

科学人文

(美) F. J. 戴森 著

李笃中 译

全方位的无限

生命为什么如此复杂



谨以此书献给我的母系黄舒兰。

她怀着对海外长孙的刻骨思念，于一九六一年含泪长眠。

她终生谦恭仁爱，

默默的忍受着命运的驱使。

大灭绝 找一个消失的年代

第一章 学海疑云

我在八年抗战的烟硝中度过了少年时代。其对，我正客居于陪都重庆。各种伦理教育纷至沓来，矛盾百出，令人无所适从。家里是慈母的训诲；她崇尚孔孟之道，劝我一心向善，待人仁义为先，同时夹杂着道家听天由命、克己为人的思想。学校里是师长的教导；他们的教育中掺着强烈的爱国主义。每日清晨，学生都要排队作操半小时锻炼身体；余下的时间是聆听师训，告诫我们要刻苦磨炼意志，以便在为生存而进行的斗争中成为强者。理由很简单，现实世界，到处是优胜劣汰。忍受不能赋予我们力量（尽管母亲倡导这种人生哲学），只有仇恨才能使我们由弱变强。

几乎与此同时，在战线的另一方，德国青年正在接受戈培尔的说教，并加入希特勒的“青年团”汲取纳粹思想。按照这些教师的逻辑，芸芸众生中只能有一方获胜。岁月如梭，物是人非。如今我们都和平共处，彼此成为同事、邻居或朋友，显然与戈培尔的预言背道而驰。当然，我的母亲地下有知，是会感到欣慰的。

尽管我们有幸成为这场残酷战争的幸存者，但却又都是一种冷酷社会思潮的牺牲品。这种思潮断言：人与人之间，国与国之间，人种与人种之间的竞争，都属于生命的自然现象；优胜者压迫弱小者是天经地义的。一百多年来，这种思潮被奉为科学的自然规律，风靡全球。它就是主要由达尔文提出的进化论。达尔文在 1859 年出版的《物种起源》一书中所提出的天择思想，就是这种进化观的完整表述。

时光荏苒。从抗战到现在，已经整整 40 年过去了。根据战时和战后发生的一切，展望未来可能发生的灾难性变故，我不禁要问，这场残酷的斗争究竟证明了什么？生者、死者，究竟谁是适者呢？作为一个科学家，我以为应当三思，冷静的思考这种为害不浅的观念究竟有多少科学可信度。

恐龙化石出土

达尔文是一位研究生命史的地质学家和博物学家。只要稍微研究一下地球上的生命史，就会发现一个矛盾的现象：地球上现存的物种虽然数以百万计，但是曾经在地球上生活过的物种却几乎都灭绝了。因为在五亿多年的历史长河中，虽然某一时代的物种总数变化不大，但物种的平均寿命是短暂的，就像人类历史中个人的生命十分短暂一样。现在还活着的种，大约只占地球上曾经有过的各种生物的百分之一。

从这一基本事实出发，任何一种生物演化理论，不仅要解释物种的新生，而且必须解释物种的灭亡。对达尔文来说，生物灭绝的机制与生命产生的机制毫无二致。每种生物个体都在某些方面有别于其他生物，而其独一无二的特征是可以遗传的。在如此难以胜数的生物个体中，自然界进行着独具

创意的选择，只有那些机能的特征最能适应其生活方式的种属，才能幸存下来并不断繁衍，将优秀的品质传给后代。反之，不适应者只有灭亡一途，其弱点亦将从种群中消失。当某种变化中的种群因为某种原因与主体的演化趋势隔绝，而无缘发生混种时，就会变成一个迥然不同的新种。尔后遇到有亲缘关系的种属时，其中的一种将在生存斗争中获胜，无情的扑灭竞争对手。达尔文如此解释他的适者生存的自然规律，他写道：

我想，生物界将无可避免的遵循这一规律：在时间的长河中，新的物种通过天择应运而生；而另一些物种则日趋减少，乃至灭绝。起源相近的生命形式，同一种群的各种变体，同一属或相关属的物种，都具有近乎相同的结构、素质和习性，通常会陷入最激烈的竞争之中。结果造成每一个变种在演化进程中，势必对最接近的宗族施加最大的压力，但求置之于死地。

我们这一代人都很熟悉恐龙和其他古代生物，但生物灭绝事件听来仍相当古怪，在达尔文时代就更不用说了。早在远古时期，人类就认识了化石，尤其是介壳化石；虽然与现代种属迥然不同，但它们也可能仅仅代表了生物从一个种属向另一个种属演化过程中出现的一种早期形态。从这种考虑出发，把一种早期生命形态的消失称为灭绝显然是欠妥的。就像人类从呱呱坠地成长为伟男子的过程中，把孩提时代称为生命形式的灭绝同属谬论一样。但种属灭亡是的确有的，恐龙灭种就是一个例子。

世界上最早的大型爬虫骨骼发现于 1770 年，大约比达尔文的生年还早 40 年。这种爬虫与任何活着的生物都毫无相似之处；下颚骨化石长达四英尺（一又三分之一公尺），牙齿锋利犹如短剑，最先是在荷兰的马斯特里奇（Maas-tricht）村圣彼得山上一个采石场的白垩层中发现的。这一发现使人大吃一惊，于是村民将一对父子解剖学家请去鉴定。鉴于骨骼奇大，又恰恰夹在两个富含海相化石的地层之间，父亲便声称这是一条古鲸的化石。但是儿子却另有高见。可能是因为研习解剖学更精或观察事物更为敏锐之故吧，他认为这种生物更像蜥蜴。但是，有谁见过如此庞大的蜥蜴，又有哪一种蜥蜴能在大海中途游呢？似乎只有把这种怪兽解释成圣经所载洪水事件之前的生物，而且可能就是那次洪水的祭品。

发现怪兽化石的采石场之上是一片牧场，场主是一位教士。他运用本身的封建权力攫取了这一发现，把遗骨安放在乡间别墅的一个玻璃神龛里。于是，发现洪荒巨龙的消息不胫而走，很快传到了名噪一时的解剖学家居维叶（Georges Cuvier）的耳中。当时，拿破仑一世是居维叶的积极支持者，曾助他从事化石采集。拿破仑获悉怪兽化石的新闻后，立即命令他的将军率师“解放”荷兰，以便将那块宝贵的化石完整无损的抢回法国。那年是 1795 年。这支队伍长驱直入，直达马斯特里奇村，占领了那间乡间别墅，但玻璃神龛里竟然空空如也。那块化石已经不翼而飞了。

将军灵机一动，决定悬赏追寻，赏格是葡萄美酒 600 瓶。重赏之下，必有勇夫，一批长于打家劫舍的大兵终于得到了这笔重赏，于是这一战战利品也

就安全的运到巴黎市居维叶的办公桌上。

其时，居维叶风华正茂，年仅 26 岁，刚刚完成乳状牙象（mastodon 另一译名为乳齿象）骨的研究。他认为，乳状牙象并非现代象的祖先，而是一种在历史上早已消失、而且没有后代的古象。他开始竭力说服他的同代人，要他们相信历史上确曾存在过这种生物灭绝现象，而马斯特里奇巨兽就是他所需要的证据。虽然这种名叫沧龙（Mosasaurus）的动物看上去与热带的陆生动物极为相似，而且也曾被称作蜥蜴，其实却是一种比普通蜥蜴大许多倍的海相爬虫类。

这一轰动一时的事件平息之后不久，又于 1822 年首次发现恐龙化石。当时达尔文还只有 13 岁。这批恐龙化石只不过是一堆碎片，其中包括一块股骨和一些硕大的牙齿，由英国南部的化石采集家孟特尔夫夫人（Mrs. Gideon Mantell）挖采出来。她认为这些化石是一种爬虫的遗骸，而当时人们熟悉的爬虫都是牙齿锐利的食肉动物。然而孟特尔夫夫人发现的牙齿冠部已经磨平，应属食草动物。

人们又去请教居维叶，居维叶证实这些确是食草爬虫的牙齿。后来，孟特尔夫先生在伦敦皇家外科医学院的汉特林博物馆（Hunterian）中见到了鬣蜥骨骸。除了大小的差异之外，那枚恐龙牙齿与鬣蜥的极为相似，因此他将它定名为禽龙（Iguanodon，鬣蜥牙），并于 1825 年正式公布了这一发现及其新名称。

以活鬣蜥的牙齿大小为标尺，牛津大学教授欧文（Richard Owen）作出了令人大吃一惊的推论：禽龙的身躯应在 30 至 60 公尺之间，算来竟有半个足球场那么长。于是，孟特尔夫先生和其他业余研究家又继续发掘，在 15 年的时间里，先后发现了肋骨、脊椎骨和其他许多骨头。这些骨头的大小迫使欧文不得不修改原来的推论，于是禽龙的身长降到了七公尺。化石还显示这种古龙要比现代的巨蜥大得多，也重得多。其胸骨的结构与鳄鱼相似，心脏有四个心室，比其他爬虫类只有三个心室的心脏进步。欧文指出，该动物的心脏和循环系统已与温血脊椎动物相差不远了。

欧文把这种动物命名为恐龙（Dinosauria），意即“可怕的巨蜥”。英国的维多利亚女王为此特地找到一位野生动物雕塑家，要他根据欧文的描述为 1851 年的博览会雕塑一尊巨蜥的塑像。于是禽龙就以一种硕大而笨重的四足兽形象，虎视眈眈的呈现在来访的权贵面前，其中包括女王和她的丈夫。

当时，美国未来的地质调查所所长海顿（Ferdinand Hayden），正在蒙大拿州裘迪斯（Judith）河附近的西部荒原采集恐龙牙齿。标本送到费城的美国自然科学院，由院长雷迪（Joseph Leidy）加以研究，发现这些牙齿属于另外的恐龙属。雷迪将其中的一种食草恐龙命名为 Trachodon（意谓粗糙的牙齿），而将另一种食肉恐龙命名为 Deinodon（意谓吓人的牙齿）。

事后方知，这些牙齿其实只是一些不足挂齿的诱饵，真正的室藏还埋在

地下。不久，雷迪就在新泽西州的哈东菲尔德（Haddonfield）发现了一副几乎完整无缺的恐龙骨骼，并命名为鸭嘴龙（Hadrosaurus）。所发现的牙齿、下颚骨、脊椎骨，以及肱骨、桡骨和四肢的尺骨，都属同一个体。将鸭嘴龙的牙齿与禽龙的牙齿比较之后发现，尽管前者的骨骼与雕塑家根据欧文的描述重塑的形象几无相近之处，但这二种绝种恐龙之间的确有着密切的亲缘关系。鸭嘴龙和禽龙的前后肢相差极为悬殊。因此雷迪认为它们根本就不是四足兽，而是一种后肢能够站立，可以像袋鼠那样跳跃行走的动物。

奇形怪状的兽骨

恐龙的挖掘工作终于风靡一时。在其后的数十年中，由商界巨子组织的采集队相互争夺，日趋激烈，力求要满足后台老板的好奇心，于是出现了一批扑朔迷离的兽骨。他们把这些真假莫辨的战利品集中起来，进贡给统治者；然后在皇家或国立博物馆中陈列，博取目瞪口呆群众的赞誉。

有些骨架的确大得惊人。雷龙（Brontosaurus）和腕龙（Brachiosaurus）体重达 55 吨，等于八只大象加起来那么重。有人认为，这样的庞然大物无法在陆地上生存，于是设想那是一些在沼泽中生活的动物。它们用细长的脖子采食水草，或者浸泡在水中并以头顶上的鼻孔呼吸。在食肉动物中，最大的要数霸王龙（Tyrannosaurus rex）。它是有史以来最大的食肉动物，牙齿与鹤嘴锄一般大。将它的骨架树立起来，沉重的尾巴拖在地上，常人身高仅及其膝部。观者无不为之瞠目结舌。

有时恐龙具有独特的躯体外部饰物或武器。有的身披重甲；角龙的脖子上长满了大片的饰骨；剑龙的背脊和尾部长满钉刺；鸭嘴龙有奇怪的头冠；禽龙长着特殊的指甲，可以用来对付刀枪不入的食肉动物，挖出它们的眼睛。

在化石争夺战中，人们又发现了一种牙齿很小的动物。翅膀像爪子，有着长长的羽毛，外形很像希腊神话中的格里芬（一种鹫头狮身的怪兽）。由于被认为是最原始的鸟类，因此称为始祖鸟。人们结合沉积物的特征研究生物习性，发现爬虫类——并非单指恐龙——真像神话故事中的动物一样奇妙。薄片龙（Elasmosaurus）是一种海龙。正是对这种怪物的遐想，才激发了尼斯湖水怪（Loch Ness Monster）的传说。翼龙则是一种长着翅膀的爬虫类，有的只有乌鸦般大小，甚至还要小一些；也有的像苍鹰那么大。有一种可以飞在海上的翼龙，其翅膀竟长达 15 公尺，可能已达飞行动物的最大极限。显然，翼龙的翅膀太重也太脆弱，并不宜于飞行。因此有人认为翼龙是一种滑行动物，只能以树顶或悬崖为中介进行滑翔。

生存竞争

按照达尔文的意见，这些横行在 6500 万年以前的怪兽之所以灭绝，是因为它们失却了生存竞争的能力。动物生存竞争的竞技场就是自然界，达尔文把它比作一个“由成万个楔子紧密排列而成的弹性面，受着连续不断的敲击。有时敲到这个，有时打着那个”。每一个楔子好比一个生物种或变种，而每一次敲击就是天择的驱动力。由于每一个楔子可以往里挤的空间是有限的，所以要打进去一个就非挤出一个不可。因此，一个适应能力较强的物种想必会排斥适应能力较弱的物种。二次大战时，瑞士边界难民云集，人满为患，瑞士人封闭边界的藉口是“船已满载”。从达尔文的观念看来，生物界的生存竞争也十分类似。

达尔文的种数空间有限论，源于马尔萨斯的人口增长空间有限论。在他的自传里，达尔文写道：

1838 年 10 月，正是我开始进行有系统的研究后的第十五个月。偶然读到马尔萨斯的《人口论》。当时，我的脑海中已经孕育了生存斗争的思想。根据对动植物生活习性长期不断的观察，我发现这种斗争无处不在。马尔萨斯的著作立即吸引了我。在有限的空间里，只有适者才得以存续，而不适者势必遭到毁灭。结果形成新种。于是，我终于找到了一种继续工作的理论基础。

20 年后，达尔文才出版这一思想。他之所以采取行动，是因为一位名叫华莱士 (Alfred Wallace) 的年轻人也产生了同样的想法。真是无巧不成书：在达尔文“出于好奇”而拜读马尔萨斯的著作 20 年之后，在地球的另一方，靠近新几内亚的一个岛屿上，华莱士也是受马尔萨斯人口论的启发，得出了与达尔文相同的想法：

其时(1858 年 2 月)，我身患疟疾，蜗居在摩鹿加 (Moluccas) 岛上的特尔纳特村 (Ternate)，每天都有几个小时忍受着忽冷忽热的煎熬。病中浮想连篇，物种起源问题总是萦回脑际。一日，忽又想起了马尔萨斯的《人口论》(十年前我曾读过此书)及其所谓的“有效控制机制”——战争、疾病、饥荒、突发事件等等，这些机制可以控制野蛮民族的人口至近乎稳定。于是联想到，这种控制当然也适用于动物，使其数量不致无限增长。但对这些控制作用如何影响物种，我只有一些非常模糊的看法。忽然间，适者生存的思想闪过我的脑海。总体而言，这些控制作用将使较劣者消亡。我想到，动植物的每个新世代都存在这种变化，而与此同时，气候、食物和天敌的变化也在不断进行，物种的变化过程终于在我的脑海里清晰起来。于是，我在发病的两小时内悟出了这一理论的要点。

马尔萨斯的《人口论》首版印行于 1798 年。当时，正值工业革命。二百年后的今天，这本书仍然是许多社会学科的必读课程。中国的经历可以用来说明这一学说的基本原理。在近一个世纪的内外战争中，中国的人口一直保持稳定。1949 年内忧外患宣告结束之后的三十年，中国人口增加了一倍，从五亿增到了十亿。按照这一增长速率，中国的人口到 2110 年将达到 20 亿，2140 年达到 40 亿，2410 年达到 1 兆。到那时，中国人就真的身无立锥之地了。然而按照马尔萨斯的理论，这种毛骨惊然的人口预测是不可能出现的。因为人与人之间的生存竞争，可以控制人口不致连续增长。

达尔文的《物种起源》公开出版之后，批评之声蜂起。但是没有人针对他的生存竞争或适者生存的信念表示意见。批评者攻击的是，它触犯了普通的遗传理论：按照遗传理论，同一谱系中分属不同分枝的所有生物，都有一个共同的祖先，以及一个或几个有亲缘关系的物种。如果把生命树的完整面貌绘制成图，我们就会看到，树的根部只不过是一个单独的生命形态，其他都是它的后代。至于生命形态不断分枝成为新生命的机制，对于那些工业革命时期充满活力的实行家而言，似乎昭然若揭。

达尔文思想被滥用

适者生存的理论立即被奉为自然规律，因为这是一种为资本家的残酷竞争辩护的理论。卡内基 (Andrew Carnegie) 写道：“无论竞争是否已经开始，竞争的法则业已建立；谁也无法回避，也找不到可以取代它的其他法则。尽管这一法则对某些个人而言，有时是残忍的，但对种族而言却最好不过。因为它能保证适者有生存的机会。”约翰·D.洛克斐勒洋洋得意的声称：“大企业的发展不过是适者生存原理的具体表现。这是自然的法则，也是上帝的意志。”

对于这种新发现的自然规律的热情，并不仅限于资本家。意大利的社会学家菲立 (Enrico Ferri) 就利用同一法则转而反对资本主义。他指出，在阶级社会这种非自然条件下，自然选择是不起作用的。只有纠正了社会财富和特权的不平等现象之后，适者生存的原则才会运行。

当政治家为其或左或右的目的解释自然选择的时候，种族主义者并没有袖手旁观。达尔文原著的副标题“生存竞争中种族的保存”，受到了种族主义者的热烈欢迎。达尔文甚至作了这样的解释：“人种之间也有差异，就像有着密切亲缘关系的物种之间存在差异一样。”正因为如此，在《物种起源》一书出版二十年后，才会有一位名叫马歇尔 (Alfred Marshall) 的英国评论家，恬不知耻的说出了他的一些同代人想说而不敢说的话。他写道：

毫无疑问，英国种族的扩张对全世界都是有利的。（但是，）如果英国的下层阶级迅速增长，超过道德和素质都较优越的阶级，那么，不仅英格兰本土的人口素质将遭到破坏，而且美国和澳大利亚的英国后裔也不会像现在这样聪明。再者，如果英国人口的增长赶不上中国人，那个无精打采的种族将会蹂躏地球的许多地方，而本来应当是朝气蓬勃的英国人定居在这些地区的。

种族主义和优生学乃是一丘之貉。加尔顿 (Francis Galton) 创立一个应用达尔文主义的学派，声称要用“遗传理论、变异理论和自然选择原理”改善人种的适应能力。事实证明，优生学与灭种屠杀相去不远。

就历史渊源而论，纳粹提倡的种族灭绝可以追溯到哈克尔 (Ernst Haeckel)。他是一位生物学家和哲学家，也是达尔文主义在德国的传播人，竭力为德国的种族主义寻找科学依据。哈克尔最著名的主张就是：个体发生

学再演了系统发生学。他以为已经找到足够的证据，证明个体发生学，即动物个体从胚胎发育为成年个体的过程，重演了系统发生学，亦即物种从比较原始的形式发育为较高级形式的过程。例如，婴儿的鼻子扁平，通体无毛，代表了人类进化的原始阶段。这一阶段的典型代表，就是“低级”的蒙古（亚洲）人种。而一个高加索种（白种）幼儿的成长，重演了最终成为典型欧洲高级种族的演化过程。哈克尔主义者认为低能儿童染患唐氏症候群的特征，也代表了一种退化到更为原始演化阶段的现象，因此他们称之为“蒙古症”。过去的生物系学生都在课堂上学过他这一套理论。

哈克尔对所谓“野蛮人”也不乏讥评。他坚持，野蛮人的头骨与尼安德达人（*Homo sapiens neanderthalensis*）极为相似，“像歌德、康德、拉马克或达尔文这类人与野蛮人在智力上的差别，远大于野蛮人与类人猿的差别”。而犹太人，尤其是俄国的犹太人，属于“肮脏而笨拙的”人种，哈克尔认为简直不应列入人类。

哈克尔坚信种族主义的真实性和正确性，并在此基础上形成了他的一元论哲学思想。一元论的前提是所谓日耳曼“种族”的优越性，夸言这一前提已由他们与劣等民族的斗争中所表现出来的强大力量所证实。希特勒拣起一元论的衣钵，不遗余力的推行消灭那些“劣等民族”的策略。

其他一些地方的社会达尔文主义者所受的一元论教育，比起纳粹德国或今日西方世界的新法西斯分子来，甚至有过之而无不及。

诚然，达尔文不应为那些用他的名义所犯下的历史罪恶负责。用萧伯纳的俏皮话来说，达尔文不过是“巧遇别有用心者”而已。达尔文在临终前已经认识到，他的思想被人滥用了。在《物种起源》一书出版以后，达尔文在给一位同事的信中，曾经语带幽默地说：“我偶尔在曼彻斯特的报纸上读到一篇讽刺短文，文中说我已经证明强权即公理。因此，拿破仑是公理，骗子也是公理。”

科学的本质

尽管如此，每一个人、每一个科学家还是应当问一句：“适者生存说”是否真是一种自然法则？或者进而问一句：这究竟能否称得上科学？

公认检验思想究竟是科学或者纯属空想的办法，就是科学理论必须能接受反证。在一般情况下，应能设计出一种实验、研究计划或观察方案。如果实验或观察结果与某一理论的预测不一致，那么这种理论就应当是错误的。

1982年，阿肯色州的一次庭讯中，曾经成功地应用过这种检验方法。法官奥佛顿（William Overton）最后裁决，“原创论”（creation science）是伪科学。这场官司是1981年，阿肯色州实施“公平待遇法案”，允许学校教授物种起源的原创理论，教学时数与达尔文主义相等；如此持续了一年有余。原创论教导学生：“圣经是上帝圣言的纪录。我们坚信圣经的字里行

间都透着上帝的意志，因此原稿所有的结论，无论从历史的或科学的角度来说都是正确的。对于学自然科学的学生而言，这意味着圣经创世纪对于物种起源的解释，是一种对简单历史真理实事求是的陈述。”

根据宪法规定的政教分离原则，美国公民自由联盟决定向法庭起诉。奥佛顿法官必须判定原创论是否科学，抑或只是一种宗教。

令人啼笑皆非的是，原创论的形象遭到了辩护人的糟蹋。一位支持者振振有辞地申言：“谁也无法设计一种科学实验来描述创生过程，甚至无法断言这一过程是否能够发生。”另一位支持者更是妙不可言，声称：“我们谁也无法通过科学研究发现造物主创造生命的任何过程。”那是因为，另一位卫道者补充道，“当代宇宙中并不存在造物主的创生作用。”

原创论者声言无法证明他们的理论不是假的，恰恰是搬石头砸自己的脚。奥佛顿法官除了宣布原创论并非科学之外，别无选择。但是那一次裁决中，并未提出达尔文的天择理论是否为科学的问题。能否证明进化论是错误的呢？

科学哲学家波琅（Karl Popper）的检验法驳倒了原创论，但他却不认为适用于进化论。他指出，达尔文主义是解释一种历史过程——地球生命史——的尝试。因为历史是无法重演的（例如，我们无法设计一种检验方法来了解罗马王朝垮台的理论原因），所以波珀觉得，试图判别历史真伪的一切努力，都不过是一种判断或信念而已。

但是，确实可以也已经有人用一些检验方法来判定达尔文理论可能有误。其中成功的检验方法是共同祖先假说。

对一种理论最强有力的检验是它的预见性。波珀坚持，一种理论如果只能解释已知的事实，那么充其量也只不过是一种历史解释而已。波珀无疑是正确的。但什么是科学呢？大多数科学家都认为，一种能够预测尚未观察到现象的理论也是科学。这样的科学理论可以反证。如果预测的事情不可能发生，或者根本不存在，或者结果与理论的预测并不一致，那么这种理论的错误也可以改正。反之，证实预言的新发现若是持续增加，这一理论也就愈益逼近真理。

共同祖先

从这一个看法，共同祖先现象是科学理论。达尔文设想，人类和猿猴是由一个共同的祖先遗传下来的，这一观点曾使他的许多同代人怒不可遏。当达尔文于 1833 年首次草草写下他的遗传思想时，还没有发现任何与智人（Homo sapiens，即现代人）不同的骨骼。因此他的理论即使不致使人膛目结舌，至少也像神话故事一样离奇。达尔文预言，如果发现此类化石，它们一定会介于猿猴和人类之间。第一个“遗失的环节”发现于达尔文的理论正式发表前两年，即 1857 年。新发现的智人亚种尼安德特人看上去确实有点

像猿猴。当其头骨和部分骨骼首次在波昂的一次德国科学会议上展出时，有人怀疑并不属于真正的人类，也有人认为不过是一种反常现象。然而，地质学家莱伊尔（Charles Lyell）发现，“新观察到的猿人骨骼与正常标准人类结构的差别，并不是一种偶然的或随机的畸形。如果变异法则正合乎进化论者（如达尔文）的要求，那么这种差别是意料中事。”

如果把“实验”一词定义为检验某种假说的过程，那么为了验证某种预测而进行的项目或探索就是一种实验。从发现尼安德特人至今，在欧、美、亚各洲都作了许多对人类和前人类化石的研究，其结果都相当引人注意。目前最原始的人科化石“露西”（Lucy）的发现也不例外。总之，达尔文的预言已经充分被证实了；因为从解剖学的角度而言，每发现一个较老的化石，都愈来愈接近于猿猴。露西代表一种小型的人类，学名称为 *Australopithecus afarensis*（南方古猿），生存于 300 万年前，已能像现代人一样直立行走，但其头骨极易被误认为黑猩猩的头骨。

这些验证工作的方法与达尔文时代并无二致，都透过骨骼的比较进行。但最近几十年来，已可利用更精密的技术来检验共同祖先的遗传理论。进化透过脱氧核糖核酸（DNA）的变化，而脱氧核糖核酸又显示了不同种之间在生物化学和形态学方面的区别。组织比较是医师检查捐器官者的血液是否适合病人的一种方法，同时也是一种测度种之间区别的方法。两个种的亲缘关系愈密切，细胞的免疫结构就愈相似。分子生物学不仅可以用来估计种间的相关程度，而且可以用来测度两个种从共同祖先开始分化究竟经历了多久。

免疫分析和分子分析，已经厘清了人类、类人猿和猴子三者之间的关系。黑猩猩是人类的近亲；这两个种从 700 万年以前的共同祖先开始分道扬镳。大猩猩开始从共同祖先分化出去的时间，还要往前推 200 万年。其他类人猿在时间和亲缘关系上与人类相距更远，更不要说猴子了。

根据达尔文的共同祖先理论，可以推断出一个同样的模式，而且已经在大量生命形式的无数次研究中得到了证实。根据比较解剖学，发现一种两亿年前可能属于温血爬虫类的两足动物，是恐龙和鸟类的共同祖先。爬虫类和哺乳类之间，则有一种类似于哺乳类的爬虫类兽孔类（therapsids）作为联系的纽带。25000 万年前，兽孔类曾主宰地球。

种群之间的联系可以追溯到遥远的远古时代，最后都归结到细菌。细菌是人类迄今所知最老的化石，已在三十多亿年的古老化石中发现细菌的显微残骸。曾经存在过的所有生命都源于同一种原始生命形式的推想，在 DNA 中得到了最戏剧性的证实。用化学语言来说，各种生物的生命过程都是一样的。

达尔文对基因或 DNA 还一无所知，所以他的想法十分不同凡响。直到克里克（Crick）和华森（Watson）在 50 年代破解了 DNA 分子的共同语言，重新发现了 19 世纪后期孟德尔（Gregor Mendel）关于基因的研究之后，达尔文在百余年前提出的生命皆有共同祖先的预言，才得到了令人信服的证

实。

验证天择说

那么，进化论的天择说是否也已得到了明确的证实呢？在某些方面看，是的。选择意味着从多个候选者中挑出一个。从个体之间的遗传构成来说，其基本的遗传组成是有变异性的。证实生物具有共同的祖先，也就证明了每一个生物个体都是独一无二的。

天择也意味着适应性。生物只有在本身的基因组合能最适应所处环境的生活方式（生物学家称之为小生境）时，才能有幸把它的基因传给后代。如果知道某种动物的小生境，我们就能预测该物种所能继承的特性。例如，一种易遭别种动物捕食的鸟类，若是雌雄鸟共同负责哺育幼鸟，它们的羽毛一定都不出色，静止不动时可完全隐藏在周遭环境中，天敌不易辨认出来。在进行孵蛋这类危险工作时，它们往往如此。至于那些羽毛鲜丽的鸟儿，因为在产卵和育雏的季节里更易遭到攻击，所以产雏较少。因此漂亮的鸟儿若非天敌甚少，便只有雄鸟色泽艳丽，而雌鸟不负责育雏。田野调查已经不止一次证实这种对鸟类和其他生物预测。

漏洞百出

如果天择是进化的驱力，那么适应性就应当反应出环境变化。英国的胡椒蛾能够改变翅膀的色素基因，是适应环境变化的最著名实例。若干年前，大多数胡椒蛾的翅膀是灰白色的，主要模拟树皮的颜色，只有极少数个体为暗色翅膀。由于暗色翅膀与树皮的颜色相差甚远，易为它的天敌食蛾鸟类发现，故暗翅胡椒蛾数量极少。然而自从工厂烟灰的污染使树皮的颜色变成暗色后，浅色与暗色蛾子的数量也发生了变化。现在，几乎所有的胡椒蛾都变成了暗翅蛾，偶然可见极少数白翅的蛾子，但都已注定成为鸟类的盘中餐了。每一个人都可以举出这样的实例，而且不胜枚举。它们似乎相当接近天择论的预言：适者生存。

但是，它们能否成为新种呢？达尔文明了，在一个类似于胡椒蛾之类的种群中，适应能力的变化并不等于物种的形成。因为种属的特性只不过随着时间的变迁而对环境发生了相应的变化而已。形成新的物种，例如大猩猩与人科从某一共同的祖先分化成两个新的物种，是有条件的。由于某种原因，一些个体可以发生不致影响该群体生存的非关键性变异。如果这些个体与其群体隔离，并独立地传宗接代，就可以演化成为新种。而且在新的环境中，这些变异都可能成为影响其生存的决定性因素。达尔文在加拉帕戈斯群岛上看到了物种形成的实例。该群岛的每一个岛屿之间，都有广阔的水体分隔；每一个岛屿的栖息条件都不尽相同。来自大陆种群的“难民”，诸如风暴带

来的幸存者，被孤立在新的环境中传宗接代。无论它们带有哪种有用的基因，又无论以后发生了哪些基因的有利变化，都必须有助于新环境的变迁所引起的适应性选择。加拉帕戈斯群岛栖息着许多种达尔文鸣鸟，每一种都适应于它的小生境，而且都是从同一个大陆种属演变而来的。

从物种形成的初步研究成果发表之后，又确定了一些隔离繁殖的机制。其中最重要的可能就是所谓“性”选择了。雌性动物并非雄尽可夫，而往往会拒绝与某些雄性个体共同传宗接代。然而，这类物种形成机制的论证也引起了新的问题。达尔文和华莱士受到马尔萨斯思潮的影响，都从人口爆炸方面，发展到了物种的形成速度。生物过量繁育后代，若没有死亡速率的制约，其数量势将持续增长，但只有在特殊条件下，新物种才可能形成。在形成物种的机会较多的地方，例如亚马逊河流域的热带雨林，每种新的生物都要创造一种新的小生境。但是这种适应性的“楔子”似乎并不排斥它的同类，还在不断的以备种方式继续瓜分环境的资源总量，与达尔文的预言相反。

资本主义经济的情况与之类似。卡内基和洛克斐勒曾认为这种经济制度充分地反映了生存竞争中适者生存的规律，其实汽车工业的发展不仅创造了它自身在经济中的小生境，而且也为橡胶工业、钢铁工业和石油工业的发展创造了小生境。生物界又何尝不是如此？一个种群内新物种的形成，也为另一个种群中新物种的形成创造了条件——新植物的发展取决于食草动物新的适应性，而新食草动物的繁衍又取决于食肉动物新的适应性。共生演化现象，例如一种新的飞虫为一种新的花木传播花粉，是极为常见的。反之，像是两种飞虫为了争夺一种花卉的花蜜而争斗，或者两种花卉为了争夺同一种花粉传播者而互不相容的竞争，却是极为罕见的。而且，这种生物个体卷入的斗争，实际上是与整个自然界的斗争。那些英国飞蛾相互之间并无争斗，它们的适应能力只与树皮的颜色和鸟的眼力相关。

根据这些研究成果，许多科学家认为：达尔文天择理论的核心缺乏根据。演化的动力可能是自然选择，但是选择者并非竞争对手，新种的诞生也绝不是对老物种的死亡宣判。

灭绝现象不简单

这样看来，灭绝现象没有达尔文想的那么简单。以恐龙为例，如果达尔文关于生物为小生境而竞争的设想是正确的，那么，物种形成的速率将如他所料，与物种的灭绝达到完全的平衡。但是恐龙却在短时间内突然消失了；迄今为止，从未在比马斯特里奇白坐新的地层中发现过恐龙化石。是哺乳动物杀死了恐龙吗？几乎没有人真的这样想过。当时的哺乳动物都很小，它们的小生境与霸王龙或角龙之类并不相扰，当然也无力击败那些庞然大物。

所以我们该探究的是生物与其环境之间的相互作用，而不是生存竞争。根据化石纪录和动物的选择性繁殖，达尔文深知生物的演化是非常缓慢的。

生物个体在生命期限内不能发生大的变化。比如说，一种生物无法因为气候日趋干旱而变成骆驼，只有在经历了许多代的干旱之后，生物才能忍受缺水的环境生存下来，或者形成某种防止失水的功能，并比无法办到的物种拥有某种繁殖的优势。在这一过程中，无疑会有某些生物个体灭绝。因为即使是现实环境中连续发生的缓慢变化，对生物的适应能力而言，也太迅速了。

但是，依事实看来，地质纪录也反映出两种相当不同的演化速率。有一段时间是平静时期；在这一段时间内，大多数物种保持不变，演化形成的新物种与灭绝的物种数量大致达到平衡。但是也有一些时期，物种形成速度极快，或者生物的灭绝更快。这些事件并不是同时发生的。首先，历史上存在着诸如恐龙灭绝那样的大规模生物灭绝事件，然后是一个间歇期。这时期生物按照马尔萨斯的说法，像兔子一样成倍地增长。然后分化形成新的物种。有时演化速度之快，谓之“爆炸”实非夸大其词。

如果我们注意到环境可能与上述生物演化形式有关的变化，那么就会发现一种显而易见的有趣联系。快速的环境变化，必将加速生物灭绝的速率，使后者超过物种的形成速度。因为任何生物通过演化而适应环境变化的速度有限。在这种情况下，旧种属的灭绝与新种属形成所引起的竞争风马牛不相及。只说明生物不能适应自然环境的变化。达尔文却反过来强调生物之间的相互作用，这显然是错误的。

有鉴于此，环境变化速率理应处于生物灭绝公式的核心地位。环境变化速率愈快，生物灭绝的速率也愈快。沿着这线索思考，近一个世纪来，古物学家四处挖掘所发现的奇珍异兽大规模灭绝，很可能是由环境的剧烈变化引起的。如果有一种灾变能够证明对这种或那种生物灭绝现象的解释是正确的，那么达尔文的“规律”就从根本上发生了动摇。如果我们不能透过鉴定古生物遗骸和现代物种的研究，预言何种生物将幸存，何种生物将灭绝，那么适者生存又有什么意义呢？

预测结果是对适者生存说的最后检验。我们或许可以说，适应能力是判断幸存者的标准，定义适应能力为生物个体适应小生境的程度。从这个看法，我们甚至可以预言哪一种农作物具备从一场为时短暂的旱灾中幸存下来的能力。但是如果环境发生灾难性变化，我们能不能预言哪一种具备最快的适应能力？即使我们能够猜度未来灾变的情况，又能否预言即将产生的小生境情况呢？现在没有食草蛇类的小生境，因为根本不存在食草的蛇类。如果假设有一场灾变使啮齿动物和昆虫急剧减少，我们根据蛇的适应能力，仍难以预言它们能否靠藻类生存下去，也无法预言经过几代的演化，它们能否有机会创造出一种小生境而不致灭绝。

由此可见，适者生存律可能并没有意义。因为它根据幸存者来定义适应能力，而没有独立的标准作为预言的基础。为一种那么邪恶的学说提供“科学”基础的所谓“自然律”，可能也是伪证。如果大多数物种的灭绝是由灾变引起的，那么决定生物生死存亡的将是机遇而不是优越性。诚然，控制生

物演化全部过程的是机遇，而非从劣等种族向优等种族的缓慢长征。可是达尔文的这种演化思想，在维多利亚时代是有口皆碑的，而且已经深深地根植在西方人的思想里。

科学家的体认

我不禁又想起了孩提时代遇到的矛盾。到我撰写本书时为止，我的生活可以分成属于三个国度的三等分。我在中国度过最初的 19 年；随后的 19 年在美国学习和工作；最近的 19 年住在瑞士。这三个国家各有其喜好的游戏。我认为，这些游戏可能反映了民族的性格或智慧。

中国人喜欢打麻将。这是一种适应能力的比赛。太过刚愎自用的人，不愿向必然规律低头，却往往会毁掉自己，痛失良机。而有的人却福至心灵，屡屡取胜。按照中国人的说法，福无双至，祸不单行。它可以适用到每个人的头上。这与道教或者佛教的哲学一致。他们重视每一种生命形式或生活方式的价值，每一个人都可以由从天而降的机遇中受益。

美国人爱玩扑克。这是一种实力的比赛。人们可以靠虚张声势赢牌，但必须有足够的筹码。比赛的结果是强者为胜，这是美国方式。我在学生时代开始学习玩扑克，当时美国人对本身优越性的信念正受到严峻的考验。以达尔文的个体竞争和身价不同“种族”之间的竞争为主体的西方哲学受到了围攻，但是对实力的信仰和对扑克的热爱都丝毫未受损害。

瑞士的国粹游戏叫做 Jass。我永远不会忘记我们在 1968 年 8 月 23 日所玩的一次 Jass。其时苏军正在向布拉格推进。一位瑞士的 Jass 能手与我为一方，我的妻子与一位美国人为另一方，后两者都是初出茅庐的新手。我们整晚都在旅馆里玩 Jass，窗外呼啸着枪声。也许是福至心灵吧，两位新手大获全胜。Jass 是一种赌运气的游戏，其胜负无法根据赛者技巧预卜。有人说，成为瑞士人是幸运的，但我却不以为然。我只能说，如果某人是瑞士人，但愿他是幸运的。因为除非他碰巧出身有社会地位的家庭，否则几乎无缘出人头地。

由此我悟出了三条不同的成功之路：一是成功属于自己，能掌握命运并压倒竞争对手的人；二是成功就是运气，谁也无法控制；三是成功属于那些能够忍辱负重的人；无论命运如何，都能因势利导，加以利用。因此，从扑克、Jass 到麻将，成功分别取决于实力、机遇和适应能力。我常想，三个十九年来，从不同角度受到的训练，开启了我的眼界，使我有能力判断这些不同的价值观念，是否影响了我们对生命历史的观察。

我不希望断言我和我的邻居谁应在战争中幸存，也不希望预言谁的适应能力可确保他在核战中幸免于难，因此也不想对这三个国家的哲学妄论短长。相反的，作为科学家，我相信科学理论需要依据科学的资料及方法判断，我判断的结果发现天择说绝非科学，只不过是一种社会偏见，而且是非常邪

恶的偏见。它已经严重地干扰了人类清醒地领悟生命历史的能力，也影响了人们耐心相处的能力。

本书将探讨研究最详的陆地灾变事件，和地质历史上生物大规模灭绝事件的证据，以便找出人类科学大厦中的那些不坚固的基石。我选择了一种历史分析的方法，着重于追踪地质学家、古生物学家和物理学家的发现，探求这些发现对生物进化思潮的冲击。究竟是生存条件的争夺决定了恐龙的命运，还是来自外部的事件造成的环境变化引起了恐龙的灭绝？如果是灾变切断了有些生物连续演化的线索，其他生物为何能够幸存？我们可不可以说幸存者是适者呢？或者说，幸存者只是幸运儿？

第二章 沧海桑田

在中国，“沧海桑田”是妇孺皆知的成语，老人常用来慨叹事过境迁、周围环境发生的巨大变化。我不知道这一成语典出何处（编注：全唐诗），但对现代地质学家来说，它却绝妙的描绘了这一学科的精髓。岁月流逝，地球业已经历了 45 亿年的悠长历史；在这 45 亿年中，山脉夷为平地，平地沉入海底，海底又上升成为陆地。桑田沧海，沧海桑田，地球就这样度过了 45 亿年。

当我离开祖国赴美攻读地质学时，发现拉马克（Chevalier de Lamarck）曾有一段名言，使我对故国的这一成语有了新的认识。拉马克写道：

在我们居住的星球上，万物都在发生不断的和无法避免的变化。这些变化遵从自然界的基本法则，而且由于变化的性质和个体在其中所处的地位不同，而多少受到变化速率的影响。然而，这些变化都是在某一个时期完成的。而对自然界来说，时间不算什么，时间成了自然的一种法力无边的手段；既可以完成微不足道的琐事，也可以完成最伟大的功绩。

拉马克是在 18 世纪末叶写下这段文字。当时，西方的时间概念正像达尔文的物种起源说一样经历着深刻的革命。它们都源于欧洲启蒙运动的最后十年。人们从化石和地层的研究中，认识到了时间的深度和历史的悠久，从而使科学得以摆脱圣经启示录的桎梏。

在那时，基督教的教条有着现代人难以想象的巨大影响力。人们对宗教万分虔诚，不过当然也有人出于对迫害的恐惧。正是出于这种影响和虔诚，所以对《创世纪》中所描述的地球历史深信不疑。曾经有近百年之久，基督教世界认为地球历史是从纪元前 4004 年 10 月 26 日上午九时开始的。经过亚当和夏娃之后代的苦心计算，据说挪亚洪水发生于纪元前 2349 年 11 月 18 日。对于大多数坚信地球历史只有六千年的同代人来说，拉马克关于时间“是一种法力无边的手段”的说法，简直不可思议。

拉马克爵士在植物学的研究方面硕果累累，并因此闻名于世。1793 年，法国国民大会任命他为动物学、昆虫学、蠕虫动物和微体动物学教授。两年后，一位醉心于岩石鉴定而无暇诊病的苏格兰医生赫顿（James Hutton），经过对爱丁堡（Edinburgh）附近岩石露头的多年观察，发表语惊四座的宏论，为拉马克的思想提供了佐证。他发现古老岩石的侵蚀作用和新岩石的形成作用无休无止的重复着，“既无始点，亦无终点”。“在向时间的深度凝视时”，大有头晕目眩之感。

要领会地质时间确非易事。人们总是习惯于根据自己的经历来估计时间的长短。还在孩提时代，我对“从前”一词就有一种朦胧的困惑。

什么是“从前”？

我幼年入学甚早。双亲都希望我能与长两岁的姊姊同班读书，但当时我尚未准备成熟。我对老师讲述的故事，尤其是满清入侵华南的故事，感到十分恐惧。当年我的故乡扬州的人民进行了殊死的抵抗，然而野蛮的侵略者还是破城而入，烧杀抢掠达十日之久，全城居民几乎全遭劫难。在一次文艺活动中，学生表演了这一惨剧。我们姊弟两人没有看到这出戏的结局：正当舞台上出现“从前”的满洲兵占领淮阴城的场景时，我们的车夫却闯进剧场来接我们回家。那时父亲正在淮阴谋生。我的心中充满恐惧，急急跑到母亲身边。虽然不敢透露对父亲可能被杀的焦虑，还是乞求母亲代我写了一封信：

亲爱的爸爸：

你好！阖家皆安。前几天连日阴雨，房顶漏水。你遇见清兵了吗？

儿 靖华上

一周以后，母亲收到了父亲的回信。从此以后，这个故事就常常成为母亲取笑我的笑柄。父亲接到我的信后非常高兴，但对信中提到的清兵一事感到不解，因为清兵入侵是“从前”的事。严格说来，已经是二百九十多年以前发生的事了。

灾变论出现

大多数 18 世纪科学家对地质时间的无知，并不亚于我在孩提时代对历史时间的困惑。伦敦地质学会的创办人兼首任理事长格林纳（George Bellas Greenough），在一次关于河流切割深谷的科学争论中，曾经狂怒地声言“没有一条河流能再使其河道加深一尺。时间再长，也不能使自然创造奇迹。”这位老人在泰晤士河畔生活长达半个世纪之久，从未见过河道因为侵蚀作用而加深的现象，他不懂得人类的生命在地质历史的长河中只不过是短暂的一瞬。毫无疑问，地质时间是能使自然创造奇迹的。

拉马克确实认识到了地质时间的重要性。尽管这位植物学家当时已经年近五十，对动物学了解不多，对岩石学知道更少，但是要掌握一门新的学科或者熟悉地质学中的革命，为时并不太晚。他研究巴黎大学搜集的介壳标本，发现化石标本与现代生物之间的差别。而且这些差别是有规律的，可以根据它们与现代瓣鳃活体之间的相似程度加以分类。他排出介壳的系列，根据其相关性发现它们之间的亲缘关系，并在此基础上提出了物种演化的理论，这就是进化论的前驱。根据这一理论，一个物种最终变成完全不同的另一个物种是绝对可能的；当然变化会非常缓慢。拉马克是一位赫顿主义者。他富于想象，不拘泥于圣经上的时间表，认为物种变化必定是一个漫长的演化过程。

地质学家赫顿和生物学家拉马克，都是日后所谓“渐变论”这一科学哲学的奠基人。这种科学哲学认为，包括全球规模的一切变化，从引起沧海桑田的地壳运动，到使古代介壳演变为现代贝类的生物演化，都是至今仍在不

知不觉的进行着的作用，不断累积的结果。他们认为，这种渐变性是自然科学本质的核心。诚如赫顿所指出的，“如果今天自由下落的石块明天会向上飞升，那么自然哲学也就终结了。我们的原理将会崩溃，就再也不能根据观察来研究自然法则。”

所谓“自然法则”，或者人们今天所说的“自然规律”，引导着自然界从古到今的改变，不过赫顿和拉马克的同行当时还不那么清楚。但是，居维叶却从他鉴定的化石中，悟出了不同的涵义。1795年，即在拉马克受聘为动物学教授之后不久，居维叶当选为法兰西学院（College of France）比较解剖学主任。同年，赫顿的著作首版问世。一天，一位工匠送来来自环绕巴黎的塞纳河流域（Seine）一个采石坑内的一块乳状牙象化石。居维叶马上发现，乳状牙象与现代的非洲象和亚洲象截然不同，是另一种古象。一道发现的还有大型哺乳动物河马、犀牛和獾的化石，都是在法国早已灭绝、但依然在热带非洲和亚洲活着的动物。几年后，在同一地区蒙马特（Montmartre）附近的一个石膏矿中，又发掘出一批哺乳动物化石，但地层层位不同。组合起这些骨骸后，发现所有这些化石都与现代生物的特征不尽相同。由于石膏沉积层早于现代砾石层，故那些早已灭绝的哺乳动物必定存活于更早的时代。最后，居维叶又在巴黎盆地周围更老的岩石中发现了古怪的恐龙化石。根据这些事实，他确定巴黎盆地至少有四个不同时代的动物群，即恐龙、灭绝的哺乳类、乳状牙象和现代陆生动物群。

对于像居维叶那样度成的宗教信徒，要把古老生命形式的灭绝现象与教堂的教义结合起来，真比登天还难。居维叶曾经研究过从埃及古墓中发现的植物标本和动物木乃伊，而这些木乃伊却与现代活体生物并无区别。在传统的时间尺度中，埃及是创世纪之后不久建立起来的一个超级大国。有鉴于此，居维叶认为，既然圣经《出埃及记》以来的千余年中，生物面貌并没有发生多大的改变，所以没有理由设想上帝创造的原始生物发生过大的变化。由此推论，巴黎盆地来到的化石只能是生活于“创世纪”以前的生物，而且必定遭到了某种灾变事件的破坏。而这种灾变事件，不受上帝创造生命以来的那些自然规律所控制。居维叶想象这些革命性的变革是翻天覆地的，“破坏了自然作用的连续性和过程，没有一种当代的自然力量足以完成这一旷世勋业”。这种自然哲学就是历史上所说的灾变论。

地质学中的水火之争，与生物学中灾变论及渐变论的争论有异曲同工之妙。水成论者以圣经上所说的洪水灾变来解释岩石的成因。而火成论者从观察发现，至少有一种岩石是由火山喷发而成的。他们是赫顿的信徒，依正在进行的正常过程解释地质构造。

山中的海相化石

洪水理论非常符合阿尔卑斯山区居民的观察。长途徒步旅行是瑞士的民

族体育活动，但相当消耗体力。有一次，我带领全家攀登法国南部高度超过森林带的芬多姆山（Vendôme），发现孩子缺乏热情。赤日炎炎，地上寸草不生，登山诚非乐事。我那年仅九岁的幼子一屁股坐到地上，说什么也不肯走了。事出无奈，只能用悬赏的办法来激励他继续攀登。我们商定，彼得每拣到一块化石，就奖励镍币一分，如果找到一块菊石壳，就可以得到一角钱。菊石是鹦鹉螺的祖先，外壳十分美观。俗语说，重赏之下，必有勇夫。这个事业心很强的孩子很快就掏空了我的口袋。因为普罗旺斯（Provence）地区的石灰岩里到处都是海相化石。渐变论占上风这些介壳显然来自海洋，是一度流行的洪水说的基础。17世纪时，有一位自称为自然科学家的牧师，名叫伯内特（Thomas Burnet）。他说，上帝震怒时，曾把地壳撕裂，地球的“地心水”喷溢而出，淹没了那些顽固不化的人类。化石介壳和成层岩石都是从那洪水的“杂乱沉积物”中快速堆积下来的。对18世纪的博物学家来说，海相化石出现在像阿尔卑斯山那种远离海洋的地方，无异为洪水说的可靠性提供了一种有力的佐证，伍德沃德（John Woodward）是灾变论最有力的支持者。这名18世纪初期牛津大学的自然史教授说，他在英格兰采集到的化石正是挪亚洪水的真正遗迹。1726年，这种愚昧的思想达到了顶峰。伍德沃德的一位瑞士籍朋友兼信徒萧赫寿（Jakob Soheuchzer），曾热情洋溢地写信给伦敦皇家学会，声称他发现了“招致这场洪水灾难的无名罪魁祸首之一”的遗骨。他为此定名为洪水证人（Homo diluvii testis）的化石，塑造了一个五十八又二分之一巴黎寸、和自己同样高度的塑像以为纪念。后经居维叶鉴定，所谓罪魁祸首，其实只不过是一只巨大的蜥蜴（salamander）。

魏尔纳（Abraham Gottlob Werner）是德国萨克森州弗莱堡的矿物学教授，与居维叶和拉马克是同时代的人。他以较不遵从圣经的方式传播洪水的学说，成为水成论者信奉的教条。魏尔纳认为，岩石原来都是在全球性的海洋中沉积下来的。最先形成的沉积物称为原始系（Primitive series），包括花岗岩和其他结晶岩；随之沉淀的是硬砂岩、泥灰岩和板岩，称为过渡系；其上覆盖着由灰岩、砂岩、白垩、页岩、石膏和煤层组成的水平地层；最上面是由砾石、砂石和黏土组成的冲积系。

这种特殊的岩石序列在弗莱堡非常典型，而魏尔纳又从未离家远行。他顽固地认为，这是覆盖全球的普遍层序。他通过长达三十年的教学不断改善他的体系，并通过有影响力的门生广为传播。

后来，一种名叫玄武岩的黑色岩石导致了魏尔纳的崩溃。魏尔纳发现，在弗莱堡的许多小山上，玄武岩像三明治中的肉片一样夹在沉积岩之间，而根据魏尔纳的分类，玄武岩是一种水成岩。然而，法国奥弗涅（Auvergne）的一位业余博物学家德斯马雷特（Nicholas Desmaret）所处的地理位置，更有利于了解自然现象。他发现在附近的玄武岩中，到处可见大大小小的气泡，很像瑞士乳酪。由此推想必定是熔岩未固结时有气泡溢出，才形成了这

种特殊的构造。而玄武岩下伏地层曾经历的烘烤现象，进一步证明这些岩石原本是炽热的熔岩。沿着玄武岩流溯源追索，德斯马雷特发现了一个死火山，是法国中部众多死火山峰之一。虽然他没有发现喷发活动，但是建立在与已知地质作用对比基础上的细心观察和逻辑推理，使他得出了一个正确的结论：玄武岩是一种火山岩。因此，德斯马雷特的追随者被称为火成论者。

魏尔纳本人一直固执己见，拒不接受这一真理，但他的学生却举起了义旗。1803年，魏尔纳的学生弗朗西斯（Jean François D' Aubuisson de Voisin）抱着水成论的观点，受邀到法国的奥弗涅进行实地考察。他面对事实，原来的信念终于发生了动摇。一年以后，这位勇敢的水成论者在法兰西学院谦恭地宣读了放弃原有观点的声明：“我所见事实确实无误，真理清晰地呈现在我的眼前。因此，我要不是断然拒绝我的感官提供的证据，昧心地视而不见，就是违背我的良知而缄默不言。毫无疑问，在奥弗涅的确存在着火山成因的玄武岩。”

接下来的19世纪日趋务实，渐变论蒸蒸日上，灾变论则日趋没落，而站在渐变论前锋的斗士是英国的莱伊尔。

莱伊尔出生在一个庄园主的家庭。他的父亲对他期望很高，莱伊尔也确有过人之处，十五岁即被选为林奈学会（Linnean Society）的会员。三年后以高贵的自费生身份进入牛津大学，属于与贫困生不相往来并享有特权的一类学生。其时，神学家兼地质学家布克兰（William Buckland）在该校教授矿物学。布克兰是一位顽固不化的水成论者。在他的课程中，常常要加上所谓诺亚洪水的精采地质“证据”。鉴于圣经中并未提到任何生物的灭绝现象，布克兰与居维叶一样，认为古代动物的骨骼化石是圣经创世纪以前的遗迹。后来，创世纪前的世界突然遭到了彻底的破坏。所以现代正在进行的自然作用，与那个远古时代的作用风马牛不相及。

莱伊尔选修布克兰的地质学课程，立即得到这位老师的青睐，并经布克兰的介绍，结识了当时的一批名流学者，当然都是些灾变论者。当身为一名业余地质学家的莱伊尔赴巴黎游历时，还随身带着布克兰的著作《洪水遗迹》以及布克兰写给法国知名自然科学家的介绍信。然而，他却应不甚出名的普里伏斯特（Louis Constant Prevost）之邀，参加了一次地质旅行，从而根本改变了他的思想路线。

普里伏斯特是渐变论者拉马克的学生。与其前辈居维叶一样，他也研究过巴黎盆地的地层。这是一套淡水和咸水沉积物的交互地层，形成于连续的海水进退的特殊环境中。灾变论者居维叶认为，海洋的变化原因不详，而且达到灾害规模。而普里伏斯特则认为，这种成层岩是由正常沉积过程日积月累所形成。该盆地时而是具有入海口的海湾，时而是与海隔绝的湖泊。湾湖交替出现，就形成了这套海陆交互相叠的沉积物。正常过程长时间的累积可以引起的环境变化之大，是这一观点惟一刺激之处。

莱伊尔与普里伏斯特相偕在巴黎盆地枫丹白露（Fontainebleau）森林旅

行，仔细地研究岩石露头，认真地思考问题，终于使莱伊尔由灾变论者转变成渐变论者。他决心抛弃老师布克兰的观点，开始探索自己发掘古今地质过程相似性的路子。其实，他毋需远觅。就在他父亲位于苏格兰肯诺迪（Kinnordy）的庄园里，有一个巴克（Bakie）湾，人们疏干湾内海水以开发底部的泥灰质沉积。那是一种黏土和碳酸钙的混合物，可以用来中和酸性土壤，使土壤适宜农作。他将巴克湾的现代石灰岩与巴黎盆地的古代石灰岩进行比较，发现二者是完全一样的。居维叶曾以为，在现代湖泊中找不到古代岩石的对应物；但莱伊尔却在后院发现了它们。

莱伊尔坚信，远古地质作用与现代地质作用是完全相同的，用现代地质作用可以解释任何地质时代的地质特征。他以一名改宗者的全部热情，竭力宣扬渐变论。赫顿曾经设想，古今的地质作用都受相同的物理定论控制，却从未认为作用本身自古至今全然相同。恰恰相反，他曾指出，如果苏格兰的侵蚀作用自古至今都以现代的速率进行，那么陆地早就冲刷殆尽而为海水淹没了。因此，在某些时期，必然有其他地质作用使陆地上升，使它露出海面或者形成新的岩石，以弥补持续侵蚀作用所损失的岩石。

莱伊尔转变过了头。他在赫顿自然规律不变的结论上画蛇添足，坚持地质历史上的作用过程与现代毫无二致，它们的状态和速率在整个地质历史中都没有发生变化。疑云重重地质作用包括沉积作用，如巴克湾和巴黎盆地底部发生的碳酸钙堆积作用，也包括一些不寻常的事件，如地震、地滑、火山爆发等。作用的状态意味着条件，例如引起山脉隆升的地下力的分布、大气圈的化学成分或全球气候等。一个事件的幅度或能量级别就是速率。莱伊尔的教条是，整个地球历史的地质变化是一种永无休止的过程。具体说来，这些作用仍在以相同的幅度进行着。在一个内营力、化学成分和气候均未发生变化的地球上，这是万古不变的规律。

莱伊尔的思想立即受到了挑战。莱伊尔的同乡瑞士青年科学家阿加西兹（Louis Agassiz）发现，在不太遥远的过去，中欧和北美的半壁河山曾为冰冠（ice caps）所覆盖。这种全球灾难性变冷的思想震撼了布克兰，于是他到肯诺迪拜访旧日的学生莱伊尔，告诉他“在离他祖居不到两英里处，就有一组极为壮观的冰碛物（moraine）”。莱伊尔对现代冰碛物原是很熟悉的，那是一种在山岳冰川前缘堆积下来的碎屑堆。事实俱在，他不得不承认从前在欧洲和北美大陆曾有冰川存在。而按现代的气候，这些地区根本不应该有冰川的。尽管如此，莱伊尔仍然强烈反对灾变的思想，竭力贬低冰期的意义，说那只不过是“地球外部环境的局部变化”引起的区域性气候变化，以捍卫他的渐变论教条。

莱伊尔既不喜欢地质历史上的革命，也怀疑拉马克所说的生命史上的变异。在1832年出版的“地质学原理”第一版中，莱伊尔写道：“无论是自然界发生的变异或者是畜牧学家或园艺学家人工培育的变异，都不能创造出生理结构大不相同的种族；即使通婚，也不能生育；即使能生育，也只能生

产没有繁殖能力的杂种。”

然而莱伊尔又对古生物化石与现代种属之间的差别感到不解，不过在拜读了布罗契（Giovanni Brocchi）的著作后，却觉得如释重负。布罗契在研究意大利海滨古相地层中的介壳化石时，发现它们与地中海的当代生物极为相似。为了实地检验这种相似性，莱伊尔于 1824 年作了一次卡拉布里亚（Calabria）之行。途中，他在都灵（Turin）稍事停留，观察采自苏帕加（Superga）山的介壳化石。当收藏化石的博物馆长告诉他，都灵的化石与意大利现代海滨的介壳迥然不同，他既吃惊又失望，更加感到困惑。于是决心到卡拉布里亚和西西里去，通过亲自采集化石来查个究竟。

为地层命名

当时测年方法尚未成熟，所以居维叶根据地层叠置原理确定巴黎盆地四层化石的相对年代。每一个沉积层或地层都只能存于下伏地层的顶板之上，因此比下伏的地层年轻，这是一条最简单不过的定理。鉴定巴黎盆地未经扰乱的地层层序，就不难确定层位较高的乳状牙象残骸，一定比下伏地层中已灭绝哺乳动物的残骸年轻；而在最低层位中发现的恐龙残骸，无疑是其中最老的一代。

在巴黎盆地或伦敦盆地那种地层在长距离内连续展布的盆地中，可以应用地层叠置原理。但在其他地方，沉积层受到了不同程度的扰动，最上部的地层或其他地层可能已遭侵蚀，因此很难说某地的第十二层是否与另一地的第十二层同时，也难以保证同时代的岩石是否属于同一类型。例如在某时某地的湖泊中形成石灰岩，但在同一时代另一地点的冲积平原上形成的却可能是页岩。除此之外，许多地质作用还会使地层发生褶皱或倾斜，使之破碎或推覆到其他地层之上，甚至变得杂乱无章而面目全非。地层纪录并不是一本可以逐页顺序阅读的书本，而是一部在疾风中飘卷的手稿。

如果一部著作的原稿标有页码，就不难正确无疑地排出顺序了。一个世纪以前，一位名叫史密斯（William Smith）的英国测量人员发现，化石可以作为确定地层年代的页码，即使沉积层已被扰乱也无妨。史密斯出师不久，就被英国政府聘为运煤水道工程的测量人员。他加入 1794 年的萨默塞特（Somerset）运河计划；在六年多的时间里，他调查了每一个河段并监督工程的施工。

挖掘工作使河道两侧的岩石暴露无遗，但是没有两个剖面的地层序列是完全相同的。灰岩、页岩、砂岩、白垩和黏土，就像人群中一张张陌生的面孔，没有什么标志能说明它们中间，哪几种是同时的，哪几种是不同时的。但经过六年的实地勘查以后，史密斯对那里的情况更熟悉了。他可以肯定，每一层都有独特的化石残骸，而且沿河各地动物化石的层序却是到处一样的。当时，在巴斯（Bath）住着一位教士，名叫理查森（Benjamin

Richardson)，是一位化石爱好者。史密斯去看望他时，已能指出这些乱七八糟的标本来自何方，进而预言在该区山顶上可能发现的化石种类。

史密斯在 1815 年出版了他的地质图，标出了英格兰和威尔斯的地层。一年以后，又出版了一部名为“根据化石有序性确定的地层”的专著。地层学从此诞生，为地质年代奠定了基础。遗憾的是，史密斯未能提出一个正式的分类表，这项工作还待莱伊尔来完成。

研究介壳化石并非莱伊尔的专长，但巴黎的业余收藏家德谢斯（Gerard Deshayes）却是一位道地的专家。德谢斯是一位脾气古怪的法国人。他因迷恋化石研究而抛弃了日进斗金的医生职业，但终于获得了确定介壳年龄的专家声誉。拉马克根据已灭绝生物与现代生物的相似程度进行分类；史密斯根据已灭绝软体动物（mollusk）的上下关系推断年代，德谢斯研究的化石又比拉马克和史密斯所研究的更年轻。他根据整个化石组合与现代生物群之间的相似程度来确定地层年代：如果化石组合中有更多的现代种属，化石群的年龄就更加年轻；反之，含现存属种愈少的化石组合，其年龄就愈老。

从巴黎回到英国后，莱伊尔支付一百英镑给这位破产的医生，请他研究从都灵、卡拉布里亚和西西里带回来的那些介壳。一年后，德谢斯向他的雇主递交了一份报告。布罗契没有说错：大多数卡拉布里亚和西西里的化石群都是现代种属，其化石组合与现代海滩能采集到的介壳并无二致，显然这些化石非常年轻。但是德谢斯又报告说，都灵博物馆的馆长也没有错。苏帕加山采集到的化石中，只有 20% 是现代种属，其余的 80% 都早已灭绝。德谢斯还将都灵采到的化石与在法国波尔多（Bordeaux）地区采到的化石进行了比较，认为这两个化石群均属年龄居中的生物组合。而在采自巴黎盆地和伦敦盆地的组合中，总共 1112 种介壳，德谢斯只鉴定出 38 个活种，仅占 3.5%，其他均为灭绝种属。因此，在所有的化石组合中，该地的化石群最为古老。

德谢斯的报告启发了莱伊尔，促使他提出根据化石组合中现存活种的百分比来划分地质年代的思想。他把德谢斯鉴定的最老的一组地层命名为始新世（Eocene），意即晚近地质历史时期的黎明阶段；中间的一组称为中新世（Miocene），意即较为接近现代的一个时期；最年轻的一组称为上新世（Pliocene），意为更接近现代的一个阶段。

莱伊尔引入的这三个地层名词一直沿用至今。但是由于对化石组合的深入研究要求对相对年代作更详细的划分，这些地层单位所代表的时间长度已经获得新的内涵。在“黎明”阶段始新世之前，增加了一个古新世（Paleocene），代表黎明前的远古时代。始新世之后，增加了一个渐新世（Oligocene），表示渐趋现代之意。接着是中新世、上新世，表示时间日益逼近现代。之后是另外两个地层单元，叫做更新世（Pleistocene）和全新世（Holocene）。全新世代表地质概念里的现代，即人类生存的时代。更新世则比上新世更年轻，因而也就最接近现代的地质时代。

时代术语增加的同时，最现代的更新世里又划分了冰期。居维叶在巴黎盆地发现的骨骼层也可以纳入这一时代框架。生活在冰期的乳状牙象属于更新世；而在蒙马特石膏坑发现的灭绝哺乳动物应属渐新世，所以时间要早得多。但是恐龙化石又更为古老，早于莱伊尔命名的任何一个地质时代。

由于德谢斯研究的化石标本一概采自新生代地层，所以莱伊尔以化石群中现存生物所占的比例，为划分地质时代的基础是可行的。新生代包含现代生命形式，从 6500 万年前恐龙灭绝开始，一直延续至今。但是，史密斯从英国萨默塞特运河工程中挖掘出来的化石中，却没有现代生物标本，所以甚至一定要比古新世的化石更古老。用地层叠置律也验证这一推论：萨默塞特运河工地揭露的地层确是在伦敦盆地的古新世地层之下。然而，史密斯还是发现已灭绝的种属与现代生物之间存在着相似性，因此可以用拉马克的分类法去确定那些化石的时代。这一套地层所代表的时代在地质学中称为中生代，代表地质历史上居中的一个阶段。而在更古老的地层中，化石与现代生物几无相似之处；它代表地质历史的古代时期，因此称为古生代。

地质学家和古生物学家发现的化石愈来愈多。逐一加以归类，又在古生代、中生代、新生代三分的基础上进行了更细的划分，建立了更详细的地层表。“代”的下面分成“纪”，“纪”的下面分成“世”。上文提到的对晚近地质时期的划分，就是比较小的时代单位。按照地质学中的惯例，建立地质时代时，必须考虑早先即已存在的命名系统。所以有些名词虽仍沿用不误，但已名是意非，早已失去了与其原意逻辑上的联系。例如，尽管第一纪、第二纪的术语已从地质词汇表中消失，但新生代的第一个纪，包括古新世、始新世、渐新世、中新世和上新世在内，仍统称为第三纪，因为这是古已有之的一个术语。但其涵义已经完全不同了。中生代的最后一个纪叫做白垩纪（Cretaceous），源于“白垩”一词（拉丁文为 creta），因为最先是在英国运河两岸的白垩层中发现它的化石群。

“世”下面进一步分为“期”。白垩纪的最后一个期称为马斯特里奇期，取自发现第一块巨型爬虫类化石的荷兰马斯特里奇镇。古新世的第一个期根据一个丹麦地名，命名达宁期（Danian）。恐龙的灭绝发生在马斯特里奇期的末期，达宁期开始以前。最小的时间单位是化石带，即某种典型化石组合所代表的时间间隔，所以一个期内会有许多个化石带。

挑战莱伊尔的教条

1950 年代时，我在美国加州大学攻读学位，距莱伊尔提出他的年代表有百余年之久。我所受的地质教育，已形成密切相关而又井然有序的完整体系。渐变论是基本的指导思想，灾变论在科学界早已信誉扫地，因为它与基督教的教义关系太密切，使用意识形态为方法而非透过观察研究自然。灾变论在 20 世纪的最后残余就是所谓原创论，其信徒仍然迷信用洪水说来解释

古代的生命形式。对科学家来说，用一种罕见的事件来解释地质历史上的现象，无异于求助于超自然力量。我的一位师尊，俄亥俄州大学的斯皮克教授（Ed Spiecker）走向了极端，主张把革命或洪水事件之类的字眼，统统从地质学教科书中抹掉。

当时，进化的思想在地质学界深入人心的程度不亚于生物学界。我们不仅要受到莱伊尔关于作用、状态、速率都一成不变这一教条所束缚，而且有了一个备极详细并极其漫长的地质时代表，一直可以追溯到 45 亿年前的混沌时期。有了渐变的作用和漫长的时间，还有什么极端现象解释不了呢？正是那些我们天天耳濡目染的正常事件，在漫长的时间里，慢慢地写下了地球的历史。

经过莱伊尔的信徒精心训练之后，我于 1954 年走出校门，成为专业的地质学家，在德克萨斯壳牌石油公司研究实验室找到一份工作。我参加了一个研究现代河流沉积和海滩沉积的计划，常在休斯顿近郊的布拉佐（Brazos）河边采集样品。平常，布拉佐河只不过是一条平静的小溪，只能搬运粉砂。然而河岸两边却堆积着大堆的粗砂。有一次适逢春汛，当我重返取样地点时，已经面目全非，不可辨认。山洪冲来的砂粒堆成了几公尺厚的沉积物，使我大吃一惊。我开始认识到，沉积物的形成并不一定单靠每日每时的正常沉积作用，春汛也能立时形成巨厚的沉积层。

当时，我的朋友金斯堡（Robert Ginsburg）正在研究佛罗里达的珊瑚礁。在生物礁生长带的后面，有一个由珊瑚砾块组成的浅滩。日潮甚弱，按理是搬不动这些巨砾的，当时我们对这些砾块的成因颇为困惑。一直到 1960 年 9 月，唐娜（Donna）飓风席卷该区，我们才恍然大悟。唐娜是二十五年来最强的飓风，风速可达每小时 300 公里，引起的浪潮高达三又二分之一公尺，比正常潮高十倍。没有人测过飓风来临时的潮水流速，但足以搬运巨石是毫无疑问的。果然，风暴过后，在礁后浅滩上又铺上了一层新的珊瑚砾块。当时我想，莱伊尔所谓的“现代作用”不仅限于每日每时的正常作用，那些偶发性的灾害自也不能排斥在外。

我在壳牌公司参与的第二个计划是加州文杜拉（Ventura）盆地含油砂层的研究。该砂层中含有许多细小的深海生物介壳，说明文杜拉的储油层乃深海沉积，后来才上升成为陆地。虽然早就有人提出这种设想，但一直被嗤之以鼻。因为在许多专家的眼里，深海沉积物应当是细粒的黏土和软泥。从陆地上剥蚀而来的粗粒陆源碎屑砂砾太重，波浪和洋流无力把它们搬到远离浅水陆棚的深海。这是常规的情况，原也无可厚非。但其实在很少见的情况中，水下滑坡偶尔也能引起非常强劲的水流。从陆棚边缘的极陡坡上崩汰而成的碎屑流，流速每小时可达 50 至 100 公里，这种灾变性的水流能把砂砾带到深海。为莱伊尔的传统观念所禁锢的许多代科学家，一直无视于这一现象，直到 1950 年方为人们所认知。基于在文杜拉盆地所作的研究工作，我相信确实存在罕见的极大规模海底地质作用。

我一直在思考这个问题，但是直到我和同事在地中海碧波荡漾的海水之下发现巨厚的盐层之后，才充分意识到莱伊尔教条的荒谬和错误。岩盐一般都沉积于浅水区、小型泻湖或盐沼内，强烈的蒸发作用使盐水不断浓缩，最后出现石盐晶体的沉淀。但是地质证据确凿无误的证明，地中海的岩盐是在深逾 5000 公尺、广达 250 万平方公里的整个海区内的海水蒸干以后留下的残余。尽管我们握有充分的证据，但是我们的理论遭到了强烈的抵制，理由是现在没有地中海干化这样的地质作用。于是我终于认识到，我们的一些同行，虽然以科学家自命，其实与宗教里的基本教义派（Fundamentalist）死硬分子并无多少区别。碰了几次钉子之后，我开始意识到，人们要告诉我的是：如果一种理论违背了莱伊尔的教条，便注定要碰得头破血流。

不过，我所受到的嘲笑同 20 世纪初两位科学家的遭遇相比，简直是小巫见大巫。这两位科学家提出一些地质作用或地质事件来解释自然现象，观点与渐变论的教条相左，遭到了可怕的厄运。

魏格纳（Alfred Wegener）是本世纪初颇为活跃的一位气象学家。他从研究世界地图出发，提出一种新鲜的想法。同许多前人一样，魏格纳注意到南美洲东岸巴西的凸出部分与尼日利亚下方的非洲西海岸，可以天衣无缝的拼合在一起。好像这两个大陆曾一度连为一体，后来才反向漂开。南美与非洲的古动物群也有相似之处。一些古生物学家墨守大陆位置固定的旧观念，无法解释生物分布的特点，不得不“以今论古”，设想曾有一座“陆桥”横跨大西洋，以供动物群相互迁移。直到陆桥沉入海底消失无踪，才结束两个大陆的动物交流。

几个大陆之间地质历史发展的相似性，比古动物群的相似更为奇妙。魏格纳指出，南美洲的大冰原（ice sheets）沉积物看上去与非洲、印度和澳洲南部的冰川沉积物是连成一体的，似乎同时经历了一次大陆冰川作用。

经过反复推敲，魏格纳大胆设想：这些大陆曾一度连成一个叫做冈瓦纳（Gondwana）的超级大陆，原来位于南极附近。魏格纳并未提出大陆“漂移”的机制。他是一位气象学家，只能说是一位业余的地学研究者，但是他的研究工作却超出了北美和西欧地质学的传统领域。毫无疑问，魏格纳是传统观念的异端分子。现代大陆似乎并无移动的迹象，魏格纳所言，乃是一种“现代并不存在的作用”，因此被长期束之高阁。大陆漂移的思想，现在称为板块构造理论，要到五十年后才能为大家接受。因为人们终于发现，大陆现在正在移动，而且推想这种移动一刻也没有停止过。

当芝加哥大学的地质学家布里兹（J. Harlan Bretz）试图用灾变的观点解释美国西部的不毛之地时，遭到了更为顽强的抵制。他费了多年的时间研究强烈侵蚀的崎岖地形，最后认为这是一次灾变性洪水刻蚀的结果。

这一异端邪说最近才得到证实。大约在一万年以前，那里是一个碎屑堤围绕的巨大冰蚀湖，面积超过五大湖的总和。一天，碎屑堤发生崩溃，容量达十亿吨的湖水以每小时几百公里的速度奔腾而出，经过西部高原直泻入

海。而且，现在公认这种高原劣地的刻蚀作用只用了几天的时间。布里兹于1983年获得了美国地质学会的最高荣誉彭洛斯（Penrose）奖章，其时他已97高龄。

莱伊尔的问题在于没有区分不大可能的现象和不可能的现象。不可能的现象是指违背自然规律的现象，例如石头不会违背重力的规律向上飞升；而不大可能的现象是指一些不常发生的事件。

规模与频率呈反比

中国人有忍耐的传统。对于感受到的不平，他们并不急于报复，而是更讲究哲理，劝人们耐心等待。做了坏事的人，今生不报，他的后代也要遭到报应。在人的一生中，小灾小难是经常不断的；长久下来，即使权倾一时的人，也不免大难临头。

简言之，这种民间哲理表达了自然事件的规模与频率呈反比关系这一统计原理。瑞士年年都有小规模的山崩，但是在过去几世纪以来，只发生过一两次足以摧毁整个村落的大规模地滑。而像是碎屑物足以掩埋数十平方公里范围的巨大地滑，过去的几百万年中只发生过几次，人类历史都尚无记载。莱伊尔说“自古至今，自然作用没有能量级的差别”，显然不符合事实。

莱伊尔说地球的状态古今一律，也是没有根据的。冰期时代的地球状态——其反射率及其相对于太阳的位置——必定与历史上的其他时期不同。过去的十亿年中，只有三个时期的气候寒冷到引起大陆冰川，而且可能只有一次冰期的规模可以与一万年前的结束的大冰期相比拟。无论是什么原因使地中海变成一片荒漠，现代绝对不存在这种情况。要使地中海变成内陆海并发生干化，不是直布罗陀海峡上升，就是海平面下降，二者必居其一。

如果莱伊尔坚持速度和状态古今不变的观点失之于偏颇，那么他说历史上的地质作用也与今日大同小异的说法对不对呢？结论也是否定的。即使是一种常规地质作用，当其能量或速度累积到一定的数量级时，也能产生异乎寻常的、当代无缘目击的后果。中国有一个妇孺皆知的寓言，叫做“愚公移山”。愚公是古代的一位老人，坚信只要子子孙孙挖山不止，就能将高山搬走。按照莱伊尔的哲学，他大概也会同意愚公的观点。岩石从高山一侧滑塌，在山麓发生堆积。日积月累，只要时间足够长，高山就会侵蚀净尽。但是，这并不是自然界的惟一模式。5000万年以前，怀俄明州西部的古洛矶山突然垮塌，而且不是一寸一寸的剥落，是一下子地裂山崩；几小时之内，碎屑物质就像地毯一样铺满了怀俄明高原。当代无缘见到如此壮观的场面，但在古新世时却确实发生过。

时间是一把双锋剑，而莱伊尔只触到了一侧的锋刃。他正确无误的看到，只要有足够的时间，日常的风化剥蚀作用也会把高山搬入大海。但是他没有看到另一侧的锋刃：在足够长的时间跨度内，罕见的灾变事件也可能发

生。我们每日每时都在受来自太空的无数宇宙尘埃颗粒的冲击，几乎平均每个世纪，就会大约有一个像几年前一位加拿大妇女被石头般大小的宇宙尘埃击中。差不多每十亿年，地球上就会落下巨大的陨星。但是，这样一种灾难并不违反自然规律。只要是可能的事，假以时日，就一定会发生。从概率理论的观点看问题，灾变是可能发生的，而且可能已曾发生过，时间够久就几乎一定能够发生。长期为科学家所摒弃的灾变论已经不复具有宗教色彩了。

日暮途穷的恐龙？

达尔文撰写《物种起源》一书时，深受朋友莱伊尔的渐变论影响，所以采用缓慢的渐进作用解释生物界的演化。为此，他设想了一种单一的作用过程，即生物的自然淘汰。这种天择过程在地球的全部历史中是一成不变的，速率也没有变化。地球上始终在进行细微的变化，但从未发生过剧变。也许是当局者迷，虽然有悖于这一推论的现象俯拾皆是，但达尔文都忽略掉了。

地质年代表里最小的单位是“带”以及“期”。专家根据在界线附近的生物突然灭绝、为量甚众的生物种属突然减少或新的种属突然出现等现象区分。简言之，化石组合中的生物种属组成会随着沉积物时代的不同而发生有规律的变化。时代相近的沉积物，其化石组合也相近。这些确是渐进的转换。

然而，穿过主要地质时期的界线都有典型生物的急剧变化。在白垩纪末期的马斯特里奇期，发现了许多与众不同的化石，包括翼龙、鱼龙及后来陆续发现的许多恐龙等愈来愈多的奇珍异兽。但在中生代以后的沉积物中，这些化石都一下子不翼而飞，曾经在特定环境里各领风骚的许多生命形式也从该时代的地质纪录中消失了。小儿彼得在芬多姆山发现的菊石，原都是中生代特有的生物。其他软体动物，包括一些数量甚多的种属如箭石和厚壳蛤，也随着菊石一道消失得无影无踪。连那些个体很小但数量之多接近天文数字的单细胞浮游生物，也在中生代末期大量灭绝了。这些事实，只能用环境剧变引起迅速灭绝的突然变化来解释。

虽然莱伊尔当时还不知道中生代末期浮游生物的大规模灭绝，但他对大生物的灭绝现象应该了若指掌。关于马斯特里奇白垩层中的动物化石，莱伊尔有一段记载。他写道：“德谢斯认真地比较及描绘了二百多种马斯特里奇期的介壳化石，但竟然找不出一一种第三纪的生物化石。箭石是一种头足类，盛产于马斯特里奇期的地层中，有一种菊石也是如此。但在任何第三纪地层中却从未找到这些化石。”

莱伊尔和德谢斯对化石的研究，证明在中生代末期确有生物的大规模灭绝。其实早在几十年前，居维叶即已发现这一现象。但是莱伊尔不能放弃他对暴力和革命的憎恶之情。为了坚持对缓慢渐进演化的强烈信仰，他竟置那些突发的压倒性灭绝现象于不顾，而假设化石纪录存在间断。在他所著的《地

质学原理》中，他用自己发明的时代术语表达了这一思想，写道：“在始新世和马斯特里奇期之间，生物遗骸似乎有一个巨大的间断。这一间断的规模，甚至比始新世与现代之间的间断还要大得多。因为始新世地层中毕竟还有一些现代尚然活着的生物，但在最新的第二群（Sec-ondary Group）中却没有始新世的化石。由于化石遗骸的这种差异，因此不能排除较长时间间断的可能性。”达尔文在 20 年后的著作中，也把中生代与新生代之间生命形式的不连续性，看作地质纪录的间断。根据地质纪录中的沉积物推算，这一侵蚀期的持续时间，至少有一至二亿年，甚至比整个中生代还要长。其实达尔文在《物种起源》一书中几乎没有论及生物灭绝现象。在他看来，新种的出现就是对老种的死刑判决书：

每一种经过选择，证明可以适应环境的生物种属在数量上将日益增加。与此同时，不适应环境的种属则不断减少，直至成为罕见的种属。地质学证明，罕见就是灭绝的前奏。我们还可以作进一步的推论，由于不断缓慢地形成新的种属，除非我们相信物种数目会永无限制地增加，否则总有物种是要灭绝的。

达尔文认为，老的生物属种缓慢消亡是不可避免的。凡不适应环境的老的动植物种属，在生存斗争中必将退出历史的舞台。

人们很快的接受了达尔文的思想，几达家喻户晓、妇孺皆知的程度。在后来的近一个世纪里，有人又发展了这种“自然”灭绝的理论。有的生物在演化过程中日趋特化，而特化就是灭绝的证明。例如大熊猫发生特化，形成了只吃一种竹子的怪脾气，大熊猫如今由于食物短缺已面临灭绝的危险；恐龙也是如此。尤其是某些最晚期的恐龙，如硕大无朋的霸王龙，或身披销甲的剑龙，都需要特殊的适应能力。因为超乎寻常的巨大躯体，无疑是一种沉重的负担。反之，躯体大小适中而又习性多变的生物，便易适应多变的环境，因而也就有较强的适应能力。在这些思想的深处，其实埋藏着一种量的概念，认为可供生物演化的“原料”是一定的。如果消费过度，那么在最需要的时候就会无以为继。

除了新种的出现促使老物种灭绝一说外，达尔文还提出另一种相关联的理论，那就是物种有“年龄”，物种也会老死。恐龙主宰大陆环境几达 16500 万年之久。经过许多代的繁衍之后，这个物种已经老化，丧失了“进化的力量”，当然也就逃不掉灭绝的命运。

这两种灭绝假设都含有几分真理。生物的进化确实是不可逆的：爬虫类的足趾变成鸟类的翼尖后，就再也不会变回去；五趾哺乳动物可能失去脚趾而指甲变成蹄，如马和猪，也可以如蝙蝠一般变为支撑翅膀的延长趾，这些变化都不可能逆转。而除了大熊猫之外，还有许多例子可以说明过分特化的危险。

另一方面，也有许多生命形式十分特化，连最有经验的生物学家也莫名其妙。有些种属非常成功。以动作缓慢著称的乌龟为例，其爬行技艺之精湛，令人膛目结舌，生物学家至今仍无法理解。为了适应其异常特化的背甲，乌

龟靠肩胛骨的伸缩来爬行。而它在中生代以前几百万年即已存在，而且竟能逃过中生代末期的巨变而至今安然无恙。

物种也确有平均的预期寿命，这一现象支持了物种老化的理论。哺乳动物的物种平均存活期约为 100 万年左右，当然也有例外。例如北美负鼠的直系祖先是一种生活在中生代的负鼠；蟑螂是人见人厌的一种小虫，却已延续了三亿多年；有一种人称海豆芽（Lingula）的小型腕足动物，在六亿年前的古生代早期多细胞生物刚刚出现时即已根植于海底，直到今日仍安健如恒。

达尔文指出，整个生物群也可能随着时间逐渐减少。物种种数减少的同时，物种的个体数也在递减。有的古生物学家认为，菊石虽然是在中生代末期灭绝，但在此之前，其分异度和个体数已在逐渐减少。翼龙其实早就在走下坡路，到中生代末期已所余无几，只剩下日见凋零的一群来承受那最后的一击。

重塑恐龙形象

然而，无论畸变说抑或老化说，都不适用于恐龙。约翰·霍普金斯大学的巴克（Robert T. Bakker）曾经领导一个古生物学家小组，试图拨乱反正，重新解释维多利亚时代对恐龙生活习性的理解。

虽然没有大如蓝鲸、小如家鼠般巨大的差别，但它们同今日的哺乳动物一样，是个从巨无霸到母鸡般大小尽皆有之的庞大动物家族。根据巴克的解剖学复原工作，一些恐龙的形象并不像维多利亚时代所描述的那样狰狞。角龙是恐龙末日的幸存者，在原先保存角龙化石的博物馆中，把它画成一种面目可惜的怪兽。但重新鉴定其化石后，发现其头骨尾缘的巨大厚重饰边，原来是长在皮下的，并未露出体外。功能有二种：一是支持强大的面部肌肉，使之有能力嚼木维生；二是支持粗厚的颈部肌肉，以支撑沉重的脑袋。各种角龙都有排列方式不同的角，怪异程度也只不过近似当今的犀牛角。

鸭嘴龙是一种众口一词认为与鸭嘴兽极为相似的恐龙，一直被描绘成半身浸在沼泽之中、嘴里塞满杂草的怪物；其实也没有人类首次为它塑造的形象那么离奇可怕。它的面肌包裹着大部分长长的下颚，看上去更像羚羊。人们曾经发现过木乃伊化的鸭嘴龙遗体，完整的保存着革状的皮肤。木乃伊化只能发生在极其干旱的条件下，而其胃里的食物也是干旱陆生灌木的枝叶，根本不是柔软的沼泽水草。这些庞然大物成群结队在原野上漫游，以草为食，抵角相戏，就像今天的羚羊一样。头上的饰物并非利器，而是识别和求爱的标志。同羚羊一样，鸭嘴龙也有蹄子。

雷龙和腕龙是否有打滚的习惯也是疑问。它们的骨骼像桁架；靠后腿和胯骨支撑重量，就像架起的一座浮桥。它们确实是在陆地上行走，并以针叶树维生。

有些个体较小的恐龙，如长期以来一直被人当作鸟类的始祖鸟长有羽毛。在对它的结构进行比较解剖学分析后，发现其骨骼与其他较小的恐龙几无二致。有充分的证据证明，它的羽毛是从恐龙赖以隔热的鳞片演化而来的，而不是飞行的工具。这些小个子恐龙可能均赖捕食昆虫为生。

足迹和巢穴的化石证明有些恐龙已具有一定程度的社会组织。某些食草恐龙有聚居地，有的地方曾见到成群哺育的幼龙，周围有一只或几只成年的恐龙负责守卫。长到一定程度并有能力参加群体活动的幼龙，常常将较小的足迹留在中间，周围则是较老恐龙的大足印；这和现代群体生物保护幼畜的方式相似。霸王龙喜欢成双的外出觅食。一些较小的食肉恐龙的足迹显示，它们惯于成群结队。

至于深夜播放的科幻恐怖片中，经常出现的拖着尾巴的笨拙步行巨兽，它们的骨骼结构和足迹都说明，有力的双腿和尾巴可以维持平衡，行动起来奔跳迅疾，不亚于短跑健将。即使最重的四足角龙，也能像犀牛一般地奔跑。

在这些“可怕的巨蜥”中，最古怪的要数有巨大头盖骨的狭眼龙（*Stenonychosaurus inequalis*）了。其立体视觉能力（stereovision）和可以转向的足趾，说明它们已属智力相当发达的种属。巴克在“科学美国人”杂志上发表过一篇题为“恐龙复兴”的文章。其中说道：“当恐龙于白垩纪末期突然灭绝时，它们并不是一个日暮途穷的、业已失去进化机会的衰败群体。相反，它们是茁壮而且在不断进行分异的种群，形成了许多种拥有巨大脑部的食肉动物，具备当时有史以来最发达的智力。”

总而言之，恐龙是当时最先进的动物。它们机智的选择各种生活方式适应环境；有的捕虫，有的食草，有的吃肉。既有一般种，也有特化种。个体有大有小，居住地也各异。它们横行了16500万年，却并未显示出任何衰败的迹象。

菊石、箭石和厚壳蛤等，也延续到新生代初期才告灭绝。菊石在整个中生代都生机勃勃，延续了大约两亿年。它们是在大海中自由游泳的头足类，是乌贼和章鱼的亲戚。螺壳小者如钱币，大者如车轮，藉螺壳中央触角往前推进，四海遨游，食肉为生，所以化石遍及世界各地。与菊石的辉煌历史相比，箭石简直是托儿所里的幼儿了。它们是从白垩纪才出现的；因为受生活习性的限制，化石的分布颇受局限。但在喜欢居住的环境里，如沉积白垩的海域中，它那笔杆状的壳体可说俯拾皆是。

厚壳蛤灭绝时，无疑也正处于其演化的颠峰时期。厚壳蛤属于双壳类，像牡蛎一样附着在海底生活。种数和个体数量之多，令人咋舌。厚壳蛤是当时重要的造礁生物，在热带海域居主导地位，与现代珊瑚相仿佛。它们在一个地点持续生长可达几百万年之久；藉着介壳堆积作用可达水深数十公尺处造礁。若是海平面上升造成造礁的厚壳蛤群落死亡，在海水回落变浅后又会为新的群落所取代。在一个地点持续生长5000万年的厚壳蛤礁体可达数百公尺厚，是油气的良好储集层。

以浮游生物而言，中生代结束之后，就再也没有出现那么种族兴旺的景象和令人惊叹的再生产能力。在白垩纪最晚期的海相地层中，一立方公分沉积物中的浮游生物，往往数以百万计甚至数以十亿计；巴黎盆地就是如此。不管如何解释，在浮游生物的演化史上，它们曾盛极一时，不久又几乎灭绝。从那以后，就再也没有恢复当年的气势。

莱伊尔和达尔文乃至随后的多少代科学家，并没有本世纪下半叶的许多更精确的研究作为利器。因此，如果他们以为那些“石化了的蜥蜴”只是一些步履蹒跚、日暮途穷的笨虫，而菊石早就在逐年减少，或者根本没有想到浮游生物，那是可以原谅的。即使以现代的先进知识，对于菊石和恐龙究竟兴旺抑或衰败，也难定论。但是，所有这些争议都无关科学家已经认定的事实，那就是在中生代末期所有的生物种中，75%的种再也没有出现在以后的化石纪录中。其中既有大型动物，也有小动物；既有植物，也有动物；既有陆生生物，也有海生生物；既有到中生代末期已繁衍几亿年的生物，也有刚刚达到演化高峰的新种。

不寻常的事情需要不寻常的解释。因为实在无法将成千上万不同物种的灭绝看作一种偶然的巧合。毫无疑问，最容易的解释莫过于莱伊尔和达尔文提出，并为尔后的渐变论者热烈支持的假说：中、新生代之间存在着一个至少长达一亿年的沉积间断。如果它的地质纪录未遭侵蚀，我们必定能找到各种缓慢的正常过程来解释这么多生物的灭绝。

那么，地质纪录中究竟有没有这样一个间断呢？

第三章 古镇揭秘

我于 1953 年在加州大学洛杉矶分校获得博士学位，1954 年春到休斯顿的壳牌石油公司研究室工作。到职不久，就有一位休斯顿大学的朋友邀我午餐。他告诉我，休大地质系要扩编，正在讨论新职位的申请者。他不无自豪地告诉我：“斯腾策尔(Heinrich Stenzel)博士将出任地质系的新主任。”

斯腾策尔原籍德国斯台丁(Stettin)。经济大萧条时期在德州经济地质局任职。几十年后，终于成为一位卓然有成的古生物学家。他是晚中生代和早新生代海相无脊椎动物的专家，曾任美国古生物学会主席。有这么一位知名科学家挺身而出扶植休大地质系，我的朋友是应当引以为傲的。

可惜好景不长。斯腾策尔这位受过普鲁士教育的终身公务员惯于发号施令，但是这种管理方式在大学是行不通的。在高等学府里，散漫而随心所欲的学术自由是教师的最高理想。于是系里的一批青年淘气鬼发动了一场政变，导致斯腾策尔博士不得不辞职他就。斯腾策尔在壳牌石油公司有许多朋友，颇为博士受到的不公正待遇忿忿不平，于是请他来当我们的顾问。缘此，我才有机会了解到白垩纪—第三纪界线事件的争论是何等激烈。

那时，我在壳牌公司的具体任务是研究德州海滩砂粒的来源。对于粗枝大叶的观察者来说，这些砂粒似乎是从海中冲来的，但事实却恰恰相反，它们是先从陆地上剥蚀下来，然后又冲到海滩上来的。因此它可以来自遥远的内地、来自不同年代的岩石。加尔维斯敦(Galveston)海滩的大多数砂粒来自内地的白垩纪和第三纪岩石。因此我的上司决定，要我和斯腾策尔到东德州去作一次地质旅行。

从休斯顿驱车到东德州路途遥远，但我们谈谈说说，并不感到乏味。博士健谈而善辩，他选择白垩纪—第三纪界线的争论作为谈话主题。这条界线标志着以恐龙为特征的中生代的终结，以及以哺乳动物主宰世界为特征的新生代的开始。

争论地质界线的确切位置，向来是地质学家的一大乐事。T.C. 张伯林(T.C. Chamberlain)是本世纪初芝加哥大学的一位名教授。他认为，一些巨大变革曾多次打断地质历史。在划分地质历史时，这些间断是最好的自然标志。在他看来，中生代末期曾发生激烈的运动，致使恐龙和菊石全盘灭绝。但是，我在俄亥俄州立大学念书时的老师斯皮克教授持相反意见。这位莱伊尔思想的忠实信徒时常告诫我们，诸如“灾变”和“革命”之类的思想已经严重危害地质学，应当从所有的教科书中彻底清除掉。他坚信，那些显著的变化都是连续的，从中生代到新生代，化石纪录中有三次动植物组合的更迭。与多房室鹦鹉螺有血缘关系的硕大而美观的软体动物——菊石，在马斯特里奇期末期首先灭绝。另两次变化发生稍晚，出现植物组合和脊椎动物的更替，而淡水软体动物却未发生显著的变化。根据这种观点，斯皮克坚持所有地质单位纯粹是人为的划分。在他赠我的“犹他州中部地区晚中生代和

早新生代史”一书中，斯皮克特地在一些段落下面作了记号，以引起我的注意。其中一段是这样写的：“一般人根据化石纪录的某种显著变化划分白垩纪—第三纪的界线，但是不能排斥这种看法纯属谬见的可能性。坦率地说，最好把这种划分看作一种因人而异的观点。”

我是好学生，也是导师观点的忠实信徒。于是在与斯腾策尔的辩论中引用了这一思想。这样作的结果，无异于在斗牛场中挥舞红布；博士勃然大怒了！

“你对化石几乎一无所知，年轻人！”他吼道，“使你五体投地的导师对古生物学也所知无几！”他说，最近完成的全面调查结果无可置疑。斯皮克把菊石的灭绝排在恐龙之前，但斯腾策尔却告诉我二者是同时灭绝的。他解释说，斯皮克把恐龙的灭绝放在后面的达宁期晚期是一种司空见惯的错误。

“如果中生代确实是自然结束的，那么为什么有那么多争论围绕白垩纪—第三纪的界线问题呢？”我问道。

“我必须给你上一堂地质学历史课。”斯腾策尔答道。“那都是一位名叫德索（Eduard Desor）的法国人招来的麻烦。”

莱伊尔正确的把荷兰马斯特里奇镇附近的白垩层划归白垩纪最后的一个地质时期，顶部标志着白垩纪的终结。这一沉积层所代表的时代就称为马斯特里奇期，即白垩纪的最后一个期。至此，事情本已告一段落，是德索引起了麻烦。1846年，德索到史蒂文克林特村（Stevn's Klint）附近的哥本哈根南海岸进行地质旅行。顺便提一句，德索并非法国人，而是在德国出生的瑞士人，斯腾策尔记错了。

当地的沉积层序包括四个单位：底部是一层白垩，顶部是两层石灰岩。二者之间是暗灰色的薄层黏土。因为其中发现了不少鱼骨头化石，故称鱼黏土。白垩和石灰岩是由碳酸钙质的生物介壳和死后搬来的海相生物骨骼组成的。然而黏土的成因却与生物无关，是由陆源或来自外太空的极细颗粒物所组成。

早在20年前，丹麦软体动物专家福希哈默（Johann Georg Forchhammer）就研究过了史蒂文克林特村的四种沉积物。根据两层石灰岩中，下面一层较老石灰岩中的软体动物化石，他认为应属第三纪，即新生代的早期。然而，德索是一位棘皮动物专家；棘皮动物包括海胆、沙海胆、海百合、海星及其他呈五轴对称的海生动物。他发现下层石灰岩中的许多棘皮动物种属，与白垩纪种属极为相似，因此应属中生代而不是新生代。他把包括鱼黏土及下伏白垩层在内的这一段沉积物命名为达宁期，作为中生代的最后一个期。德索犯了一个粗心大意的错误：他所鉴定的棘皮动物属的化石，虽然确实生存在白垩纪，但并不属于同一个种。之后，许多古生物学家又进行了大量研究工作，发现鱼黏土上下的棘皮动物有显著的变化。黏土层以下的动物群属白垩纪，而黏土层以上的动物群属第三纪。德索将白垩、鱼黏土及以上的石灰岩

笼而统之都归入达宁期，是个不幸的错误。鱼黏土中除了据以命名的鱼骨外，几乎没有动物遗骸。而在鱼黏土之下的白垩层中，却含有与上覆的石灰岩中完全不同的动物化石。白色白垩层中的菊石、箭石、厚壳蛤及其他典型的中生代介壳动物化石，在其他地方的马斯特里奇期沉积物中也屡见不鲜，但在鱼黏土之上的达宁期石灰岩中却全然不见踪迹。

对斯腾策尔这样程度的古生物专家来说，人人都知道德索犯了大错。鱼黏土层之下的白垩应属马斯特里奇期。重新定义后，达宁期的直接含义是第三纪的第一个期，以最早的第三纪动物为特征。如果德索是一个菊石专家，或者熟知软体动物、微体化石或超微化石的专家；如果他把棘皮动物鉴定到种而不是粗粗的划分到属，他就不会把这些不同门类的生物划归同一个世代。按照现在的认识，达宁期是指鱼黏土及其上覆的石灰岩所代表的一段时间。生物的巨大变化，发生在马斯特里奇期最晚期白垩与达宁期最早鱼黏土之间，这是地质历史上最引人注目的巨变之一。然而，德索造成了混乱，谬论流传日久，致使斯皮克等人把菊石的灭绝放到马斯特里奇期，而将恐龙的消亡放到了达宁期，搞错了它们的时代关系。

斯皮克也是“地质纪录缺失论”的信徒。在达尔文的《物种起源》发表百年之后，斯皮克写下了如下一段文字，表达了他的信仰：“在化石纪录中，许多动物群都是突然出现的，并表现出很高的发展程度，而无始祖群类可寻。这就使地质纪录的不完整性更为可信。认识到这种不完整，就不会坚持生物演化速度发生重大变化的观点了。”

我向斯腾策尔转述导师的教导，又引起了他的一番议论：“是的，许多动物群确是突然出现的，但并非因为地质纪录不完整，而是因为它们确乎是突然冒出来的。”

斯腾策尔承认，化石能否保存确有随机的因素。历史上存在过的生物中，只有极少数能在其身后留下印记，但是微体化石的纪录却十分的完整。每一立方公分的深海沉积物中包含着成千上万的有孔虫（foraminifera，一种单细胞生物）骨骸。曾与斯腾策尔共事的奥斯丁地调局的普露梅（Helen Jeanne Plummer）在1931年首先发现这种化石。而在马斯特里奇期末期，有孔虫的球截虫（Globotruncana）属所有的种一下子全部灭绝了。达宁期最早期沉积物中含有全新的有孔虫组合，看上去有些发育不良，但日后即成为现代海洋有孔虫的先驱。

三天时间很快就过去了。东德州的地质旅行即将结束。在我来说，与斯腾策尔博士的争论，只不过是一次智力训练。由于我对这一主题本不熟悉，又听说博士在管理工作中有武断和教条主义的倾向，我怀疑他在科学判断方面亦然，因此对他所说的那一套总是将信将疑。而且我还有许多其他悬而未决的问题有待研究，所以在那次旅行以后的二十多年时间里，我再也没有涉足界线问题的讨论。但斯腾策尔并未搁下这个问题；他劝说他在休斯顿大学的第一位研究生贝尔格伦（Bill Berggren），以研究白垩纪与第三纪界线

为论文题目。

其时，贝尔格伦在壳牌石油公司的实验室里当技师，一边工作，一边上夜大。取得学位后，被斯腾策尔送到斯堪的纳维亚并研究马斯特里奇期和达宁期的有孔虫。

有孔虫化石的启示

有孔虫是法国古生物学家奥尔毕尼 (Alcide Dessalines D'Orbigny) 于 1826 年首先发现的。奥尔毕尼曾将有孔虫误认为一种小型菊石。因为其壳体与菊石的壳圈和房室结构极为相似。当老房子过于拥挤时，人们常常在外面增建一套新房。有孔虫也是一样，习惯于在老的房室外建造更大的新房室。新、老房室呈螺旋状或行列式排列。有孔虫的名字就是由“相邻房室间的小孔”而来。

对有孔虫活体的研究发现，它们并非软体动物中的侏儒，而是一种单细胞生物。有一些种属择居海底，称为底栖有孔虫；另一些种则生活于大洋的表层，称为浮游有孔虫。planktonic 的意思是“漂浮的”生物。其实此名欠妥，因为有孔虫是一种浮游的动物，而非浮而不动或随风漂流。

有孔虫的个体很小。虽然大的壳可达 5 公分，但通常都小于 1 公厘。个体较大的多属底栖型。由于其壳体清晰，易于观察，所以研究颇详。有孔虫化石在早寒武世的古老岩石中已经迭有发现，但大型的底栖属货币虫 (Nummulites) 却仅见于第三纪地层。上世纪中期的科学家即已知道，货币虫是第三纪地层的标志，就像菊石是中生代地层的标志一样。

不用显微镜就无法观察浮游有孔虫大小。不同种间的鉴别标志极为细微。但是当贝尔格伦于 1957 年被派往丹麦研究德索的“达宁阶” (Danian terrane) 时，筛选有孔虫的技术已颇发达，种的分类命名系统亦已大致建立就绪。因此，贝尔格伦才能对达宁期沉积物中的浮游有孔虫进行有系统的研究。为了对比，他从日本、西非、苏联、瑞典、格陵兰、墨西哥及美国的墨西哥湾、大西洋沿岸以及太平洋沿岸采集了不少样品。到 1960 年，他已掌握足够的资料，足以在国际地质大会上宣布他的研究成果：“在丹麦和斯堪的纳维亚的马斯特里奇期中，不存在第三纪的浮游有孔虫种群。在作者研究过的其他马斯特里奇期地层的动物群中，也未发现确凿无疑的第三纪分子。”他还提到他所谓的“地球科学中的一大难题”：白垩纪有孔虫的壳体形态与第三纪的迥然不同，其间必须有相当长的时间才能弥合这两个时代生物演化上的差距。

然而，这两个时代的沉积物之间，只有一层从未发现有孔虫化石的鱼黏土。由于贝尔格伦受到莱伊尔和达尔文关于白垩纪与第三纪之间存在间断的思想影响，也认为有孔虫在演化纪录中有一段缺失，但他无法知道缺失的时间有多长。地层单位的放射性测年只能说明间断不像莱伊尔所说的那么大，

不会达到几百万年。那么有无稍短些的间断呢？

名闻遐迩的古比奥

为了寻求这一问题的答案，地质学家纷纷奔赴意大利的古比奥（Gubbio）。古比奥是一个中世纪的小镇。从阿西西（Assisi）的狭窄街道上蜂涌而出的摩托车队，常常忽视指向古比奥的标有“艺术之城”的路标。古比奥的壁画名闻遐迩，但是，在为圣方济而建的修道院中欣赏过乔托（Giotto）的作品之后，是不会有绕道到古比奥的地方教堂去瞻仰其祭坛壁画的。然而，古比奥已经成为地质学家的圣地。在镇外称为“红色钙质页岩”的沉积序列，提供了白垩纪—第三纪界线的最佳剖面，其中留下了中生代过渡到新生代的纪录。

这种“钙质页岩”是特提斯海（Tethys Sea）的沉积物。而所谓特提斯海，就是现代地中海及其东面的黑海、里海和咸海的前身。大约 1500 万年前，地壳运动使一部分深海底上升，形成意大利的亚平宁山脉。经过长时间的剥蚀作用，中、新生代的沉积物，包括“钙质页岩”在内，现在都已露出地表、在路边就不难采到海洋生物的化石。就在贝尔格伦的有孔虫报告发表几年之后，又有两位微体古生物学家启程去古比奥研究有孔虫的演化历史。一位是普茉莉·席尔娃（Isabella Premoli-Silva），她是来自杜斯康尼（Tuscany）的一位红发伯爵夫人，曾在米兰攻读古生物学。另一位是她的瑞士同行路特巴赫（Hans Peter Luterbacher）。他们共同研究了一个完整的沉积序列，以便揭示有孔虫演化上显著的不连续性。他们终于在古比奥附近的“钙质页岩”中找到了，说明白垩纪末期必定发生过什么。露头与普茉莉·席尔娃的故乡近在咫尺，他们都感到兴奋不已。他们的联合报告发表于 1969 年，证实了贝尔格伦的发现并提供了许多细节。白垩纪末期的最后动物群包括歧异度颇高的三科浮游有孔虫，即球截虫、红抱球虫（Ruboglobigerinids）和异卷虫（Heterohellicids），这些“浮游生物”有几十种之多。它们在温暖的白垩纪海洋中安居，已达 500 万年或 1000 万年之久。

显而易见，自白垩纪中期以来，有孔虫的演化极其迅速，至白垩纪后期达到顶峰。直到界线附近突然灭绝为止，一直不见衰败现象，也不见有种属的减少。界线像刀切的那么分明。一过界线，所有的白垩纪有孔虫都荡然无存。上述三类有孔虫中所有的属、种统统消声匿迹，在新生代动物群中从未再现。

古比奥剖面上的有孔虫多得难以胜计。有孔虫骨骼与超微浮游生物的钙质分泌物，一起构成了古比奥的白垩纪最晚期沉积物。这些沉积物石化以后称为石灰岩，是一种由介壳碎屑组成的白色岩石。直接覆盖在石灰岩顶面之上的是一层黏土。同丹麦的鱼黏土一样，古比奥的黏土也没有什么化石，因

此看上去像是一种在无生命海洋中堆积下来的沉积物。这层黏土，现在称为界线黏土，夹在中生代最后一个化石层和新生代最早一个化石层之间，在古比奥厚仅一公分。黏土层之上又是石灰岩，就在这一层石灰岩中，普茉莉 - 席尔娃和路特巴赫发现了个体很小的有孔虫化石。

白垩纪的有孔虫显得颇粗壮，直径约为 0.5 至 1 公厘。相比之下，第三纪的最早期种属简直就是侏儒了，个体只有前者的十分之一。新生代最早的一个浮游有孔虫带是古抱球虫带。它们是现代抱球虫最原始的祖先。贝尔格伦和早期的一些研究人员都忽略了古抱球虫，因为它们太小了。古比奥新生代石灰岩的资料表明，新生代有孔虫的演化极为迅速。随着演化程度的提高，个体不断增大，歧异度也不断提高。在界线黏土以上 5 公尺处的石灰岩中，早期那些纤弱的种属就被许多粗壮的浮游有孔虫取而代之了。

路特巴赫和普茉莉 - 席尔娃用极细的筛子而发现古抱球虫，是一大贡献。这一发现质疑了化石纪录的间断。虽然从细小的原始种属演化为粗壮种属的过程极其迅速，但在有孔虫的演化史上，这一过程是相当完全的。

大陆上的浅海沉积序列中，地质纪录的间断屡见不鲜。陆壳的顶部比洋底高数千公尺；但地球内部无休止的变动，既能使陆地不断升高，也可以使陆地沉入几百公尺以下的海底，就像今日的北海和波罗的海一样。除了陆地的升降外，全球海平面也在不断的变化。因此，地史学的教学常常枯燥的重复海水的侵进和退却。海侵时，海相沉积物覆盖到陆相沉积物之上，下伏沉积层受到新的沉积物保护，故一般而言保存完好。海退时，高地遭受侵蚀，沉积纪录遭到破坏。在滨海平原地区，海相沉积物埋藏在当代河流沉积物之下。有朝一日，海水重返，新的海相沉积物又会重新堆积在陆相沉积物或侵蚀面之上。侵蚀面是从前的海相或陆相沉积物遭到侵蚀的证据。因此海相生命纪录的缺失也是确定陆相沉积序列的重要根据。居维叶的那些令人叹为观止的化石标本采自巴黎盆地，而巴黎盆地就是海侵、海退频繁的佳例。由于巴黎盆地在海退过程中多次露出海面，每次泛滥时沉积物都遭到侵蚀，因此地质纪录中不可避免的有许多缺失。

在地球(layer)圈结构中，较轻的陆壳浮在较重的底质之上。后者称为地幔，厚达 2900 公里。由于均衡作用，陆壳无论如何都不会沉到不受风雨侵袭的深海洋底；而在数千公尺海水保护之下的洋底，也只有在大陆碰撞那种极其罕见的事件中，才会上升到地表。因此，最完整的海洋生命纪录都是从洋底取样获得的。这种沉积物称为远洋沉积物，pelagic，源于希腊字 pelagos，意为开阔海。现在，远洋沉积物的样品是用深海钻探船取得的。但在进行古比奥的研究工作时，深海钻探尚未实施。七年之后，人类才实现第一次深海钻探航行。幸运的是，亚平宁山脉的造山作用将深海沉积物挤到了陆地上，并在古比奥露出地表，为人们提供了得天独厚的研究条件，使路特巴赫和普茉莉 - 席尔娃有缘取得白垩纪—第三纪界线附近连续的生物演化纪录。古比奥地区在最后一次上升运动以前一直浸在海中，侵蚀作用因此

减弱，故其纪录保存得格外完整。

然而，连续毕竟是相对的。古比奥的纪录是以日计、以年计、以千年计，还是以百万年为单位的连续纪录呢？以日计的沉积纪录愈来愈罕有。研究潮沟沉积物的荷兰科学家发现了逐日的沉积纪录，并表现出按月重复的韵律性：新月或满月时满潮造成的沉积较重，小潮时沉积较薄。在这种称为潮汐束状体的沉积物中，甚至可以分辨出每月二十八天的回旋；每一个束状体中包含着二十八层日潮沉积物。但在地质纪录中，逐日的沉积纪录实际上是无法保存的。沉积物刚刚停积下来，就被破坏掉了。在偶然情况下，我们也可以得到以年为单位的沉积纪录。例如，苏黎世湖的现代沉积物是纹泥（varves），或称碳酸钙的年层。它反映湖水中藻类在夏季的勃发和冬季的死亡。夏天沉积白色的碳酸钙结晶，冬天沉积纸片状的细碎屑薄层。因此未经扰动的纹泥是沉积作用的年纪录。在湖泊中，各式各样的纹泥并不罕见，但在大洋中却是绝无仅有的。

深海沉积物中有着多种不同类型的韵律层理。遗憾的是我们尚未完全了解其成因，因此也就无法知道这些韵律所代表的时间长度。

人们一直试图得出一个适用于地质历史的年代表。但是，这种努力从一开始就带有臆断的成分。达尔文曾大胆的提出，白垩纪中期距今约为三亿年。这一意见受到了凯尔文（Lord Kelvin）爵士的责难。根据凯尔文的精确计算，地球的年龄只有 2400 万年左右。无论是手算还是凭藉高速电脑，任何数学计算的可信度，都取决于一些最基本的前提。凯尔文的计算，一开始就把基本前提搞错了。现在我们都知，地球的年龄至少有 45 亿年，比凯尔文的估算长 200 倍左右。而白垩纪中期距今大约是一亿年。

达尔文的结论也是错误的，但他的猜测要比物理学家凯尔文貌似严谨的计算更接近事实，至少得到了正确的数量级。

同位素的突破

最终用来测量地质历史的时钟是物质的放射性，因此这种测年方法也称为放射性测年法。同位素的发现带来这项技术突破。同位素是指属于同一元素，即质子数和电子数相同但中子数不等的原子。

由于化学中牵涉到的数字相当复杂，所以直到 1913 年才发现同位素。1815 年，普劳特（William Prout）提出化学元素的原子量应当是整数的看法。这一见解看来合情合理，因为元素的原子量是用它核内粒子数（包括中子数和质子数）来计算的，而中子和质子就是原子总质量的计量单位（电子的质量其实可视为零）。一个具有两个核粒子的原子，原子量应为二；具有三个核粒子的原子，其原子量就是三；道理就是如此简单。但是我们在学生时代作化学实验时，总是为计算氯化钠的分子量伤脑筋，因为氯的原子量是 35.45，根本就不是整数。

哈佛大学的理查兹 (T.W. Richards) 是一位卓越的分析化学家。他于 1913 年以无可辩驳的事实证明元素的原子量不是整数,但是他又发现同一元素的原子量可能有差别。

众所周知,放射性元素发生衰变或分解时,会转变成另一种元素。理查兹发现,铀发生放射性衰变产生的铅,原子量就与正常的铅不一样。这一结果使理查兹十分困惑。但是,年轻的英国化学家索迪 (Frederick Soddy) 提出一个非常高明的办法来解释这一现象。他设想一种元素并非只有一种原子,而是两种或多种同位素的混合物。

同位素一词源出于希腊语,意谓“位置相同”。所谓“位置”,是指元素在化学周期表中所占有的那一个小方格。这种周期表在中学的化学实验室里随处可见,表中的每一个小方格都代表一个化学元素,每一个元素都具有相同的质子数和电子数。同位素发现后,一个方格就要同时代表元素的两种或几种同位素,它们的质子数和电子数虽然相同,但中子数都不一样。例如,氯元素的原子核里都有 17 个质子,但它有两个中子数不同的同位素:一个同位素有 18 个中子;原子量为 35;另一个同位素有 20 个中子,原子量为 37。

氯元素的小方格既是原子量 35 的氯元素的位置,也是原子量 37 的氯元素的位置。氯是这两种同位素的混合物,其中氯 - 35 占 75.77%,氯 - 37 占 24.23%。两种同位素按此比例混合,原子量就是 35.45;这就是电脑发明以前我们在化学练习中时常遇到的麻烦数字。

氯 - 35 和氯 - 37 是稳定同位素。它们会永远保持原子的结构而不变。铀 - 238、铀 - 235 和铀 - 234 是铀的三种天然同位素。但它们不是稳定同位素,而是放射性同位素。放射性同位素经过放射性蜕变,变成一种新的原子,后者称为前者的衰变产物。铀 - 234 和铀 - 238 衰变产生铅 - 206,铀 - 235 衰变产生铅 - 207。一般的铅不仅含铅 - 206 和铅 - 207,而且含有铅 - 204 和铅 - 208。因此其原子量与单由放射性衰变产生的铅有相当大的差异,这就难怪理查兹感到困惑了。

人们看到石英或自然铅等岩石中的天然矿物,往往误以为它们本来就是固态物质,其实不然。它们有的是从冷却到一定温度的熔融岩浆中结晶出来,或是从溶液中沉淀出来的。矿物结晶时,某种放射性元素,例如铀,可能被结合进去。随着岁月流逝,放射性元素不断衰变,矿物中就积聚了原本不存在的衰变产物。因此,在含有放射性元素的一些特殊矿物中,放射性同位素与其衰变产物的数量比,取决于矿物首次结晶后就开始发生的衰变作用时间。时间愈长,放射性元素铀愈少,而其衰变产物铅则愈多。母元素衰变掉一半所需要的时间,称为该同位素的半衰期。铀 - 238 的半衰期为 40 亿年。由于其半衰期只是略小于地球的年龄,故地球在 45 亿年以前形成时储存在矿物中的铀 - 238,几乎还有一半保存着,而另一半则已变成铅 - 206。再过 45 亿年,残留的铀 - 238 又有一半转变为铅 - 206。那时,铀 - 238 和铅 - 206 的比值为一比三。由此可知,矿物中铀同位素与其衰变产物铅同位

素的比值，可以显示它的放射性年龄。同样的，钾的同位素钾 - 40 可以衰变为氩 - 40，矿物中钾 - 40 与氩 - 40 的比值也可以显示矿物的年龄。

至于选择何种元素进行分析，则取决于岩石的矿物组成。哪一种元素的含量最高，就用它作为测年的时钟。钾/氩比常用来测定含有海绿石的沉积物年龄。海绿石是一种常见的从海水中结晶出来的沉积矿物。火山岩中含有钾的云母，故钾/氩法也常用来测定与沉积岩成交互层的火山岩年龄。

同位素的定量分析则使用质谱仪。顾名思义，所谓质谱仪是一种按照同位素的质量分离原子的设备，可利用原子在电场或磁场内“弹开”的幅度把原子分开。以下比喻勉强可说明质谱仪的原理：轻同位素好比是“弹跳力”较重同位素强的运动员；弹跳力愈大，它在磁场内的偏离幅度也就愈大。利用这一原理，就可以把各种不同质量的同位素依序分开，并聚集下来计数。质谱仪发明于 1918 年，以后不断改进。时至今日，只要几微克 (microgram) 的样品就可以精确分析同位素的重量供测年之需了。

然而，“精确”一向都是相对的，作蛋糕所需的计量精度与化学分析的精度要求不能一概而论。霍姆斯 (Arthur Holmes) 是测年领域的先驱者，建立了地质年代的第一个数字时间表，并在 40 年代发表。近半个世纪以来，霍姆斯的数字几经修正，但并无重大变化。例如，霍姆斯测得白垩纪末期的年龄为 7000 万年。而现在公认的数字为 6500 万年。对于古比奥剖面白垩纪—第三纪界线附近的远洋沉积物，绝对年龄的偏差已经减至数百万年，因此界线年代最恰当的数字是 6500 万年，前后误差 200 万年。

如果我们知道沉积速率，就可以更精确地确定沉积层顶、底板之间的时间间隔。当普茉莉 - 席尔娃和路特巴赫开始研究工作时，白垩纪和第三纪地层中的许多沉积夹层和火山灰层均已作过放射性同位素测年。知道两个经过放射性测年的层位之间的时间间隔后，用它来除沉积厚度就得出平均的沉积速率。地质学家使用这种方法，得知海洋石灰岩的一般沉积速率为每千年数公分，而海洋黏土的沉积速率只有每千年一公厘。古比奥的纪录显示，白垩纪的有孔虫是在厚仅一公分的界线黏土所代表的那段时间中灭绝的。如该黏土层是在开阔大洋中按正常沉积速率所堆积，虽然我们无法肯定这一事件究竟发生在 6500 万年前，抑或早一二百万年还是晚一二百万年。那仍不难算出白垩纪的动物群大约在一万年左右灭绝殆尽。

路特巴赫和普茉莉 - 席尔娃猜测，白垩纪末期生物的死亡和第三纪生物的出现都是突如其来的。但他们无法肯定古比奥界线黏土的纪录中是否还有不易察觉的间断，因此不敢如此公开宣称。大洋底水的运动能侵蚀海底沉积物，他们在意大利北部白垩纪—第三纪界线附近的动物纪录中已经发现了这一现象。有几个离古比奥不远的地点，也缺失白垩纪最顶部 (或) 第三纪最下面的有孔虫带。侵蚀掉一公尺黏土就意味着 100 万年的纪录缺失。但是截至 1960 年为止的白垩纪—第三纪地层测年资料都证明，在晚白垩纪和早第三纪之间，至少没有可以称得上“间断”的缺失。白垩纪结束于不到 7000

万年前，第三纪则始于六千多万年以前。即使纪录有间断，也绝对不会超过几百万年。

白垩纪原是根据某些生物的灭绝来定义的。例如，恐龙和白垩纪浮游生物差不多都在白垩纪末期灭绝，但它们是不是同时灭绝的呢？这一个问题并不容易回答。因为恐龙和浮游生物的生活习性完全不同。在陆地和海洋中，含有最后的恐龙化石和浮游生物化石沉积物的放射性年龄也因地而异，从6300万年到6700万年不等。这种差别可以用两种办法来解释：一是那些地点的沉积物年龄确实不同，或者这种差别只不过是测年方法不完善等人为因素影响的结果。恐龙的死亡是否与浮游有孔虫同时，是不是都发生在那些几无生命痕迹的泥尘沉到洋底形成界线黏土，那段千年左右的时期里呢？

第四章 地磁年代

符号 C - 29 - R 并非间谍代号，也不是足球赛的标志，而是“新生代磁性地层第二十九反向期”的缩写。对于回答恐龙与古老有孔虫是否同时灭绝的问题，这一磁性地层期至关重要。

地层学是研究地层或沉积层及其序列关系的科学。磁性地层学是它的一个新分枝；藉着研究沉积时或岩浆结晶时“冻结”在岩石里的少量磁铁矿，来确定地层的时代。我是在 1953 年从朗康 (Keith Runcorn) 的一次报告中，接触到用岩石磁性测年这项知识。当时，我是加州大学洛杉矶分校的中国籍研究生，而朗康是英籍博士后研究人员。说来见笑，我因为一点小小的私怨，而没有去听他的报告。当时，朗康与我都要处理岩石样品，但实验室只有一台大型岩石切片机。这位硬挤进来的英国人原本是学物理的，切割岩石薄片是个生手，而我们这些地质专业的学生却是这方面的行家。朗康有权在晚上使用切片机，但在第二天早晨，我们却不止一次发现锯片断了，所以不得不从换锯片开始一天的工作。此外，身为年轻研究生的我，也颇有一些初生之犊的傲气，总以为只有自己的研究才最有价值。一个连切片机都不会操作的人，还能讲出什么至理名言吗？我当时这样想。但是，事实证明我错了。我从一位与会的同学那里知道，朗康那天的报告涉及岩石的天然余磁，对地质学家是一个极重要的命题。

磁极倒转现象

所有的岩石都含有磁铁矿之类的磁性矿物，古人制造的第一个罗盘就是用磁铁矿为材料。这些微小的磁性体只要有机会发生自由运动，就会按照地磁场的方向定向，像铁屑按照磁铁的磁场定向一样。当沉积物发生沉积或火成岩从液态冷凝为固态时，磁铁矿的小颗粒都会定向。通常它们是指向地理北极附近的磁北极。因为磁场像是环绕一根贯穿地球南北的磁棒而形成，因此有弯曲现象。在北半球，磁铁中的指北极都向下倾，而在南半球则上翘。这倾斜的角度称为磁倾角。

在测定火山岩的磁性时，用来测量天然余磁强度和方向的仪器初试锋芒。法国地球物理学家布容 (Bernard Bruhnes) 于 1909 年开始研究法国中部玄武岩流的天然余磁，研究区位于罗亚尔 (Loire) 南部高原。大多数样品的磁性与预测结果相符，但有些样品的磁性却是反常的，因此布容吃了一惊。这些岩石里小磁铁的指北极不是指北，而是指南；向上翘而不是向下倾。也就是说，它的定向与现代磁场正好相反。

等到 20 年后的 1928 年，松山基范对日本 200 万年以来的火山岩进行了类似的测量，也发现了反向的天然余磁。异常磁性都出现在一组较老的玄武岩中，而较年轻样品的磁性方向却都与现代地磁场一致。他突发奇想，大胆

提出地球的磁极曾经倒转过：在某些时期，地球的磁北极曾位于地理南极附近，而磁南极则靠近地理北极。松山推测，这种倒转发生在第四纪的某一时期，大约在数百万年以前。朗康在报告中强调，如果松山的设想不谬，那么地质学家就有了一种新的方法来分辨倒转前后的岩石。如果我去听朗康的报告，我可能会嘲笑他的自信；因为地磁极曾经发生倒转的想法太异想天开了。

没有多少科学家相信松山的解释。连他的同胞也不例外。上田诚也当时还是一个刚出校门的地球物理专家。他不但排斥松山的荒诞想法，还试图为磁性倒转这一毋庸置疑的事实找出一种较可信的解释。根据他的实验研究，上田提出了一种自倒转现象。到 1958 年，他已证明在某些特殊情况下，可以用人工使岩石获得反向磁性。上田的实验很好，但没解决问题。布容和松山的样品火山岩磁性的确倒转过，因此要不是这些岩石经历过上田的特殊处理，就是地球的磁极在某些历史时期确曾发生过 180 度的大倒转；二者必居其一。

有一种方法可以检验这两种想法孰是孰非。如果松山的主张不谬，那么，反磁性的岩石都应当是在历史上的某个特定时期形成的，年龄应当接近。而其年龄又可以用放射性测年的方法确定。

火山岩含有放射性钾，所以是测年的好材料。时至 1960 年，放射性测年技术已经取得了长足的进展。加州和澳洲的研究队伍陆续发表了年轻玄武岩可靠的年龄数据，数据证明了松山的推测。所有反极性的玄武岩都是在新生代的上新世晚期和更新世早期形成的，其年龄数据集中在 240 万年到 70 万年之间，似乎说明在这段时间内确曾发生过地磁极的倒转。为了纪念松山的贡献，后人把这一磁性地层期称为“松山反极性期”。松山期之后，地球的磁场一直保持现状，称为“正极性期”，延续至今长达 70 万年，为了纪念布容，称为“布容期”。因此，在朗康的报告之后不到十年的时间里，地质学家的想法发生了 180 度的大转弯。事实证明，松山“荒诞不经”的想法竟是对的。他的名字已经在磁性地层表中广为引用，也因此而为后人垂念。

地磁极性倒转现象得到证实，预示着更多的地磁期尚待发现。我们现已确知，地球的磁场是不稳定的。在地质历史上，地球的南北磁极曾经历了多次正向期和反向期的交替。反极性期的出现在时间上并不规则，每一次倒转大约需要几千年才能完成。在布容期以前有很多正极性的岩石，松山期以前也有许多反极性的岩石。

人们总是天真的认为，地磁场是由埋在地球内部的巨大固体磁铁引起的。从物理学的观点看来，要使这样一个大磁铁倒转根本不可能，因此直觉上并不认可这一想法。其实地磁场的起因与这种设想的大磁铁风马牛不相及。因为在地球内部的高温状态下，任何固体都将失去它的磁性。根据现代的认识，地球的磁场是一种电磁场，是由带电粒子在地球内部熔融的铁核心中发生流动而产生的，就像电流流经线圈时产生磁性一样。因此，地球的核

心更像一部巨大的发电机。由于地球液态核心的运动受到地球自转的影响，所以地球的磁极都十分接近地理极。计算还显示，地球液态核心的随机运动，与大气气旋中的紊流非常相似。只要达到一定的临界条件，就能引起地磁场的倒转。地磁场的极性倒转是一种真实的物理现象，而不是什么超自然的奇迹。

大洋底的磁性条带

正当人们在实验室里忙于测定陆地岩样极性的时候，斯克里普斯 (Scripps) 海洋研究所的地球物理学家却正在船上调查太平洋底的剩余磁性。当他们把测量结果绘到图上时，发现了另一种奇怪的现象：调查区域内的地磁场强度呈现一种特殊的规则分布，狭长的强磁性海底条带与弱磁性的条带相间排列。条带的宽度从几公里到百公里不等，长度可达数千公里。后来，他们更发现全球所有的大洋中都存在这种条带。

斯克里普斯海洋研究所在 50 年代末期出版了第一张海底地磁图，但是研究这一问题的地球物理学家拉夫 (Art Raff) 和瓦克奎尔 (Vic Vacquier) 依然找不到适当的解释。人们也许会想，高强度的磁条带下面可能有磁性玄武岩的海底小脊，但是水下测深资料显示磁性与地形并无相关。海底山脉既可与高强度的磁条带一致，也可与低强度的磁条带相吻合；海底平原亦然。但是这一疑团不久就迎刃而解了。斯克里普斯的海磁图出版后不久，剑桥大学的瓦因 (Fred Vine) 开始念研究所，并很快找到了问题的答案，在地质学史上留下了一段佳话。

我在 1966 年第一次听到瓦因的名字。我们两人都是那一年的美国地质学会旧金山年会重点报告的候选人，结果瓦因获胜，并在年会上作了至今举世闻名的有关海底扩张的报告。落选的失落感使我郁郁寡欢，因此连瓦因的报告会都没有参加。如果我当时没错过那次机会，也许有可能立时加入瓦因激发的地学革命，而不必等到三年之后由我自己的工作证明这一思想时才迎头赶上。

我最终是在若干年后结识瓦因本人。当时我以苏黎世联邦理工学院地球物理教授遴选委员会主席的身份，邀请他访问苏黎世。谈话中他告诉我，有两条思路使他受益匪浅，得以一举解开磁性条带之谜。出发点是魏格纳在 20 年代提出的大陆漂移说。魏格纳搜集了许多看来不可思议的事实，而惟有承认大陆变位，才能解释这些事实。但是，整个地球都包裹着一层固体地壳，大陆怎么能漂移呢？

普林斯顿大学的海斯 (Harry Hess) 最先提出海底扩张的观点之后，瓦因从不同角度审视了观察的事实，结论是大陆并没有主动发生漂移。但是如果大陆之间的海底发生扩张，大陆也会随之发生移动。玄武熔岩不断沿着海底扩张轴向外喷溢，在中央不断形成新的洋壳，势必不断地把老的洋壳推

向两侧，大洋两边的遥远大陆当然也要跟着运动。这些年来，已经有许多资料证明海底扩张确是事实。瓦因的理论不仅解释了大陆之间的显著漂移，而且也归纳出大陆碰撞的逻辑结论。现在我们知道，像阿尔卑斯山脉、亚平宁山脉和喜马拉雅山脉这样的巨大山系，都是由大陆碰撞推挤而成的。

瓦因的理论还有第二层含义。如果确实存在过地磁场的倒转，而新喷出的玄武岩又必须与当时的地磁场保持一致，那么每一次地磁场的变动都将依次记录在扩张轴两侧的海底中。而且每次磁性倒转后沿着扩张轴形成的新洋底沉积物，其极性应当与倒转前形成的沉积物相反。中央的新生洋底不断把两侧的老洋底推开，无异于在洋底上不断加添新的块段或条带。瓦因用非常简单的算术方法解释了各条带磁性强度的不同：形成于正极性期的条带与现代的正磁场一致，故而呈现纪录中见到的强磁场磁度；形成于负极性期的条带，记录到的磁场强度，应为现代正磁场与当时反磁场的差值，故呈弱磁场强度。磁场强度强弱相间的条带，就好比是记录地磁场倒转历史的一条磁带。不言而喻，磁条带的宽度与极性期的持续时间有关。极性期的持续时间愈长，所形成的新海底就愈宽。它按照相同的方向发生磁化，我们就会记录到一条较宽的磁条带。甚至可以达到极大的宽度，这就是所谓的“平静带”。如果磁极倒转频繁，则将形成一系列的窄条带。如果海底扩张的速度是恒定不变的，那么条带的宽度将与其形成时的极性期长短成正比。

1963年，瓦因与他的导师马修斯(Drum Matthews)合作发表一篇论文，公布了这一思想。那时，地球科学家已经用放射性测年的方法测定了最新四个极性期的持续时间，全部时间长度约为500万年。从现代往前回溯，布容期为70万年，其他三个极性期分别为1.7, 0.9和1.7个百万年。如果瓦因和马修斯的理论不谬，那么最靠近扩张轴的四个磁性条带的宽度比应为0.7:1.7:0.9:1.7。从斯克里普斯研究所出版的图上得到磁条带的宽度资料，瓦因证明实际资料的确与预测一致。太平洋底和大西洋底的磁条带宽度都有相同的比例。从而证明，至少在过去的500万年内，两大洋的海底是以恒定的速率扩张的。

瓦因进一步推论，如果海底扩张速度始终保持恒定，只要用扩张速率除以该点到海底扩张轴的距离，我们就可以确定海底任何一点的年龄，假定海底扩张速率为每年一公分，该点距扩张轴的距离为100公里，其年龄应为100公里除以一公分/年，即1000万年。这一方法具有广阔的应用前景。我们可以用海底磁条带的宽度来计算地磁场倒转开始的时间和持续的时间，而限于最新的四个。拉蒙特·多尔蒂(Lamont Deherty，以下简称拉蒙特)地质实验室的海尔兹勒(Jim Heirtzler)及其同事利用已完成调查区的资料，于1968年建立了8000万年以来的磁性地层时间表。

令人遗憾的是，我未能亲自参与这些扣人心弦的海上发现。60年代时，我的工作是在陆地上调查石油。既然不熟悉事实，也就不会了解其涵义。我漠视这些发现，依然自以为是的认为极性倒转和海底扩张的思想都是无稽之

谈。

1967年，我接受了内陆国家瑞士的聘用，命运之神又把我从美国赶到了欧洲。翌年，我却从瑞士接受了海洋戡查的邀请，在“联合海洋机构地球深部取样计划”（JOIDES）这个多国调查项目中谋得一职。我在海上的第一次冒险是新实施的深海钻探计划（DSDP）第三航次。这一计划以深海钻探为要务，而这一航次的任务正是验证瓦因和马修斯的理论。

我们的使命是远赴南大西洋，在距海底扩张轴（即所谓大西洋中脊）200、420、500、700、740、1000和1300公里的站位上进行钻探。大西洋这一部分的扩张速度在过去的500万年中为每年二公分。使用扩张速度除距离的简单公式，这七个站位的预期年龄分别为10、21、25、35、37、50和65个百万年。经过两个月的钻探和粗略的船上分析，我们得到的年龄值分别力9、24、26、33、40、49和67个百万年。二者的结果惊人的一致，我的怀疑终于冰释。

我真不愿承认在科学判断中犯了错误，但又别无选择。一种科学理论既要能预测，自然也要得到证实。瓦因和马修斯进行了预测，而其预测得到了令人目瞪口呆的证实。

一年之内，深海钻探结果证明了磁性地层年代表的有效性。下一步要看从水平海底扩张推行出来的极性倒转年代学，与在沉积物纵向序列中根据化石带放射性测年推导出来的年代学是否一致。达到这一目标需要更艰苦的努力，因为只有沉积物和沉积岩具备足够的化石供古生物学家正确测年，但是磁性信号要比首次发现极性倒转事件的火山岩微弱得多。必须发明高灵敏度的仪器才能研究这些更难记忆的余磁，取样技术也需要改进。当时深海钻探的取样技术尚在原始阶段，取得的远洋沉积物样品都是破碎而不完整的。如果不能在洋底获得完整而又未经扰动的钻探样品，我们就无法进行工作。实际上，发明验证垂直沉积序列年代与海尔兹勒的水平时间表是否一致的技术，是13年以后的事。1980年，我领导了深海钻探计划第七十三航次，再一次来到南大西洋研究洋底的年代学。我们发现，用沉积物天然余磁确定的极性期与洋底磁性条带的极性期之间，是完全可以对比的。科学家在这两类资料中，都对地球磁场变换的历史进行了编码。

中生代结束的标志

C—29—R 是这一编码的速记形式。每一个磁性地层期都称为“时”。每一个“时”都有一个数字编号，代表它在磁性地层期的位置。C是新生代的代号，“时”的编号由新到老依序计数。新生代—1（C—1）相当于布容和松山磁性地层期。字母N代表正极性期，R代表反极性期。因此，布容期可简写为C—1—N，而松山期则为C—1—R。新生代—2—N或C—2—N，表示下一个正极性期；当时的磁极位置与现代一致。所有标以N的“时”都相当

于海底的高强度磁条带，形成于正极性期。其间为低强度带，形成于反极性期，标以 R 以示区别。

在沉积序列中可靠的确定“地磁时”，要比从海底水平磁性条带确定“地磁时”困难得多。世界上没有一个地方可以找到从现代开始直到恐龙时代的连续剖面，因此无法从一个地点的顶部开始向下计数直到我们的目的层，而必须根据零星资料，从不完整的序列中找到我们要我的层位。幸好极性倒转的时间间隔是不规则的，所以信号读起来就像摩斯电码。从海底扩张中心向外读，例如：海底 C—25—R 磁性条带是窄的，而 C—26—R 是宽的。再向外数，C—26 是窄、宽；C—27 是窄、窄；C—28 是中、窄；C—29 是窄、中，凡此等等。每一个磁性地层时都有相应的持续时间：如 C—25—N 是短的，C—25—R 是长的。到 C—29 可依次读作短、长，短、长，短、短，中、短，短、中。

事实上，地磁信息要比宽、窄、长、短之类的形容词精确得多。因为磁条带的宽度可以精确测量并用数字表示。如果用黑白条带的图示方法来表示正反极性段，那么所得图谱看上去就像商品条码，很容易用电脑读出储存在这些条带内的信息。同样的，地质学家也能判读出磁性地层系统。早在 1969 年，在我首次参加的南大西洋航次中，我们就已指出，中生代最晚期沉积物可能是在新生代第二十九反向期内形成的。用简化的表达形式，我们可以初步地说，中生代结束于 C—29—R 期。

自从磁性地层学成为科学家的一种测年工具以来，已经解决了古比奥剖面的许多年代学问题；如有孔虫的灭绝时间、恐龙的灭绝时间、这些微小生命与庞然大物灭绝所经历的时间跨度，以及二者的灭绝是否同时等等。1979 年，即古生物学家确定古比奥的白垩纪生物灭绝层位后十五年，地球物理学家洛雷 (Bill Lowrie) 和地质学家阿弗雷兹 (Walter Alvarez) 参加了古生物学家普茉莉—席尔娃的研究组，一起回到她进行有孔虫研究的发祥地，目的是破译古比奥沉积序列的磁性地层学。他们发现富含孔虫的石灰岩过渡为无生命界线黏土的白垩纪—第三纪界线。经古地磁测年后，该层位在磁性地层学序列中的位置确系 C—29—R，从而证实了南大西洋钻探组的初步结论；那是我首度参加的深海钻探航次。我们的意见是 C—29—R 标志着中生代的结束。但是，根据海底扩张理论推导出来的 C—29—R 年龄，是如何与含古生物大规模灭绝证据的沉积物，及其放射性测年结果对比起来的呢？

C—29—R 的弱磁性条带位于远离大西洋中脊 1300 公里处。假设该南大西洋区段的海底扩张速度恒定为每年二公分，那么 C—29—R 的年龄应为 13000 万公分除二公分/年，即 6500 万年。而白垩纪·第三纪界线附近的火山灰层的放射性年龄值为 6300 至 6700 万年，上下误差为 200 万年。6500 万年这一磁性地层学年龄恰恰与放射性年龄的中间值不谋而合，因此这一数字成为中生代终结和新生代开始的最通用年龄。

鉴于放射性测年都有一定的误差范围，因此不能用来测定较短的，诸如数百万年左右的持续时间。然而，磁性地层学却为我们提供了一种测量持续时间的精确尺码。拉蒙特地质实验室的肯特 (Denis Kent) 发现，C—29—R 的持续时间不会久于 50 万年。根据这一弱磁性条带的宽度，肯特算出这一反极性期的精确时间为 47 万年。由于磁性条带所代表的时间间隔，与同一极性期的沉积层所代表的时间间隔是一回事，所以肯特的数字代表了古比奥海洋沉积物中，海相浮游生物灭绝时间的最大限度。

除此之外，科学家还要计算灭绝过程是否包括 C—29—R 时期的全部，抑或仅为其一部分。古比奥的 C—29—R 反极性层序主要由远洋相的石灰岩组成，厚约五公尺。这种石灰岩的沉积速率通常在每千年一公分之数，故该层石灰岩所代表的时间跨度大约为 50 万年左右。然而，灭绝事件的纪录是厚仅一公分的界线黏土。黏土沉积作用一般要比石灰岩慢得多，其速率只有每千年一公厘左右。因此，最合乎情理的估计是，古比奥的海相微体生物是在 C—29—R 的某一段时期，大约一万年左右的时间内灭绝的。借助磁性地层学，现在我们可以认定古比奥的纪录是完整的。即使真有所谓间断，也不会超过几千年。

那么，恐龙的灭绝是否也是在同一短时间内发生的呢？磁性地层学虽然不能提供确切的答案，但却可以使我们更清晰地研讨这一问题的重点。

从含最后一批恐龙化石的砂岩和页岩中，我们已经取得白垩纪末期灭绝事件的大量放射性同位素年龄。这些砂岩和页岩与火山灰成交互层，测年上比较方便。有些样品的资料显示，恐龙灭绝发生在 6700 万年前，而另一些样品的资料则显示，恐龙曾苟延残喘到 6300 万年前，数据因地而异。放射性测年数据的这种不确定性并非分析误差，而可以用恐龙灭绝过程比较缓慢来解释。看来，这一过程至少持续了 500 万年。磁性地层学的发展，至少可以帮助我们缩小恐龙灭绝时间的可能范围。如果所有晚白垩纪恐龙的最后一批遗骸都只存于 C—29—R 沉积物中，那么其灭绝时间将不会久于此极性期的持续时间 50 万年。

但是，这一充满希望的方法却由于工作失误而引起了一些误解。1979 年，林德赛 (E. H. Lindsay) 等人对新墨西哥州圣胡安 (San Juan) 盆地内一个不完整的沉积剖面进行了初步研究，声称他们在一个正极性期内发现了最后的恐龙，而这个正极性期可能是 C—29—R 之前的 C—29—N 期。同一地区的其他研究者则认为，林德赛所谓“最后的”恐龙其实并无依据，因为那里的中生代最晚期沉积物已遭侵蚀。林德赛采到的是一个次于最晚的，而不是最晚的恐龙化石。后来，美国地调所的法塞特 (James Fassett) 重新研究了中、新生代过渡带沉积序列没有间断的东圣胡安盆地，从而澄清了这一混乱。法塞特等人的研究成果清楚的表明，侵蚀作用确实迷惑了林德赛。他所谓生活在 C—29—N 的“最后”恐龙，其实是存于比中生代的结束时间早 500 万年的 C—32—N。林德赛本人的最新研究成果也承认，圣胡安盆

地的白垩纪—第三纪界线事件发生在 C—29—R 期间。

过去的几年中，在北美洲西部的许多地区又展开了磁性地层学研究。末代恐龙的遗骸总是发现于反极性期的沉积物中。加拿大的勒伯克莫 (J.F. Lerbekmo)，对阿尔伯它 (Alberta) 地区的中、新生代沉积序列剩余磁性“条码”的重大变化，进行了仔细判读；结果发现沉积物的时代均属 C—29—R。现在看来，可以确定恐龙在这一反极性期的 50 万年内灭绝似已无问题。

突然的全球灭绝现象

恐龙的灭绝是否与古比奥的有孔虫同样迅速呢？这是一个悬而未决的问题。因为发现的恐龙骨骼为数不是很多，而测年技术又不够完善，不足以得出恐龙究竟是在几千年、几万年或几十万年内灭绝的结论。然而，在地质学的语言里，不到 100 万年的时间是“短暂的”，其间发生的变化当然也就是“突然的”。从这个意义上说，把陆上恐龙王朝覆灭的时间，解释为与海洋有孔虫的灭绝同样突然，可能不致引起古生物学家的太多质疑。

问题是，白垩纪末期的大规模生物死亡事件，是否确实为 C—29—R 的 50 万年内遍及海陆的全球事件，抑或仅是限于古比奥和美国西部的局部事件呢？

就海洋生物而言，最近几年的磁性地层学研究已提供了肯定的答案。我本人有幸在 1980 年南大西洋的钻探中亲自得到了证实。大西洋和太平洋其他深海钻探站位的样品都说明：白垩纪—第三纪界线是在 C—29—R 期，西班牙和德国的古深海沉积序列的界线研究结果也与上述结论一致。在陆地上，古植物学家也把白垩纪末期灭绝植物组合的最后一代孢粉（又作孢粉）化石放到了 C—29—R。因此，我们已经愈来愈有信心断言，许多生命形式，无论是海相还是陆相，无论是植物还是动物，都是在 C—29—R 这一反极性期中发生了大规模的灭绝现象。

近几年磁性地层学研究的进展，对莱伊尔和达尔文关于中、新生代沉积纪录之间存在巨大间断的假设，是一个沉重的打击。时间的推移，在海底表现为条带，而在大洋和陆相沉积物中表现为纵向序列。它既有宽度，又有深度，C—29—R 是实际存在的一个重要地质时期。

俗语说，耳闻为虚，眼见为实。我们必须相信自己的眼睛。如果许多生命形式，都是在 C—29—R 期间最后露面一次，以后不复再现，那么可以说，它们是在 6500 万年前突然而又同时在全球范围内灭绝的。

第五章 灭绝之谜

生物灭绝这一事实，本不易为人们所接受，遑论大规模的生物灭绝事件了。按照林耐(Linnaeus)的意见，混沌初开，上帝对每种有性物种都只创造了一对，即一雌一雄；而雌雄同体的生物则减半，只造一个。林耐在1751年出版的《植物哲学》一书中写道：“现有物种的数量与混沌之初创生的生命形式数目无异。按照生殖法则，这些早期生命形式繁殖了为数众多的后代，但都与祖先相似。因此，当代自然界里物种的数目，同以往的生命形式并无出入。”

在18世纪，大多数学者都相信“种”乃是上帝在洪荒时代创造的基本实体，这位伟大的生物分类学家所抱持的信念，并未能突破时代的局限。林耐以生物物种不变和数量固定的坚定信念，作为生物分类的基本出发点。

后来，林耐看到杂交可以产生新种，信念发生了动摇。于是他在分类系统中比种高一级的“属”这一等级上划下了一道防线，以“属”作为最根本的，即混沌之初创造出来的“基本单元”。遗憾的是，他的追随者却置若罔闻，依然对种的不变和本质性坚信不疑。

1753年，林耐已经掌握了6000个物种，并估计物种的总数大约在一万左右。但在林耐身后发现的新种之多，已经不可胜计。据最新资料，物种数的保守估计是200万，而大胆一点的估计则达3000万之多。

即使林耐知道这一数字是多么巨大，种数也不是症结所在，问题在于物种数是否固定不变。从已发现的化石物种看来，许多化石与现代生物迥然不同。拉马克被任命为巴黎博物馆的昆虫、软体和微体动物教授之后，就遭遇了这一问题。拉马克是一位十分卓越的观察家，决不会对馆藏软体动物化石与现代生物的区别视而不见。当然，他也会注意到二者之间有相同之处。为了让可能发生的物种灭绝事件符合圣经的教条，拉马克那时代的人声言，灭绝的生物都是上帝有意摧毁的邪恶之徒，或者是洪水时期因为某种理由而未能上船的族类。

年轻的莱伊尔信奉渐变论，无法接受古代世界曾为其他生物所主宰的思想。他已经得知了居维叶在巴黎盆地沉积层中发现四个动物世代，但仍然抱有一线希望，因为当时尚有大片地区未经调查。他感到蛮有把握，说不定已经灭绝的那些化石的后代，会在什么遥远的地方又被发现。即使在当代，这种希望仍未破灭。据报载，现已在南非水域发现一种公认三亿年前即已灭绝的空棘鱼类（矛尾鱼）；中国西南部的原始森林中，也已发现一种中新世的原始水杉，这些发现因为罕见，所以有新闻价值。一些乐观的探险家也还在沿着刚果河的丛林或者苏格兰的滨海湖沼寻找恐龙；但他们成功的希望非常渺茫。因为已发掘的五千多件恐龙骨骼，都不是在白垩纪以后的地层中发现的。退一步说，即使违反了各种可能性，比如真的发现了尼斯湖水怪或其同伴，问题的实质并未改变。我们仍然面临如何解释其他生物灭绝的问题。

作为一位坚定的渐变论者，拉马克也不赞成用洪水灾害或其他灾害机制来解释灭绝现象。尽管他最终还是放弃了通过地理调查发现灭绝生物的幻想，但是未能摆脱时代思想的局限，一直坚持上帝创生以来物种数稳定不变的信仰。后来他终于迈出了革命性的一步，质疑物种的不变性。他格外留意到，许多介壳化石都有虽然不尽相同、但颇为相似的现代生物与之相对应这项事实。因此他指出，物种并非静态的。经历多代变异的日积月累，势必导致后代与祖先的差异。并非所有的物种都维持原状不变。它们从创生以后，已经发生演化。某些化石群的演化过程相当清晰，于是拉马克能够排出它们从古到今的年代序列。

真假灭绝

这种年代序列称为生物演化谱系。现已辨认出许多演化谱系，而且成为现代生物演化理论的主要支柱。拉马克千方百计回避灭绝问题。他说，世上并无所谓灭绝，人们看到的是一种“假灭绝”现象。较老的物种并未真的灭绝，只不过是创生以后的岁月中逐渐演化变成了新种而已。物种虽已变了，但谱系并未中断。当今世上的物种数还是与上帝创世之初一般多。讽刺的是，渐变论和进化论都是原创论者引用来为其教义辩护的理论，他们也需要藉助渐进演化说来支持其种数不变论。

假灭绝确是一个有用的概念。还在石油公司工作时，我记得有一位石油业界的老前辈曾经向我说起著名的“七姐妹”故事，以说明石油公司永远不会中断，而仅仅是在演化，逐渐改变结构，然后在一夜之间换了招牌。在股票交易市场上，新泽西标准石油公司（Standard Oil of New Jersey）、瑟可尼瓦库（Secony Vacuum）、洛克桑纳（Roxana）或阿美拉达（Amerada）等公司的名字已经销声匿迹，代之而起的是艾克森（Exxon）、美孚（Mobil）、壳牌（Shell）和阿莫卡（AMOCO）等名字。招牌变了，内容依旧，那确是货真价实的假灭绝。

但是，真灭绝也是有的。在本世纪初的头几年内，约翰·洛克斐勒（John D. Rockefeller）摧毁了他的竞争对手。这位老前辈说，“新种”也确曾出现，早期的标准石油公司受反托拉斯法限制，分裂为新泽西、加利福尼亚、俄亥俄、印第安纳和德克萨斯标准石油公司，就是一例。在古生物纪录中，到处可以找到假灭绝的谱系实例。野生动物被驯为家畜便可说是假灭绝。但是，真灭绝的历史证据更多：恐龙和其他巨型爬虫类灭绝了，鱼龙并未变成鲸鱼，翼龙没有变成蝙蝠，鸭嘴龙也没有变成袋鼠。这些生物灭绝后留下的小生境，随后为哺乳动物的新种所占据。这些新种沿着相似的路线演化，在相似的环境里扮演着相似的角色，但与恐龙绝非同一谱系。

虽然以“假灭绝”观念支撑“种数不变说”行不通，渐变论者的理论中有一点却始终是正确的：从化石纪录堪供计算种数的六亿年前至今，生物种

数惊人的稳定。任一时期的生物“种”数相当于古生物学家所谓的“歧异度”(diversity)。比较不同时代的歧异度,就可以获得各地质时期生物面貌变化中基本的质和量的概念。

然而,测定歧异度并不像计算某一地质时期已知物种数那么简单。因为各地质时期,无论是纪或世,其时间跨度并不是一律的。例如,奥陶纪的延续时间是志留纪的两倍,因此从奥陶纪地层中发现的物种数也是志留纪的两倍。这就好比某村用了一百年的墓地中墓碑数,大致相当于另一个在其他时代用了五十年的墓地中墓碑数的两倍,但是绝不意味着人口同样是两倍。恰恰相反,它说明该村的人口是大致稳定的。为了处理地质时代延续时间长短不一的问题,芝加哥大学的劳普(David Raup)提出用一个世每百万年中的物种数来表示它的生物歧异度。用百万年为单位来比较,奥陶纪和志留纪的生物歧异度就近乎一致了。

另一个问题是地质纪录中保存下来的沉积物体积。沉积物的年龄愈老,在造山运动时期遭受侵蚀的可能性就愈大,失真得也就更厉害。我们生活的新生代,持续时间大约与白垩纪相若。新生代已经延续了6500万年,白垩纪则大约为7000万年左右。但是,新生代沉积物的体积大致相当于白垩纪的两倍,所以不难设想,在新生代沉积物中发现的化石数也应当是白垩纪的两倍。事实证明这一推理是正确的,新生代地层中采集到和描述过的化石确是白垩纪化石的两倍。同样可以用墓地来作比方:历史上某一时期完整保存的墓地愈少,那么不管当时的实际人口多少,可以计数的墓碑就愈少。为了正确估计物种的歧异度,劳普统计了每百万年的物种数,同时考虑不同时代沉积物之间的取样偏差。把这两个复杂因素加在一起考虑,劳普在1976年得出了以下出人意料的结论:保存最好的化石纪录——海相无脊椎动物的物种歧异度,在过去的六亿年中一直非常稳定。有些同行不同意劳普的结论,私下与他讨论和争辩了多次。但是四位最主要的反对者最终还是妥协了。1981年,他们联名发表论文,表示他们同意在过去的六亿年中,生物歧异度即使有所增加,也是不显著的。

突然灭绝与快速新生

详细的资料分析显示,生物种数的宏观稳定主要是由于大规模生物灭绝后的快速复原。在地质学中,古生代、中生代、新生代这些大阶段的划分,都是基于生物面貌的巨大变化。在每一个地质时代的末期,种数歧异度都有大幅度的递减,而且不只限于种级,在属和科的级别上也是如此。鲁塞尔(Dale Russell)统计了白垩纪界线前后生物属的数量,发现虽然陆地生物和河湖淡水生物的歧异度减小幅度相对较小,但爬虫类的属数(包括恐龙属)却从54个降到23个,减少过半。几种海洋生物的歧异度也有类似的递减现象。例如浮游微体生物的歧异度从298属减到173属,平均下降了40

%。钙质介壳的浮游有孔虫和超微浮游生物下降较多，而矽质介壳的浮游生物却并未遭到多大破坏，补偿了钙质生物的一部分损失。海洋底栖生物的歧异度减少了一半，从 1976 属递减到了 1012 属。游泳的海洋生物这个群体受到最为惨重的打击，属数从 332 降到 99，减少了 70%。

鲁塞尔对中、新生代界线上下生物统计，包括了白垩纪最晚期的 2862 属和第三纪最早期的 1502 属。这些数字表示，在白垩纪的最晚期，生物属的一半消灭了，真正灭绝的属数可能更多。况且鲁塞尔统计中的所谓幸存者，不仅包括灭绝前的属，同时也包括灭绝后出现的新属，因此实际上灭绝的属数应当大于 50%。

古生物学家往往不擅于生物统计。由于对影响化石组合歧异度的因素考虑不周，常易为单纯的个体统计引入歧途。碧珂兰 (Tove Birkelund) 是一位杰出的古生物学家，曾任哥本哈根大学地质系主任。她在统计丹麦的海相生物化石时，就犯过错误。研究了白垩纪末期海相底栖动物的种歧异度后，她曾声言，当时什么事情都没有发生。1981 年，在犹他州雪鸟 (Snowbird) 城举行的一次白垩纪末期灾变事件的讨论会上宣读论文时，她发表了这一意见，结论语惊四座。为什么浅海底栖无脊椎动物安然无恙，而同一浅海的浮游生物都几乎毁灭殆尽呢？

海里有一种叫做唇口目苔藓虫的水生动物，碧珂兰对它的种歧异度格外感兴趣。它们在分泌钙质骨骼时，表皮形成了极为复杂的壳饰。由于不同种的壳饰不同，因此颇易鉴别。碧珂兰在综合其研究成果时解释：在白垩纪最晚期，苔藓虫的种歧异度极大，第三纪最早期亦然，仅丹麦的马斯特里奇期和达宁期就有五百多种。因此她认为“达宁期的歧异度与马斯特里奇期的歧异度同属一个等级”，这一不显着的界线上下的一致性，理应属于“演化过程中的停顿”。

但是，在 1981 年送交美国地质学会的一篇论文中，碧珂兰得出了不同的统计结论：

哈卡森 (Håkansson) 及汤生 (Thomsen) 在 1979 年发表的论文中，对日德兰半岛 (Jylland) 西北尼克洛夫 (Nyeklov) 组的界线序列中的唇口目苔藓虫，进行了非常详细的研究，共发现 115 个种。其中的 60 个种仅见于马斯特里奇期，11 个种在马斯特里奇期和达宁期都有，而 44 种仅限于达宁期。马斯特里奇全期的种数都极繁多，这达宁期初期的种数却同样的少，最底部只有一个种，往上一公尺处也不超过四个种，二者形成极为鲜明的对照。值得强调的是，在达宁初期出现的这少数种群，没有一个在通过马斯特里奇期—达宁期界线之后，继续生存。在这一次减种数锐减后，生物的歧异度和密度又迅速增高，在界线以上六公尺处的苔藓虫灰岩中达到最大值，种数达四十以上。

这位名教授用简洁的语言明白告诉我们，所有的唇口目苔藓虫在尼克洛夫组中突然消失了，一个孤独的移居群落取而代之。从此，80% 的白垩纪种群再也没有重现。在生物灭绝之后的头一个百万年中，达宁期白垩层中的先驱者中又加入了少数新移民，其中有几种显系移居异地后找到避难所的幸福。

存者。“新生的”种群很快跃居主导地位，约占达宁期生物群的80%。一度不存在的歧异度，如今又重新建立了。

碧珂兰在进行事件“前”、“后”的比较时，忘记了变化发生的关键时刻，所以犯错。如果我们把二次大战前十年和后十年的西德经济发展加以比较，我们也许会说西德经济是“停滞不前的”。但其实西德经济经历了1945年的灾难性大破坏，战后的头几年几乎是从零开始的。因此，西德战后经济的复苏其实速度惊人。

突然灭绝这一说法要比灭绝本身更难为人所接受，而且同样因为不够缜密的分析而出现假象。例如，统计资料处理欠妥曾使某些古生物学家产生一种印象，认为长着公羊角般螺旋形外壳的浮游动物菊石，是在几百万年的时间内逐渐死灭的。而白垩纪最晚期所发生的事件只不过是压断驼背的最后一根稻草。一位在西班牙工作的古生物学家在1969年作过一次计算，资料显示中白垩纪的阿尔必期（Albian），菊石有一百五十多属，但在中生代结束前夕的马斯特里奇期最顶部的沉积物中，却只有三个属。他提出的解释是，在其最后残余分子惨遭灭绝以前，菊石业已经历过一个长期的衰败过程。可惜这位生物分类学家并不是一位严格的生物统计学家，没有考虑到阿尔必期要比马斯特里奇期的最后一批菊石活的时间长得多。

碧珂兰研究丹麦最晚期菊石化石。继在西班牙发现的三个属，又在史蒂文克林特村附近的鱼黏土层下面最年轻的马斯特里奇期岩石中，发现了七个新的菊石属。但她强调：每一个马斯特里奇期菊石属的种数都很少。她认为这种歧异度很低的现象说明白垩纪前菊石即已开始衰落。但她未曾考虑到陆地上尚未发现多少马斯特里奇期的岩石。如果她研究的马斯特里奇期海相沉积物，与阿尔必期的沉积物分布得一样广泛，就一定会发现更多的马斯特里奇期菊石。

最新资料表明，取样偏差对分析结果的影响非常大。大约在中生代末期，欧洲和北美都经历了海退，浅海从被淹没的陆地上大规模后撤。所以在北半球，出露在陆地上的中生代末期沉积物为量甚少。当然也就相对减少了发现马斯特里奇期菊石的机会。南极洲的情况则恰恰相反。该大陆是在中生代末期发生海侵，逐渐为海水淹没。在那一块遥远的陆地上，马斯特里奇期海相沉积物的分布，要比更老的白垩纪沉积物广泛得多。最近终于有一位阿根廷青年科学家指出，当中生代突然终结时，菊石的歧异度不是减少而是增加的。洞悉当地的地质历史后，这种分布状况乃是意料中事。

渐变论者认为种属是日渐衰落而非突然灭绝的偏见，却最吸引古生物学家。包括碧珂兰本人在内，他们一般都信奉由来已久的老化理论。这种老化理论假设古代生物的科、属、种，都随着时间的推移失去“进化活力”而逐渐老化。按照这一理论，古代的菊石面临灭绝的命运是不可避免的，就像耄耋老者正在一步步走向死亡一样自然。

然而这种比拟却非常欠妥。诚然，生物的个体都有一个平均寿命的预期

值，但种、属、科却不然。几乎没有人会认为蟑螂已经失去活力，但它却是昆虫中最古老一科的后代，也是残存的最原始有翅昆虫的一种。美洲负鼠的直系祖先与最晚期恐龙同时代；巨大的水杉是从一种两亿年前的古树繁衍而来，银杏则至少还要比它早 5000 万年。最使人惊异的古老生物是一种小型的腕足类动物，叫做海豆芽。在寒武纪的最古老的化石中也曾找到过它，年龄已经超过五亿年。看来，生物属的寿命是没有限制的。

碧珂兰所研究的一种特殊菊石属，其实属于最古老的菊石世系，已经生活了几百万年，几乎没有发生任何演化。因此，问题显然不在它们有无活力，而是“为什么繁衍了那么久之后突然灭绝”。突然死亡就是猝死，与死者年老或年幼无关。

灭绝速度迅速异常

对丹麦沉积物的详细研究显示，除了有孔虫和苔藓虫，许多生物也都发生同样的突然灭绝现象。苏利克（Finn Surlyk）和乔安苏（Marianne Johansen）研究了丹麦的腕足类。这是一种在浅海底层觅食的固着贝类动物。在尼克洛夫的晚马斯特里奇期白垩含腕足类 27 种，在达宁期白垩中含 35 种，在 27 个马斯特里奇期的种中，有五个种见于达宁期最早期的界线鱼黏土；有六个种在这一危机中幸免于难，并进入了达宁期。首次出现于达宁期的新种有 24 个。换言之，在 27 个种中，只有六个种未遭死灭，越过了达宁期最早期，死亡率高达 80%。但是规模相若的突然恢复，最终又使界线另一侧的歧异度剧增了 30%。

苏利克是碧珂兰在哥本哈根大学的同事，都受过最好的正式传统教育。在他结束腕足动物的研究之前不久，《自然》杂志的编委请他评论我的一篇关于白垩纪末期生物突然灭绝的论文。他对此疑虑甚多，建议谨慎从事。但当他完成了在尼克洛夫的研究后，犹疑冰释。尼克洛夫腕足类的变化并不是一种假灭绝。苏利克和乔安苏强调了马斯特里奇期和达宁期腕足类的属组成的重大区别。马斯特里奇期的腕足类确实经历过一次大灭绝，全新的种族是从一小撮幸存者中演化而来的，灭绝的情况与古比奥的有孔虫有异曲同工之妙。

腕足类并未衰老，也没有失去“活力”，更看不到任何渐变的迹象。苏利克和乔安苏在为“科学”杂志撰写的一篇论文中指出：“无论从生物分布密度和生物歧异度，还是某些特化种群的早期灭绝看，都没有任何先兆。”突然之间，在沉积这层黏土的不到 50 万年中，腕足类四分之三以上的种一下子灭绝了。达宁期的腕足类，正如同地区达宁期的苔藓虫和古比奥剖面达宁期的有孔虫古抱球虫一样，突然开始生长繁衍，与马斯特里奇期生物消失一样急速，而其分异速度之快远远超过了它们的严重损失。

个体统计只能说明灭绝的严重程度，却并不能说明灭绝的速度。要测定

灭绝的速度，我们必须确定一定时间内发生灭绝的生物种百分比。自古就有生物种的灭绝；以研究颇详的太平洋新生代软体动物的灭绝速度来衡量，每700万年就有一半的软体动物种发生灭绝，这种正常的灭绝速度称为灭绝背景值。正常的物种灭绝现象每几百万年发生一次，似颇稳定。假若软体动物的灭绝速度为700万年失去种数的二分之一，那么如果在350万年内种数减少二分之一，或者在700万年内种数减少四分之三，其灭绝速度就无异增加了一倍。苏利克和乔安荪对丹麦腕足类的研究表明，在不到50万年的时间里减少了四分之三的种数，至少要比正常过程快20倍。时间愈短，灾害的规模就愈大。如果鱼黏土所代表的时间长度只有五万年，那么那些软体动物的灭绝速度将相当于正常速度的200倍。

灾难突降

尽管我们对白垩纪末期生物灭绝现象的严重程度和灭绝速度，提供了明晰而确凿的证据，但渐变论者仍然试图作最后的挣扎。正如林耐为了保存物种不变性而选择“属”作为比较基准一样，当代的一些古生物学家为了掩饰大规模生物灭绝现象，在编制死亡表时也提高了生物的分类学级次。如果一位将军惨遭败北，而在向他的上司报告战果时却以幸存的团为单位，那么他可以说损失寥寥，无足轻重。其实某些团可能已全军覆没，有些团可能只留下少数散兵游勇。即使军团的主力已经荡然无存，他还是可以声称在他领导的每一个单位中都有幸存者，藉以掩饰惨败。一些古生物学家采用同样的伎俩来掩盖中生代末期的大规模灭绝事件。我曾经看到一些有关生物灭绝问题的文字，既不以种，也不以属作为统计单位，而是以科或更大的分类系统作为统计单位。统计所用的分类级别愈高，结论的谬误就愈大。如果选用纲作为统计单位，那么连恐龙的灭绝也看不出了，因为爬虫类依然幸存。根据这些资料绘制的图只能说明白垩纪末期一切安然无恙，万物生意盎然。这真可谓失之毫厘，谬之千里了。

然而，即使以科为统计单位，也会清晰的看到在白垩纪末期的短暂一幕中，“科”的数量迅速而大幅度的减少。劳普及其助手最近以海洋生物化石的“科”为单位，对这种生物的存亡作过一次统计分析。他们统计了生活在13500万年前白垩纪初期的289科海洋生物，计算它们经过7000万年到白垩纪末期的灭绝速度。经过大约2800万年后，消失了29个科；6400万年后，消失65个科，因此这一时期的背景灭绝速度为每百万年灭绝一个科。但在白垩纪的最后500万年中，原科数的10%，亦即将近30个科突然消失。新生代开始后，灭绝速度又回复正常。

劳普并未划定白垩纪末期生物加速灭绝的持续时间。如果在马斯特里奇期的500万年中科的灭绝速度相当稳定，那么其灭绝速度将是正常背景值的六倍，而若灭绝发生在C—29—R期的50万年内，那么灭绝速度就是正常值

的 60 倍。如果灭绝发生在界线黏土沉积的短时间内，那么灭绝的速度将是灾难性的，要比其背景值高出 500 倍以上。

经过适当的处理和判读之后，统计学资料终于说明“种”数并不是不变的，它们的灭绝速度和更替速度也不是稳定的。不仅如此，物种歧异度的测定还说明大规模生物灭绝没有任何先兆的突然降临。找不到任何资料足以说明，那些健康的、大量的、充满生机活力而又高度歧异的有孔虫、苔藓虫或腕足类已经濒临灭绝的厄运。

个体统计并不能揭示这些生机勃勃的海洋生物群落走向末日的情景，更为神秘的是这场灾难的巨大规模。而使海洋浮游生物和腕足类荡然无存的事件，可能也就是在陆地上消灭恐龙及其他灭绝生物的可怕杀手。

惟一的结论是：全球范围的灾难突然同时降临陆地和海洋的不同生物群落，使中生代突然告终。

死因何在

多年前，当我还是壳牌公司的一名年轻雇员时，常常拎着纸袋，到我的好友特拉菲斯(Alfred Traverse)的办公室里与他共进午餐。有一天中午，我见他正伏案研读最新出版的一期专业杂志。我坐了下来，开始享用三明治。他把杂志递给我，说道：“请读一下这篇关于恐龙的文章。作者是不是在开玩笑？德·劳本菲尔斯(de Laubenfels)这个名字，会不会是为了愚弄人而取的笔名呢？”

我一边吃饭一边浏览文章，读来相当有趣。德·劳本菲尔斯写道，最后一批恐龙是在一个巨大的陨星落地时，被爆炸产生的热空气杀死的。因为“热空气”是俚语“吹牛皮”的意思，所以特拉菲斯以为这是一篇讽刺时弊的小品。作者的意思仿佛是指恐龙并非死于自然规律，而是被人们狂吹牛皮吹死的。

对恐龙大规模灭绝现象，的确曾经有过许多荒诞不经的故事。

我最欣赏的故事是伦敦皇家植物园(Kew Gardens)的一位化学分类学家斯温(Tony Swain)虚构的。这一故事发表于1974年，斯温称之为“白垩纪的冷血谋杀”。斯温的专长是研究有害于食草动物的植物合成化学物质。蕨类和松柏类植物都含有大量单宁酸(tannins)。单宁酸显然对恐龙无害，因为这些植物是许多食草动物的基本食物。到白垩纪中期，被子植物蓬勃发展，成为植物世界的主角，当然也就成了食草恐龙的主要食物。其中的有害物质是生物碱。生物碱略有苦味，中等剂量即可致病，服食过多足以致命。哺乳动物显然不喜欢这种苦味生物碱，常藉控制食量以保平安。爬虫类，如斯温实验中的龟类，却感觉此类植物甚为可口，因而摄食过多，导致“严重的生理障碍，乃至一命呜呼”。

根据他所发现的哺乳类和爬虫类“口味”的不同，斯温作出了一个轻率

的结论。他把恐龙与龟类相提并论，念念不忘恐龙食量超群，因此提出恐龙是由于食物中毒死亡，进而招致灭绝。

这是一个言之成理的故事，地质学家却一笑置之。即使斯温所有的设想都无懈可击，也只不过解释了食草恐龙的灭绝。那么是谁“谋害”了霸王龙呢？而且恐龙的灭绝是在被子植物出现数百万年之后，他又怎样解释这种滞后效应？斯温似乎忘记了一个重要事实，即当时灭绝的生物非恐龙一类，还包括了多种爬虫类、海洋无脊椎动物、哺乳动物和鸟类，甚至也同时殃及几种被子植物。若不是他的想法颇有引人入胜之处，也许早就被人抛诸脑后了。

另一种同样荒诞的说法，认为恐龙不是中毒身亡，而是死于饥荒。这种假设设想：在海洋表层的浮游生物中，大多数单细胞的光合浮游生物在白垩纪末期发生灭绝，引起食物链的崩溃，恐龙只不过是最后的牺牲者而已。

光合浮游生物的大小通常都在 0.01 公厘以下。它们在光合作用过程中靠磷、氮等营养盐生长，因此在营养盐极为丰富的沿海水域中尤为繁盛。个体虽小，但数量极多。在繁殖季节，每公升海水中的个体数以十亿计；这种迅速繁殖的季节称为繁盛期。软体光合生物死后几乎毫无痕迹，但硬体的光合生物，即钙质超微浮游生物，却能分泌特征各异的骨骸。这些骨骸在软体死亡后沉到海底并保存下来，因此在由超微浮游生物化石组成的白垩质沉积物或石灰岩中，都留有其历史纪录。

超微浮游生物一词源于拉丁文 *nana*，意即侏儒，比喻其个体微小。其化石称为超微化石，最早由德国微古生物学家爱伦堡（Christian Ehrenburg）于 1836 年在岩石中发现。二十多年之后，达尔文的学生和坚决支持者赫胥黎（Thomas Huxley），在大西洋的现代深海沉积物中发现了一种超微生物，称为颗石藻。其介壳是一种环状的小片，中间有一个孔洞。赫胥黎的同人索比（Henry Sorby）则发现，颗石藻竟是英国白垩的主要组成成分。在以后的一个世纪中，许多专家从事新的超微化石种属的描述和分类，但鲜有引人注目的进展。直到 1964 年，在加州大学洛杉矶分校执教的布拉姆莱特（Bill Bramlette）证实，白垩纪末期超微浮游生物也曾发生大规模的灭绝事件，才引起科学界的关注。

白垩纪时，超微浮游生物歧异度很高。加州大学洛杉矶分校的另一位微体古生物学家黛潘（Helen Tappan），继布拉姆莱特之后计算过它的属数，数量在 100 以上。布拉姆莱特发现，在马斯特里奇期末期，中生代的颗石藻几乎完全灭绝，只有少量“不显眼”的种幸存下来。然而到几百万年后的达宁期末期，这些为量甚微的残余分子竟很快发展出新的种属，并再度出现了一个繁盛多姿的超微生物王国。

超微浮游生物的灭绝与其他生物类群的灭绝在时间上的巧合，启发黛潘思考这些现象之间的因果关系。她注意到光合浮游生物位于食物链的最底层，而根据生物学家哈维（H. W. Harvey）的估算，要年产 100 吨光合浮游

生物才能支持 70 吨像有孔虫那样的浮游生物。后者可供 4 至 7 吨鱼维持生计，这些鱼又可保证 300 公斤重的食肉动物一年的食物。如果光合浮游生物的产量锐减，就会激发一连串的连锁反应。食物链的崩溃必将使其他生物陷入饥馑。巨型的食肉恐龙胃口奇大，无疑是这场饥荒首当其冲的牺牲品。

黛潘的故事有两个明显的缺陷。首先，她把主要起因归结为生物产量下降，回避了问题的实质。试问生物产量下降的原因又是什么呢？光合浮游生物需要营养盐和维他命。诚如布拉姆莱特曾经提到过的，可能是营养盐发生了短缺，或维他命发生了短缺。颗石藻需要的维他命，如维他命 B12，维他命 B1 和维他命 H，是由土壤细菌合成的。这些维他命由河流带入海洋，再由洋流散布到各处。食物供应链的混乱可能引起灾难，但是仅此不足以服众。若不是河流干涸或堵塞，若不是海洋停止流动，就是土壤细菌也遇到麻烦，发生了灭绝。

第二个缺陷甚至更为严重。与恐龙同时代的大型海洋爬行动物以鱼为食。如果光合浮游生物的产量下降，它们可能死于饥馑是言之成理的。但恐龙却是陆生动物，食肉恐龙以食草动物为食物。浮游生物因为海洋营养不良而死亡，当不致危及恐龙从繁盛的陆生植物中得到温饱。

既非中毒又非饥荒，那么恐龙是否可能死于严寒呢？不少古生物学家倾向于这种想法，乃是基于古生物学家发现的以下事实：即在最近的一亿年中，地球气候曾出现变冷的趋势。中生代时，全球气候温暖，热带和亚热带植物的分布几乎接近两极。200 万年前开始出现冰期，导致了一场危机。恐龙本来是在一种温暖气候中发展起来的，只能适应慢慢变冷的气候。不幸气候的变化竟然十分剧烈。压断龙背的最后一根稻草终于在 6500 万年前加上了。恐龙死于严寒。

这一想法在当时颇受欢迎。因为大家都认为恐龙与其他爬虫类无异，也是一种冷血动物。巨大的鳄、蟒、鬣蜥和乌龟，今天都生活在温暖气候带。那些确实生活于温带的爬虫类，小的如龟蛇之类可以挖洞和冬眠以防寒，但恐龙这样的庞然大物就御寒无方，藏身无地了。然而仔细研究之下，这一假设疑团甚多，不单是恐龙是否仅生活于热带和亚热带这一个问题而已。

其实恐龙的景况并未狼狈至此。在高纬度地区，根据诸如榆树和山毛榉之类的落叶树密布成林判断，恐龙度过的冬天并不太寒冷。有些较小的恐龙，只有鸟类和猫那么大，在演化过程中形成了隔热的羽毛。这些特征为其后代继承，就发展成为鸟类（长有羽毛的翼龙是一种会飞的爬虫类，并非恐龙）。而且愈来愈多的古生物学家认为，在某种程度上，所有的恐龙都属于温血动物。约翰·霍普金斯大学的巴克（Robert Bakker）是这一新观点的领军人。他们认为恐龙是一种充满活力的温血动物，保持体温并非难事。

另一位恐龙专家，芝加哥大学的瓦伦（Van Valen）提出，不是气候变冷，而是亚热带型植物向温带型植物的转变杀死了恐龙。瓦伦的工作主要集中在蒙大拿州。他认为，当中生代末期的冬天变得很冷时，许多亚热带的植

物从地球上消失，并为温带植物所代替。恐龙不但不适应这种植物，而且落叶树的增加，使恐龙在冬天面临食物短缺的威胁。如果某种生物只能适应极为有限的食物，就像中国的大熊猫完全依赖箭竹维生，那么择食的要求对于它的生存来说，的确是至关重要的。以恐龙而言，虽然有些种类有偏食之癖，只吃西壳椰子（sago palm）或某一种蕨类植物，但大致来说，它们都是不大挑食的。这个家族，从啃木头、抓蚱蜢到专吃松柏嫩芽，无所不为，无奇不有。而且，它们常常成群结队的向食物产地迁徙，就像捕食者追踪猎物一样。如果亚热带植物确实南移了，为什么恐龙不随之南迁徙，反而在原地坐以待毙呢？这种“迁徙”——货真价实的人口大迁移——的速度一年仅以英尺计，不会造成任何困难，而且热带恐龙大致不会遇到这样的问题。把蒙大拿恐龙置于死地的寒冷，也不会同时杀死那么多热带的小哺乳动物、鸟类以及除海龟外的所有海洋爬行动物。

如果我们无法绘出一幅恐龙因降温而冻毙的悲惨图画，那么也就没有理由设想海洋浮游植物会因为海洋温度稍稍降低而大规模灭绝。对于这一点，我们是有把握的，因为人们对中生代末期以来 6500 万年间的氣候波动纪录已经了如指掌了。

对新生代气候的地质研究已经表明，在 5000 万年前的始新世、3500 万年前的渐新世初期、1400 万年前的中新世中期、600 万年前的中新世末期以及 250 万年前的上新世末期，气温都曾发生大幅度下降。最后一次大降温引起了大冰期，而且在冰期和间冰期的交替过程中，海洋发生极为强烈的温度波动。但是没有一次温度剧降可起海洋灾难；在陆地方面，更没有引起像恐龙灭绝那么大规模的变化。考夫曼（Earle Kauffman）是一位白垩纪海洋无脊椎动物专家。由于在古生物研究中累积了丰富的经验，他不赞成用诸如中毒、饥荒、降温之类的简单方法去解决问题。1982 年，我到华盛顿特区的史密生博物馆去拜访他时，他给我上了一堂生动的古生物课。我们的讨论一直延续到晚餐时分；一边品尝龙虾，一边争论不休，饭后回到博物馆又继续争论。考夫曼并不认可白垩纪末期生物突然灭绝的纪录（后来他改变了观点）。他倾向于采取渐进的解释，而且提出了一套关于海水进退引起的环境变化造成海水中氧气耗损的复杂说法。

马斯特里奇期早期，海水侵漫陆地，陆棚全部成为碧波荡漾的鱼虾乐园。由于海水可以储存热量，故海侵有利于改善气候条件。但是，温暖海洋的通气条件不佳，因此考夫曼认为在马斯特里奇期早期的海侵过程中，逐步导致了海水中含氧量的耗损，危及许多生活在热带浅海底的动物。由此引起了生物的大规模死亡。以后发生海退，陆棚重新露出水面，于是气候转冷。由于某种未加深究的原因，冷海水的通风依旧不良，海水含氧量进一步减少。缺氧条件再加上气候寒冷，使浅海热带生物遭到了致命的打击。在马斯特里奇期早期开始的生物大规模死亡事件，终于在其晚期达到顶峰。

考夫曼的设想似乎言之凿凿，而且许多古生物学家都喜欢他那种印象派

画家式的模糊表达方法。但是，即使是公正的外行人也不难洞察其中的漏洞。只要提出一个问题就足以使考夫曼无言以对：地质历史上曾经发生过无数次海侵海退，为什么最终都未留下造成生命史变革的纪录，而惟独马斯特里奇期的海侵海退招致了如此空前的自然灾害呢？而更加无法回避的问题在于：恐龙生活在远离海洋的内陆地区，海水或进或退，或者海水中是否缺氧，自当与之无关，为什么也惨遭劫难呢？

许多专家都相信恐龙有能力保持体温，但是恐龙是否有能力承受高温呢？大型动物与小而细长型动物相比，散发热量的面积较小，更能储存新陈代谢作用产生于体内的热量，所以比较适应寒冷气候。但是，有道是“胖子怕热天”；有足够的力量保持热量，在气候迅速变暖的环境中却并非幸事。

鲁塞尔把一只体重 20 吨的恐龙比作一个表面积九平方公尺的圆球。假如我们设想这一庞然大物就同现代爬虫类一样，也是冷血动物，那么它由新陈代谢而产生的热量将为每小时 557 大卡，体表散热等于体温超过气温一度的比率。晒太阳时，恐龙将增温。如果周围环境的温度与室温相仿佛，为摄氏 20 至 25 度，那么除了代谢作用放出的热量外，还会获得 8100 大卡的太阳能。恐龙的体温不可能超过哺乳动物所能承受的温度变幅，即不能超过周围环境摄氏 15 度。如果空气的温度升高到摄氏 30 或 40 度，即大致相当于夏季的热浪，那么大型恐龙就无法忍受，除非立即躲到荫凉之处以避高温。

美国博物馆古脊椎动物馆馆长科尔伯特 (Edwin Colbert) 发现，只要环境温度比美洲鳄最适应的温度高出几度，它就会一命呜呼。而根据科尔伯特的助手考尔斯 (R. B. Cowles) 的研究，几种沙漠蜥蜴的情况也是如此。冷血动物承受高温能力如此之低，其实不难理解。因为它们没有散发热量的有效机制，无法调节体内外的热平衡。

大型恐龙能否承受高温的问题，由于巴克找到了恐龙乃系温血动物的证据而更形复杂了。如果它们已经演化为温血动物，那么是否可以借喘气、出汗或者脸红之类的功能，形成更为有效的散热机制呢？鲁塞尔的答案是否定的。他觉得过热问题对温血动物更为严重，因为其产热的代谢功能也强得多。

麦克林 (Dewey McLean) 是一位微体古生物学家。他在生物科学方面的广泛兴趣，使他的想象力远远超出了本学科的局限。1978 年，他在美国的《科学》杂志上发表了一篇论文，专论恐龙，文中提出了一个绝妙的论点，即恐龙死于“中生代末期的温室效应”。

麦克林重温了爬虫类无法忍受高温的所有证据，提出了一个离经叛道的观点，即恐龙并非死于降温，而是死于升温。巨型恐龙及其他大型爬虫类，不管它们是冷血还是温血，只要气温高出正常环境摄氏 10 度，就将因为无法承受热浪冲击而死去。

即使升温幅度不那么大，也会影响生物的繁殖。例如，麦克林指出，雄性不育症的导因之一，就是精子过热。温度稍微升高，精子就会失去传宗接

代的能力。对鸡施加热压力，鸡蛋就会变得异常酥脆。对最晚期恐龙蛋壳进行的病理学研究也提供了证据：其中的许多蛋是未受精的不育蛋。

然而，为了要对如此长期的热浪冲击作出解释，麦克林不得不像他的前辈一样，归咎于浮游生物的死亡。他指出，由于海洋中光合浮游生物大批死亡，在营正常光合作用中所应摄取的二氧化碳大量释放到空气中。当今之世，温室效应已经妇孺皆知；它能捕集逸向外太空的热量而使全球的温度升高。众说纷纭，莫衷一是。但所有这些解释都存在着同样的缺陷，未能指出什么原因引起了海洋浮游生物的死亡。直到麦克林 1978 年的论文发表一年后，还没有一种设想可以为海洋生物大规模死亡的原因提供答案。在那时，人们还只能借助对 6500 万年前的气候研究，在热杀手还是冷杀手这两种可能性之间争论不休。

第六章 深海求证

我在加州大学洛杉矶分校读书时，曾与著名的地球物理学家格里格斯（David Griggs）一起从事我的博士论文研究。他心目中的英雄是汤姆森（William Thomson），或者更为知名的说法是凯尔文爵士。在格里格斯办公室的门上，贴着一段凯尔文的名言：“我常说，如果你能测度你的研究对象并以数字表示之，那么谓之有所知。如果你不能用数字描述研究对象，那你的知识就是粗浅而片面的。或许你正要开始了解你的研究对象，但无论研究对象为何物，你的认识尚未升华到科学状态。”

凯尔文的另一段名言完全是侮辱性的。他说，有些科学家——他指的是物理学家——用数字来表达他们的认识；诸如生物学家、地质学家和其他自然科学研究者却只对标本感兴趣，所以只称得上是“集邮爱好者”罢了。

且不论他的傲慢，凯尔文的确言之成理：我们需要用数据证明思想。鲁塞尔等人估计，如果空气的温度突然上升摄氏 10 度，恐龙就难以幸存。麦克林提出白垩纪末期时气候要温暖得多，但并无数据支持。德·劳本菲尔斯认为海相爬虫类死于近于沸点的高温，但他没有提到关于沸腾海洋的最保守证据。至于气候变冷趋势的证据一样模糊：在一亿年的漫长过程中，竟未提到任何一个时间的温度。

古代气候情况

长期以来，我们一直靠古生物学家获取古气候的资讯。植物是敏感的环境标志；有些植物化石至今还有代表存在，所以我们有理由设想，它们古代祖先的生存环境与当代相似。例如，人们在亚利桑纳州的沙漠中发现了中生代的棕榈树化石，就能说明 25000 万年前，那里的气候与当代并无多少差异。然而，还有许多其他植物却灭绝了，只能根据化石与现代植物的关系来推测植物化石的环境，或者用植物的形态来进行推理或解释。例如，阔叶树多半生长在热带或亚热带；而松柏类或豆科植物则更常见于温带或干旱地区。

各种动物也偏好不同环境。珊瑚礁生长于热带，而海豹和海象则习惯于极区的冷水。生物歧异度是另一种判别标准：在最佳气候条件下，万类生物竞胜，生物种数极多。而在极冷或其他极端气候条件下，却只有少量强者才能幸存。正是凭藉这些资料，古生物学家才能判别过去的动物区，并联系上相应的气候带。

海洋单细胞生物的分布也与气候带有关。单细胞生物又称为原始生物，是一种既不属于动物，也不属于植物的特殊生命王国。单细胞生物中既包括曾被视作单细胞动物的生物，如以草为食的有孔虫；也包括曾被认作单细胞植物的生物，如作为食物的超微浮游生物。生活于热带的有孔虫和超微浮游生物种属，与中高纬度地区的种属有显著的区别。在赤道太平洋，具有美观

的玉石般平滑骨骼的放射虫 (radiolarian) 比比皆是，在极区海洋中，致密外壳可用作亮光剂 (polishing agents) 原料的矽藻则更为常见。

古生态学研究与气候有关的化石分布规律。在一个多世纪的时间里，古生态学向不同方向发展，力图揭示过去的气候变化。科学家用诸如温暖与寒冷、热带与温带之类术语，来描述各种古代生物生活的环境中，温度的重大区别。对于古生态学家的的工作，我们充满信心；因为来自不同渠道的证据都趋于相同结论。林林总总的动物群，都存于热带植物极其繁盛的陆棚近海部分，或赤道原始生物蓬勃生长的开阔海。在非古生物学方法发展起来以后，许多结论又得到了进一步的证实。例如，天然余磁的磁倾角能指示纬度，因此证实似属热带化石组合的生物群，确实位于赤道附近，是真正“热带型”的。

然而，古生态学方法也有不能提供数字的缺陷。大多数古生态学家约定俗成，都使用“温暖”、“相对较温暖”、“较温暖”或“非常温暖”之类的术语。可是某甲所指的“温暖”可能正是某乙概念中的“非常温暖”。举例来说，“热带动物”一词可能也是一个模糊的概念，并不意味着这些生物一定生活在热带附近海域。如果某一时期全球海洋都非常温暖，那么这些生物也可以生活在高纬度地区，而仍不失其热带动物的特征。事实上，就支持生物大规模灭绝的寒冷说或过热说所要求的精确性而言，古生态学方法部不合格。关于白垩纪末期的气候问题，古生态家争论已久。有的说冷，有的说热；各持一端，互不相让。

可是，早已有人发明了一种定量测定古气温的技术。在麦克林提出他的温室理论解释恐龙的灭绝时，已经使用了 20 年，那就是所谓的古温度计。但是，发明一种新的工具，知道如何去善用并使它达到预期的精度，有时是很费时间的。在相当长的时间里，结果往往非常混乱。

放射性测年技术

这种测年技术是从同位素的研究中衍生出来的。同位素研究早已使放射性测年成为可行的方法。研究之初，人们设想，化学元素的各种天然稳定同位素的相对数量，应当到处一律，与环境无关。所谓稳定同位素是指不会发生衰变的同位素，因此不能用于测年。在 30 年代，人们还不知道氢有同位素。但是，尤里 (Harold Urey) 却猜测氢可能有几个同位素，而且认定终会找到一种方法，使它们分别趋集到一个样品中，达到超乎寻常的丰度。通常，氢原子只有一个质子，是最轻的同位素，原子量为一。像这样的轻原子最为活跃。含有轻同位素的液体发生蒸发时，这种轻原子最有机会从液体中“跳”出来变成蒸汽。反之，在蒸汽冷凝为液体的逆过程中，含有一个或多个中子而较重的同位素，冷凝为液体的机率也更大。因此，反复进行蒸发和冷凝，最终的残余溶液中将会有重同位素趋集；这在理论上无懈可击。尤里

蒸发了六公升液态氢，最后用质谱仪检查，发现残余溶液果真趋集着原子量为二的氢原子：尤里终于发现了氢的重同位素。由于其原子量是正常氢原子的两倍，这种重氢被命名为氘。尤里也因此而荣获诺贝尔奖。

氘的原子量为二。因为它的原子核除有一个质子外，还有一个中子。后来，化学家又发现了氢的第三种同位素氚，它含有两个中子。氘是稳定同位素，但氚却是放射性同位素。其他常见元素也有同位素。碳有碳—12，碳—13，碳—14。碳—14 是放射性同位素，已经成为含碳物质测年的基本工具。氧有氧—16，氧—17，氧—18。它们都是稳定同位素，不会衰变为子元素，因而也就不能用于放射性测年。

然而就像尤里能将氢分离为重同位素和轻同位素一样。所有的同位素都是可以分开的。二次大战期间，尤里为曼哈顿计划工作。战后重操旧业，致力于基础研究，开始思考稳定同位素在自然界的分馏机制及其后果。

最常见的氧同位素是氧—16，其原子核中有八个质子和八个中子，占自然界氧原子的 99.756%。氧—17 多一个中子，氧—18 多两个中子，分别占氧的 0.039%和 0.205%。当氧与其他元素结合成化合物时，化合物中的氧里也含有一小部分重同位素氧—17 和氧—18。化合物中各种氧同位素百分含量，称为它的氧同位素组成。通常，氧—17 极少，很难精确测定。因此用最重和最轻的两个同位素即氧—18 和氧—16 的比值，已经足够表示氧的同位素组成了。

水 (H_2O) 是大家熟悉的氢和氧的化合物。它既含轻氢，也含重氢，又含有氧的三个同位素。海洋的水已经完全均质化了，其氧—16 和氧—18 的比值实际上是到处一律的，因此可以作为比较的标准。这就是标准平均海水，简称 SMOW。然而，云就像尤里在实验室中反复用蒸发和冷凝的方法，从液态氢中排出的蒸气，虽然来自海水，但与海水相比，其中重氧—18 的同位素含量都少了许多。氧—18 含量低于平均海水，称作相对 SMOW 具氧—18 负异常，因此，云具有负的氧同位素异常。当然，从云层中落下的雨雪亦然，由降雨和融雪补给的山川江湖更无例外。反之，氧—18 含量高于 SMOW 者，称为正的氧同位素异常。

应用古温度计

1946 年，尤里在瑞士联邦理工大学的一次学术报告中发表了他的新发现。在座的该校矿物学教授尼格里 (Paul Niggli) 立即敏感地意识到，这一方法在地质学中有广阔的应用前景。多少年来，地质学家一直为无法区分湖相和海相的石灰岩而深感苦恼。石灰岩即碳酸钙 ($CaCO_3$)，是一种含氧的岩石；这些氧来自于形成石灰岩的水体。如果淡水相对于 SMOW 具有负的氧同位素异常，那么形成于湖泊中的石灰岩相对于海相石灰岩而言，也应当有较低的氧—18 含量。基于这一推测，后来尤里选定北卡罗莱纳州匹蒂组

(Pee Dee Formation) 海相石灰岩中的一种生物介壳作标准物质，用以判别成因不明的碳酸钙沉积。

尼格里在尤里报告之后所作的一番评论，可能改变了尤里一生的方向，开始从化学专业改攻地球和行星科学。在他的新历程中，第一个重要贡献就是以碳酸钙的同位素组成，作为测量古海洋温度的古温度计。理论分析显示，即使是从同一个 SMOW 中结晶出来的碳酸钙，其氧同位素的相对丰度仍将受到结晶时温度的影响。较高的水温引起的分馏作用对较活跃的轻同位素比较有利，故在较温暖海水中沉淀出来的碳酸钙中，较重的氧—18 相对较少。尤里和他的学生麦克雷 (J.M. McCrea) 根据计算编制了一张查阅古海洋温度的量度表。温度变化引起的氧同位素差异之大，即使用当时的质谱仪测定，精度也已绰绰有余了。鉴于海洋生物介壳是由从海水中析出的碳酸钙构成的，所以尤里推断，化石介壳的同位素组成应能指示当时的海水温度。

根据上述理论分析，尤里在一名年轻的古生物学家洛文斯坦 (Heinz Lowenstam) 的协助下，由美国地质学会的经费支持，开始寻觅化石，并发现细长而尖，状如箭矢的箭石是一种最合适的古温度计。

尤里选中箭石作为标准物质，是因为这种化石保存极佳，而其他许多化石均已发生成岩作用，造成原来的矿物被新的矿物取代。第一次测定的是取自英格兰侏罗纪地层的一块箭石标本。这块标本直径约 2.5 公分，浅棕色且透明。切出一个剖面可以看到十分清晰的生长环；他们分析了 24 个环。氧同位素异常的变化范围相当于摄氏 14 度至 20 度的水温变化。从温度变化的历史得知，这一侏罗纪的游泳生物经历了三个夏天和四个冬天，死于春季，享年四岁。

之后，英国博物馆向芝加哥的研究团体，提供了英格兰中到晚白垩纪白垩中的箭石、牡蛎及腕足类化石。哥本哈根大学博物馆又赠送了三个马斯特里奇期的箭石标本，其中最新的一个标本采自顶部白垩以下 17 公尺处，大约生活在白垩纪终结以前的 100 万年左右。在美国的密西西比、田纳西、北卡罗莱纳和南卡罗莱纳州的匹蒂组石灰岩中，也采集了箭石和牡蛎样本。英国的标本显示，白垩纪末期温度从摄氏 23 度降至 14 度。美国样品的纬度带更偏南，也有相似的古温变化，但趋势不甚清晰。

尽管尤里只有零星而初步的资料，还是卷入了恐龙灭绝的争论。他和同事在发表于《美国地质学会志》的一篇论文中表示，他们倾向于恐龙乃是冻死的假说。也许是出于某种预感吧，虽然尤里样品不多，一个化石带只有一个样品，但他相信如果有更多的样品，定会显示出更为明显的温度递降趋势。于是，白垩纪末期气候变冷学派胜了一局。

尤里的学生洛文斯坦和爱比斯坦 (Sam Epstein) 于 1954 年继续从事此项研究，作了更多有系统的研究，从瑞典、丹麦、英格兰、荷兰、比利时、法国、阿尔及利亚、印度、日本、澳大利亚和美国采集了大量样品，得出了一亿年前大约在白垩纪中期的辛诺曼期 (Cenomanian) “平均箭石温度”，

最低为摄氏 15 度，而在马斯特里奇期，在温度降至另一个最低点前的最高温度为摄氏 20 度。洛文斯坦和爱比斯坦重申早先的结论：没有发现可以导致恐龙灭绝的“温度大幅度升高的证据”。但是从另一方面分析，恐龙既然度过了一亿年前寒冷的辛诺曼期，那就没有理由把 6500 万年前恐龙的灭绝归因于气候变冷，“除非有尚未发现的因素同时发生”。

从芝加哥校园内发出的数字并未为学术界广泛接受。老派的古生物学家用古生态证据质问古温度计的有效性。他们举出了大量证据，如造礁珊瑚、热带软体动物和大型有孔虫歧异度的增加，就辛诺曼期和马斯特里奇期中的寒冷期提出了质疑。从生态学的资料来看，海水的温度在这些时期是最高而不是最低的。为了解决这一矛盾，他们提出一种可能性，即海洋生物对同位素是有选择性的。如果箭石优先用较重的同位素造壳，那么即使当时生活在温暖的海水中，其氧—18 的含量也会偏高，从而显示出低温海洋的特点。这种可能的“关键效用”仍未确定，不过在第二轮的争论中，变暖说似又扳回一局。关于白垩纪末期气候的争论，在相当长的一段时间内众说纷纭，莫衷一是。也没有进一步的证据足以说明，在白垩纪最后的 1000 万或 2000 万年内，气候究竟变暖还是变冷。

由于箭石在中生代末期就已灭绝，新生代早期没有任何气候变化的资料。洛文斯坦和爱比斯坦分析了马斯特里奇期和达宁期的其他化石，但未见二者的氧同位素组成有什么明显区别。有些像腕足类的生物分布甚广，也极为常见，对同位素测定理应很有价值，但却因为成岩作用引起的变化，改变了它们的同位素信号。这些生物原产于海相石灰岩或白垩中，后来升到了陆地上。在地下水的作用下，原来的松散沉积物变成了岩石，化学成分也发生了变化。因此，人们多年来一直都在寻找合适的化石，以便应用尤里的古温度计。

得力助手出现

1958 年夏，我到迈阿密访问。我的老朋友金斯堡（Bob Ginsburg）特地安排了一次午宴，介绍我与一位满脑子新主意的科学家艾密连涅（Cesare Emiliani）认识。

那年，地球科学界正经历着一场激烈的争论。发明动力定位船的技术突破，为科学家在深海底钻孔取样提供了可能途径。

通常，近海钻采的平台是用海底打桩的办法来固定的，墨西哥湾和北海的油井钻采都是如此。但是，在 5000 公尺深的海底打桩殊非易事。而动力定位船却毋需系船于海底；它能根据监测电脑的指令，调节四个发动机，使船身稳定的保持原位。这一技术突破问世以后，许多科学机构都想在海底钻一个 5000 公尺深的钻孔直透洋底，那就是所谓莫霍孔（Mohole），就像美国的孩子都梦想挖一个井穿过地球到中国旅游观光一般。科学界为此已经花

掉了几百万美元，并向美国国会提出了更多的资助要求。

艾密连涅认为，这是一个不切实际的计划，无异把钱扔进大海（事实证明是如此）。他觉得在洋底沉积物中钻一些浅孔，取些样品研究大冰期的气候变动要比莫霍孔有意义得多。

艾密连涅曾在波隆那（Bologna）大学研习古生物学。他以祖国和母校为傲，总是不失时机的赞美杜斯康尼（Tuscany）的绮丽风光，宣传波隆那大学是世界上最老的大学。艾密连涅早年在波隆那大学研究浮游有孔虫，二次大战后获得去芝加哥大学作博士后研究的奖学金，而该校正是尤里推广应用古温度计原理的发祥地。当时艾密连涅研究的是深海沉积物样品（但绝对没有到界线处那么深）。深海沉积物是由有孔虫和超微浮游生物介壳组成的石灰质泥，称为软泥。用手使劲捏时，会从指缝间流出来。尤里在深海沉积物的研究受到挫折，因为在他的样品中，有的有孔虫栖息在寒冷的海底，而另一些则是在温暖的海面。任意取出的样品是这两类有孔虫不同比例的混合物，因此尤里无法得出有意义的结论。如果要根据软泥进行温度分析，必须设法将温水浮游有孔虫与冷水底栖有孔虫分开。未经专业训练及没有鉴定浮游生物的经验，便无法区分这些微小生物。因此，当艾密连涅这位专家出现在芝加哥时，尤里如获至宝。艾密连涅知道如何区别这两类有孔虫，他正是研究深海气候史的得力助手。

划分大陆冰期

在当时，惟一详细研究过的古气候事件，是200万年前到一万年前的冰期。地理学家兼地貌学家彭克（Albrecht Penck）曾在德国的巴伐利亚山区度过了许多宝贵的青春岁月，那里冰川遗迹比比皆是。彭克首先认识到大冰期并不是一个持续的寒冷期，而是一个气候波动的时期；既有冰川的推进，也有冰川的后撤。1880年代，彭克在德国南部工作。他注意到现代河流流经砾石滩时，形成蛇曲的能力很弱。他认为这是因为现代河流没有搬运砾石的能力，因此这些粗碎屑物质必定是大冰期时由汹涌奔腾的冰川融雪水搬来的。

彭克又发现，河谷两侧的台地之下，也有与现代河谷一样的砾石沉积分布。这些砾石必定是在大冰期的较早期沉积在较高的位置上的。经过仔细的追踪对比，他分出了四级阶地，从而推想有四次冰川推进的寒冷期。这就是彭克及其助手布吕克纳（Brückner）分出的四个冰期。他们用当地的河流来进行命名，即贡兹冰期（Günz）、明德冰期（Mindel）、里斯（Riss）冰期和玉木冰期（Würm）。这在欧洲已经妇孺皆知。冰期之间是间冰期，其气候与现代一样，甚至更加温暖。

北美的地质学家用不同的方法得出了相似的结论。他们指出，冰川在向前推进时，会将泥石推向两侧，就像推土机前进时把泥土推向两边一样。有

些碎屑裹在冰川里，化冰时就留下一片粗碎屑物质，堆积在泥质的基质中，这种堆积物称为底冰碛。间冰期到来，冰碛物一部分一部分的风化为土壤。只有在冰川重返时才会再次被覆盖，并在土壤层顶部堆上新的一层底冰碛，因此可以透过计算冰碛层和其间的土壤层来确定冰期和间冰期的次数。与彭克一样，北美地质学家也发现了四次冰期和间冰期。他们根据出露最好的地点命名，即内布拉斯加（最老的）、堪萨斯、伊利诺和威斯康星冰期。我学习地质时，一般认为美洲的四个冰期与欧洲的四个冰期是遥相对应的。

无论是美洲抑或欧洲的经典方法，都不能提供冰川历史的完整纪录。后来的冰期，可以把前次冰期留下的沉积物剥蚀净尽。例如在瑞士，里斯冰期似乎是最强有力的，它剥掉了较早冰期的许多沉积物。同样，河流台地也会随着时间的推移而不断遭受侵蚀，以台地数目进行对比也存在着不少的争论。其实在彭克最终确定四冰期的划分方案之前，曾一度认为只有相当于三次冰期的三级台地。彭克身后，其他科学家又发现了更多的河流台地，说明大陆冰川可能不止四期。然而，理论一旦被写进了学校教科书，就立即变成了不容争辩的真理。虽然我们不得不提出里斯、里斯、玉木、玉木乃至玉木之类的“亚冰期”，仍必须保留贡兹、明德、里斯、玉木冰期的名称，藉以维护那种魔术般的命名系统。

深究大冰期的历史

海洋是沉积物最大的堆积场所，可以提供地球历史各方面的连续纪录。但是在彭克的年代，还只能在海底抓泥取样。这些样品只能说明近代的历史，还不能揭示大冰期的秘密，因为大冰期的沉积物深埋在表层沉积物之下。若要从表层沉积物下面取样，必须有海底取芯技术。

德国“流星号”考察船于1925到1927年间在大西洋进行考察时，取得第一个深达大冰期沉积物的岩芯。这种最早期的取样技术称为重力取样。他们把一个空心的钢管系在钢缆的一端沉入海底，再把钢管拉到甲板上，就会得到一段沉积物的岩芯。重力岩芯的长度约为一公尺。科学家在研究“流星号”取自赤道大西洋岩芯中的有孔虫化石时，有一个有趣的发现。在岩芯最顶部的众多有孔虫中，有一种麦氏有孔虫（*Globorotalia menardii*）。这种有孔虫现在仍然生活在热带海域。但在岩芯的中段，却不见这种典型的温水种，显然这段岩芯沉积时的海洋太冷了。因此，研究人员认为它们是在最后一次冰期，即玉木冰期时沉积的。当时赤道部分的大西洋要比现在冷得多。再往下，在接近岩芯底部的沉积物中，麦氏有孔虫又再次出现，似乎代表末次冰期以前的一次间冰期的气候纪录。

“流星号”的调查结果燃起了人们的希望。但由于当时技术水准的限制，样品极为有限。大洋沉积物的堆积速率通常为每千年几公分，一公尺长的岩芯只能说明几十万年的历史。单凭重力的作用自由下落，不可能使取样

器深入海底一公尺以下。因此，还要待长岩芯的取芯技术发明之后，才能弄清楚大冰期更详细的历史。

相持不下

第一个重大突破就是库伦堡取样器。这种活塞取样器以发明者库伦堡（Börge Kullenberg）的名字命名。库伦堡是瑞典的一位海洋学家，领导过 1947 到 1948 年瑞典的深海考察。库伦堡取样器的原理与医用注射器的原理相似。当取样管推入海底时，一个活塞就向上拉起，活塞腾出的空间会自动的将岩芯吸入。40 年代末期，这一设备投入使用。从那以后，地球科学工作者就能得到更长的岩芯了，也就有了获取更古老气候信息的机会。纽约州派利沙德的拉蒙特地质观察站用库伦堡取样器取得了大西洋和加勒比海的长岩芯。埃里克森（Dave Ericson）和沃林（Goesta Wollin）于 1950 年发现，喜欢温暖的麦氏有孔虫在过去的 200 万年中曾四次明显缺失，标志着相应的四个寒冷气候期。人们希望证明这四个寒冷期就相当于欧洲和北美大陆四个冰期。

与此同时，一位名叫阿伦尼斯（Gustaf Arrhenius）的瑞典青年地球化学家刚到斯克里普斯海洋研究所任职不久，试图另辟蹊径，从海洋沉积物中浮游生物的资料揭示过去的气候。在现代海洋中，赤道带有极为丰富的浮游生物。因为来自南极的底流在那里随着上升流上泛，为浮游生物带来了生活必需的营养盐。根据他对底流特性的研究，阿伦尼斯推测，冰期时南极冰川向前推进，大洋底流更强，也就会有更多的营养盐被带到赤道区，浮游生物的产量当然也高得多。

浮游生物的相对数量是可以测量的。它们死亡后，具有钙质骨骼的遗骸沉到海底，使沉积物富含钙质化石。超微浮游生物愈多，沉积下来的碳酸钙也愈多，因此可以根据碳酸钙的含量来区别赤道海洋冰期和间冰期的沉积物。冰期海洋沉积物应比间冰期沉积物含有更多的碳酸钙。用这一原理去研究太平洋的岩芯，阿伦尼斯在斯克里普斯的同事没有发现一般相信的四个冰期，反而似乎至少有九次强烈的寒冷期。

两种不同技术路线引出的不同结论，必须有第三种方法来加以检验。当时在芝加哥大学同位素实验室工作的艾密连涅，想用尤里新发明的方法来直接确定大洋的温度。用来分析古水温的岩芯取自加勒比海，也就是埃里克森和沃林用来进行麦氏有孔虫数量分析的岩芯。

这两种不同方法所得出的温度结论在岩芯上部颇吻合，但对下部岩芯却截然相反。整个下部岩芯中都没有麦氏有孔虫，说明气候寒冷。但艾密连涅手中的同位素资料却表明，在这一段时间内有两个温暖期，中央有一个寒冷期。当艾密连涅用他的气候纪录与彭克从陆上河流台地得出的冰期对比时，与拉蒙特的科学家产生了更为激烈的争论。艾密连涅认为加勒比海的岩芯可

代表彭克的四个冰期，而埃里克森和沃林却认为这段岩芯只到达第二古老的冰期，即明德冰期的顶部；双方都怀疑对方使用的方法。艾密连涅认为，影响麦氏有孔虫存在与否的不是气候，而是其他因素；而埃里克森和沃林压根儿就不相信同位素技术的可靠性。

这就是我于 1958 年与艾密连涅在迈阿密共进午餐时的背景情况。毫无疑问，对他来说更紧迫的是大冰期的岩芯而不是莫霍孔！

终于如愿

当时，艾密连涅接受了迈阿密大学的邀请，刚刚离开芝加哥。他要继续从事稳定同位素的研究，首先需要一台质谱仪。而他本人并非一位经验丰富的仪器专家。所以他说服了他的瑞士朋友盖斯（Hans Geiss）来帮忙。他们东拼西凑，终于组装成一台质谱仪。去迈阿密时，他们骄傲的领我参观了他们的实验室。艾密连涅情不自禁的谈起了他的新发现。他曾以为自己首次从加勒比海岩芯得出的四个寒冷期可以与贡兹、明德、里斯和玉木冰期对比，但又不敢肯定，因此只能用数字表示气候期而不敢径行使用冰期的名字。现在他来到了迈阿密，而且有了长岩芯，发现了七个旋回性的变化。当时，斯克里普斯海洋研究所的科学家发现的气候变化似乎已成定论，但也不可能与彭克的年代表相对比。显然，我们都站在一个有关大冰期的思想革命的十字路口。而要实现这场革命，需要更多的样品，尤其是长岩芯。

艾密连涅怀着外国移民常有的乐观情绪，认为美国是一块机会最多的土地。于是他在 60 年代初期向美国国家科学基金会提出了一项申请，要求基金会支持他取得深海沉积物的长岩芯，以研究气候变化的历史和原因。当时，美国国家科学院的科学家正在讨论这个问题，打算立一个项目来研究洋盆的沉积物和上部地壳，并希望一些领先的研究所来倡导此事。艾密连涅的申请递得恰是时候。但迈阿密大学无论人力或设备上都不足以独力承担此事，还要从其他大学找到一些发起者，艾密连涅才能如愿以偿。

1963 年，哥伦比亚大学拉蒙特地质实验室的主任艾运（Maurice Ewing）也加入了这一行列，为大洋沉积物的钻探计划四处奋斗。于是，迈阿密大学和拉蒙特实验室的代表，联合斯克里普斯海洋研究所、普林斯顿大学和伍兹霍尔（Woods Hole）海洋研究所的代表，组成了 LOCO（Long Cores，长岩芯）委员会寻求资助，以建造一艘动力定位船。就同其他领域一样，科学政治中也少不了权位之争，新合作的伙伴不免要争个你短我长。因此，在 LOCO 进一步改组为海洋调查探勘组织（CORE）时，迈阿密和普林斯顿首先退出。随后，迈阿密又与拉蒙特、斯克里普斯和伍兹霍尔等单位重新联合，成立了“地球深部取样联合海洋研究机构”（JOIDES）。后来，习惯于议会政治的美国国家科学基金会认为，需要增加美国太平洋岸西北方的区域代表。于是，华盛顿大学也应邀参加了这一组织。

1965年，JOIDES租用了动力定位的“卡德列尔号”(Caldwell)，并于四五月间在大西洋钻了14个孔。从这些岩芯获得的结果十分引人注目。愈来愈多的人相信，全大洋的沉积物取样势必获得更大的成功。1967年，根据JOIDES顾问委员会提出的构想，各方又签约组织了“深海钻探计划”(DSDP)，并由斯克里普斯海洋研究所组织实施这一计划。为了实现这一计划，环球海洋公司专门建造了一艘新的钻探船，命名为“D/V·格洛玛·挑战者号”(D/V Glomar Challenger)，以纪念光辉的海洋调查先驱“HMS挑战者号”。该船于1968年3月下水，距离艾密连涅向国家科学基金会提出申请恰好四年。

格洛玛·挑战者号于1968年7月20日离开德克萨斯的橘港(Orange)，驶向墨西哥湾进行第一期深海钻探。艾运这位JOIDES的主要倡导者获得领导第一航次的荣誉。翌年，我也参加了JOIDES—DSDP的活动，随第三航次远赴南大西洋去验证海底扩张理论。艾密连涅的愿望，与导致地球科学革命的那些宏伟目标相比，真算不了什么。这些愿望很快得到了满足，不久就得到了大冰期沉积的100公尺长岩芯。

变冷说获胜

那个航次中取得的岩芯，也激起了有关白垩纪末期气候的新争论。钻孔深逾1000公尺，取得了中生代中期以来长达1500万年期间的沉积物样品。其中的DSDP21号钻孔位于西南大西洋的里奥格兰德(Rio Grande)海隆上，穿过了白垩纪—第三纪界线。我们把这些样品取回后，进行了同位素分析。格洛玛·挑战者号船上的古生物学家斋藤分开了浮游有孔虫和底栖有孔虫，他在拉蒙特的同事分别分析了这两类化石，得到了海底和表层的水温值。工作于1974年结束。无论是海底抑或表层的资料都表明，在中生代末期的最后几百万年内，温度都下降了摄氏五度左右，新生代早期的海洋甚至更冷。因此，拉蒙特的学者同意尤里及其同事关于中生代末期气候变冷的结论。而且这一变冷的趋势越过白垩纪—第三纪的界线进入了新生代。关于白垩纪末期气候争论的拉锯战，趋冷学派取得了第三回合的胜利。

然而，拉蒙特学者的研究成果带来的喜悦是短暂的，他们的结论很快遭到了责难。因为所谓变冷趋势是根据三个代表300至500万年的样品作出的，短期的气候波动只有十万年，甚至更短。如果样品更多一些，结论可能完全不一样。

格洛玛·挑战者号在头五年内钻了二百多个钻孔，取得了几千公尺的岩芯，但只有极少数岩芯作过古温分析。这不是因为缺乏兴趣，而是因为几乎没有样品适合于此项分析。例如，我们在20号站位也钻穿了白垩纪—第三纪界线。但这些沉积物中的底栖有孔虫极少，无法进行同位素分析。

变暖说扳回一局

我自己也遇到过同样的问题。1972年，我第二次参加深海钻探随船去地中海。我们发现了古生物方面的证据，说明500万年前地中海的底层水要比现在冷。我想取得某些真正的数字，于是同我的老船友、拉蒙特的斋藤讨论有关同位素技术方面的问题。他向我解释了其中的难处：大洋软泥中所含的底栖有孔虫太少，不够作常规的同位素分析。但是他听说剑桥大学有一位年轻的物理学家正在研究微量样品的同位素分析技术，可能会助我们一臂之力。斋藤处理了二公尺化石稀少的岩芯，才挑出三颗细小的地中海底栖有孔虫。他将这三颗化石封在一个小瓶里，托人捎到剑桥，交给了夏克尔顿(Nick Shackleton)。

夏克尔顿是一位著名地质学家的儿子。为了回避托庇乃父声望之嫌，他决定学习物理，学成后在剑桥大学植物系工作。因为该系有一个小组专门从事古植物的研究，也包括古气候的应用，而这个组正需要一名长于同位素分析的物理学家。因此，夏克尔顿虽然躲开了地质系，但是并没有逃出地质学。他操作仪器的熟练技巧使他很快成为更新世和全新世地质学的第一流专家。

夏克尔顿分析同位素组成的样品可以少到几十微克，但这项技术的重要性却并未轻易受到认可。1979年，我就想请他到苏黎世来帮助我们改进同位素实验室(最后他终于来了)。但当我在一个学术评议会上赞扬他的成果时，一些同行对他的发明有多少价值提出了质疑。从事物质成分测试的教授都希望分析样品愈大愈好，因此不认为分析微量样品有其必要。而我则一再解释，如果我们需要精密的地层学数据，非有微量测试技术不可。从二公尺岩芯中挑出的有孔虫，其同位素值只能反映25万年或50万年的平均温度，但从一公分样品中挑出的有孔虫却可以提供几百年的平均海洋温度。夏克尔顿的技术恰能使我们如愿以偿，得到极短期气候变化的信息。

夏克尔顿在70年代初期开始从事微量分析，我从地中海取回的样品正是他分析的第一批样品之一。他在以后若干年中所作的工作，很快填补了大冰期气候波动纪录中的空白。深海钻探计划第二阶段的主要任务是研究古气候。为了达到这一目的。格洛玛·挑战者号于1973年出航南极。罗斯海一钻成功后，又驶到纽西兰以南水域，在那里一连打了三个孔。有一个孔深达472公尺，钻到了新生代最早的一个世——古新世的沉积物。当时，在佛罗里达大学执教的纽西兰人肯纳特(Jim Kennett)是这一航次的首席科学家之一，也是一位有孔虫专家。肯纳特的取样间距大于80公分，每个样品代表100万年的时间。他亲自挑样，分开浮游和底栖有孔虫，由夏克尔顿进行同位素分析。他们携手合作，第一次提供了南部大洋新生代气候变化的数字纪录。这些纪录表明，水温的下降并非一条直线。相反的，却监测到了新生代七个气候变化的阶梯。最后一个阶梯是在250万年以前，正是大冰期时期

促使大陆冰川向前推进的一次变化。

虽然夏克尔顿和肯纳特的论文发表在一份发行量非常有限的考察报告中，但这一划时代的贡献已成为地质学中引用最多的文献之一。我们在瑞士的科学家对于这项重要研究成果并未视而不见。夏克尔顿终于在 1978 年实现了他的苏黎世之行，在那里介绍了他们在南部大洋取得的资料。

夏克尔顿的新资料使我们吃了一惊。有一个钻孔 DS-DP384，钻于西大西洋底。它不仅钻穿了下第三纪，而且穿过了上白垩纪。夏克尔顿因此得以把他的温度纪录延拓到白垩纪—第三纪界线。他的技术也有了进一步的发展，当时已能分析只有几个同种有孔虫化石的样品。混合样品只能提供混合的信息，只有单种样品的信息才是清晰而鲜明的。夏克尔顿为我们作了一张图表，展现 DSDP 384 孔的最新成果。在该站位，白垩纪之后的底水温度有突然升高现象，大约升高了摄氏五度左右。于是，“变暖说”赢得了最后一局。

夏克尔顿习惯单调平淡的说话方式。他虽然提供了极为重要的数字，但无意卷入恐龙灭绝问题的激烈争论。报告结束后，招来了不少疑问：为什么他的资料与拉蒙特科学家的结论不一致？夏克尔顿的解释非常简单：“因为前人并未掌握界线上百万年的代表性样品，许多讯息丢掉了！”他对自己的测量结果深信不疑，结论斩钉截铁。那么，是什么原因引起了温度上升呢？他不知道。但是偌大的海洋如此突然升温摄氏五度，显然是任何气候波动所无法解释的。

陨石带来大难？

思想活动有时是很奇怪的。自从我在那次午餐时匆匆翻开德·劳本菲尔斯的怪文至今，已经二十多年过去了。我依稀有此记忆，但已记不清文章发表的年月和杂志名字，连作者的大名也忘却了。

但是，“热空气”的故事已经储存在我的脑海里，当夏克尔顿在屏幕上放映他的图表时，这一记忆一下子恢复了。在图书馆员的帮助下，我重新查阅了这篇文章和作者的经历。文章的标题是《恐龙的灭绝：又一个新假说》，发表在 1956 年的“古生物学期刊”上。德·劳本菲尔斯曾是俄勒冈州立大学的古生物学教授，是一位海绵化石专家，但平生著述不多，关于恐龙灭绝的文章是他的最后作品。文章发表后的第三年，他就与世长辞了。

德·劳本菲尔斯认为，导致恐龙灭绝的热空气并非持续时间很长的热浪，而是一次短暂的冲击。他认为赤道附近的温度接近沸点，在高纬度地区亦可达摄氏 50 度（华氏 122 度）。“炽热的风暴席卷大地，只有零星的小块地区得以幸免。”环境如此恶劣，恐龙必死无疑。巨大的爬虫藏身无地，也遭灭族之难。乌龟“有能力在水中屏气几小时”，因而幸免；鳄鱼也度过了这场浩劫。德·劳本菲尔斯说，可能是“一堆鳄鱼蛋深埋在泥里，躲过了冲击。”蜥蜴之所以能幸存，是因为它们能钻进岩石的缝隙或洞穴中躲避高

温；蛇也因为藏身有术未遭厄运。鸟类和哺乳动物的运气最好，因为它们生活在“白雪皑皑的高纬度地区……，即使是近乎沸点的热空气，吹过数英里的雪地之后，也会降到适宜呼吸的程度。”短暂的热变化仍能留下足够的植物。野火烧不尽，春风吹又生。它们的根还会发芽，使植物界重新占领这个世界。

德·劳本菲尔斯在文章中没有提到菊石和海洋浮游生物。他可能认为，当空气的温度达到沸点时，大概再也不会会有任何表层游泳生物幸存，因而也就无需讨论。至于这一瞬间的世界末日的原因，德·劳本菲尔斯归诸击中地球的一颗巨大陨石。他认为，一颗直径 100 公尺、重量 3000 万吨的铁陨石就能引起这场灾难。这样一次冲击释放出来的能量，相当于 3000 百万吨 TNT 炸药，或者相当于 20 万个广岛原子弹。

我在 1956 年初次拜读德·劳本菲尔斯的文章时，虽也觉得言之成理，但总以为还不足为科学理论，因为作者并未提出什么证据。像其他许多不成熟的思想一样，德·劳本菲尔斯的陨石冲击说只能被束之高阁，等待有朝一日证据俱在，再来证明它的正确性。现在，夏克尔顿提供了数据。看来似已有可能证明这位被人遗忘了的古生物学家确是一位了不起的预言家。那么，陨石冲击引起的热空气果真能使大洋变热吗？

第七章 死神天降

我有一个习惯，每周都要去一次图书馆，浏览新出版的杂志，就像早餐时浏览报纸一样。在紧张工作之余，这未尝不是一种休息和解脱。《自然》和《科学》是我最喜欢的两本杂志。它们都是周刊，常常刊登新发现和新见解。从避孕药物，到英格兰南部索立兹伯里平原史前石柱群的新假说，乃至未受精蜥蜴卵孵出的奇闻，凡此等等，无奇不有。70年代早期，人们对柯特克(Kohoutek)存在彗星出现可能引起的后果忧心忡忡，也引起了我的关注。有一天，我偶尔看到一篇文章，提及威普(Fred Whipple)于1950年撰写的有关彗星的作品。

中国人将星体分为四类。太阳属于恒星，在太阳系中占有固定的位置；地球叫作行星，围绕太阳旋转；流星或陨星是指那些从天而降的寂灭星体；彗星又称扫帚星，因为其形状如同扫帚，中国人视之为不祥之物。

威普在文中写道，英文彗星(comet)一词，源出于希腊字aster kometes，意为“长发星”，与中文俗名颇有异曲同工之妙。所谓“长发”，就是指的彗尾，彗星的头部称为彗首。彗首的中心是彗核，周围是由冰晶、尘埃和离子颗粒——失去电子的原子——等物质组成的气层。这一气层形成彗尾的起点，可以拖在彗星之后，形成几百万公里长的尾巴。人们并未目睹彗核究竟是什么样子，但计算结果显示它的直径鲜少超过十公里。

彗星把一些碎屑颗粒撒向身后的星际空间，而碎屑大小多半与葡萄相差不多。因此，多年来，人们一直认为彗核是某种匆匆掠过星空的“砾石库”。这些与铺路石子相仿佛的固体颗粒，并未胶结成团，只不过由于相互间的吸引力而松散的聚到了一起。

这种砾石的松散集合体，在宇宙空间里就像流体一般。过分接近一个强引力星体时就会遭到破坏。根据19世纪法国著名天文学家罗谢(E. Roche)的计算，当它接近一个星体，距离达到该星体直径的2.5倍以内时，就会因为星体的引力而被撕裂。这一极限直径就称为罗谢极限。

威普在1950年提出一个新的想法。他认为，与其说彗星像一个砾石库，倒不如说更像一个脏雪球。彗核中的碎屑并不是一些松散的石块，而是镶嵌在冰里的固体颗粒。彗星的运动特性启发了威普。根据牛顿的万有引力定律，彗星的周期应当像时钟一样规则。但是恩克彗星却已经比它三年一度的来访周期提前两个半小时，而哈雷彗星则总是迟到；在最近的11次观察中，发现它出现的时间平均每次要迟到4.1天。威普认为，这种反常现象只能用一种假定来解释，那就是彗星在接近太阳时失去了一部分质量。因此，他推测是太阳的辐射使脏雪球中的冰发生了升华——即不经融化而直接蒸发，从而散失一部分质量。从彗星中涌出的蒸发分子的喷射作用可以推动彗星运动，使之接近或远离太阳，并因此提前或延迟出现。

1965年，威普有关彗星组成的假说有了难得的检验机会。池谷一关彗星

在其轨道的近日点与太阳的距离，只有太阳直径的三分之一，正好位于罗谢极限之内。如果彗星是一个砾石堆，它就要碎裂，而如果它是由冰胶结在一起的，那么彗核就会有足够的强度免遭碎裂的命运。结果一如所料，该彗星并未因为太阳引力引起的潮汐力而分裂，几乎毫无损伤安然离去。威普的推测被证实了。

通古斯事件

是什么物质构成了彗核的冰雪呢？当然是冷凝的水。然而威普在文章中指出，除了水之外，还有其他许多物质也在外层空间的极低温度下结成了冰。例如，火星上的冰就是“干冰”，亦即冷凝的二氧化碳，在彗核中也有干冰。但除此之外，氨、甲烷、一氧化碳也与金属的和石质的尘埃冻到了一起。

今日读来，威普的文章仍然引人入胜。当我得知在彗星中还发现了冰冻的氰化物时，我陷入了沉思。人们早就发现彗星中显示出含有氰化物，但总是不甚确切。最近对柯特克彗星的研究排除了一些疑问：它的资料证明，彗星不仅含有氰化物这种致命的毒物，而且其含量可达彗星质量的 10% 或 20%。

想到氰化物的剧毒，我不由得倒吸一口凉气。哈雷彗星的质量是一万亿吨，如以含量 10% 计，则氰化物的重量将是 1000 亿吨。如果把如此大量的毒物倾泻到海洋中，那将是怎样一种情况呢？

这一想法从我的脑海里一闪而过。但是在十亿年的时间跨度内是不会有哈雷级的彗星撞击地球的。我继续阅读，把这一可怖的预测淡忘了。

时光如驶，那是 15 年前的事了。当时我对地质时间在灾变事件中的重要性还很模糊，也不了解时间与概率之间究竟有什么关系。谚语有云：“只要有充足的时间，万物皆可应运而生。”对于这一点，我也没有认真想过。诚然，我的直觉并没有错，十亿年间不会有如此巨大的撞击事件。但是地质历史已经有四十多亿年，小规模撞击事件频频发生，众多的古代撞击坑可以为证。在短短的人类历史中，西伯利亚的通古斯地区就曾发生过一次大规模的撞击事件。

通古斯是西伯利亚中部的一个宁静偏远小村。1908 年 6 月 30 日上午七时许，一颗光耀夺目的大球出现在东南方的地平线上。亮蓝色的光球越过无云的晴空，在西北方一闪而灭，传来的爆炸声震耳欲聋，爆炸的规模是史无前例的。当地震学家从仪器上读出震级并计算它的能量时，不由得都惊呆了。用当代语言来说，其爆炸能量相当于千万吨级的核爆，或者相当于 700 个广岛原子弹。

据目击者报导，数百公里以外都可以见到爆炸的光焰，1000 公里以外都可以听到爆炸的轰鸣声。浓烟滚滚的火柱拔地而起，接着一团蘑菇云冉冉升

起，直达 20 公里的高空。60 公里以外的一位农民竟被灼伤，被热空气从台阶直抛到几公尺以外。其冲击波绕地球两星期后方始消失。两个晚上之后，爆炸喷射物弥漫到了北欧上空。两周之后，加州接收到大量细粒尘埃，空气透明度为之一变。

所幸爆炸发生在 8.5 公里以上的高空，其落点又是人烟稀少的不毛之地。据最先进入受难地区的猎人说，爆炸引起了森林大火，整个森林破坏殆尽。事隔 20 年之后，人们才开始进行系统的调查研究。1927 年，以库列克 (LeonidKulik) 为首的首批苏联科学家来到灾区，靠马车出入被破坏的森林，调查爆炸的后果。他们披荆斩棘，备历艰辛。最后绘制的图件表明，在 30 至 40 公里的范围内，树木都连根拔起，围绕爆炸中心呈放射状倒伏。在爆炸圈内，2000 平方公里的地区毁于大火。方圆 18 公里的地区内，20 年后仍是一片焦土。

撞击事件的落点已成为一个巨大的沼泽，周围有许多小坑和浅洼。库列克认为他已发现细小陨石碎屑造成的撞击坑，于是开渠排水，在抗里仔细搜寻陨石碎片，结果一无所获。直到二次大战以前，先后又派去了三个考察队。他们的结论是：那些凹坑形成于火球撞击以前。那天外来客造访该地时，竟然没有一片较大的碎屑落到地上。

二次大战后又重新恢复了对通古斯地区的研究，直到今天还在继续。虽然未发现陨石，却在土壤中发现了类似玻璃陨石的小球。这些黑色的玻璃状颗粒在土壤和沉积岩中均曾发现，一般都认为是陨石撞击作用的产物。这种撞击玻璃陨石的化学成分与陆地上的岩石相似，显然是撞击坑中的物质在爆炸热造成的极高温下发生熔化，又在下降过程中冷凝成为水滴状。其组成物质基本上与周围岩石相同，只是稍有来自陨石的地球外物质污染物。在通古斯发现的这种球粒，曾一度被视作小玻璃陨石或微玻璃陨石。小玻璃陨石是直径只有大约一公厘的球形颗粒，其化学成分与宇宙尘相似。显然它们并非撞击坑里喷射出来的物质，而是陨石在地球上空几公里处爆炸后，降落到地上的地球外物质。

那么，那天凌晨在西伯利亚上空爆炸的天外来客，究竟是何方神圣呢？

天文学家曾经提出许多如黑洞和反物质等一般人匪夷所思的说法。但像通古斯事件那样引人瞩目的陨落事件，似乎并不需要什么异想天开的解释。最合乎常情的解释就是最接近真理的解释：通古斯的天外来客是一颗陨石。

陨石俗称“流星”，是宇宙物质进入或经过地球大气层时因炽热而达到白炽化的碎片。希腊人将它误解为一种气象或大气现象，因此其英文名字叫做 meteor，源于希腊词 meteoron。现在我们知道，这种物质或者是小行星碎片这种古远年代行星碰撞的产物，或者是生成于太阳系远方的彗星碎片。这些星体碎片在驶向地球的旅程中，幸未蒸发殆尽的残余小块就称为陨石。陨石一般是石质的，也有的由铁质组成。体积和组成物质的密度愈大，就愈可能不被蒸发而成为陨石。

1947年，又有一颗铁陨石进入大气，在西伯利亚的东海岸落下，在距地面六公里处碎裂，撒下380个碎块，总重量达23吨。这次陨落事件与通古斯事件相比，真乃小巫见大巫。其爆炸能量相当于2000吨，不到通古斯陨石事件的0.1%。1965年3月31日，又有一个火球在加拿大英属哥伦比亚省上空爆炸，仪器纪录指示其撞击能量大约为二万吨，事后并发现了许多石质陨石碎屑。如果通古斯事件确是一次陨石爆炸，那么碎片何在？从事件的规模看来，它决不会是一个解体后除了微玻璃陨石之外，连碎片都不留下的小型石陨石或铁陨石。而事实俱在，偌大规模的通古斯爆炸，除了那些宇宙成分的小球外，既没有碎块，也没有撞击坑。这一现象使许多人颇感困惑，但却符合首先由威普和几位苏联科学家在1930年代提出的想法：通古斯陨石是由非常松散的物质组成的，应当是一颗与地球相撞的彗星或者彗星碎块。

这颗1908年的彗星可能是在一个与地球相反的方向里运行，与地球迎头相撞的速度可达到每秒60公里。彗核或其一部分发生爆炸并解体。其爆炸能量主要由动能转化而来，估计相当于1000万吨TNT炸药。由此反推，该彗星的质量大约为3000万公斤。

这该是一个微不足道的彗星，彗核直径大约只有40公尺，而一位捷克天文学家在1978年甚至断言，通古斯陨石只不过是一个彗星碎片。他指出，恩克彗星在1908年突然改变轨道，当非巧合，而是因为失去了通古斯陨石那么大的一个碎块。

地外星体频频造访

那么，通古斯事件是不是独一无二的呢？

一个连撞击坑都不留的撞击事件，当然也就不会留下任何地质纪录供科学家去研究。地球表面的四分之三是海洋，在海洋里难以找到撞击坑。而在陆地上，侵蚀作用会迅速消除小的撞击坑，假以时日，连最大的陨石坑也会侵蚀得踪影全无。正因为缺少证据，陨石撞击现象并未被认作一种重要的地质作用。直到太空时代揭开序幕，陨石对地球的频繁撞击作用才开始得到认真的研究。后来，太空船向地球发回了许多照片，月球表面竟布满了大大小小的撞击坑，这一发现使地质学家大吃一惊。月球上的撞击坑是过去45亿年间陨石连番轰炸的结果，那儿既无空气也无海洋，即使是松脆的彗核也会留下撞击的印记，加上没有风浪的侵蚀作用，这些痕迹才会保存无遗。火星表面虽然似曾发生过某种侵蚀作用，也仍保存着几十亿年以来陨石撞击的纪录。天体碎屑既然能撞击相邻的行星和月球，地球岂能例外？太空调查迫使我们承认，陨石撞击作用在太阳系里是一种常规现象，而并非偶发事件。

地球上最著名的一个撞击坑是美国亚利桑纳州的撞击坑。多年前，在一次去大峡谷作地质旅行的归途中，我曾去参观过。这个圆形的凹坑，直径约

为 1.2 公里。那时尚未发现陨石碎块，而在太空时代之前，并不很确定这里是否的确为地外物体造成的撞击坑。后来在这个坑里发现了一种叫做柯石英（coesite）的矿物；这种矿物虽与平常的玻璃砂成分相同，但更为致密，只有在几十万个大气压力下才能形成，而地球表面不会自然形成如此高压。除地外星体的撞击作用之外，绝无其他可能。

休梅克（Gene Shoemaker）在加州理工学院读书时的论文题目就是亚利桑纳州的陨石坑，当时我也在加州大学洛杉矶分校攻读博士学位。他发现了二万至三万年前发生撞击作用的证据，而撞击物是一块铁陨石。亚利桑纳事件是比较罕见的，但形成直径数十公尺撞击坑的小规模事件却屡见不鲜，如堪萨斯州的直径仅 14 公尺的哈维兰（Haviland）陨石坑，和西伯利亚的直径为 51 公尺的索波列夫（Sobolev）陨石坑就是佳例。像亚利桑纳陨石坑那样的大坑，就可以成为旅游胜景了。地球上直径超过一百公里的陨石坑屈指可数，但在月球和火星上，这样的撞击痕迹却比比皆是。

加拿大人格里夫（Robert Grieve）编录了地球上所有已知的陨石坑，发现撞击坑的大小是与其出现率成反比的。那就是说，灾难性的撞击事件通常是罕见的，而最小的撞击坑则最常见。规模与频率呈反相关的规律也见于其他现象，如地震、地滑、风暴引起的洪水、浪潮和火山爆发等地质灾害莫不如此。换言之，陨石撞击地球并不罕见，罕见的是大规模的撞击。小型的流星在夏日的夜空天天可见，小规模陨石撞击作用几乎每十年就出现一次。极大型的撞击体虽然罕见，但在漫长的地质历史中，确曾发生过。

格里夫的公式提供了撞击事件的概率。天文学家休斯（David Hughes）于 1979 年在《自然》杂志上发表了一篇评论文章，把这一数学关系译成了平易的文字：直径一公里的撞击坑，每 1400 年出现一次；直径十公里的撞击坑，每 140 万年出现一次；直径 100 公里的撞击坑，第 1400 万年出现一次。如果地球上的撞击纪录保存得同月球表面一样完好，那么，我们会发现地球上有一千个而不是寥寥几个毁灭性的撞击痕迹，每个撞击坑都有整个洛杉矶地区那么大。

格里夫的公式和休斯的解释，为我们提供了一条思考灾变性撞击事件的途径，此外还有一篇文章对开阔我们的思路更有助益。我为十几岁的儿子安德鲁订了一本名为《科学美国人》的杂志。有一天随手拣来浏览，发现威塞里尔（George Wetherill）写了一篇关于阿波罗（Apollo）小行星的文章，颇为引人入胜。

阿波罗小行星是一群石质的星体，其轨道面与地球的运行轨道斜交。它们离地球很近，来访频仍。所以威塞里尔认为，它们可能是地球和月球表面在过去 30 亿年中形成那么多陨石坑的主要原因。到 1979 年为止，已经发现了 20 个阿波罗小行星。隐藏在地球周围的小行星数量一定会多得多。尚未发现的阿波罗小行星中，直径在 0.5 公里以上的可能有六百多个。其中最大的那些小行星，直径大于三公里。阿波罗小行星的命运，不是与地球碰撞，

就是摆脱太阳系的引力束缚奔向宇宙空间，最后消失。阿波罗小行星平均寿命大约为 2000 万年。但是它有一个长效的来源，保持着稳定的补给，使总数基本上保持恒定。

撞击能量与频率

那么这些小行星是从哪里来的呢？威塞里尔说，阿波罗小行星其实就是彗星的致密核心。它们从太阳系远端的奥尔特 (Oort) 星云得到源源不断的补给。威普解释道，当彗星的轨道接近太阳时，每次都会使它的冰核向石质星体的转变迈进一步。例如，恩克彗星的轨道与阿波罗小行星的轨道十分接近，每三年来访一次，每次来访都要失掉一些冰。一千次来访或三千年以后，恩克彗星就会失去其挥发物而变成一个阿波罗星体。再过二千万年左右，这个彗星前身的石核就会与地球相撞。

威塞里尔的文章使我陷入了深思：如果一颗彗星在其轨道内运行终将因为挥发物丧失净尽而注定陨落的命运，那么当彗星还是一个“脏雪球”时，是否也有可能击中地球呢？而设若这种情况是可能的，那么在它失去冰的重量之前发生的撞击，规模会不会大一些？或者规模究竟会有多大？威塞里尔是当代最著名的行星科学家之一，现在还担任着国际行星地质学会的主席。他晋升为教授是我离开加州大学洛杉矶分校之后不久的事。当我还在学校时，就曾听说威塞里尔有从学生手中搜罗陨石的轶事，但却无缘相见，引为憾事。几年前的一个冬日，我们终于在莫斯科相遇了。我们都应邀到苏联首都帮助筹备一次国际地质大会。计划中安排五天咨询活动。苏联人彬彬有礼的听取我们的意见，但他们其实早已成竹在胸。我们的作用不过是认可业已准备就绪的计划，并表示遵命照办，所以我和威塞里尔都有足够的时间，围坐在科学宾馆餐厅的小酒吧前品尝伏特加的辛辣，我也就有时间慢慢探询彗星是否可能撞击地球这一悬疑了。

威塞里尔的回答是肯定的。为了压倒苏联饭馆里那种特殊的乐队音乐，这位语调柔和的教授不得不提高嗓门：彗星已经撞击过月球，而且也可能已经撞击过地球。具有致密冰核和极高速度的彗星与地球迎头相撞，可能已经造成了世界上最大的陨石坑。那么，彗星撞击地球的能量会有多大呢？

威塞里尔当场计算，像哈雷彗星那么大的一颗彗星会放出多大的撞击能。撞击能等于撞击体质量与其速度平方的乘积。如哈雷彗星以每秒 40 公里的速度撞击地球，其撞击能大致相当于 4000 亿吨 TNT 炸药，或者 200 亿个广岛原子弹。地球的表面积为五亿平方公里，哈雷级的一次彗星撞击作用释放的能量分配到地球表面，相当于每平方公里 500 颗广岛原子弹。毫无疑问，要毁掉地球上的所有生命是不费吹灰之力的。所幸者，撞击能将集中在撞击点附近，所以未曾出现这种可怕的情景，但其后果的确使人闻后尚有余悸。

于是我忽然关心起彗星撞击作用的频率了。“有两个办法看这个问题。”威塞里尔回答。加州理工学院喷射推进实验室的韦斯曼 (Paul Weissmann) 曾经计算过，彗星与地球碰撞的可能性大约为十亿分之一或二。”这种可能性可以转变为比率或机率，”威塞里尔解释道：“比如说，你在一台吃角子老虎前，赢的可能性是千分之一。如果你日以继夜的玩同一台，每二分钟拉一次，共拉一千次，那么你可能在二千分种，亦即三十三小时内拉中赌注。你也可能赢不到钱，但根据机率，你一定会以每一天至一天半一次的平均比率赢得赌注。”

彗星撞击事件亦然。对某一个特定的彗星来说，其撞击的可能性也许只有十亿分之一。但是，每年起码有九百多个足以形成十公里以上撞击坑的彗星通过地球轨道。因此，即使就一个彗星而言，碰撞的可能性很小，但是与九百个彗星中的一个碰撞的机会就大得多了。可能的比率将达每 500 万年至 1000 万年碰撞一次。但其中又只有一小部分彗星质量够大。因此与可能产生直径几百公里撞击坑的彗星撞击的机会，就只有每十亿年一或二次了。

计算彗星撞击机率的第二种办法，是计算特定等级彗星（在我的印象里，哈雷彗星是最大的）的撞击坑大小，然后用表达撞击坑大小与出现频率函数关系的格里夫公式算出频率。威塞里尔告诉我，有一本书叫《撞击作用和爆炸撞击坑的形成过程》，由加州理工学院喷射推进实验室的科学家编写，可供参考。

于是我开始从该书中寻找答案。作者根据实验和原子弹试验，推导出一系列撞击能量与陨石坑大小的关系式。亚利桑纳陨石坑，直径 1.2 公里，相当于 1500 万吨 TNT 的撞击能量，只要一个直径为 42 公尺的铁陨石就足以造成。根据格里夫公式，这样的小事件每 2000 年就能发生一次。

休梅克的估计比较保守。他认为，像亚利桑纳陨石坑那样的撞击事件大约每 5000 年发生一次。他也从能量的角度计算了可能的频率：一个 6000 吨级爆炸可能年年都有；20 万吨级的爆炸可能每 25 年发生一次，百万吨级的事件每百年发生一次，而像通古斯事件那样达到千万吨级的爆炸，大约每千年发生一次。

人类历史已经长达几千年。在这几千年中，如果确曾发生过几次通古斯规模的撞击事件，那么有无此类历史纪录呢？似乎没有。也可能此类事件确曾发生，但大多已落入茫茫大海或荒无人烟的旷野。然而，圣经中关于“索多姆” (Sodom) 和“蛾摩拉” (Gomorra) 的故事还是引起了我的好奇心。圣经上说，上帝曾扔下火与硫磺之雨，于是罪孽之城顷刻化为焦土。能否把这段故事看作天降灾星的一种含混说法呢？

以千年为周期的撞击事件，虽然未能造成人类地质纪录上足以监测到的痕迹，但地质历史几乎是人类历史的百万倍。罕有的、但却更为强烈的事件证据以多种形式保存在地质纪录中，如撞击坑、玻璃陨石和其他残迹。一个哈雷级彗星的撞击能要比人类迄今试验过最大规模的核爆还要大几百万

倍。因此，根据原子爆炸的资料来推断极高能撞击作用，有许多难以确定的因素。而最科学的推测是，一个哈雷级彗星高达 4000 亿百万吨 TNT 的重击，应能形成一个直径为 250 公里的大坑。把这一数据代入格里夫公式计算撞击作用的比率，即可发现兆（万亿）吨级的地外星体与地球相撞的机会，大约是一亿年一次。一亿年对人类短暂的生命来说是够长的了，但地球已有 45 亿年的漫长历史。从六亿年前的古生代开始，就已有发达的生命形式存在。从那时至今，理应有几次灾难性的事件撞击地球。加拿大安大略省有一个直径 100 公里的撞击坑，至少就是一次强烈事件的代表。

奇想纷纷出笼

我对灾变概率作的思考，并没有铁证支持。我并未见到 250 公里的撞击坑，而且我还有比科学幻想更为紧迫的责任。1979 年春，我应邀回中国大陆帮助实现地质调查和地质教育的现代化。我和我的妻子及四个孩子在那块刚从“无产阶级文化大革命”中解脱出来的土地上，度过了六个月的时间。我一边旅行，一边讲课，直到哑然失声，还不得不参加无休止的咨询会和讨论会。我完全沉浸在祖国面临的实际问题之中，这些问题是那么真切而紧迫，哪里还有时间去想及彗星或者生物的大规模灭绝呢？但是，当我在九月回到欧洲时，又立刻因为扣人心弦的新讯息而开始了无休止的探索。围绕白垩纪—第三纪界线的争论更趋激烈了。那一年初，又提出了两个白垩纪末期生物灭绝事件的新假说。一个假说是我从前的学生柴尔斯坦（Hans Thierstein）和他在斯克里普斯的同事伯格（Wolf Berger）共同提出的。另一个假说是由瓦尔特·阿弗雷兹（Walter Alvarez）、他的父亲路易斯·阿弗雷兹（Luis Alvarez）和他在柏克莱的同事提出来的。

柴尔斯坦和伯格设想，白垩纪末期时，大洋得到了来自北极的大量淡水补给。用他们自己的语言，叫做淡水的“注入”。这并不是一个全然新鲜的想法，早些年，德克萨斯农工大学（A&M）的古生物学家加德纳（Steve Gardner），就曾提出过同样古怪的主张。他认为他在中纬度的第三纪早期沉积物中，已经找到了来自北极区的白垩纪砂藻，但是这一发现并未得到那些造诣高深专家的认可。

然而，柴尔斯坦和伯格又重新拣起了淡水注入的思想，因为它能解释两个异常的事实。首先是第三纪早期沉积物中的超微浮游生物 Braarudosphaera 的奇异状况。在现代，这一属的许多种都存在于盐度异常的水体中，如盐度低于正常海水的黑海，也见于盐度高于正常海水的红海。在第三纪早期正常海相沉积物中发现这种超微浮游生物，说明表层海水因为来自某处的淡水注入而发生了稀释作用。柴尔斯坦和伯格假说的第二个证据是夏克尔顿发现的界线上下的氧同位素异常，斯克里普斯海洋研究所的科学家从其他地方取得的分析数据已经证实这一异常。在新生代早期沉积物中缺

少氧-18。按照尤里的古温度计，海洋的温度升高了摄氏 5 度。由于淡水中具有氧-18 的贫化现象，所以这一信号也可以解释为大量淡水的注入。一般说来，海水温度突然升高摄氏 5 度几乎是不可能的，因此柴尔斯坦和伯格是主张淡水注入。

按照他们的解释，北极盆地在白垩纪时为一巨大的淡水湖，由一个陆堤与世界大洋隔开。白垩纪末期，一次大地震使陆堤毁于一旦。湖水奔腾而出，涌向大洋，表层海水的温度因此降低。几乎没有什么海相生物能适应这种低盐度环境。淡水的注入引起了软体动物（如菊石）、浮游生物和光合浮游生物的灭绝。只有 Braarudosphaera 和一些茁壮的近亲得以幸存。

我从中国回来后，办公桌上信件堆积如山，其中就有柴尔斯坦和伯格在《自然》杂志上发表文章的油印本。我一下子就被这一精心设计的想法吸引住了。但稍一思忖，我又不得不摒弃这一巧妙的设想。大洋的而积大得惊人，要改变其盐度谈何容易。从北极盆地这样一种规模的湖泊中涌出的淡水，无异于杯水之于车薪，只能在一定程度上稀释海水的最表层，而不会影响整个大洋的盐度。然而，夏克尔顿的资料却表明，洋底和洋面都有同样的同位素异常。因此我们不得不作出这样的推论，即 Braarudosphaera 的繁盛恐非盐度异常所致，而是另有原因。

那一年的九月下旬，我到巴巴多斯为 JOIDES 的深海钻探计划选择站位，恰巧与柴尔斯坦和伯格相遇。我们都在该岛西岸圣詹姆斯市的麦吉尔大学海洋生物站作客。专题讨论会整整开了一天，搞得我们一个个都筋疲力尽。于是避开闹区选择港边一家餐厅，在宁静的环境下心境轻松了许多。饮了几杯杜松子酒之后，我们开始讨论他们不同凡响的设想。我提出了我的保留意见，伯格漫不经心的耸了耸肩膀。

伯格是一位善于思考、经常突发奇想而却不关心后果的科学家。他喜欢引述科学作家斯诺（C.P.Snow）的一段格言：“思想之于科学家，就像花花公子的女友。如果他女友如云，失去几个又算得了什么。”然而，不管怎么说，同位素资料总得有一个合理的解释。

根据同位素资料提供的讯息，也许温度的确造成过异乎寻常的灾难。我向他们提起德·劳本菲尔斯的文章。伯格笑了笑：“你不是惟一接受 E.T（地外事件）假说的人。”他还告诉我，柏克莱有一位名叫瓦尔特·阿弗雷兹的地质学家，早在 1979 年春天的美国地球物理年会上就报告过，他们在古比奥的界线粘土中，发现了地外的痕量元素（tracemetals）。而多年前即已证实，该剖面界线附近并无间断。阿弗雷兹及其合作者认为，他们早已找到足够的证据来支持蒂宾根（Tübingen）的古生物学家辛德沃尔夫（Otto Schindewolf）早年的假说，即白垩纪末期的灾变是由一颗爆炸的星体引起的。

在这种新奇理论的启迪和杜松子酒的刺激下，我贸然提出了自己的见解。“不，不可能是一颗超新星，”我提出异议道：“应当是一颗彗星。一

颗巨大的彗星，会释放出足够的氰化物来杀死白垩纪末期所有的海洋浮游生物。”

这两位朋友并不认为我是认真的，但还是建议我去哥本哈根参加一次学术研讨会。哥本哈根大学的碧珂兰拟在 1979 年 10 月组织一次题为“白垩纪—第三纪界线事件”的讨论会。说实在的，她早就该这么作了。因为史蒂文克林特村和哥本哈根近郊有完整的沉积剖面，对我们认识白垩纪—第三纪界线至关重要。碧珂兰也提出过一些解释。事件（events）一词用复数反映了这位会议召集人的观点；她认为白垩纪末期事件是一系列相接续的事件，而不是一次独立的灾变导致了生物的灭绝。

柴尔斯坦准备在会上介绍他和伯格的观点。瓦尔特·阿弗雷兹也打算参加这次会议。他们都希望我去进一步阐发我的氰化物污染说，以活跃会议的气氛。虽然我那时已有些微醺，没有认真考虑去报名参加。

不过那年秋天，感染到会议的兴奋气息而忘其所以的人可不只我一个。随着会议的逼近，形形色色的荒诞想法接腹而至。幽默作家伏格特（Peter Vogt）和霍尔顿（John Holden）为此专门写了一篇讽刺短文，题为：《白垩纪末期生物灭绝：疯狂假说面面观》。文中写道：

纵观白垩纪末期生物灭绝事件的种种假说，我们的结论是一味依靠资料相当危险。不管新资料的质量多高，来源多么可靠，却不仅没有厘清 1 日理论的是非，反而招致了许多更荒诞的新想法。我们不妨再加上几种可能性来揭示这一现象（且称之为“伏格特—霍尔顿效应”）的危害，比如仅有一叶方舟幸存的白垩纪诺亚洪水，白垩纪末期外星人对地球生命的大屠杀，乃至存在所谓“生物灭绝机”等等。似乎在某些科学领域中，尽管资料愈来愈强，解释资料的理论却愈来愈站不住脚。

我是从佩姬尼尔逊（Anna Katharina Perch — Nie1sen von Salis）处获悉十月讨论会情况的。她是瑞士人，丈夫为丹麦籍。在她来苏黎世加入我们学校以前，曾在哥本哈根执教。作为一位超微浮游生物专家，中新生代界线专家兼白垩纪—第三纪界线国际工作组的主席，她当然参加了碧珂兰组织的讨论会。会毕甫归，我就去看她。

伏格特和霍尔顿没有出席会议。没有一个基金组织愿意资助他们的旅行费用，再让他们恣意发表那些令人不快的讽刺文章。柴尔斯坦和瓦尔特·阿弗雷兹都参加了会议，两人都在会上讲述了自己的观点。但佩姬尼尔逊说，谁也不相信他们的想法。我暗自寻思：幸好没有去哥本哈根发挥我的彗星毒化思想，否则场面或许也是很尴尬的。

殊途同归

于是这个问题暂时搁置下来。直到 11 月初某天早晨，我照例到图书馆去作我每周一次的阅读，在《自然》杂志上发现了由天文学家克卜（Vic Clube）和纳皮尔（Bill Napier）合写的关于彗星撞击作用的文章。

奥特星云位于太阳系的最外缘，威普认为它是彗星和阿波罗小行星的发源地，它离太阳的距离比冥王星还远几千倍。彗星是某一星体靠近奥特星云时从中“震落”下来的碎片，以后就向着太阳系的内部运行；首次在 1972 年发现的柯特克彗星就是这样从星云中甩出来的。

奥特星云本身也被认为是原始星云崩溃产生太阳系时的残余物。而克卜和纳皮尔在文章中提到，彗星起源于银河系旋臂内侧的星际空间。太阳行经银河旋臂时，偶尔会将彗星捕获（吸引过来）。这便补充了奥特星云内的彗星数目，同时也周期性的增加了逸出的彗星与地球碰撞的机会。

最近，一位日本天文学家用电脑计算，认为不常访问地球的长周期彗星可能是 1000 万年前被太阳系从星际空间中捕获的。克卜和纳皮尔想了解太阳系当时的位置是否的确正好通过银河系的旋臂。结论是肯定的。他们发现，太阳系在 2000 万年前进入了一个称为古尔德带（Godd's Belt）的巨大旋臂，直到 1000 万年前才转出来。这两位天文学家颇为自信的指出，这种捕获事件正是地球历史上发生周期性撞击灾变的原因。

该文发表后，克卜和纳皮尔的假说一直受到科学界的批评。批评者攻击的要害是，彗星的化学成分是典型的太阳系星体的成分，不像来自星际空间。然而，克卜和纳皮尔的勇气激励了我，因此我决定选择同一本杂志《自然》来发表我对白垩纪末期事件的看法。该杂志的一位前任编辑曾经告诉过我，这一刊物坚持自由的出版方针，可以“发表不涉色情的一切创新思想”。诚然，《自然》杂志也发表过一此无聊的作品，但与它率先发表华森和克里克揭示 DNA 结构、瓦因和马修斯阐述海底扩张理论的文章，对人类文明所作的贡献相比，那些糟粕是微不足道的。因此我决定把我的论文“白垩纪末期彗星撞击事件引起的地球灾变”，交给《自然》。

为了撰写这篇文章，我重温了德·劳本菲尔斯关于恐龙灭绝的文章、威普关于彗星的文章以及休斯关于撞击成坑作用的论文。当我在图书馆员嘉普依丝（Esther Chappuis）的帮助下翻阅这些论文时，从参考文献中发现了尤里的一篇题为“彗星撞击作用与地质时代”的文章。当时，一个名叫维里科夫斯基（Immanuel Velikovsky）的人写了一本名叫《撞击的世界》（Worlds in Collision）的书，激起了一场激烈争论。这本书宣扬灾难性的彗星撞击作用，一时洛阳纸贵。尤里的短文就是为这场争论而写的。

维里科夫斯基生于俄国，是一位杰出的古典文学家。他游戏人间，用一种非正统的方法观察自然现象，他的研究以古代编年史家的报告为前提而不问是非。如果希拉多德斯（Herodotus）说地球曾经改变它的旋转方向，那么地球就确曾反转过；如果圣经说太阳曾一度静止不动，那么太阳的转动就一定停止过。维里科夫斯基不是地质学家，不关心哪些现象在逻辑上是不是可能。按照他的见解，地球上的灾变乃是在与行星或彗星的撞击过程中产生的。这位古典文学家宣称，金星是一切灾难的渊藪。它是一颗伪装的彗星，尾部的石蜡油落到地球上，就是圣经上所说的火雨。金星——彗星的别称——

一也引起了红海的干涸，使摩西得以从埃及逃走。至于金星并无尾巴，或者金星的轨道同地球的轨道一样固定种种事实，他都置之不理。

维里科夫斯基的著作是一部很好的科幻小说。甚至可以看作比较神话学中佼佼的文学作品，麻烦在于出版商竟把它列入“科学”类中。结果，新闻媒介和文学界纷纷去找科学家发表评论，爱因斯坦（Albert Einstein）也不得不发表意见。他认为此书“并不太坏，……惟一不妥之处是疯狂。”诺贝尔奖得主尤里深刻的思考了这个问题，而且改写了《撞击的世界》，这就是我在图书馆中偶然发现的那篇文章。

尤里的科学方法无懈可击。他从一个物理学上并非不可能的前提，即一颗哈雷级的彗星与地球相撞出发，来探索这一假设的逻辑结论。结果发现，这一灾变事件对环境的破坏极大。彗星撞击作用确实引起了广泛的破坏：不是像维里科夫斯基所说的人类历史上的灾变，而是地质历史上证据确凿的动植物大规模死亡和灭绝。他还列举了白垩纪末期生物灭绝的例子，6500万年前恐龙的大规模灭绝可能是彗星冲击的结果。但他并不坚持彗星灾变确曾发生过。

尤里的这些想法先发表于《周末评论》，以后在《自然》杂志上也作过简要报导。这两篇文章在科学界并未引起强烈的反响，很快就被人们遗忘了。因为任何一种科学思想，无论好坏，若非经过检验以辨是非，总是极易被遗忘的。

思想里有了那么多素材，又搜集了所有的文献，我开始写作。文章的第一节描写白垩纪末期灾变的情况。在极短的时间内，有太多的生物种属突然灭绝，而环境变化又是那么巨大而强烈，没有一种地面过程可以解释这些变化。在第二节里，我回顾彗星撞击作用的频率统计，讨论了哈雷级彗星撞击事件的影响。第三部分列述化学污染的后果，包括氰化物对水中生物可能产生的毒化作用，或许会阻碍浮游生物再生产的海水化学成分变化，以及由此引起的食物链破坏。我推想，化学污染物必定是由表层洋流扩散到海洋中的。浮游的海洋生物——菊石、箭石、浮游有孔虫及超微浮游生物，都是一些随着赤道洋流移动的浮游生物，因此受害最深；而深海底栖生物则大多幸免了。

海洋污染当然不能成为陆生动物的有效杀手。根据德·劳本菲尔斯、麦克林等人的意见，我认为大型脊椎动物是在一种短暂的热压力下死去的。陆上的小型动物或水生动物耐热能力较强或躲避有方，才幸免于难。

我不希望我的思想立即为人们所遗忘，于是提出了检验这些思想的多种想法，并呼吁大家来寻找陨石坑。我在圣诞节前把稿子寄给《自然》杂志编辑部，同时给佩姬尼尔逊寄了一份复印稿。因为她在哥本哈根会议上接触了那么多异想天开的想法，可以帮助我纠正某些不尽合理之处。她又复印若干份，寄给了由她主持的白垩纪—第三纪界线工作组的每一位成员。我也给那些积极参与此项研究的同行各寄了一份。

各方面的回响从四面八方飞来。荷兰同行斯密特（Jan Smit）的反应是惊讶，问我为什么与他所见略同。他与赫特根（J. Hertogen）合写的稿子将于下月，即 1980 年 1 月，寄给《自然》杂志。不久，杂志编辑给我来信，要求延迟发表我的论文，以便这两篇文章能在同一期中刊出。

过了新年不久，我偶然读到阿弗雷兹小组在美国科学促进协会 12 月会议上的一份报告。在经过进一步分析痕量元素后，他们放弃了超新星或行星爆炸的假说，代之以一个 1000 亿吨、直径达十公里的类星体，来解释白垩纪末期生物的灾难性灭绝。不久，我收到了文章的复印本和瓦尔特·阿弗雷兹的一封长信。他们的论文原稿完成于 1979 年 11 月，几乎与我同时开始撰写论文。

同是 1979 年 11 月，艾密连涅受了夏克尔顿关于白垩纪末期海洋温度升高的同位素资料启发，到加州大学洛杉矶分校作了一次报告。他主张恐龙和浮游生物大规模灭绝是温度灾难性升高的结果。

四篇讨论中生代末期生物大规模灭绝地外原因的文章，即斯密特和赫特根的文章，阿弗雷兹的文章，艾密连涅的文章和我的文章，终于在 1980 年春天的某个月中，在三本不同的刊物上同时发表了。这可以看作纯属巧合，也可以怀疑我们之间通过科学界的管道摸到了各自的最新思想。事实上，在我撰写我的论文时，斯密特还没有放弃陨星冲击作用的思想，阿弗雷兹小组还在讨论超新星，我对艾密连涅正在琢磨同一资料、思考同一问题也一无所知。同时发表相近的理论，既非巧合，也不是相互交流的结果。当资料日趋明晰时，思路敏捷的人往往会殊途同归。

第八章 中子神探

1958年，在加拿大纽布伦兹维克（New Brunswick）的一个小镇附近的废石坑中，发现了一个少女的尸体。嫌犯是一个名叫伏尔曼的年轻人。在女孩失踪的当晚，有目击者见到伏尔曼在一个药房的柜台前把她带走，还有人目睹那个女孩乘坐伏尔曼的车驶向郊区，一位晚归的农民曾发现嫌犯的汽车停在发现女尸的采石坑旁。伏尔曼对这些事实都供认不讳，但矢口否认女孩是他所杀。谁能证明死者后来没有同另一个真的凶手重返那个采石坑呢？陪审团必须掌握更为具体的证据。

警察发现的惟一物证是死者指甲里的一根深色的头发，显然是生死搏斗的标志。这不是女孩的头发，因为她是金发。伏尔曼的头发倒是深色的。但有深色头发的人太多了，怎能证明这根头发就是嫌犯的而不是别人的呢？

幸好，在渥太华的罪证实验室里，有一位法医发明了一种根据痕量元素鉴别人发的方法。这些元素是从人体中分泌出来的，聚集在人发中。他的调查显示，人发就像指纹，可以作为一种鉴别标志。于是，那根六公分的头发连同嫌疑犯的头发，一起送到了首都渥太华。一周后结果出来了：死者指甲里的头发与嫌犯的头发同属一人所有，伏尔曼因此被判有罪。

哥尔德施密特的先见

如果恐龙确系死于彗星，那么，那个“长发星”难道连一根头发都没有留下吗？我在为《自然》撰写论文时不禁暗暗的问我自己。

彗星的主要成分是氧、氢、氮、碳，与地球的主要元素无异。与大量地球物质混在一起后，难以用它们来判别彗星。那么能否像用人发中的痕量元素确定罪犯那样，用某种彗尾的特征元素来鉴定彗星呢？是的，确有某些元素可以用来达到这一目的，那就是阿佛雷兹及其合作者发现的一些元素。回首往事，我微微感到有些惆怅。我在青年时代自视过高，不够尊重长者的教导，因而失去了重大发现的机会。

我第一次到苏黎世是1957年，刚完成博士论文毕业不久。我并不觉得一定要再去注册重过学生生活，但还是每天都到地质研究所的图书馆去读书，另外也听几门课。当时我对地球化学颇有兴趣。地球化学是上世纪发展起来的一门新兴学科，研究地球的化学成分。哥尔德施密特（V.M.Goldschmidt）是这一新领域的开拓者，把研究领域从地球扩大到了地外物质。化学元素宇宙成分丰度的知识有很大部分要归功于他。也因此我们才有办法区分地球原有和地外成分的玻璃陨石。在我的学生时代，美国大学里已不再教授哥尔德施密特的这种地球化学，我们也不再关心哥尔德施密特潜心研究得出的天体化学成分的冗长资料。我们只对作用过程感兴趣，只关心曾经使地球发生变化的化学作用。但在苏黎世大学，地球化学仍然是一

门重要课程，由哥尔德施密特的学生拉韦斯（Fritz Laves）主讲。在他心目里，哥尔德施密特是一位英雄。他总是不厌其烦的忆述他在哥廷根度过青年时代的轶事。在哥廷根，拉韦斯这名亚利安种人曾努力保护他的老师不受纳粹分子的野蛮侵扰，但哥尔德施密特到头来还是被迫流亡到英伦三岛。战后不久，这位科学界的巨擘客死挪威。

拉韦斯是一位老派人物，矢志于自己的记忆。哥尔德施密特所著《地球化学》是他选择的教科书。第一堂课就给每人发了一张元素丰度表，那是哥尔德施密特的杰作。表中将每种元素在岩石圈中的丰度和陨石中的丰度进行了比较。然后，拉韦斯开始讲课，其实说是念书会更贴切些。他的语调低沉而单调，只有读到 n.b 未定)和 p.p.m. (百万分之一)时，才略有停顿。“氢，未定”，他开始朗读“氢未定；锂，在岩石圈中的丰度为 65 p.p.m.，陨石中的丰度为 4p.p.m.，铍，岩石圈中的丰度为 6p.p.m.，陨石中的丰度为 1 p.p.m.，碳，岩石圈中的丰度为 320 p.p.m.，陨石中的丰度为 300 p.p.m.，氮，未定；氧，岩石圈中的丰度为 466,000 p.p.m.，陨石中的丰度为 323,000 p.p.m.....”。

半小时后，拉韦斯已经念到镧、铈、钋。他毫不顾及学生的耐性，还要无休止的念下去，我则已经忍无可忍，顾不得礼貌的在他念完钋以前溜出了教室。如果我再坚持一小时，也许我就会学到一些有用的东西。毫无疑问，拉韦斯一定会念到这张表的末尾：“钷，在岩石圈中的丰度未定，陨石中的丰度为 1.92p.p.m.；铽，在岩石圈中的丰度为 0.001p.p.m.，在陨石中的丰度为 0.65p.p.m.；钷，在岩石圈中的丰度为 0.005p.p.m.，在陨石中的丰度为 3.25p.p.m.；金，在岩石圈中的丰度为 0.001p.p.m.，在陨石中的丰度为 0.7p.p.m。”

如果我去听他的第二节课，我一定会了解到，钷、铽、钷、金均属铂族元素，或称亲铁元素。它们在地球最外层的岩石圈中为量极微，但在陨石中却很多。

哥尔德施密特在他的晚年致力于研究铂族元素的宇宙丰度。这些痕量元素的天然度极小，每一次世界大战后的分析技术还不足以鉴别这些元素。然而，铂族元素的平均含量在石质陨石中要高出几千倍。在铁质陨石中更为富集，其浓度要高出一个数量级。

一般认为，石质陨石的成分与形成层圈结构以前的原始地球相似。关于地球的成因问题，争论已久。现代理论认为，地球是由许多细小的块体和尘埃相互重力吸引凝结而成的。原始物质中的放射性元素以极快的速度产生热量，使这一迅速增长的行星无法散热，终使原始地球的石质部分发生融熔。融熔的铁和镍都是最重的元素，沉到地球的中心后成为铁镍核心。亲铁元素与铁有一种化学上的亲和力，也随之一起集中到地球的核心。较轻而贫铁、镍及贫亲铁元素的石质矽酸盐，在地心周围组成了厚达 2900 公里的地幔。地幔一直处于某种热状态，因此具有弹性。地球表层的冷脆岩石圈称为地

壳，其物质来自于地幔，因此也以贫铁、镍和贫亲铁元素为特征。

石质陨石虽然由同样的地球物质组成，但未经化学分凝作用，因此还保持着原始宇宙的亲铁元素组成。那些尚未凝结成较大块体的宇宙尘埃或小颗粒，或者由于撞击作用而爆炸形成的小颗粒，也同样保持着宇宙物质的元素组成。宇宙尘埃虽然不断的降落到地球上，但是由于降落的尘埃数量太少，与分布极广、数量又多的沉积物混在一起，其化学信息殊难测出，因此，沉积岩与来自地幔的火成岩一样，也贫亲铁元素。然而，深海沉积物中应较富集这些亲铁的金属元素。例如在北太平洋中部，几乎不会有陆源物质到达，而黏土的沉积速度又很低，一年不足一公厘。故而在大洋沉积物中，宇宙尘埃是重要的成分。

哥尔德施密特预见到了这种情况，但无法予以证实。一次大战以后，分析仪器还很原始，不能精确测量数量如此之低的元素。哥尔德施密特是一位非常卓越的科学家，但是他的科学生涯被政治迫害和战争打断了，后竟不幸英年早逝。如果他多活十年，他可能会满意的得出那些数字来证实他的预言。因为十年后出现了中子活化分析技术，可以达到要求的测量精度，也正是这种技术测出了伏尔曼一案中嫌犯头发里痕量元素的精确数值。

中子活化技术可以检测浓度只有兆分之十的痕量元素。它在伏尔曼案件中初试锋芒，现已成为一种常规的分析技术了。

中子是使同位素增重的一种核粒子。与带正电因而在电性上互相排斥的质子不同，中子呈中性，可以自由游荡，因此有机会进入元素的原子核，使之转变为另一种同位素。当中子集成一种中子流时，它加入原子形成同位素的机会就增加了。

中子冲击作用是贯穿于整个地质历史时期的一种自然作用。太阳发射的能量流和粒子流称为宇宙射线，自由中子是宇宙射线的主要组成部分。中子冲击作用的天然产物是放射性同位素，例如空气中的氮受到宇宙射线中的中子冲击后就会产生碳-14。每种放射性原子都会自动裂解为子代产物，就像碳-14衰变形成氮-14一样。

化学分析的传统方法是设法从样品中把感兴趣的元素分离出来，然后称量纯化后的物质重量。为此要花费很多时间进行化学分离，而且常常要求极大的样品量。中子活化法避开了样品化学分离的复杂程序，所需的样品量也很小，只要用中子冲击一下即可得出数据。在中子与铂、铀之类的母物质之间，会发生许多核反应，于是各种放射性同位素开始蜕变，每种元素都发射出反映其同位素蜕变特征的分子和能量。用仪器监测、记录元素的蜕变特征，就得到该元素的标准信号，由此可以推断受中子冲击后发生这一衰变的母物质。各同位素蜕变“事件”的数量，透露出样品中各母元素的相对含量。因此中子活化分析既能定性，又能定量。

地质学在 1968 年首次应用中子活化分析法，哥尔德施密特的梦想终于实现了。斯克里普斯海洋研究所的两位科学家，测定了太平洋沉积物中的

钷、铀含量，用以估计宇宙物质的影响。

1969年，我首次参加南大西洋的深海钻探航次归来，其时中子活化技术的应用还不到一年。德克萨斯州农工大学里面的核子化学家就来询问我，要不要作岩芯的痕量元素分析。当时我正在为实测地质学的定量化进行一场败局已定的斗争。在60年代后期，强调仪器分析已成风尚。资料愈来愈多，但消化利用极少，我对此十分反感。几年之后我才痛切意识到自身思想的偏颇，没有预见到新资料早晚都会促进科学的认识水准。如果我当年能耐心的聆听拉韦斯以朗诵元素宇宙丰度表为主要内容的讲课，也许就会欣然接受德克萨斯那边提供的帮助。虽然我当时正沉浸在扫帚星的问题之中，而且有两个站位钻穿了白垩纪—第三纪界线，但对痕量元素分析可以揭示界线沉积物中地外碎屑的重要意义，尚无悟识。

太空科学家和天文学家就不同了，他们并未忘却哥尔德施密特的预言。一旦新的技术出现，就立即开始研究亲铁元素。斯克里普斯的科学家发现，从北太平洋沉积物中钷、铀含量算来，宇宙尘埃正在以每年每平方公分 1.2×10^{-8} 克的速度堆积。这个数字并不很大，只相当于每年每平方公里120克或每年每平方英里二盎司。进一步应当研究其他大洋沉积物样品中的宇宙尘埃。

他们从一百多年前“HMS 挑战者号”所取得的沉积物中，采集了一些直径为公厘级的细粒球状物体。有些球粒是富铁的，有些球粒是石质的。其主要元素组成如铁、镍、钴的含量与铁陨石极为相似。有一位名叫加纳派塞（R. Ganapathy）的印度移民，当时正在新泽西州的一个化学公司工作。他决定用中子活化法检验其痕量元素。他分析了十五种元素，包括铂族元素铑、钨、钨、金。加纳派塞发现，大洋沉积物中石质球粒的元素组合与石质陨石完全一致。这些资料使他相信，那些细小的石球应是来自外太空的不速之客，而且这些球粒与通古斯发现的球粒外观极为相似。但它们大多是宇宙尘，是从规模较小的陨落流星中落下来的。

父子搭档联手

以上就是阿弗雷兹父子偶然发现钷异常的背景。瓦尔特·阿弗雷兹是一位著名物理学家的儿子，他的父亲路易斯由于核子物理学方面的卓越贡献，于1968年荣获诺贝尔奖。与尼克·夏克尔顿一样，为了避嫌，年轻的阿弗雷兹选择了另一种职业；也与尼克·夏克尔顿一样，他躲不开命运的安排。但瓦尔特·阿弗雷兹并未卷入物理学，而是把他的父亲拉入了地质学的争论漩涡。

瓦尔特·阿弗雷兹于普林斯顿大学获博士学位，在意大利作博士后研究，之后在纽约郊外的拉蒙特—多尔蒂地质观察站找到了第一份工作。

拉蒙特在首任主任艾运领导下，由一个两人小组发展成为著名研究所，

到 70 年代初已达几百人的规模。奥普但克 (Neil Opdyke) 在拉蒙特建立一个研究大洋沉积物剩余磁性的一流先进实验室。拉蒙特的科学家在建立古地磁地层学方面有重要的贡献。当时, 有一位青年物理学家洛雷 (Bill Lowrie), 在奥普但克的实验室里工作, 他摆脱海洋研究的局限, 开始研究由于造山运动而升起的古代海洋沉积。出露在亚平宁山脉古比奥村附近中、新生代沉积物是当然的研究对象之一。阿弗雷兹在意大利进行博士后研究时, 对古比奥的剖面相当熟悉, 于是就帮助洛雷研究古比奥剖面。正是在这个剖面上, 路特巴赫和普茉莉—席尔娃在界线黏土中发现了有孔虫大规模灭绝的证据, 而且证明其时代为 C-29-R 地磁期。

阿弗雷兹并非古生物学家, 当时尚未卷入白垩纪末期生物灭绝事件的研究, 他关心的是古地磁地层年代表的可靠性。

C-29-R 的持续时间短于 50 万年的结论, 是根据海底地磁条带的宽度推断出来的。虽然反对海底扩张理论的人现在已经不多, 但对扩张速度保持恒定的设想却有争议。阿弗雷兹想, 如能另辟蹊径检验 C-29-R 的持续时间, 这一设想的可靠性就可以得到验证。

正当阿弗雷兹思考这一问题时, 斯克里普斯的科学家发表了用痕量元素推算深海沉积物中宇宙尘埃堆积速度的文章。他受到启发, 决定一试, 用测定黏土中宇宙尘埃含量的方法测定古比奥界线黏土的堆积时间。

这时, 洛雷已转到苏黎世联邦理工大学地球物理研究院就职, 而阿弗雷兹也已离开拉蒙特回到父亲所在的柏克莱。有一次, 阿弗雷兹与家人谈及此事。老阿弗雷兹虽然已从柏克莱的劳伦斯实验室退休, 但在专业活动中仍然活跃如昔。于是父子两人决定同心协力解决这一难题。用中子活化分析法, 检测极微量的铂族元素需要非常精密的仪器、专门的知识 and 极其熟练的专家, 而柏克莱实验室拥有一切条件。以熟练的分析技术著称于世的阿萨罗 (Frank Asaro) 和米歇尔 (Helen Michel), 都参加了阿弗雷兹的研究群。

在亲铁元素中, 铀是最容易用中子活化技术测定的元素。因此, 柏克莱研究组首先选择铀作为研究对象。铀善于捕获慢中子, 其蜕变谱线亦较易辨认。样品取自古比奥 C-29-R 期堆积的各类沉积物, 包括界线上及下几乎无化石的黏土和富含化石的沉积物。这三类样品事先都经过了预处理, 用酸溶掉了其中的钙质骨骼, 余下的都是黏土等不溶残余物。经过这样的处理后, 古比奥的样品就可以与斯克里普斯科学家所分析的样品进行比对了。

把处理后的样品先放到柏克莱的反应器里进行中子活化, 然后上机测定。界线黏土上下的不溶黏土沉积物中的铀含量为 0.3p.p.b., 与斯克里普斯科学家预言的深海沉积物中宇宙铀的含量完全一致。

关于铀沉积速率的逻辑结论, 证实了地磁地层学的确是估计地质时代持续时间的可靠工具。C-29-R 地磁期确实持续了 50 万年的时间, 与肯特根据海底地磁条带的宽度得出的结论完全一致。

那么, 界线黏土本身, 这一厚仅一公分而又完全没有化石的黏土层又如

何呢？阿弗雷兹在界线黏土中发现了异常高的铀丰度，这使他大吃一惊。在底界面以上几公厘的一个层位中，铀的最高值竟达 10 p.p.b.。这一异常值大约是正常值的 30 倍。在界线以上一公尺的沉积物中，或者说在中生代结束后的 15000 年以后，铀含量又回到正常背景值。

在一个点上发现的这一奇怪的异常，引起了他们的好奇心。于是他们又分析了丹麦著名的史蒂文克林特村的样品。在那里，界线黏土被称作鱼黏土，结果发现铀异常甚至更为显著。其背景值约为 0.3p.p.b.，与意大利的情况相同。而鱼黏土中发现的最大值竟达 65 p.p.b.，超过正常丰度 200 倍。在界线以上 70 公分处，铀含量降至 0.4p.p.b.，再往上半公尺，铀含量回到背景值。

对于高铀含量的最合理解释是：两地的界线黏土都是在极低的沉积速率下堆积的。如果这厚仅一公分的界线黏土不是沉积于五千年间，而是沉积于一百万年间，那么方有足够的宇宙尘埃堆积下来，才可以解释高过正常值 200 倍的铀异常。若这一假定属实，其他痕量金属元素浓度也应以 200 倍左右的系数增加。

为此，阿弗雷兹小组分析了古比奥样品中的其他 27 种元素，包括钠、铝、稀土元素和其他非亲铁的痕量元素。除了铀的丰度增加了三十倍外，没有一种元素的含量超过正常值的二倍。与上下层位相比，界线黏土中的稀土元素反而贫化了。这就显得铀的“行为”更加反常。古地磁地层学并没有错：用界线黏土异乎寻常的缓慢沉积速率无法解释这一异常，那么一定曾超乎寻常的加进富铀碎屑物质。

富含大量铂族元素碎屑的惟一的已知来源是地外物质。正是基于这一推理，路易斯·阿弗雷兹、瓦尔特·阿弗雷兹、阿萨罗和米歇尔等人在 1979 年这一不寻常的年份，率先为白垩纪末期事件的地外成因提供了铁的证据。

一再验证

为了进一步检验这一假说，阿萨罗又进行了一次试验。如果铀是地外成因的，那么其他亲铁元素也应在界线黏土中按比例富集。于是，他和米歇尔分析了丹麦鱼黏土中钼、铂、金、镍、钴的含量，伯恩市的克莱亨布尔 (Urs Krähen-bühl) 分析了石质陨石中这些元素对铀的相对丰度。阿萨罗在黏土样品中发现了非常接近的相关关系。

加纳派塞是把深海球粒确定为宇宙尘埃的科学家。当他从报纸上得悉柏克莱的研究组发现铀异常的消息后，立即对九种贵金属进行了分析。除了阿萨罗分析的元素外，又分析了钽、钷、铯。所有这些元素在陨石中均较富集，但在地球表层却极为稀少。加纳派塞不仅证实了界线黏土中的铀异常，而且发现其他贵金属也有富集现象，除铯外，所有元素的丰度比值均与陨石相似。

加纳派塞注意到铯相对更为富集，是因为这一元素极易溶解，其超乎寻常的富集，只能用海洋化学过程来解释。但是，如果铯的丰度可能受到海洋化学过程的影响，那么怎能排除其他金属在界线黏土中发生类似富集作用的可能性呢？丹麦的界线黏土几乎不含碳酸盐，岩石呈黑色，而白垩则是完全由碳酸盐组成的。这种成分上的差别说明，在界线黏土沉积时期，海洋的化学环境异乎寻常。由此得出结论：如果铯和其他痕量元素的高含量是海洋化学过程的结果，那么在陆地沉积物中就不会有同样的异常。反之，如果铂族元素确系宇宙尘埃，那么不管沉积物形成于洋底抑或陆上，所有白垩纪—第三纪界线沉积物中都应一律发现铯异常。

阿弗雷兹父子从柏克莱古生物系的同事手中，得到了取自蒙大拿古冲积平原的样品。由于那里的白垩纪—第三纪界线是根据恐龙的灭绝以及花粉化石总数确定的，所以取样层位是在最后的恐龙化石层之上。花粉不同于恐龙骨骼，恐龙只有在极为特殊的情况下死亡，并得以保存时才能成为化石，而花粉却几乎无处不在。植物每年都要产生大量的花粉，而花粉的外皮有一层不易穿透的薄膜能防止腐朽。在湖泊、冲积平原或沼泽沉积物中常常保存一些花粉，变成岩石中的微体化石。

古代有一种寄生植物，连同其近亲，被古植物学家统称为白垩纪鹰粉属植物群（*Aquilapollenites*），显然与恐龙同时灭绝。在恐龙化石极少或不存在的地区，可以根据花粉的数目，确定鹰粉属的灭绝带，从而确定白垩纪—第三纪的界线。

1980年春，我们从科学管道获悉蒙大拿古冲积平原的界线层序中发现了铯异常。这一惊人的发现，足以使那些推测由于海洋化学状况引起铯异常的学者哑口无言。我一直在等待这一材料的发表，但却渺无音讯。是年6月，在鲁塞尔于渥太华召集的一次界线问题讨论会上，我禁不住问阿萨罗：“蒙大拿剖面上的铯异常究竟见于什么部位？”

“在样品处理技师的白金结婚戒指里。”阿萨罗悻悻他说。

真是无巧不成书。他们新雇的一位样品处理技师新婚不久。她用铝箔包裹样品时，手指碰到了新买的白金结婚戒指。虽是轻轻一触，却足以使样品受到铂、金、铯三种亲铁元素的污染，致使柏克莱的科学家不得不尽弃前功，重新采集样品。

柏克莱的研究组终于在蒙大拿的白垩纪—第三纪界线处发现了铯异常。但是由于结婚戒指引起的事故，使他们失去了领先的机会。罗萨拉摩斯（Los Alamos）的研究组在拉顿（Raton）盆地的陆相沉积物中，率先发现了铯异常。

拉顿盆地是科罗拉多和新墨西哥境内桑格里·德·克列斯托（Sangre de Cristo）山脉以东的一个气候干燥的小型沉积盆地。驱车往来丹佛（Denver）的驾驶人要经过令人不适的半沙漠地区，莫不尽快匆匆驶过。但在6000万到7000万年前，这一地区却颇为温暖湿润。沼泽遍地、林木葱郁，与当代

的亚马逊河流域无异。河流洪水有时挟带着大量泥沙滚滚而来，把茂密的丛林埋在地下，年深日久，变质成煤，因此拉顿盆地是一个重要的煤矿区。

社会对煤的需求促进了该区地质历史的研究。为了查明该矿床，人们详细研究了路边出露的沉积地层，并在盆地中钻了许多钻孔，根据详细的化石鉴定确定了地层的古生物时代。而在该区西边的圣胡安地区，存有大量恐龙化石。但从采集到的恐龙化石分析，它们当年似乎没有进入到拉顿盆地的白垩纪森林，因此不得不用鹰粉属植物群的消亡，来确定拉顿盆地地层序列中的白垩纪—第三纪界线。人们从钻孔岩芯和公路边的露头上采集了样品。这些样品由罗沙拉摩斯实验室的奥思（Carl Orth）及其同事用最先进的中子活化分析法进行元素测定，其精度可达一万亿分之一，结果就在预计层位上发现了异常。那层白色界线黏土上覆煤层，下为泥状沉积物。最高铯浓度为 5p.p.b.，是正常值的 250 倍。怀疑论者难道还能说，在大洋沉积物界线黏土中的过量铯是外部化学作用的结果吗？

在根据古植物资料确定的白垩纪—第三纪界线中发现铯异常，有力的说明陆地上鹰粉属植物群的灭绝，与海洋生物的灭绝同时。事实证明，铯异常是一种非常精确的事件标志。

但是，仍然有必要用地磁地层学方法来进行验证。如果陆地和海洋中的铯都来自同一次陨落事件，含铯异常的地层层位理应在 C-29-R 磁性地层期内。反之，如果在一个正向磁化期的沉积物中发现铯异常，那么地外撞击作用把铯元素同时散布到世界各地的理论就岌岌可危了。当时确实面临这一危险。

一位来自德州休斯顿石油公司的科学家于 1982 年研究了拉顿盆地的岩芯，发现富铯地层是在一套正极性的地层中，使许多人吓了一跳。但是，这位科学家忽视了一个重要的事实。众所周知，在某些情况下，沉积物在沉积很久之后会改变磁性。要揭示原来的磁性信号，必须经过一道消磁的操作程序，把后来的印迹洗掉，但他没有进行消磁就匆匆宣布了结果。后来，美国地调所的休梅克及其同事重新研究了拉顿盆地的同一套地层，获得了消磁后的清晰信号：所有接近界线沉积物的剩磁均属反极性期。

这时，柏克莱的科学家仍在蒙大拿的沉积物中苦苦搜寻铯异常。他们虽因白金戒指的污染而有些丧气，但并未失去信心。他们用一套新样品作了磁性地层测量和中子活化分析，结果与奥思和休梅克的资料不谋而合。他们在一个煤层之下的界线黏土中发现了铯异常。最大铯浓度为 4p.p.b.，与拉顿盆地的情况相似，而且也是在一个反极性期之内。在富铯层以下三公尺处，发现了该区最后的恐龙化石，是霸王龙的一块股骨。它生活在铯陨落事件以前三万年之内。

但是，疑团并未因此冰释。因为休梅克研究的剖面并不很长，所得的“条码”太少，不足以确定拉顿盆地反极性沉积物确属 C-29-R 期，抑或属于另一个反极性期。柏克莱的科学家研究的样品，或从蒙大拿另三个地点得到的

样品虽然也属反极性期，但也面临同样问题。后来，加拿大科学家在北面阿尔柏它建立了一个无懈可击的剖面，证明恐龙确实是在 C-29-R 期间灭绝的。该地的界线位于一层火山灰中，可以用钾-氩法测年。这层火山灰是反极性的。放射性测年显示它沉积于 6500 万年以前，恰好是在 C-29-R 期。

提出一种像地外撞击说之类石破天惊的理论，来解释白垩纪生物灭绝那样充满争议的事件，一定会有人表示怀疑。为了查清这一问题，往后几年，也就是 80 年代初期，凡是科学家所能使用的手段，几乎都用上了。目的就是要肯定或否定铀异常的宇宙成因。80 年代中，科学技术的发展异常迅速。一种叫作加速器质谱仪的超灵敏检测仪器发明了，可以对单个原子计数。用这个方法很快发现了丹麦界线黏土中的铀异常。然而，这种太过灵敏的仪器，从远在界线黏土之上的沉积物中也发现了铂的富集现象，说明宇宙星体陨落之后，确曾与海水发生过物质交换。虽然过量的铀仅限于界线黏土内，但溶解的铂似在海水中滞留了一段时间，在地外事件发生后几千年才最终沉积下来。

铂的富集可能是由于化学沉淀这一事实，让怀疑论者重燃希望。铂既如此，铀异常为什么不能用正常的化学过程来解释呢？

耶鲁大学的图瑞肯 (Karl Yurekian) 是一位海洋地球化学家。在犹他州雪鸟城举办的讨论会期间，我们曾共进午餐。他告诉我，分析界线黏土中铀的同位素组成，可以一次解决全部有关宇宙成因或是地球成因的争论。

铀有两个稳定同位素，铀-186 和铀-187，铀-187 是镭-187 的衰变产物。由于放射性镭衰变生成铀-187，富镭的物质中自然也会有比铀-186 多的铀-187。岩石圈中的镭含量要比陨石中多得多，所以陆源沉积物中铀-187 与铀-186 的比值要高于宇宙陨落物。图瑞肯估计，在陆源岩石中这一比值应在十左右，但在陨石中却只有一。

图瑞肯说作就作。他还知道进行此项分析需要的 Cameca IMS-3f 离子探针。离子探针其实是一种特殊的质谱仪，堪称现代分析技术的又一奇迹。其优点是同加速器质谱仪一样，能够确定浓度极小的元素同位素组成。图瑞肯在热情的年轻助手协助下，测定了丹麦和拉顿盆地界线黏土样品的同位素组成，并与洋底取得的正常样品进行了比对。

测量结果显示，正常海洋沉积物的铀同位素比在 6 到 8.5 之间。这一数字并不像图瑞肯预言的陆源沉积物一样，正好等于十，因为所有的深海沉积物中都含有相当的宇宙混入物。界线黏土的铀同位素值则迥然有异。拉顿盆地的样品，铀同位素比在 1.29，丹麦的样品为 1.65。陨石标准值为 1，二者的偏差也是因为混染的结果，因为宇宙物质同地球物质混在一起造成的。

图瑞肯的研究工作是一种探索。试验之初，连他自己也颇多疑虑，但很快就对自己的资料建立了信心。之后，除了亲铁元素外，他又作了许多元素的同位素分析以及元素富集和贫化规律的研究，终于说服了怀疑者，白垩纪—第三纪界线沉积物的特殊性确乎揭示白垩纪末期有地外物质的异常增

加。余下的问题是要确定地外物源的性质。过量的亲铁元素究竟是来自一个类星体呢，还是一颗彗星，或是来自一颗超新星的爆炸呢？

小行星抑或彗星

超新星灾变的思想最先由杜宾根的古生物学家辛德沃尔夫 (Otto schindelwolf) 提出。

超新星是一种正在发生爆炸的星体。一颗超新星能够发射出 10^{52} 尔格的能量，相当于 100 亿个太阳的能量，或者哈雷级彗星撞击能的 10^{21} 倍。在如此巨大的能量中，只有极少的一部分以辐射光的形式发出，能到达地球的只是其中更小的一部分。但是即使相距远达 100 光年，仍能对地球环境产生一定的影响。如果与地球的距离缩小一倍，爆炸的辐射能将会严重的危及生命。

有人估计，每隔 7000 万年左右就有一次距离地球 50 光年的超新星爆炸。当阿弗雷兹第一次获得宇宙成因的铀富集标志时，他们以为已经抓到了这种爆炸的证据。于是，超新星爆炸引起生物大规模灭绝的想法马上传开了。阿弗雷兹原来的推理，是根据一位斯克里普斯化学家朋友所作的重要分析。铀有两个同位素——铀-191 和铀-193。不同的超新星产生的铀，具有不同的同位素比。天文学家认为，众多超新星的爆炸碎屑，在漫长的时间内积聚而成太阳系。既然太阳和行星都是由各色各样的碎屑浓缩而成，那么太阳系内的铀同位素比，无论是地球还是陨石，都应接近于多个超新星的平均值，而这一平均值是已知的。如果后来有某一个超新星的新碎屑落到地球表面，那么含有这一碎屑的层位，应具有与太阳系平均值不同的铀同位素比值。柏克莱的阿萨罗和米歇尔用中子活化法研究了界线黏土的铀同位素组成，并与其他层位的正常值进行了对比。

首次测量结果使他们相信，界线黏土中的铀是来自一颗超新星，因为其铀同位素比率与太阳系的平均值有 5% 的偏差。然而，第二次测量却出现了 5% 的反向偏差。事实迫使他们不得不怀疑这是一种分析误差。概率分析也使路易斯·阿弗雷兹觉得，超新星爆炸不像一种合理的解释。古比奥样品中的铀含量太高了，除非爆炸超新星的距离缩短到十分之一光年，或者说略多于光速一个月的行程。与太阳系如此接近的超新星爆炸机率在过去的一亿年中为十亿分之一，即一亿个十亿年内只会有一次。地球的历史只有 45 亿年。1979 年底，柏克莱的研究组终于确认他们被实验误差引入了歧途。进一步的测试发现，界线黏土的铀同位素比确与太阳系其他地方无甚差别。

根据天文物理理论预测，超新星爆炸过程中，由于捕获中子而形成的重元素具有一定比例，每 1000 个铀原子就要有一个钋-244。钋-244 是放射性元素，半衰期长达 8050 万年，分裂十分缓慢。如果宇宙尘埃来自 6500 万年前的超新星爆炸，那么仍应有一半以上的钋-244 残存，用中子活化分析不难

发现它们。于是，中子侦探再次被召到“犯罪现场”，但是却未发现钚-244。

事实排除了爆炸超新星的角逐资格，余下就只有在小行星和彗星中选择罪魁祸首了。

阿弗雷兹倾向于主张是小行星，他们指的就是阿波罗星体。虽然威瑟里尔已从理论上指出，这些轨道与地球重叠的星体其实不过是排气以后的彗星，但仍有人认为它们更像因为路过星球的引力干扰，而从正常轨道中甩出来的小行星。不过，无论其成因如何，阿波罗星体终究是固体岩石，而彗星则是冰组成的星体。

要判别这两种星体似乎并非不可能。尤其如果克鲁普和纳皮尔提出的所谓彗星乃系太阳系外的俘虏之说不错，我们是否可用小行星和彗星化学成分的差别来区别它们，或者说，可否用中子来查明 6500 万年前撞击地球的两个嫌疑犯呢？布朗利 (D.E. Brownlee) 等人从同温层采集了一些由彗星分解而成的尘埃颗粒，其直径只有 50 至 5 公毫 (micrometer)。分析结果显示，其成分与石质陨石 (类似小行星) 完全一致，哈利岱 (Ian Halliday) 所作的彗星碎屑光谱分析也得到了相同的结果。看来，依仗成分差别区分两颗星体的努力未获成功，中子已经完成了它所能承担的侦缉任务。

如果连最强有力的法医武器都无法区分彗星和小行星，那么是否可以再回到原始的侦寻技术呢？毕竟至少应该有一个“罪犯”埋身的撞击坑吧！我们许多人对以下事实颇有兴趣：在苏联南部和西伯利亚北部，至少有四五个撞击坑的年龄在 6500 万年左右。这些撞击坑都不大，乌克兰的卡姆斯克 (Kamensk) 撞击坑，直径只有 25 公里，最大的一个撞击坑位于西伯利亚的卡拉 (Kara) 附近，其直径为 60 公里，但年代不详。一个一兆 (trillion, 即万亿) 吨的巨大陨星击成的撞击坑直径应在 200 至 300 公里左右。可以设想，苏联的那些撞击坑确是白垩纪末期撞击作用的产物，问题是为什么出现一群小坑而不是一个大坑。也可从另一种设想考虑，即这一星体可能落进了无边无际的大洋。1985 年，南非的哈特纳迪 (Chris Hartnady) 写信告诉我，他在印度洋塞昔耳群岛 (Seychelles) 西南方发现了一个年龄恰如所期、而直径也达到 300 公里的撞击坑。海洋资料的初步研究已经证实了这一设想。科学家正在考虑安排一个深海钻探航次，好确定这一海底巨坑是否一颗陨星的墓穴。

第九章 暗无天日

一位通俗科学作家用描写凶杀案审判过程的手法，来说明白垩纪末期生物灭绝事件的研究。按照审判惯例，他要提出一连串的问题，包括作案动机，谁是凶手，作案过程等等。在研究白垩纪末期事件时，科学家也必须逐一回答这些问题。

所谓作案动机是指事件发生的诱因。与达尔文的设想相反，我们几乎没有证据说恐龙的灭绝是由于失去生存竞争的能力。在当时，恐龙可说所向无敌。即使有设想中的杀手存在，也不是蓄意谋杀，而只是过失杀人，或者更贴切地说是过失杀龙。这种杀戮是偶然的，并无恶意，而且显然全无目的。

那么，谁是杀死恐龙的凶手呢？

被人称为中子之神探已经发现了一些间接证据，嫌犯是陨星，其重量达兆吨。最后一次亮相时正以每秒几十公里的速度向地球直扑过来，这是自寻毁灭的一击。但是，只发现了一根杀手的“发丝”，而不是杀手的尸体，可比作冒烟枪口的撞击坑也还是悬案。迄今为止，“验尸宫”还无法确定那颗陨星究竟是一颗小行星还是彗星。

这次谋杀又是如何进行的呢？

这是一个最难解决的问题，但解决这一问题区分无罪者和罪犯的分水岭，因为小行星和彗星作案的方式是不同的。

专家齐聚一堂

为了解决这个问题，1981至1982年间，先后召开了四次讨论会。第一次讨论会是1981年5月由恐龙专家鲁塞尔发起的，主要讨论白垩纪末期的生物灭绝。二十多名科学家齐集加拿大渥太华国立自然科学博物馆。包括阿弗雷兹父子、克鲁普和纳皮尔、斯密特、麦克林、柴尔斯坦和我本人在内的许多人都发表了自己的见解。加州大学洛杉矶分校的研究生凯特（Frank Kyte）也应邀与会。凯特和他的教授沃森（John Wasson）分析了北太平洋白垩纪—第三纪界线黏土样品，发现了和阿弗雷兹父子在史蒂文克林特村采集的样品中发现的同样高的铱浓度和其他亲铁元素异常。与会者中间，还有许多天文学、撞击力学、毒物化学、古植物学和恐龙古生物学的专家。他们从本学科的角度不时亮起红灯，使我们不致走弯路而尽量保持公正。

虽然这次会议的原意只是一种自由漫谈，但貌似离题的讨论证明，在一个学识渊博的群体里谈论问题会磨去粗糙的棱角，而使思想的菁华更加锋芒毕露。大多数与会者并不相信，仅是一个撞击体就会触发白垩纪的灾变，但无法达成共识，因此会后的出版物是以一种圆桌会议的纪要形式发表的。

以阿弗雷兹父子为首的柏克莱研究组提出的罪犯作案景象让人印象最深刻，人们戏称之为“暗无天日”说。他们提出，6500万年前，一颗直径十

公里的陨石击中了地球。从爆炸和撞击坑中激起的岩石粉尘冲天而起，弥散到同温层中，顷刻遍及全球。大部分的阳光受到遮挡，地球一片黑暗，光合作用因此停止，齐根斩断了生物的食物链，正是这一事件造成了我们在古生物纪录中观察到的生物灭绝现象。他们推测，在丹麦和意大利发现铱异常的黏土层，可能就是陨星撞击地球之后几年内的落尘堆积而成的。

乍听之下，“暗无天日”说似乎言之成理。但是我们对这种不寻常的撞击事件的后果还一无所知，因此很快纷纷提出问题：岩石粉尘激射到同温层中是不成问题的。但是，这些粉尘会不会如此迅速地弥散到全球呢？尘埃的数量足以遮天蔽日吗？由此引起的黑暗是否会持续很久，致使光合作用受到有效的抑制而招致大量生物的灭绝？达宁阶的界线黏土是否就是撞击事件发生后几年内堆积而成的喷射碎屑层？

回答这些问题需要许多学科的科学家的帮助。阿弗雷兹的观点发表后不久，这些科学家就立即投入了行动。包括加州理工学院的奥基夫（John O'Keefe）和阿伦斯（Tom Ahrens），纽约州立大学的梅洛什（Bill Melesh），利佛莫（Livermore）的奥菲尔（Tom Orphal），休斯顿月球和行星研究所的舒尔茨（Peter Schultz）和克罗夫特（Steve Croft），加州国家太空总署亚米斯研究中心的图恩（Brian Toon），罗萨拉摩斯的琼斯（Eric Jones）和科迪斯（John Kodis），墨菲行星学研究中心的高尔特（Don Gault），以及其他许多专家进行了撞击力学的研究，并探讨一个直径十公里的地外天体直接撞击可能产生的影响。有人用电脑计算，有人在实验室进行模拟，忙得不亦乐乎。1981年10月，第二次白垩纪生物灭绝事件讨论会在美国犹他州的雪鸟城举行。由德州休斯顿的月球和行星研究所发起这次会议，上述专家均应邀与会。

雪鸟会议的全称是“大型天体撞击作用与地球演化：其地质学、气候学与生物学含义”，由加州理工学院的西尔弗（Lee Silver）负责筹备。我在学生时代即与西尔弗相识，曾一道研究圣加布利尔（San Gabriel）的变质岩。而当我的专业爱好转向海洋地质时，他也成了一位行星地层学专家。在人类实现登月理想之前，他是向太空人介绍月球地质学的专家之一。我们分道扬镳已久，多年几乎不通音讯，其间只有一次信件往来：他以主席的名义致函通知我当选了美国地质学会名誉会员。1981年，我应邀到新西兰和澳大利亚作为期三个月的讲学。八月的一天，有人告诉我，西尔弗从帕沙迪那（Pasadena）打电话找我，说有要事。我感到非常惊讶，立即回电相询。

在电话里，西尔弗约我赶赴雪鸟城。我当时并不想去，因为我自认在渥太华会议上已经把要讲的话都讲过了，而且1981年我在外旅行已久，但西尔弗仍坚持要我参加。这通横跨太平洋的电话僵持近半小时，我的电话恐惧症终于征服了我。我为逃避那恼人的电话机，违心的答应了。到了十月，我只得重整行装，乘机直飞盐湖城。

我在雪鸟城的表现颇为令人失望。匆忙中，我竟忘了携带报告所需的图

表。我感到非常内疚，又不敢直陈自己的疏忽，不得不谎称在旅程中丢失了行李，但我的朋友都熟知我是一位老练的旅行家，不致于把重要文件放在托运行李中。除了这一疏忽外，我对会议十分满意，因为学到了不少东西。由于我对大规模撞击作用的后果已不那么无知，所以才能回避错误，开始选择新而更合乎实情的解释。撞击情景历历如绘大型天体的撞击机制与小流星有极大的不同。小流星在大气圈中旅行时要经过比其直径大得多的距离，因此多半在空中发生燃烧或碎解。大气层的厚度约为 7.1 公里，大洋深度的中间值为 3.6 公里，一个直径为十公里的一兆吨流星，其中心直径相当于大气层和大洋深度之和。奥基夫和阿伦斯指出，这样的撞击作用将轻而易举的在大气层中打穿一个大洞。天体撞上地球之后，吸起大量的喷射物，形成一个大球扶摇直上，这个空洞仍会留存。五公里深的大洋虽然也会产生一种巨大的压力使其下降减缓，也阻挡不了一颗大规模的流星以每秒 20 公里的高速从天而降，不过速度可能降至每秒六公里。但不管以何种比率计算，一颗流星通过大气层和大洋所发生的直接能量损失不会很大。通过大气层的损失肯定小于 5%，通过水体的损失也不会大于 15%。大部分的能量要在撞击时释放出来，无疑将形成一个巨大的撞击坑，熔融的岩石会铺满撞击坑的底部。在此同时，从撞击坑里激射出来的碎屑，与空气、水、蒸汽和气化的陨石混在一起，形成一个巨大的气柱直上重霄。这个气柱的直径可达几十公里，并在同温层中间侧向散开呈蕈状云。

从撞击坑中抛射出来的碎屑有各种大小不一的颗粒，数量非常可观。较粗的碎屑抛落物会堆积在撞击坑的周围，或像雪崩一般向外扩展。而小颗粒则将熔融、气化，并以超音速呈火柱冉冉上升。如果撞击物击中海洋，就会产生大量水蒸汽。琼斯和科迪斯曾经绘声绘影的描绘撞击后几秒钟的景象：火球起始时是一个薄薄的热气盘，一秒钟后，气盘爆炸性的扩展，渐呈球状，然后在半分钟内变成一个快速上升的热气柱，直达 30 公里的高空。一分钟后，喷射物展开成为蕈状云，细粒喷射物可以被带到 100 公里以上的高空。

奥基夫和阿伦斯指出，惟有直径小于一公毫的最小颗粒，才有办法能在同温层中停留足够长的时间，并散布到全球各处。公厘级和公分级的熔融颗粒虽然一样向上抛射，但将沿原来的陨落轨道回落。冷却后重行穿过大气层，成为玻璃陨石或玻璃质、石质或铁质微玻璃陨石。

证据遍布全球

尽管大家对白垩纪末期事件的描绘纷纭不一，但渥太华会议的结论却一致认为罪魁祸首就是陨星。我倾向于是陨落的彗星，因为它能引起污染，但是阿弗雷兹坚持小行星的观点。他们最得意的一个论点是这个天体散布了大量的铀。

彗星是一个“脏雪球”，所含的石质物质要比同样规模的小行星少得多，

因此所含的铀也要少得多。但是在界线黏土中发现的铀数量惊人。要沉积如此大量的铀，小行星必须重达 1000 亿吨，如果是彗星则还要加重十倍，达到一兆吨。诚如路易斯·阿弗雷兹于 1982 年在美国科学院的一次报告中所说，阿弗雷兹父子认为较小天体的设想更为可信。但是，可信度只是一种信念，而并非有说服力的证据。

格里夫根据他对大量撞击坑的计算，估计一颗普通石质陨石或铁质陨石陨落时挖出的地面喷射物体积，大约是陨石自身的 100 倍，所以 1000 亿吨的小行星撞击作用将产生十兆吨的喷射物。虽然只有一小部分碎屑可以通过同温层分散到各地，但从天空中最终落下的颗粒将以地球物质的成分居多，而非宇宙物质。

然而，欧洲几个点的界线黏土中铀浓度太高了。显然地源物质不可能超过宇宙物质的 100 倍，连陨落物体的十倍都不会超过。即使黏土中的所有颗粒都是撞击沉降物，从撞击坑中爆发出来的碎屑量也不会多于撞击体物质总量的十倍。

为了解决铀“过量”的问题，加州大学洛杉矶分校的凯特和沃森推测，撞击天体必须是低密度的。其密度不能大于每立方公分 0.1 克，才能解释界线黏土中喷射物的极高地外物质含量，这一比重值与雪球相差无几。舍水质的彗星外，不可能是其他天体，也不会是石质的小行星。根据陨落物的体积，这两位科学家相信该彗星的重量要略大于一兆吨，其直径应在十公里以上。那就必须是一个哈雷级的彗星。

科学无坦途，探索无穷尽，人们的注意力又转向喷射物的性质。斯密特在西班牙卡拉瓦卡（Caravaca）的白垩纪—第三纪界线黏土中发现了两种微玻璃陨石。其中较小的一种，大小和化学成分均与通古斯地区发现的球粒相似，而且铀浓度高达 56,900p.p.b.，接近铁陨石的含量。这种高铀含量说明这些物质直接来自陨石在空气中的爆炸，未被地球物质所污染。但较大的一种含铀量却不高，只有 10.4p.p.b.。因此，斯密特及其合作者得出结论，这些圆形的盘状或哑铃状的较大微玻璃陨石原属陨落作用形成的融熔物质，主要是从撞击坑中挖掘出来的地源物质，但已受到地外物质的严重污染。进一步的研究显示，其痕量元素组成与大洋岩石相似。因此，这些喷射物似乎来自洋底的一个撞击坑。事实上，无论是成分与大洋岩石相似的大微玻璃陨石，还是成分更接近于宇宙成分的小颗粒，从前都在古比奥的界线黏土中发现过，后来在其他许多地区也陆续鉴定出来了。

经过更多的分析后，理论上的疑团开始冰释。在界线黏土中与宇宙物质混在一起的数量不多的地球物质，显然揭示了一次彗星撞击作用，而不能用小行星撞击作用来解释。为了研究撞击作用发生后喷射物的分布机制，奥基夫和阿伦斯在柏克莱的大型电脑帮助下，发现这两类尘埃的分布过程并不相同。喷射物一开始含有异常高的地外物质成分和极高的速度，其宇宙物质的含量同古比奥、卡拉瓦卡、史蒂文克林特村等地发现的小颗粒相若。柏克莱

的科学家推测，高速使之上升到十公里以上的同温层，并分布遍及全球。但是，速度较小、主要来自撞击坑内含较多地球物质的碎屑，大多在达到如此的高度以前已经落下，分布自然不能太广。受宇宙物质污染最轻的降落物应出现在最接近撞击坑处，而不会在界线黏土中。因此，依据富含宇宙颗粒的界线黏土，并不能准确的量出地球物质与宇宙尘埃的比值，所以完全无助于解决何种星体撞击成坑的问题。研究深了一层，我们却又回到了原点：界线黏土中的铀异常并不能说明陨落物究竟是小行星还是彗星。

然而，陨石撞击地球的证据确凿，而且确曾抛射出大量尘埃。微玻璃陨石的特征证明，这个地外天体并未像通古斯陨石一样在空气中完全碎裂。时间是真正的救主，科学上的一些争论只能靠时间来解决。事隔几年之后，当丹佛美国地调所的黏土矿物学家鲍欧（Bruce Bohor）研究拉顿盆地的界线黏土时，在几百颗正常的砂和粉砂颗粒中，发现了不少特殊的石英颗粒，其结构与在亚利桑纳陨石坑及其他大型撞击坑中发现的柯石英极为相似。形成此种石英需要极高的压力。在地球表面，只有高速的陨石撞击作用才能产生如此高压。这些资料虽均有利于地外星体撞击说，但撞击作用是否曾一度使地球暗无天日，仍然悬而未决。

奥基夫和阿伦斯相信，撞击作用的喷射物至少要在大气层中停留数星期之久，才能达到全球性的分布，而且仅限于最细的尘埃颗粒。大于一公毫的颗粒将迅速从同温层下落。即使是很细的颗粒，因撞击作用而熔接在一起时，也会凝成较大的颗粒而迅速沉落。图恩及其同事作了一些计算，发现大于四公毫的颗粒两周之内就会沉落，大于二公毫的颗粒则要几个月。0.5 公毫的颗粒如不能黏结成较大的集合体，要经过三年才能落地。由此可知，微玻璃陨石下落必定很快，而且分布极为有限。

界线黏土中的球粒最先发现于西班牙、意大利、丹麦和北太平洋的 DSDP 四五六站位。所有这些地点都是在北半球的中高纬度地区，因此我曾认为这是一个东西向延伸的微玻璃陨石分布区。这种分布区由快速下落的颗粒组成，曾透露许多广为人知的陨石撞击轨迹。如果白垩纪末期的大规模撞击作用合乎图恩的计算，那么微玻璃陨石分布区应能指示天体实际撞击点的位置。但是，斯密特最近写信告诉我，南、北半球的许多地方都已发现白垩纪末期的微玻璃陨石，铀异常也是全球性的。1982 年，路易斯·阿弗雷兹就曾断言，无论何地，只要有界线沉积物，就一定有铀富集。其浓度从几个 p.p.b. 到几十 p.p.b. 不等。在阿弗雷兹的图上，已经标上了意大利、丹麦、西班牙、高加索、新墨西哥、德克萨斯、蒙大拿、北太平洋、南大西洋和新西兰等 36 个点。根据他在 50 年代追踪苏联氢弹试爆放射性落尘的经验，路易斯·阿弗雷兹估计，靠同温层的风将喷射碎屑从北半球带到南半球需要一年以上的的时间，而非几星期。除了最细的颗粒外，其他碎屑在一个半球到另一个半球的长途搬运中早就落下了。因此，地球南北半球同时发现喷射碎屑，不能单用同温层风来解释，而必须另寻可能途径。阿弗雷兹根据罗沙拉摩斯的琼斯

和科迪斯的研究指出，撞击天体很可能是以一种很小的角度与地球相撞的。如果当时发生的事件确是斜斜的一击，那么，爆炸和喷射碎屑就可以掠过地球表面进入轨道，玻璃陨石和球粒就能在几小时内散布到全球。不管这种反弹式陨星的解释是否正确，事实是这些碎屑确实广布全球，而且根据铱异常判断，其数量的确相当可观。

黑暗大地

那么，是否有足够的物质形成遮天蔽日的尘埃圈，阻碍光合作用的进行呢？罗沙拉摩斯的格斯尔（siegfried Ger-stl）和札尔德基（Andrew Zardecki）根据火山爆发时喷射出大量火山灰的资料，研究了同温层的尘雾覆盖全球这一极端情况下，光合作用减弱的情况。1883年，喀拉喀多（Krakatoa）火山爆发，喷出的同温层尘雾达一亿吨。光合作用所需的日光因此减少了10至25%。1912年，卡特曼（Katmai）火山爆发，放出的尘雾约为前者的一半，日光减少了20%。格斯尔和札尔德基的模拟计算显示，要使太阳辐射减少到正常情况的千分之一，即达到漆黑一团的程度，至少要有400亿吨尘埃喷射到同温层中。

一颗大规模的彗星，甚至毋需击中地球，就能提供那么多尘埃。只要一次比较接近的运行，就能在大气层留下足够的尘埃而招致完全的黑暗。

用稍高一些的数字，按500亿吨同温层尘埃计算，并设想层圈内的尘埃以每平方公分十毫克的密度均匀分布，图恩的计算结果与格斯尔和札尔德基的模型基本一致。在那时，地球到处的确像午夜一样漆黑一团，光合作用也将因此而完全停止。但是植物有储存能量的本领，大可以保持一段时间不死，并在大地重光时立即恢复光合作用。因此，植物是否会在暗无天日的情况下死去，尘埃的沉落速度就成了关键因素。图恩的数字表明，尘埃会很快下落，光合作用也将在三个月内重新恢复。

即使有更多的尘埃，达到数兆吨或几十兆吨，在撞击作用发生三个月之后，天空也会像月夜一样，呈现朦胧的光亮；四个月后，光合作用将恢复如初。图恩的计算中，假设小颗粒将凝结在一起迅速下落。如果不发生凝集作用，颗粒缓缓下落，黑暗将会持续一年左右；但这种情况基本上是不可能的。无论彗星抑或小行星造成多大规模的撞击作用，黑暗应该只能持续几个月。

如果陨星落入大洋，喷射物构成的火球将为一个巨大的“蒸汽泡”所包裹。克罗夫特模拟了大洋撞击作用的情况：一个直径十公里的石质天体，以每秒15至30公里的速度击中大洋，将使相当于陨落物20至100倍的海水，亦即体积1000至5000立方公里、重量1至5兆吨的海水化为蒸汽。撞击发生后一分钟，一个直径达20至30公里的汽柱将冲天而起，达到几十公里的高度。在撞击处，大洋将会沸腾！

冲入大气层中的大量水蒸汽，使直径达几千公里的一个地区之上的同温

层达到过饱和。蒸汽将迅速重新凝聚，以雨雪的形式重降地面。克罗夫特估计，大多数水分将在事件后数月内降落。总降雨量达上千公尺，以每天 5 至 10 公尺或 200 至 400 英寸的平均速率返回地表。我不禁想起了圣经上关于挪亚洪水的故事，记载大雨滂沱达 40 天之久。设若当时有一颗大陨星击中大洋，这种景象在理论上并不是不可能的。当然，撞击海洋事件发生后，彤云密布，天空将更加黑暗。但在另一方面，雨雪有助于清理空气中的尘埃，加速大地重光。没有人计算过这两种相反效应的联合效应。但是不管陨星击中的是陆地还是海洋，暂时的黑暗世界似乎是无可避免的。

幸存与死绝之谜

几个月的黑暗会给生物界带来什么影响？虽然阿弗雷兹研究组中没有一个人自认是生物学家或古生物学家，但他们确实估计了黑暗世界的生物学后果。他们的估计既无新意，也未经深思熟虑，只是把暗无天日理论与古老的饥荒说连到一起，主张所有植物暂停光合作用以及海洋浮游生物大规模的永久灭绝，造成食物链的崩溃。按照他们的观点，光合浮游生物的灭绝，势必导致食物链上位置较高的海洋动物饥饿与死亡。由此可以解释大部分有孔虫的灭绝，以及箭石、菊石和海洋的爬虫类完全灭绝。

至于以上陆生植物为根基的第二食物链，他们认为，在黑暗时期原来的植物无疑将因无光而死，或者至少停止生长。即使在重见光明之后，新的植物会从种子萌发新芽或者从幸存的根部再度生长，但大型的食草动物和食肉动物都是直接或间接的倚赖植物生存，它们将因此而趋灭绝。至于包括原始哺乳动物的小型陆生脊椎动物，由于可以依赖果实、种子、昆虫和腐败植物为生，就从这场灾难中幸存下来了。

遗憾的是，这一简单生动的假说，并不足以证明黑暗的杀伤力，甚至不能说明食物链上的高层生物受到了明显的影响。因为白垩纪的生物灭绝有着非常特殊的方式，任何一个试图解释这种特殊方式的理论，就一定要解释为什么有些生物惨遭灭绝，而另一些生物却安然无恙；这是白垩纪末期灾变的关键所在。生活在海洋表层的海相浮游生物受到了严重的打击，深水底栖生物却逃过了劫难。在浮游生物中，分泌钙质骨骼的生物几乎无一幸免，而分泌矽质骨骼的生物却安然无恙。游泳的菊石、箭石灭绝了，但鹦鹉螺类的软体动物却躲过了这场危机。在底栖生物中，浅水种属的死亡率也不尽一致。例如，棘皮动物受害较小，比腕足类幸运得多。即使是腕足类，情况也不尽相同。生长在泥底上的幸存者较多，而生活在白垩质海底的种属受创惨重。小型淡水无脊椎动物，如河流和湖泊中的软体动物，似乎完全无损。在陆地上，比较大的动物，尤其是体重大于 25 公斤的动物最易受到伤害。白垩纪末期生物的选择性灭绝，是最令人迷惑不解的问题之一，而且只有通过了解各种生命形式的生物学才能解决。使一种生物致死的因素可能正是另一种生物

幸存的机会，或者只不过是一种暂时的危机。这种情况取决于每一种生物的生活方式。

例如，阿弗雷兹研究组的科学家认为：进行光合作用的浮游生物在无光的条件下坚持不了多久。但在极区，长达几个月的完全黑暗是一种正常现象，光合浮游生物及以它为食物的浮游生物依然繁衍不衰。浮游生物在极区的冬天里可能暂不繁衍，却能越过黑暗岁月，在春回大地时重新勃发；生命之谜真使我困惑。我曾向研究海洋生物的朋友请教原因。

他们告诉我，如颗石藻的光合浮游生物，靠简单分裂繁殖，生命由周期性的活动期和休眠期组成。某些种属在活动期的分裂速度可达一日四次；进入休眠期时，其细胞失去鞭毛，并停止活动。还有些光合浮游生物，其活细胞藏在胞囊（通胞囊）中，就像熊躲在洞里一样。休眠期的生物或躲在胞囊中的生物并不需要进行光合作用，外部世界究属光明还是黑暗无关宏旨。最后，这些不活动的细胞也会发生分裂，形成大量周围长满鞭毛的子细胞，成为第二代孢子释放出来。极区和温带的超微浮游生物都有休眠的本能，而正是这种生命旋回的适应性使它们度过了漫长、寒冷和黑暗的冬季。

可以设想，全球短暂的暗无天日，将会把许多光合浮游生物驱入休眠期或蛰居期。而当大地重见光明时，某些浮游生物无疑又会产生活动期的新细胞并维持再繁殖。

如果光合浮游生物能经历黑暗而存活下来，那么其他浮游生物是否也能保存下来呢？是的，它们也有活动期和休眠期。我的同事奥勃亨斯莉（Hedi Oberhänsli），与图宾根的科学家一起在巴巴多斯附近的热带海域，进行过多年活体有孔虫的研究。她告诉我，她很喜欢一种叫作 *Globorotalia sacculifer* 的有孔虫，其生命周期与月亮的周期一致。幼年时成群潜入深海底，在那里长到成虫大小，在下一次满月时返回海面，繁殖新的一代。一个个体的寿命为一个月。如果持续数月的黑暗才能造成饥荒致死，那么这种生命短暂的有孔虫第一代仍可顺利的繁殖，并在饥荒开始以前很久寿终正寝。而以后的几代却不得不因为植物进入休眠期而面临食物日趋短缺的局面。那么，它们是否会因饥饿而死呢？

我为这一问题请教了加州大学戴维斯分校的利普斯（Jerry Lipps）。利普斯是一位专门研究极区活体有孔虫的专家，而极区浮游生物在黑暗的冬季是无物可食的。

利普斯告诉我，每当冬季来临，这些生物就停止繁殖进入休眠期，直到明春食物丰富时才能醒来。它们能休眠多久呢？利普斯不敢断言。但肯定可以坚持几个月，有的种属甚至会保持休眠状态达数年之久。

总而言之，黑暗可以致生物于死地的说法，虽然是一种看似成理的猜测，但谁也难以断言，所有的个体都无法逃避这一严峻的命运。尤其是极区生物已经提供范例，证明它们能够适应几个月的黑暗。大规模生物死亡并不一定导致大规模的生物灭绝，这是两个迥然不同的概念。尤其是在估计黑暗

对陆生植物的影响时，必须努力划清死亡与灭绝的界线。

历劫之后

几个月的黑暗无疑将严重摧残植物世界，植物将枯萎并大量落叶。沉积物中的花粉组合已经提供了生动的证据支持这一设想。美国地调所的楚迪（Robert Tschudy）研究过鹰粉属植物群。这种植物在北美西部的灭绝，标志着拉顿盆地白垩纪的终结；其层位与发现最晚期恐龙化石的层位相当。在同一地点，奥思及他在罗沙拉摩斯的同事在界线附近发现了铍异常现象，找到了地外事件的证据。楚迪的花粉图提供证实灾难性环境变化的有力依据。

白垩纪末期，拉顿盆地是一片沼泽丛林，主要由被子植物（angiosperm）组成，其中多数是乔木类。虽然到处都有蕨类植物，但其赖以繁殖的孢子，在花粉组合中为量甚微，不及 5%。楚迪在鉴定了界线上下的孢粉组合后，发现在铍异常层附近，植物面貌发生了极大的变化。界线以上几乎没有乔木花粉，但蕨类植物的孢子竟占孢粉组合的 90%。显然所有树木及沼泽树林突然遭到了毁灭性的破坏，只有羊齿类植物还能在劫后的土地上苟延残喘。楚迪把这一灾难性的变化与在印尼火山喷发区见到的情况进行了对比。从火山白喷溢而出的炽热熔岩，顺着山势奔腾而下，毁掉了沿途的所有树木。在森林再度繁殖起来之前的几十年间，只有蕨类摇曳在光秃秃的熔岩之间。

从楚迪的孢粉图上反映出来的植物剧变，是从两个相距不过一公分的样品中得出的。一公分的大洋软泥一般代表一千年的时间，但是陆上沉积物的沉积速率一般要比大洋高出许多倍。鉴于贫孢粉沉积物极薄，拉顿盆地的森林遭到摧毁的总时间可能还不到一千年。我们其实可以拟想，在陨星撞击之后，森林在一年内全部死去。

楚迪在紧接着拉顿盆地界线黏土之上的沉积物中，发现了高温炭化的植物碎屑，他怀疑是大范围的森林大火所致。楚迪的推测后来得到了芝加哥大学一批化学家的证实。他们在史蒂文史林特村和北太平洋的黑色界线黏土中也都发现了炭质灰烬，而且确定这些灰烬颗粒是陆上野火的产物。这么多灰烬埋藏在洋底的界线黏土中，促使芝加哥的化学家推测，在陨星撞击事件发生后，至少有十分之一的动植物在一次火灾中化为灰烬。

灾难之后的景观是不难想象的：烧剩的树干与倒伏的树木杂乱的堆在一起。在那些死去的树干上，长满了一簇簇的蘑菇。诚如地质记录所揭示的，蕨类植物藉机崛起。有人设想，只有一些地方可以见到被子树木的幼苗，在成片的生物残骸之间，孤独的摇晃着它们的树冠。

但是楚迪的孢粉图还指出，植物的复原算是相当迅速。富含蕨类孢子的沉积层非常薄，就在界线沉积物以上几公分处，花粉的数量又重新超过了孢子。可以想象，新一代的植物在几十年间又已枝繁叶茂，重现生机。一二百

年间，又是一片茂密森林，只有几种如鹰粉属的植物未能在劫后重返植物王国。

虽然孢粉和孢子资料描绘的故事揭示了一场巨大的灾难，而且当第一个静寂的春天重返地球时，死灭的森林中和光秃秃的原野上已不复有野花盛开，但在陆地植物的演化长河中，这一事件似乎并不重要。因为白垩纪末期陆生植物的大规模死亡，并未引起多少植物种的灭绝。如果楚迪关心一下植物的灭绝格局或歧异度的变化，他本可以得出白垩纪末期植物并未发生重大变化的结论，但他失去了机会。另一位著名的古植物学家，斯密生博物馆的希基（Leo Hickey）抓住了这一机遇。他在白垩纪—第三纪界线上植物种属的统计分析中，计算了白垩纪植物延续到第三纪早期种数的百分比。

希基在《自然》杂志上发表了一篇文章，题为“陆生植物证据支持白垩纪末期生物的渐进演化而非灾变”。其中指出，幸存生物的格局显示出太多的随机性，不足以说明曾发生令人毛骨悚然的全球黑暗。例如，他发现在南半球高纬度地带（南纬 60 度以南），90%的植物都未遭死劫；而在中纬度地区则有 60%的植物幸免于难。热带地区的情况比较复杂；有的地方幸存率达 100%，而另一些地区，幸存率只有 20%。在北半球，高纬度地带的情况变化更大，幸存率从 95%到 5%都有。在西伯利亚和北美西部的鹰粉属植物群中，75%的白垩纪种属都灭绝了。希基描绘的植物分布格局其实只是揭示了一个事实，即愈向北，生物破坏程度愈严重；但他并未领悟到这一事实的重要意义。

如果加上季节因素，希基关于选择性灭绝的资料恰恰证明了地外灾变。陆生生物与浮游生物一样，为了适应恶劣环境也会进入休眠期，不过其准备工作要比实际的冬天提前几个月。在南半球的高纬度地区，从四月份开始的长达数月的黑暗，对植物社会几乎不会有什么损害。那时已临近冬天，植物已经通过积蓄淀粉和落叶等方式完成了休眠的准备工作。当南半球的春天在九月份重返时，天空已恢复清明，植物及其种子又有了重新萌芽的条件。因此，对于南极的植物，事件并未扰乱其季节性的节奏。

但是，北半球的情况就不同了。四月份开始的黑暗，将给植物界带来毁灭性的打击。因为其时正值早春，植物刚刚从休眠期中醒来，进入活跃生长期，光合作用不可或缺。一旦发生这样的黑暗，植物将因不能重返休眠期而死去。无法再持续休眠下去的种子只好萌发新芽，但是没有光明也就无法进行光合作用，于是新芽必将因此而夭折。于是就发生了希基发现的规模远大于南半球的大规模植物死亡或灭绝现象。植物愈向北所受摧残愈重的分布格局，说明一颗巨大的陨星在北半球的春天击中了地球。

被希基认作随机现象的灭绝百分比变化，也可以用许多其他方式来解释。种子休眠期的长短就是关键因素之一。贾曾（David Jarzen）引用针对 180 种马来西亚树木发芽情况的研究，为我们提供了一个佳例。在那里的热带丛林中，65%的种属都在大约 12 周内萌发新芽。如果陨星在春天击中

地球，三四个月后尘埃落尽，天空再度重见光明，那么，休眠期只有六周而发芽最快的种，将失去幸存的机会。对有三个月休眠期的大多数种子来说，陨落事件只是轻描淡写的一击。当然，休眠期长达六个月以上的树木，就会呈现高幸存率了。

对于因休眠期足够长而幸存下来的种属，情况也不一样。有的也会因为失去繁殖能力而灭绝。印第安纳大学的迪尔契(David Dilcher)指出，白垩纪末期的被子植物一般是靠昆虫传播花粉的，到第三纪早期风媒植物才迅速扩展。这项事实是否指出白垩纪末期事件引起了昆虫的灾难性死亡呢？如果昆虫大批死亡，那么靠昆虫传播花粉的植物将因此而失去繁殖能力。但是风力依旧，从而使风媒植物在大地重光后的若干年中有了蓬勃发展的机会。

锲而不舍寻真相

虽然暗无天日的设想为白垩纪末期的植物变化提供了一种解释，但把恐龙灭绝与它联系到一起的尝试，却不免有牵强附会之嫌。计算的结果显示，黑暗时期只持续了几个月。因此草料应足够一些食草动物活存，一些食肉动物也可以靠其他动物尸体熬下去。把所有的恐龙都归因于饥谨而死，实在令人难以置信。有人说，恐龙是靠目力觅食的，黑暗将使它们无能觅食而陷入饥荒。但是并无证据说明它们的嗅觉和听觉不够发达，也无证据足以说明在黑暗时期的生存竞争中，夜行生物有任何占优势之处。

尤其甚者，暗无天日说之所以证据不足，不在于一颗巨大的陨石有没有办法扬起足够的尘埃使天空转为漆黑一片，而是在于每百万年或每千万年都会发生的撞击事件就能引起类似的情况。休梅克对陨石撞击地球事件的频繁了如指掌。诚如他在一次讨论会上所云，如果黑暗就能引起生物的大规模灭绝，地质纪录中就一定会有更多生物大规模灭绝的证据。

这一假设的最后检验是灾变的时间表。如果黑暗真是白垩纪生物灭绝的原因，那么灭绝只能发生在大地上重光前的几个月内，或者按照最极端的估计，也必须在几年之内完成。所有的菊石、箭石、厚壳蛤和恐龙，以及仅有极少例外的全体有孔虫和超微浮游生物，真的都是在那么短暂的时间内灭绝的吗？

第十章 劫后余生

大洋底是浮游生物的墓地。不具骨骼的软体浮游生物死亡后，细胞中的软组织发生氧化，都变成了二氧化碳和水，在沉积物中间或保有一些痕迹。然而那些分泌硬体的浮游生物，却会留下化石。在大多数情况下，有孔虫和超微浮游生物的骨骼是由碳酸钙组成的；而碳酸钙也是石灰岩的主要成分。分泌矽质的放射虫和矽藻的化石遗骸比较少见，而矽质是燧石的组成成分。在放射虫和矽藻十分繁盛的极区海域中，矽质软泥是主要沉积物；但在大多数海域中，钙质软泥才是主要的沉积物。达几百公尺深的海水中，碳酸钙是不饱和的。因此有孔虫和超微浮游生物骨骼中的部分碳酸钙将发生溶解，不过溶解速率甚小。与此同时，由于新介壳的稳定增补，较早的介壳不致发生完全的溶解。只有在浮游生物的繁殖力很低或在溶解速率很高的大洋最深部位，才会发生全部介壳溶解的现象。惟一留下的沉积物是一种极细颗粒的不溶残余，也就是来自陆地或外太空的尘埃。由这些尘埃组成的沉积物称为黏土，通常呈红色。因为大洋深部的底水常常富含氧，故沉积物中的铁都变成了三价铁，就像铁器生锈一样；而三价铁是红色的。

方解石补偿深度的意义

若是那儿的浮游生物繁殖力很低，红黏土会出现在四千公尺以下的深海底；若是那儿的浮游生物很繁盛，则会出现在五千公尺的深处。分开白色钙质软泥和红黏土的界线称为方解石补偿深度（calcite compensation depth），简称 CCD。补偿之意，是指沉淀和溶解的钙质骨骼量达到平衡。在 CCD 之上，沉淀的钙质介壳多于溶解的钙质介壳，故有钙质软泥的沉积。而在 CCD 之下，供应的浮游生物骨骼不足以补偿其溶解量，故有红黏土堆积。方解石补偿深度因地而异，取决于浮游生物生产力与海水溶解的不同。

斯克里普斯的伯格曾用一种类比的方法解释方解石补偿深度的概念。我们不妨设想一个干涸的海底，地形起伏不平。峰脊顶部都戴着白帽子，而较低的斜坡、深海平原的深海沟等凹地，则为红黏土或棕黏土等暗色沉积物所覆盖。分开白色和暗色沉积物的界线就是方解石补偿深度，看上去就像冰冻区的雪线。雪线是年融雪量与年降雨量严格补偿的地方；它与 CCD 一样，也是因地而异的。降雨量大或气候极冷、融化作用很小的地区雪线低；而在降雨量极少的沙漠地区或气温很高的热带地区雪线就高。方解石补偿深度亦然；它在浮游生物介壳沉积量极高的赤道带或底水溶蚀能力不强的地区较低；而在浮游生物产量很低的中纬度地区的海洋“沙漠”或者溶蚀力很强的底流活跃区，CCD 则较高。

1968 年，我参加了深海钻探计划南大西洋第三航次。其时，关于 CCD 的理论已经盛行了一段时间。因此，当我在一个不应发现红黏土的地方见到红

黏土时，曾感惊讶不已。当时我们正在大西洋中脊钻探，这一水下山脉的山顶大约在海面以下 2.5 公里处。该区的方解石补偿深度在 4.5 公里以下，中脊顶部到处覆盖着白色软泥。红黏土见于大西洋深海平原的中央部位，那里的水深超过 5 公里。但在现代 CCD 之上的中脊翼部的几个钻孔中，我们都在现代钙质软泥下面发现了红黏土，真是奇哉怪也。

我受莱伊尔思想的多年熏陶，不免有先入为主的影响。我在报告中解释这一现象时，就采用了一种教条主义的渐变论方法。我设想南大西洋的 CCD 在历史上未发生过丝毫变化，一直维持在 4.5 公里左右。而大西洋中脊在红黏土沉积时，没有现在那么高。根据这一种解释，较老的沉积物之所以是红黏土，乃因当时的大西洋中脊顶部还在 4.5 公里以下，所以有孔虫和超微浮游生物都溶解掉了。

回首往事，我不禁为当时的天真而失笑。没有人会坚持雪线应该永远保持在同一海拔而不变化。在未次冰期时，整个瑞士，无论峰谷都位于雪线之上，而这并不是因为这个小国的海拔比现在高，而是因为当时融雪量很小而降雪量甚多，从而使雪线大大降低的缘故。那么，我们又有什么理由设想大洋的白色石灰质“雪线”在地质历史上永恒不变呢？在后来的深海钻探航次中，其他科学家很快纠正了我的错误。他们提出了许多令人信服的根据，证明大西洋中脊的高度并未改变，而是方解石补偿深度曾经因为海洋表层生物的生产力和海底化学条件的变化，发生过上下移动。在 1000 万年以前，因为 CCD 反常的位置较高，于是在大西洋中脊顶部形成了红黏土沉积物。海伊（Bill Hay）曾是第四航次的随船科学家。他制作了一张图，显示一亿年间方解石补偿深度的升降和变化。

当时海伊在伊利诺大学执教，他的一位研究生沃斯利（Tom Worsely）选择白垩纪—第三纪界线作为自己的论文题目。在美国南部的一些地方，晚白垩纪和早第三纪的海洋沉积物已经因为后来的上升作用而暴露于地表，在南方的许多公路边上都可以见到。沃斯利在阿拉巴马州的布拉格斯（Braggs）附近采集了一套样品；那里有一个连续剖面，化石保存得很好。他在白垩纪—第三纪界线处发现了一层坚硬的贫碳酸钙岩石。鉴于古比奥和其他地方的界线黏土均以贫碳酸钙为特征，沃斯利提出了一个惊人的大胆设想：

白垩纪末期的 CCD 曾从 4.5 公里的正常深度，上升到最多只有几百公尺深的透光带。而引起补偿深度上升的海洋化学变化原因，同时也是招致光合浮游生物大规模灭绝的杀手。

没有多少科学家认真看待沃斯利的设想。但是 CCD 的变化却是一个事实，所以我们需要掌握 CCD 变化的确切资料。当时，由于在海上的经验，我正面临深刻的思想变革；不仅要否定自己对南大西洋红黏土的幼稚解释，而且对我的整个地质思想体系作一番深刻的反思和剖析。

全球携手合作

深海钻探计划 (DSDP) 本来只有 18 个月的资金, 但刚刚执行, 就在头几个月中取得了无比辉煌的成就, 从而使美国国会决心继续在财政上支持这个研究。DSDP 第二阶段的任务, 是把格洛玛·挑战者号派赴印度洋, 第三阶段则专事南极钻探。当时我正卷入地中海地质历史的研究, 我竭力劝说 JOIDES 中的朋友, 在地中海钻几个孔是绝对必要的; 结果我成功了。而且钻探活动在地中海有惊人的发现: 600 万年前, 地中海曾一度干化, 成为一个位于现代海平面 3 公里以下的无垠盐漠。

地中海的经历给我留下了极为深刻的印象, 因而初次对渐变论这一地球科学的基本原理产生了怀疑。莱伊尔犯了一个错误: 地球表面的条件不是、也不可能是一成不变的。海洋既然可以变成沙漠, 海洋的方解石补偿深度当然也可以改变。地质变化及其原因, 要比莱伊尔想象的情景更为剧烈和扣人心弦。

地中海的发现也给美国自然科学基金会留下了极其深刻的印象, 因为地中海航次 90% 的随船科学家都是欧洲人。当时山姆大叔还是这计划的惟一资助者, 但既然这些外国人对深海钻探都那么感兴趣, 他们自也应慷慨解囊。于是他们在巴黎召开了一次记者招待会, 宣传地中海航次的成就。我作了地中海最新发现的报告。随后, JOIDES 执委会的主席发表演说, 邀请各国政府参加这一项最伟大也最昂贵的地球科学实验。法国、英国、日本和苏联都被说服了。从此 JOIDES 变成了一个国际性的组织。1975 年, 开始了国际大洋钻探阶段 (IOPD)。

我曾努力争取让瑞士以准会员国身份参与合作, 却因国际科学界的权力冲突而未能成功。然而我总算提出了一份钻探建议书, 要求在现代海底白色软泥之下意外出现红黏土的地方, 研究方解石补偿深度。

在 1975 年, 刚刚开始国际大洋钻探计划, 我就写了一封信给 JOIDES 组织的规划委员会, 建议在大洋中脊的东翼, 沿着南纬三十度打一排钻孔, 研究一千万年前中新世时期 CCD 的显著上升。那时有两种假设争持不下。“补给派”坚持, 中生代时, 大西洋那一部分的生物繁殖力曾急剧下降; 而反方的“需求派”则提出, 有一种溶蚀能力很强的寒冷底水曾突然侵入该区, 引起广泛而强烈的溶解钙质软泥作用。由于溶解量过大, 供应量无法补偿, 就导致了 CCD 的上升。我们需要生物生产力的资料以及可靠的化学标志, 才能解决这一争议, 而南大西洋正是取得这些资料的最理想地区。

这些问题对科学界意义非凡, 地点也作了精心的选择。根据我在 1975 年的建议, JOIDES 同意在 1978 年安排一个为期七周的钻探航次。但是此一安排又延缓到了 1980 年, 因此我们有充足的时间规划这次以及南大西洋的两个航次。

成果斐然

延迟计划对科学家来说固然是一种挫折，但也会带来意想不到的运气。好处之一是有机会利用最先进的技术。

科学家虽然早已根据海底扩张产生的洋壳条带，得出了余磁的“条码”，但却从来应用磁性地层学来研究海底钻探取样所得到的沉积序列。DSDP 头十年取得的岩芯不适合古地磁研究，因为它们几乎一律被旋转钻扰乱了。而且岩芯取样很少能够百分之百的完整，而完整的取样对于完整的记录极性倒转事件是不可或缺的。谁都承认这是关键所在。

科学家常常忽略工程技术发展的潜力。当我们为岩芯样本不完整而沮丧绝望，深海钻探计划聘用的开发工程师还不知道这是使我们大伤脑筋的难题。塞鲁基(Stan Serucki)是我在壳牌石油公司工作时的老同事，已为 DSDP 工作了近十年，却偶然才知道，我们急需的是完整无缺、未扰动的岩芯进行精确测年，而这一工程问题其实并不难解决。于是塞鲁基设计了一种水压活塞取样器，以取代常规的旋转取样装置。那是一个用水压驱动的钢管，通过旋转着的钻头下到海底取芯。用这种技术不会扰乱到岩芯，而且样本可达百分之百完整，不致残缺遗漏。

1979 年时，我正在中国大陆旅行。拉蒙特的海斯(Jim Hays)写信告诉我，他们在加州海湾的一个航次中初试活塞取样器获得成功；狂喜之情，跃然纸上：“对海洋历史的研究者而言，液压活塞取样器是仅次于动力定位钻探船的伟大的礼物。”这样，我们就可以精密的确定短时期内发生的地质事件了。从破碎而不完整的岩芯中，我们只能取得分辨率为百万年的年龄平均值，而今却已能根据大洋沉积物测定百年或千年的地质事件。海斯要求同行支持这一革新，中断正常的钻探计划，安排一个特殊的航次试验这一新技术。这意味着我们的南大西洋航次不得不再一次延迟。然而，海斯是对的。既然我们有可能使工作尽善尽美，为什么不尽力而为呢？我们应当给这种新的取样器一个机会。

新取样装置的发明刺激了深海钻探计划，国际合作阶段向后延续到 1983 年。因此，当我从中国大陆归来，参加第一次计划会议时，发现我们的任务扩大了。我们必须在南大西洋执行五个钻探航次，而不是原来的三个，其中有一个航次计划通过大洋中脊的各站位。为了精确测定沉积物的年代，要尽可能采用液压活塞取样器。接着我们为深海钻探计划 73 航次选择了 7 个优先取芯的站位。

我在巴西的桑托斯港登上格洛玛挑战者号，这是我第四次登船为深海钻探服务。拉蒙特的海底磁异常专家拉布雷克(John LaBrecque)，与我同任首席科学家。休士顿大学的卡尔曼(Max Carman)、美孚石油公司的佩希佛尔(Steve Percival)、佛罗里达大学的赖特(Ray Wright)这三位老朋友，以及我从前的两位学生麦肯琪(Judy McKenzie)和瓦塞特(Helmut Weissert)出任随航科学家。来自英国、法国和德国的同行也参加了这个美

国—瑞士联合分遣队，加强了我们的力量。

我们于 1980 年 4 月 13 日启航，其时，我正发表关于白垩纪末期灾变事件的论文。到达第一个站位大约需要十天的航程，我们有充分的时间讨论计划。我身边还带着文章的校样，竭力向科学家宣传我对生物大规模灭绝事件的热情和兴趣，向他们解释这个航次与白垩纪末期事件的关系。

我 1975 年的建议书中，并未包括白垩纪界线的研究。说实话，当时我还没有意识到这一问题的重要性，而只是热中于中新世方解石补偿深度的变化，和沃斯利提出的、与白垩纪末期事件不谋而合的 CCD 急遽上升也沾不上边。待到航次的任务扩大之后，我们提出了一个研究整个新生代的建议，直到白垩纪的界线为止，但界线本身并未列入钻探计划之中。普茉莉—席尔娃提出的研究界线建议也全然遭到忽略。

当时大家对这一问题都缺乏热情。原因是深海钻探计划从未取到穿过白垩纪—第三纪界线的连续而又未经扰动的岩芯。虽然我们在第三航次时曾两次穿过这一界线，但古生物学家却抱怨一无所获；在以后的深海钻探航次中也都是如此。由于种种原因，不是第三纪的最早期沉积缺失，就是白垩纪最晚期沉积间断，或者二个情况都发生了，可能是因为扰动了岩芯、样本不全或者是关键部位忘了取芯。总而言之，我们错失很多良机。

液压活塞取样器的发明并未激起多少乐观情绪；因为取样器无力穿透非常坚硬的沉积物或穿过 250 公尺以下的沉积物。而白垩纪最晚期的沉积物形成于 6500 万年以前，通常都埋藏在海底下 500 至 1000 公尺的深处。一般说来，它们压缩太紧，埋藏太深，非液压活塞取样器的能力所能及。

然而就在我登船之前，一位同事在二月举行的最后一次计划会议上作的即席评论，重新点燃了我的希望。德国基尔大学的菲德雷 (Dieter Fütterer) 报告了前一年夏天，在 R/S. 简·卡罗特 (R/S Jean Charrot) 号调查船上进行调查工作的情况。顺便提到他们在开普敦西面的开普盆地，亦即离我们原定站位不远处的海底，用一般的活塞取样器在海面以下不深处取到了古新世的沉积物样品。

古新世是长达 6500 万年的新生代的第一个世，大约延续了 1000 万年的时间。这一时代的沉积物一般都埋藏在几百公尺厚的年轻沉积物之下。而菲德雷却告诉我们，古新世沉积物在那个站位却直接位于浅海。它与白垩纪的界线自然不会埋藏根深，可能就在当今海面以下一二百公尺处，理应在液压活塞取样的能力范围之内。如果我们能用新的方法得到界面上下的样品，实乃天赐良机。

我的伙伴对我的陈述很感兴趣，但开普盆地的站位在我们的计划中排在第三位。第三就是第三，我们必须照章行事。从四月二十三日五月十九日，我们在大西洋中脊的东翼，按原计划钻了一排五个钻孔。我们的运气很好；气候宜人，作业顺利，几乎没有遇到障碍。我们已经完成横越南大西洋的一半航程。原计划打七个孔，但第一批钻探结果显示，钻孔布置得太密了些。

钻完四个孔后，我们跳过了第五个孔，而第六个孔亦已接近尾声。按照日程表，我们必须于六月一日前在开普敦靠港，距那时还有足够钻一个孔的时间。

我们可以去钻第七个孔，但这个孔也可以省略不钻，并不影响我们的计划。那么，我们何不开赴开普盆地一试液压活塞取样器的锋芒，碰一碰钻穿白垩纪—第三纪界线的运气呢？

付诸行动

五月十九日晨，我召集了一次随船科学家会议。大家围站在工作台的周围进行民意调查，结果都愿一试，以求有所突破。毫无疑问，这是一场赌赛。固然，在航次中随机应变是允许的，但是要把第一顺位的任务搁置一边而去实施第三顺位的任务，难免招致物议。我们马上起草了一个电报给 DSDP 的首席科学家，要求批准到开普盆地钻探。其实在要求正式被批准以前，我们的钻探船就已向那个方向驶去了。

目标站位，即深海钻探计划第五二四号站位在开普敦市以西一千公里处。我们在五月二十一日傍晚到达现场，但却遇到了一连串的麻烦。因为工程组要试验一种新的装备，开钻就延迟了，而试验又以失败告终。试验包的设计者忘了与工程组的人商量，把套管外径作得与钻头内径一样大。试验时把带着试验包的套管硬挤进去，到钻头里就卡住了。试验作不成，钻探又进不得，进退两难。钻工不得不将四千公尺的钻杆全部起出，除去卡住的钻头，再重新组装钻具。这一事故花费了二十四个小时和五万美元。

终于在五月二十三日中午开始液压活塞取样。恰如菲德雷所料，一开钻就遇到了古新世沉积，但不久又遇到了麻烦。在孔深三十公尺处，我们钻到了燧石层。燧石是一种由放射虫的骨骼碎屑胶结而成的坚硬岩石，活塞取样器无法穿过，所以我们在古新世卡住了。为了用这一取样器取到界线上下的样品，只能一切重新开始。在第二个钻孔中，我们改用旋转钻打穿硬岩层；取得的是常规的旋转岩芯，既不连续，岩芯也遭到了破坏。但我们仍然有希望，因此继续坚持钻进。

这时，船长到了岩芯实验室，送来坏消息。我们愚蠢的为一种设计错误的装备浪费了海况良好的宝贵时光，连海神都震怒了，如今正面临风暴的威胁。风暴的前锋将于翌日凌晨六时抵达，船长要我们钻得快些。钻具的末端是最脆弱的地方，最易断折，如果能在风暴之前把这一段最脆弱的钻具埋到大洋沉积物中，就可以度过风浪的冲击。其实我们又何尝不想钻得快些，但在技术上有很多限制。幸运的是，风暴并未到来。其前锋在站位南面一百公里处突然转东，从我们的旁侧掠过去了。

五月二十四日，气候晴朗。速率达到每两小时一管，钻孔愈来愈深。虽然我们使用的是常规技术，但岩芯扰动轻微，岩芯收获率也很高。每一次提

升取样装备时，取样器几乎都是满满的。

样品要在船上进行及时的现场研究。古生物学家研究有孔虫和超微化石；地球物理学家则用磁力仪研究每个样品剩余磁性的极性。

海洋沉积物中的超微浮游生物组合因时代而异；基于这一差别，可以把它们分成不同的世代，这在古生物学中称为化石带。新生代大约有五十个超微化石带。在五二四站位，大多数化石带已遭侵蚀。超微化石带是以连续的数字编号的，就像埃及的法老王朝一样。我们取样的第一个带属于早第三纪（即新生代的前半期），序号十三，叫做超微化石早第三纪十三带，简称为 Np—13。我们的目的层是 Np—1，即早第三纪最早期沉积物，理应直接覆盖在白垩纪—第三纪界面之上。我们很快钻进了 Np—12，11，10，9，8，7，6，5，4。五月二十四日午夜，当第十三管岩芯取出时，时代为 Np—3 带。大家都在紧张地等待着 Np—1 沉积物之下的界线样品。

当时，科学家都在忙着用旋转磁力仪验证古生物学家确定的样品年龄。我们已经穿过了地磁带 C—24—N，C—24—R，C—25—N，C—25—R，C—26—N，C—26—R，遇到了 C—27—N。C—27—N，可以与古生物年代 Np—3 相对比，而界线的位置应当是在多灾多难的 C—29—R。

Np—3 带的沉积物竟然出奇的厚。整个下午，超微化石专家佩希佛尔一无所获。新岩芯取出后一小时，他就按照惯例在黑板上用粉笔写上“超微化石·早第三纪 3”（Nan-nofossil Paleogene 3）这样的通告。待他重复四五次后，我们开始同他开玩笑，干脆在黑板写“佩希佛尔 3 老套”（Nothing—new Percival 3）以示全无进展。直到傍晚九时，佩希佛尔还没有发现 Np—2 带的任何化石。这时，船长再次来到实验室。天气预报情况不妙，又一次风暴将在第二天早晨再度光顾。船长警告说，如果风暴前锋到达本站位，我们就不得不起钻避风。这是缓慢的钻进与高速推进的风暴前锋之间的一场比赛，我们能否赶在风暴到来之前钻透 Np—1 进入 C—29—R 呢？我们有没有这样的运气取得界线附近的样品呢？

我们都在焦急不安的等待着。五月二十五日凌晨一时，佩希佛尔告诉我，几小时前取上的十九号岩芯中发现了白垩纪的超微化石。

“但是超微化石带 Np—1 哪里去了呢？我们还没有发现 Np—1 带呢！”

“没有 NP—1 带的化石。”佩希佛尔答道。

我们都感到非常沮丧。其时已过午夜，风暴即将来临。我情绪不佳，不想面对令人不快的现实，把现场监督的责任交给拉布雷克就去睡觉了。

终于如愿

一觉醒来，但见蓝天碧海，满室阳光。像上次一样，这一次风暴又在离我们站位五十公里处转到东面去了。

我跑到岩芯实验室，佩希佛尔叫我亲自去检查十九号岩芯中的超微化石

带 Np—2 和白垩系（编注：系指岩石，纪指年代）最上部的接触带。他没有发现第三纪最早期的任何超微化石种，那么在该序列中就一定要有一个间断。因此，佩希佛尔认为界线处产生了一个侵蚀面。

我站在岩芯前面，用放大镜逐一观察岩芯的表面。从海面上层落到海底的远洋沉积物，就好比堆积到地上的雪花。在空气不净的地方，常能见到雪和尘埃相间而形成的纹理。在我们的岩芯中，最老的第三纪沉积物也有同样的纹层状构造，可以看到像纸片一样薄的互层及微小的成分差别。如果有侵蚀作用，那么非常规则的纹理将为一个不规则面所切割，但我并未发现这种反映沉积作用中断的界面。此外，我们正在进行钻探的开普盆地之所以称为盆地，是因为它是一个沉积凹陷。浅海陆棚或海底山脊上的沉积物可能为底流冲走，但是，在一个盆地里，沉积物会搬到哪里去呢？不仅不应当有缺失，反而还应当见到更厚更全的沉积序列，或者一个放大的剖面才对。诚然，其他早第三纪沉积物，像厚厚的 Np—3 就是放大的了。但佩希佛尔却告诉我们，早第三纪最早期的沉积物统统都缺失了。

十九号岩芯取出后，佩希佛尔彻夜未眠，其中又连续取了三个岩芯。之后他回房休息，我留在他的实验室里阅读他的纪录。二十号岩芯于凌晨三点三十分取出，二十一号岩芯五点三十分，二十二号岩芯七点三十分。佩希佛尔匆匆观察一遍，发现了大量白垩纪的超微化石，只有二十号岩芯的上半截却是空白。在岩芯上半部的三公尺内取的样品，似乎不含超微化石。佩希佛尔在工作日志上写道：“粗略鉴定未见超微化石。”

真是怪事一桩。在世界各地，直到白垩纪末，生物都极为繁盛，只有界线之上的早第三纪最早期沉积物几乎不含化石。而且界线黏土通常只有几公厘厚，最厚也不过几公分。在最晚期的白垩纪沉积物之下，竟有三公尺不含化石，岂非咄咄怪事。是否佩希佛尔在凌晨的匆忙和疲倦中发生了疏忽呢？

佩希佛尔一向以办事稳重著称。在大西洋第三航次中我们就曾同舟共事。我在申请黑海钻探计划时，曾特地要求指定他为船上的微古生物学家。当格洛玛·挑战者号在 1975 年驶过波斯普鲁斯海峡后，我们又曾相处一段时间。他工作刻苦，富有合作精神，处事达观，给我的印象极为深刻，还经常不眠不休的连续工作三十六小时或四十八小时。所以当我们讨论七十三航次的人事安排时，我再次要求佩希佛尔上船服务。这已是我们之间的第三次合作了，我对他完全的信任毫不动摇。

正当我为这一难题犹豫不决时，佩希佛尔在短暂的休息后又回到了实验室。二十三号岩芯于早晨九时三十分取出。在他结束新样品的常规鉴定后，我走近他，问他为什么那一段没有化石。

但他并不能肯定那段岩芯一定没有化石。岩芯起得很晚，或者更精确的说是在黎明时分。他并未聚精会神的在黏土沉积物中寻找细小的超微化石。睡了两个小时后，他感到精力充沛，已能重新鉴定这些样品了。

为了让佩希佛尔能安静的工作，我走上船桥去同气象员闲谈。他通过电

脑打印的卫星图象，预报五月下旬还有风暴。这在南半球的冬天是司空见惯的。

通讯系统传来的信号打断了我们谈话。佩希佛尔要我去他的实验室。我满怀希望，急步下楼，只见佩希佛尔满面笑容的站在我的面前。他终于在那一段看上去没有化石的岩芯中找到了化石，还在其中找到了第三纪最早期的超微化石。据此，他认为十九号岩芯中的白垩纪超微化石是从白垩纪沉积物中冲刷出来，又重新在早第三纪堆积下来的。界线不是在十九号岩芯，而应当在二十号岩芯。整个地层序列并未为侵蚀作用所中断，所以沉积作用是连续的。从白垩纪最晚期到早第三纪最早期，什么都不缺。

我们终于敞开了成功的大门。 DSDP 五二四站位二十号岩芯的头三段，现已成为深海岩石钻探岩芯中研究得最为彻底的岩芯之一。

开普盆地的古新世沉积物是在异常高的沉积速率下堆积的，其沉积速率可达每千年三公分。古比奥剖面的界线黏土厚度不到一公分，在开普盆地却要厚好几倍，老第三纪最早期的化石带 Np- 1 的厚度也大于三公尺，这就为我们研究界线上下生物群的变化提供了极好的机会。

佩希佛尔鉴定超微浮游生物组合时，取样间距只有一公分，代表一千年或不到一千年的时间。我在苏黎世的同事佩姬尼尔逊也按此间距进行超微化石鉴定，美国地调所的波尔（Dick Poore）和阿姆斯特丹的斯密特则鉴定了有孔虫。粗略看去，生物灭绝的情况似乎与其他地方无异：白垩纪的超微浮游生物和有孔虫突然发生了大规模的灭绝，没有任何先兆。生物灭绝带之上是一层几乎没有化石的界线黏土，然后悄悄出现了第三纪的生物种。开始只有寥寥数种浮游生物的少数个体。佩希佛尔在黎明前的几小时埋头于显微镜下观察二十号岩芯的上半部，一无所获的原因就在这里。

诉诸化学方法

在详细研究这些新资料之前，我对界线上下化石组合的变化，有一个简单的先入之见。有人告诉我，在鉴定古比奥的界线黏土时，接触面简直像刀切得那么分明。刀子下面是白垩纪化石，上面是第三纪化石。但是，在古比奥和丹麦鱼黏土薄如刀刃的界线，在二十号岩芯中却是厚达数公尺的一个过渡带，这就使我们首次有可能获取 6500 万年前那次事件的详细纪录。佩希佛尔在十九号岩芯底部就发现了白垩纪的超微化石，但该地层实际上并非白垩系。鉴定并无错误，化石就是证明，但是在同一样品中，他也发现了第三纪的种属。如果我们用白垩纪种属的最高位来划定界线，就要像佩希佛尔原先所想的那样，划在十九号岩芯的某部位。然而，一般是根据第三纪化石的初现位置来划定界线的。按照佩希佛尔和佩姬尼尔逊的最终鉴定，这一界线是在二十号岩芯顶部以下 4.05 公尺处。所以在白垩纪—第三纪界面以上，还有四公尺长的一段岩芯，其中白垩纪生物化石与第三纪的化石共存，不过

老种属的百分比向上稳定递减。那么那些化石是否可能就是死里逃生的幸存者后代，证明几个月的黑暗世界不足以引起白垩纪浮游生物的灭绝呢？

与佩希佛尔及其他专家的讨论中，我发现他们对这种过渡带的存在并不感到惊讶，不过觉得开普盆地过渡带的厚度有些超出常规而已。在其他地方，专家也已发现这样的过渡带。但是，这些情况对我仍属新知，又激起了我打破砂锅问到底的好奇心。

佩希佛尔解释道，超微化石太小，底水稍有运动，它们就会跟着搅动起来。使我感到失望的是，他认为那些白垩纪化石可能是生活在第三纪早期之前的生物骨骼，后来才与过渡带沉积物中的第三纪化石混到一起的；这就是人们常说的再沉积作用。

斯克里普斯的柴尔斯坦认为，化石的再搬运是栖息于海底的生物钻孔活动的结果。他研究过大西洋西部某站位的界线以上沉积物，那里的界线已被穴居于沉积物中的蠕虫动物和其他生物搅得乱七八糟。根据柴尔斯坦的观点，早第三纪和晚白垩纪沉积物的混合是不可避免的。

但是，我们几乎没有在五二四站位发现钻孔生物扰动的痕迹，界线之上的细粒沉积物纹层构造保存得完好如初，所以只剩底流活动的这种可能。那么，我们怎样才能区分白垩纪末期事件中猝死的生物，和那些延续到早第三纪的劫后余生者的后代呢？要解决这一疑团，还要求助于化学方法。

如果大洋的化学成分发生变化，海洋生物化石的成分也要跟着发生变化。当你漫步现代海滩采集贝壳时，生活在 1945 年前和 1945 年后的介壳看上去并无二致。但是，原子时代的介壳以锶-90 的高含量为特征，这是 1945 年后核子试爆所引起的一种放射性同位素活动现象。从那时起，所有生物的介壳、骨骼、牙齿，都烙上了这一同位素信号，与原子时代以前的无放射性骨骼成为鲜明的对照。

“灾变前”的浮游生物化石与白垩纪末期以后仍然幸存的生物化石，也有不同的同位素印记。例如，夏克尔顿发现的摄氏五度左右的升温，将使灾变前后生物化石的氧-18/氧-16 比值改变达数千年之久。有两位地球化学家布伦内克 (J.C.B. Brennecke) 和安德森 (Tom Anderson) 早在 1977 年就已发现，晚白垩纪和早第三纪化石的碳同位素有显著的差别。因此，颇有希望用同位素分析区分灾变前后的化石骨骼。

在劫难逃

我们于 1980 年 6 月 1 日圆满结束在南大西洋的调查。船停靠开普敦港，三箱样品立即空运到苏黎世。当时，我有一位勤奋的中国学生何起祥在苏黎世。他打开样品包，把界线附近的几个样品的一部分交给了伯尔尼大学的克莱亨布尔，请他作中子活化分析，然后立即开始样品的处理和分析测试。

一个月后，克莱亨布尔告诉我们，在佩希佛尔确定的界线处，铀异常赫

然在目。而且就在铀浓度从 0.1p.p.b.的背景值突然跃到 3.6p.p.b.的层位上，发现了第一颗第三纪的超微化石。诚如我的船友桃丝 (Lisa Tauxe)、彼德逊 (Nikolai Peterson) 和杜克尔 (Peter Tucker) 的磁性地层学研究所揭示的，这一层位恰恰位于 C- 29- R 内。除了在第三纪最早期沉积物中发现了白垩纪化石之外，各种情况均一如所料。同位素分析将可决定，哪些化石是彗星撞击时被击毙或早已死去的白垩纪浮游生物的骨骸，哪些化石是幸存者后裔的骨骸。根据地质纪录，我们知道，后者虽然也面临灭绝的命运，但毕竟还是挣扎了几千年。

我并未在苏黎世坐等结果，而应中国同行之邀，到西藏作了一次地质旅行，下榻拉萨迎宾馆。有一天，我从布达拉宫观光回来，收到麦肯琪的来信。何起祥已经在我们的实验室里分析了几百个南大西洋的样品，其中既发现了氧同位素异常，也发现了碳同位素异常，而且都是在发现铀异常的界线上。我们曾假设界线黏土形成于第三纪最早期，因为其中含有第三纪的标准化石。同位素分析证实了我们的推论。但是，佩姬尼尔逊在鉴定了界线黏土中的超微化石组合后，发现 90% 的种属都与下伏的白垩纪种群一样。她有系统的统计资料显示，直到在界线以上二公尺处，亦即在相当于引起铀异常的灾变事件发生后五万年，白垩纪化石才消失了踪迹。

化石的同位素化学组成仿佛就是一种指纹，证明过渡带中的“白垩纪”化石确是在灾变后的最早期海洋中又生活了一段时间的残余种群。如果这一解释不谬，那么结论是：三四个月的黑暗世界并未将当时的生物赶尽杀绝。在重见天日之后，白垩纪的许多超微浮游生物又复苏了。但是，却又终究遭到了摧残，幸存者的后代也面临着湮灭的命运。

缓慢灭绝

如果超微浮游生物逃过了黑暗岁月这一劫，有孔虫的命运又如何呢？荷兰乌德勒支 (Utrecht) 大学的斯密特 (Jan Smit)，研究了白垩纪—第三纪界线上下的全球微古生物纪录。虽然他同意我们关于超微浮游生物的灭绝经历了几万年的结论，但是他也发现浮游生物突然灭绝的证据。例如在西班牙的卡拉瓦卡，有孔虫的过渡带只有几公分厚，与超微浮游生物过渡带厚以公尺计恰成对照。白垩纪有孔虫中最强壮的球截虫和红抱球虫消失了，但个体极小的种属，虽然在白垩纪最上部极为罕见，但事件之后却数量激增。不过好景不长，它们虽然渡过了灾难，但依然面临日益逼近的末日。最后也是最小的白垩纪种属，终于在界线以上十公分处，亦即产生铀异常事件的三四千年后永远的消失了，第三纪的古抱球虫取而代之。

从事件发生到恐龙灭绝，中间究竟经历了多长时间呢？芝加哥大学的冯瓦伦 (Leigh Van Valen) 认为，他在蒙大拿州的布格溪组 (Bug Creek) 地层中已经发现最后的恐龙与最早的新生代哺乳动物共生，估计白垩纪—第

三纪过渡时期大约持续了五万年左右；柏克莱的古生物学家克莱门斯（Bill Clemens）持同样的看法。然而，斯密特和他的学生研究了布格溪组的沉积史后，表示了不同的意见。他们发现该组是由较早期的冲积平原沉积物和后期的河道沉积物组成的。所有的恐龙化石都产在冲积平原中，其中包括富含铀的层位。后期的河道切入较老的冲积平原中，而所有的哺乳动物骨骼却都在河道沉积物里。因此这些荷兰科学家认为，在这些哺乳动物入侵蒙大拿州之前，恐龙就已经死绝了。

埃尔本（Heinrich Erben）是波昂大学研究恐龙蛋的专家。他坚持认为，有些恐龙在白垩纪末期的“最后事件”后，还是幸存下来了。在1983年于斯特劳斯堡（Strasbourg）的一次谈话中，他声称在白垩纪最上部地层中发现的恐龙蛋都是正常的。但是，“五个含病态恐龙蛋壳的层位”，经测年证实均属古新世。埃尔本的详细研究结果尚未发表，但毫无疑问，还要作许多工作，我们才能得知这些巨型怪兽究属地球上暗无天日的世界末日牺牲品，还是逃过了这一劫难，只是缓慢的等待最后灭绝命运的可怜虫。

几年以前，学界的意见还不统一。但现在已经明白，虽然白垩纪末期事件引起了大规模的死亡，但并未引起即时的灭绝。几十年来，认为一次全球灾变引起大规模死亡的科学家一直受到责难，要他们证实生物的灭绝是突然而迅速的。待到大多数人接受了全球灾变说之后，却又说生物的灭绝可能并不是那么迅速的。科学家再次面临挑战，必须解释为什么生物的灭绝发生得那么缓慢。

第十一章 死劫海洋

我在 1972 年初识麦肯琪。那时我在苏黎世理工学院执教，藉休假之便到加州拉约拉 (La Jolla) 的斯克里普斯海洋研究所去当客座教授。我开了一门关于瑞士阿尔卑斯山脉地质的课。这个题目对于海洋学的学生来说关系其实不大；一些研究生和青年教师之所以参加，与其说是对我的报告感兴趣，毋宁说是为阿尔卑斯山的风光照片所吸引。麦肯琪就是学生之一，她有乐于助人的性格，无论是帮着挂图、寻找幻灯片或复制手稿，都愿意帮忙。她专攻同位素地球化学。有一天，她来找我。

“你在作什么论文呢？”我问。

“我在作 geosecs (地球大断面)。”

“geosex (地性)？”

“不是 (性的) sex，而是断面 (sections) 的缩写 secs。这是一个大型的研究计划，任务是沿着某些断面研究海水的化学成分。”

“那么，你做些什么工作呢？”

“我正在做一个氮的抽提装置，然后将氮送入质谱仪。”

我无法理解为什么会有人对海水溶解气体的同位素组成感兴趣，其实麦肯琪也不了解。她来找我的目的是想打听一下有无比较“明显可见”的项目，想看到自己的所作所为及其结果。在苏黎世，我们有一个组正在研究波斯湾的现代沉积，正需要一位同位素地球化学家。后来麦肯琪到了苏黎世，同我们一起在波斯湾完成了她的博士论文。但是十年之后，地学断面研究竟为理解陨石撞击作用历经千年才引起生物灭绝这一难题提供那么多帮助，则是我始料不及的。

大难致浮游生物于死地

战争是人为的灾难，自然灾害与战争之间存在着某种相似性。在人类历史上，人口在战争摧毁后的土地上复苏的例子屡见不鲜，生物种属在自然灾害之后迅速复原也是典型的例子。劳普估计，即使一场灾难席卷地球四分之一表面的所有生物，也只会 2% 的种属发生灭绝。因为大多数生物种属都有所谓全球性分布；一个地区的全面灭绝可以消灭当地的居民，却并不能消灭一个种族。灾变一旦过去，新的移民将在疮痍遍地的土地上重新繁殖，并成倍的增长。

然而，极大规模的灾变可能会有一种无法预见的后果。且以假想的全球核战争为例：可能会有许多人逃过这场劫难，毛利人或巴塔哥尼亚的印第安人生活在与世隔绝的世界角落，可能会免于灾难，但是，他们及后裔却无法在这个由于环境的破坏而无法生存的世界繁衍。在国际科学联盟委员会进行的一项研究中，一个专家委员会描绘了一幅所谓“核子冬天”的可怕图景。

他们悲观的得出结论：核战之后，人类这个生物种将遭到毁灭性的撞击而趋于灭绝。那么，白垩纪末期撞击事件能否对环境产生类似的破坏，从而使熬过了黑暗岁月的幸存者，在劫难之后几万年重趋灭绝呢？

幸好我们这些力图求解的人还不是要求“明显可见”答案的学生。麦肯琪的同学克鲁普尼克（Peter Kropnick）一直坚持地学断面的研究，在博士论文中作了许多有贡献的研究。地学断面的研究结果与麦肯琪后来搜集湖泊沉积物的同位素资料最终殊途同归，都可以帮助我们认识 6500 万年以前发生的事件。这一事件严重破坏了当时的海洋环境，致使浮游生物无法生存。

海洋的循环机制

我们一般都认为海洋是一个具有特定的化学成分、一定的平均盐度和平均年温度的均匀水体。但实际上这些参数是因地而异的，也正是这种差异引起了海洋的循环。

海洋绝非死水一潭：风和潮汐产生了表层洋流，这是古代水手航海时必不可少的知识；中层以及底层的海水也在不停的流动。德国的潜艇舰长对此就了若指掌；在二次大战中，他们曾屡次成功利用这种水流躲避敌方的侦察。英国海军司令部在直布罗陀海峡设有一个监听站，负责监视德国潜艇的活动。但德国人在出入地中海时就关掉马达，靠水流冲进冲出。进地中海时，潜艇下潜较浅，藉大西洋流向地中海的表层洋流流进；要出去时，潜艇则往深潜、随着底流而被冲出，英国监察站一筹莫展。

地中海的水之所以呈底流的形式流入大西洋，是因为它的比重比大西洋流的海水高一些。而地中海水之所以变重，是因为蒸发作用使盐度增高，和来自欧洲的冷风使温度降低的结果。研究人员在大西洋、太平洋和印度洋的深部也观察到了类似于地中海底流的深水流。那么这些大洋中的高盐度、低温度并因此而密度较高的水流是从哪里来的呢？

大洋底水有两个主要来源：其一来自南极威德海，其二来自大西洋的挪威海。海水结冰使两极冷水的盐度高于正常海水；密度的增加形成了足够的水压，驱动大洋的底水循环。两极的海域是吸取氧气的源地，就像海洋的肺一样，而底流的循环可以比作人体的血液循环。氧气随着这些水流循环到大洋各处，又为活体生物的新陈代谢和死亡生物的腐败作用消耗殆尽。

大气层是氧的根本来源，因此表层水一般而言富含氧。由于在较冷的水中氧气的溶解度增加，故氧气在极区水中尤为富集。这种富氧的海水下沉到深部，就会使洋底发生氧化。大洋黏土在许多地方都氧化成铁锈色，就是这个缘故，因为铁的氧化状态是一种红色的化合物。

在表层水和深水之间，是大洋中层水。在许多地区，大洋中层水是比较停滞的，因而贫氧。形成于这一深度的沉积物，由于细粒有机质在这一最低

含氧带未能充分氧化，故一般呈灰色甚至黑色。参与地学大断面研究的科学家，像克鲁普尼克就在拉蒙特的布罗克（Wallace Broecker）和斯克里普斯的克雷格（Harmon Craig）指导下，用数字表示了氧的分布特征。

二氧化碳是生命过程中不可或缺的一种化合物，是所有生物的基本“食物”。植物靠二氧化碳和水进行光合作用，形成组成细胞组织所必需的醣类。我们直接或间接的都依靠蔬菜和谷类生存，因为除了直接摄取蔬谷，食草动物又间接的把植物变成肉类供人们享用。人类死后，尸体腐烂，又放出二氧化碳和水，最后通过各种途径回到海洋和大气层。

尽管二氧化碳如此重要，但在数量上却是大气层中无足轻重的一个成分，仅占空气的 0.03%，与占 20% 的氧气相比，真是微不足道。虽然二氧化碳比大气层中的其他气体更易溶解，但在表层洋水中，溶解二氧化碳的总量仍然小于每公升一公克。大气层中的二氧化碳与海水中的二氧化碳，两者数量密切相关。空气中的二氧化碳愈多，溶解在海水中的二氧化碳也就愈多，反之亦然。海水中溶解气体的含量也受到海洋光合浮游生物生产力的调节。肥力较高的海洋，光合浮游生物蓬勃生长，要消耗大量二氧化碳，故其表层海水贫于溶解气体。反之，光合浮游生物不易在贫瘠的海洋繁殖，所以二氧化碳的含量反而较高。

二氧化碳的贫化是海水的表层现象。因为进行光合作用的浮游生物只能生活在阳光可及，可以进行光合作用的极浅水中，一般不会超过五十公尺。较深的海水不仅没有二氧化碳的贫化，相反还有富集的现象。因为生物遗体在落下过程中发生腐烂分解会放出二氧化碳，而二氧化碳在寒冷的底水中是易溶的。

大洋水和大气层之间的二氧化碳交换同氧的交换一样，是一种循环。深海水在海岸带和其他地区上升时，溶解的二氧化碳会重新逸出，增加大气层中二氧化碳的含量。尔后，大气层中的二氧化碳气体又会溶解到表层水中，并为光合浮游生物所消耗，成为有机体的一部分，最后随着遗骸沉到海底。这种二氧化碳的再循环无时无刻不在进行。布罗克以放射性碳-14 作为研究二氧化碳循环的示踪剂（tracer），发现每年大约有 5000 亿吨大气层二氧化碳进入大洋表层水并为光合浮游生物所摄取，死后落到深处再重新释放，大约二千年后重返表层。

这种周期长约二千年的循环处于一种动力平衡状态。在日光能够穿透的极薄表层，浮游生物蓬勃生长，故海水常常贫二氧化碳。而大洋的总体则由于洋流循环而发生均匀化，使来自生物腐烂分解的二氧化碳相对富集。尤其是在含氧量最低的滞流中层水中，二氧化碳更有富集的趋势；地学大断面研究公布的数字，也证明了二氧化碳这种分布形式。

溶解的二氧化碳就是碳酸。碳酸虽是一种弱酸，但毕竟是一种酸，这就是苏打水对牙齿有害的原因。苏打水中冒出的气泡就是重返大气圈的二氧化碳，正是二氧化碳腐蚀了牙齿的珐琅质。在海洋中，富含二氧化碳的海水也

是死亡生物碳酸钙质介壳和骨骼的腐蚀剂。因此要在海底沉积钙质软泥，必须有一个条件，即死亡超微海洋浮游生物和有孔虫骨骼在方解石补偿深度以上的堆积速度，超过底水中的弱碳酸对它们的溶解速度。只有在溶解速度大于堆积速度的地方，才能形成像白垩纪—第三纪界线层那样的黏土沉积物。

在古比奥和其他许多地方，晚白垩纪和早第三纪沉积物都是白垩或石灰岩，是灾变发生前后生意盎然的有孔虫和超微浮游生物的细小骨骼堆积物。二者之间，位于标志界线事件的铍异常层之上的，是一薄层黏土。在其他地方，虽然界线沉积物也是石灰岩，但其中所含的黏土却要比上下层位多得多。当沃斯利于 1970 年研究界线黏土时，曾注意到界线黏土普遍贫碳酸钙的现象。他指出，当时的洋水应有异于寻常的溶蚀性。换言之，白垩纪末期海水的二氧化碳含量非常高。这种异常海水溶掉了浮游生物的骨骸，留下的不溶残余就堆积成界线黏土。

从另一角度分析，也可以简单的把界线黏土看作介壳物质供应不足的结果。再推论一步，我们可以说，死亡浮游生物的骨骼之所以供应不足，乃是因为活着的生物太少。生物贫乏的海洋，与溶蚀性很强的海洋一样，其沉积物都是不含钙质的黏土。既然这两种说法都可以自圆其说，我们怎样才能判断谁是谁非呢？

地学断面计划和我们自己对湖泊沉积物的研究，提供了一种启示：碳同位素可以用作古浮游生物繁殖力的监测器。

抽丝剥茧

用质谱仪分析碳酸钙的同位素组成，要先溶解样品，取得二氧化碳气体，然后将这种气体输入仪器。尤里在研究古温计时，测量了样品的同位素比值，同时也测得了碳同位素值。当时，他并不能了解这一数据，但肯定碳同位素组成不大会受到有机体分泌骨骸的环境温度影响。他发现了各种不同的碳同位素值，但无法找出这些数据与其他变量的关系，无论是化石标本抑或现代生物都是如此。这使尤里感到茫然。

科学家累积大洋沉积物碳同位素资料已有几十年的历史，但是由于无法理解这些资料，所以均未发表。1973 年，在基尔召开的国际浮游生物学会议，专就这一问题展开了讨论，但与与会人士都束手无策。氧同位素分析能提供古海洋温度的有用资料，而碳同位素分析却除了提供数字外，几乎毫无意义。

在地学断面计划取得的大量资料中，科学家终于看到了一种趋势。即从一个测点到另一个测点，碳同位素组成都呈类似的有系统变化：表层水的碳—13/碳—12 比值，要比中层水和底层水高，或者说含有较多碳—13 原子。趋势一经确定，沉积物碳同位素资料的解释就不那么困难了。钙质软泥是由生物骨骸组成的，而生物骨骸是靠从海水中摄取钙和二氧化碳生长的，因此碳酸钙质介壳同时含有来自二氧化碳的碳—13 和碳—12 原子。根据化

学原理，这两种同位素的相对数量，取决于它们在原始物质中的数量。溶解的碳—13 愈多，吸收的碳—13 也愈多。因此简言之，介壳碳酸盐的碳同位素组成，反映生物当时所处海水二氧化碳的碳同位素组成；化石或由化石变成的钙质沉积物，当然也是如此。

生物的活软组织和细胞的情况则不然。不管海水的同位素组成如何，它们从海水中摄取的碳—13 比例要少得多。因为生物软体与介壳不同，总是优先结合碳—12。不言而喻，生物的繁殖对海水的同位素组成必当有极大的影响。

光合浮游生物和浮游动物只能生活于海水的表层。由于生物的细胞组织优先吸收碳—12，故只要是浮游生物繁盛的地方，表层海水中就会出现碳—13 相对富集的现象。底栖生物当然也排斥碳—13，但其数量太少，不能造成多大的影响，所以底水中碳—13 所占的比例与平均洋水并无多大区别。

死劫效应

如果浮游生物活体的功能，是使表层水中的二氧化碳贫化和碳—13 原子相对富集，那么，在没有浮游生物活体的海洋中将会出现怎样的情况呢？1981 年，布罗克到苏黎世理工学院地质研究所作海洋碳同位素的报告，我便以这个问题请教他。

由于布罗克的名声在外及共同朋友的介绍，我对他闻名已久。他是一位专攻海洋地球化学的著名专家，我的年轻同事麦肯琪算是他的同行。当她申请美国地质学会的会员资格时，我建议布罗克作为三名推荐人之一。专业学会的会员资格就像某种联盟的成员资格，北美地球科学方面的高级研究人员，我以为都应该是地质学会的会员。但是，当我收到该学会总部的一封简函时，不禁大吃一惊。信中说，布罗克不能作为麦肯琪的推荐人，因为他本人已不是地质学会的会员。这位孜孜于事业的大忙人因为忘记按时缴纳会费而被除名。

布罗克的研究工作以海洋二氧化碳循环的研究最为著名。新的思想不断从他的脑海中跃出，就像气体从苏打水中冒出来一样。在拉蒙特担任了几年的管理工作之后，趁休长假之机来到海德堡。我在瑞士污染防治中心工作的朋友闻讯后，立即给我打了一个电话，问我是否有意请他到苏黎世作几个报告。我确实十分愿意邀他来访，虽然他已不再是我们“工会”的会员。

80 年代初期，化学家对至今未融化的古代冰层中呈气泡状空气的化学成分进行了分析，这是当时最引人入胜的科学发现之一。他们在大冰期时代捕集在冰中的空气“化石”中，发现二氧化碳的浓度很低。布罗克闻风而动，马上抓住了这一发现，对大冰期的大气层贫二氧化碳的原因想出了解释。

在冰期，富含营养盐的底水上泛作用增强。表层水的肥力高于现代，浮游生物的繁殖力因此大大增加。浮游生物愈多，他们消耗的二氧化碳也愈

多，空气中二氧化碳贫化的现象也就愈严重。海洋沉积物提供的证据显示，冰期的海水肥力确实高于现代。布罗克告诉我们，可以用碳同位素检验当时的生物生产力。

我们从地学断面的资料中得知，由于光合浮游生物优先摄取碳—12 这种同位素，表层水中碳—12 含量相对较少。如果冰期的浮游生物比现代多得多，那么表层水中碳—12 贫化和碳—13 富集和现象也将比现代更甚。化石骨骼正确无误地纪录了当时海水的碳同位素比值，冰期的同位素值则可以从当时的浮游生物化石中获得。由于底栖生物数量不多，不足以影响深水的碳同位素比，因此冰期底栖化石的碳—13/碳—12 比与表层生物碳—13/碳—12 比的差值，要比现代或间冰期的种属之间的差值大得多。根据当时所发表为数不多的碳同位素资料，布罗克的确找到了冰期碳同位素的证据，证明冰期浮游生物繁殖力相对较高。

布罗克结束报告后，我向他提出了思考已久的问题。

“啊，你是在问我死劫效应 (Strangelove effect)”。他说道：“一个没有浮游生物的海洋将不会有碳同位素梯度，从顶到底，同位素的数值将近乎一致。那样的海洋，就叫做死劫海洋！”

Strangelove (死劫) 是一部电影里的主角。我没有看过那部电影，但我知道它的梗概。死劫博士异想天开，想用核灾难摧毁地球上所有的生命，只留下包括他自己在内的所谓菁英，然后再由他们来重新繁殖人口。布罗克不无调侃的采用了这个影像鲜活的名词作比喻。在我随后的著作中，我也从不放弃运用这名词的机会。

了无生机诚然，布罗克的工作是一种理论性的归纳，因为我们不能杀灭所有的海洋生物来验证海水碳同位素组成上下一致的结论。然而湖泊是不大的水体，自然界也已为我们作了许多浮游生物生产力的实验。麦肯琪在研究瑞士湖泊中的白垩成因时，不经意的发现了死劫效应的证据。

瑞士西北部的格里芬湖 (Greifensee) 是一个所谓的优养 (eutrophic) 湖。上世纪的工农业生产不断把过量的磷酸盐和硝酸盐输入湖泊，大大增加了营养盐的正常输入，生物生产力因此剧增。藻类生长的颠峰期是在七八月。他们对碳—13 原子的选择性排斥作用，导致碳同位素在夏季形成最大的垂直梯度。表层水的碳—13 原子要比底水高 4.5%。到秋季，生物生产力降低，九月末的表层水样品中的碳—13 原子只比底水高 3%。待到时序入隆冬，藻类也进入休眠期。十二月中旬，水样的同位素组成呈现上下一致。到了春天，生长季节开始，五月初发生第一期藻类的勃发，再度形成碳—13 梯度，增长的趋势一直延续到夏季。格里芬湖就这样年复一年的重复循环。

麦肯琪通过样品碳同位素的分析，揭示了碳酸盐的季节性变化。海洋中的溶解碳酸盐储量要比湖泊大得多，季节性的短期肥力循环对其同位素梯度的影响微乎其微。然而，生产力长周期的实质性增减却会带来显著的影响。

理论上，生产力等于零的死劫海可以与格里芬湖冬季休眠期的情况相

比。如果没有浮游生物控制碳同位素的分馏作用，那么，由于底水的上升和表层水的下降，海洋化学成分将渐趋均匀。均匀化的速率，一般来说应与二氧化碳的循环速率相同。从顶到底，再从底到顶大约需要两千年。设若海洋浮游生物都惨遭灭绝，则在一片死寂的死劫海中，碳—13 值应在两千年左右的时间里变得上下一律，就像格里芬湖冬季的情形一样。

那么，在白垩纪灾变之后，是否真有一个死劫海洋呢？

死劫情景

多年来我一直犹豫不决要如何解释化石骨壳的碳同位素分析资料，现在终于明白，布罗克是正确的。其实，早在 1978 年就有机会弄清这一问题。那年夏克尔顿在苏黎世所作的报告中，已经提到了他搜集的新生代最早期有孔虫的碳同位素资料。出乎他的意料之外，那些样品中的浮游生物骨壳并不像正常海洋那样富含碳—13。夏克尔顿颇感不解；他对自己提出的四五种解释也都不满意。

当时，我也不甚了解他那碳同位素资料涵义所在，如今布罗克的报告和麦肯琪在格里芬湖的工作使我的思想豁然开朗。夏克尔顿资料的意义愈来愈清楚：生活在白垩纪末期表层水里浮游生物的介壳中之所以没有碳—13 富集，是因为海洋中的光合浮游生物太少了，不足以引起碳同位素的分馏作用。这不就是一个典型的死劫海吗？

在科学研究中，长期不能理解一种资料意义的现象是司空见惯的。其实，指示白垩纪末期碳同位素异常的资料已经瞪着我们多年了。早在 1977 年，伊利诺州立大学的地球化学家安德森和他的研究生布伦内克已经发现，与白垩纪最晚期的资料相比，第三纪最早期的海相沉积物都有贫碳—13 原子的现象。

界线上下碳—13 的变化幅度将近背景值的十倍。在界线上下几千年的短时间内，海洋沉积物的碳同位素组成就发生如此巨大的变化是史无前例的。而且碳同位素异常只不过是一种波动，而不是一种偏移。因为几千年后它又回复到白垩纪晚期的数值，以后就保持稳定。

波动意味着什么呢？

与夏克尔顿一样，安德森和布伦内克对他们的发现也颇为困惑，并未重视其中的意义。事隔五年之后，我们对开普盆地五二四站位最后取得的二十号岩芯样品，进行了彻底的分析，才终于摆脱了这一令人困惑的局面。安德森和布伦内克分析的是全岩样。其中虽然也含一些底栖生物，但以浮游生物居多。他们注意到了碳—13 的总体降低，但是由于未将表层和底栖样品分开，所以无法了解是否存在从顶到底的梯度变化；我们对南大西洋全岩样品的分析结果证实了他们的发现。一越过界线，界线黏土的碳—13 值就小于晚白垩纪的数值。但是我们要更精确的了解海洋环境的变化，于是设法剔除了

底栖有孔虫，分析了全部由表层超微浮游生物骨壳组成的样品。分析结果与全岩样的异常毫无二致，说明在表层水中，这种同位素比的变化确凿无疑。但我们对此并不满足，于是请佛罗里达的赖特从我们的样品中挑出为量极少的底栖有孔虫标本，以便进行同位素测定。结果是：白垩纪—第三纪界线上下的底栖有孔虫，未见任何碳同位素异常。证明碳—13的异常性降低只是发生在浮游生物生存的表层水中。或者更确切地说，表层水中已无生物生长。

事件之后，残留下来的寥寥浮游生物在水面上重新繁殖，又开始了优先摄取碳—12原子的过程。于是，过剩的碳—13不断聚集，又重新建起了从顶到底的变化梯度。

总而言之，碳同位素资料已成为海洋肥力的卓越监测器。

像铍异常一样，世界各地的界线沉积物中均已发现碳同位素异常。这说明在白垩纪末期事件之后，确有一起全球性的生物危机，使海洋近乎死寂。浮游生物对碳同位素的正常分馏作用停止了。在事件发生后的二千年中，各种深度的水体都达到了均匀化，造成了大洋从顶到底碳同位素的一致性。

仔细研究五二四站位的资料后，我们发现浮游生物骨骸的碳—13值甚至比当时的底栖有孔虫还要低一些。我们把这种碳—13原子的相对亏损现象，归因于白垩纪末期灾变之后的“死寂大陆”。

陆地植物与海洋浮游生物一样，都优先摄取大气层中的碳—12来建立其细胞组织。这些植物死亡腐烂分解后，有机质发生变化，释放出二氧化碳。这些二氧化碳溶解在地下水中，最终通过河流归入海洋。死劫大陆到处都是腐解的陆生植物，不断向海洋供应过量的生物碳屑和溶解性二氧化碳。这两种物质都贫碳—13，从而使大洋表层水中的碳—13更趋贫化。单靠浮游生物的死亡是不能解释这种贫化现象的。

虽然大洋的生物群减少到了足以阻止碳同位素分馏作用的程度，但白垩纪末期灾变之后的第三纪最早期海洋并不是一个绝对的“死劫海洋”。浮游生物的再生产并未完全停止，所以在某些深海钻探站位的界线黏土还是钙质软泥，不过是黏土质的钙质软泥。碳同位素异常的波动同样存在，但并不意味着海洋生物的灭绝。显然，在这些站位有足够的有孔虫和超微浮游生物生产，且未完全溶解，这才形成了海底某些部位的浅白色软泥。

经过多年的研究，我们终于发现了各种界线沉积物异乎寻常的分布格局。多少含一些黏土的碳酸盐软泥，沉积于2000至3000公尺的中等深度，而不含碳酸盐的黏土则沉积于方解石补偿深度以下的深海平原。但是，滨岸水域中的沉积作用却是一种例外。

在大陆边缘，浮游生物的生产力通常都相当高。海水不具溶蚀性的地方，正常的沉积物应当就是碳酸盐软泥。但第三纪最早期的陆棚沉积物却并非软泥而是黏土；像古比奥的界线黏土和史蒂文克林特的鱼黏土等，均属此类。只能用一种假设解释何以在这些黏土中缺乏浮游生物骨壳，即当时近岸海区的水体溶蚀能力不寻常的强。这可能是由于从当时死劫陆地搬来的有机

碎屑发生氧化作用，产生了过量的碳酸，才增强了近岸海水的溶蚀能力。

如果是异常多的有机碳发生氧化产生二氧化碳，势必消耗异常大量的氧。而植物的光合作用其实是大气层中氧的惟一来源。如果大部分陆地和海洋中的光合作用大减，那就不难设想，当时的大气层中并无大量的氧。一方面供应短缺，另一方面消耗激增，势必导致近岸水体严重缺氧的情况。那么沉积物中有无这方面的证据呢？

是的，铁证如山。

1982年，我造访了位于丹麦名闻遐迩的史蒂文克林特村，在那里，界线黏土的位置一目了然。白垩纪的白垩和第三纪的石灰岩都是白色的，但界线黏土却是黑色的。在黏土中，薄如纸片的纹理清晰可辨，而颜色和纹理都是说明沉积当时底水缺氧的极好标志。完好的层理之所以能保存，是因为没有或几乎没有生物扰动它们。而没有底栖动物的原因是因为水中缺氧，无法呼吸。水中缺氧的原因可以解释为从死沉沉的陆地上搬到海洋中的有机质发生腐解，耗尽了海水中的氧气。残余的有机质和森林大火留下的未及氧化的灰屑，把沉积物染成了黑色。

从满目疮痍的陆地输入碳质的过程不会持续很久。几千年后，这些生物碎屑不是被冲走，就是被新的沉积物埋藏。从劫难中复苏的植物将重新形成森林，覆盖茫茫大地，同时将大量碳质保存在土壤中，并使侵蚀作用减到最弱。研究界线过渡带所得的证据证明，近岸水体的缺氧情形并未超过几千年。瓦尔特·阿弗雷兹曾描述过，古比奥界线黏土上下分成两种颜色。下半部厚约半公分，呈灰色，上半部则呈红色。因为界线黏土沉积的全部时间只不过5000年，在缺氧条件下形成的灰色沉积物的沉积时间，不会超过2500年。后一段时间的海水重又富氧，并因铁质染色物质的氧化而使黏土呈红色。

但是，在当时的开阔大洋中，底水缺氧的情况却并不像近岸水体那么严重。开普盆地界线黏土的颜色确实比上下的沉积物暗。但是由于含有铁质染色物质，黏土仍然微呈红色，说明水中至少含有一定量的氧。在太平洋的深海平原，界线上下并无颜色变化，不过在许多地方的界线沉积物中都发现了黄铁矿和海绿石这两种典型的缺氧矿物，甚至在中太平洋的红色界线黏土中也不例外。除此之外，还发现了砷、锑硫化物的异常，这些都是在缺氧条件下才能形成的矿物。以上这些现象足以说明，灾难事件发生后，海水的化学破坏已经达到很深的海域。

污染的关键性

如果我们在湖泊中观察到化学破坏的证据，我们不妨把它解释为湖泊生物遇上了一个坏年头。但是，在覆盖全球四分之三的面积、水深平均达到四公里的广袤海洋中，地质纪录的解释就不那么简单了。海洋的广度和深度将

掩盖短暂的化学事件，把它们湮没在更为壮观而且长达几千年的循环中。如果 6500 万年以前灾难的祸首不过是长达数月的黑暗，那么我们根本就不可能发现它，或者只能见到环境迅速恢复的痕迹。当太阳从尘云中重现时，所有幸存的浮游生物都将重新恢复其巨大的再繁殖速率。超微浮游生物至少每天分裂一次，每一次分裂数量就增加一倍。春夏两季是浮游生物蓬勃生长的时期，每公升水中会生产一千万个个体，相当于每平方公尺的水面满布着 3000 亿个进行光合作用的生物；每一次繁盛生长可以覆盖几千平方公里的水面。

从沉积纪录中发现死劫海洋这一事实说明：快速的生物死亡和缓慢的繁殖过程持续了相当长的时间，所以黑暗岁月无法解释这些现象。而恢复的缓慢和灭绝速度之高也不能用大规模生物死亡来解释。事实上，混乱的海洋应有很强的自治能力，理应很快复原，以极少数幸存者为代表的种属也应获救。浮游生物的繁盛一般都受营养盐数量的控制。在无生物生殖的黑暗岁月中，营养盐都得到了保存。在几千年的时间里，由于陆地森林遭到摧毁而带入海洋的有机质，也会使表层水发生肥料过剩的现象，磷酸盐和硝酸盐将发生富集。食物丰富，光线充足，幸存的浮游生物本应蓬蓬勃勃的迅速恢复繁盛。

然而，尽管二十号岩芯和其他界线样品显示，白垩纪末期事件中免于劫难的种属并非绝无仅有，但通常在第三纪早期海洋中蓬勃生长的却只有两个属的少数种，即 *Thora-cosphaera* 和 *Braarudosphaera*。其他浮游生物都在逐渐减少，而且几千年内就销声匿迹了。

研究了劫后幸存的超微浮游生物之后，发现它们是一些甚至在异常的温度、盐度和化学条件下都能蓬勃发展的种属。在这些种属蓬勃发展的同时，其他生物却渐趋灭绝，说明环境条件十分严峻。浮游生物的大规模死亡造成死劫海，而几乎所有的生物都未能复苏，说明第三纪早期的海洋受了污染，而不利于浮游生物的生长和繁殖。

这种情况一旦发生，自然界的污染将像当今森林的毁灭一样，使生物死亡。虽然它并不是这场灾难的根源。

第十二章 酸雨滂沱

中国有句谚语：城门失火，殃及池鱼。我年方十二岁的幼子彼得实实在在的体会了这句话的意义。

彼得是一位热心而饶有经验的钓鱼人。尤其是在 1979 年，我应邀携全家到中国大陆旅行讲学，他不必上学，更有足够的时间精研捕鱼之道。回到瑞士时已是秋天，彼得抓到了两条大鲈鱼，这是一个不小的收获。捕鱼人很少伤害其猎获物，而宁愿把它们作为战利品，彼得也不例外。有钓鱼癖的人都喜欢把自己捕到的马林鱼作成标本挂在起居室里作为茶余饭后的谈资。彼得另有高见，他要设法将这两条鲈鱼养起来，于是我们不得不牺牲后院的百合花池充作鱼池。

冬天来了，彼得又恳求哥哥马丁让出珍养水生植物的水族箱供他作鱼池，于是这两条鲈鱼都有了一个舒适的避难所。彼得用两位同窗好友的名字命名鲈鱼，温驯的一尾叫拉尔夫，好斗的一尾叫尼基。

喂鱼是一大难题。拉尔夫和尼基食肉，胃口奇佳，每天要吞下六条到八条蚯蚓。彼得不得不用冰镐刨地，为他的宝贝寻找食物。

春回大地，鲈鱼重返旧居。迁居的那一天，彼得往鱼池中倒了几桶热水，以缓和温度突变的影响。临睡以前还下达了最后一分钟的指示，要我在午夜时再加一点热水，以免拉尔夫和尼基冻死。

水池要定期清理和擦洗。像鱒鱼一样，鲈鱼要有清洁而富氧的水体才能健康成长。彼得惟恐用漂白粉处理过的自来水不利于这两个宝贝，特地设计制作了一个构思精巧的集水系统，把房檐上流下的雨水引到一个塑胶容器中，后者又与一浇花的水管相连，将水引向百合花池。

那一年的春天，雨水频仍，断断续续的下了两周。一天，彼得骄傲地宣布：他的工程设计成功了，水池中的自来水已完全为雨水所取代。他拉着我去参观他的杰作，设计的确精巧。在水晶般透明的水中，拉尔夫和尼基游来游去，显得生气勃勃。

但是，好景不长。在池水全部更换后的次日，当彼得放学回家时，拉尔夫和尼基竟都鱼肚朝天，呜呼哀哉了。

究竟是怎么回事呢？难道是邻居的猫或临街的淘气孩子下的毒手？不会的。在我们的花园里既没有看到猫，也没有看到孩子。

“杀手是受污染的水。”我年轻的邻居约纳斯说。他也是一位养鱼爱好者。“但是池水并无污染哪！还有什么水能比雨水更干净呢？一池清水，杂物全无。”

的确，水是清澈透明的，但鱼却确实无疑的一命呜呼了。

为了找出鱼的死因，彼得绞尽脑汁，采取了一切措施。他取了水样，正在大学里攻读生物学的姐姐伊丽莎白帮他分析。伊丽莎白并不会作水样分析，但她从教科书中查阅了鲈鱼的有关资料。书上说，鲈鱼不能在 pH 等于

或小于 5 的水中生活。

pH 是表示氢离子浓度的一个参数，或称溶液的酸度。中性溶液的 pH 值为 7。pH 等于 6 的溶液，其氢离子浓度要增加 10 倍，因而是酸性的。而 pH 等于 5 的溶液，其氢离子浓度为中性溶液的 100 倍，因此是极酸性的。那么，是不是下了酸雨呢？

“哦，对了！”我的妻子克莉斯蒂说。“一个月前，市议会还在争论这个问题呢！在我们住宅下方，技术大学的锅炉房以含硫的石油为燃料。它的烟囱太低，许多污染物质散布到毗邻地区。严冬时节，所有的油炉都在运行，情况就更糟了。”

我在《自然》杂志上读过有关酸雨的文章。斯堪的纳维亚半岛诸国的政府抱怨说，不列颠群岛工业区排放的污染物造成了酸雨。斯堪的纳维亚北部湖水的 pH 值已小于 5，鱼类因此绝迹，这对养鱼人来说真是一个悲剧。阿迪隆达克 (Adirondacks) 的湖泊也面临同样的问题：美国中西部的高烟囱排放的污染物吹送到中东部，直入加拿大境内。由于水体的酸度过大，阿迪隆达克百余个湖泊中，鱼已绝迹。而加拿大诺法斯科细亚 (Nova Scotia) 省的许多河流已经酸化到鳟鱼无法产卵的程度。

我决定打电话向我的朋友斯陶姆 (Werner Stumm) 请教。斯陶姆是瑞士联邦水质保护局的局长，他应当知道我们的院子里是否降了酸雨。

“啊哈，你算找对人了。”斯陶姆回答说。“我去年刚发表了一篇关于酸雨的文章，我会寄一份油印本给你。”我浏览了他的文章，终于找到了答案。我又请他告诉我苏黎世雨水的 pH 值。

斯陶姆解释说，酸雨遍及瑞士城乡，不单是苏黎世受害。在土桑、日内瓦和圣加仑州，皆有酸雨。当时瑞士雨水的典型 pH 值为 4.3。酸的成分中，50% 为硫酸，30% 为盐酸，20% 为硝酸。幸运的是，遍布瑞士的石灰岩层很快中和了过量的酸。但是在土桑州花岗岩区的湖泊中，由于酸雨污染作用，其 pH 值已降到 4.5 以下。

那就是彼得想要了解的事。他的工程技术加速了酸化过程，在雨天之中完成了土桑湖二十年间才完成的业绩。我们的自来水来自拉尔夫和尼基的故居苏黎世湖，湖水的 pH 值在 8 左右，属于碱性较高的水质。彼得将鲈鱼养在酸雨的贮水池中，虽然出于好意，却是亲手杀死了他的宠物。

化学污染充任杀手？

不仅是鱼类，几乎所有的水生生物都会受到过量的酸所影响。软体动物在酸度小于 6 的水中很难存活。许多昆虫、乃至浮游生物都不能忍受小于 5 的 pH 值。如果 pH 值降至 4 以下，就几乎无生物幸存了。

酸雨也是中欧的森林发生灾难性死亡的原因。pH 值小于 4 的酸雨落在机树和云杉的叶子上，会吸收其中的有机酸和矿物酸；落到地上时，水的酸度

就更大了。这样高的酸度会溶掉土壤中的钾、钙和其他矿物盐，夺走树木生长所必需的营养。我从书上读到，这种情况会使树木生病和死亡。然而，我的女儿伊丽莎白并不同意这一观点。她认为，森林的枯萎不能完全归因于酸雨。那时，她正在撰写一篇有关这一问题的论文，而且已经读了很多书。按照她和许多专家的意见，毁灭森林的杀手是氮的氧化物（ NO_x ）。

地球的大气层主要由氮和氧组成。在正常的大气层温度下，这些气体在化学上是惰性的，亦即它们不会与其他物质反应形成新的化合物。然而，在极高的温度下，氮将与 x 个氧原子结合成氮的氧化物 NO_x 。它可以是 NO 、 NO_2 或其他氮氧化物。在大气层中，温度高至足以形成 NO_x 的情况是极为罕见的，只有在闪电的一刹那间才能出现。因此自然过程产生的 NO_x 一般而言微不足道，但是工业生产和汽车引擎内部燃烧却能造成持续的极高温度。伊丽莎白告诉我，1980 年产生了三千万吨 NO_x ，而其中的一半是由机动车辆造成的。

NO_x 最终将发生氧化而形成硝酸，硝酸是酸雨的重要成分之一。但在 NO_x 转变为硝酸之前，这些气体也会严重的直接破坏森林。例如，氮的氧化物 NO 就是一种有效的落叶剂，美国人在越战中曾广泛利用这种气体。现在，我们正在不自觉的用快速行驶的汽车毁灭森林，而毫无内疚之感。

所以， NO_x 污染雨水，酸雨毁灭森林，都是工业革命的副产品、人类智慧的结晶。那么，在 6500 万年前，当恐龙还是地球上最发达的动物时，是否也有酸雨和氮的氧化物呢？我是在彼得的鲈鱼灾难数月之后，于 1981 年的雪鸟城会议上得到这一问题的答案的。当然，化学污染的思想那时早已根植在我脑海里了。

臭氧层遭到破坏

一个兆吨级陨石下落会造成什么样的物理结果，路易斯·阿弗雷兹以物理学家的身份，迅速作了判断。撞击喷发的尘埃物质升到同温层是一种物理现象，遮天蔽日的黑暗也是。阿弗雷兹用地球的“暗无天日”作为生物大规模死亡的原因，乍看合理，但经不起推敲。时间就是必须考虑的问题。如果从灾难发生到最后一个受到毁灭性打击的种属死去，需要几万年的时间，那么生物大规模灭绝就不可能是由暂时的黑暗或其他短期效应引起的，陨星撞击作用必定引起了某种持续时间较长的后果。与阿弗雷兹相反，我对地球化学更为熟悉，而且已注意到彗星撞击作用的化学后果，而且在渥太华会议上提出过氰化物污染的设想。当时以化学污染作为生物大规模灭绝的原因这一思想，颇为引人注目。除了氰化物外，在白垩纪—第三纪界线黏土中发现的几种重金属，毒性也很大。例如，铯和钡只要到十亿分之几的浓度就已有害，而砷、硒、锑等也是有毒元素。鉴于这些元素在界线黏土中的浓度极高，已

足以排除来自陆源的任何可能性。加拿大赫伯格研究所的费尔德曼 (Paul Feld-man) 指出, 我们已能 “ 得出某种共识。界线处确有彗星撞击的证据; 它把挥发性的毒物带进了地球环境。 ”

然而, 在任何领域中, 科学家解释自然现象的尝试都难以一矢中的。“ 毒化说 ” 的问题在于, 地外物质带来的毒物毕竟不足以引起全球性的污染。计算结果显示, 一个兆吨的彗星带入海洋的氰化物、一氧化碳或有毒重金属的浓度, 都达不到致命的剂量。在我前一年发表的论文中, 设想有毒物质仅限于表层水, 就是为了解释这一问题。既然污染是 “ 局部 ” 现象, 有毒物质的浓度就只能引起表层水流中海洋浮游生物的选择性灭绝。这一理论较好的解释了底栖生物幸免于难的事实, 因为落到深海底的地外有毒物质数量甚微。

在雪鸟城会议之前, 我一直以为我的毒化物污染说找到了正确的答案, 颇为沾沾自喜。抵达雪鸟城的那天早晨, 我遇见了加州理工学院的阿伦斯。他先祝贺我的聪明设想, 但同时告诫我这种机制是行不通的。他十分自信地指出: “ 撞击作用发生后产生的高温高压, 会破坏任何可能带入海洋的氰化物。 ”

阿伦斯可能是对的。当有毒的彗星变成几十万公尺高的火柱冉冉上升并扩张成蕈状云时, 其温度将升到摄氏数十万度, 足以使任何氰化物和有毒气体发生离子化。但是, 这一过程同时也开创了产生新的有毒物质的可能性。

亚利桑纳大学的刘易斯 (John Lewis) 在雪鸟城作出一个非常重要的报告, 题为 《地球上重要撞击事件的化学后果》, 证实了阿伦斯的结论。任何大规模撞击作用造成的火球温度那么高, 绝不会有任何彗核带来的有毒分子保存下来。他的第二个论点强调地球大气层撞击增温作用的后果。根据对闪电、大型核爆炸和通古斯事件的研究, 现在可以肯定, 已有大量 NO_x , 尤其是可作为落叶剂的氧化氮产生。

刘易斯和他的合作者根据各种设想进行了计算。假设一个兆吨级的石质陨星以每秒 14 公里的速度撞击地球, 产生的 NO 分子将达十亿吨。这还是一种保守的估计, 彗星的运行速度要快得多。如果一个兆吨级的彗星以每秒 40 公里的速度撞击地球, NO 的产量将增加 100 倍, 即 1000 亿吨氧化氮。这些化合物将很快的为同温层中的臭氧和大气层中的氧气氮化为 NO_2 、 N_2O_4 以及其他形式的 NO_x 。刘易斯断言, 用不了一小时, 地球大气层将为灾难性的 NO_x 所污染。

刘易斯指出, 撞击产生的 NO_x 将在几周之内沿纬度形成一圈, 但要使有毒物质遍布全球还需要几年的时间。在这一段时间内, 大气层中的水蒸汽将吸收 NO_4 形成硝酸和亚硝酸, 并以酸雨的形式降落下来。因此 NO_x 的污染不可能是全球性的, 只能限于中纬度地区。这种污染将毁坏一个呈东西向延伸, 至少长达 35000 公里、宽达 2000 公里的地区, 约占地球面积的 14%。

白垩纪末期植物群的破坏情况, 符合一个彗星落在北半球中高纬度地区

的设想。这一假说可以解释孢粉分析所揭示北美森林遭到严重破坏的事实，以及鹰粉属植物从西伯利亚到阿拉斯加这一广大范围几乎全部灭绝的情况。

虽然对植物的直接破坏可能沿纬度形成一个东西带，但对动物的长期影响可能是全球性的。最严重的后果是同温层中臭氧在与 NO_x 的反应过程中发生的损耗。图恩与其合作者研究了通古斯事件的化学后果。根据计算，他们预测在同温层中产生 3000 万吨氮的氧化物，将会使北半球消耗掉 35—40% 的臭氧。他们把计算结果，与威尔逊山 (Mount Wilson) 史密斯天文物理观测站搜集的通古斯爆炸后若干年内的资料进行了对比。在那颗陨石下落以后的头四年中，臭氧确实减少了 30%。但这种破坏作用可以自行修补恢复，因为臭氧减少后，将有更多的太阳紫外线穿入大气层，而紫外线辐射作用的增强反过来将增加氧 (O_2) 转变为臭氧 (O_3) 的速度。然而破坏的规模愈大，恢复所需的时间也愈长。图恩计算了兆吨级陨星撞击作用的最小影响。撞击后第一年内，全球臭氧减少量将超过 90%，几年之后仍将维持在 50% 以上。奥基夫和阿伦斯的估计更为惊人。他们认为，至少在十年内，臭氧层会遭到彻底的破坏。勾勒出大致情景地球臭氧层的功能，是保护生物免遭强烈的太阳紫外线辐射的致命影响、这种强烈的紫外线辐射也称为紫外线带 (UV—B)。1975 年，美国科学院的一个委员会的生物学家研究了大规模核战的后果。他们得出惊人的结论：核弹爆炸对臭氧层的破坏所造成的影响，要比辐射尘大得多。现代紫外线带的强度几乎已达到生物所能容忍的最高限度；强烈的紫外线辐射能破坏皮肤，曝晒时间长了就会引起皮肤癌。在紫外线带的辐射之下，癌细胞将增殖，生殖细胞将发生变异，甚至被全部杀死。异常的生殖细胞又能引起不孕、流产、死胎、先天不足乃至有害的甚至致命的染色体遗传变异。1985 年 9 月，美国科学院宣布了一项惊人的发现。在针对大规模核战后果“核子冬天”的研究项目中，布朗大学的两位内科医生发现，在同温层中的臭氧因为与 NO_x 反应而大量减少后，动物若暴露在强烈的紫外线之下，会破坏免疫系统中的 T 细胞 (thymus-derived cells)。紫外线辐射，就像爱滋病毒 HTL-3 一样，将导致免疫能力减弱，从而使动物失去对疾病的抵抗力。

很可能是因为强烈阳光的杀伤作用，引起白垩纪末期的生物灭绝。幸存者那些能够忍受异常高强度紫外线的生物，或是躲在深水或洞穴中，或是因夜行而受到保护的生物。在这些幸存者中，少数个体会发生某些有益的变异，因而提高其分化的速率。当然，这并不是白垩纪末期事件的全部过程。

无论是全球黑暗也好，空气污染也好，臭氧耗损也好，来得快，去得也快。尘埃下落，污染物的消失，大概用不了一年的时间；臭氧层复原大概需要十年的时间。幸存生物理应迅速恢复繁盛，但其实却不然。相反，许多种属还在减少，并逐步走向灭绝，原因可能是当时的水体已遭污染。十亿吨氮的氧化物虽然从空气中消失了，但更多的硝酸却落到了土壤中和海洋里。

最初，我曾设想酸雨对陆生动植物的破坏作用要比对海洋生物的破坏作用强得多，因为污染物质将集中在池塘和局部的流域盆地中。不难想象，在一个酸化程度很高的小湖中，所有的动物将像彼得的鱼那样惨遭厄运。而海洋是那么巨大，兆吨的硝酸也不会引起化学成分的巨大变化。即使如 NO_x 专家刘易斯所设想的，所有的硝酸都集中在大洋表层 75 公尺的水体中，其 pH 值也只会有一半单位的变化，也就是酸度仅增加三倍。这种变化虽不能说对生物绝无伤害，但不致引起大量生物的死亡。从古生物纪录看来，尽管海洋浮游生物在第三纪最早期的岁月中几乎全部灭绝，但淡水动物和陆生植物发生的变化却很少。如果酸雨是凶手，那么为什么海洋生物受害最深呢？

一种答案是，虽然小生境比大洋般的巨大环境更易遭受污染，但恢复也快。在拉尔夫和尼基丧生百合花池之后，我们将酸雨排出，重又换上了自来水以迎新客。可以想象，在陆相环境中也有同样的情形。有的森林可能已完全落叶，有些湖泊和河流可能已遭严重污染，并将引起生物的大规模灭绝。但无论是否酸雨，降雨都将净化空气。从净化空气中降下的淡水，将把污水赶到大洋。陆地、湖泊和河流在初期可能受了严重污染，但不久又可重新成为生意盎然的环境。一些从污染较轻的环境，如受灾较轻的大湖中迁出的难民，将在新环境中繁殖生长。

第二种答案可能更切中要害。从生物的进化过程考虑，对于那些几乎没有后代或者因为生命短促而未及发育后代的个体来说，不会有机会形成有害的遗传特征。某些一度有用的特征，在环境改变时也不见得有机会保存下去，成为依然有用的特征。例如，北美麋鹿要度过相当长的寒冷时日后才能受孕。这是一种非常奇妙的适应性：在麋鹿的故乡，麋鹿若太早受精，产仔时气候过冷，草料不足以养育幼鹿，因此形成了这种奇妙的适应性。而在英格兰，几个世纪以来，贵族费尽心机在他们的庭园里豢养麋鹿以供欣赏，但麋鹿却根本不能生育，因为那里没有足够的冷天使它受孕。如果气候逐渐发生变化，每一代中会有一些数量个体的生物钟微有调整，只需较少的寒冷天气便能受孕，整个族群会逐渐转变而采用新的繁殖时间，我们便说它们适应了新的气候。但是，如果麋鹿在其故乡也经受如此急剧的环境变化，它们就会灭绝。

浮游生物可以很良好的适应现在的海洋温度和环境条件，但是任何曾经从事养殖浮游生物的研究人员都会说，它们的生育能力极易遭到破坏。在我的研究生时代，一位同窗选择在实验室研究养殖有孔虫的环境因素作为论文题目。一年后，他不得不终止研究，因为这些有孔虫都不能繁殖。他能抓到活的有孔虫标本，也能在实验室里养活它们，但就是不会生育；那已是三十年前的事了。三十年来，一些专家在实验室里繁殖某些海洋浮游生物，已经略有成就。但即使对于这些生物，温度也必须刚刚好，人工海水的化学成分必须与天然海水毫无二致，浮游生物的养殖仍然是一种艺术。成功的饲养者只与其友人共享机密，就像大厨师缄口不谈最新发明佳肴的烹调技术一样。

当水的 pH 值降到 7.5 以下时，某些现代超微浮游生物将停止繁殖。现代海水只有在 1000 公尺以下，或者说在浮游生物生长带之下，才能达到这样的酸度。白垩纪末期事件发生以前的情况可能也是如此。有孔虫对化学变化也很敏感，硝酸盐多了或者酸多了，都会影响其繁殖。

说到此处，我们可以大致描绘一下当时的情景了。首先，地球转入黑暗，生物大规模死亡。待大地重光之日，因为没有大量浮游生物消耗溶解的二氧化碳，导致碳酸的异常聚集，加上酸雨和陆地激流带来了兆吨的硝酸，大洋的 PH 值降到 7.5 以下。除了最强壮的种属外，大多数浮游生物都失去了繁殖能力。这种经过剧烈变化的海水化学条件似乎持续了几千年；因为浮游生物的生产力一直很低，而且海水又发生上下的均匀化，终于形成死劫海洋，溶蚀能力很强的底水与表层水混为一体。

海洋最终只能靠自己的自然过程来净化。石灰质是酸的中和剂；当年人们开采莱伊尔领地上的白垩并在市场上销售，用来中和英格兰北部沼泽地区的酸性土壤。只要是酸性土壤，就会经常使用石灰中和。陆地上石灰岩的侵蚀作用和海底碳酸钙骨骼的溶解作用，最终将提供足够的石灰质，中和死劫海洋里过量的酸。几千年或几万年之后，表层海水又会回复正常，重新有利于浮游生物的生长。但破坏已经造成。即使是休眠的孢囊也不可能维持再生能力达几千年之久。超微生物和有孔虫的大规模灭绝看来是化学污染不可避免的结果。

有趣的是，分泌矽质骨骼的矽藻可以在 pH 值接近 6.4 的海中成倍的繁殖，所以没有遭受像有孔虫和超微生物一样的大规模灭绝。

如果我们能像了解浮游生物一样了解恐龙，那么我们会对当时的环境变化作一断语，究竟是恐龙的生育能力遭到了破坏呢，还是如埃尔本研究恐龙蛋时所指出的那样，其繁殖能力发生了某种病理学变化。遗憾的是，它们并未留下后裔，无法在实验室里加以饲养。因此，最好的办法是去寻找最明显的、人人津津乐道的原因——气候。三阶段温度变化大规模陨星撞击地球之后的温度变化极为复杂，艾密连涅及其同事提出了一个三阶段的图案。

陨星撞击作用的直接效应将一如德·劳本菲尔斯生动的描述过的一样。不过需要略加更正的部分是他想象的全球性热波。在撞击区，应该是像圣经中“所多玛”和“蛾摩拉”所遇见的现象：一个巨大的火球冲天而起，渐成一个烟柱，过热的空气形成巨大的蕈状云。如果撞击作用发生在陆地，必定会有干燥的热风和无法控制的森林大火。但是这种温度波动将是暂时的，受影响的地域也有限。

随后发生的寒潮就不同了。第二阶段的特点将类似于众所周知的核子冬天。美国、苏联、德国和其他国家的物理学家，近年来正在研究核战引起寒潮的可能后果。如果许多核弹落到地球上，由蕈状云带到同温层的烟尘将形成一厚层悬浮颗粒。在几个月内，太阳辐射能受到遮挡，全球温度将下降几十度。茫茫大地和地表水域将是一片冰霜。没有作物生长，大多数幸存者将

会冻饿而死。上世纪几次大规模火山喷发之后，人类已经略微领略过尘埃引起温度下降的滋味。

大规模陨星撞击之后长达数月之久的同温层尘埃，将夺走地球上的夏季。图恩在雪鸟会议上报告说，地球上某些地区的气温可下降达摄氏 40 度之巨，而且必定已在零度以下。而在人为的冬天恰与自然的冬天偶合的地区，生物的灭绝要比那些仍处于夏季的地区稍轻一些。习惯于在热带阳光下取暖的动物即使得以幸存，也不得不在寒风中苦熬岁月。

核子冬天的持续时间不会太长。喷发尘埃下落后，重现的日光将再次把温暖撒向大地，因此我们并不期望在地质纪录中发现这一短暂事件的证据。然而，我们从南大西洋取回岩芯的氧同位素资料，却真的指示出铍异常事件之后，有一个几百年之久的冷期。虽然它并不是“核子冬天”本身，但此一持续的冷期可能是它的后果。设若陨星撞击作用发生在海洋，那么首先将是滂沱大雨，日降水量达 3000 公厘（约 200 英寸）的降水过程将持续几周。联想当时气温的急速下降，这场难以想象的降水将不会是雨水，而是在昏昏寒夜里从天而降的鹅毛大雪。一英寸雨水相当于十英寸霜雪。大地重光之日，地球已成为一个巨大的雪球。美国气象局的科学家注意到，降雪较早的话，那年冬天会比平常冷，因为雪地的反射作用折回太空的太阳能要比无雪的陆地所反射的强得多。提前降雪产生的效应只能在那一个冬天起作用，但是由于冰雪覆盖地球非常广大地区而引起的热损失就不能同日而语了。因为在寒冷气候下，冰雪的融化极其缓慢，可能会持续几百年。我们的资料似乎已足以说明这一推理。

夏克尔顿在 1978 年的报告中已经明确提出最后全球变暖的气候变化。他的资料显示，就连洋底的温度也升高达摄氏 5 度。而在大西洋的样品中，我们发现的升温值为 8 度。

艾密连涅用温室效应解释变暖的趋势。大气层中的 CO₂ 就好比温室的玻璃，阳光可以穿透玻璃和气体，但地球表面反射到太空中的热量却不能传出，因此可以将热量捕集在温室中使室内增温。同理，大气层中捕获的热量也会使全球温度上升。通常，大气层中的二氧化碳变化大小，不会引起太大的影响。但是，气象学家业已注意到，在过去的一个世纪中，因为人类用石化燃料作为能源，大气层中二氧化碳的含量已增加了 20%。这一趋势现在还在继续，而且在近几十年中是以指数函数在增长。在不远的将来，大气层中的二氧化碳将增加一倍，引起全球气温或许升高摄氏 2 度。最后，温室效应捕集的热量将会使两极冰雪融化，引起海平面上升，以致全世界的沿海城市淹没在海水之下。

灭绝原因各异

诚然，在恐龙时代既无高烟囱、也无排气管。在工业社会以前的几千万

年中，是由浮游生物控制着大气层中二氧化碳的数量。浮游生物在海洋中消耗的二氧化碳愈多，返回大气层中的气泡就愈少。反之，消耗二氧化碳的浮游生物愈少，那么大气层中的二氧化碳就愈多。在第三纪最早期的几千年中，可以确定浮游生物寥寥无几。布罗克估计，由于浮游生物的大规模死亡和生产力的持续下降，可能会使大气层中的二氧化碳增加三倍。根据各种电脑估算结果，二氧化碳含量增加三倍，将会使全球的温度增加摄氏二度至五度。只有当海洋逐渐重新变为肥沃可栖、浮游生物的幸存后代得以重新繁殖，才有可能再次回到正常的气温。我们的岩芯样品证明，从白垩纪末期惨遭摧残的残余种属转变到第三纪正常的蓬勃生长的生物种群，在约需要 5 万年的时间。

突然的温度变化也会严重损害陆生动物。在大冰期之后的千年间，北美有三分之一的哺乳动物灭绝，虽然我们还不能肯定温度升高是不是惟一的凶手。麦克林总是念念不忘增温是恐龙灭绝的决定性因素，他讨论了异常高温对生物生殖细胞的影响。空气温度升高几度并不会杀死恐龙，却会造成许多不育的个体。大规模死亡未必是恐龙灭绝的直接原因，但大规模的不育却是可怕的杀手。研究爬虫类蛋孵化过程的动物学家指出了一种更为有趣的可能：许多爬虫类的性别并非取决于其染色体，孵化温度才是关键。可以想象，如果最后的恐龙都属同一性别，它们将因没有后代而趋于灭绝。遗憾的是，我们永远都无法确知此说正确与否。

我们可以提出许多设想来探讨浮游生物对环境的影响，或者环境对浮游生物的影响，因为我们已相当了解浮游生物的活体。至于菊石、厚壳蛤、恐龙和巨型爬虫类，情况就不同了。自从 18、19 世纪发现其化石至今，它们一直是灭绝的标志。这些生物皆无后代，我们无法查询，也无法测试它们对于冷、热、酸度或污染的承受能力，更无法探查可能导致它们消失的微妙相互作用。

1985 年 6 月，我参加了柏林的达莱姆 (Dahlem) 会议，与一群生态学家和古生物学家一道讨论生物的大规模灭绝。在讨论过程中，大家的意见去芜存菁后，同意必须从两个不同的层次观察问题。生物的灭绝有其直接原因，每一个生物种的原因都可能是独一无二的，而终极原因则可能造成众多生物种的灭绝。科学家必须提高警惕，切忌陷入直接原因的迷宫而不能自拔。最近，报载乌鸦吞食了几年才产卵一次的两个加利福尼亚秃鹰的蛋。诚然，乌鸦有可能使秃鹰渐趋灭绝，不过是栖息地的破坏而非乌鸦的食欲，才是秃鹰和其他现代生物面临危机的终极原因。根据他们对现代灭绝种属的研究，柏林的生态学家认为：栖息地的破坏和其他导致数量减少、遗传变异能力减弱或生殖能力破坏的因素，才是生物灭绝的终极原因。

终极原因并不一定能解释直接原因。众所周知，北美候鸽正由于捕杀过量，面临灭绝的厄运，但它们确有其特殊的弱点。群居是它们求爱的必要条件，造成为数不多的幸存者不能保持适当的繁殖率。此外，大凡园丁都知道，

某些树木对污染的抵抗能力很低，甚至在城市里都无法生长。而另一些植物不仅能忍受污染，而且能排除诸如一氧化碳、甲醛蒸汽和香烟废气之类的有毒物质。陨星落地后，栖息地遭受严重而长期的破坏，是白垩纪灭绝的终极原因。但除非了解生物的特殊弱点，否则不能解释各个种群的厄运。

人类的倒行逆施

所以，菊石可能是食物链遭到破坏的牺牲品，但也可能因为化学污染而不能生育。热带生物礁的建造者——珊瑚和厚壳蛤——可能在紧接短期黑暗之后的漫长寒冬中突然死去，或者由于浅水缺氧，慢慢的窒息而死。腕足动物可能是中毒身亡，也可能是因为居住地换了“地毯”，即清洁的白垩质栖息地变为泥质海底后，无法适应而一命呜呼。

各种灭绝方案我们都想遍了，但找不出一方案适合于全体恐龙族。恐龙就和现代哺乳动物一样，成员个别差异极大。研究某一种恐龙的科学家可能会发现，它们的蛋壳太脆或者并未受精，因而认为高温对繁殖能力的破坏是灭绝的原因。但是一些研究不同恐龙类群的科学家却发现，有些恐龙并不下蛋，无论是在白垩纪末期还是其他时期，都未见这些恐龙有蛋保存，因此推测它们是胎生的。要解释一种恐龙的灭绝，我们必须了解恐龙生理学和生活习性方面不胜枚举的事实。因为我们并不知道它们弱点何在，任何无知的推测都是毫无乐趣的。虽然我们并不了解恐龙灭绝的细节，不过也并非全然令人泄气。短短几年以前，任何有关恐龙灭绝的可能情况都嫌理由不足。一些设想看似合理，但都不能解释大量其他生物何以与恐龙同时灭绝。只有全球环境遭到出乎科学想象的扰乱这种说法，才能解释相关的事实。

对于生物的大规模灭绝，我们现已有了更深刻的认识和更明确的观点。严格地说，这些认识是从人类自己对生态环境的破坏中累积起来的。人类与捕杀过量的其他生物、森林的破坏、环境的酸化和破坏、烟尘对臭氧层的威胁，人类自己建立起来的温室效应，乃至人类用自己的发明去制造核子冬天等，为我们提供了思考全球灾难可能景象的基础。而前人却一定忽略了这些层面。

在追逐竞争权的斗争中，我们已经把人类赖以生存的星球推到了危险的边缘。人们以为，这种进展反映了人类的天然优越性，这是从适者生存这一自然规律中推演出来的一种信念。然而，在人类之前，生物发生灭绝的根本原因各不相同。大规模生物灭绝是剧烈自然变化的结果，这种变化并不是任何生物造成的。

至此，我们不得不问一下这个故事的结论，也就是我在本书开篇提出的一个问题：达尔文主义是科学吗？鉴于我们肯定了天外飞来横祸的意义，那么，我们新的理解是否否定了社会达尔文主义的有效性，并使我们有理由把它扔进旧纸堆呢？

第十三章 演化之道

在我学习古生物学时，我们透过南美的实例，接受以适者生存为核心的达尔文主义教育。几百万年以前，南美大陆与北美大陆分道扬镳了一长段时间。两个大陆上都演化了多种动物，二者的生物面貌迥然不同。巴拿马地峡升起后，北美大陆的动物开始大举进袭南美。

经过北美严峻气候考验的新来者，比缓慢进化因而不甚发达的原地动物素质较佳。南美的土著生物在褊狭的故国止步不前，已有很长的时间。于是人们得出结论，认为发展程度较低的原地生物，大多被较具优势的入侵者消灭了。他们得出这一结论是毫不足奇的。在北美洲，许多今天已被视为南美土著动物的现代动物，如骆马、美洲豹和獾，其实都是北方群落的后代。只有极少数诸如犰狳和 的原始哺乳动物由南美移向北美，扎下了根。

达尔文认为，天择就是创造生物的过程。他非常明白，如果自然只不过是一个刽子手，通过杀灭不适应其小生境的生物来保存适者，那么天择规律所铸造的生命史，其实与原创论并无多大区别，都认为哪一种生命形式创造得较完美，保存下来的机会就较大。自然规律是完美者的保护神，生物种属其实是不变的。达尔文对他在生物灭绝和发展的研究中所观察到的演化事实，并没有得到解释。

正由于这样，达尔文又提出，自然选择会改善生物的适应能力。生物的每一种变异，尽管各有不同，都趋向于在牺牲其竞争对手利益的基础上，更有效率的利用地球资源。因此，生命的历史只是进化的历史。如果谁能把现代的动植物搬回到恐龙时代，那么现代生物将无情的掠夺较老的居民，就像南北美洲合并后，较优越的北美动物取代较低劣的南美动物群一样。

由于达尔文的思想逻辑深受人口压力推论的束缚，所以势必得出这种把演化看成进化的观点。他认为，生物之间的竞争是控制生物进化的杠杆。一种捕食者捕食速度的提高，将迫使类似的捕食者提高猎物速度，并与其对手在竞争中一决雌雄。如果后者保持原状，那么等待着它们的将是灭绝。

一些非常著名的当代生物学家甚至都认为这是不灭的真理。1984年，人口遗传学家施密斯(John Maynard Smith)在《自然》杂志上发表了一篇文章，指出他很惊讶“古生物学家对化石纪录的看法不同。他们认为，恐龙的灭绝同恐龙与哺乳动物的竞争毫无关系。虽然他们存在的时间和恐龙一样久远，不过是在恐龙灭绝之后，哺乳动物才散布到那些空下来的地方。他们认为，其他重要物种的更替也是如此。”但是，施密斯持的看法却是：“生物灭绝的主要原因是物种之间的竞争。”

与古尔德的歧见

在我对生物大规模灭绝现象发生兴趣以前，从未有机会质疑生物竞争进

化的思想。当我于 1980 年从南大西洋的探险远航归来时，开始对生物一步一步的向高级演化而日趋完美的理论感到不安，甚至已产生反感。看似疯狂的灾变论证据却不容忽视。生物的更替果真是自然选择的结果吗？如果不谬，那么用什么标准来判断幸存者的优越性呢？我决定问我的老朋友，古生物学家古尔德（Steven Gould）教授。

我与古尔德首次相遇是在 1972 年。那一年，我到牛津参加一次会议，而他正在那里度假，在会议中间休息时有人介绍我们认识。我们早已相互知名，而且了解对方的工作。他知道我，乃是完全归因于我在地中海的研究，而正是这研究动摇了我对莱伊尔渐变论的信仰。我闻其名，是因为他对同一理论的批评。他不同意达尔文关于生物演化速度的意见。达尔文是一位进化论者，坚信“自然不会跳跃”的格言。古尔德却发现，自然是会跳跃的。他曾注意到，从化石纪录看来，一个种在突然消失之前，往往已经保持几百万年不变，只是急速的为另一种明显有关、但实质不同的种所取代。古尔德断言，“进化论是人为制约的偏见，而并不是自然界的事实。”古尔德与同事埃尔德里奇（Niles Eldridge），二人共同创造出来“间断平衡”这一专门术语，以表示他所说的跳跃式演化。

我很满意古尔德也在向南美洲哺乳动物的故事进行挑战。早在我们的学生时代，老师总是用这一故事来讲述进化论。在一篇题为“呵，墓碑，你的胜利何在？”的论文中，古尔德公布了芝加哥大学科学家的最新发现：大陆间的生物相互交流不是单向的。

据统计，最终在巴拿马地峡以南找到安身之地的北美哺乳动物有十四个科，相当于南美大陆动物总科数的 40%，这是确凿的事实。但与此同时，也有十二个科的南美动物迁移到地峡以北，约占北美哺乳动物总科数的 36%。此外，灭绝速度也是平衡的，北美洲和南美洲灭绝的属数大致相同。古尔德评论道：“‘征服者载誉归来’的陈腐故事——差异迁移和屠杀浪潮的故事，再也不能继续下去了。”

然而，新的研究显示，北美的动物确在新居住地产生了许多新属，而来自南美的移民演化出来的新属却屈指可数。古尔德推测，这种差别可能是由南美气候的突变引起的。安第斯山脉近期的上升运动在南美的大部分地区建起了一个雨影区（rain shadow），使之由热带雨林区变成了旱林、草原和沙漠地区，土生生物的适应能力因此而面临严峻的考验。适应于热带雨林的许多哺乳动物，在北方动物入侵时，其实已经灭绝，或者数目正在下降。而向北迁移的动物业已经历日益干旱化的南方气候威胁，又受到地峡以北干旱气候的阻碍，所以面临进退两难的困境。

而在另一方面，北方的动物在迁居以前已经适应了类似的条件。所以气候的变化比种间竞争能更好的解释美洲的生物灭绝和物种变异的化石纪录。

自从我们在牛津初次相逢以后，这一思想一直是古尔德研究工作的主

题。而在之后的八年中，我们一直保持着友谊。现在我所看到的，不仅是古尔德所说的“间断演化”，而且开创了新生代的历史新篇章。我觉得我应当让他知道这些发现。可能他会同意达尔文用适者生存的观念来解释演化过程是错误的。

八月，我从南大西洋回到苏黎世，立即给古尔德写了一封信，提到一长串问题。其中之一是：白垩纪那些生意盎然的生物突然灭绝究竟意味着什么？他们是在同谁竞争呢？他们为什么不是适者？

古尔德给我的答复使我吃了一惊。在一封思虑周密的长信中，他强烈的表达了对天择理论的认同。信中提到，天择说是达尔文对演化论生物学的最伟大贡献。我们没有理由否认这一理论的贡献，即使在当今的环境危机中也没有理由这样做。

在回信的同时，古尔德还赠书一册。其中有一篇论文，对一篇题为《达尔文主义的错误》的文章大加鞭鞑，声言“埋葬达尔文主义为时过早”。“达尔文主义的错误”是贝瑟尔(Tom Bethell)在1976年应《哈泼》(Harper)杂志之邀而写的一篇文章，贝瑟尔在文中指出，达尔文主义已经面临崩溃的边缘，“早在几年以前，人们就已悄悄的抛弃了天择说，甚至连它最热诚的支持者也不例外。”因为那只不过是一种陈腔滥调。

古尔德对这篇文章的二个观点都不赞成，陈腔滥调意味毫无新意。“我的父亲是一个男人，”古尔德写道：“这句话就是陈腔滥调”，因为任何人的父亲都不可能是女人。重复这种显而易见的事实，毫无新意。贝瑟尔认为，“适者生存”就是这样的陈腔滥调，因为生存本身就意味着它是适者(或者，按照一位人口遗传论者的定义，“具有最大幸存率的种型就是适者”)。因此，衡量生物适应能力的惟一标准就是它的存在与否。

贝瑟尔把达尔文的“错误”归因于对比失误。《物种起源》第一章讲的就是鸽子的饲养。鸽子饲养者通过人工选择，把野种的岩鸽培育成不同形式的扇尾鸽、翻飞鸽、大脖鸽和信鸽。达尔文认为，自然界的選擇作用，把单一的祖先改造成不同生物种属，同饲养鸽子有某种相似性。这种对比的错误，在于养鸽子的人事先就想好了，因此有一个独立的标准衡量其进展。但是，自然界既无目的、也没有独立的鉴别标准。对某一物种来说，无论变异多少，都无所谓进化可言。

古尔德争辩道，独立的标准是有的。设定有某种自然条件的变化，例如安第斯山脉升起后，自然条件的变化以及全球各处陆陆续续的大小变化，人们就可以想象生物在变化了的标准下试图幸存的能力是好是坏。达尔文认为自然界存在着某种宇宙优越性(cosmic superiority)。对此，古尔德未表示意见。但是他认为较优越的物种能适应居住地的环境变化这一观念，是达尔文的智慧菁华。“这些特征，”他写道：“就是适应能力的判别标准，而并非单靠它们的幸存或扩散这一经验事实来判断。在被毛哺乳动物发展某绒毛外套之前，气候原已变得较为寒冷了。”

根据这一标准，他认为适者生存理论乃是可以检验的。如果我们知道气候正在变冷，那么我们就可以预言，能改进其隔热结构的生物将会幸存下来。但是，我对这一套说教不敢轻信。在大冰期前的多种大象中，谁能说哪一种大象会长出防寒的长毛呢？而若冰期的到来像彗星的速度那么快，那么谁又来得及穿上皮毛呢？

新达尔文主义负隅顽抗

古尔德不同意贝瑟尔的看法。他认为达尔文主义并未濒临崩溃的边缘，天择说并没有悄悄的被抛弃。维护天择说的声势仍然非常强大。他列举多位建构新达尔文主义者的话，天择说已被“多勃然斯基（Dobzhansky）比作作曲家，被辛普森（Simpson）比作诗人，被梅尔（Mayr）比作雕刻家，被小赫胥黎（Julian Huxley，编注：赫胥黎的孙子）比作莎士比亚”。因为以上这些最卓越的生物进化论者，当然也包括古尔德自己，都试图用这些比喻来“描绘达尔文主义的菁华——天择说”。当我应邀到柏林为一个进化论的学术会议挑选报告者时，我开始相信，这种对信仰的热情而坦诚的表白，已经深入到广大的生物学家中间。当我听到一位卓越的青年遗传家仅仅因为另一位生物学家不忠于天择说而反对他参加会议时，不禁大吃一惊。有一次，我与这位青年教授共进早餐，我问他为何如此理直气壮，仿佛在原创论外，舍天择说再无其他任何可能似的。

他不厌其烦地举了许多例子，包括在遗传实验室里的人工选择实验，以及最近在达尔文曾经研究过的加拉帕戈斯群岛的鸣雀中进行的自然实验。

自然实验的结果发表在《自然》杂志上，题为《加拉帕戈斯群岛达尔文鸣雀（地雀亚科）群中激烈的自然选择》。文中指出：“在经历了一场旱灾之后，达芬梅杰岛上幸存下来的达尔文鸣雀并不是随机的。大鸟，尤其是大喙雄性存活情况最好。因为它们有能力啄开在干旱中保存最好的大颗硬壳种子。”

我抱怨说，我不明白大喙鸟的幸存究竟证明了什么。随机现象意味着偶然的、无目的或者无原则的现象。作者提出非随机的，那就是说岛上的自然选择是有目的，是受某种原则控制的。我可以同意，大喙鸟的幸存是非随机的，它们确有啄开坚果的优秀设计。但是，我要问，干旱也是非随机的吗？难道旱灾不是自然界的一种异想天开的恶作剧吗？度过旱灾而得以幸存下来就是适应能力的定义吗？如果气候向相反方向转变，不再发生旱灾，大喙鸟的适应能力又将如何呢？这种自然选择，是否也同雕刻家根据一块纳克索斯（Naxos）大理石来想象维纳斯的形象，然后慢慢雕刻成形一样，是一种创造呢？

照我这个中国宿命论者看，一切不过是机遇。达芬梅杰岛的旱灾是一种偶合，大喙鸣雀靠坚果维持生存也是一种机遇。如果遗传特征的选择像气候

一样瞬息万变，那么所谓的创造何在？在别的岛屿上，其他鸣雀却因为不同机遇而幸存下来了。

我认为可以把机遇定义为自然的反复无常。因此，天择也就是随机选择。那么幸存者也就可以定义为幸运儿，但是并不一定是最适应者。想想，如果达芬梅杰岛大雨滂沱，鸣雀又将如何？

我的新达尔文主义的朋友很不同意我的看法。在 20 世纪，科学界又把孟德尔关于遗传方式的研究结果重新搬出来，遗传密码也在 50 年代得到了破译。进化机制的研究在野外和实验室同时展开。遗传学家发现，生物的特征是从基因继承下来的，而在一个群落中的变异是基因不同组合方式的反映，所以具有大基因库的巨大群落有着极大的变异性。除此之外，由于从光线乃至化学污染，每个因素都可引起变异，造成基因的突变，至少在实验室里是如此。

在实验室里进行人工选择（他提到果蝇实验室），可以分开具有特殊遗传特征的个体和特殊变异的个体，并可在它们中间进行培育。如果把这些经过培育的群落与其本群落分开，经过足够长的时间，理论上就可以创造新种。但是科学家迄今还只能把这种孤立的群落培养成新奇的变种，而不能造新种。因为时间还不够长，但在自然界中却不乏实例。

他举出一个例子。现在土生土长在夏威夷群岛的许多动植物的祖先，是在几百万年前才与世隔绝的。由于它们不能与大陆的亲属进行杂交，所以才演化成了其他地区所无的新种。他说，其他“种属隔离”的办法也能引起与世隔绝的繁殖，并最终导致新种的形成。

他耐心地向我解释这一切，就像一位真正掌握了世界真谛的年轻人向老一代人解释生命一样。多少年来，宣扬进化论的生物学家也是这样向整天与化石打交道的古生物学家解释生命现象。根据渐变论的教条，现代的观察是解释古代现象的钥匙，而果蝇实验室里的实验又严格地模拟了自然界。因此他认为进化论生物学家根本毋需了解化石纪录的生命史。

全面观察

地球科学家或许该为自己的彻底被遗忘负责。古生物学家从时间尺度研究地球，在 19 世纪发展到顶峰时期，成了联系古代历史和现代地质作用的纽带。在欧洲，古生物学家在许多地质研究所里跃居为学界主角。从 1830 年的斯米思 (William Smith) 到 1859 年的达尔文，地球科学界视为殊荣的乌拉斯坦 (Wollaston) 奖章的半数，即三十枚的得主是从事古生物学研究的。但以后的三十位得主中，却只有一位古生物学家。

从本世纪初开始，古生物学的研究急转直下。学生的任务只是学习如何鉴定化石。诚然，这些化石对于确定地层相对年代是极为有效的，但是，尽管这些工作已经作得很好，古生物学家仍在为某一特殊界线究竟应当高十公

尺还是低五公尺而争论不休。而地质学家却已经把注意力转移到了地球物理学、地球化学、海洋学和板块构造学。许多大学已停止设课讲授古生物学，进化论这一主题也已从地质学生的课程中日益淡化。正如施密斯所说：“族群遗传学家对于那些亟愿为进化论添砖加瓦的古生物学家的态度是：走远一点，去找你的化石，别来烦我们这些大人。”

从纯理论的遗传学观点来理解物种成因的尝试，不比试图用人种学、社会学、自然人类学和群众心理学来解释民族的形成高明。国家的形成是一部历史。没有哪一项社会科学研究能够解释，为什么瑞士与法国之间的西北边界画在佛假山脉的中间，将语言相同、又在同一教堂作礼拜的人民一分为二。只有历史研究才会揭示，瑞士得到伯尔尼斯侏山（Bemese Jura），不过是 1815 年维也纳会议上一群政治家的偶然决定。这是一种只能用拿破仑战争政治解释的社会现象。

国家的幸存也只能用它独一无二的历史来解释。没有一种理论能够预言，在几十个德国和奥地利的封建领土相继丧失其独立之后，为什么列支敦士登仍能保留下来，成为一个自主的国家。对于那些只会鹦鹉学舌的人而言，其幸存是因为它是适者。

如果我们要按照我们现在对物种的了解阐释物种的变化，有关演化机制的知识固然有用，但是历史知识也必不可少。我们都知道，世界上的国家的确都进化了。各种学科都可以提出一些机制，用它们来解释某些方面的进化。但是每一个国家都有独一无二的历史——天灾、战争、经济危机和思想危机等等。没有这些知识，任何理论归纳必遭惨败。同样，如果我们忽视化石纪录或者否认生物危机的现实，我们就无法理解物种的形成和灭绝。

灭绝无独有偶

对于生命历史中的灭绝现象，地质纪录又能揭示什么呢？麦克拉伦（Digby McLaren）在 1982 年于美国地质学会所作的演说中，总结了古生物学家的一致意见：在地球生命史中，有过多次大规模的生物灭绝现象。白垩纪末期事件只不过是最近的一次而已。

所有这些灭绝事件的形成都是相似的。大量高度歧异的生物群一下子全盘灭绝，并为歧异度很低、数量却很多的生物群所取代。麦克拉伦强调了生物大规模灭绝的情景：经过长期平静的、没有任何戏剧性变化的生物演化之后，事件突如其来，毫无先兆。大规模突然灭绝的种群“立即”为规模相若的新种群所取代。所谓“立即”，在像麦克拉伦这样的地质学家心目中不超过几千年。再经过几百万年，新的生物种群经过不断的分化，达到很高的歧异度，就像灭绝以前一样。对地质学家或古生物学家来说，生物在几百万年之内分化，也是一种非常迅速的现象。

物种形成和灭绝的形式，与达尔文提出的模式迥然不同。达尔文根据马

尔萨斯人口论提出他的物种理论，但是我们看到的事实，却显示在生物灭绝事件发生之前，既没有物种的增加，也没有生存竞争升高的证据。马尔萨斯认为繁殖的结果将导致崩溃和灾难，但是自然界和马尔萨斯的世界并不相似。生命的历史是以大规模的杀戮事件及随后的新生命形式爆炸性增长为特征。大规模的繁殖现象并不在大灾难之前，而是在大灾难之后，就像二次大战后的婴儿潮一样。生育率的激增并不是灾难的原因，而是灾难的结果。

“适者生存”失去意义

许多古生物学家都信奉生物进化的小生境理论。自然界只有这么多生境，它们各为有限的生物所占据。而当所有的生境全为生物占满后，生物的演化就缓慢下来，乃至停止演化。待到灾难降临，许多生境的居民遭难，争夺生存空间的斗争又重新开始。这种情况和核战颇相似。核战杀死百姓，却留下了一幢幢的建筑物。在一次大规模的生物灭绝之后，为原种属所占据的空间——草原、沙漠、森林、海滨等等尽皆空空如也，留待新的居民。紧随而来的爆炸性的物种形成作用，又使这些空空的“建筑物”挤满了新的居民。

现实情况并非如此简单。灾变前的许多生机勃勃的小生境其实已遭摧毁。例如，寄生植物栖居的小生境也适合恐龙栖息，随着恐龙的灭绝，这些小生境也毁掉了。在复杂的生物关系网中，众多生物居住的无数其他小生境，也会出现同样的情况。生物之间的关系是它们发生歧异的先决条件；捕食动物的小生境也应包括被食者的特性，就像蒲公英的小生境也包括为其创造发芽条件的人类一样。然而，这种“领地”在灾变之后也是同样向大环境开放的，然而过程要比原始空间缓慢。如果栖息地充满了先驱的种属，生物之间的关系也会逐渐复杂起来，最后又会重蹈覆辙。

灾变之后幸存者后裔数量的激增，无法与充满自然栖息地的种属相提并论。并不是因为它们的适应能力更强，而是因为它们是先来者，道理简单之至。继这些先驱者之后，是同一血统的后裔，它们发生歧异，开始充满各种原先空着的“领地”。同样，它们并不一定是这些环境的适者，只要捷足先登即可。因此，我们不能说，那些在白垩纪种属一度生活过的地方重新涌现出来的新有孔虫，比它们的祖先更适应这一环境，就好比我们不能说鲸鱼比沧龙优越。当沧龙在白垩纪灾变中灭绝时，它们既让出了在海洋中所占据的空间，也同时失去了海中猎手的作用。当鲸鱼演化到一千万年以后时，它们是在空空的舞台上扮演同样的角色。

演化可能会创造，但作为创造者的大自然却不会按照达尔文的教条，缓慢而又一成不变的把每一块大理石削成固定的形状，使它完全适合原先的格局。我觉得这种物种形成作用更像一位文思泉涌的作家用个人电脑进行创作一样。他猛力不断的敲击键盘，磁碟几乎已经录满；一会儿改改这儿，一会儿敲敲那儿，这里删掉一个字，那里换上一个词义相近的词。经过一段时间

之后，终于有一天，偶然发现磁碟已经完全洗掉，不得不重头开始撰写原稿。

新稿可能优于原稿，也许根本不如原来的稿子，但毕竟是不同的稿子，新稿也不是原稿的真正修改稿。新稿只受知识和词汇量的限制，就像生物面貌要受到物种发生、辐射渠道、生物与栖息地的关系等因素的限制一样。实际上，他已经将文章完全重写了一遍。

试图解释这一原稿化石纪录的科学家，当然困惑不已。人们发现，章节上连续的原稿，内容却迥然不同。达尔文解释这个疑团的办法是假设二者之间，例如晚中生代和早新生代之间生命形式的转变，在纪录中缺失掉了。尽管地质纪录必定是残缺不全的，某些章节或某些页码可能甚至完全没有纪录，但是我们的最新证据却说明，中生代与新生代之间章节并无缺失，中间也没有过渡带。古比奥剖面是连续的。

正如麦克拉伦在演说中所声明的，虽然科学家还在争论这种灭绝的速率和原因，但是现在几乎已没有古生物学家质疑大规模生物灭绝现象。也没有人认真的认为生物灭绝的原因是生物之间的生存竞争，更没有人认为恐龙的灭绝是由于哺乳动物与恐龙的斗争，或者由于二者为了争夺小生境而进行的斗争。但是，那些顽固不化的达尔文主义者，仍然试图挽救祖师爷的教诲，说什么适者生存是指生物对危机的幸存能力等等；不过一切这些花招已经于事无补了。

这使我想起了古尔德在他的一篇文章中描述过的“小水熊”。这是一种很小的生物，个体小于一公厘，看上去很像昆虫，由在 1773 年发现这些小生命的德国博物学家高兹（Goeze）命名。当时，对这些生物的分类尚无把握，于是姑且称之为“小水熊（Kleiner Wasserbär）”。从那时到现在，已发现这种甲壳动物四百多种，居住在极为广泛的小生境中。从北极到南极，从高山到深海，无处没有这种小生命的足迹。小水熊所以能从极端环境中幸存下来，是因为它有很强的休眠能力。在休眠状态下，它们没有饥饿的感觉。它们生存的温度范围高可超过水的沸点，低可达 0.0008 度 K，或者说接近绝对温度零度。它们还能够承受比人类致命剂量强几千倍的放射性辐射。古尔德写道，就像博物馆长把苔藓的干燥标本弄湿后发现竟然能复活一样，小水熊也能在休眠几百年之后，像睡美人一样醒来。

如果度过危机的能力就是适应能力的基本判别标准，那么小水熊就应是生物中最适应者，而这正是达尔文主义者所说的自然选择的方向、目的或力图达到的完美性。幸好自然界并未按此逻辑进行，否则世上除了小水熊之外就不会有别的生物了。

那么，什么是适应性的涵义呢？所谓适应性就是指适应于生物的小生境。如果小生境遭到破坏，那么会出现什么样的情形呢？当然，生物就变得不适应了。

恐龙的适应性一直是极好的。既能适应生物之间的相互关系，又能适应所居住的自然环境。后来，一颗陨星击中地球，恐龙一下子变成了不适者，

最后终遭灭绝。爱尔兰麋鹿和被毛哺乳动物适应冰期的环境是无庸置疑的，可是当气候回暖时，它们反而灭绝了。环境本身既然反复无常，适应与否也就没有意义了。

生命史的无名英雄

言归正传，我们还是来讨论天择说究竟是科学原理还是一种空论。根据波珀检验伪证的办法检验其预见能力，这一理论是完全失败的。它的预见能力甚至不如历史学。如果我们研究罗马王朝崩溃前的纪录，了解当时的情况、条件和四周民族的渴望，我们也或可预见到它的崩溃。但是天择说的情形就不同了。即使我们对马斯特里奇期的动物和植物群的情况了如指掌，甚至看过恐龙和菊石的电影，详细研究过它们当时的生活方式，我们还是无法预见其灭绝的前途。事先并无任何预兆，没有一种理论能预言将发生什么。我们也无法辨别灭绝者的弱点或幸存者的优点。因为，用原创论者的话来说，“人类不可能进行一项科学实验”，来重演导致白垩纪终结的事件。

诚然，除非生物已经灭绝，谁也不能说它们是不适者。当然，我们也不能因为某种生物还活着而断言它们是适者。我们可以说沧龙已不适宜在海上捕鱼为生，也可以说变成鲸鱼的哺乳动物海上捕鱼的本领更强，但这种解释并非科学。如果沧龙延续至今，可能反会因为肉味不佳或油脂对人类无甚价值，而比鲸鱼更幸运，但鲸鱼却正因为人类过度捕杀而面临灭绝的危险。这就是演化的反复无常。

可能所有的灭绝现象，包括时时都在进行的背景灭绝（background extinction）都是偶发性的、不可预见的。既与适应性无关，也与灾变性的生物大规模灭绝无关。世上的事物无时不在变化之中。一部分适者会迅速转变为非适者，因为它们没有机会及时发现改变了的小生境。但是生物的大规模灭绝仍然不容忽视，尤为引人注意的是，在地球历史上，这样的事件已发生过许多次。

几乎所有重要地质时期的划分，如奥陶纪与志留纪界线，都标志着极其繁盛的旧生物群灭绝和同样繁盛的新生物群兴起。古生代向中生代的转变，与中生代向新生代的转变形式一模一样，但更为严重。25000 万年以前，95%的古生代生物一扫而光。而在古生代的极早期，即 56000 万年前的寒武纪初期，化石纪录反映了介壳类生物惊人的勃发现象。或者是前寒武纪保留下来的含化石地层太少了，或者是前寒武纪繁荣的生物主要是软体而无硬壳，所以无法保存。总而言之，我们几乎找不到能说明当时究竟发生了什么的化石纪录。然而，从其他各时代的生命演化模式判断，爆炸性的物种形成一般是紧随于同样大规模的生物灭绝之后的。

当我还在大学作博士后研究的那一年，约翰·霍普金斯大学的斯坦利（Steve Stanley）按照当时理解的生境理论解释了前寒武纪的灾难。当时

对生境的理解还不是指生活方式，主要是指居住地。他认为前寒武纪的世界到处覆盖着藻类，阻碍了本可以更妥善利用生存空间的生物的演化。他又想象，单细胞的食藻生物后来吃尽了藻类，为多细胞生物扫出一片干净的生境。斯坦利这一设想的基础就是生态学家所熟知的播种原理。一种宜于播种的生态系统，无论是水池或非洲的太平原，都会促使生物发生更大的分异，而不是单种生物，诸如贻贝或单种水草的蔓延。斯坦利设想，正是这种细小的食草动物，才有寒武纪初期生命形式的勃发。古尔德把这种物种形成现象称为“生命史上的无名英雄”。

那些无名英雄没有留下骨骼，是这一睿智思想的麻烦所在，因此无法验证。在早于前寒武纪的地层中，至今只发现了几种原始介壳。但在1947年，澳洲地质学家在澳洲南部埃迪卡拉山脉（Ediacara）的晚前寒武纪砂岩中，发现了一种特殊现象。也许是因为某种特别好的保存方式吧，他们在那里发现了六亿年前的软体生物化石。有的呈水母状，可能就是水母；另一些显然就是蠕虫动物或藻类；还有一些奇怪的动物，与所有已知的死去或活着的生物都毫无相似之处。从那以后，在澳洲的其他地方，还有在南非、英格兰、苏联、中国和纽芬兰，都发现了相似的软体生物组合。

如果说，真有某种生物为寒武纪五彩缤纷的生物群开路或创造生活条件，那么这种生物绝不会是单细胞的无名英雄。这种小生命，无论多么贪婪，也吃不掉水母。那么埃迪卡拉动物群究竟发生了什么变数呢？为什么无法将它们归纳到以后的生物分类中去呢？

灾难促成演化巨变

1981年，我到中国大陆去参加地质学会成立60周年庆典时，遇到了旧友吴景祯先生。吴景祯告诉我，柏克莱的阿萨罗在三叶虫首现层以下的样品中，发现了极高的铀异常。三叶虫是一种古老的节肢动物，从寒武纪开始大规模繁殖，成为有壳生物蓬勃发展的先驱。闻讯后，我感到非常振奋。

我们知道，铀异常是陨石撞击地球的可靠标志。也许我们可以研究一下前寒武纪与寒武纪界线处的碳同位素。我的中国主人非常帮忙，把我领到了中部的长江三峡。那里的寒武纪底界剖石出露极佳。我取了六块样品，作初步研究之用。回到瑞士后，我把一部分样品交给伯尔尼大学的克莱亨布尔作铀分析，我的助理奥勃亨斯莉帮我作质谱分析。

结果令人鼓舞。我们发现了陨石撞击事件引起的铀异常，也发现了负的碳同位素异常，显示当时近乎不育的海洋。这两种现象都发现在界线层，就像白垩纪—第三纪界线的情形一样。而且都是在爆炸式的物种形成之前。

我们不想凭六个样品的分析结果匆匆作出结论，于是要求我们的中国同行提供更多的样品。中国科学院地质研究所所长孙区光先生给我寄来了界线上下的两套样品。一套样品采自长江三峡，就是我原来取样的地方，另一套

样品取自西南边陲的云南省。两地相距一千公里以上。

奥勃亨斯莉在我们的同位素实验室里分析了这些样品，结果无误。碳同位素异常赫然在目，刚好位于两地的界线层中。

现在我们相信，“生命史上的无名英雄”绝不是那些微不足道的传播者，而是那些硕大无朋的天外来客。埃迪卡拉动物群可比拟为当时的恐龙，可能正是这次来访的牺牲品。

不久，我们的中国同事向我们通报了他们研究其他界线的结果。一是古生代和中生代的界线；在这一界线上，95%的物种死绝，堪称最有破坏性的一场生命危机。中国科学家用中子追踪的办法，发现了分开二叠纪—古生代最后一个纪，和三叠纪—中生代第一个纪之间界线黏土中的铀异常，同时发现了碳同位素的负异常。现在，我们已经在地球生命史的演化过程中变化最大的三个界线处，发现了形式相同的地球化学变化。

灾变(catastrophe)一词源于希腊文 Katastrophe，意即“彻底的转变”。每一次巨大的撞击事件都使生物的演化转变到不同的方向，从奇形怪状的软体生物或埃迪卡拉动物群，到有壳而形状固定的寒武纪生物群，从恐龙乃至哺乳动物。我们很难把生命史上那种关键的转变想象成一种任意发生的行为。如果地球与陨星撞击现象引起生物界发生灾变，如果撞击看来似乎是随机的，那么究竟是否有某种规律可循呢？如果历史曾经重演，那么历史是有规律的吗？

生命界环环相扣

劳普和舍普科斯基(John Sepkoski)认为，生物的大规模灭绝是周期性的。除了我们用以划分地质时代的主要灭绝事件外，还有一些规模较小的生物灭绝时期，但其规模亦大到足以在化石纪录中发现。回顾过去 25000 万年间可鉴定的事件，芝加哥大学的科学家提出 2600 万年的灾变周期，最近一次发生在 1400 万年以前。

随后，瓦尔特·阿弗雷兹和缪勒(Richard Muller)比较了这一时间周期与 25000 万年以来地球上发生的撞击成坑作用。经测年证实的材料固然不多，但二者看来相当一致；大规模撞击事件有着 2840 万年的周期。劳普和舍普科斯基确定的最新一次大规模生物灭绝事件，与德国南部里斯(Ries)附近 1400 万年前的一次陨星撞击事件不谋而合。

时至今日，地质测年技术仍然不很精确，古代地层与撞击碎屑的放射性测年偏差可这一二百万年，使我们无法进行完善的追踪。但是，劳普和阿弗雷兹等人相信，这些事件中有着规律性，而韵律又受到天体运动规律的控制。

说法有很多种，其中一种是 5000 万年的周期。1979 年，克普鲁和纳皮尔在《自然》杂志的一篇文章中，把它描述为周期性陨石撞击的可能周期，

我就是受这篇文章的启发而卷入白垩纪生物灭绝事件争论漩涡的。这一周期显然与劳普和舍普科斯基的 2600 万年的生物灭绝周期不一致。另一种周期是太阳对银河系轴面的上下摆动，其周期为 3300 万年。值得一提的是，近年来有一种极端荒唐的理论。这种蛊惑人心的说法认为，太阳有一颗尚未发现的伴星，周期性的分裂成引起地球灾变的天体，并已经定名为复仇女神（Nemesis）。1985 年秋，我到加州见阿弗雷兹父子。他们告诉我，他们已经查过数以千计的天象照片，没有发现这颗隐星的蛛丝马迹。

要将生物演化过程与天体运动相对比，显然有太多的未知数有待解决。生物大规模灭绝的周期可能是地质纪录的误解。撞击成坑作用是根据很少的资料算出的，而且伴星复仇女神的存在也毫无根据。因此，我同意休梅克的意见：他认为这些思想的正确性只有 1% 的机率。也许我们还不得不同意麦克林的意见，“这是绝对误入歧途的科学”。除此之外，这些议论还大有文不对题之嫌。

即使我们发现地球有规律的遭到彗星的轰炸，也无法预测演化的趋势。一次撞击之后将会引起什么后果，取决于陨星的大小、撞击地的位置、撞击发生的季节，以及最重要、也最复杂、连最新式的超级电脑也无法分析的因素——对整个生命界的组成会产生什么样的后果。在生命界中，生物总是相互依存的。

人类存在只是偶然

天择说理论的荒谬之处已经暴露无遗，现在该是醒悟的时候了。

毫无根据、且与大多数事实不相符合的一种假说，如此轻易地为广大科学家所接受，原因究竟何在？我想，除了因为我们愿意相信它外，没有别的解释。关于适者生存这一“自然规律”，惟一“自然”之处，是它在某种程度上符合一些人的偏见。人类之间竞争非常激烈，人类也杀灭过其他生物，包括人种本身和其他物种，即那些被称为弱者或人类认为没有价值的生物。在这种竞争中，引用达尔文主义就可以自圆其说。但生命的历史却并不是这样的。认为在生存斗争中将保存“优势种族”，是一种极其危险的思潮，再也不能让它披上科学的外衣而贻误后代了。

但是我也想象得到，许多人会不愿意抛弃这种信仰。因为理性原因和最终目的两项概念已经根植在我们对世界的直觉中，这种直觉是出于人类本身独一无二的演化模式的人为产物。但是如果生命历史上的重大事件，甚至像人类的存在这样的事实都是偶然的（因为作为人类祖先的哺乳动物，若非恐龙为彗星所毁灭，怎会有机会演化至今天的样子？），岂不使人感到惘然？我们怎能接受人类存在的偶然性这一事实呢？

幸运者也不见得好过，对此我的感触很深。有人说我是幸运儿，因为我在一次车祸中幸免于难。在这次车祸中，我的第一任妻子鲁丝不幸丧生。我

是生者，她是死者；她已长眠，而我却必须忍受死别的悲哀，究竟谁更幸运呢？一位牧师来看我，要我拜读圣经中使徒保罗致哥林多人（Corinthians）的书信。我从中得到的启示是：生命只是使命，而死亡才是酬报；我因而觉得比较安慰。也许鲁丝已经结束了她的使命，她生育了三个可爱的孩子。而我，还要继续完成我的使命，直到生命的尽头，才能得到酬报。这是幸运，还是不幸？

在以后的岁月中，道家的哲学愈来愈吸引我。那就是在严酷的生存竞争环境中，慈母长期教导我的哲学。回首当年，外族入侵，山河破碎，继之世界大战，生存竞争不仅是每日耳闻目睹的现实，而且似乎已经成为生活中压倒一切的目标。人类都是时代的产儿，他们总是根据自己的经验，戴着有色眼镜观察世界。战后我远涉重洋到美国求学，成为我女儿口中所谓“有所成就的人”。那是 50 年代，当时，我们这一代人差不多都汲汲于有所成就。到 60 年代，我已经年长到不宜参加当时盛行的嬉皮活动行列。这些年轻人背弃了社会达尔文主义，所以我视之为一个充满希望的新时代的开始，代表着一种新的生命观，更接近于我自幼受教至今坚信不渝的道家思想。

在中国的词汇里，道就是“路”。而道学的“道”是方法、原理和真理的代名词。这种真理，又要比西方只意味着“事实”的真理难以捉摸。波珀喜欢引用德国幽默诗人的一段名作：

二二得四道理真，
空洞无物意不新，
我欲高深指明路，
引导世人出迷津。

在道学中，所谓迷津是指某种本质上难以捉摸的事物。《道德经》的第一句话就是“道可道，非常道”。与波珀所谓的真理相当接近，也是人类永远无法找到的。他说，我们之所以知道有真理存在，只不过是因虚假易于辨识。所以有谎言就有真理，不管它是多么难以辨识。就像有不幸就有幸运，尽管谁也说不清什么是幸运一样。我想，从这种逻辑出发，幸者生存的道理便可以被人接受和理解。在我们生活的星球上，确有某种规律、原理或真理。我们无法发现，无法谈论，但它们确实是存在的。

我还不至于如此狂妄，要装成对演化之道知之甚多，也不想定义幸运一词。圣经中提及的使命并不适用于恐龙。不过，我承认我的存在是受赐于恐龙的及时灭绝。生物演化，必定有“道”。我愿揭发虚假不实，站在真理的一边。达尔文《物种起源》一书的副题——“生存竞争中优势种族的保存”就是一种伪言。它所衍生的所有观点或者以它作为判别标准而衍生出来的所有观点，可谓全盘皆错。

我宁可用与达尔文迥然不同的观点观察生命。

一切全在时运

在最近于柏林召开的达勒姆会议上，康奈尔大学的尼克拉斯（Karl Niklas）根据化石群所揭示的事实回顾了生物演化的历史。他的描绘强调生物之间的演化关系。正是在这种关系中，出现了新生、分化和机遇。地球上最早生物发源于大海。水生节肢动物所以能演化成陆生昆虫，是因为藻类为它们提供了食物，而藻类又因而能够在潮湿的岸边生长。接着昆虫又成为其他生物的食物，这些生物演化成为蜘蛛。随着植物演化出现参天大树，昆虫长出翅膀，蜘蛛演化出网。昆虫以花粉花蜜为食，替植物传粉，导致被子植物的歧异度不断增加，从而为昆虫创造出来了新的小生境，也为昆虫创造了新的生活方式。到头来，昆虫又为食虫类创造了新的小生境。这些食虫动物已不限于蜘蛛，也包括两栖类、爬虫类极和最原始的哺乳动物。

这只不过是那些纪录中最小的一个片段，从化石纪录或者当代生物群落中，还可以找到无数类似的故事。事实证明，生命形式之间的依存关系是生物演化的生命线。一种生命形式的变化，都会引起一个生命网的改变，而卷入这一现象的生命形式加在一起，就组成了所谓生命。在这一故事中，几乎没有新物种摧残和征服老物种的任何证据，相反，却充满了某种生物的灭绝引起其他生物发生危机的事实。历史上没有一种生物可以不倚赖其他生物而独立存在。当然，也有一些生物可能在危机中受益。比如，我们可以说，古抱球虫这种浮游生物，在白垩纪末期其他生物惨遭灭绝时，或受益、或遭摧残，这两种可能都是存在的。但无论如何，我们不能说，新的有孔虫种属是靠杀灭其他老的种属来维持生存。反而我们必须承认，古抱球虫的幸存是后来物种形成，甚至哺乳动物分化的重要原因，因为它的子孙净化了空气。

如果这样一种理解提供了生物演化之道之一隅，反映了生物演化的规律和真实，其中的谦逊特别值得称道。道家说，祸兮福所系，福兮祸所伏，祸福之间并无绝然的判别界线，至少以人类的智慧还无法判断。在演化过程中，跃进确实存在，也许上帝的确会耍一些把戏。

《物种起源》一书发表后的百余年是充满激烈斗争和忧患的年代，人类经历了两次世界大战和许多极权主义的暴

第十三章 演化之道

政。我深切的感到，愈是倡导优越性、愈是想估量他人的价值、愈是想使我们的目标尽善尽美，就会造成更多的伤害。根据母亲的老式箴言，或者根据我们从地球生命史中学到的更古老的格言，我相信人类必须真诚相处，不要假装明了谁是适者，谁又不是适者。相反，我们倒应当对各种生命形式和滋养生命的各种方式采取兼容的态度。回顾长达数十亿年的生命演化史，我感慨万千。这就是我对道家生存哲学的认识。

对西方人而言，我愿引述圣经上的一段话表达心中的感受。圣经上说：
我又转念，见日光之下，快跑的未必能赢，
力战的未必得胜、智慧的未必得粮食，
明哲的未必得资财、灵巧的未必得喜悦。
所临到众人的，是在乎当时的机会。

