

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

区域土地利用土地覆盖遥感调查



区域土地利用  
土地覆盖遥感调查

## 第一章 绪论

土地一般是指地球表面上的陆地区域，包括陆地、岛屿和内陆水域。土地是一个综合的概念，它是包括地貌、土壤、气候、水文、植被等各种自然因素在内的自然综合体，同时也包括人类活动的作用和影响。<sup>[1]</sup>

土地是重要的自然资源，它的最大特点是具有生产力，是农业和工业生产的物质基础；但同时，土地的生产力又是一定的。合理地利用土地可以使土地的生产力永续发挥；如果利用不合理，将会导致土地退化，生产力下降。

20 世纪以来，由于世界性的人口膨胀、资源短缺、环境恶化等一系列问题日益突出，如何协调好人类活动与土地资源关系，促进社会的可持续发展，已成为当今世界的一个重要研究任务。

土地资源合理利用的前提是要摸清土地资源状况，包括土地类型、土地利用、土地质量等。土地利用 (land use) 着重从人类开发利用的角度对土地的“人为世界”进行分类，通常是指耕地、林地、牧场、建设用地、交通用地等的划分<sup>[2]</sup>。土地利用调查是合理利用土地资源、制定各项经济建设规划、改善生产布局的一项基础工作，是一项涉及面广，综合性、区域性和生产性很强的工作。

常规的土地利用调查是通过实地测绘的方法来进行，工作量大，调查周期长。近一二十年来，国内外开始广泛应用遥感技术来进行土地利用调查。

遥感 (remote sensing) 技术是指以现代工具 (仪器、设备) 为技术手段，对目标物进行遥远感知的整个过程。遥感技术在获取地面物体信息中具有宏观性、实时性、动态性等特点，是土地利用调查的有效手段，已在许多应用中显示出明显的优越性。

例如，英国曾进行过一次英伦三岛 24 万 km<sup>2</sup> 的土地利用常规调查，当时动员了 6000 名中小学教师，花去 6 年时间才完成，等到土地利用图绘制完成后，土地利用状况已发生很大的变化；1976 年英国应用卫星图像分析与野外调查相结合的方法，只用 4 个人 9 个月就完成了全国的土地利用调查，而且统计非常详细，大大缩短了调查的周期<sup>[3]</sup>。

又如，上海市中心区的土地利用调查，90 年代初曾用常规方法花了 2 年多的时间才完成，但完成后的图件已不能反映 2 年后的情况；1995 年初利用航空遥感方法，只花了 2 个多月就完成了调查，并且比常规方法更加详细<sup>[4]</sup>。

土地覆盖 (land cover) 是随着遥感技术的发展而出现的一个新概念，它的含义与土地利用相近，只是研究的角度有所不同<sup>[5]</sup>。土地利用侧重于土地的社会属性；土地覆盖侧重于土地的自然属性。如对林地的划分，前者从林地的利用目的和利用方向出发，将林地分为用材林地、经济林地、薪炭林地、防护林地等；后者则根据林地生态环境的不同，将林地分为针叶林地、阔叶林地、针阔混交林地等。

由于土地覆盖是按照遥感图像所反映出的信息进行分类，但土地的某些信息 (主要是社会属性信息) 在遥感图像上反映不出来；同时，遥感图像上反映出的一些信息又是常规调查中无法取得的，因此，遥感调查常把土地利用和土地覆盖两者合并考虑，建立一个统一的分类系统，统称为土地利用/土地覆盖分类体系。其中以土地利用为主的调查简称为土地利用遥感调查，以土地覆盖为主的调查则简称为土地覆盖遥感调查。表 1—1 为美国地质调查

所提出的用于遥感探测的土地利用/土地覆盖分类系统。

表 1—1 用于遥感探测的土地利用/土地覆盖分类系统  
(美国地质调查所 671 号通知, 美国内政部, 1972 年)

1. 城市和建设用地	(1) 住宅用地 (2) 商业用地 (3) 工业用地 (4) 农业用地 (5) 运输、交通和公共事业用地 (6) 科研机构用地 (7) 狭长式和集团式用地 (8) 混杂用地 (9) 空隙地及其	4. 林地	(1) 落叶林设用地 (2) 常绿林 (3) 混交林
		5. 水域	(1) 河流和航道 (2) 湖泊 (3) 水库 (4) 海湾和河口 (5) 其他
2. 农用地	(1) 作物地和牧场 (2) 果园、幼林、灌木 果树、葡萄园和园艺地 (3) 饲养业活动范围 (4) 其他	6. 难以利用的土地	(1) 有植物生长的 (2) 裸露地
		7. 荒地	(1) 盐滩 (2) 海滩 (3) 除海滩以外的沙地 其他
3. 放牧地	(1) 草原 (2) 热带稀树干草原 (3) 丛林 (4) 荒漠灌木	8. 苔原	
		9. 冰雪永冻带	

区域土地利用/土地覆盖调查对合理开发土地资源、因地制宜布局生产和安排建设、提高土地利用率和土地生产力等均有重要意义。同时,土地利用/土地覆盖状况又是遥感图像所反映的最直接的信息,是进行其他内容调查的基础。这主要表现在两个方面: 在土地利用/土地覆盖分类的基础上,调查各种地类的有关特性,如农作物估产(Sridhar et al. 1994)、灾害评估(Reed 1993)等; 某些现象的分布不能直接从影像上得出,但根据土地利用/土地覆盖与这些现象的相关关系,在土地利用/土地覆盖分类的基础上,可获得这些现象的空间分布信息,如人口分布调查(Lo 1989)、畜群分布调查(Thomson et al. 1989)、渗水层与非渗水层的区分(Finch et al. 1989)等。

遥感技术按遥感平台可分为航空遥感和航天遥感,其中航天遥感又包括

陆地卫星遥感和气象卫星遥感。航空遥感、陆地卫星遥感和气象卫星遥感是在不同的高度对地面进行成像，所获得的图像具有不同的空间分辨率，对应于不同的空间范围，同时，图像的成像周期也不一样。

根据土地利用/土地覆盖成图比例尺和调查目的，应选择相应的遥感方法。如大比例尺土地利用/土地覆盖图，一般比例尺是几千分之一到10万分之一，主要是配合小范围地区的全面详细调查或专题调查而编制，内容能较详细地反映土地利用/土地覆盖的特性和微域差异，这类图件主要是根据航空遥感方法来编制，其中1:5万~1:10万的图件也可采用高空间分辨率的陆地卫星资料编制。中比例尺土地利用/土地覆盖图，比例尺一般为1:10万至1:50万，往往是配合一个中范围地区的调查研究而编制，供区域规划、农业区划和国土整治参考，这类图件一般是利用陆地卫星遥感方法来编制。小比例尺土地利用/土地覆盖图，其比例尺小于1:50万，主要是配合大范围区域或全国性研究而编制，供研究宏观布局、编制大区或全国生产发展规划和经济区划、国土规划、农业区划工作参考。陆地卫星遥感和气象卫星遥感是土地调查的主要方法，其中气象卫星遥感在这方面具有很大优势和潜力。

遥感技术按接收的电磁波波段可分为紫外遥感、可见光及近红外遥感、热红外遥感、微波遥感等。其中，可见光及近红外遥感是土地利用/土地覆盖调查中最常用的遥感方法。但其他类型也都具有各自的特点，特别是微波遥感，能全天时、全天候成像，对土地利用/土地覆盖的实时调查具有重要意义，已越来越引起人们的重视。不同波段遥感数据的相互结合将使土地利用/土地覆盖遥感调查工作更加全面与深入。

地理信息系统（GIS）和全球定位系统（GPS）是近十几年里迅速发展起来的新技术，它们与遥感（RS）技术一起统称为3S技术。遥感与地理信息系统、全球定位系统有着密切联系。遥感技术的发展能促进地理信息系统、全球定位系统的发展，反之，地理信息系统、全球定位系统的发展也将促进遥感技术的发展。地理信息系统、全球定位系统在土地利用/土地覆盖遥感调查中的应用尽管目前还不是很广泛，但已经显示出很大的潜力。

## 参考文献

- [1] 郭焕成. 1984. 土地利用调查与制图方法的初步研究. 地理学报, (3)
- [2] 陈传康. 1992. 土地科学和土地利用规划. 见: 土地科学与区域开发, 上海科学技术文献出版社
- [3] 马荣斌等. 1982. 遥感原理和工程地质判释. 中国铁道出版社
- [4] 吴健平等. 1997. 上海市土地利用现状航空遥感调查. 华东师范大学学报(自然科学版), (1)
- [5] 左大康主编. 1990. 现代地理学辞典. 商务印书馆. 585
- Finch J et al. 1989. The application of remote sensing to estimate land cover for urban drainage catchment modelling. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 3(6) 558~563
- LoCP. 1989. A raster approach to population estimation using high-altitude aerial and space photographs. Remote Sensing of Environment, 27 59~71
- Mukai Y, et al. 1987. Extraction of areas infested by pine bark

beetle using landsat MSSdata.53 ( 1 ) 77 ~ 81

Reed B C , 1993.Using remote sensing and Geographic Information Systems for analysinglandscape/drought interaction.Int.J.Remote Sensing , 1993. 14 ( 18 ) 3489 ~ 3503

Sridhar V N , et al.1994.Wheat production forecasting for a predominantly unirrigatedregion in Madhya Pradesh ( India ) .Int.J.Remote Sensing , 15 ( 6 ) 1307 ~ 1316Thomson AG , C Milner.1989 Population densities of sheep related to landsat Thematic Mapper radiance.Int.J. Remote Sensing , 10 ( 12 ) 1970 ~ 1912

## 第二章 航空遥感方法

航空遥感是利用飞机（或气球）对地面物体进行摄影或扫描成像，然后根据所得的图像进行有关调查。航空遥感所得到的图像一般为高空间分辨率的图像，结构信息是图像的主要信息，这种信息较适合于目视判读，而要建立计算机判读模式则比较困难，加上航空遥感主要是进行大比例尺制图，对精度要求较高。因此，目视判读是目前土地利用/土地覆盖航空遥感调查中采用的主要方法。

在目视判读遥感图像的过程中，除了根据图像所反映出的各种信息外，还结合了判读人员对研究区域的认知。这种结合可以对一些图像上不能反映的土地的社会属性进行区分，即按土地利用分类的要求，对一个区域进行土地利用调查。土地利用和土地覆盖的目视判读方法基本一致，本章主要讨论土地利用调查。

### 1. 基本情况

利用航空遥感进行土地利用调查已有较长历史。1932年，美国K.C. 麦克默里首次采用航空摄影像片绘制小区域植被与土地利用图<sup>[1]</sup>；30年代初期，美国田纳西河流域管理局根据五透镜像机拍摄的航空像片镶嵌图绘制了田纳西河流域土地利用图<sup>[2]</sup>。50年代，我国对一部分地区进行了大、中比例尺航空摄影，在此基础上，开展了一系列工作，其中包括土地利用调查。近一二十年来，随着航空遥感技术的发展，航空遥感已成为土地利用调查的一个重要手段。我国许多城市及区域都已利用航空遥感进行过土地利用调查。

目前，关于土地利用航空遥感调查的理论与方法从总体上来说比较成熟，大多数文献所介绍的方法基本相同<sup>[3][4][5]</sup>。但是目前的研究还存在一些不足，其中最突出的就是缺少对遥感制图综合的研究。这主要表现在两个方面：对类型界线的表示，即如何进行遥感制图综合的研究很少；对航空遥感调查中的某些过程，如面积调查、精度分析及动态调查等，往往只是从遥感解译的结果来考虑，而没有考虑到制图综合的影响。当图像上大多数地类图斑大于最小制图面积时，即遥感制图综合程度较小时，遥感制图综合不会对遥感调查造成很大影响；而当图像上有一定数量的地类图斑小于最小制图面积，即遥感制图综合程度较大时，如果不对遥感制图综合进行研究，就会造成一些问题，如：不同的调查人员对同一地区的调查结果（包括图件和数据）往往会有很大差异，这种差异并不是判读错误造成的，从而使调查结果缺少稳定性；某些调查和分析的结果不能反映实际情况。

下面将以目前研究中的薄弱环节为重点，探讨土地利用航空遥感调查的理论与方法。

### 2. 理论与方法

利用目视判读方法进行土地利用航空遥感调查的工作流程如图 2—1 所示，其中动态分析只用于动态调查中。

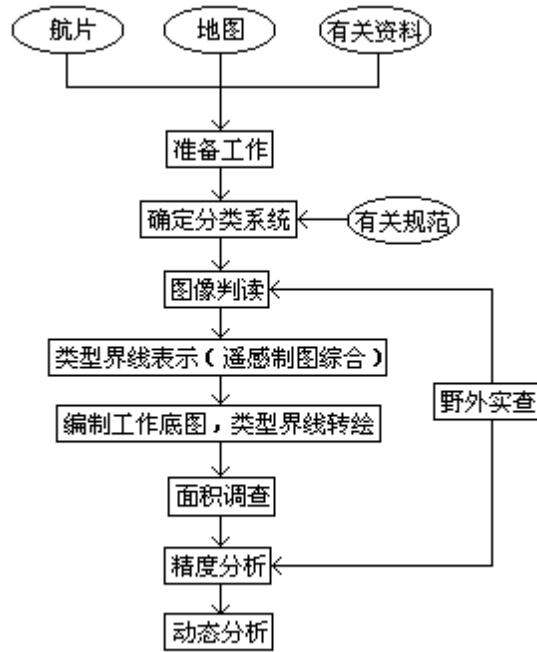


图 2-1 航空遥感调查工作流程框图

## 2.1 确定分类系统

土地利用类型是土地利用现状的地域组成单位，也是编制土地利用图的基本依据。因此，土地利用调查中，首先要确定土地利用分类系统，它关系到调查成果的质量和使用寿命<sup>[6]</sup>。

对土地利用分类系统的确定要从下面几个方面来考虑：

(1) 不同的调查目的，采用不同的分类系统。如用于农业区划的土地利用调查，一般采用农业区划委员会制定的分类系统<sup>[7]</sup>；用于城市规划的，则采用建设部制定的分类系统<sup>[8]</sup>。

(2) 土地利用分类系统通常是多级的，分级的具体标准则与制图比例尺有关。

(3) 对各部委制定的全国性的分类系统，有时要根据研究区域的特点作一定的修改。

(4) 目前制定的分类系统大多都是从使用的角度出发来制定，并没有考虑遥感调查的局限性。在遥感图像上，不同地类的可识别率是不同的，这里所说的可识别率是指通过少量野外调查，从遥感图像上能识别出的地类面积占该地类总面积的比例。一般来说，当某一类型的可识别率低于 85% 时，就要对该类型的分类进行调整 (Thomasetal. 1979)。

## 2.2 图像判读

在航空像片上，不同的地物有其不同的影像特征，这些影像特征是判读时识别各类地物的依据，称之为判读标志。判读标志有直接判读标志和间接判读标志两种，前者包括形状、大小、色调或颜色、阴影和落影、模式或图型以及纹理；后者则包括地物的位置及地物之间的相关关系。在图像判读前，首先要对研究区域进行调查，建立起各类土地利用类型的判读标志。表 2—1



列出了上海地区主要土地利用类型在彩红外航片上的影像特征。

表 2—1 上海地区主要土地利用类型在彩红外航片上的影像特征

土地利用类型		影像特征
耕地	水田	图形规整，四周边为边缘光滑、交角明显、粗细均匀的蓝、青色线条（即田埂显示）所封闭。大片水田呈网格状，含水量较大的田块色调较深暗，未收割水稻呈细粒黄色，收割后的裸地为青灰色
耕地	旱地	多沿河呈条状分布，或分布于农民住宅周围。自留旱地常呈深浅不同的品红色
	菜地	地块比水田小，行列细，图像清晰而规则。生长旺盛、覆盖面大的菜地呈鲜艳的品红色；没有种植或已收割的菜地呈蓝灰色
园地	果园	图形规整，多呈正方形、长方形等几何图形。果树多呈排列整齐的粗粒红点
林地	有林地	深红色、厚地毯状，有立体感，基本分布于宅基周围
	苗圃	呈矩形或方形图斑影像，个体呈淡红色、暗红色小斑点。常呈垅状排布，亦有呈不规则颗粒状的
居民点及工矿用地	城镇	一般工厂呈暗青色，高大，排列整齐。密集居民区影像呈青灰色。铁路、公路、街道呈灰白线条影像
	农村居民点	呈青灰色，图斑外形不规则。居民地内部和周围大都栽种树木，常呈红色影像。居民地的外围常有一些形状规则的青灰色影像，这一般是乡镇办的工厂用地
	工矿用地	几何形态上，厂房以宽大长方形居多，车间顶部结构有拱式、平顶式、单坡式或锯齿形，多呈各种灰色色调
	仓储用地	由一幢或数幢平面结构相同的宽大长方形建筑物构成，沿河流、道路分布
	禽畜场用地	离开住宅及主干公路，由数排外形相同、呈等距排列的狭长形建筑物构成
	公安国防用地	大多具特殊的几何形态
	旅游名胜、古迹与墓地	因其绿化好、形态规整，故在影像上呈形态规整的红色调
垃圾堆场	不均匀的蓝灰、灰白等色调，且往往见扩散晕似的外形	

土地利用类型		影像特征
交通用地	铁路	无护路林的呈深灰色，有护路林的呈红色带状，其中部分为深灰色线条，弯道呈平滑弧形
	公路	几何形态为带状。水泥路面呈灰白色调，沥青路面呈灰黑色，有护路林的公路两旁为粗粒红色斑点
	农村道路	呈灰白色细长线，穿越居民地和田地
	港口码头	沿江、河分布，且有伸向河面的泊位，还有条带状露天堆场
水域	河流	多呈青蓝色条带状，且常有弯曲。受污染严重的河流常呈黑色
	精养鱼塘	外形呈方形、长方形，或沿大河堤岸内侧呈长条形，水面多为蓝色色调
	苇地	多呈红色细点
	海涂	呈灰色深色调
	湖泊	呈青蓝色，为一不规则的封闭水面

不同的地物在航片上反映出的影像特征的明显程度是有差异的，有的明显，有的不明显。此外，对判读者来说，有的影像特征是熟悉的，有的则不熟悉。根据上述情况，在判读时往往采用3种方法：

- (1) 影像特征明显且熟悉的地物：直接判读；
- (2) 影像特征明显但不熟悉的地物：结合少量野外调查，根据经验进行判读；
- (3) 影像特征不明显的地物：根据已有地图或对调查区域的认识，反过来在航片上确定这些地物的图斑。

影像特征的明显程度随比例尺及分类级别的变化而变化。如在大比例尺航片上，纺织厂厂房的屋顶呈锯齿状，影像特征明显，随着比例尺减小，锯齿状形状逐渐显示不出，影像特征也随之变得不明显；耕地作为一种类型，影像特征很明显，但如要进一步划分出水田、水浇地、旱地等次一级类型，则影像特征就不够明显。

在图像判读过程中，对土地利用的空间分布规律以及土地利用的结构进行分析是很重要的。土地利用的空间分布规律分析是根据土地利用的分布与其他一些要素（如地貌、水系、居民点等）的关系来判读其属性。有些情况下，土地利用本身的影像不明显，但可以根据其他一些要素的分布来间接确定土地利用分布。如在黄土高原地区，土地利用分布与地貌有着密切关系，不同的海拔高度、地貌部位、坡向与坡度、地面切割状况，往往有不同的土地利用类型，而这些地貌类型在图像上的影像特征是很明显的，因此，可以通过地貌类型的判读来确定土地利用分布。

土地利用结构包括土地利用类型结构和面积比例结构，如耕地，其结构包括种植作物的各种类型和未耕种地的类型以及它们的面积比例结构。土地利用结构的差异会引起影像特征的差异，因此，土地利用结构分析就是要掌

握研究范围内每一类土地利用的结构变化情况及其引起的影像特征的差异，以便更好地进行图像判读。

### 2.3 类型界线的表示

遥感图像的判读是判读者获得信息的过程。作为一项工作，判读者需要把获取的信息经加工处理后以某些形式表示出来。其中，地图是最主要的表示形式（图 2—2）。

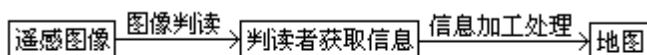


图 2-2 从遥感图像到地图的信息传输过程

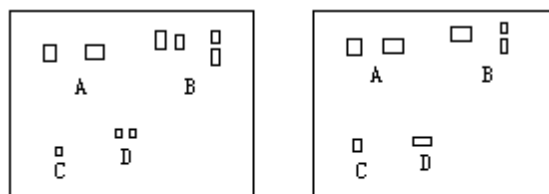
从信息论的观点来看，遥感图像和地图具有共同点，即既是存贮信息的工具，又是传递信息的工具。遥感图像反映了地物分布的客观状况，没有人人为的综合取舍，信息量很大，但信息传输的效率较差。地图作为提供给用户使用的研究成果，一方面要考虑到存贮的信息量，另一方面也要考虑到信息传输的效率。因此，在表示类型界线时，并不是把所有的类型界线完整地勾绘出来，而是要通过制图综合，使地图的信息量及传输效率达到最佳效果。从某种意义上讲，类型界线的表示过程实际上就是制图综合过程。

图像上的制图综合包括两个方面：图斑的取舍及图斑形状的概括。图斑的取舍是指选取主要图斑而舍去次要图斑；图斑形状的概括是指除去微小弯曲，显示和强调图斑的主要形状和特点。

与地图编制（利用大比例尺地图编制小比例尺地图）过程中的制图综合相比较，由于考虑到要从地图上量取各个地类的面积数据，因此，遥感制图过程中的制图综合除了强调要正确显示制图区域的基本特征外，还强调保持各个地类综合前后面积的一致。当然，对这两方面的强调有时是有矛盾的。一般来说，在大比例尺制图中，制图综合程度小，面积数据往往是调查的主要内容，因此，更强调保持面积的一致；而在小比例尺制图中，制图综合程度大，很难保持面积的一致，更强调正确显示制图区域的基本特征。

根据遥感制图中的制图综合原则，在图斑取舍中采用的具体方法如下：

（1）当图斑面积大于最小制图面积（线性地物的宽度大于最小宽度），且同类图斑之间的距离大于最小距离，则独立表示图斑（图 2—3 中的图斑 A）。



(a)综合前

(b)综合后

图 2-3 图斑的取舍

（2）当图斑面积大于最小制图面积（线性地物的宽度大于最小宽度），但同类图斑之间的距离小于最小距离，则合并或适当移位（图 2—3 中的图斑 B）。线性地物只能移位，不能合并。

（3）图斑面积小于最小制图面积（线性地物的宽度小于最小宽度），但为了反映区域特征或为了保持面积一致，对图斑进行夸大表示或对同类图斑

进行合并(图 2—3 中的图斑 C 和 D)。对某些具有特殊意义的地物则根据制图目的进行特别表示,如古建筑、古墓葬等,可用特殊的符号表示。

(4) 一般情况下,不表示小于最小制图面积(线性地物的宽度小于最小宽度)的图斑。

在图斑形状概括中,除了对一些具有特殊意义的微小弯曲进行夸大表示外,为了保持综合前后图斑面积的一致,对某些一般的微小弯曲也作适当夸大(图 2—4)。

## 2.4 类型界线的转绘

根据航片勾绘出的类型界线图没有数学基础和地理基础。此外,大多数解译用的航片没有经过几何纠正,因此,勾绘出的图只能称为解译图,要成为真正意义上的地图,还需要把类型界线转绘到工作底图上。这部分工作实际上包括两个方面:工作底图的编制和类型界线的转绘。

工作底图的编制一般是以相同比例尺的地形图或地理图作为基础资料,在聚脂薄膜上勾绘出行政界线、水系、道路等地理要素及经纬线等数学要素。对照航片,对有变化的水系、道路进行修正;对有变化的行政界线和地名也要根据最新的资料加以改正。

类型界线的转绘是以河流、道路等要素作为控制,把解译图上的类型界线转绘到工作底图上。类型界线的转绘方法很多,概括起来有三大类:光学仪器转绘、图解转绘及分块蒙绘转绘。

### 2.4.1 光学仪器转绘

使用光学投影设备,将类型界线、航片影像投影到底图上,使两者起控制作用的地物光学图像重合,描绘出投影在底图上的类型界线。按仪器性能可分为以下几种方法:

(1) 像片转绘仪法:将像片影像投影到工作底图上,利用控制地物作控制进行转绘,主要用于平原地区的转绘。图 2—5 所示的棱镜转绘仪是其中的一种像片转绘仪。

(2) ZOOM 转绘仪法:美国博士伦公司生产的 ZOOM 转绘仪,具有光学变焦特性,能连续变焦放大,像片放大率一般为 0.7 倍~14.0 倍,地图放大率为 0.7 倍~1.0 倍。这类仪器能实现相似、同素、仿射变换,使两个不同的投影格网配准。它适用于平原、丘陵、低山区的类型界线转绘。图 2—6 为 ZOOM 转绘仪。

(3) 单个投影器法:将判读好的像片翻拍成透明缩小片,然后投影到底图上,利用控制点来消除地物点的倾斜误差,用分带转绘限制各带的投影误差,通过改变投影器的高度统一各带比例尺,最后完成航片上类型界线的转绘。该方法主要用于丘陵和低山区的像片转绘。图 2—7 为单个投影器转绘仪。

### 2.4.2 图解转绘

拍摄中,由于在以航片特定点(等角点、像底点)为中心点的辐射线上

移动而产生了像片误差。根据这一规律，可用解析和图像的综合法，在转绘中对投影误差和倾斜误差进行改正。在辐射交会转绘作业中，由于等角点和像底点在航片上的位置不易求得，并在一定的条件下像主点及其附近的点都具有等角点和像底点的特性，间距很近，易于确定，所以实际作业中是在以像主点为圆心、 $f/40$  为半径的圆内选取明显地物点为辐射中心。这样画出的方向偏差不会超过作业限差。当地面高差超出规定的限制值时，则应设法求出像底点后，再以像底点为辐射中心。

图解转绘法虽较繁杂，但在无仪器条件的情况下，仍被广泛使用。图解转绘有几种方法，其中辐射线网格法应用较广。

辐射线网格法是在以像主点为圆心、 $f/40$  为半径的圆内选取明显地物点为辐射中心，利用透明模片在像片上建立辐射线网格（如图 2—8 所示），并在底图上建立完全一致的网格，然后逐个把像片上网格内的判读结果描绘到相应的底图网格内。此法适用于丘陵、山区的类型界线转绘。

### 2.4.3 分块蒙绘转绘

当像片水平、地形平坦且像片比例尺与成图比例尺一致时，可在其上直接蒙绘类型界线。为了合理地配赋误差（像片不绝对水平、地形也不绝对平坦），可以把像片的图像分为若干块，以每一块内的特征点或地物作为控制，逐块配准，逐块蒙绘。块分得越多，转绘精度也就越高。

不同的转绘方法其转绘精度也各异。一般来讲，光学仪器转绘能借助机械及光学系统，通过纠正来消除像片倾斜误差，并能将投影误差改正到允许的范围，转绘精度较高；图解转绘法比较繁杂费事，转绘精度也不如光学仪器转绘法，但在不具备仪器设备情况下，图解法仍不失为通常采用的方法；分块蒙绘转绘方法简单，转绘速度快，但要求航片的比例尺与底图的比例尺一致，且航片的倾斜和投影误差很小。

## 2.5 面积调查

面积调查一般包括图斑面积量算、面积数据调整及面积数据控制平差 3 个过程。此外，在某些情况下，为了调查净耕地面积，还需要在耕地面积中求出并剔除不参加平差的非耕地面积。

### 2.5.1 图斑面积量算

土地利用图上的图斑可分为面状图斑和线状图斑。面状图斑的面积可采用求积仪法、称重法、网格法、光电扫描法、计算机矢量数字化等方法直接量算。线状图斑是指道路和线状水域，宽的道路和线状水域面积量算可采用面状图斑的面积量算方法；细的道路和线状水域，在地图上有些被夸大表示，有些则由于宽度不够没有在地图上表示，所以面积不能直接从图上量取，而要通过其他方法求取。如铁路、正规公路的面积可以从有关部门查取；农村道路及线状水域可采用成数抽样法在航片上计算出它们的分布系数，然后根据统计区域的总面积求出它们的分布面积。

### 2.5.2 面积数据调整

从地图上量算出来的各类土地利用面积数据与实际的面积数据是否接近，一方面与判读精度及面积量算精度有关，另一方面则与地图的比例尺有关。随着比例尺的缩小，制图综合程度增加，一些分布面积小的图斑逐渐被综合掉，由此而造成呈离散分布的、图斑小的地类面积缩小，而包含这些地类的、图斑大的另一些地类面积增加。因此，要根据具体情况，对量算出来的面积数据作一定调整。调整可采用如下方法：在航片上，首先按某一地类综合程度的差异，把研究区域划分成若干子区，对每一子区，选择一定数目的样区，采用精度较高的量算方法，量算样区内该地类所有图斑的面积。在聚酯薄膜上描绘出图像样区内该地类的每一图斑（如图 2-9），然后用扫描仪扫描到计算机中，利用图像处理软件即可算出样区内该类型图斑的总面积。将图像上量算出的面积与对应样区地图上量算出的面积进行比较，求出被综合掉的面积的比例，即制图综合系数  $G$ ：

$$G = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \quad (2-1)$$

$S_1$  为图像上量算面积（实际面积）， $S_2$  为地图上量算面积。按比例即可求出每一区域内该类地物被综合掉的面积，并加入到对应的地类面积中。同时，对制图综合过程中面积增加的地类，要扣除相应面积。

### 2.5.3 控制平差

为了消除面积量算过程中的系统误差，对量算出来的各类土地利用面积数据，需要用各个统计区域的总面积来控制，按比例进行平差。如果统计区域是多层次的，则从上到下层层控制。

### 2.5.4 非耕地面积的计算与扣除

遥感调查所得的耕地面积一般都偏大，原因是遥感解译图中的耕地图斑包括了田埂、水渠、乡间小路等非耕地类型，这是遥感调查的特点造成的。耕地图斑中的非耕地类型一般不参加平差，但为了求得净耕地面积，必须计算出这些类型的面积并在相应耕地面积中扣除。

非耕地面积计算的关键是确定非耕地系数。影响非耕地系数大小的因素主要有两个，一是地貌类型，二是耕地类型。为此，在航空像片上首先对调查区域按地貌类型和耕地类型进行分层，在每一层选择典型地段，利用量测放大镜量测航片上非耕地类型（一般都为线型地物）的宽度，通过抽样，与地面对应实测数据建立回归方程，利用回归方程修正量测出的宽度，并乘上长度，得到线形地物的面积。非耕地系数  $D$  的计算公式为：

$$D = \frac{S}{S}$$

其中， $S$  为非耕地面积， $S$  为平差后的耕地面积。

每一层的耕地面积乘上该层的非耕地系数得到该层的非耕地面积，扣除非耕地面积后得出的即为净耕地面积。

## 2.6 精度分析

精度分析是遥感调查过程中一项不可缺少的工作。通过精度分析，调查者能确定调查方法的有效性，改进调查方法，提高调查精度；使用者能根据调查结果的精度，正确、有效地获取调查结果中的信息。

遥感调查结果的精度有3种形式，即位置精度、类型精度和数量精度。位置精度（也称定位精度）是指调查所得地图与参考图上对应单元在空间坐标上的位置差异；类型精度（也称定性精度）是地图上的图斑类型与实际类型相比较的判读正确程度；数量精度（也称定量精度）是指调查结果中某类（或各类）的数量与该类（或各类）实际数量的接近程度。

### 2.6.1 位置精度分析

地图上各个地类的位置精度取决于类型界线的转绘。因此，位置精度的分析通常是在解译图上选择几个代表性的样区，利用精度较高的转绘方法（如转绘仪法）进行转绘，选择一些检验点与地图上的对应点进行比较，求出每一个点的位置误差。整幅地图的位置精度通常用中误差（ $M_p$ ）、最大点误差  $K_{max}$  及点误差大于某一值的百分比来表示。中误差（ $M_p$ ）的计算公式为<sup>[9]</sup>：

$$M_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n K_i^2}{n}} \quad (2-2)$$

式中： $K_i$  为对应点的点误差， $n$  为对应点的个数。

### 2.6.2 类型精度分析

类型精度从理论上来说就是地图上每一个点与地面对应点比较，类型一致的点占全部点的比例。由于地图上的点是无数的，因此，在实际工作中是采用抽样的方法，即在地图上抽取一定数量的样本点进行精度分析。

最少样本个数  $n$  的计算公式为<sup>[10]</sup>：

$$n = pqz^2/d^2, \quad (2-3)$$

式中， $p$  和  $q$  分别表示判读正确和错误的百分比，可以通过对判读结果精度的认识或试探性抽取少量样本进行检验得出； $z$  是对应于置信水平，从正态分布  $z$  值的概率表上所查出的值； $d$  为误差允许范围。

确定抽样点数后，接着要采用一定的抽样方法在地图上确定抽样点。对遥感方法编制的土地利用图的精度分析，通常采用的抽样方式包括：简单随机抽样、集群抽样、分层随机抽样、系统抽样以及分层系统无偏抽样（Congalton 1988）。

航空遥感解译图上抽样点的类型是否正确，在理论上应通过实地检验来确定。但如果每一样点都要去实地检验，在实际工作中往往是很难做到的。同时，遥感制图过程中存在制图综合，也会造成地图上的点与地面对应点的类型不一致，但这不属于判读错误。根据航片判读的特点，可以先通过与航片的对照，对抽样点进行预处理，以减少实地检验的抽样点数，提高精度分析效率，同时也可避免精度分析过程中的盲目性。如前所述，航片判读分为

三种情况，第一种情况是影像特征明显且熟悉；第二种情况是影像特征明显但不熟悉；第三种情况是影像特征不明显。对第一种情况的抽样点，判读错误是由于判读人员在判读过程中的疏忽而造成，因此可以通过与航片的仔细对照来确定判读是否正确；对第二种情况的抽样点来说，抽样点的类型是否一致是确定的，但类型的判读存在不确定性，会造成判读误差，因此，相同影像特征（同一类型）选一、二个抽样点；对第三种情况的抽样点来说，判读误差是由于遥感调查本身存在的缺陷而造成，因此是实地检验的重点。经过预处理后，可大大减少实地检验的抽样点数。

调查结果的类型精度通常是用分类精度矩阵来表示（Congalton 1991）。分类精度矩阵是一个  $m \times m$  的矩阵（ $m$  是类型数），它表示了抽样点中被判读为某一类而经过检验属于该类及其他类的数目。表 2-2 为一个分类精度矩阵的例子。

表 2-2 一个分类精度矩阵的例子

类别	落叶林	针叶林	裸地	灌木林	行数据和
落叶林	65	4	22	24	115
针叶林	6	81	5	8	100
裸地	0	11	85	19	115
灌木林	4	7	3	90	104
列数据和	75	103	115	141	434

根据分类精度矩阵可以得出每一类的精度及总精度。计算总精度的最简单方法是把主对角线的元素值相加，所得到的和除以抽样总数。Congalton 等人在 1983 年提出了利用迭代比例拟合方法（iterative proportional fitting）来计算总精度。该方法不仅考虑了主对角线元素值，而且还考虑到非对角线元素值，因此，所得到的结果更符合实际（Congalton et al, 1983）。

迭代比例拟合方法首先对精度矩阵进行标准化，使矩阵中的每一行和每一列的元素值之和为 1。根据标准化的误差矩阵，计算其主对角线元素之和并除以分类数，即得出分类总精度。

引起航片判读误差的 3 个原因中，前两个是主观原因，可以通过主观努力减少误差；第三个是客观原因，它反映了在特定资料、特定比例尺、特定调查内容下，航片判读存在的固有的判读误差，它决定了调查的可行性。

### 2.6.3 数量精度分析

数量精度是指调查出来的各类土地利用面积数据与实际面积数据的接近程度，这里所说的实际面积数据也是相对的，一般采用统计数据或更精确的调查数据。

某一地类的数量精度  $P_i$  可用如下公式计算<sup>[11]</sup>：

$$P_i = |C_i - R_i| / R_i, \quad (2-4)$$

式中， $C_i$  和  $R_i$  分别为第  $i$  类土地用量算出的面积和实际的面积。

总的分类精度  $P_{总}$  的计算公式如下：

$$P_{总} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m |C_i - R_i|}{\sum_{i=1}^m R_i} \quad (2-5)$$



式中， $m$  为分类数。

图像判读和面积调查是影响数量精度的两个主要原因。从图像判读来说，影像特征不明显的地类，比较容易漏判，面积数据往往偏小，数量精度也较低。从面积调查来说，面状图斑及宽的线状图斑由于直接从图上量算面积，精度较高；而窄的线状图斑由于采用间接方法求算面积，精度较低。在面积调查过程中，有时需要对一些地图上量算出的地类面积数据进行调整，调整的比例越大，该地类的数量精度也就越低。从某种意义上说，数据调整的比例决定了该地类面积数据调查的可行性。

## 2.7 野外实查

野外实查是土地利用遥感调查的重要环节，特别是对不太熟悉的区域。如何选择实查的路线及实查的典型区，对正确判读及提高工作效率有很大影响。野外实查包括两个过程：一是在图像判读时，对一些难以判读的地类通过地面调查来确定，并建立解译标志；二是在精度分析时，对需要检验的抽样点进行实地验证，确定判读的正确与否。在野外实查时，需要注意以下几个问题：

(1) 野外实查前，首先要对图像进行仔细判读，并查询有关资料，决定哪些类型需要通过实地调查才能确定。相同影像特征的点可以选一二个典型点，并尽可能集中在几条线路上。

(2) 有条件的情况下，利用 GPS 进行实地定位（关于 GPS 将在后面讨论）。在没有 GPS 的情况下，调查验证点应尽可能选择易于确定实地位置的点，如居民点附近、河流交叉处等，有的可以选择与它们影像特征基本一致的其他点来代替。

(3) 在野外实查时，还必须了解图像成像与地面实查这段时间间隔中，土地利用的变化情况（有无变化及如何变化）。

(4) 对光谱特征不熟悉的地物，需要通过野外光谱测试确定它们的光谱特性，如有塑料薄膜覆盖的菜地光谱特性。

(5) 除了确定调查点的类型外，还要对各类地物的分布规律进行调查，以利于更好地进行图像判读。

## 2.8 动态分析

土地利用动态调查是调查各类土地利用类型分布及面积的动态变化。动态调查的基本方法是对两个或多个时相的航片进行制图及面积调查，然后互相之间进行比较。从理论上来说，不同时相航片的制图及面积调查方法应当相互协调，即同一图斑具有相同的类型界线及面积数据，这样才能避免由于制图及面积调查方法的不同而形成一些“伪”的动态变化，真实地反映出土地利用类型分布及面积的动态变化。

在实际工作中，为了使两个不同时相的解译相互协调，一个时相的解译图应以另一时相的解译图作为控制（一般是以前一时相的解译图作为控制），作为控制的解译图蒙在另一时相的航片上，勾绘出新的类型界线，然后标上反映类型变化的标号，得出一张动态变化图。为了减少动态变化图的载负量，各类型的标号可用一个英文字母来代替，如农田用  $f$  表示，居民地用  $s$  表示，

道路用 r 表示等等。如果原来的农田变为居民地，则标号为 fs；如果原来的居民地变为道路，则标号为 sr。根据动态变化图，可以解译出另一时相的地图，其中，某些相邻图斑类型从不一致变为一致，需要合并为一个图斑。

面积量算时，同一图斑应具有相同数据。图斑扩大或缩小情况下，量算原先图斑及增加（或减少）部分面积，然后对这两部分面积相加（或相减），得出新图斑的面积。这样，可以避免由于量算过程中的误差造成图斑扩大（或缩小）而量算出的面积反而减少（或增加）的错误。

### 3. 应用实例

#### 3.1 上海市土地利用现状航空遥感调查

改革开放以来，特别是浦东开发、开放以来，上海市城乡面貌发生了巨大变化。为配合上海市城市总体规划修订工作，华东师范大学地理系与上海市航空遥感综合调查办公室合作，应用最新的彩红外航片（1994年10月21日航摄），对上海市土地利用现状进行调查，内容包括全市（包括郊县）1 7.5万土地利用现状图编制及各类面积调查，中心14区（原先10个区加宝山区、闵行区、嘉定区和浦东新区）1 2.5万土地利用现状图编制及各类面积调查。

本次调查有两个特点：以整个上海市作为调查区域进行土地利用航空遥感调查，在上海历史上是第一次；结合上海市城市总体规划修订工作，采用建设部的分类系统。

整个调查工作仅用了4个月的时间，调查成果已通过有关部门的鉴定，并已正式作为上海市城市总体规划修订工作的基础资料。

调查采用了图2-1的工作流程（不包括动态分析）。

由于调查主要是配合上海市城市总体规划的修订，因此土地利用的分类系统采用了建设部的分类系统，其中1 7.5万土地利用现状图除E类（水域和其他用地）分至中类，其他类型均分至大类；1 2.5万土地利用现状图则均分至中类。此外，考虑到上海地区土地利用现状的特点，对分类系统作了适当调整：上海地区目前在建工地及已征用但还未开发的土地较多，因此增加一类待建用地（0）；上海地区牧草地很少，但禽畜场较多，因此，这里的牧草地主要是指禽畜场用地。各类的代码及范围见表2-3。

表2-3 土地利用分类代码及范围

类别代码	类别名称	范围
大类	中类	
R	居住用地	居住小区、居住街坊、居住组团和单位生活区等各种类型的成片的或零星的用地
	R1 一类居住用地	市政公用设施齐全、布局完整、环境良好、以低层住宅为主的用地
	R2 二类居住用地	市政公用设施齐全、布局完整、环境较好、以多、中、高层住宅为主的用地
	R3 三类居住用地	市政公用设施比较齐全、布局不完整、环境一般，或住宅与工业等用地有混合交叉的用地
	R4 四类居住用地	以简陋住宅为主的用地
C	公共设施用地	居住区及居住区级以上的行政、经济、文化、教育、卫生、体育以及科研设计等机构和设施的用地
	C1 行政办公用地	行政、党派和团体等机构用地
	C2 商业金融业用地	商业、金融业、服务业、旅馆业和市场等用地
	C3 文化娱乐用地	新闻出版、文化艺术团体、广播电视、图书展览、游乐等设施用地
	C4 体育用地	体育场馆和体育训练基地等用地
	C5 医疗卫生用地	医疗、保健、卫生、防疫、康复和急救设施等用地

续表

类别代码		类别名称	范围
大类	中类		
C	C <sub>6</sub>	教育科研设计用地	高等院校、中等专业学校、科学研究和勘测设计机构等用地
	C <sub>7</sub>	文物古迹用地	具有保护价值的古遗址、古墓葬、古
建筑、革命遗址等用地			
	C <sub>9</sub>	其他公共设施用地	除以上之外的公共设施用地 M
工矿企业的生产车间、库房及其附			
			属设施等用地
	M <sub>1</sub>	一类工业用地	对居住和公共设施等环境基本无干
扰和污染的工业用地			
	M <sub>2</sub>	二类工业用地	对居住和公共设施等环境有一定干
扰和污染的工业用地			
	M <sub>3</sub>	三类工业用地	对居住和公共设施等环境有严重干
扰和污染的工业用地			
W		仓储用地	仓储企业的库房、堆场和包装加工
			车间及其附属设施等用地
	W <sub>1</sub>	普通仓库用地	以库房建筑为主的储存一般货物的
普通仓库用地			

续表

类别代码	类别名称	范围			
大类	中类				
T	T <sub>4</sub>	港口用地	海港和河港的陆域部分		
	T <sub>5</sub>	机场用地	民用及军民合用的机场用地 S		道路广场用
市级、区级和居住区级的道路、广场					
			和停车场等用地		
	S <sub>1</sub>	道路用地	主干路、次干路和支路用地	S <sub>2</sub>	广场用地
公共活动广场用地					
	S <sub>3</sub>	社会停车场库用地	公共使用的停车场和停车库用地 U		市政公用用地
市级、区级和居住区级的市政公用			设施用地		
	U <sub>1</sub>	供应设施用地	供水、供电、供燃气和供热等设施用		
地					
	U <sub>2</sub>	交通设施用地	公共交通和货运交通等设施用地	U <sub>3</sub>	邮电设施用
邮政、电信和电话等设施用地					
	U <sub>4</sub>	环境卫生设施用地	环境卫生设施用地		
	U <sub>5</sub>	施工与维修设施用地	房屋建筑、设备安装、市政工程、绿		
化和地下构筑物等施工及养护维修设					
			施等用地		
	U <sub>6</sub>	殡葬设施用地	殡仪馆、火葬场、骨灰存放处和墓地		

续表

类别代码		类别名称	范围
大类	中类		
D		特殊用地	特殊性质的用地
	D <sub>1</sub>	军事用地	直接用于军事目的的军事设施用地
	D <sub>2</sub>	外事用地	外国驻华使馆、领事馆及其生活设施等用地
	D <sub>3</sub>	保安用地	监狱、拘留所、劳改场所和安全保卫部门等用地
E		水域和其他用地	除以上各大类用地之外的用地
	E <sub>1</sub>	水域	江、河、湖、海、水库、苇地、滩涂和渠道等水域
	E <sub>2</sub>	耕地	种植各种作物的土地
	E <sub>3</sub>	园地	果园、桑园、茶园、橡胶园等园地
	E <sub>4</sub>	林地	生长乔木、竹类、灌木、沿海红树林等林木的土地
	E <sub>5</sub>	牧草地(禽畜场用地)	畜牧场和养禽场
	E <sub>6</sub>	村镇建设用地	集镇、村庄等农村居住点生产和生活的各类建设用地
0		待建用地	在建工地及已征用但还未开发的土地

航片的原始比例尺为 1:6 万。1:7.5 万的调查直接利用 1:6 万的航片进行判读, 1:2.5 万的调查则把调查区域的航片放大至 1:2.5 万。

图像判读采用 3 种方法: 对影像特征明显且熟悉的地类, 如大多数耕地、园地、林地、水体、居住用地等, 直接判读; 影像特征明显但不熟悉的地类, 如机动车教练场, 通过调查或根据经验进行判读; 影像特征不明显的地类, 如一些军事用地、外事用地, 则根据对已有地图或对调查区域的认识, 反过来在航片上确定这些地类的图斑。

按照遥感制图综合方法对图像上的类型界线进行勾绘。1:2.5 万地图的制图综合程度相对较小, 在制图综合时尽可能保持面积一致, 而 1:7.5 万地图则主要强调正确显示制图区域的基本特征。

1:2.5 万和 1:7.5 万工作底图的编制分别以上海市测绘院编制的相同比例尺地理图作为基础资料, 在聚脂薄膜上勾绘出行政界线、水系、道路等基本要素, 对有变化的水系、道路, 则对照航片进行修正, 如原图上没有杨高路, 根据航片在底图上加上杨高路。

类型界线的转绘是以河流、道路等要素作为控制, 将解译图上的类型界线转到工作底图上。1:2.5 万地图采用透图转绘法转绘, 1:7.5 万地图采用转绘仪法转绘。

在面积调查中, 利用日本索佳公司生产的带微机的数字式求积仪量算面状图斑面积。其中中心 14 个区在 1:2.5 万图上量取, 其他 6 个县在 1:7.5 万图上量取。对制图综合程度较大的地类通过求制图综合系数的方法来对量

算的面积数据进行调整。在本次调查中，主要对农村居民点的面积数据进行调整。

对中心 14 区的农村居民点面积数据，在 1:2.5 万航片上，选择 6 个样区（每个样区的大小约为  $10 \times 10\text{cm}^2$ ），按照前述方法量算出农村居民点的面积，并与地图上量算出的相应的面积数据相比较，求出制图综合系数（表 2-4）。实际面积与量算面积的相关系数  $r=0.994 > r_{0.001}$ ，表明相关性极显著。根据制图综合系数对原来地图上量算出的面积数据进行调整。

表 2-4 不同样区农村居民点制图综合系数（中心 14 区）

样区	实际面积 ( ha )	量算面积 ( ha )	制图综合系数
1	59.19	58.78	-0.69
2	32.86	31.27	-4.84
3	48.36	47.21	-2.38
4	45.53	44.36	-2.57
5	61.64	60.33	-2.13
6	28.96	28.42	-1.86
合计	276.54	270.37	-2.23

对 6 个郊县的农村居民点面积数据，按照农村居民点的分布特点，分成 3 种类型：

（1）以青浦县为典型，包括青浦、南汇全县以及松江和奉贤的部分乡，特点是居民点集中，图斑较大；

（2）以金山县为典型，包括金山全县以及松江和奉贤的部分乡，特点是居民点分散，图斑较小；

（3）以崇明县为典型，居民点呈长条状分布，但居民点之间不是连在一起的。

图 2-10 显示了以上 3 种类型农村居民点的制图综合情况。在 1:6 万航片上，每一类型选择 4 个样区（样区的大小约为  $5 \times 5\text{cm}^2$ ），量算出每一样区内农村居民点的面积，并与地图上量算出的相应的面积数据相比较，求出每一类型的制图综合系数（表 2-5）。3 种类型的实际面积与量算面积之间的相关系数  $r$  分别为 0.9969、0.9530 和 0.9986，均大于  $r_{0.05}$ ，表明相关性显著。根据各个类型的制图综合系数，对原来地图上量算出的面积数据进行调整。

从图 2-10 及表 2-5 中可以看出，第一种类型的制图综合程度较小，量算出的面积与实际面积较接近；第二种类型的制图综合程度较高，量算出的面积与实际面积相比减少较多，最大的将近达到 50%，也就是说图上面积只有实际面积的一半；第三种类型农村居民点的综合一般是一条表示，另一条不表示。假如综合得好，可保持总面积相对一致；如果综合得不好，总面积就会相差很多（减少或增加）。

农村居民点减少（或增加）的面积基本上都增加到（或来自）农田中，因此在面积调整过程，要在农田中减去（或加上）相应面积。

表 2-5 不同样区农村居民点制图综合系数（郊县）



郊县第一种类型

样区	实际面积 ( ha )	量算面积 ( ha )	制图综合系数
1	-13.98	20.88	17.96
2	37.49	35.63	-4.96
3	48.16	44.72	-7.15
4	44.50	43.20	-2.92
合计	151.03	141.51	-6.30

郊县第二种类型

样区	实际面积 ( ha )	量算面积 ( ha )	制图综合系数
1	36.33	19.87	-45.31
2	13.81	10.46	-24.26
3	17.83	14.25	-20.08
4	26.44	17.78	-32.75
合计	94.41	62.36	-33.95

郊县第三种类型

样区	实际面积 ( ha )	量算面积 ( ha )	制图综合系数
1	24.60	21.89	-11.02
2	28.71	27.77	-3.27
3	47.89	52.34	+9.29
4	21.15	19.42	-8.18
合计	122.35	121.42	-0.76

地图上各个地类的位置精度取决于类型界线的转绘。本次调查采用了转绘仪法(1:7.5万地图)和透图转绘法(1:2.5万地图)两种方法。从理论上讲,转绘仪法的转绘精度要高于透图转绘法,因此,着重对1:2.5万地图的位置精度进行分析。在1:2.5万地图上,选择了3个代表性样区,利用转绘仪法把类型界线转绘到聚酯薄膜上,并利用控制点叠置在透图转绘的地图上,量测出一组对应点的点误差,并按公式 2-2 计算出3个样区的中误差。表 2-6 列出了3个样区的位置误差统计。

表 2-6 3个样区的位置误差统计

样区	对应点个数	中误差 $M_p$ ( mm )	最大点误差 $K_{max}$ ( mm )	点误差大于 1mm ( % )
1	37	0.58	1.4	15.5
2	55	0.63	1.3	12.4
3	61	0.55	1.3	8.7

在判读精度分析中,根据对判读情况的定性分析,先假定判读精度为 90%,则  $p=0.9$ ,  $q=0.1$ ;取置信水平为 95%时,  $z=1.96$ ;如误差允许范围  $d=$

±2%，则 n=864。通过与航片进行仔细对照，最后确定需要到实地检验的抽样点分别为 37（1:2.5 万地图）和 61（1:7.5 万地图），均不到理论抽样点的 1/10。

检验结果，1:7.5 万全市土地利用图的判读精度为 92.74%，1:2.5 万分区土地利用图的精度在 94%到 97%之间。

由于缺少参考数据，没有进行详细的数量精度分析，但对经过调整的面积数据进行了分析。根据合计的制图综合系数，对每一种类型的农村居民点，将每一样区的量算面积进行了调整。调整后的面积与实际面积相比较，求出误差系数。然后根据每一样区的误差系数求出该类型平均的误差系数，这个系数表明了调整后的面积数据与实际面积数据相比可能存在的误差。表 2-7 列出了中心 14 区农村居民点及郊县 3 种类型农村居民点的误差系数。

表 2-7 调整后面积数据的误差系数  
(中心 14 区)

样区	实际面积 ( ha )	调整后面积 ( ha )	误差系数 ( Di ) ( % )
1	59.19	60.12	1.55
2	32.86	31.98	-2.75
3	48.36	49.46	2.23
4	45.53	35.37	-0.35
5	61.64	61.71	0.11
6	28.96	29.07	0.37

$$\text{平均误差系数}\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i|}{n} = 1.23。$$

样区	实际面积 ( ha )	调整后面积 ( ha )	误差系数 ( Di ) ( % )
1	20.88	19.17	-8.92
2	37.49	38.03	1.42
3	48.16	47.73	-0.90
4	44.50	46.10	3.47

$$\text{平均误差系数}\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i|}{n} = 3.68。$$

(郊县第二种类型)

样区	实际面积 ( ha )	调整后面积 ( ha )	误差系数 ( Di ) ( % )
1	36.33	30.08	-20.78
2	13.81	15.84	12.82
3	17.83	21.57	17.34
4	26.44	26.92	1.78

$$\text{平均误差系数}\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i|}{n} = 13.18。$$

( 郊县第三种类型 )

样区	实际面积 ( ha )	调整后面积 ( ha )	误差系数 ( D <sub>i</sub> ) ( % )
1	24.60	22.06	-11.52
2	28.71	22.98	-2.60
3	47.89	52.74	9.20
4	21.15	19.57	-8.08

$$\text{平均误差系数}\bar{D} = \sum_{i=1}^n \frac{|D_i|}{n} = 7.85。$$

### 3.2 山西省大宁县土地利用现状航空遥感调查

大宁县位于晋西吕梁山西南的黄土残垣沟壑区。在开展“七五”国家攻关课题“黄土高原水土保持林区遥感综合研究”中，大宁县是其中的一个调查典型县。1989年，华东师范大学地理系利用彩红外航片对大宁县土地利用现状进行了调查，编制了大宁县 1 5 万土地利用现状图（大宁县系列图之一，已由西安地图出版社正式出版），并量算了各类土地利用的面积。大宁县土地利用调查采用三级分类，一、二级类型与全国农业区划委员会的分类系统一致，三级类型按地域性、实用性原则划分。各个土地利用类型及它们在彩红外航片上的判读标志见表 2—8。

表 2-8 大宁县土地利用类型及判读标志

一级类型	二级类型	三级类型	判读标志
耕地	水浇地		随着地面作物的长势、种类、封垆程度的不同而呈现品红、红色调，形状规则，斑块大小不一，内部有明显的线性地物，如沟渠、田埂、道路。分布在昕水河、义亭河沿岸的高河漫滩及一、二级阶地上，一些时令河沿岸也时有分布
	旱地	平旱地	色调呈均匀的浅品红色，形状规则。分布在河流、沟谷的沿岸，起伏平缓
		坡旱地	白底偏黄色调，较均匀，形状不规则，面积大小不一，地面明显倾斜。位于塬、梁、峁及山地的坡部
		塬旱地	呈浅品红色调，均一，形状规则，斑块很大，因作物的影响，内部呈现规则的块状。塬面向塬坡过渡时坡度突然增加。分布在起伏平缓的黄土塬上

一级类型	二级类型	三级类型	判读标志
园地	果园		呈红色斑点状，排列细致、规整，间隔一致，斑块大小不一。多分布在居民地周围的低山丘陵区
	桑园		红褐色点阵排列。分布在沂水河沿岸居民点附近的缓丘
林地	有林地	人工林	呈红褐色、深红色调，呈不规则的条块状，面积较大。位于河川沿岸、农田边缘以及谷坡、沟头
		天然林	均一的红色调，面积大，块状。集中分布在土石山区
	灌木林	浅红色，光滑，均匀，形状不规则。分布在低山丘陵中谷坡的下部	
	疏林地	橙红底色中零星散布着不规则的红色斑点，面积较大。是林地与荒草地的过渡地带	
	未成林造林地	浅黄色背景上呈现隐约可见的排列规则的淡红色小斑点。分布于河川沿岸、农田边缘、沟谷坡地	
牧草地			棕黄色，色调不匀，结构粗糙，面积广大，形状不一。分布在丘陵、沟壑区
农村居民点	城镇		呈青灰色调，形状规则，内部有矩状分异
	农村居民点		灰白色调，间杂有因四旁树而致的红色斑点。形状不规则，结构粗糙
交通过地	公路		呈灰色、青灰色调，细长条带状
	农村道路		黄、白色调，细长条带状
水域	河流		呈青蓝色，形状规则，呈宽窄不一的条带状，弯曲自然
	水库		深蓝色调，均匀，库区出口处有直线状堤坝。分布于沟谷谷底
	滩地		偏白色，均一，有植物时呈浅红色。沿河川分布
未利用土地	荒草地		棕黄色，时有红色零星斑点，杂乱，形状不规则。分布于面积广大的丘陵沟壑地区
	裸土地		灰白色，略偏黄，无条纹，表面光滑。分布在陡急坡地
	裸岩		灰白色，有草被时略偏红色，结构粗糙，多棱角，形状不规则。分布在深切基岩的河谷底部

航片判读按照从已知到未知、由宏观到微观、先整体后局部的顺序进行，对影像特征明显的地类直接判读或通过逻辑推理方法进行判读；对有疑问的地类则标上记号。室内预判读结束后，按照事先设计好的计划和路线，对航空像片进行专题调绘，将标识下来的疑问之处调查清楚，并纠正错判类型。判读出的类型界线勾绘在蒙在航片上的聚脂薄膜上，图斑勾绘的最小面积为4mm<sup>2</sup>。

接下去的工作便是把航空像片上勾绘出的类型界线转绘到工作底图上。针对大宁县属于黄土丘陵沟壑区，高差大、地形破碎等特点，选用单投影转绘仪进行转绘。用单投影转绘仪转绘既能纠正航空像片的倾斜误差，又可以将投影误差限制在允许的范围内。

用中心方向线的方法可以检查土地利用现状图的转绘精度（表 2—9）。

表 2-9 土地利用现状转绘精度

地形	图幅内高程差 ( m )	中误差 ( mm )	最大误差 ( mm )
平原	< 40	0.75	1.5
丘陵	40 ~ 300	1.0	2.0
山地	> 300	1.5	3.0

土地利用现状调查工作的一个重要环节是面积量算。面积量算的方法很多，本项工作采用精度较高的网格法。

图幅的理论面积作为面积量算的一级控制。平差改正后的土地利用各类面积之和等于图幅的理论面积，然后，统计出各类土地利用现状面积。

计算出的耕地图斑面积还需扣除其中的非耕地面积，经抽样调查，得出各个耕地类型在不同地貌单元的非耕地系数（表 2—10）。根据非耕地系数计算出非耕地面积，并在相应的耕地

图斑面积中扣除，即得到净耕地面积。

表 2—10 各种耕地类型在不同地貌单元的非耕地系数

耕地类型 \ 地貌单元	水浇地	平旱地	坡旱地	塬旱地
平原	0.06	0.06	—	0.08
丘陵	—	—	0.14	0.10
山地	—	—	0.18	—

## 参考文献

[1] 中国大百科全书编辑委员会. 1990. 中国大百科全书《地理学》. 中国大百科全书出版社. 542

[2] 张莉等译. 1989. 遥感手册（第十二分册）. 国防工业出版社. 5<sup>[3]</sup> 王长耀主编. 1985. 彩色红外航空遥感技术在天津市土地资源调查中的应用. 测绘出版社

[4] 褚维德等. 1992. 准格尔旗土地利用遥感调查与制图. 见：内蒙古准格尔旗资源遥感研究，中国科学技术出版社

[5] 常庆瑞等. 1994. 彩红外航片在黄土高原土地利用现状调查中的应用.

遥感信息, (3)

[6] 郭焕成. 1984. 土地利用调查与制图方法的初步研究. 地理学报, (3)

[7] 国家计划委员会农业区划委员会、农牧渔业部土地管理局. 1985. 土地利用现状调查手册. 农业出版社

[8] 城乡建设环境保护部. 1991. 城市用地分类与规划建设用地标准. 中国计划出版社

[9] 倪绍祥等. 1992. 准格尔旗 1:5 万土地利用制图精度的研究. 见: 内蒙古准格尔旗资源遥感研究, 中国科学技术出版社

[10] 张超等编译. 1983. 计量地理学导论. 高等教育出版社. 166<sup>[11]</sup> 吴建平, 杨星卫. 1995. 遥感数据分类结果的精度分析. 遥感技术与应用,

### 第三章 陆地卫星遥感方法

#### 1. 基本情况

陆地卫星以探测地球资源和环境为主，可分为传输型和回收型两种。前者是长时间在空间运行（通常为 2~5 年），通过数据传输的方式把卫星接收到的地面信息传输到地面接收站，这类卫星包括美国的陆地卫星、法国的 SPOT 卫星等；后者运行时间较短（一般为几天），通过卫星回收的方式获得卫星接收到的地面信息，如我国在“七五”期间发射的国土普查卫星。

利用陆地卫星遥感方法调查区域土地覆盖/土地利用时，有两种方法：一种是目视解译方法，凭光谱规律、地学规律和解译者的经验，从陆地卫星图像的颜色、纹理、结构、位置等各种特征解译出各种土地利用/土地覆盖类型（主要是土地利用调查）；另一种是计算机图像分类方法，选择分类特征，利用模式识别模型，确定每一像元的土地利用/土地覆盖类型（主要是土地覆盖调查）。

目前，目视解译的方法比较成熟，在实践中有许多成功的应用，如内蒙古自治区的土地利用调查<sup>[1]</sup>，黄土高原水土保持林区的土地利用调查等<sup>[2]</sup>。但目视解译方法的工作量较大，调查速度较慢。计算机分类方法的特点是调查的速度快，符合快速成图的要求。另外，计算机分类法可以识别出像元的每一级灰阶差异，这是目视解译不可能做到的。但计算机分类法在考虑目标物的形状、位置及它们的空间相关性时要比目视解译困难，常常因此影响分类的精度。从目前情况来看，单纯的计算机分类结果无论从精度还是从分类图的可阅读性方面来看，往往不能满足实际应用的要求，必须在分类过程中进行较多的人机交互工作，如英国在 1990 年进行的全国土地覆盖制图（Fuller 1994）、西班牙在加泰罗尼亚地区开展的土地覆盖制图（Vinas et al. 1995）等。目前，计算机分类工作更多的是选择一个子区（通常为 512 × 512 个像元）进行各种方法的试验研究（Wang 1990, Johnsson 1994），真正对一个具体区域的应用研究还很少。尽管如此，从今后的发展趋势来看，随着计算机硬、软条件的逐步完善，与地理信息系统（GIS）及全球定位系统（GPS）更好的结合，计算机分类结果的精度以及分类图的可阅读程度将会逐步提高，加上其本身所具有的优点，将会成为土地覆盖调查的主要方法。

陆地卫星遥感中的目视解译方法与航空遥感中的目视判读方法基本一致，不同之处在于：航空遥感的分类类型主要是单质类型；而陆地卫星遥感由于图像的空间分辨率较低，加上制图比例尺小，分类系统中有比较多的复合类型；航空像片的判读以地类个体的形状作为主要标志；而陆地卫星图像则是以地类的颜色及地类群体的结构作为解译标志；地学分析及土地利用/土地覆盖结构分析在陆地卫星遥感中更加突出。

本章着重讨论计算机图像分类方法。

#### 2. 陆地卫星数据

目前，已有美国、法国、日本、印度等国家发射了陆地卫星，我国除已发射过国土普查卫星外，还计划与巴西合作发射传输型陆地卫星<sup>[3]</sup>。这些卫星所获得的数据是进行区域土地覆盖调查的重要信息源。下面介绍主要的陆

地卫星及它们的数据。

## 2.1 美国的陆地卫星 ( landsat ) 及数据

美国的陆地卫星 ( landsat ) 原名地球资源技术卫星 ( earth re-source technology satellite )。1972 年 7 月 23 日美国发射了第一颗地球资源技术卫星 ( 简称 ERTS—1 )，1975 年 1 月 22 日又发射了第二颗。由于这两颗卫星主要用于全球陆地资源观测，所以在第二颗地球资源卫星发射后，改称为陆地卫星。第三颗陆地卫星于 1978 年 3 月 5 日进入轨道。

landsat1、2、3 号的星体轨道及传感器基本相同，它们被称为第一代陆地卫星。

在 landsat1、2、3 号上均携带 RBV 和 MSS 两种类型传感器。RBV 是一种高分辨率的电视摄像机，由于技术上的原因，它所获得的图像数据不多。MSS 是多光谱扫描仪，是采用对地面逐点扫描的方式获取景物的图像。landsat1、2 号上的 MSS 为 4 个波段的扫描仪，在 landsat3 号上增加了一个热红外波段。各波段对应的波长范围及空间分辨率如表 3—1。

表 3-1 MSS 各波段对应的波长范围及空间分辨率

波段编号	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	空间分辨率 ( m )
4	0.5 ~ 0.6 绿光波段	79 × 79
5	0.6 ~ 0.7 红光波段	79 × 79
6	0.7 ~ 0.8 红-近红外波段	79 × 79
7	0.8 ~ 1.1 近红外波段	79 × 79
8	10.4 ~ 12.6 热红外波段	240 × 240

这 3 颗卫星覆盖全球的周期均为 18 天。

landsat 4、5 号是在陆地卫星后续计划中产生的，它们分别于 1982 年 7 月 16 日和 1984 年 3 月 1 日进入预定轨道。这两颗卫星除了具有 landsat 1、2、3 号的性能外，还作了较大的改进，称为第二代陆地卫星。

卫星的轨道与前三颗基本一致，所不同的是高度及倾角有所变化，覆盖全球的周期由 18 天缩短为 16 天。

传感器除了具有类似于 landsat1、2、3 号上 4 个波段的多光谱扫描仪之外，还带有一套改进的多光谱扫描仪，称为专题制图仪 ( TM )。TM 可以同时获取 7 个波段的数据，这 7 个波段的波长范围及空间分辨率如表 3—2 所示。

表 3-2 TM 各波段对应的波长范围及空间分辨率

波段编号	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	空间分辨率 ( m )
TM—1	0.45 ~ 0.52 蓝光波段	30 × 30
TM—2	0.52 ~ 0.60 绿光波段	30 × 30
TM—3	0.63 ~ 0.69 红光波段	30 × 30
TM—4	0.76 ~ 0.90 近红外波段	30 × 30
TM—5	1.55 ~ 1.75 近红外波段	30 × 30
TM—6	10.40 ~ 12.50 热红外波段	120 × 120
TM—7	2.08 ~ 2.35 近红外波段	30 × 30



landsat6 号于 1993 年夏天发射,但发射后不久就失去了联系( Iannotta 1993)。landsat 7 号计划于 1998 年发射 ( Fuller1994)。这两颗卫星的主要传感器为增强型专题制图仪 (ETM),它保留了 TM7 个波段的波谱和空间特征,但增加了一个地面分辨率为 15m 的全色 (PAN) 波段,该波段的波长范围为  $0.50 \mu\text{m} \sim 0.90 \mu\text{m}$ 。

## 2.2 法国的 SPOT 卫星及数据

法国在 1986 年 2 月 22 日发射了第一颗 SPOT 卫星,1990 年 1 月、1993 年 9 月和 1998 年 3 月又分别发射了 SPOT - 2、SPOT—3 和 SPOT—4。

SPOT—1 卫星携带了两台相同的高分辨率可见光传感器 (HRV),每一 HRV 由一个全色波段和三个分色波段组成 (表 3—3)。

表 3-3 SPOT 卫星各波段对应的波长范围及空间分辨率

波段	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	空间分辨率 (m)
全色波段	0.51 ~ 0.73	10 × 10
绿波段	0.50 ~ 0.59	20 × 20
红波段	0.61 ~ 0.68	20 × 20
近红外波段	0.79 ~ 0.89	20 × 20

HRV 可以通过旋转反光镜对地面进行倾斜扫描。因此,通过对同一地面不同角度的扫描,可以获得立体像对。

SPOT 卫星每 26 天覆盖全球一次,但由于 HRV 具有倾斜扫描能力,同一地面的成像周期,在赤道上可以缩短到 3.7 天,在纬度  $45^\circ$  地区可以缩短到 2.4 天。

据报道,法国决定 2001 年发射 SPOT—5。SPOT—5 为第二代卫星,它同第一代卫星相比,有两项重大改进:一是全色图像和多光谱图像的分辨率分别提高到 5m 和 10m;二是立体成像方式由原来的不同圈轨道上左右倾斜成像改为在同一圈轨道上前后倾斜成像。

## 2.3 日本地球资源卫星 (JERS) 及数据

第一颗日本地球资源卫星 (JERS—1) 于 1992 年初发射入轨。该卫星携带新一代的合成孔径雷达 (SAR) 和光学传感器 (OPS),两种传感器的地面分辨率均为 18m,覆盖周期 44 天。合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar) 是一种有源微波传感器。在卫星运行过程中,SAR 以每秒超过 1500 次的频率向地面发射微波脉冲信号,并用同一天线接收来自地面的反射信号波。

光学传感器 (Optical Sensors) 由 VNIR (可见光和近红外辐射计) 和 SWIR (短波远红外辐射) 组成,用 8 个波段进行对地观测 (表 3—4)。

表 3-4 光学传感器各波段波长范围

波段	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	对应波段	
VNIR	1波段	0.52 ~ 0.60	绿光波段
	2波段	0.63 ~ 0.69	红光波段
	3波段	0.76 ~ 0.86	近红外波段
	4波段	0.76 ~ 0.86 (前方视场)	
SWIR	5波段	1.60 ~ 1.71	近红外波段
	6波段	2.01 ~ 2.12	
	7波段	2.13 ~ 2.25	
	8波段	2.27 ~ 2.40	

其中3波段和4波段所对应的波长范围一致，第4波段前视15.3度，与第3波段组成立体观测。这两种辐射计均采用4096个像元的CCD像机。

## 2.4 印度遥感卫星 ( IRS ) 及数据

印度在1988年3月17日应用苏联火箭发射了第一颗印度遥感卫星( IRS—1A )，1991年发射同型后续卫星 IRS—1B。卫星应用了成像自扫描传感器 ( LISS )，成像系统共有4个波段，覆盖可见光和近红外波段 ( 表3—5 )。

表 3-5 LISS 各波段的波长范围

波段	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	对应波段
1	0.45 ~ 0.52	蓝光波段
2	0.52 ~ 0.59	绿光波段
3	0.62 ~ 0.68	红光波段
4	0.77 ~ 0.86	近红外波段

IRS—1A的成像传感器有两种：一种称为LISS-I，地面分辨率为72.5m；另一种称为LISS—A和LISS B，是两个分开的成像传感器，其地面空间分辨率为36.25m。卫星覆盖同一地面的周期为22天。

1995年，印度发射了第二代遥感卫星 IRS—1C，该卫星搭载了3个类型的传感器：具有23m空间分辨率的LISS-、具有小于10m空间分辨率和立体成像能力的全色波段传感器Pan、具有188m空间分辨率的宽域传感器WFS。WFS主要供植被监测用，设计在两个波段(红与近红外)成像，地面扫描带宽约774km，在赤道上重复覆盖的周期为5天。

## 2.5 欧洲遥感卫星 ( ERS ) 及数据

欧空局 ( European Space Agency ) 于1991年7月发射了第一颗欧洲遥感卫星 ( ERS—1 )。ERS—1是一颗近极地太阳同步轨道卫星，轨道平均高度为785km，倾角为98.5°，卫星从北向南经过赤道上空的时间约为当地时间10点30分，卫星的主要工作周期为35天。

在卫星平台上搭载的仪器共7种，它们分别是：合成孔径侧视雷达 ( SAR )；测风散射计；雷达测高仪；轨道跟踪扫描辐射计和微波探测

器； 精密测距测速仪； 激光反射器； 星载数据处理系统。

上述仪器中，用于土地利用/土地覆盖调查的主要是合成孔径雷达。

合成孔径雷达向地面发射和接收窄束雷达波束，波束相当于地面 100km 带宽。随着天线的运动，SAR 进行成像，根据接收到回波反射值大小的变化，SAR 图像反映出地表的特征。

合成孔径雷达的工作频率为 5.3GHz (C 波段)，极化方式为 VV 型，视场角 23°，有时达 25°，空间分辨率 30m，辐射分辨率 2.5dB ~ 18dB。

### 3. 图像校正

在理想情况下，卫星图像上的像元值只依赖于进入传感器的辐射强度；而辐射强度又只与太阳照射到地面的辐射强度和地物的辐射特性（反射率和发射率）有关，使图像上灰度值的差异直接反映了地物目标光谱辐射特性的差异，从而区分地物目标。而实际上，由于大气层的存在，也由于传感器内探测器性能的差异，使得进入传感器的辐射发生畸变，引起图形模糊，对比度下降等。另一方面，由于卫星飞行时姿态变化及地球形状等因素影响，图像中地物目标的几何位置也会发生畸变。为了使图像更好地满足使用要求，必须尽可能地通过处理消除畸变，恢复图像的本来面目。

#### 3.1 辐射校正

引起辐射畸变的原因主要有两个：大气引起的辐射畸变及传感器引起的辐射畸变。

##### 3.1.1 大气引起的辐射畸变及校正

影响卫星图像数据的大气因素包括大气程辐射及大气光谱透过率两个方面。

大气程辐射是大气对入射辐射的散射，使得一部分散射光进入传感器，改变了地物辐射强度。大气程辐射校正的方法是把每一个像元的值减去大气程辐射值。如果大气均匀，则大气程辐射值为常数。非均匀大气条件下，卫星图像上各像元点大气程辐射值的计算方法与步骤如下<sup>[4]</sup>：

在遥感图像上选取若干小区域（由于范围小，小区域内的大气状况可视为均匀），每个小区域内地形条件相同且有两种以上不同类型的地物，区域内两种不同类型地物的反射率  $r_1$ 、 $r_2$  为已知。利用公式

$$D_A = DN_1 - \frac{r_1 \cdot (DN_1 - DN_2)}{r_1 - r_2} \quad (3-2)$$

计算出每个区域的大气程辐射值  $D_A$ （区域内每个像元的  $D_A$  相同），式中  $DN$  为对应反射率的像元值。根据得到的呈离散分布的大气程辐射值，利用插值计算，得出图像内各像元的程辐射值。

在非均匀大气条件下，大气的光谱透过率也是不均匀的，同样会引起辐射畸变，因此要根据各像元点的大气光谱透过率来校正像元值。

遥感图像上各像元点的大气光谱透过率也是首先求得若干离散分布于图

像上的像元大气光谱透过率，再利用这些已知点值，通过插值计算，逐点计算出图像上各像元的大气光谱透过率。

像元  $(i, j)$  的大气光谱透过率， $\tau_{ij}$  为：

$$\tau_{ij} = (DN_{ij} - D_{Aij}) \cdot \tau_{ij} / (K \cdot r_{ij} \cdot H_{ij}), \quad (3-2)$$

式中，地面辐照度  $H_{ij}$  和像元地面的反射率  $r_{ij}$  由野外同步测定，像元大气程辐射值  $DA_{ij}$  可通过前面的方法精确算出， $K$  为传感器系统的比例系数(增益)，以 MSS-4 波段为例， $K=25.40$ 。

某像元： $DN=26$ ， $r=0.18$ ， $DA=6$ ， $H_{ij}=17.20\text{mw}/\text{cm}^2$ ，则该像元大气光谱透过率  $\tau_{ij} = 0.79$ 。

大气光谱透过率的校正以图像中最大光谱透过率为基准。设  $\tau_{max}$  为图像内最干洁大气的光谱透过率，各像元的大气光谱透过率修正系数  $C_{ij} = \tau_{max} / \tau_{ij}$ ，像元值的校正公式为：

$$DN_{ij} = C_{ij} \cdot (DN_{ij} - DA_{ij}) \cdot \tau_{max} + DA_{ij} \cdot \tau_{max} \quad (3-3)$$

### 3.1.2 仪器引起的辐射畸变及校正

在卫星传感器内，一个波段常常有多个检测器同时工作，接收来自不同地域条带的信号。如在陆地卫星 MSS 中每一波段有 6 个检测器，TM 中每一波段有 16 个检测器，而 SPOT 卫星的 HRV 传感器的全色波段则有 6000 个之多。这些检测器的性能不可能制作得完全没有差别。在辐射能量进入检测器并转变成信号输出时，这种转变是线性关系，如果检测器全部相同，线性的斜率（或叫增益）应该相同，但这往往很难做到；另外，当没有辐射进入检测器时，应该没有信号，而实际上却有微弱信号产生，使得线性关系又在信号轴上产生一个截距（或叫暗流），而且各检测器截距不相同。检测器的这种性能上的差异导致接收的图像不均匀，产生条纹。由仪器本身产生的辐射畸变，多数在产品到达用户手中以前已被资料处理中心校正。因为在设计传感器时已经考虑到这种校正，并在系统内安装了“校准楔”，以提取今后校正所需的数据<sup>[5]</sup>。

## 3.2 几何校正

几何校正可分为两种：几何粗校正和几何精校正。

针对引起几何畸变的原因而进行的校正称为几何粗校正。引起遥感图像几何畸变的原因包括地球自转造成的影响、地球表面曲率的影响、遥感平台位置与运动状态变化的影响以及传感器的影响等。根据产生畸变的原因，利用计算公式和取得的辅助数据可以进行系统校正，这项工作常常就在卫星资料处理中心完成，那里有专门进行系统几何校正的软件包。

由于卫星上仪器提供的姿态信息一般来说满足不了几何校正所要求的精度，因此，为了使遥感图像的几何精度符合制图要求，还需利用地面控制点作进一步校正，称为几何精校正。除了几何畸变校正外，几何精校正还用于图像的投影变换、图像的镶嵌及图像的覆合。

几何精校正最常用的方法是利用二元多项式再采样，包括两个过程：位

置计算和亮度值内插计算。

### 3.2.1 位置计算

精校正的第一步工作是按校正后图像中的每一点找到校正前图像的对应位置。两个图像点的对应关系，一般描述为数学关系：

$$\begin{cases} X = f_x(x', y') \\ Y = f_y(x', y') \end{cases}$$

这个数学关系常表示为二元多项式一次、二次、三次或更高次表达式，如二元二次多项式可以表示为：

$$\begin{cases} X = a_{00} + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{11}x'y' + a_{20}x'^2 + a_{02}y'^2 \\ Y = b_{00} + b_{10}x' + b_{01}y' + b_{11}x'y' + b_{20}x'^2 + b_{02}y'^2 \end{cases} \quad (3-4)$$

计算采用最小二乘法。首先寻找两个图像已知的对应点，称作控制点，这些控制点在两个图像上的坐标分别已知。用最小二乘法和已知控制点坐标求出未知的系数  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$ ，于是找到了两种图像间数学关系表达式的具体表示。然后，依次代入校正后图像的每个像元点的坐标，求出相应的  $X$  和  $Y$  值，完成位置计算。

对于  $n$  次多项式，控制点的最少数目为  $(n+1)(n+2)/2$ ，控制点在图像上的分布应比较均匀，并且为保证控制点本身的准确，一般选用图像上易分辨且目标较小的突出特征。

### 3.2.2 亮度值内插计算

由于位置计算所找到的对应  $X$  和  $Y$  值多数不在原来像元的中心，因而必须重新计算新位置的亮度值。新位置亮度值的计算有 3 种方法可以选择：

(1) 最近邻采样。取被计算点周围相邻的 4 个点，比较它们与被计算点  $(X, Y)$  的距离，哪个点距离最近，就取哪个点的亮度作为  $(X, Y)$  点的亮度值。这种方法计算简单，节省计算机机时，且不引入新的像元值。缺点是改变像元值的几何连续性，原图中某些线状特征会被扭曲或变粗成块状。

(2) 双线性内插。取被计算亮度的点  $(X, Y)$  周围的 4 个邻点，利用  $X$  方向和  $Y$  方向进行 3 次内插，得到  $(X, Y)$  点的亮度值。这种算法与最近邻采样方法相比，线状特征的块状化现象减少，但计算量随之增加。由于双线性内插对图像起到平滑的作用，因此对比度明显的分界线会变得模糊。

(3) 三次卷积内插。取被计算亮度的点  $(X, Y)$  周围 16 个点，采用二维卷积内插。先计算  $X$  方向，每行 4 个像元求出一个中间内插值，然后用这 4 个中间值，求出最终的内插亮度值。与双线性内插相比，三次卷积内插突出的优点是高频信息损失少，但计算时间较长。

内插方法的选择除了考虑图像的显示要求及计算量，还要考虑内插结果对分类的影响，特别是当纹理信息为分类的主要信息时。研究表明，最近邻采样将严重改变原图像的纹理信息。因此，当纹理信息为分类主要信息时，不宜选用最近邻采样 (Roy 1994)。双线性内插及三次卷积内插将减少图像异质性，增加图像同质性。其中，双线性内插结果的变化更为明显，这种变化特性也是在分类时需要注意的。

## 4. 基本的分类方法

基本的分类方法是基于分类地物的光谱信息、基于像元以及基于统计的分类方法，即根据像元在分类特征（波段）上的像元值，选择分类器，利用统计方法对每一像元进行分类。在利用基本分类方法分类时，通常需要对下面一些问题进行研究：分类器的确定；光谱类的确定；选择训练样本产生统计参数；分类特征的选择。

### 4.1 分类器的确定

分类器的种类很多，但主要分为两大类：一类是非监督分类，这种分类没有什么先验知识，依据给定的数学模式分出光谱类别，得到结果后再设法将光谱类别逐一地与信息类别挂钩得到可用的结果；另一类是监督分类，监督分类需要有先验知识，利用对所研究地区地类的了解，划分出“训练区域”，确定判别函数，求出参数，用以“训练”计算机作下一步的分类工作。这种分类得到的结果一般可以直接分出信息类别。

#### 4.1.1 非监督分类

非监督分类按照特征矢量在已选择的特征空间中以类别集群的特点进行分类。非监督分类中常用的方法是聚类法，该方法的主要运算过程如图 3—1所示。距离的计算通常采用欧几里德距离， $d_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2 \right]^{1/2}$ ，即几何直角空间里两点的直线距离。在实际作聚类时，有时经过多次迭代还不能停止，有时由于数据本身的聚类特性不太好，类别重叠，或一些零散点远离各个聚类中心，或过少的点自成中心等，这些都会影响聚类结果。因此常规定一些附加的约束，以提高分类质量。这些约束主要有：

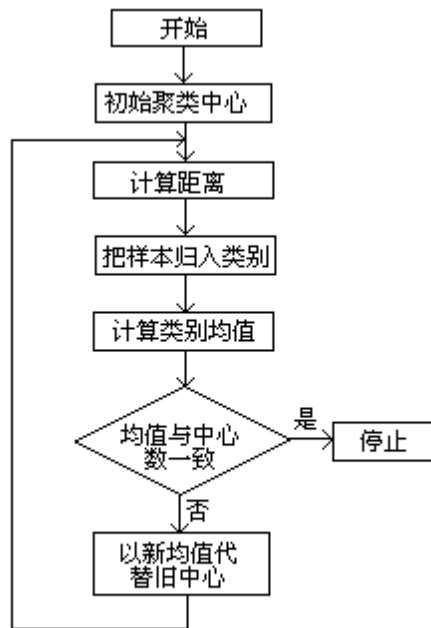


图 3-1 非监督分类流程框图

(1) 设置一个拒绝类。如果这些点距离各类中心都很远，则属于拒绝类而不会被分到某一类中。设拒绝参数为  $T$  距， $d_{ij}$  为最小距离，且  $d_{ij} > T$  距，则  $X_j$  属于拒绝类。

(2) 类合并。当两个聚集中心过近时，将其并为一类。设距离合并参数为  $T_{合1}$ ，如果两类均值距离小于或等于  $T_{合1}$ ，两类合并成一类；若两类均值距离大于  $T_{合1}$ ，则保留这两类。另一种情况，当分到某一类的像元数过少时，去掉此类合并到最近的类别中去。设数目合并参数为  $T_{合2}$ ，计算分类后每类像元数占总像元数的百分比，若百分比小于或等于  $T_{合2}$ ，寻找距这一类均值距离最近的类别合并；若百分比大于  $T_{合2}$ ，这一类保留。类别合并后，需要重复计算各类均值矢量。

(3) 类分裂。有时数据在特征空间某些方向上分布过宽或分布过密，在这一类别中可能不止一个集群中心，这时可以作进一步的分裂。办法仍是检查每一类的像元总数占各类像元总数的百分比。设定一个百分比阈值作为分裂与否的参数  $T_{分}$ ，如果所求百分比中，某值大于或等于这一参数，则对应的类别将被分裂，否则被保留。如果这一类被分裂，要选定两个新的聚类中心。首先计算类别均值矢量  $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$ ，以及标准差矢量  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ ，则规定新的聚类中心为：

$$M_1 = M + S = (m_1 + s_1, m_2 + s_2, \dots, m_n + s_n)^T$$

和

$$M_2 = M - S = (m_1 - s_1, m_2 - s_2, \dots, m_n - s_n)^T。$$

上述方法也称为 ISODATA (迭代自组织数据分析或动态聚类) 方法。

#### 4.1.2 监督分类

在监督分类中，最大似然判别是最常用的一种方法，它假定各类的分布函数为正态，因此，也称为 Bayes 分类。

最大似然分类首先计算像元值矢量  $x$  属于各类的条件概率(判别函数)：

$$P(w_i | x) \quad i=1, 2, \dots, m,$$

$w_i$  代表第  $i$  类，共有  $m$  类。

如果  $P(w_i | x) > P(w_j | x) \quad j \neq i, j=1, 2, \dots, m$  成立，则  $x$  属于  $w_i$ 。

这样的判决比较合理，或者风险最小，错误概率最小。

根据概率理论中的贝叶斯(Bayes)公式，可以求出条件概率

$$P(w_i | x) = \frac{P(w_i)P(x | w_i)}{P(x)} \quad (3-5)$$

$P(x)$  与类别  $w_i$  无关，对各类来说是一个公共因子，作判别时可将  $P(x)$  去掉，这时，判别函数  $g_i(x) = p(x | w_i)p(w_i)$ ，判别规则为：如果

$p(x | w_i)p(w_i) > p(x | w_j)p(w_j), j=1, 2, \dots, m, j \neq i$ ，则： $x \in w_i$ ，式中  $p(w_i)$  是分类图像中类别  $w_i$  出现的概率，可以根据对研究区域的认识来确定，也可以假定各类出现的概率相等； $p(x | w_i)$  是类别  $w_i$  的概率分布，它表示在  $w_i$  这一类别中像元  $x$  出现的机会。最大似然分类假定各类的分布函数为正态，因此，

$$p(x | w_i) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sum_i^{-1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - M_i)^T \sum_i^{-1}(x - M_i)\right] \quad (3-6)$$

式中  $N$  是参加分类的特征数(或波段数)， $M_i$  为均值矢量， $\sum_i$  为类别  $w_i$  的协方差矩阵，其估计值分别为：

$$M_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_j \quad (3-7)$$

$$\sum_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} [(X_j - M_i)(X_j - M_i)^T] \quad (3-8)$$

式中， $n_i$  是类  $w_i$  的像元数目， $j$  为像元标号， $T$  为矩阵的转置， $M_i$  和  $\sum_i$  可通过对样本像元的数据计算来得出。

监督分类中除了最大似然法外，还包括最小距离法、平行六面体法等。监督分类的流程如图 3-2 所示。



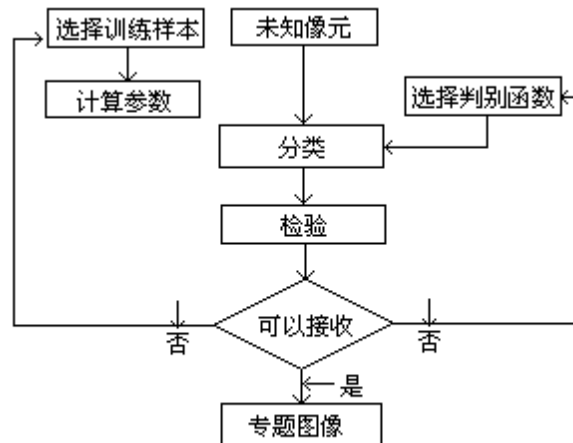


图 3-2 监督分类流程

## 4.2 光谱类别的确定

为了将各波段图像中像元的亮度值与地面景物特征联系起来，必须发现其中的规律。由地物反射率曲线可知，在不同的波段，各种地物反射率有差异。图 3—3 是雪、沙漠、小麦、湿地反射率曲线的例子，按 MSS 波段 1, 2, 3, 4 分段，可以看出各段中它们的反射率的差异。

任意选取卫星图像同一景中的两个或两个以上的波段，以每一波段的亮度（灰度）为轴作多光谱空间，可以发现，对应于地面同一地类的像元点，在多光谱空间内的位置都靠得很近，有聚集的倾向。如图 3—4 中，由于几类地物反射率在波段 1 和波段 3 的不同，凡同一类型的地物，如湿地，亮度接近，并且在波段 1 亮度最小，在波段 3 亮度也最小，因此在二维波段 1~3 空间中，湿地的位置在左下角区域；而小麦亮度在波段 1 较小，在波段 3 却较大，位于光谱空间的左上角，等等。这种同类聚集的特性说明，如果按照地物类别聚集的规律把多光谱空间划分为若干个子空间，每一子空间包含有一个类别，这样就可以对图像中未知的像元进行分类，把它们分配到各自的子空间去。

这种完全按照光谱特征在多光谱空间内聚集的类别称为光谱类（spectral classes）。如果光谱类与分类系统中的类别（称为概念类，conceptual classes）是一一对应的，那么光谱分类的结果就是最后分类结果，分类系统中的类别即为光谱类。但实际上，由于自然界地物光谱的复杂性，以及其他一些因素，在分类时经常会发现同种地类（概念类）有不同的光谱类，即同质异谱，以及不种地类（概念类）属于同一光谱类，即异质同谱现象。因此，不能对所有的分类数据都简单地按照分类系统中的类别进行光谱分类（Richards 1986, Lark 1995）。

造成光谱类与概念类不能一一对应的原因有下列几种：

- （1）外部因素。如传感器本身的辐射误差，云覆盖的影响等。
- （2）同一地类特性的差异。同一地类由于特性的差异会造成光谱特性的不同，如同样是林地，不同类型的林地可能会有不同的光谱特性。即使是同种类型的林地，也会因为生长状况、组成密度的不同而有不同的光谱特性。
- （3）某些地类之间信息差别不分明，如大豆与玉米，云杉与冷杉，它们的光谱特征十分相似，甚至还有重叠的部分<sup>[6]</sup>。

(4) 混合像元。混合像元由几种地物组成，一般以像元中比例最高的地物作为该混合像元的类型。随着各类地物比例的不同，混合像元所反映出的光谱特性可能是新的光谱类，也有可能与其他光谱类混淆。

(5) 类型的定义。分类系统中某些类型所对应的图斑可能不是单质图斑，而是复区图斑。复区图斑的类型一般是按照组成地物的比例来确定，如沙地的类型（流动、半流动、半固定、固定）是按照沙地中植被的比例来确定。

根据光谱类与概念类不能一一对应的关系，通常按下面的方法来确定光谱类：

首先对图像数据进行预处理，消除可能由于外部因素形成的无实际意义的光谱类。

对某一地类（概念类）通过对样本数据进行分析，检验是否符合正态假设，对明显具有多重模态概率函数（即具有一个以上极大点的概率函数）的类别，分成若干光谱类，使一个光谱类正好对应于实际分布中的一种模态。

分析不同地类之间的光谱差异，如小于某一阈值，则合并为一个光谱类。最后得出光谱类别数及对应的光谱类别。

### 4.3 分类特征选择

遥感数据分类中所用的特征数据除了原始的光谱数据外，还包括对原始光谱数据进行各种变换（如比值、线性组合）所得到的新的特征数据，以及其他的非光谱特征数据（如地形、空间信息等）。在实际的分类过程中，对已有的特征数据有时候并不是全部用来参与分类，而是选择一部分特征数据。减少用于分类的数据维数，一方面可大大减少计算量，另一方面，理论和实践表明：当数据维数超过某一限度时，增加特征数不仅不会提高分类的精度，反而会降低分类精度<sup>[7]</sup>。这种矛盾出现的原因是因为选择的训练样本是有限的。图 3—5 是一个实验研究的结果，它表明分类的准确程度随维数增加而增加到一个极大值（图中为三维）后，增加维数反而会降低分类精度。

减少维度的方法主要有以下几种：主成分分析法、最佳指数因子分析（Optimum Index Factor, OIF）及变换离散度分析。

主成分分析是通过 K—L 变换把坐标旋转到数据散布最大的几个方向上。一般来说，取前几个主分量，可以集中所需要的信息，达到特征减少的目的。

最佳指数因子分析是对所有波段的三波段组合方案进行评价。最佳指数因子的计算公式为<sup>[8]</sup>：

$$OIF = \sum_{i=1}^3 S_i / \sum_{j=1}^3 |R_j| \quad (3-9)$$

式中， $S_i$  为  $i$  波段图像的亮度标准差，其值越大，说明数据的离散度越大，所包含的信息量越大，可分性越高； $R_j$  为三波段中任意两波段之间的相关系数，其值越小，表明图像数据独立性越高，信息的冗余度越小。OIF 越大，组合图像的信息量越大，组合方案越佳。

上述两种方法都是从分类图像的总信息量来考虑。但对某一种目的的分

类来说,某些信息可能对分类过程不但没有帮助,甚至妨碍分类,这种信息被称为噪声。某种信息(如土壤信息)在一种应用中(如土壤分类)可能是有用信息,但在另一种应用中(如作物分类)就可能是噪声<sup>[9]</sup>。变换离散度分析是通过分析不同特征组合情况下类型间的可分性,来确定最佳特征数及最佳特征组合的方法。

判断类型间的可分性可用变换离散度来测量。变换离散度( $TD_{ij}$ )的计算公式为(Su 1990):

$$TD_{ij} = 2000[1 - \exp(-D_{ij}/8)], \quad (3-10)$$

其中, $D_{ij}$ 称为散度,它的计算公式如下:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}[(C_i - C_j)(C_j^{-1} - C_i^{-1})] + \frac{1}{2} \text{tr}[(C_i^{-1} - C_j^{-1})(M_i - M_j)(M_i - M_j)^T] \quad (3-11)$$

式中 $\text{tr}[A]$ 表示矩阵A的迹, $C$ 是类型*i*和*j*训练样本的协方差矩阵, $M$ 是类型训练样本的均值。当对这两个类型进行分类时, $D_{ij}$ 是错误概率大小的间接指示,因此,对于为分类目的而选出的各种候选的特征集合,它能提供一种表示它们相对有效性的度量,对于任何一对给定的特征子集,只要算出这两个子集的离散度,并选取离散度最大者,便能确定出最优子集。

变换离散度是一种“对间的”(pairwise)距离度量,对于多类问题,一个常用的解决办法是利用平均变换离散度,即计算全部类对(pairis of classes)的变换离散度的均值。平均类对变换离散度 $TD_{ave}$ 的定义如下:

$$TD_{ave} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P(w_i)P(w_j)TD_{ij} \quad (3-12)$$

这是一个以类型先验概率为权重的加权平均值。

下面是一个利用变换离散度分析选择分类特征的例子。

在利用TM数据进行上海市菜地分布信息提取中,通过计算不同波段组合情况下,菜田与其他地类之间的平均类对变换离散度来选择最佳的分类特征。整个研究区域共分出14个光谱类(水体3类、城镇居民点4类、道路、农村居民点、油菜、麦子、其他植被休闲农田和菜地),在工作站上,利用PCI遥感图像处理软件中的变换离散度计算模块,计算出不同波段组合(不包括TM—1和TM—6)情况下,菜地与其他光谱类之间的变换离散度,然后根据公式(3—12)计算出平均类对变换离散度(表3—6),其中 $P(i)$ 是通过对2、3、4三波段分类结果进行统计得出。

从表3—6中可以看出, $TD_{ave}$ 最大的波段组合为(3,4,5,7)和(2,3,4,5,7), $TD_{ave}$ 均为899.53;其次为(3,4,7), $TD_{ave}$ 为899.52。波段多, $TD_{ave}$ 不一定大; $TD_{ave}$ 最小的波段组合为(4,5,7), $TD_{ave}$ 为859.64。

#### 4.4 样本像元的选择及纯化

监督分类是遥感数据信息提取中最常用的一种方法。在监督分类中,首先是选择训练样本,通过对样本像元的像元值进行分析,得出每一类型的统计特征量,然后根据统计特征量对整个图像的所有像元进行分类。训练样本的选择对分类结果有很大影响,不同的训练样本,所得到的分类结果有时会

有很大差异。

表 3—6 不同波段的组合情况下菜地与其他光谱类的平均类对变换离散度 ( $TD_{ave}$ )

波段组合	$TD_{ave}$
2, 3, 4	896.66
2, 3, 5	888.42
2, 3, 7	894.90
2, 4, 5	899.38
2, 4, 7	899.45
2, 5, 7	892.63
3, 4, 5	899.33
3, 4, 7	899.52
3, 5, 7	895.19
4, 5, 7	859.64
2, 3, 4, 5	899.48
2, 3, 4, 7	899.15
2, 3, 5, 7	895.36
2, 4, 5, 7	899.51
3, 4, 5, 7	899.53
2, 3, 4, 5, 7	899.53

为了保证分类结果有较高精度，首先是要保证有足够数量的训练样本。实践表明，如果要对  $n$  个特征的数据进行分类，训练样本的数目至少要不小于  $10n$ ，能达到  $100n$  则更好。只有这样，才能获得各类别统计参量的精确估计；其次，选择的样本像元应具有代表性，即训练样本的统计特征量与该类型总体统计特征量相接近。分布在不同位置的同类地物，由于自然、社会等因素的影响，光谱特性往往会有一些差异，样本像元的选择应尽可能与该地类的分布相一致，避免集中在局部位置上。

从理论上讲，选择的样本像元不但类型要与训练样本的类型相一致，而且还要排除类型一致但光谱值异常的像元。但在实际操作中，由于用目视方法选择样本像元，因此很难保证做到这一点。训练样本中存在不合要求的像元，将会影响分类结果的精度。因此，为了提高分类结果的精度，需要对训练样本进行纯化。

训练样本的纯化是剔除训练样本中不合要求的像元，可以通过像元的光谱信息和空间信息来判断像元是否符合要求<sup>[10]</sup>。

从光谱信息上来判断，如果样本像元与训练的类型在光谱上是可分的，即像元值与该训练样本类中心的距离大于某一阈值时，确认该像元的值异常，为不合要求的像元。可以通过对像元进行分类或计算像元值与类中心的距离来判断像元是否符合要求。

从空间信息上来判断，边界像元往往都是非纯像元（混合像元），因此，可以根据每一像元与周围像元的方差值的大小来确定是否是非纯像元。

选择上海市嘉定区一个区域的 TM 图像数据作为实验，图像尺寸为  $300 \times 300$  像元。该区域的主要土地覆盖类型包括农田（除菜地）、菜地、城镇居

民点和农村居民点 4 种类型。

训练样本纯化的方法如下：

利用 IDRISI 图像处理软件显示该图像，然后分别选取这 4 个地类的训练样本，产生原始的样本像元图像，图像上样本像元的值表示选择样本时，该像元所属训练样本的类型，非样本像元的值为零。

根据样本像元对图像进行分类，得到分类图像。如果样本像元图像上样本像元的值与分类图像上对应像元的值不一致，则表示该样本像元的类型与选择样本时该像元所属的类型在光谱上是可分的，即属于不合要求的像元，应当在样本像元图像中剔除。剔除的方法是对分类图像和样本像元图像进行相减，在相减结果图上把值不等于零的像元（不合要求的样本像元及非样本像元）置为零，把值为零的像元（类型一致的纯像元）置为 1，产生一幅二值图像，该图像可用来剔除利用光谱信息判别出的不合要求像元。

计算每一像元与相邻 4 个像元的方差，以计算出的方差值作为该像元的值，得到一幅反映边缘像元的图像。利用 IDRISI 图像处理软件显示该图像，通过目视分析，选择 100 作为阈值，把像元值大于 100 的像元置为 1，把其他像元置为零，即得出另一幅二值图像，该图像可用来剔除利用空间信息判别出的不合要求像元。

上述两张二值图像相乘，所产生的新的二值图像再乘上原始样本像元图像，即得出经纯化后的样本像元图像。

样本像元经纯化后，利用两个指标对纯化的效果进行分析。第一个指标是类间发散度，表 3—6 显示了三个波段（TM—2、3、4）情况下，纯化前后类间发散度的变化。纯化后的类间发散度普遍高于纯化前的类间发散度。

表 3—7 类间发散度比较

(a) 纯化前类间发散度

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点
农田	0.00			
菜地	17.60	0.00		
城镇居民点	133.19	22.44	0.00	
农村居民点	117.31	18.40	2.86	0.00

(b) 纯化后类间发散度

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点
农田	0.00			
菜地	32.95	0.00		
城镇居民点	369.42	61.42	0.00	
农村居民点	189.50	25.59	12.60	0.00

第二个指标是分类精度，选择 374 个抽样点，通过检验，得出训练样本纯化前后分类结果的误差矩阵（表 3—8）。根据误差矩阵，利用迭代比例拟合方法得出纯化前后分类总精度，即标准化精度（表 3—9）。分类前后的标准化精度分别为 85.63% 和 91.25%。

表 3—8 分类结果的误差矩阵

(a) 纯化前

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点	行数据和
农田	112	7	2	2	123
菜地	8	87	4	2	101
城镇居民点	2	4	68	9	83
农村居民点	4	3	5	55	67
列数据和	126	101	79	68	374

(b) 纯化后

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点	行数据和
农田	117	6	1	0	124
菜地	4	90	2	1	97
城镇居民点	2	3	73	6	84
农村居民点	3	2	3	61	69
列数据和	126	101	79	68	374

表 3—9 标准化的误差矩阵

(a) 纯化前

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点	
农田	0.881	0.068	0.026	0.025	标准化精度
菜地	0.064	0.858	0.053	0.025	= 3.425/4
城镇居民点	0.015	0.037	0.841	0.106	= 85.63 %
农村居民点	0.039	0.036	0.080	0.845	

(b) 纯化后

类型	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点	
农田	0.930	0.054	0.016	0.000	标准化精度
菜地	0.036	0.910	0.037	0.017	= 3.650/4
城镇居民点	0.012	0.020	0.898	0.070	= 91.25 %
农村居民点	0.023	0.017	0.048	0.912	

## 5. 空间信息辅助分类

基于光谱信息的分类存在着一些缺陷：

(1) 有些地类在光谱上难以区分，如水库与河流。

(2) 当地类的图斑不是均质图斑时，图斑内像元的分类结果往往不是该图斑的类型，而是组成图斑的地类类型。如城镇居民点图斑的分类结果往往是由水体、植被以及不同类型的建筑等所组成。当遥感图像的空间分辨率提高时，这种现象更为明显，即基于光谱的逐个像元分类技术不会由于空间分辨率的提高而获得更高的分类精度，相反，可能会获得较差的分类精度 (Rosenfield 1981, Williams et al. 1984, Irons et al. 1985)。

许多研究表明，在常规的光谱分类中加入空间信息，能提高分类精度 (Swain et al. 1979, Franklin and Peddle 1989)。遥感图像中的空间信

息包括两种类型(Alonso et al. 1991)：纹理(texture)和相关(context)。纹理是指地类图斑中色调的空间变化特性；而相关则是指不同地类像元之间的空间关系。

### 5.1 纹理信息

有许多方法可以表示纹理信息。

(1) 均值和标准偏差，图斑内像元的平均值和标准偏差。

(2) 灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix)，均值和标准偏差只考虑像元的值，而不考虑像元的位置，因此，像元组成一致、排列不同的图像计算出的值一致。灰度共生矩阵不仅考虑像元的值，而且考虑像元在空间中的排列。

设  $(x, y)$  是一个空间位移， $M$  是  $k \times k$  矩阵，矩阵中第  $i$  行  $j$  列元素的值表示空间相隔为  $(x, y)$  的两个像元，其灰度值分别为  $i$  和  $j$  出现的频率， $0 \leq i, j \leq k-1$ ， $k$  为像元灰度级数。举例： $f$  为一个图像，

1	1	2
0	2	1
0	0	1
1	0	1

是  $(1, 0)$ ，那么  $M$  是

2	1	2
1	2	1
0	1	2

矩阵  $M$  的大小取决于灰级数，与图像的尺寸无关，如上例中灰阶数为 3，则  $M$  为  $3 \times 3$  矩阵。接近对角线的元素对应灰

级基本相等的像元对，远离对角线的元素对应灰级相差较大的像元对。矩阵  $M$  中各个元素除以图像中位移为  $(x, y)$  的像对数，所得到的矩阵  $P$  称为灰度共生矩阵(Rosenfeld 1982)。灰度共生矩阵能提供图像灰阶空间分布的有用信息。例如，组成图像的基本图斑(即灰阶接近的图斑)尺寸为  $s$ ，如果  $(x, y)$  的长度小于  $s$ ，那么矩阵  $P$  的高值将集中在主对角线附近，因为空间相隔为  $(x, y)$  的像元对灰阶接近的概率较高。换句话说，如  $(x, y)$  的长度大于  $s$ ，那么矩阵  $P$  中的值将分散。

在实际应用中， $(x, y)$  的选择通常不大于组成图像的图斑尺寸，常选用 1。

利用灰度共生矩阵  $P$  还可进行一系列统计分析(Haralick 1979)：

(a) 反差(contrast)： $CON = \sum_i \sum_j (i - j)^2 P_{ij}$ ，当矩阵，

$P$  中值集中在对角线附近时，反差小；反之，反差大。

(b) 同质性(homogeneity)： $HOM = \sum_i \sum_j P_{ij} / [1 + (i - j)^2]$ ，

当矩阵  $P$  中值集中在对角线附近时，同质性大。

(c) 角二次力矩(angular second moment)： $ANG = \sum_i \sum_j P_{ij}^2$ ，

当矩阵  $P$  中各个元素的值相等时，ANG 值最小；值相差大时，ANG 值大。

$$(d) \text{ 平均信息量 (entropy) : } ENT = - \sum_i \sum_j P(i, j) \log P_d(i, j),$$

当矩阵 P 中各个元素的值相等时, ENT 最大; 当矩阵中的值为对角线集中时, ENT 是小的。

### (3) 分形维数

自从美国数学家 B.B.Mandelbrot 1975 年创立分形几何学 (fractal geometry) 以后, 分形理论在过去的二十几年中发展迅速, 并逐渐将纯数学研究同自然科学和计算机应用结合起来, 它的应用几乎涉及了自然科学的各个领域, 甚至于社会科学。在遥感领域中, 分形理论的应用从目前来看主要有三个方面: 分析遥感图像的结构信息量; 辅助遥感图像分类; 模拟遥感图像。其中辅助遥感图像分类是利用分形维数 (fractal dimension) 来描述图像的纹理特征, 并作为一种空间信息叠加到分类信息中。

分维的定义有许多种, 包括 Hausdoff 维数、相似维数、盒维数、容量维数等。其中盒维数的数学计算及经验估计相对容易一些, 是应用较广泛的维数之一。

盒维数的定义如下: 集合 S 由  $N(L)$  个 E 维、线长为 L 的盒子覆盖, 若整个 S 包含在一尺寸为  $L_{\max}$  的盒子内, 则  $N(L)$  个子集中的任一个将落在尺寸为 L 的盒子内, 应有

$$N(L) \times r^D = C。$$

其中, 比例因子  $r = L/L_{\max}$ , D 为分维值, C 为常数。则可得:

$$D = \frac{\log N(L)}{\log r} \quad (3-13)$$

实验证明, 不同的纹理结构具有不同的分形维数。可将每幅图像看成三维物体, 对应任一像点的三维坐标为  $[x, y, f(x, y)]$ , 其中  $(x, y)$  是像点在图像平面的位置,  $f(x, y)$  是该像点的灰度值, 则在纹理细密处, 灰度起伏较大, 分维值也较大; 在纹理平滑处, 灰度变化平缓, 分维值较小。分形维数一般用来描述物体的整体特征, 但考虑到遥感图像分类中处理的是图像的像元点, 因此需要获得每个像元点的分维值, 才能同各波段的灰度值一起, 来进行图像分类。

可以用某点相邻像元的灰度变化来求该点的分维。计算任一像元  $(x, y)$  的分维值方法如下。

如图 3—6 示, 以像元点  $(x, y)$  为中心, 作正东—正西、正南—正北、东南—西北、东北—西南等 4 向轴, 按给定度量尺码 L 截取有效计算范围  $[0, L]$ , 沿各方向分别计算分维 (图 3—7)。任取  $r \in (0, L)$ , 令  $r = b - a$ ,  $0 < a < b$ , 设

$$n(r) = \frac{|f(b) - f(a)|}{r} + 1$$

其中,  $f(b)$ ,  $f(a)$  是相应像点的灰度值。取尽所有可能的 a 值, 可得  $n(r)$  的平均值



$$\overline{n(r)} = \frac{\sum_{a=0}^{L-r} n(r)}{L-r+1} \quad (3-14)$$

令  $N(r) = \overline{n(r)} \frac{L}{r}$ ，并取尽所有可能的  $r$  值，可得  $N(1)$ 、 $N(2)$ 、...、

$N(L)$ 。由最小二乘法可拟合出  $\log N(\quad)$  与  $-\log(\quad)$  之间的斜率，即为  $(x, y)$  点沿该方向的分维值  $D_i(x, y)$ ，其中  $i = 1, 2, 3, 4$ ，分别代表 4 个方向的分维分量。根据特定图像的特点，取 4 向分维的平均值或最大值作为该点的分维，也可由 4 个分量共同组成该点的分维向量。

从理论上讲，对不同的纹理，用来测量分维的度量尺码也有不同的有效范围，多尺码测分维的方法，是将不同尺码对应的分维值组成分维向量，然后设置适当的比例因子来调整，以使不同纹理突出对应不同尺码的分维分量。但在分类识别前，无法用不同的尺码去分别测量不同纹理的分维，而只能用同一度量尺码去获得每点的分维。

纹理信息可以在分类中作为分类特征。但必须注意到，如果选择的分类方法为最大似然分类，那么，首先要对纹理信息的正态性进行分析。一个分类特征是否符合正态分布的条件可以用概率描绘法或  $\chi^2$  检验方法来检验。

下面介绍  $\chi^2$  检验法<sup>[11]</sup>：

在图像上选取样本像元，利用样本像元得出均值及方差的估计值  $\bar{\mu}$  和  $\bar{\sigma}^2$ 。要检验的假设为：

$$H_0 \quad \sim N(\bar{\mu}, \bar{\sigma}^2)$$

对像元值  $x$  进行变换  $Z = (x - \bar{\mu}) / \bar{\sigma}$ ，化  $x$  为标准正态变量  $Z$ 。把  $Z$  值划分为  $k$  个组，统计出每一组内的像元数  $f_i$ ，并通过正态分布表查出每一组内的理论频率  $(P_i)$ ，乘上总像元数  $(n)$  后，即得到理论像元数，根据公式可以得出每一组统计量  $\chi^2$ ，整个样本的统计量  $\chi^2$  为每个组统计量  $\chi^2$  之和：

$$\chi^2 = \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} \quad (3-15)$$

统计量的自由度为  $k-3$ ， $k$  为组数。通过查表可确定在某一水平下能否接受  $H_0$ ，即该分类特征是否服从正态分布。

## 5.2 相关信息

在光谱分类中结合相关信息的基本思想是：一个像元的地面覆盖类型与相邻像元的地面覆盖类型不是独立的，即一种地面覆盖类型与各种地面覆盖类型（包括本身）相邻有不同的概率，这种概率可以被结合到光谱分类中去（Alonso et al., 1991）。

如某幅图像上，农田与农田相邻的概率最大，林地与林地相邻的概率最大，弃耕的未利用土地（杂草地）与城镇居民用地相邻的概率最大。当某一像元从光谱上并不明显属于这 3 类中的某一类，这时就可以根据相邻像元的类型来确定它的类型。如相邻像元之中农田的像元最多，则该像元分为农田；林地最多，则分为林地；城镇居民地最多，则分为未利用土地。

1978年, Toussaint把序列复合决策理论引入到相关信息与光谱信息相结合的分类中(Toussaint 1978)。接着,其他一些学者也提出了一些类似方法(Swain et al, 1981, Khazenie and Crawford 1990, Kartikeyan 1994)。这种基本的方法可以被总结如下(Alonso 1991):

设分类的图像数据是由  $m \times n$  的多光谱数据组成;  $X_{ij}$  为第  $i$  行、第  $j$  列像元的  $n$  维光谱值矢量;  $k$  是该像元所属的类,  $C = \{1, 2, \dots, k\}$ ,  $C$  是可能出现的类集; 设仅仅考虑分类像元周围的  $N$  个相邻像元,  $N$  通常为 2、4 或 8, 像元的组成分别如下:

$$\begin{aligned} N_2 &= \{(i-1, j), (i+1, j), (i, j)\} \\ \text{或 } N_2 &= \{(i, j-1), (i, j+1), (i, j)\}, \\ N_4 &= \{(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), \\ &\quad (i, j+1), (i, j)\}, \\ N_8 &= \{(i-1, j-1), (i-1, j+1), (i+1, j-1), \\ &\quad (i+1, j+1), (i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), \\ &\quad (i, j+1), (i, j)\}. \end{aligned}$$

对每个像元, 可以计算出其属于每一类的判别函数值  $g$ , 当某一类的  $g$  为最大, 则该像元被定义为该类。像元  $(i, j)$  属于类  $k$  的  $g$  值表达式为:

$$g_k(X_{ij}) = \sum \left[ P(I_c = w_k) \prod_{l=1}^N (P(X_l | T_l)) \right]$$

$$I_c = \{T_l, l=1, 2, \dots, N\}. \quad (3-16)$$

式中,  $I_c$  为  $N$  个相邻像元可能出现的类型组合;  $P(I_c | k)$  为在像元类型为  $k$  的情况下, 相邻像元各种类型组合出现的概率, 可以从同一图像非相关分类的结果图上获得;  $P(X_l | T_l)$  是在每一类型组合情况下, 类型组合中第 1 个像元属于类型  $T_l$  的概率密度,  $T_l$  为该类型组合中第 1 个像元的类型值。

相关分类对于消除呈零星分布的噪声是很有效的。

由于相关分类的算法比较复杂, 与光谱分类相比, 需要更多的计算时间, 因此, 一般只用于面积较小的区域。

## 6. 基于图斑的分类

前面所讨论的分类(基本的分类及结合空间信息的分类)都是基于像元的特性来进行分类。近几年来的一些研究表明, 基于图斑特性的分类所得结果的精度往往要高于基于像元特性的分类(Megier et al. 1984, Pedley 1991)。

基于图斑的分类, 首先是要对分类图像图斑化, 使得图像中每个像元的值为该像元所在图斑的特征值。图斑的特征值除了像元所具有的光谱和空间特征值外, 还具有形状和大小特征值。一些具有相同光谱特性而形状不同的地物, 如河流和水库, 公路和体育场, 可以用形状指数来区分。形状指数的计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$I = \sqrt{S} / P \quad (3-17)$$

这里,  $S$  是地物的面积,  $P$  是地物的周长。一个复杂或狭长的地物总是具有较小的形状指数值; 相反, 一个简单或圆形的地物则具有较大的形状指数

值。图斑的大小也是识别地物的一个重要信息，如农村居民点与城镇居民点的区分。

图斑生成（图斑化）有下面几种方法：

(1) 图像初分类

利用基于像元的分类方法对图像进行初分类，然后，利用图像处理软件中分组模块（如 IDRISI 中 group）对初分类结果的图像进行分组并编号（即相同像元值并且相邻的像元并成一组，组内像元具有相同编号）。通过与原图像的叠置，可以得出每一组（图斑）的光谱及空间统计值（如像元均值、均方差等），图斑的尺寸、周长也可以根据相应模块得出。这些特征值赋予图斑中的每一像元，即完成图像的图斑化过程。

(2) 图像分割（image segmentation）

图像分割的方法很多，最常用的分割方法包括区域增长（Levine and Shaben 1978）、分裂与合并（Laprade 1988）以及多分辨率等方法。

下面是区域增长的方法。

从图像的左上角开始，逐列逐行处理每一像元，一直到图像右下角。利用像元的特征值比较检测像元与周围图斑（像元的值表示像元所在图斑的特征值）的相似性，如果相似性满足某一指标，检测像元被合并到最相似的相邻图斑中，如果像元与任一相邻图斑的相似性都不满足指标，则这个像元作为一个新的图斑。一旦像元被合并到图斑，则这个图斑的概率密度函数被更新。选择的特征值除了像元光谱值外，还可以是纹理信息，这时，一般用  $3 \times 3$  的窗口代替单一像元。

对某一图斑  $R_k$ ，设该图斑有  $n_k$  个窗口（如  $3 \times 3$  窗口），每一窗口有一个特征值  $T_k(i)$ ， $i=1, 2, \dots, n_k$ 。对图斑  $R_k$  来说，有一个平均特征值及标准偏差：

$$\mu_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} T_k(i) \quad (3-18)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{n_k} \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} (T_k(i) - \mu_k)^2 \right\}^{1/2} \quad (3-18)$$

当一个窗口合并到图斑后，图斑的均值及标准偏差需要重新计算。新的均值  $\mu'_k$  及标准偏差  $\sigma'_k$  的计算公式为：

$$\mu'_k = \frac{1}{n_{k+1}} (T_w + n_k \mu_k) \quad (3-20)$$

$$\sigma'_k = \left\{ \frac{1}{n_{k+1}} \left[ n_k \sigma_k^2 + \left( \frac{n_k}{n_{k+1}} \right) (T_w - \mu_k)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (3-21)$$

式中， $T_w$  为窗口的特征值。

窗口与相邻图斑的相似性常以偏差  $k$  来确定：

$$k = |T_w - \mu_k|。$$

$k$  越小，则相似性越大。如果  $k \leq \Theta k$ ，则子区被合并到图斑，如果不止一个图斑符合条件，则合并到  $k$  为最小的图斑中。

$$k = |T_w - \mu_k|$$

式中， $\Theta$  是一个常数，特征值为均值时，理想的  $\Theta$  值通常是 15 ~ 20 或 50 ~

55；特征值为标准偏差时， $\Theta$ 值通常在 90 ~ 120。图像分割时，选择的特征值可以不止一个，这时合并的条件是每一特征的相似性都要满足条件。

如果不止一图斑满足要求，则合并到  $\sum_{q=1}^m [ \sigma_k(q) ]^2$  最小的图斑中，公式中  $q=1, 2, \dots, m$ ， $m$  为特征数。

### (3) 图斑界线数字化

对分类区域已有的土地覆盖图进行数字化，并且进行栅格化，利用控制点对地图与图像进行几何配准。接着，利用图像初分类中图斑化方法提取每一图斑的特征值，并赋予图斑中每一像元。图斑界线的数字化也可以通过屏幕解译的方法来实现，这时，图斑界线更能符合实际情况。

上述三种图斑化方法，前两种方法工作量较小，但图斑的生成是假定每一图斑是由同一地类组成或组成图斑的像元（窗口）具有相近的特征值。因此，当图像比较简单的情况下，生成图斑与实际情况比较符合；而当图斑比较复杂时，图斑化的结果与实际情况就会有较大差异。第三种方法的图斑化结果比较符合实际情况，另外，分类情况可以直接以地图形式输出，尽管第三种方法的数字化工作量较大，但数字化好的地图可以作为本底资料，以后只要对一些变化的界线进行适当修改，就可用来对图像进行图斑化。

图像图斑化后，利用基于像元的分类方法对图像中的每一像元进行分类。

下面一个例子比较了基于像元的分类和基于图斑的分类。实验区域位于嘉定区南翔镇附近。利用 IDRISI 图像处理软件在屏幕上对图像进行数字化，然后，利用 GROUP 模块对图斑进行分组编号，共有图斑 218 个。

选择的分类特征包括 3 个光谱特征（TM—2、3、4）及一个纹理特征（TM—4 波段的标准偏差），已经证明，显示光谱空间变化的标准偏差分布接近正态分布（Arai 1993）。

原始 3 个波段图像的图斑化是计算各个波段中每一图斑内的平均值，为避免一些“噪声”像元值的影响，在计算均值时，去掉最大和最小两端各 2.5% 的像元；基于像元分类的纹理特征是计算原图像上  $3 \times 3$  像元矩阵的标准偏差，基于图斑分类的纹理特征则是通过计算每一图斑内像元值的标准偏差而得出。

共确定了 7 个土地覆盖类型：农田、菜地、园地、城镇居民点、农村居民点、交用地及水体。在图像上选择了 569 个像元作为训练样本，根据训练样本得出的分类参数对图像进行分类

（基于像元的分类和基于图斑的分类）。

分类结果以图斑为单位进行检验，对基于像元分类的结果首先要进行图斑化，以图斑内像元最多的类型作为该图斑的类型。用于对照的参考资料是 1 2.5 万彩红外航片（1994 年 10 月成像）。经过对照得到的分类精度矩阵如表 3—10 所示。两种方法的判对率（分类正确的图斑数与总图斑数之比）分别为 83.94% 和 91.28%。

表 3-10 分类精度矩阵  
(a) 基于像元的分类

类别	农田	菜地	园地	城镇居民点	农村居民点	交通用地	水体	分类图斑数
农田	28	2	1	1	4	1	0	37
菜地	2	27	2	0	2	0	0	33
园地	1	1	21	0	2	0	0	25
城镇居民点	0	0	0	10	1	1	1	13
农村居民点	2	1	2	3	76	1	1	86
交通用地	0	0	0	0	1	7	0	8
水体	0	0	0	1	1	0	14	16
参考图斑数	33	31	26	15	87	10	16	218

(b) 基于图斑的分类

类别	农田	菜地	园地	城镇居民点	农村居民点	交通用地	水体	分类图斑数
农田	28	2	0	0	2	0	0	32
菜地	1	28	1	0	2	0	0	32
园地	2	0	24	0	3	0	0	29
城镇居民点	0	0	0	15	0	0	0	15
农村居民点	1	1	1	0	79	0	1	83
交通用地	0	0	0	0	0	10	0	10
水体	1	0	0	0	1	0	15	17
参考图斑数	33	31	26	15	87	10	16	218

## 7. 基于神经网络的分类

神经网络是 80 年代中期迅速兴起的一门非线性科学,它在遥感分类中的应用目前尽管还处在初级阶段,但由于其所具有的一些优点,已日益引起人们的注意。许多学者对神经网络用于遥感图像分类进行了尝试,如 Yoshida 等人利用神经网络进行土地覆盖分类 (Yoshida and Omatu 1994);章杨清等人利用神经网络并引入分维向量进行土地覆盖分类。

神经网络与传统分类方法的区别在于: 在处\* 问题时,人工神经网络并不基于某个假定的概率分布;在非监督分类中,从特征空间到模式空间的映射是通过网络的自组织来完成,是一种聚类过程;在监督分类中,网络通过对训练样本的学习,获得网络的权值,形成分类器。神经网络通常具有较好的容错特性,有利于解决遥感模式的“同物异谱”和“异物同谱”问题。

神经网络的模型很多,其中 BP (back-propagation) 网络是目前应用较多的一种多层神经网络;BP 网络在分类时,首先是根据样本数据网络本身进行自学习,然后利用学习结果对整个图像进行分类。BP 网络的结构如图 3—8 所示,网络由分为不同层次的节点集合组成,每一层的节点输出送到下一层节点,这些输出值由于连接权值不同而被放大、衰减或抑制。除了输入层外,每一节点的输入为前一层所有节点输出值的加权和,每一节点的激励值由节点输入、激励函数及偏置量决定。

如图 3—8 所示，输入模式的各分层作为第 1 层各节点的输入，在第 m 层，第 j 个节点的输入值为：

$$\text{net}_{mj} = \sum_{i=1}^{N_{m-1}} W_{mij} I_i \quad j=1,2,\dots,M \quad (3-22)$$

这里，M 为第 m 层的节点数， $I_i$  为上一层第 i 个节点的输出值； $W_{mij}$  为上一层第 i 个节点对 m 层第 j 个节点的权重； $N_{m-1}$  为 (m-1) 层的节点数。节点的输出值为：

$$O_{mj} = f(\text{net}_{mj})。$$

其中，f 为激励函数，常选 S 型函数：

$$O_{mj} = \frac{1}{1 + e^{-(\text{net}_{mj} + \theta_{mj})/\theta_0}} \quad (3-23)$$

$\theta_{mj}$  为偏置量， $\theta_0$  的作用是改变激励函数的形状。

继续前推，在第 n 层，第 j 个网络节点的输入值为：

$$\text{net}_{nj} = \sum_{i=1}^{N_{n-1}} W_{nij} I_i，$$

输出值为：

$$O_{nj} = f(\text{net}_{nj})。$$

在学习阶段，设网络输入样本  $X_p = \{X_{pi}\}$ ，期望输出值为  $O_j = \{O_{pk}\}$ ，网络系统输出值为  $O_j = \{O_{pk}\}$ ，对每一输入模式样本，平方误差  $E_p$  为：

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k (X_{pk} - O_{pk})^2 \quad (3-24)$$

而对于全部学习样本，系统的均方误差为：

$$E = \frac{1}{2P} \sum_p \sum_k (X_{pk} - O_{pk})^2 \quad (3-25)$$

为了使 (3-25) 式收敛，调整连接权值与偏置值，每次调整的增量  $W_{mij}$  与梯度  $-\partial E / \partial W_{mij}$  成正比，即：

$$\begin{aligned} W_{mij} &= - \frac{\partial E}{\partial W_{mij}} \\ &= \theta_{mj} O_i \end{aligned} \quad (3-26)$$

为一常数， $\theta_{mj}$  为误差函数， $O_i$  为隐藏层输出值，对输出单元：

$$\begin{aligned} \theta_{mj} &= (O_j - O_j) f'(\text{net}_{mj}) \\ &= (O_j - O_j) O_j (1 - O_j)； \end{aligned}$$

对隐藏单元：

$$\begin{aligned} \theta_{mj} &= f'(\text{net}_{mj}) \\ &= O_j (1 - O_j)。 \end{aligned}$$

通过学习得到各层各节点的权系数，然后对图像数据进行计算，得到输出结果，根据其结果与每类期望值之间的精度，与哪类相比精度高就归为哪类。

基于 BP 神经网络的分类过程可用框图 (图 3-9) 表示。

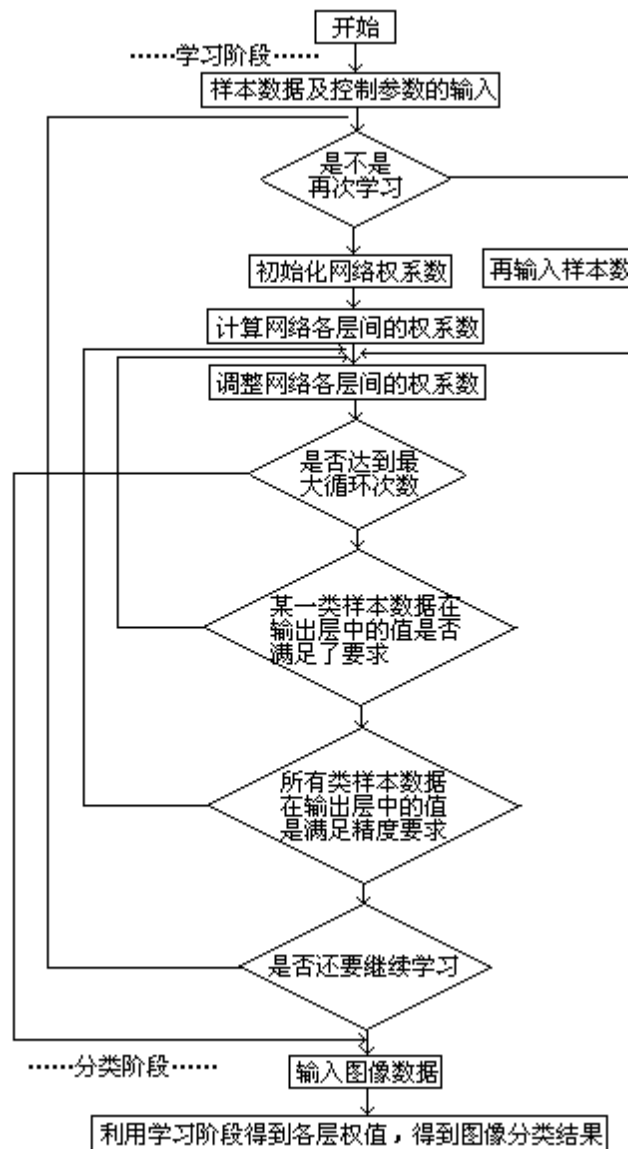


图 3-9 基于 BP 神经网络的分类过程框图

## 8. 基于知识的分类

常规的分类方法是基于统计原理，分类结果有时不太稳定。为了提高分类结果的稳定性，一些学者提出了基于知识的分类方法（Taylor 1986，Wharton 1987）。

基于知识的分类模拟了人的目视判读过程，它通常是把一个分类的问题分解成一个树状的层次结构，图 3-10 为一个土地覆盖层次结构的示意图。

一旦土地覆盖的层次结构建立，接着就要为每一土地覆盖类型建立知识规则。通常是下面一些信息来构建知识规则（Ton et al. 1991）：

### （1）专业的光谱知识

专业的光谱知识可以从遥感的有关文献中获得，如植被指数在区分植被和非植被方面是有效的；水体的光谱值随着波长增加而递减等。

### （2）根据训练数据获得的光谱规则

遥感文献可提供不同土地覆盖类型一般的光谱特性，但不是具体的规则。在利用特定的遥感图像对土地覆盖类型进行分类时，定性的光谱知识需要转化成更加具体定量的光谱规则，如知道了植被的植被指数是高的，但究竟多高则需要根据训练数据来获得。

### (3) 空间信息

在分类中，光利用光谱信息是不够的，空间信息也需加入到分类规则中去。空间信息包括地物的形状、大小以及地物之间连接的特性。

对图像中的每一个像元，可以选择一些特征，根据分类像元的特征值以及规则库中该特征所描述的规则对像元进行分类。如规则库中对植被指数  $b_{ij}^v$  ( $b_{ij}^v = NIR / VIS$ ) 这一特征有以下规则：

$$\text{像元}(i, j) \text{ 为} \begin{cases} \text{植被} & \text{如果 } b_{ij}^v > 2.5 \\ \text{非植被} & \text{如果 } b_{ij}^v \leq 1.5 \\ \text{不确定} & \text{其他情况下} \end{cases}$$

假如计算出该像元的植被指数为 3.27，则该像元被划分为植被。接下去利用其他特征，根据像元的特征值及规则库中的规则进一步划分，一直到不可再分为止。

## 9. 精度分析

### 9.1 定位精度

陆地卫星数据分类结果的定位精度分析，可以用如下方法进行 (Hall et al 1991)：

在分类地图上选择若干个图斑及控制点，把这些图斑及控制点描绘在透明聚脂薄膜上，并利用控制点与参考图（一般选用航空遥感解译图）相叠置。在每一图斑内任意确定一个点，每隔  $30^\circ$  作一条发射线（图 3-11），形成 12 条发射线，在每一发射线上，分类图与参考图对应点的位置误差  $D_i$  的计算公式为：

$$D_i = [(X_{i2} - X_{i1})^2 + (Y_{i2} - Y_{i1})^2]^{1/2} \quad (3-27)$$

$D_i$  的符号按照位移的方向确定，一般是朝向中心的为负值，远离中心的为正值。

对某一图斑，12 个方向偏差的平均值  $D_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} D_i$ ，12 个方向绝对偏差的

平均表示图斑的绝对偏差  $D_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} |D_i|$ 。整个分类结果位置偏差的平均值  $\bar{D} =$

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m D_j, \quad m \text{ 为选择的图斑数。}$$

### 9.2 类型精度

陆地卫星遥感数据分类结果的类型精度分析与航空遥感判读结果的类型



精度分析基本上是一致的，所不同的是分类图上样本点的正确与否通常是与参考图（一般为航空遥感解译图）上对应点的比较来确定。参考图可以通过数字化的方式输入到计算机图像处理系统中，按遥感数据的空间分辨率，把参考图的矢量数据转换成栅格数据，利用控制点对两张图进行配准，编制一个相应软件，对两张图上对应抽样点的类型代码进行比较，即可得出分类精度矩阵中各个元素的值，即两张图上不同类型对应的像元数。由于分类图存在着位置误差以及地图在成图过程中经过一定的制图综合，对处在两种类型边缘的抽样像元来说，这种误差和制图综合可能会造成检验误差，为避免或减少这种情况，可以在样本像元的四周建立一个有一个像元宽的缓冲带，当抽样像元与缓冲带上任一像元的类型不一致时，就删去这一抽样像元，并重新选择其他抽样像元进行补充，使得每一抽样像元四周至少都有一个相同类型的像元（Swain 1978）。

### 9.3 数量精度

陆地卫星数据经土地覆盖分类后，可以得出各个土地覆盖类型的像元数。根据研究区域（一般为行政区）的统计面积数据与该区域的总像元数，可以得出每一像元所代表的实地面积，再乘上各个类型的像元数，求出它们所对应的实地面积。

数量精度的计算在前面已经介绍过，这里不再重复。

如果陆地卫星图像的像元都为纯像元（即由同一类型的土地覆盖组成），则判读精度越高，分类的数量精度也越高（反过来则不然）。但实际上，陆地卫星图像上的像元都为纯像元的情况一般是不存在的，特别是在地形比较复杂或土地覆盖比较复杂的地区，混合像元的出现是普遍的。由于现在讨论的分类是基于一个像元一种类型（混合像元分解的方法将在下一章讨论），因此，混合像元中必定有一些类型被综合掉了。一般情况下，当地类的空间分布尺度比空间分辨率小得多时，那么它被综合的概率要大于其综合其他地类的概率，计算出的面积就会偏小，相应，其他一些地类的面积就会增加。对一个像元一种类型的分类，这种数据的误差并不是分类方法的原因造成，而是遥感数据本身就存在的。

## 10. 分类的稳定性分析

对同一地区的土地覆盖调查来说，监督分类所得到的结果与3个因子有关：分类特征、分类模式及样本像元。由于样本像元的选择带有一定的随机性，不同的人以及同一人在不同时间所选择的样本像元不可能是完全一致的。由于样本像元不同，分类所得出的结果也必然会有一定的差异。因此，评价一种分类（分类特征及分类模式）对一个地区土地覆盖调查的有效性，除了对某一分类的结果进行评价外，还需要对其分类结果的稳定性进行分析。

分类的稳定性分析可采取如下方法：根据每一地类训练样本的统计特征，利用随机数产生软件为每一地类产生一系列模拟的训练样本。根据模拟训练样本进行分类，比较不同训练样本所得结果，计算出每种地类分类结果的标准偏差及整个图像分类结果的标准偏差。

进行上述方法的前提是原始训练样本所得到的统计代表该类型真实的分布。因此，首先要确定原始训练样本所得到的统计是否代表该类型真实的分布。可以选择检验区来判断检验区与训练区的统计是否一致，即它们是否是同一分布的样本（ $\mu_1 = \mu_2$ ）。可采用 t 检验方法，每一波段的 t 值可利用如下公式计算（Snedecor and Cochran, 1967）：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad (3-28)$$

这里：

$$S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \left[ S^2 \left( \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right) \right]^{1/2},$$

$$= S^2 \frac{S_1^2 + S_2^2}{2},$$

$S_1^2$ 和 $S_2^2$ 是训练区和检验区的方差， $n_1$ 和 $n_2$ 是训练区和检验区的样本容量。

如果所有波段的 t 都小于  $t_{0.05}$ ，表明在 95% 置信度下零假设可以接受，训练样本的统计能反映类型的真实分布。

下面以上海市嘉定区的一个子区（300 × 300）作为例子进行分析。子区内共有 4 个地类：农田（除菜地）、菜地、城镇居民点和农村居民点。选择训练样本得出每一地类的统计特征（TM-2、3、4）（表 3-11）。为了确定训练样本的统计能否反映类型的真实分布，选择检验区得出每一地类的统计特征（表 3-12）。按公式(3-28)，计算出各个类型不同波段的 t 值（表 3-13）。通过查表可知，每一 t 值均小于  $t_{0.05}$ ，表明训练样本的统计能反映类型的真实分布。

表 3-11 训练样本的统计特征

波段	农田		菜地		城镇居民点		农村居民点	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
TM-2	35.45	0.9106	38.56	1.9354	40.15	2.7811	38.89	1.8405
TM-3	31.68	1.6053	39.60	3.2659	43.54	4.1922	40.85	3.5663
TM-4	84.76	8.6773	57.79	4.7692	42.57	5.1499	49.39	6.5480

表 3-12 检验样本的统计特征

波段	农田		菜地		城镇居民点		农村居民点	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
TM-2	35.56	1.3122	38.55	0.8285	41.04	2.5877	38.95	1.2095
TM-3	32.35	2.4715	39.76	0.9134	44.35	4.3117	41.47	1.9240
TM-4	82.38	8.3593	59.68	3.9668	45.13	6.8978	51.36	4.2612

表 3-13 各个地类在不同波段上的 t 值

波段	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点
TM-2	0.42	0.03	1.42	0.16
TM-3	1.40	0.28	0.81	0.93
TM-4	1.21	1.79	1.80	1.53
	$n_1=341$ $n_2=20$	$n_1=128$ $n_2=20$	$n_1=209$ $n_2=20$	$n_1=217$ $n_2=20$

接着，利用 IDRISI 软件中的有关模块来产生模拟训练样本。方法如下：  
按照训练样本的统计特征，各个类型的每一波段利用 random 模块产生一个随机图像，共  $4 \times 3=12$  个随机图像。任意选一幅图像，利用屏幕数字化方式在图像上任意数字化 10 个区域，利用统计特征生成模块 (makesig) 每次为一个地类生成 10 套模拟训练样本。在分类时，每次分类选择一套模拟训练样本，分类结果计算出每个地类的像元数。比较每次分类所得的像元数，可以计算出每个地类分类的标准偏差及整个图像分类的标准偏差（表 3-14）。

表 3-14 10 套模拟训练样本的分类结果

项目	农田	菜地	城镇居民点	农村居民点
1	36623	23492	11342	18543
2	36095	22360	12118	19427
3	36336	23049	11375	19240
4	36476	22746	11491	19287
5	36360	22596	11698	11346
6	36015	23516	11144	19323
7	36341	23408	11930	18321
8	36610	23016	11924	18450
9	36210	23146	11777	18869
10	36385	23356	11259	19000
均值 ( Mean )	36345	23069	11606	18981
均方差 ( SD )	189	376	312	392
	SD=1269			

整个图像分类的标准偏差为 1269，占整个图像的 1.41%。

## 11. 土地覆盖变化分析

土地覆盖变化分为季节变化 (seasonal change) 和年度变化 (annual change)。季节变化是指在落叶植物上看到的那种以一年为周期的变化，如农田就明显地呈现这种变化。年度变化是指高尔夫球场建设及森林采伐等的变化，一般来说它们是一些非周期的或单方向的变化。

在图像中，季节变化和年度变化往往混杂在一起，但在大多数情况下要检测的是年度变化。由于季节变化通常比想像的更为复杂，如在寒冷地区，往往 10 天 ~ 15 天就会产生很大的变化。因此，在检测土地覆盖变化时，必

须很好地了解目标地物的季节变化特性。

利用两个不同时相的陆地卫星图像数据分析土地覆盖变化有三种方法：分类图与分类图比较、图像与图像比较以及多时相图像分类。

(1) 分类图与分类图比较，利用相同的分类系统分别对两个图像进行分类，分类结果进行几何配准，比较对应像元的类型，得出分析结果。该方法不仅能得到像元的土地覆盖变化情况（是否变化），而且还能得到变化的类型。但由于单个图像的分类结果存在着不确定性，因此，经常会出现一些错分现象，即类型没有变化的像元被错分成类型发生变化。

(2) 图像与图像比较，选择某一波段的两个时相图像，进行几何配准并对对应像元的像元值进行相减处理，得出每个像元的土地覆盖类型是否发生变化。该方法首先要对非土地覆盖变化所引起的光谱变化进行订正，最主要的是对大气、光照等外部因素的变化所引起的光谱变化进行订正。采用的办法一方面是选择受大气影响较小的长波段图像，如 TM-7 波段图像，另一方面在图像上选择一些类型没有变化的高反射和低反射像元，对对应的像元值进行比较，确定两个图像的平均像元值差异，并以一个时相的图像为基准，对另一时相图像上的每一像元值减去（或加上）平均像元值差值（Green et al. 1994）。对地类本身特性的变化所引起的光谱变化，如含水量的变化，植被生长状况的变化，可以结合其他的一些数据来区分，如两个时相的植被指数差值。该方法能比较有效地确定像元的土地覆盖类型是否变化，但也会发生一些类型没有变化的像元被错分成类型发生变化。

(3) 多时相图像数据的分类（Martin and Howarth 1989），利用某一波段两个时相的图像数据进行分类，分类方法同单时相遥感图像的分类方法一致。分类的类型既包括静态类型（如农田、居民点、水体等），也包括动态类型（如农田转化为居民点，水体转化为农田等）。该方法能克服前两种方法存在的易出现错分的缺陷，但类型及训练样本不易确定。

利用不同时相的陆地卫星图像分析土地覆盖变化，首先必须解决好不同时相陆地卫星数据的高精度几何配准问题。由于卫星在运行过程中会发生轨道偏移，卫星探测的姿态也可能发生细微的变化，加之不同接收站配置的软硬件不尽相同，故预处理出的不同年份同一景的陆地卫星图像之间会产生几何位移。前面已经谈到通过选择控制点，以多项式进行匹配拟合的几何精校正方法，一般可保证校正精度达到一个像元，这对许多应用项目来说，已满足要求，但对土地覆盖变化分析来说，要求配准误差越小越好，最好能减少到半个像元以内，避免由于像元错位而造成“伪变化”信息。为实现这个目标，可以通过改进控制点选取技术，即对控制点像元进行分解，取其局部（可称为子像元）作为配准依据，这样就能提高控制点对的定位精度<sup>[13]</sup>。

## 12. 应用实例

### 12.1 上海市菜地分布现状遥感调查

掌握菜地分布现状是进行菜地规划及“菜篮子”工程建设的重要前提。近几年来，随着上海市城市建设的发展，菜地分布状况有了很大变化，迫切需要一张详细反映全市菜地分布现状的地图及相应的面积数据，为有关部门的规划和决策提供及时、准确和客观的信息。

华东师范大学地理系与上海市气象科学研究所合作应用 Landsat TM 资料对上海市的菜地分布现状进行调查，编制了全市菜地分布现状图，并求算出了分乡（镇）菜地分布面积。菜地分布信息提取的整个过程如图 3—12 所示。

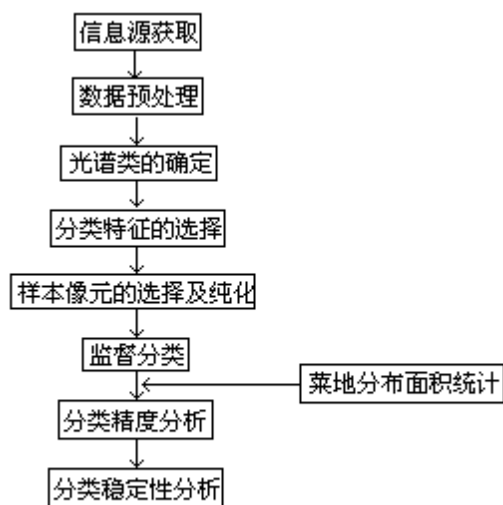


图 3-12 上海市菜地分布信息提取过程框图

根据上海市蔬菜种植的季节特性，5 月～6 月是蔬菜调查的最佳时相。此时，全市菜地种植最多，几乎无白地；塑料棚菜地的覆盖也已撤掉。但由于受到信息源的限制，最终选择了相对较好的时相，成像时间为 1995 年 4 月 8 日的 TM 数据。

由于覆盖整个上海市的 TM 资料需要两景，分别为宁波幅和上海幅，为了构成一幅完整的上海市图像，首先把两景资料合并成一景，并利用计算机中已有的上海市 1:10 万行政区划图对 TM 数据进行几何精度校正。

按照前面所述的确定光谱类的方法，共确定 12 个光谱类（水体 3 类、城镇居民点 4 类、道路、农村居民点、油菜、麦子、其他植被、休闲农田以及菜地）。

计算不同波段组合情况下，菜地与其他光谱类之间的平均类对变换离散度  $TD_{ave}$ ，得出  $TD_{ave}$  最大的前三位分别为（2, 3, 4, 5, 7）、（3, 4, 5, 7）及（3, 4, 7），前两个组合的  $TD_{ave}$  均为 899.53，后一个组合的  $TD_{ave}$  为 899.52。考虑到增加一个特征将会大大增加计算工作量，因此，选择了 3, 4, 7 三个波段作为分类特征。

对每一个光谱类分别选取训练样本，共选取样本点 734 个。利用训练样本纯化的方法对训练样本进行纯化，纯化后的训练样本点为 657 个。

根据选取的训练样本，利用监督分类的方法对图像数据进行土地覆盖分类。行政界线与分类结果图像相叠置，提取出各乡（镇）的菜地分布面积，其中全市的菜地分布面积为 8 925.5ha。

由于没有比较可靠的参考图件及数据，精度分析着重是对类型精度进行分析。另外，考虑到本次调查的重点是常年菜地，因此，精度分析的范围是有常年菜地的乡（镇）。根据最少样本个数的计算公式，取置信水平为 95%，误差允许范围  $d = \pm 1\%$ ，并先假定分类精度为 90%，计算出最少样本个数  $n = 3 456$ 。利用图像处理软件中抽样点产生模块，在分类结果图像上产生随机样点，在检验区域内实际产生的样点为 3 574 个。通过与彩红外航片（1994

年 10 日成像, 比例尺 1 : 2.5 万) 对照及少量实地验证, 分析菜地分类精度。

通过分析得出, 分类结果图像上为菜地、实际也为菜地的像元 122 个; 分类结果图像为菜地、实际为非菜地的像元 7 个; 分类结果图像上为非菜地、实际为菜地的像元 7 个。分类精度可用两种方式表示, 一种是分类正确的像元数与实际为菜地的像元数之比, 称为分类者精度, 表示某一类像元被正确分类的概率, 对应的误差称为漏分误差 (omission errors); 另一种是分类正确的像元数与分为菜地的像元数之比, 称为使用者精度, 它表示分类结果图上一个像元的类型与实际类型相一致的概率, 对应的误差称为错分误差 (commission errors)。本次调查的分类者精度和使用者精度分别为 94.59% 和 96.06%。造成分类误差的主要原因是: 一些园地与菜地光谱接近, 被错分为菜地; 休闲菜地没有分出来。

对分类结果进行稳定性分析, 得出菜地分类结果的标准偏差为 53ha, 占分类出的菜地面积的 0.59%。

## 12.2 英国土地覆盖制图 (Fuller et al. 1994)

为满足环境研究和规划中对土地覆盖信息不断增长的需求, 英国陆地生态研究所通过对 Landsat TM 数据进行最大的似然分类, 编制了英国土地覆盖图。整个工作包括 Landsat TM 图像的获取, 几何纠正和图像配准、最大似然分类、分类结果修正、与参考数据比较、地图编制等几个过程。

### 12.2.1 陆地卫星 TM 数据的获取

选择的 TM 数据的基准年是 1990 年, 但考虑到由于云的覆盖, 有些区域没有 1990 年的 TM 数据, 因此, 选择的数据也包括 1990 年前后两年的数据。为了能更好地区分具有季节变化的不同作物以及常年的半自然植被, 分类的 TM 数据包括夏季和冬季两个时相。理想的“夏季”时相是主要作物生长季节 (5 月中旬到 6 月下旬), “冬季”时相是初霜 (10 月中旬) 到春季 (3 月中旬), 不同高度和纬度区域的理想时相需要相应变化。整个研究利用了 46 景陆地卫星图像。

### 12.2.2 几何校正和图像配准

在 I<sup>2</sup>S Model75 和 IVAS 图像处理系统上, 利用 1 : 50000 军用地图上的控制点及 System 600 软件把夏季的 TM 数据配准到英国国家网格 (BNG) 上, 然后利用三次卷积重采样进行多项式拟合转换, 输出对应地面 25 × 25 m<sup>2</sup> 的像元。冬季数据根据校正后的夏季图像上的控制点进行重采样并进行配准, 最后得到包括 6 个波段的图像数据, 夏季和冬季各三个, 每一时相都为 Landsat TM—3、4 和 5。

### 12.2.3 最大似然分类

土地覆盖类型包括海水、内陆水、海滩、裸地、城镇居民点、乡村居民点、耕地以及 18 种半自然的植被, 共 25 个类型。

训练区的选择是通过野外踏勘，每一景 Landsat 图像野外踏勘到的图斑大约 1200 个，整个调查的图斑约 30 000 个。根据踏勘获得信息，利用人机交互方式勾绘出最大、最单一的图斑。大多数覆盖类型被进一步划分成光谱子类，如地形起伏的区域，大多数覆盖类型有明显的光照和阴影的变化。比较典型的，在训练中每景有 70~80 个光谱子类可以被定义，每一子类尽可能有 5 个或更多的训练区，100~200 个像元，如训练区面积小、数量少，最少也需 30 个像元。

根据训练数据对图像中其他像元进行分类。

#### 12.2.4 分类结果处理

对最大似然分类结果存在的一些错误分类，利用掩膜方法进行处理。

##### (1) 云、云阴影及雪掩膜处理

云的存在导致云下地类的信息被掩盖，造成错误分类，在 TM3 波段上定义一个亮度阈值，像元值大于这个阈值的像元即认为是云像元，并以单一时相的分类数据来代替原先的分类数据。同样，云阴影的存在也会造成错误分类，定义一个低的亮度阈值，检测云阴影像元并以单时相分类结果数据代替。某些冬季时相图像上有雪存在，为消除雪的存在造成的分类错误，在 TM 3 波段上定义一个亮度阈值，大于这个阈值的像元以夏季时相图像的分类数据来代替。

##### (2) 海陆土地覆盖类型混淆的处理

在分类结果图像上，海滩与城镇、海水与内陆水、盐沼与耕地经常发生混淆，通过在分类图像上勾绘出海岸线，检测陆地上的“沿海土地覆盖类型”以及海洋上的“陆地土地覆盖类型”，对检测出的像元以相邻像元的类型代替。

##### (3) 居民点内部像元错分的处理

居民点内植被和建筑物复杂交错。利用夏季和冬季时相分类，当两个时相没有完全配准时，会造成一些像元具有耕地的特性，即一个时相是裸露的，另一个时相有植被覆盖，这将导致居民点中的某些像元被错分成耕地。通过勾绘出居民点的界线，保留居民点内正常的类型，如树木、水体、草地、建筑物，对分类类型为耕地的像元以相邻像元的类型代替。

#### 12.2.5 与参考数据比较

分类结果同两个参考数据进行了比较，一个是 90 年全国范围分层抽样调查结果；另一个是英国北部  $10 \times 10\text{km}_2$  的高沼地地区地图。

1990 年，结合航片解译，在全国范围内对 508 个  $1\text{km}^2$  的样区进行实地调查，调查结果记录在 1:10 000 的军用地图上。利用 ARC/INFO GIS 软件对地图进行数字化，其中的 143 个样区的矢量数据被转换成栅格数据，以像元为单元，与分类图进行比较。比较结果，类型一致的为 67%，如果排除边界像元，一致性上升到 71%，排除由于调查时间不一致造成的差异，则一致性为 76%（包括边界像元）和 82%（不包括边界像元）。

$10 \times 10\text{km}^2$  的高沼地地区地图的比例尺为 1:25000，通过数字化输入到计算机中并栅格化，与分类图进行了比较，两者类型相一致的为 89%。

## 参考文献

- [1] 赵济, 梅安新, 王静爱. 1987. 内蒙古自治区土地利用现状的遥感分析. 见: 内蒙古草场资源遥感应用研究, 内蒙古大学出版社
- [2] 王长耀等. 1990. 晋陕黄土高原水土保持林区土地利用遥感调查与制图. 见: 黄土高原水土保持林区遥感综合研究, 中国科学技术出版社
- [3] 李德仁. 1995. 航天技术在测绘、遥感和地理信息系统中的应用. 地球科学进展, (5)
- [4] 李先华等. 1994. 卫星遥感数字图像的非均匀大气修正研究. 遥感技术与应用, (2)
- [5] 彭望录. 1991. 遥感数据的计算机处理与地理信息系统. 北京师范大学出版社
- [6] 承继成等. 1986. 遥感信息的机制与模糊性. 遥感信息, (3)
- [7] 李德熊. 1987. 遥感技术. 北京工业学院出版社
- [8] 陈丙咸等. 1991. 城市遥感分析. 南京大学出版社. 60~61
- [9] PH 斯韦思, SM 戴维. 1984. 遥感定量方法. 科学出版社, 220
- [10] 吴健平, 杨星卫. 1996. 遥感数据监督分类中训练样本的纯化. 国土资源遥感, (1)
- [11] 浙江大学数学系高等数学教研组. 1979. 概率论与数理统计. 人民教育出版社
- [12] 黎夏. 1995. 形状信息的提取与计算机自动分类. 环境遥感, (4)
- [13] 戴昌达. 1995. 城市变迁的遥感监测. 见: 城市遥感, 上海科学技术文献出版社, 244~245



## 第四章 气象卫星遥感方法

### 1. 基本情况

本世纪 60 年代初美国成功地发射了世界上第一颗气象卫星 (TIROS—1)，其后，美国、苏联、日本、欧洲联盟、印度及中国等纷纷向太空发射了近 200 颗气象卫星。经过 30 多年的努力，目前气象卫星已发展到相当成熟的阶段，形成了由太阳同步极轨气象卫星 (NOAA、METEOR) 和地球静止气象卫星 (GOES、GMS、METEOSAT 及 INSAT) 六颗卫星组成的气象卫星全球观测系统 [1]。

气象卫星与陆地卫星相比，具有覆盖面积大、成像周期短、资料易获取等特点。因此，除气象服务外，在其他领域也有许多应用。其中，以 TIROS—N/NOAA 为标志的第三代气象卫星，安装了改进型甚高分辨率辐射仪 (AVHRR)，采用相应的轨道设计，所得到的资料不仅能满足气象观测及云图识别的要求，而且还能满足其他许多领域的应用要求，是目前在非气象领域中应用最广泛的气象卫星资料。许多学者都认为，气象卫星遥感信息将会继续扩大它的应用领域和深度，特别是针对全球变化的研究以及自然灾害与作物估产的应用 [2]。

下面着重介绍 NOAA 气象卫星及 AVHRR 资料。

NOAA 气象卫星是近极地、与太阳同步的卫星，高度为 833km ~ 870km，轨道倾角 98.7°，成像周期 12 小时。目前，NOAA 系列卫星采用双星运行，同一地区每天可有四次过境机会。

AVHRR 是 NOAA 系列卫星的主要探测仪器，它是一种五光谱通道的扫描辐射仪，各光谱通道的波长范围及地面分辨率见表 4—1。星上探测器扫描角为  $\pm 55.4^\circ$ ，相当于探测地面 2800km 宽的带状区域，两条轨道可以覆盖我国大部分国土，三条轨道可完全覆盖我国全部国土。AVHRR 的星下点分辨率为 1.1km。由于扫描角大，图像边缘部分变形较大，实际上最有用的部分在  $\pm 15^\circ$  范围内 (15° 处地面分辨率为 1.5km)，这个范围的成象周期为 6 天。

表 4-1 AVHRR 各通道的波长范围及地面分辨率

通道	波长范围 ( $\mu\text{m}$ )	对应的波段	地面分辨率(星下点, km)
AVHRR - 1	0.55 ~ 0.68	绿—红	1.1
AVHRR - 2	0.725 ~ 1.1	近红外	1.1
AVHRR - 3	3.55 ~ 3.93	热红外	1.1
AVHRR - 4	10.5 ~ 11.3	热红外	1.1
AVHRR - 5	11.5 ~ 12.5	热红外	1.1

为了用于洲级及全球范围的研究，AVHRR 数据经常被重采样形成空间分辨率更低的数据。目前有两种全球尺度的 AVHRR 数据：NOAA 全球覆盖 (GlobalAreaCoverage, GAC) 数据和 NOAA 全球植被指数 (GlobalVegetationIndex, GVI) 数据 (Kidwell1990)。GAC 是通过对原始 AVHRR 数据进行重采样而生成，空间分辨率为 4km，由 5 个 AVHRR 的原始波段组成，没有经过投影变换；GVI 是对 GAC 数据的进一步采样而得到，空间分辨率为 15km 或更粗，经过投影变换。此外，为了减少云的影响，GVI 是由连续 7 天图像中 NDVI 值最大的像元所组成。美国国家海洋与大气管理局 (NOAA)

从 1982 年起就生产 GVI 数据。

AVHRR 资料的应用主要有两个方面：一方面是大尺度区域（包括国家、洲乃至全球）调查，这方面的应用，气象卫星遥感具有其他遥感所无法相比的优势。目前已经开展过的工作包括美国本土的土地覆盖调查（Loveland et al. 1991）、非洲的土地覆盖调查（Tucker et al. 1985）、南美土地覆盖调查（Townshend et al. 1987）以及全球的土地覆盖调查（Defries 1994）等，应用的方法一般是采用多时相分类的方法对 1km 空间分辨率的

AVHRR 数据或更低空间分辨率的 GAC 或 GVI 数据进行分类；另一方面是中小尺度区域的调查，这方面的应用主要是由于目前高空间分辨率遥感数据的获取比较困难，遥感调查的实时性较差，利用 AVHRR 数据来获得宏观的、实时的、能达到一定精度的地面信息。应用的方法通常是针对 AVHRR 数据空间分辨率低的缺陷，采用混合像元分解技术对 AVHRR 数据进行分类。

从研究的现状来看，AVHRR 数据在大尺度区域调查中所采用的方法基本一致，但由于调查区域范围大，精度分析比较困难，在图像的预处理方面也还存在一些没有解决的问题（Townshend et al. 1994）；目前 AVHRR 数据在中小尺度区域土地覆盖调查中的应用还不是很多，但发展潜力很大，这方面的工作还有许多问题需要深入研究。

## 2. 图像预处理

### 2.1 辐射校正

AVHRR 的可见光和近红外波段（通道 1 和 2）的辐射校正比较困难，原因是没有星载辐射校正装置，而 AVHRR 传感器在卫星发射后，传感性能开始衰减，原先的校正系数发生变化（Price 1987）。因此目前常用的校正方法是利用地面稳定的点，如同质沙漠来掌握传感器性能的衰减。Teillet 和 Holben（1994）利用沙漠进行测量，计算了 NOAA—11 上 AVHRR 传感器基于时间（time—dependent）的校正系数，利用这些校正系数，通过分段线性拟合可以得出实时的校正系数。AVHRR 热红外通道（3, 4, 5）的校正系数是在卫星上通过一个稳定的黑体作为参考来得到。

### 2.2 大气校正

大气对 AVHRR—1、2 两个通道的影响是显著的，其中影响最大的是 4 个主要的大气因子：水蒸气、气溶胶、臭氧及瑞利散射（Eidenshink 1994）。

瑞利散射一般是根据地形来校正，可以获得标准气压和温度条件下推荐的瑞利光学深度参考值（Teillet 1990）。

臭氧影响的校正可以根据臭氧总量制图光谱仪（TOMS）或其他传感器的实际测量值来进行，臭氧浓度也可以根据纬度和成像季节从标准气候表上查到。

水蒸气和气溶胶的浓度由于存在着空间和时间的变化，目前还没有可行的方法来进行校正。

### 2.3 NDVI 值的计算

NDVI 值是近红外波段与可见光波段像元值的差与像元值的和之比，计算公式为：

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{VIS}}{\text{NIR} + \text{VIS}} \quad (4-1)$$

NDVI 的值从 -1.0 到 1.0，正值的增加表示绿色植被的增加；负值指示非植被地面特征，如水、裸地、冰、雪或云。为了获得更高的精度，在图像几何配准和重采样前，先计算 NDVI，并以 16 比特的精度记录。

## 2.4 图像合成

这里的图像合成是指对一定时间间隔内成像的 AVHRR 图像进行合成。最常用的合成方法是最大 NDVI 值合成 (maximum NDVI composite)，该方法是比较各个时间 AVHRR 数据对应像元的 NDVI 值，选择最大的 NDVI 值作为合成图像的像元值，合成的图像称为最大 NDVI 值合成图像。

已经证明，最大 NDVI 值合成在减少云影响方面相当有效 (Holben 1986)。因为有云覆盖的像元在可见光波段和近红外波段具有相近的值，因此 NDVI 值很低；另外，一些薄云和子像元云 (sub-pixel clouds) 不能直接在 AVHRR 图像上观察到，但它们对 NDVI 值有很大影响。

除了减少云影响，最大 NDVI 值合成还能减少大气的影晌。

其他合成方法还包括 NDVI 值最高值平均及利用热红外波段合成。

合成图像的时间间隔通常是 7、10、14 天。时间间隔短，能提高土地覆盖动态监测的分辨率，但获得无云、近星下点像元的机会将减少。因此，理想的时间间隔应当是能够解决地面覆盖动态监测的最短时间，但又能获得高质量的图像。

理想的时间间隔将依赖于一个区域的成像时间、云覆盖的频率、云的持续时间以及植被状况的变化和植被对不同环境条件的敏感度。例如，赤道雨林地区的区域，可能要求一个非常长的时间间隔；相反，北非撒哈拉地区对环境条件很敏感，7—10 天或更短的时间间隔对土地覆盖的变化监测更为合适。

## 2.5 几何配准

包括图像与地图的配准以及图像之间的配准，常用的方法是利用控制点，以地图 (或一幅图像) 为基准，对另一幅图像的像元坐标进行转换及重采样。由于气象卫星图像空间分辨率较低，控制点的确定比较困难，常通过通道组合增强的方法来突出特征点<sup>[3]</sup>；另外还可以从陆地卫星 MSS 数据中选择控制点，然后把 MSS 数据的空间分辨率调整到 AVHRR 数据的空间分辨率，但这种方法比较费时。

## 2.6 云检测及云剔除

气象卫星的主要应用是获取云图，云对气象分析来说是有用的信息，但对土地覆盖调查来说，云的覆盖将影响调查的精度。因此，为了提高气象卫

星资料在土地覆盖调查中的可用性，需要对云进行检测及剔除。

### 2.6.1 云检测

云检测的方法可分为三类：基于直方图分析的统计方法（Phulpin et al., 1983）；阈值技术（Saunders and Kriedbel 1988, Stowe et al. 1991）；基于大范围（100 km 或更大）纹理分析的模式识别方法（Garand and Weinman 1986, Edbert 1987）。其中阈值技术是目前应用最多的。

阈值技术是基于不同的云相对于植被、土壤、水域等不同的下垫面在可见光和近红外波段具有较高反射率，而在热红外波段具有较低亮温的特性产生的。

利用阈值技术进行云检测有以下几种方法：

#### （1）单通道探测值阈值检测

任取 NOAA 气象卫星的某一通道图像资料，并给定一个云区灰度阈值，凡高于该阈值的像元皆为云。

#### （2）可见光和近红外通道反射率阈值检测

计算可见光和近红外通道图像的反射率，给定反射率阈值，凡高于该值的为云。

#### （3）热红外通道温度阈值检测

运用普朗克公式计算热红外通道的亮温和温度，设立温度阈值，凡低于该阈值的为云。

#### （4）可见光通道自动云检测

根据云的时空分布特征，采用计算机自动判别方法对可见光通道的反射率进行分析，并分别选取不同判云阈值进行检测，达到自动判云的目的。

#### （5）热红外通道自动云检测

根据不同地区不同季节云的温度情况，通过计算机自动判别云区。

#### （6）可见光和热红外通道组合自动判云

热红外通道主要对温度敏感，但它对低云和薄云反映不灵敏，因为低云和薄云的温度有时几乎和下垫面的温度相等，而在可见光波段低云和薄云却能清晰地表现出来。因此，考虑到可见光波段和热红外波段的互补性，可将可见光反射率和热红外温度结合起来自动判云。

### 2.6.2 云剔除

为了提高 AVHRR 资料的可用性，除了检测图像中云覆盖像元外，有时还须对云覆盖像元进行剔除和修复。云剔除可采用同周期相近时相 AVHRR 资料的相对变化率来反演替代云区<sup>[4]</sup>。方法如下：首先利用地面控制点对原始图像和替补图像进行配准。设有云的原始图像为 X，替补图像为 Y。

$$\text{令 } F_i = \frac{y_i - \bar{y}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$y_i$ 、 $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 、 $n$  分别为替补图像像元值、像元最大值、最小值及图像像元数。则云覆盖像元的替补值为：

$$x_i = F_i(x_{\max} - x_{\min}) + \bar{x} \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} (i = 1, 2, \dots, m)$$

$x_i$ 、 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 、 $m$  分别为原始图像（不包括云覆盖像元）的像元值、像元最大值、最小值和像元数。

对零星分布的云则可以以同一图像相邻的非云像元值进行内插来剔除。

云剔除并不能恢复图像原有的信息，因此，当图像中云的覆盖达到一定程度时，该图像就不能用来进行土地覆盖分类。

### 3. 多时相分类

遥感数据除了光谱信息和空间信息外，还具有时相信息，即不同的地物，光谱的时相变化特性往往是不一样的。有些土地覆盖类型在单个时相的遥感数据中难以区分，但可以通过多时相数据来进行分类。

自然界中，光谱时相变化最明显的是植被，因此常用反映植被状况的植被指数作为多时相分类的特征。植被指数有很多种，最常用的是归一化植被指数（NDVI）。

多时相分类可采用监督或非监督分类。另外，还可以简单地通过对每一像元在不同时相上的 NDVI 值比较来对像元进行分类。图 4—1 为三种土地覆盖类型的 NDVI 值时相变化曲线，其中麦子的最大 NDVI 值出现在 5 月中旬；牧草地的最大 NDVI 值出现在 6 月下旬；而后季作物的最大 NDVI 值出现在 7 月底。通过比较每个像元最大 NDVI 值的成像时间，就可以对像元进行分类。

在多时相分类中，需要注意以下几个问题：

（1）时相的选择 时相的选择首先要保证不同时相图像上土地覆盖类型没有变化或很少变化，避免由于土地覆盖变化而引起分类错误。另外，时相的选择还要考虑能反映出不同土地覆盖 NDVI 值的差异，如对图 4—1 中 3 种土地覆盖类型的分类，选择的最佳时相应是 5 月中旬、6 月下旬及 7 月底。

（2）土壤背景的影响 土壤特性的差异，如铁的含量和有机质的存在，会对 NDVI 值产生影响，当植被的覆盖度较高时，这种影响较小，但当植被覆盖度较低，且土壤特性差异较大时，就要考虑土壤背景的影响。通常可选择对土壤背景变化不太敏感的植被指数，如 Huete 和 Tucker（1991）提出的土壤调节植被指数（Soil-adjusted vegetation index, SAVI）。

### 4. 混合像元分解

混合像元（mixed pixel）是指像元所记录的信号来自一个以上的地类，它是扫描图像存在的一种普遍现象。随着空间分辨率的提高，混合像元的数量将减少，但不管空间分辨率达到多少，混合像元现象总归是存在的（Fisher and Pathirana 1990），这是地球表层客观存在的浑沌现象的反映<sup>[5]</sup>。

混合像元的出现有两种情况，一种情况是边界像元，即不同的地类在像元内相邻（图 4—2a）；另一种情况是所谓子像元现象，即一种地类包含其他地类（图 4—2b）。

传统的分类方法是一个像元一种类型，它的假设是所有的像元都是纯像元。因此，当遥感图像有较多的混合像元时，这种分类方法所得结果的精度（特别是数量精度）就会下降。为解决这个问题，一些学者提出了利用混合像元分解的分类方法来代替常规的一个像元一种类型的分类方法。一些研究已经表明，采用混合像元分解的分类方法，在一定程度上能够提高土地覆盖分类的精度（Quarmby 1992）。

NOAA/AVHRR 数据由于其空间分辨率较低，混合像元的比例很高，因此，是混合像元分解方法应用的重点。

混合像元分解一般采用两种方法：建模法和分类法<sup>[6]</sup>。

#### 4.1 建模法

建模法是建立像元内各土地覆盖类型的光谱值、面积比例与像元光谱值之间的线性混合模型。即第  $k$  个像元在第  $i$  波段的像元值  $x_{ik}$  为：

$$x_{ik} = \sum_{j=1}^C f_{jk} m_{ij} + e_{ik}, \quad (4-2)$$

式中， $f_{jk}$  是第  $k$  个像元内第  $j$  种土地覆盖类型的面积比（即隶属度）； $m_{ij}$  是第  $j$  种土地覆盖类型在第  $i$  个波段的像元值，这里的像元为纯像元； $C$  是分类数； $e_{ik}$  是误差项。

上式可以以矩阵形式表示：

$$x_i = Fm_i + e_i \quad l=1, \dots, l, l \text{ 为波段数。} \quad (4-3)$$

其中， $x_i$  是  $(K \times 1)$  矢量， $K$  为像元数； $F$  是  $(K \times C)$  的矩阵，第  $k$  行表示第  $k$  个像元包含各个土地覆盖类型的比例； $m_i$  为  $(C \times 1)$  矢量； $e_i$  为  $(K \times 1)$  的误差矢量。

混合像元分解就是根据每一像元在各个波段的像元值来估算像元内各个土地覆盖类型的比例。首先确定各个土地覆盖类型在不同波段的像元值  $m_{ij}$ 。 $m_{ij}$  可以通过野外或实验室光谱测量及光谱测量值与像元值换算来得到，也可以在图像上选择样本像元通过最小二乘回归方法来得出，即  $\hat{m}_i = (F'F)^{-1}F'X$ ，估算结果的协方差矩阵：

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ M & M \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{bmatrix}, \sigma_{ij} = \frac{(X_i - F\hat{m}_j)'(X_i - F\hat{m}_j)}{K}$$

利用后一种方法估算  $m_i$  首先是要确定每一样本像元内各个土地覆盖的比例  $F$ 。直接从 AVHRR 图像上确定  $F$  比较困难。可以选择空间分辨率较高的陆地卫星图像来辅助确定矩阵  $F$ ，方法如下：

选择与 AVHRR 图像成像时间相近的陆地卫星图像，对陆地卫星图像进行监督分类，监督分类结果按 AVHRR 的空间分辨率进行压缩，压缩后的图像与 AVHRR 图像进行配准，得到矩阵  $F$ 。根据矩阵  $F$  及样本像元的像元值  $X_i$ ，可以估算出各个地类在纯像元情况下的像元值  $m_{ij}$ 。

在得到  $m_{ij}$  后，就可以估算每一像元中各个地类的比例  $f_j$ 。一个像元在第  $i$  波段的像元值  $X_i$  为：

$$x_i = \sum_{j=1}^c f_j m_{ij} + e_i \quad (4-4)$$

由于估算出的 $f_j$ 必须满足两个条件： $\sum_{j=1}^c f_j = 1$ ， $0 \leq f_j \leq 1$ ， $j=1, \dots, c$ 。按照第一个条件，可以把公式改写成：

$$x_i = \sum_{j=1}^p f_j m_{ij} + f_c m_{ic} + e_i, \quad (4-5)$$

这里  $p=c-1$ 。由于

$$f_c = 1 - \sum_{j=1}^p f_j,$$

因此：

$$x_i = m_{ic} + \sum_{j=1}^p f_j (m_{ij} - m_{ic}) + e_i,$$

用矢量形式表示即：

$$\begin{aligned} x &= a + bf + e, \\ x &= (x_1, \dots, x_1)'; a = (m_{1c}, \dots, m_{1c})'; f = (f_1, \dots, f_p)', \\ b &= \begin{bmatrix} m_{11} - m_{1c}, \Lambda, (m_{1p} - m_{1c}) \\ (m_{i1} - m_{ic}), \Lambda, (m_{ip} - m_{ic}) \end{bmatrix}; e = (e_1, \Lambda, e_1)' \end{aligned}$$

$f$  可以下面的公式来估算：

$$\bar{f} = (\bar{b} \bar{\Sigma}^{-1} \bar{b})^{-1} \bar{b} \bar{\Sigma}^{-1} (x' - \bar{a}) \quad (4-6)$$

估算结果的协方差矩阵为  $(\bar{b} \bar{\Sigma}^{-1} \bar{b})^{-1}$ 。由于  $\bar{b} \bar{\Sigma}^{-1} \bar{b}$  只有当  $p < c$  才能求逆，因此可以估算的条件是类型数必须小于光谱数。

利用上述方法估算出的每一像元内各个类型的比例  $f_j$  能保证和为 1，但比例  $f_j$  可能在  $[0, 1]$  范围之外。一个最简单的解决办法是把最小值置为零，然后调整其他值使它们的和为 1；另一种方法是首先对  $f_j$  进行对数变换  $Z_j = \ln(\bar{f}_j / g_j)$ ， $g_j$  是第  $i$  个像元内各个类型比例的几何平均，然后按下面的公式计算出调整后的  $f_j$ ：

$$\bar{f}_j = \exp(\bar{Z}_j) / \sum_{j=1}^c \exp(\bar{Z}_j) \quad (4-7)$$

## 4.2 分类法

分类法通常采用模糊分类方法来提取每一像元内各类地物的面积比例信息，包括模糊监督分类和模糊非监督分类 (Wang 1990, Fisher and Pathiran 1990)。

### 4.2.1 模糊监督分类

模糊监督分类首先选择样本像元来确定分类参数，和传统的监督分类不一样，选择的样本像元并不严格要求是均质的，但要根据样本像元地面的实

实际情况，确定每一样本像元对各个地类的隶属度。如某一样地内，农田、草地和裸地的面积比分别为 0.7、0.2 和 0.1，则对应于这块样地的像元属于这三类地物的隶属度分别为 0.7、0.2 和 0.1。然后根据样本像元计算各类型的模糊均值矢量和模糊协方差矩阵。每一类的模糊均值矢量  $M_j$  为：

$$M_j^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij} X_i}{\sum_{i=1}^n f_{ij}} \quad (4-8)$$

式中， $n$  为样本像元数； $f_{ij}$  是第  $i$  个像元属于第  $j$  类的隶属度（即第  $j$  类的面积比）； $X_i$  为样本像元的像元值矢量， $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ ； $m$  是波段数。

模糊协方差矩阵  $\Sigma_j^*$  为：

$$\Sigma_j^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij} (X_i - M_j^*)(X_i - M_j^*)^T}{\sum_{i=1}^n f_{ij}}, \quad T \text{表示转置}, \quad (4-9)$$

当  $f_{ij}=0$  或 1 时，上面两式就成为一般的均值矢量和协方差矩阵。

在确定了分类参数  $M_j^*$  和  $\Sigma_j^*$  之后，根据每一像元的光谱值进行模糊监督分类，即确定像元对各类地物的隶属度。像元的隶属度可用最大似然分类算法确定，这时，模糊均值矢量  $M_j^*$  和模糊协方差矩阵  $\Sigma_j^*$  代替均值矢量和协方差矩阵。像元属于某一类  $j$  的隶属度  $f_{ij}$  的计算公式如下：

$$f_{ij} = \frac{P_j^*(X_i)}{\sum_{k=1}^c P_k^*(X_i)} \quad (4-10)$$

公式 4-10 中：

$$P_k^*(X_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{|\Sigma_k^*|}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(x_i - M_k^*)^T \Sigma_k^{*-1} (x_i - M_k^*)\right] \quad (4-11)$$

$C$  是预先确定的分类数， $1 \leq j \leq c$ 。

#### 4.2.2 模糊非监督分类

模糊非监督分类是边学习边分类的方法，事先不需要确定分类参数。它的分类基本思路是先定义一目标函数，或准则函数，此函数之值随聚类结果不同而取不同值。通过求目标函数极值的方法求出最佳聚类。

模糊非监督分类的计算一般采用迭代法，步骤如下：确定分类数  $k$ ， $1 < k < n$ ， $n$  为像元数；选择距离公式  $d_{ij}$ 。

给出初始隶属度矩阵  $F^{(0)} = (f_{ij}^{(0)})$ ， $f_{ij}^{(0)}$  是像元  $i$  属于  $j$  类的隶属度，



显然， $F^{(0)}$  的各列元素之和应等于 1。

计算各类的模糊聚类中心：

$$M_j^{*(1)} = \sum_{i=1}^n (f_{ij}^{(1)})^m X_i / \sum_{i=1}^n (f_{ij}^{(1)})^m, j = 1, 2, \Lambda, k, \quad (4-12)$$

$1 < m < +\infty$ ，是一个参数，一般取  $m=2$ 。 $X_i$  为像元  $i$  的像元值矢量。

利用公式：

$$f_{ij}^{(1+1)} = \frac{1}{\sum_{p=1}^k \left(\frac{d_{ij}}{d_{pj}}\right)^{2/(m-1)}}, i = 1, 2, \Lambda, n; j = 1, 2, \Lambda, k \quad (4-13)$$

计算新的隶属度矩阵  $F^{(1+1)}$

如果满足结束迭代的标准，则程序停止；否则重复 ~ 过程。结束迭代的标准可以取

$$\max_{i,j} \left\{ \left| f_{ij}^{(1+1)} - f_{ij}^{(1)} \right| \right\} \leq \varepsilon$$

## 5. 土地覆盖变化监测

气象卫星数据具有高时相分辨率的特点，根据同一年份不同时相的气象卫星特征数据，可以得出该特征的变化曲线。在用于土地覆盖变化监测时，通常是比较某一特征在不同年份的时相变化曲线，通过对时相变化曲线进行抽样（或选择指定周期的最大值）得到  $n$  维的特征矢量，当像元的特征矢量值偏离基准值时，就可检测出土地覆盖的变化。该方法比起常规的仅仅利用几个时相的观测更加敏感，特别是对小的土地覆盖的变化。

在  $n$  维时相空间中，同一像元两个年份的特征值差异可用欧氏距离计算：

$$I = \left[ \sum_{i=1}^n (I_1 - I_2)_i^2 \right]^{1/2} \quad (4-14)$$

公式中， $I_1$  和  $I_2$  是年份 1 和年份 2 的像元特征值， $i$  为对应观测的周期（假如是月合成图像，则  $n=12$ ）。

土地覆盖变化监测可采用植被指数、地表温度以及空间结构等不同特征来进行。

### (1) 植被指数

多时相植被指数是小比例尺土地覆盖制图及土地覆盖变化分析中所使用的主要数据。一些研究已经成功地在不同空间范围以及不同生态系统的情况下，建立起了植被指数与其他一些变量之间的关系，这些变量包括植物冠层的特性（如绿色生物量、叶面积指数）、植物的长势（如叶绿素含量）、太阳辐射同植物冠层的相互作用、植物的温度、生态（如降雨、潜在和实际的累积蒸发量、表面温度）、植被瞬间活动率（如光合作用率、净二氧化碳交换率）。

### (2) 热红外数据

一些研究已经表明热红外数据在土地利用/土地覆盖变化分析中潜力很大。如 AVHRR 通道 3 的数据被用来检测森林变化（Tucker et al. 1984），确定西非的灌木、乔木和热带森林草原界线（Malingreau et al. 1989）；从

AVHRR 热红外数据导出的地表温度可用来划分赤道雨林与萨王纳植被 (Achard and Blasco 1990)。但在低空间分辨率情况下,影响植被热辐射的生物物理量因素还需更好地掌握。

### (3) 空间结构

AVHRR 数据的空间分辨率是  $1.1 \times 1.1 \text{ km}^2$ , 在这一空间分辨率下, 尽管有较明显的传感器引入的空间自相关现象, 但基于这些数据的研究表明了不同生态区具有不同的空间特性 (Belward 1992)。此外, Vogt (1992) 分析了西非不同生态区空间结构的季节变化, 显示 NDVI、地表温度及反射率的空间结构有明显的季节变化过程, 生态过渡区的空间结构也有明显的季节变化。因此, 空间结构的时相变化可以为土地覆盖变化过程提供重要信息, 但对景观结构与空间分辨率的关系还需进一步掌握。

Lambin 和 Strahler (1994) 应用以上讨论的三个特征对西非一个研究区的土地覆盖变化强度及变化类型进行分析。分析结果表明, 这三个特征的相关系数小, 信息冗余低, 它们所揭示的土地覆盖变化过程分别对应于不同的时间尺度, 其中热红外数据主要是揭示降雨以及土壤含水量等的变化过程, 所对应的时间尺度最小; NDVI 主要是揭示植被生长的季节变化; 空间结构则主要是揭示较长时间尺度的景观生态变化过程。

## 6. 应用实例

### 6.1 利用 NOAA/AVHRR 数据估算上海地区水稻种植面积

作物面积的估算是进行作物估产不可缺少的一项工作, 它的精度直接影响一个地区作物总产量的估算精度。目前, 利用高空间分辨率的遥感图像 (如 SPOT、TM 或 MSS) 进行作物面积调查能达到比较高的精度, 在方法上是可行的。但高空间分辨率的遥感图像成像周期较长, 往往在作物的生长期里, 得不到完整的无云覆盖图像, 加上成本较高, 在实际工作中的应用受到许多限制, 特别是对较大范围的区域来说。与之相比, NOAA/AVHRR 数据尽管空间分辨率较低 (星下点为  $1.1 \times 1.2 \text{ km}^2$ ), 但具有覆盖周期短、价格低、数据易获取等优点, 因此, 一些学者对 AVHRR 数据在作物面积估算方面的应用进行了研究。研究表明, 采用混合像元分解的技术, 能克服 AVHRR 数据空间分辨率低的缺陷, 提取出的作物面积信息能够达到一定的精度<sup>[7]</sup> (Quarmby 1992)。

华东师范大学地理系与上海市气象科学研究所开展“上海地区水稻遥感估产”课题 (“八五”国家攻关项目子课题) 中, 利用 AVHRR 数据对上海地区水稻种植面积进行估算。考虑到水稻生长期里, 上海地区无云覆盖的图像很少, 要获得多时相高质量的图像比较困难, 因此, 用模糊监督分类方法对单时相的 AVHRR 数据进行分类, 以提取水稻种植面积。

研究的实验过程如图 4-3 所示。

水稻栽插以后的一两个月是选择 AVHRR 图像的最好时相。这时, 水田的光谱特性既同水体有明显区别, 又同其他作物有明显区别。同时, 应尽可能选择无云覆盖的高质量 AVHRR 图像。

原始的 AVHRR 图像存在着几何误差和辐射误差, 在使用前, 通过气象卫星图像处理软件, 对图像进行几何和辐射校正。为使图像和地图资料配准以

及与其他遥感图像之间对照，利用双线性内插法对像元进行内插，使内插后的图像像元大小对应于实地的面积约为  $250 \times 250\text{m}^2$ 。

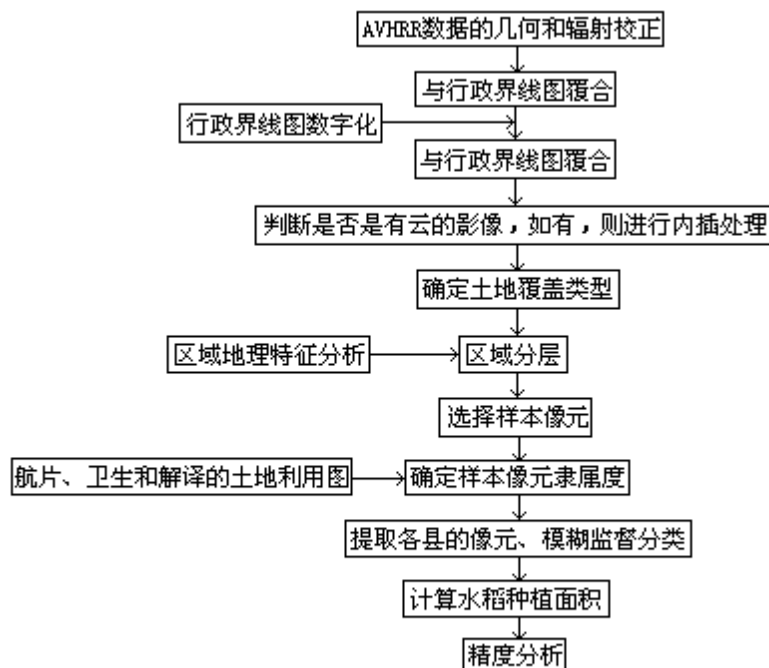


图 4-3 实验过程框图

在地理信息系统支持下，把一张上海市的行政界线图输入计算机中（包括行政界线和水系），在显示屏幕上与 AVHRR 图像覆合。

选择出的图像中有时还是会有些零星分布的云像元。这些云像元的存在将影响分类精度。因此需要对云像元进行检测及处理。检测与处理的方法是在 AVHRR 通道 1 图像上确定某一像元值作为阈值。由于在通道 1 上，云为亮色调值，像元值大于其他地物的像元值，所以取最暗的云像元值为阈值，打印出像元值直方图，判断是否有大于阈值的像元值存在，如有的话，则找出这些像元并以相邻的非云像元值进行内插。

尽管本研究只是估算水稻种植面积，但模糊监督分类需要知道研究区内各个类型的模糊均值矢量和模糊协方差矩阵。只有这样，才能计算出每一像元中水稻的比例。

按照地物的光谱特性，本实验共分出 5 个土地覆盖类型：植被类、水体类、水田类、城镇居民点类和农村居民点类。植被类包括农田中的旱地、菜地以及园地、有林地、撩荒的杂草地等，它们具有比较接近的植被光谱特征；水体的光谱特征明显，单独作为一类；由于选中图像的时相是水稻栽插以后一二月这段时间，水稻处在生长初期，既有植被的光谱信息，也有水体的光谱信息，因此，从农田中分出来组成一类；城镇居民点由于内部建筑物密集，水蒸气不易散发，形成城镇的湿岛效应，影像特征较明显，另外，铁路用地也具有类似的影像特征，因此，也包括在城镇居民点类中；农村居民点和城镇居民点的光谱特征有较大差异，但和公路、农村道路、休闲农田等具有相似的光谱特征，因此，这些地类合并为一个土地覆盖类型。

选中的样本像元是否有代表性以及确定的样本像元隶属度是否符合实际情况，对最后的分类精度有很大影响。由于各县（区）的区域特征并不完全一致，区域特征的差异会造成土地覆盖类型的同物异谱、同谱异物的现象，

为了减少这些现象对分类结果的影响，在选择样本像元前，首先对区域进行分层。通过区域地理特征分析及图像分析，把上海市郊区（区）分成 3 个部分，即西部的松江、金山和青浦，东部的宝山、闵行、嘉定、浦东新区、南汇、奉贤，以及北部的崇明。

区域进行分层后，每一部分分别选取样本像元，并通过对照航空像片、TM 陆地卫星图像以及根据航片解译的分县土地利用图来确定样本像元的隶属度。样本像元的选择考虑了下面几点：样本像元尽可能位于土地覆盖类型比较稳定的地方；样本像元的选择要反映出各个土地覆盖类型的光谱特征，一般是对每一土地覆盖类型在其影像特征明显（不一定是纯像元）的地方各选择 2~3 个像元。农村居民点由于分布不集中，在 AVHRR 图像上反映不出影像特征，样本像元无法选择，但在选择其他样本像元中要考虑反映出农村居民点的信息；样本像元在航片（或 TM 图像、地图）上的位置要比较容易确定，如菜地、水田像元一般选择在城镇、河流、湖泊附近；样本像元不包括内插出来的像元。

选择出的样本像元和参考资料（航片、TM 图像和地图）进行对照确定隶属度。对某些样本像元，需要在参考资料的相应位置上，确定一个一定大小的区域，计算各个土地覆盖类的图斑面积，得出它们的比例。

由于水稻种植面积估算是以县（区）为单位，因此，在分类前首先要把各个县（区）的像元提取出来。通过行政界线图与 AVHRR 图像的叠置，分别提取出 10 个县（区）的像元（不包括双线性内插出的像元）。

AVHRR 数据共有 5 个通道，其中通道 1、2 为可见光和近红外波段，通道 3、4、5 为热红外波段，在以往的土地覆盖分类中主要是利用可见光和近红外波段数据。近几年来，一些学者发现热红外波段数据在土地覆盖分类中也有很大用处（Achard and Blasco 1990, Cross 1991）。另外考虑到本次分类的区域较小，同一地类的温度差异不大，因此选择了通道 3 与通道 1、2 一起作为分类的波段。

根据选中的样本像元计算出分类参数（模糊均值矢量和模糊协方差矩阵），利用分类参数及 AVHRR 三个波段（通道 1、2 和 3）数据，对每个县（区）内各个像元进行模糊监督分类，分类后分别得出 10 个县（区）5 类土地覆盖类型的像元数及百分比。以每县（区）的总面积作为控制，计算出每县（区）的水稻种植面积。

根据上述方法进行了 1992、1993 和 1994 三年的上海市水稻种植面积估算，并在水稻收割前一个月向有关部门发布了水稻种植面积的预报。

采用面积比的方法分析分类结果的数量精度，计算公式为：

$$P = 1 - \frac{|S - \bar{S}|}{S}, \quad (4-9)$$

式中：P——水稻种植面积的估算精度，S——用 AVHRR 数据计算得出的水稻种植面积， $\bar{S}$ ——实际的水稻种植面积。

在本次研究中，选用了各个县当年上报的水稻播种面积作为实际的水稻种植面积。

通过分析，得出上海市三年水稻种植面积的估算精度均大于 90%。

表 4-2 为 1992 和 1993 年分县水稻种植面积的估算精度。

表 4-2 水稻面积估算精度

面积单位：km<sup>2</sup>

地区	1992 年			1993 年		
	计算面积	上报面积	精度 ( % )	计算面积	上报面积	精度 ( % )
宝山	149.8	129.9	84.7	103.4	110.9	93.2
闵行	143.4	140.7	98.1	101.4	110.2	92.0
嘉定	168.3	158.8	90.6	185.8	164.6	87.1

续表

地区	1992 年			1993 年		
	计算面积	上报面积	精度 ( % )	计算面积	上报面积	精度 ( % )
浦东	175.1	148.8	82.3	138.1	129.6	93.4
南汇	219.9	206.7	93.6	200.3	198.2	98.9
奉贤	195.4	204.9	95.4	180.5	197.0	89.1
松江	290.7	260.8	88.5	281.2	249.9	87.5
金山	287.2	260.1	89.6	225.3	251.7	89.5
青浦	283.7	251.5	87.2	185.5	229.6	80.8
崇明	322.0	281.1	85.5	225.7	273.5	82.5
全市	2235.6	2070.2	92.0	1827.2	1915.2	95.4

## 6.2 利用 NDVI 数据进行全球土地覆盖分类

全球土地覆盖数据是开展全球变化研究的基本信息。全球土地覆盖数据可以采用常规方法从某些资料如地图集、区域地图、研究报导编辑获得，由于这些原始信息是在不同的时间产生，采用了不同的土地覆盖类型，因此，很难获得土地覆盖变化信息；另外，通过对已有的通过常规方法得到的全球土地覆盖数据进行空间分布和面积数据比较，发现互相之间有较大差异 (Townshend et al 1991, DeFries and Townshend 1993)。

利用遥感数据进行全球土地覆盖调查，从理论上讲比常规方法优越。首先，遥感数据提供了对地球的宏观观测，因此，能得出内在一致的土地覆盖数据；第二，卫星遥感数据能提供反映植被特性的某些信息，如季节变化、光合作用等；第三，遥感可以多时相成像，能提供全球土地覆盖变化信息。

DeFries R.S. 和 Townshend J.R.G. (1994) 利用 NOAA 卫星的 NDVI 数据进行了全球土地覆盖调查研究。利用的

NOAA 数据是 1987 年 AVHRR 图像最大 NDVI 值合成数据，分辨率约  $8 \times 8 \text{ km}^2$  ( $1^\circ \times 1^\circ$ )。为了剔除异常的低值，首先利用富里叶变换对时相剖面进行平滑处理。在调查过程中，还利用了常规方法得到的全球土地覆盖数据作为辅助信息。

根据要求，确定了 11 种土地覆盖类型，即：阔叶常绿林、针叶常绿林、高纬落叶林、苔原、落叶常绿混交林、阔叶落叶林、森林草原、草原、灌丛和裸地、裸地、耕地。

比较 3 种常规方法得到的土地覆盖图，选择这 3 种图上类型相一致的区

域作为训练区。为了使每一类训练集与其他类训练集在光谱上尽可能分离，采取了以下步骤：

(1) 考虑到南北两半球季节的差异，每一训练集数据分成南半球和北半球。

(2) 每一训练集的特征空间用目视方法检验，剔除明显在范围外的像元。另外对明显具有多重模态概率函数的训练集进行进一步划分。

(3) 基于 Bhattacharyya 距离检验不同类型训练集的重叠情况，确定哪些类型可以合并，例如南半球主要位于非洲的阔叶林和森林草原。

通过以上步骤，得出 15 个训练集。原先 11 种类型中，7 类不需要进一步划分，2 类（森林草原和草原）被分成北半球和南半球，2 类按分布地域（不同洲）划分。

利用 NDVI 值合成数据进行全球尺度的土地覆盖调查，不同区域季相的差异是需要考虑的问题。同一土地覆盖类型由于季相的不同会造成 NDVI 时相剖面的差异，最明显的例子是同一土地覆盖类型（如森林草原）南北半球的 NDVI 时相剖面正好相反。另外，在同一洲内，由于气候带的不同，也会有大的季相差异。

为了克服季相差异对土地覆盖分类的影响，可以采用几种方法：最简单的方法是前面谈到的把全球分成南北两半球，分别选训练区进行分类，分类结果再进行合并；另一种方法是对全球按纬度进行分带，每一带分别进行分类，每一带的分类结合可以连接成全球数据；第三种方法是对 NDVI 值的顺序进行重新排列，第一个 NDVI 值将是一年中最大的 NDVI 值，而不管它出现在哪一个月，如北半球第一个 NDVI 值可能出现在 7 月，南半球第一个 NDVI 值可能出现在 1 月，接下去的 NDVI 值将是以后各月出现的 NDVI 值，然后按照这种记录分类（不需要分南北半球）；最后一种方法是基于 NDVI 值的剖面特性，而不是 NDVI 值本身，这个特性包括通过对一年中高于某一值的 NDVI 进行积分所得到的“绿度”以及根据 NDVI 的振幅所得到的季节变化值。

利用最大似然法对每一像元进行分类，在分类时，考虑到季相差异问题，分别结合了上述 4 种方法。对分类结果，在没有独立检验数据情况下，利用训练数据对不同方法的分类结果进行分析。分析结果表明，对全球表面按纬度进行分带的方法（包括把全球分为南北两半球）精度相对较高，但分类结果带与带之间会产生接缝。利用重新排序的 NDVI 数据分类以及基于 NDVI 值剖面特性分类的结果精度相对较低，但它们由于训练区的范围较大，能真实反映全球土地覆盖的异质性。

## 参考文献

[1] 刘亚平. 1992. 90 年代国际气象卫星发射计划一瞥，遥感技术与应用，(1)

[2] 陈述彭. 1992. 迎接信息时代. 见：地学的探索，4. 科学出版社

[3] 周红妹等. 1994. 气象卫星小范围区域遥感图像配准方法的探讨. 遥感技术与应用，(1)

[4] 周红妹，杨星卫，陆贤. 1995. NOAA 气象卫星云检测方法的研究. 环境遥感，(2)

[5] 陈述彭. 1992. 地球科学的复杂性与系统性. 见：地学的探索（第四

卷), 科学出版社

[6] 吴健平编译. 1992. 从遥感多光谱数据中产生分要素图像的最小二乘混合模型. 地理译报, (3)

[7] 徐希孺等. 1990. 混合像元的因子分析方法及其在大面积冬小麦种植面积估算中的应用. 科学通报, (4)

## 第五章 不同类型遥感

### 数据的结合

遥感数据有多平台、多传感器、多波段、多比例尺、多时相等众“多”优势，能提供丰富的地面目标光谱信息。不同类型的遥感数据各有特点，它们之间的结合是提高遥感调查精度和效率的重要途径。

不同类型遥感数据的结合主要有三个方面：不同类型遥感数据的结合分类；不同类型遥感数据的信息覆盖；不同类型遥感数据的互相补充。

#### 1. 不同类型遥感数据的结合分类

不同类型遥感数据的结合分类包括两个过程：空间配准和分类。

##### 1.1 空间配准

当两个图像的空间分辨率相差不大时，可以通过选择同名控制点对两个图像进行空间配准，但当两个图像的空间分辨率相差比较大时，则两个图像在空间域上的准确配准比较困难。一种常用的配准技术是首先对两个图像进行富里叶变换，对空间分辨率高的遥感图像进行适当的低通滤波，然后在频谱域对两个图像进行相关运算，取其极大值处（即相关程度最高）为最佳对应位置，再反变换到空间域，从而确定两者空间位置的配准关系<sup>[1]</sup>。

相关系数的计算公式为<sup>[2]</sup>：

$$r(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_1(m, n) f_2(i + m, j + n), (5-1)$$

$f_1(m, n)$  和  $f_2(i + m, j + n)$  表示两个图像的空间频谱， $(i, j)$  表示它们的偏移值。

相关系数的计算工作量很大，在实际工作中，并不需要计算图像的全部像元，而只需要选择一些小块面积来作相关运算。如图 5-1 所示，在一个图像上选择若干个  $N \times N$  大小的窗面积，而在另一个图像上相对应地选择同样数量  $M \times M$  大小的搜索面积（显然， $M$  应大于  $N$ ）。于是，相关运算就只是在窗面积和搜索面积之间进行。从图 5-2 可见，对于  $L \times L$  个全部可能的偏移位置，总共需要运算  $N^2 L^2$  次，其中  $L = M - N + 1$ 。

为了避免由于搜索面积内平均灰度级的变化出现假的相关峰值，上式一般需按下式归一化：

$$r(i, j) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N f_1(m, n) f_2(i + m, j + n) / A_1 A_2, (5-2)$$

式中：



$$A_1 = \left[ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N f_1^2(m, n) \right]^{1/2},$$

$$A_2 = \left[ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N f_2^2(i + m, j + n) \right]^{1/2} \quad 0$$

## 1.2 分类

图像数据结合分类的最简单方法是把不同类型遥感数据作为同一传感器得到的数据，利用多变量正态分布来描述这些数据（Leckie 1990），如  $(x_1, \dots, x_k)$  是陆地卫星 TM 图像上一个像元的特征矢量， $(y_1, \dots, y_l)$  是 ERS—1 SAR 图像上对应像元的特征矢量，那么，两种类型数据结合后像元的特征矢量为  $(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_l)$ ，根据特征矢量，利用常规的分类方法即可对每一像元进行分类。但这种方法在以下两种情况下不适用：不同类型遥感数据不能以相同的光谱模式来表示；不同遥感数据成像时间不一致，并且在成像时间间隔中，地物类型发生变化。

考虑不同类型遥感数据的光谱模式不一致，可以按以下方法来进行结合分类。设不同类型遥感数据相互独立，像元  $(i, j)$  属于某一类  $c$  的概率为：

$$P(c | X_1(i, j), \dots, X_n(i, j)) \\ = P_1(c | X_1(i, j)) \dots P_n(c | X_n(i, j))。 \quad (5-3)$$

这里  $X_k(i, j)$  为不同类型遥感数据的像元值， $n$  为类型数。当某一类的概率为最大时，则该类型即为像元  $(i, j)$  的类型。

如果不同类型遥感数据的分类可靠性不一致，则可以在公式中引入可靠性因子（Schistad 1994）：

$$P(c | X_1(i, j), \dots, X_n(i, j)) \\ = P_1(c | X_1(i, j))^{a_1} \dots P_n(c | X_n(i, j))^{a_n}, \quad (5-4)$$

$0 < a_1, \dots, a_n < 1$ ，分别是不同类型遥感数据的可靠性因子。

上述公式可以用对数形式表示： $\log P(c | X_1(i, j), \dots, X_n(i, j))$

$$= a_1 \log P_1(c | X_1(i, j)) + \dots + a_n \log P_n(c | X_n(i, j))。 \quad (5-5)$$

当第  $i$  种遥感数据不可靠时， $a_i$  等于 0，它对似然函数就没有贡献；如某一类遥感数据可靠性很大时，则可靠性因子接近 1。一般是利用总的分类精度作为可靠性因子。

在两种类型遥感数据情况下，如果考虑到这两种数据成像间隔中地物的类型发生变化，这时的似然函数可用下式表示：

$$L(c, l) = a_1 \log P_1(c | X_1(i, j)) + a_2 \log P_2(l | X_2(i, j)) \\ - V(C_{1,ij}, C_{2,ij})。 \quad (5-6)$$

这里， $V(C_{1,ij}, C_{2,ij})$  表示一个制约函数，是用户定义的常数，通常取  $=0.5$ 。

制约函数可用下式表示：

$$V(C_{1,ij}, C_{2,ij}) = (1 - P_r(C_{1,ij}=c | C_{2,ij}=l)) (C_{1,ij} + C_{2,ij})$$

$$\delta(c, l) = \begin{cases} 1 & \text{当 } c = l \text{ 时} \\ 0 & \text{其他情况下,} \end{cases} \quad (5-7)$$

$P_r(C_{1,ij}=c|C_{2,ij}=l)$  是成像时间间隔中, 类型 1 变化到类型 c 的概率, 根据先验知识得出,  $P_{n,ij}$  为局部可靠性因子

$$P_{n,ij} = P_n(\max) - P_n(C_{n,ij}), \quad (5-8)$$

其中,  $P_n(\max)$  为不同类型之间最大的概率。

对像元  $(i, j)$ , 假定  $L(c, 1)$  最大, 若  $c=1$ , 则表示两种数据成像间隔中, 地物类型没有变化; 若  $c \neq 1$ , 则表示类型发生变化, 即从类型 c 变化到类型 1。

## 2. 不同类型遥感数据的信息覆合

不同类型遥感数据的信息覆合有两种目的: 一种用于显示; 一种用于分类。

当信息覆合用于显示时, 首先对不同类型的遥感数据进行几何配准, 然后进行光谱覆合。常用的光谱覆合方法是利用彩色变换模型, 即彩色模型 RGB (红、绿、蓝) 和 IHS (强度、色相、饱和度) 的变换。唐伶俐等人<sup>[3]</sup>在研究星载 SAR (ERS - 1) 图像和 TM 图像覆合时, 采用了如下的覆合处理:

(1) 考虑到 TM-4、5、3 这 3 个波段的波谱信息概括了 TM 的主要信息, 故选取 TM-4、5、3 这 3 个波段进行 IHS 变换:

$$\begin{bmatrix} \text{TM-4 (R)} \\ \text{TM-5 (G)} \\ \text{TM-3 (B)} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{IHS变换 H}} \begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{H} \\ \text{S} \end{bmatrix}$$

(2) 选取上述变换后的色度分量与饱和度分量 (即 H、S 分量), 并以 SAR 图像作为强度分量 (即 I 分量) 进行 IHS 反变换:

$$\begin{bmatrix} \text{SAR图像I分量} \\ \text{变换的H分量} \\ \text{G变换的S分量} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{IHS反变换}} \begin{bmatrix} \text{R} \\ \text{G} \\ \text{B} \end{bmatrix}$$

(3) 选取 TM3、4、5 波段及 SAR 图像进行 KL 变换。

(4) 将第(2)步 IHS 反变换后的 G 分量、TM-4 波段原始数据以及第(3)步 KL 变换后的第 1 主分量分别对应 R、G、B 通道进行假彩色合成, 即得到 SAR 与 TM 主要波段信息覆合图。

信息覆合后的图像基本上将两种图像的信息优势集中在一起。

当信息覆合用于图像分类时, 实际上是通过高空间分辨率全色图像与多光谱图像的覆合, 提高多光谱图像的空间分辨率。由于光电传感器的空间分辨率和光谱分辨率往往是一对矛盾, 因此, 一些遥感卫星, 如 SPOT 卫星以及将要发射的 landsat-7 卫星都提供多光谱图像和全色图像, 这两种图像都有它们各自的优点, 多光谱图像具有高的光谱分辨率, 而全色图像则具有高的空间分辨率。为了充分利用各自的优点, 一种方法是对这两种数据进行信息

覆合，产生融合两种图像优点的新图像。

Pradines(1986)提出了一种 SPOT 全色波段图像和多光谱图像覆合的方法。即 4 个全色波段像元和一个对应的多光谱像元覆合(图 5-3)，新图像的像元值  $XP_j$  按下面的公式计算：

$$XP_j = X \cdot \frac{P_j}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}, (j = 1, \Lambda, 4) \quad (5-9)$$

这里， $XP_j$  是新图像上第  $j$  个像元的像元值， $P_j$  是高分辨率全色图段上第  $j$  个位置上的像元值， $X$  是低分辨率图像的像元值。这种方法要求全色波段与每个多光谱波段高度相关，否则这种方法将是无效的。

Price(1987)提出了一个针对两种不同情况的覆合方法。一种是对与高分辨率全色图像高度相关的多光谱数据增加空间分辨率；第二种是对弱相关的多光谱波段进行增强。

对第一种情况，根据多光谱数据与全色数据存在高度相关的假设，这些图像之间的像元值存在线性关系：

$$XS_i = a_i \cdot PAN_{ave} + b_i \quad (5-10)$$

这里， $XS_i$  是低分辨率图像第  $i$  波段上超像元(superpixel，即低分辨率图像像元)的像元值， $PAN_{ave}$  是高分辨率图像上对应超像元的像元平均值， $a_i$  和  $b_i$  是第  $i$  波段最小二乘回归系数。在求出  $a_i$  和  $b_i$  后，第  $i$  波段覆合增强图像可以按以下方法产生：

$$XS_{i'} = a_i PAN_{HR} + b_i, \quad (5-11)$$

$$Hybrid_i = \frac{XS_i \cdot XS'_{i'}}{XS'_{(avg,i)}} \quad (5-12)$$

在公式(5-11)和(5-12)中， $Hybrid_i$  是覆合产生的第  $i$  个高分辨率多光谱波段像元值， $XS_{i'}$  是第  $i$  个多光谱波段高分辨率估计值， $XS_{(avg,i)}$  是  $XS_i$  图像上对应  $XS_i$  超像元的像元平均值。这种方法类似于 Pradines 方法，只是 Price 是利用多光谱波段数据，而不是直接利用全色波段数据；Price 方法产生的覆合图像上，对应超像元的平均像元值与原始的多光谱像元值相同，而 Pradines 方法则要求超像元内覆合的像元值之和等于原始的多光谱值。

第二种情况是假定低分辨率多光谱波段和高分辨率全色波段图像不是线性的。按照下面的方法进行信息覆合：对落在每一超像元内的全色图像的像元进行像元值平均，产生一个新的图像，新图像与多光谱图像的对应像元进行比较，对新图像的每一像元值，找出与该值相对应的低分辨率图像的所有像元，并对这些像元的值进行平均，从而产生一个查找表(LUT)(图 5-4)，利用该查找表可以估算出每个多光谱波段的高分辨估计值，然后利用前面的公式(公式 5-12)计算出覆合后图像上每一像元的像元值。

Price 在利用模拟的 SPOT 全色波段数据和 3 个多光谱波段覆合时发现，1 波段(绿光波段)和 2 波段(红光波段)与全色波段强相关(99%以上)，而 3 波段与全色波段弱相关(大约 87%)。

研究表明，通过信息覆合能提高土地覆盖分类精度(Munehika et

al.1993)

### 3. 不同类型遥感数据的互相补充

利用高空间分辨率遥感数据进行土地利用/土地覆盖调查,调查结果的精度较高,但需要投入很多人力、物力;而低空间分辨率遥感数据成本较低,调查的速度也较快,但调查结果的精度较低。为了充分利用各自的优点,弥补各自的缺陷,在土地利用/土地覆盖调查中,不同类型的遥感数据常被用来进行互相补充,以便充分利用它们的优点,使调查既能获得满足精度要求的成果,同时又能使调查的成本最低。

不同类型遥感数据的互相补充包括: 利用抽样区高空间分辨率遥感数据的调查结果对整个调查区低空间分辨率遥感调查结果的数据进行校正;利用实时的低空间分辨率遥感数据对高空间分辨率遥感调查结果进行数据更新。

#### 3.1 数据校正

假定利用低空间分辨率遥感数据调查出的区域内各个土地利用/土地覆盖类型的比例为  $e$ ,  $e = (e_1, \dots, e_L)$ ,  $L$  为分类数,高空间分辨率遥感数据得出的比例为  $a$ ,  $a = (a_1, \dots, a_K)$ ,  $K$  为分类数。它们之间的关系可用一个类型变换矩阵(class transformation matrix)

联系起来,即  $Pe = a$ 。利用抽样调查数据得出  $P$  的估计  $\bar{P}$ , 然后用  $\bar{P}$  及  $e$  得出  $a$  的估计  $\bar{a}$ , 即校正后整个调查区的各个土地利用/土地覆盖类型的面积比例。

由于估算出的  $\bar{a}$  必须满足每一个比例值在 0 和 1 之间,且比例值的和为 1。为满足这些限制,可采用不等式限制的最小二乘(inequality constrained least squares, ICLS)方法来估算。

设有  $N$  个抽样单元,  $E$  表示根据低空间分辨率遥感数据得出的各个抽样单元中各个地类比例的矩阵,  $A$  表示相同区域高空间分辨率遥感数据得出地类比例的矩阵,两个矩阵的关系可以表示成:

$$EP = A + E, E \text{ 为误差矩阵。} \quad (5-13)$$

公式(5-13)可以改写成如下形式(Roessel 1993):

$$N \times K \begin{bmatrix} [e_{11}I] \Lambda [e_{L1}I] \\ [e_{1N}I] \Lambda [e_{LN}I] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ M \\ P_{1k} \\ M \\ P_{L1} \\ M \\ P_{LK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ M \\ a_{k1} \\ M \\ a_{1N} \\ M \\ a_{KN} \end{bmatrix}$$

$L \times K \quad (L \times K) \times 1 \quad (N \times K) \times 1$

$$\text{即} \quad X = Y + \quad (5-14)$$

这里的  $[e_{ij}I]$  是  $K \times K$  的对角线矩阵, 对角线元素为  $e_{ij}$ 。

由于  $e_{ij}$  满足

$$\sum_{i=1}^L e_{ij} = 1, 0 \leq e_{ij} \leq 1,$$

$$i=1, \dots, L;$$

$$j=1, \dots, N_0.$$

为了使  $a_{ij}$  满足相同条件,  $P_{ij}$  应满足下列限制 (Roessel 1981) :

$$\sum_{j=1}^K P_{ij} = 1, P_{ij} \geq 0 \quad i=1, \dots, L; j=1, \dots, K_0$$

一个等式的限制可以改写成两个不等式限制, 如  $a=c$  等同于  $a \leq c$  和  $-a \leq -c$ , 因此, 公式可以用下面的不等式矩阵形式表示:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 1000 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 0100 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 0010 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 0001 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \\
 111 \Lambda \Lambda 10 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 L \times K \quad 000 \Lambda \Lambda 0111 \Lambda \Lambda 1 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 0 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda 111 \Lambda 1 \Lambda 0 \\
 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \\
 -1 -1 -1 \cdot \cdot -10 \Lambda \Lambda \Lambda 0 \\
 000 \Lambda \Lambda 0 -1 -1 -1 \cdot \cdot -1 \Lambda 0 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 0 \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda -1 -1 -1 \cdot \cdot -1 \Lambda 0
 \end{array}
 \end{array}
 \beta \geq (L \times K) \times 1
 \begin{array}{l}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 1 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 -1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 ((L \times K) + 2L) \times (L \times K) \\
 ((L \times K) \times 2L) \times 1
 \end{array}$$

表示矢量形式的矩阵  $P$ , 以  $Z$  表示不等式左面的矩阵, 以  $C$  表示不等式右面的矩阵, 则公式为:

$$Z\beta \leq C. \quad (5-15)$$

现在的问题是估算  $\beta$ , 使得  $(Y - X\beta)$  为最小, 同时满足

$$A\beta \leq C \text{ 或 } A\beta - V = C$$

这里的  $V$  为松弛矢量。

上述问题可以通过二次规划方法求解; 许多文献已经介绍了二次规划方

法的算法 (Lemke 1962) 以及方差的计算 (Liew1976) , 这里不再介绍。

### 3.2 数据更新

利用低空间分辨率遥感数据对高空间分辨率遥感数据调查结果, 来进行数据更新时, 可采用如下方法:

(1) 把高空间分辨率遥感数据(如航空像片)调查结果输入到计算机中, 作为本底资料。

(2) 选择与高空间分辨率遥感图像成像时间接近的低空间分辨率遥感图像(如陆地卫星图像), 利用图像处理软件, 与计算机中的本底图进行配准覆合。

(3) 利用本底图中的图斑作为分析单元, 分析不同类型土地利用/土地覆盖在低空间分辨率遥感图像上的光谱信息、空间信息, 并把该图像作为基准图像。

(4) 对实时数据的低分辨率遥感图像与基准图像进行覆合, 利用变化分析方法检测土地利用/土地覆盖有变化的像元, 并选择合适的特征量对类型有变化的像元进行分类。

(5) 分类结果代入本底图, 即本底图上类型有变化的图斑以分类类型作为新的类型, 从而产生新的本底图。同时, 把实时的低空间分辨率遥感图像作为新的基准图像。

### 参考文献

[1] 刘茜, 徐希孺. 1994. 航空影像与 TM 影像的配准及用航空影像对 TM 进行作物估产方法的精度检验. 环境遥感, (4)

[2] 李德熊. 1987. 遥感技术. 北京工业学院出版社

[3] 唐伶俐等. 1995. SAR 与 TM 图像复合处理技术的初步研究. 遥感信息, (4)

## 第六章 地理信息系统、全球定位系统与遥感的结合

### 1. 地理信息系统与遥感的结合

地理信息系统(GIS)是以地理空间数据库为基础,在计算机软硬件的支持下,对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示,并采用地理模型分析方法,适时提供多种空间和动态的地理信息,为地理研究和地理决策服务而建立起来的计算机技术系统<sup>[1]</sup>。地理信息系统和遥感是两个相互独立发展起来的技术领域,但它们存在着密切的关系,一方面,遥感信息是地理信息系统中重要的信息源;另一方面,遥感调查中需要利用地理信息系统中的辅助数据(包括各种地图、地面实测数据、统计资料等)来改善遥感数据的分类精度和制图精度。

#### 1.1 地理信息系统与遥感结合的方式

总的来说,地理信息系统与遥感的结合主要有两种方式:

(1) 通过数据接口,使数据在彼此独立的地理信息系统和遥感图像分析系统两者之间交换传递(图 6-1)。这种结合是相互独立、平行的,它可以将图像处理后的结果输入地理信息系统,同时也能将地理信息系统空间分析的结果输入图像处理软件,从而实现信息共享。

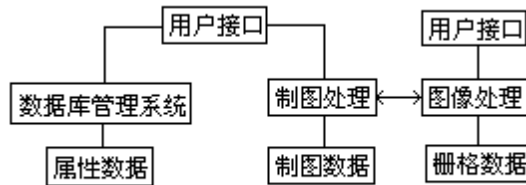


图 6-1 通过软件接口实现地理信息系统和遥感的结合

(2) 地理信息系统和图像处理系统直接组成一个完整的综合系统(集成系统)。它可以分成两个层次:

a. 两个软件模块共用一个用户接口,可以实行栅格—矢量的串行或并行处理(图 6-2a)。它应具备将地理信息系统的矢量数据直接进行图像处理、统一不同性质数据的输入方式、误差分析和遥感数据进行时态变化模拟的能力。

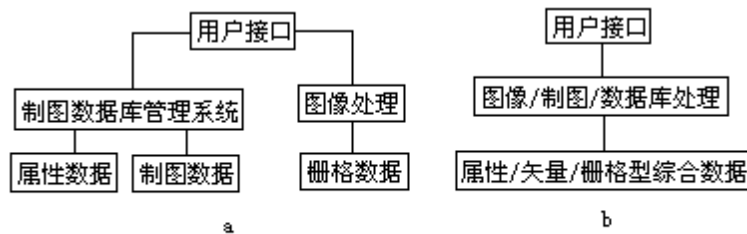


图 6-2 遥感、地理信息系统组成综合系统

b. 将地理信息系统和遥感组成一个统一的综合体,实现两者的真正结合(图 6-2b)。这是一个长期的目标,统一后的系统将具有在层结构中协调栅格和矢量数据、允许进行综合的空间查询、进行同所谓的基于测量信息系统的结合、产生现实世界中实体的综合模型以及根据该模型确定相应的空间表

示法等功能。当地理信息系统与遥感的结合以遥感为主体时，地理信息系统是作为基本数据库，用以提供一系列基本数据，来弥补遥感数据的不足，提高遥感数据的分类精度。这个基本数据库一般应包括下列两类数据：

图形数据库：

- (a) 地理基础要素
- (b) 数字地形模型
- (c) 地名库及汉字库

统计数据库

- (a) 地球物理场
- (b) 地面观测场
- (c) 自然环境要素
- (d) 社会经济数据

## 1.2 遥感调查中地理信息系统的应用

在遥感调查中，地理信息系统的应用主要有三个方面：遥感数据预处理；遥感数据分类；遥感制图。

### 1.2.1 遥感数据预处理

在遥感数据几何校正时，通常是以地理信息系统中的地图为基准，通过选取控制点的方法，对遥感图像进行几何校正。此外通过地图与遥感图像的叠置，还可以切割出所需区域的遥感数据。

遥感数据的辐射校正除了校正由于大气引起的辐射畸变及传感器引起的辐射畸变外，在地形起伏较大的地区，为了消除地形对影像的影响，需要利用地理信息系统中的 DEM（数字高程模型）数据对遥感数据进行辐射校正。

辐射校正的计算公式为<sup>[2]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{(L_p - L_u)(\cos \theta_0 + H_0 E_{\lambda d} / E_{u0})}{\cos \theta_p + H_p E_{\lambda d} / E_{u0}} + L_u && < 90^\circ \\ L &= \frac{(L_p - L_u)(\cos \theta_0 + H_0 E_{\lambda d} / E_{u0})}{H_p E_{\lambda d} / E_{u0}} + L_u && 90^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

式中： $L_p$  为某一像元的辐射亮度，一般可由影像灰度值换算而得；

$L$  为校正后的像元辐射亮度值；

$\theta_p$  和  $\theta_0$  是该像元相应的地面坡度角和太阳入射角，可由 DEM 计算得出；

$$H_p = 1 - \frac{S_p}{S_0};$$

$S_0$  和  $S_p$  是校正参考平面的坡度角和太阳入射角，可预先选定；

$E_{\lambda d}/E_{u0}$  和  $L_u$  一般未知，但可利用遥感数据和地面坡度数据估算这两个参数。<sup>[3]</sup>

### 1.2.2 遥感数据分类



地理信息系统在遥感数据分类中的应用主要是利用系统中各种辅助数据参与分类，最常用的辅助数据是地形数据，另外还有土壤、植被、森林等各种专题图数据。

遥感专家很早就认识到辅助数据在遥感图像分类中的重要性（Campell 1978, Townshend and Justice 1981）。在过去的二十几年中，已发展了很多利用辅助数据提高分类精度的方法，如 Fleming 和 Hoffer（1979）利用观察到的土地覆盖与坡度、坡向、高程的关系，显著提高南落基山地区 MSS 森林覆盖制图精度；Cibula 和 Nyquist（1987）在利用 MSS 数据对华盛顿奥林匹克国家公园进行土地覆盖分类时，利用地形和气候数据使分类数从 9 类增加到 21 类，总精度达到 91.7%。地理信息系统的发展使得辅助数据和遥感数据的结合更加广泛和深入。

辅助数据在遥感数据分类中的应用有几种方法：

辅助数据作为逻辑通道和各波段光谱数据一起参与分类。这种方法比较简单，但由于在监督分类中，分类特征必须满足正态分布，而大多数辅助数据往往不是正态分布，因此该方法的应用不是很多。

应用辅助数据分层估计各地类出现的先验概率。最常用的是根据 DEM 数据和代表不同地面类别的样区数据，统计各主要地物的垂直分布特点，继而按高程数据把研究区域划分成若干高程带，分别对每一高程带的遥感影像进行分类处理，最后把各高程带的分类影像叠加，形成整个研究区域的分类结果。如杨凯等人<sup>[4]</sup>在利用陆地卫星 MSS 数据进行湖北省咸宁县土地利用调查时，根据该县 DEM 数据和六个样区的地面数据，把全县划分为五个高程带，估计每个高程带中各个地物类别出现的先验概率，对五个高程带的图像分别进行分类处理，并对样区范围内的整体分类和按高程分层分类的结果与样区实地类别数据进行比较，比较结果表明，引入高程信息后分类精度有所提高，其中单一类别的平均分类精度提高了 7.5%。

应用辅助数据对光谱分类结果进行后处理。遥感图像上经常有异物同谱现象，一些地类从光谱上难以区分，但它们在空间分布上往往具有不同的特征，因此可以通过辅助数据加以区分。美国在利用多时相 AVHRR 数据进行美国本土的土地覆盖调查时，首先利用非监督分类进行聚类，得到 70 个类别，然后与辅助数据（包括高程、生态区、无霜期等）叠置，分析每一类中各个辅助数据的直方图，对直方图中明显有多于一个峰值的类别利用辅助数据进一步分类，最后得出 189 个类别（Brown et al. 1993）。

### 1.2.3 遥感制图

地图是遥感调查最主要的成果，地图上除了类型界线外，还需要有行政界线、注记等要素，这些要素往往不能直接从遥感数据中得到；另外，一些道路、河流由于分辨率的限制，也不能从遥感数据中提取出。为了使分类结果能以地图形式输出，需要采用信息覆合的方法，把地理信息系统中的行政界线、注记等要素叠加到分类结果图上，从而形成完整的地图。

## 1.3 遥感图像判读专家系统

在 GIS 和遥感结合的领域中，遥感图像判读专家系统的发展十分引人注目。专家系统通常由三个部分组成：(1) 知识库(KBS)；(2) 推理机(INE)；(3) 用户接口(UIS)。遥感图像判读专家系统汇集了遥感及有关领域专家的知识及经验，利用计算机模拟专家的思维过程，研究和解决不确定的、经验性的问题，充分利用 GIS 中的各种辅助数据，从而提高遥感数据的分类精度。

Skidmore (1989) 曾利用图像判读专家系统进行澳大利亚东南部桉树林分类。根据地理信息系统中的数字地形模型导出坡度、坡向和地形位置，并与 TM 图像进行几何配准。根据当地森林工作者的经验，建立各种类型桉树林与地形之间的关系，并作为专家系统中的知识库。在利用专家系统进行分类时，对任一个像元  $X_{i,j}$  是否属于某一类通过多个判据 (evidence) 来检验。该系统中的判据包括：根据非参数分类得出的各个类型正确分类的概率、坡度、坡向以及地形位置 (即山脊、上中坡、中坡、下中坡、山谷)。

设  $S_a$  是某一类型 ( $a=1, \dots, n$ )， $E_b$  是某一判据 ( $b=1, \dots, k$ )，建立一个假设 ( $H_a$ )，即像元  $X_{i,j}$  的类型为  $S_a$ ，可以定义如下的规则：

$$E_b \Rightarrow H_a。$$

即，给定一个判据  $E_b$ ，可以导出  $H_a$ 。但实际上这个规则往往是不确定的，规则的概率既不是 1 也不是 0，而是 0 和 1 之间的一个值，这个值取决于这个规则 (真或假) 的确定程度。

根据 Bayes 理论可以得出这个规则的概率：

$$P(H_a | E_b) = \frac{P(E_b | H_a)P(H_a)}{P(E_b)}, \quad (6-2)$$

式中， $P(E_b | H_a)$  是假设成立的判据概率 (也称为类—条件分类概率)； $P(H_a)$  是假设 (像元  $X_{i,j}$  的类型为  $S_a$ ) 成立的概率，这个概率最初是通过非参数分类得到的正确分类概率，此后根据其他判据计算出的概率  $P(H_a | E_b)$  来迭代。 $P(E_b)$  是判据 ( $E_b$ ) 出现的概率，Bayes 理论提供了计算  $P(E_b)$  的公式：

$$P(E_b) = \sum_{a=1}^n P(E_b | H_a)P(H_a)。 \quad (6-3)$$

当  $P(H_a)$  改变时， $P(E_b)$  也将改变。需要注意的是， $\{E_b\}$  必须是独立的，否则  $P\{E_b\}$  将会越来越大或越来越小，由此会造成后验概率不正确。

利用专家系统分类时，首先选择一个判据 (这里首先选择根据非参数分类得出的各个类型正确分类的概率)，计算  $P(H_a | E_b)$ ，并作为下一证明的后验概率  $P(H_a)$ ，接着计算下一证据的概率。利用同样方法，一直迭代到最后一个证据。

迭代结果，对像元  $X_{i,j}$ ，每一假设都有一个概率值，选最大概率的假设，以该假设的类型作为像元类型。

类—条件概率  $P(E_b | H_a)$  (先验概率) 即为专家的知识或经验 (表 6-1)，在建立专家系统时已存贮在系统知识库中。

表 6-1 各个判据的先验概率

环境信息	森林类型									
	Q	Y	TT	YSM	BLS	STL	STD	CC	STM	ALL
N	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
W	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
S	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3
E	0.4	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
FI	0.4	0.4	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1
R	0.4	0.5	0.05	0.1	0.75	0.6	0.6	0.3	0.4	0.1
Um	0.4	0.5	0.08	0.2	0.6	0.5	0.5	0.3	0.5	0.1
M	0.4	0.5	0.1	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.6	0.3
Lm	0.4	0.3	0.2	0.7	0.4	0.2	0.2	0.3	0.6	0.3
G	0.4	0.1	0.6	0.8	0.1	0.01	0.01	0.3	0.5	0.3
< 10	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
10 ~ 20	0.4	0.3	0.1	0.35	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3
> 20	0.4	0.2	0.01	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3

注：N——北

W——西

S——南

E——东

FI——平地

R——山脊

Um——上中坡

M——中坡

Lm——下中坡

G——山谷

< 10——坡度小于 10°

10 ~ 20——坡度 10° ~ 20°

> 20——坡度大于 20°

目前，遥感图像判读专家系统在知识的表示和获取方面还存在很大困难，还有许多的基础工作要做。

## 2. 全球定位系统与遥感的结合

全球定位系统，英文为 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Position System，简称 GPS。它的含义是：导航卫星测时和测距/全球定位系统。该系统是美国国防部主持开发的第二代卫星导航定位系统，现在已经在大地测量、工程测量、城市规划、地壳运动监测与地震预报、海洋学、冰川学和气象学等研究领域显示出良好的应用前景，引起了许多国家的重视。

### 2.1 GPS 定位的基本原理

长期以来人类一直在为精确确定目标物在地球上以及近地空间中的位置而进行不懈的努力。早期解决这一问题的主要方法是进行天文定位：测定太阳或其他天体的高度角和方位角并记录观测时间，以确定用户在该时刻的经纬度以及至某一目标的方位角。这种方法的定位精度通常不是很好，而且观测还要受气候条件的限制。

20 世纪初随着无线电技术的发展，各种无线电导航定位系统相继出现，如欧米伽 (Omega) 系统、罗兰 C (Loran-C) 系统、台卡 (Tacan) 系统和微

波着陆系统 (MLS) 等。无线电导航定位的基本原理与测量学中测定点位的方法十分相似，现以距离交会系统为例加以说明。设 A 和 B 为两个地面无线电信号发射台，其坐标已精确测定。用户 P 在某一时刻  $t_i$  采用无线电测距的方法分别测得从 P 点至 A、B 两点的距离  $S_{AP}$  和  $S_{BP}$ ，那么只需以 A 点和 B 点为圆心，以  $S_{AP}$  和  $S_{BP}$  为半径作出两个定位圆；即可交会出 P 点的平面位置。当然两圆相交一般会有两个交点，但用户根据其概略位置通常是不难加以判断和取舍的。况且为了提高定位的精度和可靠性，已知的无线电站数量实际上往往不止两个，此时就不再存在两个解的问题。根据用户至已知点的间距以及所需的精度，上述解算工作可以近似地在平面上进行，也可以在椭球面上进行。

与天文定位相比，无线电定位无论是在定位的速度还是在自动化程度方面都有了长足的进步，定位精度也有所改善，而且定位已基本不受气候条件的限制。然而地面无线电导航定位系统的作用距离（覆盖面）和定位精度之间会产生矛盾。低频率的无线电波可以沿着地球表面传播，因而只要具有足够大的发射功率信号就能传播到很远的地方。但长波信号的观测精度较差而且信号的传播路径又难以准确确定，再加上信号需要在稠密的大气层中远距离传播，而用户又无法测定信号传播路径上的气象因素，因而难以进行准确的气象改正，所以一些覆盖面很大的地面无线电导航定位系统的定位精度通常都较低。反之，使用高频率的信号虽然可以获得较高的精度，但这些信号是沿着直线传播的，所以覆盖面很小。于是各个部门和单位为了满足各自的要求相继建立了各种不同类型的地面无线电导航定位系统。

20 世纪 60 年代，随着空间技术的发展，各种人造卫星相继升空。于是人们很自然地想到，如果把无线电信号发射机从地面台站搬到卫星上组成一个卫星导航定位系统，就能较好地解决覆盖面与定位精度之间的矛盾。全球定位系统就是一种采用距离交会法的卫星导航定位系统。如果用户 P 在某一时刻  $t_i$  用 GPS 接收机同时测得从接收机至视场中的三颗 GPS 卫星 (A、B、C) 的距离  $S_{AP}$ 、 $S_{BP}$ 、 $S_{CP}$ ，而且该时这些卫星在空间的位置也是已知的的话，那么我们就用距离交会的方法求解 P 点的三维坐标  $(X_p, Y_p, Z_p)$ 。其观测方程为：

$$\begin{cases} S_{AP} = [(X_p - X_A)^2 + (Y_p - Y_A)^2 + (Z_p - Z_A)^2]^{1/2} \\ S_{BP} = [(X_p - X_B)^2 + (Y_p - Y_B)^2 + (Z_p - Z_B)^2]^{1/2} \\ S_{CP} = [(X_p - X_C)^2 + (Y_p - Y_C)^2 + (Z_p - Z_C)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (6-4)$$

式中  $(X_A, Y_A, Z_A)$ ， $(X_B, Y_B, Z_B)$  和  $(X_C, Y_C, Z_C)$  分别为卫星 A、B、C 在时刻  $t_i$  的空间直角坐标<sup>[5]</sup>。

## 2.2 GPS 的组成

GPS 由卫星部分、地面控制部分和用户接收机三部分组成。

卫星部分由分布在 6 条轨道上的 24 颗 GPS 卫星组成。每条轨道都是高

度约为 20200 km 的圆形轨道，倾角  $55^\circ$ ，轨道与轨道间的夹角为  $60^\circ$ ，同一轨道上布有 4 颗卫星，相邻卫星间的位相差为  $90^\circ$ ，不同轨道上两邻近卫星间的位相差为  $30^\circ$ ，卫星绕地球一周为 12 小时（恒星时），这样在世界上任何地方任一时刻都能同时观测到 4 颗以上的卫星，因此 24 小时中在地球上任何地点都能定位（图 6-3）。卫星上安装有轻便的原子钟、微型计算机、电文存储和信号发射设备，均由太阳能电池提供电源。卫星上备有少量燃料，用来调节卫星的轨道和姿态。

GPS 卫星发射的是一对相干波，载波频率和波长分别为：

$$f_{L1}=1575.42\text{MHz}, \quad \lambda_{L1}=19\text{cm}$$

$$f_{L2}=1227.60\text{MHz}, \quad \lambda_{L2}=24\text{cm}$$

用伪随机码调制，其码率分别为 10.230MHz（波长为 29.3m）和 1.023MHz（波长 293m），前者称 B 码或叫精码，码的变化结构十分复杂，不易捕获，但能用于精密定位，仅供军方使用；后者称 C/A 码或叫粗码，按设计仅用于粗略定位，任何用户都能免费接收粗码信号。

地面控制部分是整个系统的中枢。如前所述，进行 GPS 定位的一个先决条件是用户必须知道观测瞬间 GPS 卫星在空间的位置。由于不同的用户将在不同的时间对不同的卫星进行观测，所以实际上是要求知道所有的 GPS 卫星在任一时刻的位置。上述要求是在全球定位系统的地面控制部分的支持下得以满足的。全球定位系统的地面控制部分是由一个主控站（位于美国科罗拉多州），三个注入站（分别位于太平洋的卡瓦加兰岛，印度洋的狄哥·伽西亚和大西洋的阿松森岛上），5 个监测站（除位于上述 4 地外，再加上夏威夷群岛）以及通讯辅助系统组成的。

监测站是无人值守的 GPS 卫星跟踪站，其站坐标已精确测定。每个监测站内均配备有双频 GPS 接收机、气象元素传感器、原子钟和微机。以原子钟作为频率标准的 GPS 接收机在微机控制下对视场中的所有 GPS 卫星进行伪距测量。为了对观测值进行对流层延迟改正，气象元素传感器还可自动采集当地的温度、气压和相对湿度。在微机控制下监测站能对伪距观测值进行各项改正，并对观测资料进行编辑、平滑和压缩，并通过通讯系统将资料送往主控站。主控站对各监测站送来的观测资料进行处理，以计算每个卫星的运行轨道以及卫星钟的改正参数，并外推出未来 26 小时的卫星轨道和卫星钟参数，然后按规定格式编制成卫星导航电文送往注入站，再通过各注入站将它们送往每个卫星，寄存在卫星的内存中，卫星则将导航电文调制在测距码和载波上，按时播发给用户。用户用相关法进行伪距测量时，可同时获得卫星星历，经简单计算后，即可求得该时刻卫星在空间的位置。

用户接收机部分由主机、电源和天线组成。主机的核心为微电脑、石英振荡器，还有相应的输入输出设备和接口。在专用软件控制下主机进行作业卫星选择、数据采集、加工、传输、处理和存储，对整个设备系统状态进行检查、报警和部分非致命故障的排除，承担整个接收系统的自动管理。天线通常采用全方位型的，以便采集来自各个方位任意高度角的卫星信号。

### 2.3 GPS 定位方法

目前，GPS 的定位方法大致分为 4 类<sup>[6]</sup>：多普勒法；伪距法；干涉法；载波相位法。为了满足高精度定位要求和分析研究的需要，除实时

定位外，还可以将观测值录入磁盘、磁带或盒带，利用研究部门提供的软件进行后处理。

伪距法的定位原理比较简单。用伪距法定位时，接收机本机振荡产生与卫星发射信号相同的一组 P 码（或 C/A 码），通过延迟器与接收机收到的信号进行比较，当两组信号彼此重合时，测出本机信号延迟量即为卫星信号的传输时间，加上一系列改正，乘以光速，得出卫星至测站无线相位中心的斜距。如果同时观测 4 颗卫星，即可按距离交合法推算出测站位置和接收机时钟误差 4 个未知参数。伪距法定位精度较低，但可用于实时定位，如卫星、飞行器和船舶的实时导航。

载波相位是目前讨论最广泛、深入的一种定位方法。它能提供高精度定位的观测数据。所谓载波相位观测值实际上是卫星信号和接收机参考信息之间的相位差。由于载波相位法是利用卫星信号、载波波长为单位进行量度的，如果测相精度达到百分之一周期，则可使仪器测量分辨率达到 1.9mm 和 2.4mm。在精密大地测量、地球重力学观测以及空中三角测量中，为了保证高精度，往往采用相对定位法，即把许多单测点瞬时载波相位观测值进行组合，形成单差方式、双差方式以及三差方式，消除系统误差。

GPS 的定位按应用方法可分为两类<sup>[7]</sup>：

（1）静态对地定位 主要用于大地测量、板块运动测定等方面。这种方式定位所需时间长（几分钟到几十分钟），定位精度高，可达 1ppm 的量级。

（2）动态对地定位 这一类定位精度较低，定位精度为分米级至米级，定位数据更新率可达秒级。主要是将 GPS 接收机安置在快速运动的待测平台上，如飞机、卫星、火箭、气球、船舶、汽车等，以对这些平台导航定位。

#### 2.4 GPS 在遥感调查中的应用

GPS 在遥感调查中的应用主要有两个方面：在遥感图像上识别出桥梁、河流汇合处以及村庄这些能作为地面控制点的地物，然后到实地，利用 GPS 确定每一控制点的实际位置（经纬度等），进而对图像进行几何纠正和投影变换；对图像上的样本像元，根据它们的空间坐标，利用 GPS 进行实地定位，确定样本像元对应的地面类型，并用于分类。这两方面的应用方法在有关 GPS 的文章中已有介绍，下面以一个例子介绍 GPS 用于样本像元地面定位的方法。

美国曾利用 SPOT 数据与 GPS 相结合方法进行佛罗里达州南部湿地的土地覆盖调查（Rutchey 1994）。调查首先是利用 ERDAS 软件对 SPOT 数据进行非监督分类，聚类数的确定是基于分类结果图上每一聚类都能找出同质区域，以便利用 GPS 进行野外验证，通过试验，最后确定的分类数为 30。

利用 20 个均匀分布的地面控制点把图像纠正到 UTM 地图投影。首先是在图像上找到对应地面控制点的像元，利用地面控制点数据和对应图像像元的位置数据计算变换矩阵，产生一个系数文件，利用一阶变换计算出每个像元变化后坐标，变换后像元位置的均方根误差（RMS）为 0.4 个像元，利用最近邻再采样法进行像元值内插。

为获得像元点地面实况，在经过纠正的图像上选择验证点，30 个非监督分类类型尽可能每一个选择 5 个点，每一个点必须位于至少  $3 \times 3$  像元的同质图斑中心，这样做是考虑到图像像元的位置本身存在着误差（均方根误差为

0.4 个像元=8m) 以及 GPS 定位误差 (3 m ~ 7 m)。最后从图像上选择了 129 个点。

对图像上选择的每一个点进行野外验证, 野外验证利用 GPS 定位, 通过目视方法估算大约  $20 \times 20\text{m}^2$  范围内每一土地覆盖类型的比例。

通过对验证点的实地状况分析, 最后归纳出 19 个土地覆盖类型。129 个验证点被归类到这 19 种土地覆盖类型中, 这些验证点作为每一类型最初的训练样本。

观测每一类训练样本的分布, 剔除不能反映该类分布的训练样本, 剩下的训练样本被用来产生每一类的统计特征, 并利用最大似然监督分类对图像中的每一个像元进行分类。

### 参考文献

- [1]张超等.1994.地理信息系统.高等教育出版社
- [2]杨凯, 陈军.1986.辅助数据在遥感影像计算机分类中的应用.环境遥感, (3)
- [3]陈军.1984.DTM 在遥感影像分类中的应用.武汉测绘学院学报, (1)
- [4]杨凯等.1985.遥感多时相特征图像按高程分层分类法——咸宁县土地利用面积的遥感测定.测绘学报, (3)
- [5]李征航.1995.GPS 定位中的几个基本概念.见:RS、GIS、GPS 的集成与应用, 测绘出版社
- [6]李德仁.1991.GPS 全球定位系统在航空遥感精确定位中的应用.环境遥感, (3)
- [7]李树楷等.1991.90 年代动态 GPS 遥感信息对地定位系统.环境遥感, (3)

## 第七章 结束语

### 1. 发展展望

(1) 新型传感器的不断研制将为土地利用/土地覆盖遥感调查提供更多更合适的信息源。从现在起到 21 世纪的头几年,一个完善的对地观察网将逐渐形成。其特点是:高、中、低轨道结合;大、小、微型卫星协同;粗、细、精分辨率互补<sup>[1]</sup>。即将发射的 Landsat-7 将提供空间分辨率为 15m 的全色图像;SPOT-5 的全色图像和多光谱图像的空间分辨率将分别提高到 5m 和 10m;日本已宣布要发射一种名为“高分辨率观测卫星”(Hi-ros)的新型卫星,该卫星将提供 2.5m 分辨率的全色图像和 10m 分辨率的多光谱图像<sup>[2]</sup>。更令人鼓舞的是美国三家公司宣布将推出 21 世纪新型 CCD-Eyeglass,它的像元空间分辨率将达到 1m,而立体观测则是“全方位”——兼有前后视和侧视<sup>[3]</sup>。新型传感器的发展还表现在光谱分辨率的提高,如 AVIRIS 机载可见光和红外成像光谱仪,在可见光和红外波段划出 224 个波段;美国即将研制出的航天成像光谱仪(装载到 EOS 即地球观测系统上)将达到 256 个波段,其中 0.4  $\mu\text{m}$ ~1.04  $\mu\text{m}$  有 64 个波段,1.04  $\mu\text{m}$ ~2.5  $\mu\text{m}$  有 192 个波段。我国也已研制出具有 71 个波段的航空成像光谱仪(可见光 32 个波段,短波红外 32 个波段,热红外 7 个波段)。成像光谱仪提供了极其丰富的光谱信息,为更精确地分析和提取地物信息奠定了坚实的基础,使大量的地面光谱测量数据与遥感光谱数据的真正结合有了可能。

(2) 不同类型的遥感数据都有它们各自的优点,同时不可避免的都存在着缺陷。通过不同类型遥感数据的结合,利用各自的优点,克服各自的缺陷,是计算机遥感图像处理所要研究的重要内容。不同类型遥感数据的结合主要有两个方面,第一是不同波段遥感数据的结合,如 TM 与 SAR 的结合,一方面能获得实时的土地利用/土地覆盖信息,同时又避免单独从 SAR 图像中提取信息的困难;第二是不同遥感平台数据的结合,即高空间分辨率(低时相分辨率)遥感数据与高时相分辨率(低空间分辨率)遥感数据的结合,利用高空间分辨率遥感数据调查结果作为本底资料,以低空间分辨率、高时相分辨率的遥感数据作为实时资料进行土地利用/土地覆盖调查是今后这种结合的主要方式。

(3) 3S(RS、GIS 和 GPS)的结合与集成进行土地利用/土地覆盖调查是今后发展的必然。从遥感技术的发展和应用来看,它正面临着越来越高的应用要求,即由定性到定量、静态向动态应用过渡,GIS 为遥感应用的不断深入提供了一个良好的技术环境。GIS 中各种辅助数据(如高程信息、土壤类型信息等)与光谱信息结合将弥补单纯光谱信息分类的局限性,同时,GIS 中各种应用模型的存在使多种来源数据的综合分析应用得以实现。由于遥感技术的迅速发展,以 GPS 为标志的空间定位系统也得到广泛应用,一方面由于卫星定位和提供星历参数的需要,GPS 将更多地用于遥感卫星,另一方面遥感应用中地面采样、导向、定位也将把 GPS 作为有力的工具。因此,3S 的结合和集成进行土地利用/土地覆盖调查是今后发展的必然。3S 的结合与集成将有两种主要方式,一是以 GIS 为中心的以矢量数据为主的 3S 结合和集成,这是各类信息系统发展的方向,遥感影像处理系统和 GPS 是为了充实信息服务的;二是以遥感图像处理系统为中心的以栅格数据为主的 3S 结合和集



成，这是遥感影像处理技术发展的方向，GIS 和 GPS 是为遥感影像处理服务的。

(4) 随着计算机技术的发展，特别是具有人工智能特点的第五代计算机系统发展，开发能模仿人的目视判读过程的综合分析、逻辑思维的遥感图像分析专家系统是今后遥感信息提取的重要发展方向。遥感图像分析专家系统(ES)将专家解译和分析的经验以知识的形式汇集起来，在遥感影像初步分类的基础上开展判据的逻辑推理，并引入部分空间拓扑关系。ES 中的不确定性推理和层次推理方法以及启发式推理技术都是遥感图像信息分析的有力工具，因为对某一用户而言，仅涉及其所在的局部，土地利用/土地覆盖分布规律是十分清楚的，以局部地区为目标建立遥感影像分析的专家系统十分有利，这种专家系统与普通图像处理系统可以衔接起来，接口数据形式可参考 GIS 方式，以初步分类结果的多边形为单元建立起来。

## 2. 亟需解决的问题

(1) 建立不同层次的区域地理信息系统。

为了能在 GIS 的支持下，提高区域土地利用/土地覆盖遥感调查精度，应建立不同层次的区域地理信息系统。系统的内容包括自然、经济、社会等有关的数字化图件，有关的统计数据及本底的遥感数据等。

(2) 发展更完善和更有效的数据分析方法和软件，以适应遥感数据实用化的需要。目前的遥感图像处理软硬件系统，大多以数据的波谱特征统计分类算法为基础，容量小，分类精度不高，很难满足实用化的要求。为此，必须在深入研究遥感成像原理，特别是遥感成像的生物地学规律等的基础上，加强对遥感数据空间特征抽取与分析方法、多种遥感数据的综合分析方法、在地理信息系统支持下多种来源数据的覆合分析方法、以经验和知识为基础的判读专家系统方法等的研究<sup>[4]</sup>。

(3) 遥感分类结果的快速地图输出。地图是遥感调查的主要成果，从遥感分类结果到地图的转换需要制图综合过程。制图综合并不是按照图斑的大小进行机械的综合，而是要通过综合来更好地反映制图区域特征。自动制图综合的实现需要结合计算机、数学、地理学、地图学及人工智能等知识。

(4) 土地利用/土地覆盖类型含义的规范化。目前，不同区域在土地利用/土地覆盖遥感调查中，分类出的同一土地利用/土地覆盖类型往往不一致，如我国北方地区的田块较大，分类出的农田像元往往接近纯像元；而南方地区的农田田块较小，分类出的农田像元往往是非纯像元，即包括一些农村居民点、水体等。同样，不同的遥感调查所得出的土地利用/土地覆盖类型往往也有不同含义。因此，要对不同区域、不同层次遥感调查的土地利用/土地覆盖类型的含义进行规范化，这样，有利于不同区域、不同层次遥感调查结果的互相比较。

## 参考文献

[1] 何昌垂. 1996. 21 世纪空间遥感与信息发展的机遇与挑战. 遥感信息, (3)

[2] 魏晨曦. 1996. 高分辨率卫星成像系统的发展简介. 遥感信息, (4)

[3]舒宁.1995.新型传感器与 3S 集成.见：RS.GIS.GPS 的集成与应用，测绘出版社

[4]阎守邕等.1990.中国遥感技术系统的软科学研究.中国科学技术出版社，14

