行地理坐标配准需要至少 20 个地面控制点。当然地面控制点的选取与影像的质量、空间分辨率也是分不开的，所以控制点位置的选取完全是个人的主观行为，没有办法保证控制点的位置与实际位置不发生偏移。控制点选取的好坏通常用 RMSE（均方根误差）来衡量，即对控制点实际位置（真实值）与选取位置（估算值）之间的偏差估量。计算方程如下

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\left(x_{\mathrm{act},i}-x_{\mathrm{est},i}\right)^2+\sum_{i=1}^{n}\left(y_{\mathrm{act},i}-y_{\mathrm{est},i}\right)^2\right)\Big/n}$$

式中，n 是控制点的数量，$x_{\mathrm{act},i}$、$y_{\mathrm{act},i}$ 是 i 点的实际位置的 x、y 值，$x_{\mathrm{est},i}$、$y_{\mathrm{est},i}$ 是 i 点的估算位置的 x、y 值。为了保证几何变换的精度，控制点的均方根误差必须控制在一定的容差值范围内。这个值会根据数据的精度、比例尺及空间分辨率有一定的区别。例如，输入数据是比例尺为 1∶24 000 的标准地图，小于 6m 的均方根误差是可以接受的。而一幅空间分辨率为 30m 的 TM 影像，均方根误差小于 1 个像元是可以接受的，即 30m。

经过几何变换后的图像是一幅包含投影坐标的新图像，但是图像的像元值是空的，必须通过像元值重采样的操作对其像元值进行重新填充。重采样是指利用原始图像的像元值填充新图像的每个像元，具体方法包括最邻近插值、双线性插值和三次卷积插值。最邻近插值法是将原始图像的最邻近像元值填充到新图像的每个像元中。该方法计算速度快，同时保留了原始值，这对一些类型栅格数据（如草地类型、土地利用类型）的重采样非常重要。双线性插值和三次卷积插值都是把原始图像的像元值经过距离加权平均后，再填充到新图像中。其中，双线性插值利用三次线性插值得到的 4 个最邻近像元值的平均值填充到新图像的相应像元。三次卷积插值则用五次多项式插值得出 16 个邻近像元的平均值，赋予新像元。这两种方法都改变了原始值，但是能产生更加平滑的图像，对剔除异常值、平滑图像非常有效。

二、地理坐标系统

地理坐标系统是由经度和纬度定义的，空间要素的精确位置是由经线和纬线的交叉点确定的（图 8-2）。经线和纬线的角度可以用度-分-秒（DMS）、十进制表示的度数（DD）或者弧度（rad）的形式表示。1 弧度等于 57.2958°，1°等于 0.01745 弧度。

地球并非一个完美的球体，它是一个赤道比两极之间略宽的近似椭球体（图 8-2）。绘制地球表面空间要素的第一步是选择一个与地球形状、大小接近的椭球体模型。椭球有与赤道相连的长轴（a）和与极点相连的短轴（b）。扁率（f）用于测量椭球两轴的差异，定义公式为：$f=(a-b)/a$。基于椭球的地理坐标被称为大地坐标，它是所有地图制图系统的基础。而大地基准就是地球的一个数学模型，可作为计算某个空间要素的地理坐标的参照或基础。大地基准包括大地原点、地球椭球体参数及椭球与地球在原点的分离。随着空间测量技术的发展，人类对地球的认识在逐步提高，对地球测量的精度也在提高。由此形成的大地基准也在逐步提高精度。椭球体与基准面之间是一对多的关系，也就是基准面是在椭球体基础上建立的，但椭球体不能代表基准面，同样的椭球体



图 8-2　地理坐标系统

能定义不同的基准面。很多国家通过本地测量逐渐建立了自己的大地基准，如欧洲基准、澳大利亚基准、日本基准、印度基准等。我国参照苏联从 1953 年起采用的克拉索夫斯基（Krassovsky）椭球体建立了我国的北京 54 坐标系，1978 年采用国际大地测量协会推荐的 1975 地球椭球体建立了我国新的大地坐标系——西安 80 坐标系。目前大地测量基本上仍以北京 54 坐标系作为参照，北京 54 与西安 80 坐标之间的转换可查阅国家测绘地理信息局公布的对照表。

20 世纪 80 年代末，克拉克椭球 1866 成为美国地图绘制的标准椭球体。在 1986 年美国国家大地测量局又引入了 NAD83（1983 年北美基准），该基准是以 GRS80（大地测量参照系统 1980）椭球体为基础，以地心为中心的基准面。WGS1984（全球大地测量系统 1984）是由美国国防部的国家图像与制图局（现国家地理空间情报局）制定的参照系统或基准。基准面采用 WGS84 椭球体，它是一种地心坐标系，即以地心作为椭球体中心的基准面，目前 GPS 测量数据多以 WGS84 为基准。需要注意的是，基于相同坐标系但不同基准的数字化图层不能正确配准，所以不同基准的数字化图层需要做大地基准的转换。无论是 NAD27 转成 NAD83 或者 WGS84 都需要大地基准的转换，即对从一个地理坐标系统到另一个地理坐标系统的经纬度值进行再计算。商业 GIS 软件包提供了可供转换的方法，如三参数法、七参数法、Molodensky 法等。

三、地图投影

地图投影是利用一定的数学法则把地球表面的经纬线转换到平面上的理论和方法。由于地球是一个赤道略宽两极略扁的不规则的梨形球体，故其表面是一个不可展平的曲面，所以运用任何数学方法进行这种转换都会产生误差和变形，为按照不同的需求缩小误差，就产生了各种投影方法。按投影变形方式，可以把投影分为等角投影、等积投影和任意投影。等角投影，又称正形投影，指投影面上任意两方向的夹角与地面上对应的角度相等。在微小的范围内，可以保持图上的图形与实地相似，但不能保持其对应的面积成恒定的比例，图上任意点的各个方向上的局部比例尺都应该相等，不同地点的局部

比例尺是随着经纬度的变动而改变的。等积投影指地图上任何图形面积经主比例尺放大以后与实地上相应图形面积保持大小不变的一种投影方法。任意投影为既不等角又不等积的投影，其中还有一类“等距（离）投影”，在标准经纬线上无长度变形，多用于中小学教学图。根据正轴投影时经纬网的形状，可以分为圆锥投影、圆柱投影和方位投影（图 8-3）。其中，圆锥投影主要应用于中纬度地区沿着东西伸展区域的国家和地区。圆柱投影是圆锥投影的一个特殊情况，正轴圆柱投影表现为相互正交的直线。等角圆柱投影（墨卡托）具有等角航线，表现为直线的特性，因此最适宜编制各种航海、航空图。方位投影的等变形线为同心圆，最适宜表示圆形轮廓的区域，如表示两极地区的地图。

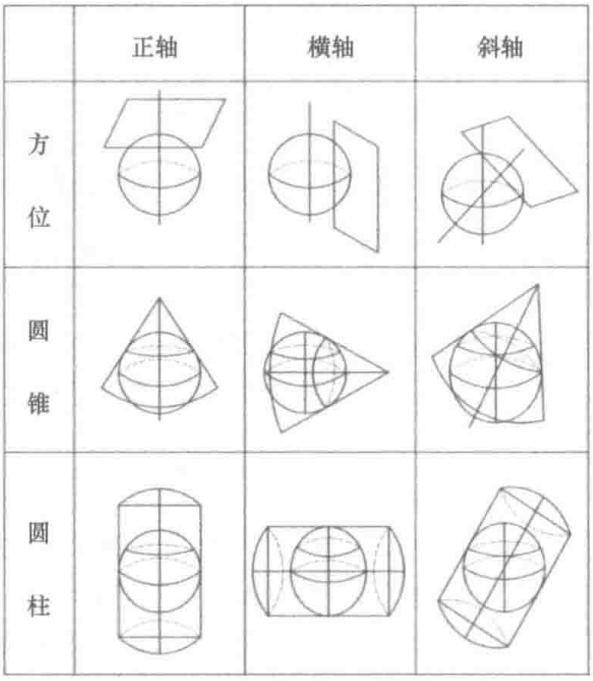


图 8-3　几何投影类型

四、常用地图投影

我国的基本比例尺（1∶5000，1∶1 万，1∶2.5 万，1∶5 万，1∶10 万，1∶25 万，1∶50 万，1∶100 万）地形图中，大于等于 50 万的均采用高斯-克吕格投影（Gauss-Krüger Projection），又称横轴墨卡托投影（Transverse Mercator）；小于 50 万的地形图采用正轴等角割圆锥投影，又称兰勃特投影（Lambert Conformal Conic）。高斯-克吕格投影依椭圆柱作为投影面，并与椭球体相切于一条经线上，该经线即为投影带的中央经线，按等角条件将中央经线东西一定范围内的区域投影到椭圆柱表面上，再展成平面，便构成了横轴等角切椭圆柱投影。在 GIS 系统中均采用 6°或 3°分带的高斯-克吕格投影，因为一般坐标采用的是 6°或 3°分带的高斯-克吕格投影坐标。高斯-克吕格投影以 6°或 3°分带，每一个分带构成一个独立的平面直角坐标系，投影带中央经线投影后的直线为 X 轴（纵轴，纬度方向），赤道投影后为 Y 轴（横轴，经度方向），为了防止经度方向的坐标出现负值，规定每带的中央经线西移 500km，即东伪偏移值为 500km，由于高斯-克吕格投影每一个投影带的坐标都是对本带坐标原点的相对值，各带的坐标完全相同，因此规定

在横轴坐标前加上带号，如（4231898，21655933），其中 21 即为带号，同样所定义的东伪偏移值也需要加上带号，如 21 带的东伪偏移值为 21 500 000m。假如工作区位于 21 带，即经度在 120°～126°，则该带的中央经度为 123°。

第三节　地理信息系统数据模型

为了能够利用 GIS 工具来描述现实世界，并解决其中的问题，必须采用一定的模型来描述现实世界。GIS 中的空间数据就是对现实世界进行描述的方式。空间数据包含位置及属性信息，可以对任何现实世界的要素进行描述。在 GIS 中，有两种空间数据模型——矢量数据和栅格数据模型。两种数据都可以表达空间要素，但各有优缺点。一般矢量数据对离散型的空间要素描述较好，如台站、河流等；而栅格数据更适用于连续型的空间要素，如高程。本节的主要内容包括矢量数据和栅格数据模型的数据结构，以及二者之间的转换方法。

一、矢量数据模型

矢量数据模型用点、线和面等几何对象来表示地理空间要素。点要素只有位置特征，是由地理空间中一对 x、y 坐标表示的，如水井、采样点等；线要素除了位置特征，还具有长度特征，由一系列 x、y 坐标对表示，如道路、河流、等高线等；而面要素除了位置之外，还有面积和周长等特征，是由连接的、闭合的和不相交的线段组成，如伐木场、湖泊等。需要注意的是，利用点、线、面表示地理空间要素并非完全绝对的，还取决于地图比例尺和地图出版机构建立的指标体系。例如，在小比例尺（1∶1 000 000）地图中，一个城市可以用点来表示，而在大比例尺（1∶24 000）地图上却表示为一个面。

矢量数据模型是 GIS 发展中变化最大的一个方面。自 20 世纪 80 年代，ESRI 公司为了把 GIS 从当时的 CAD（计算机辅助设计）中分离出来而引入了内置拓扑的 Coverage 模型，其对应的软件包是 Arc/Info，后来开发了不具备拓扑特性的 Shapefile 矢量数据模型，对应的软件包是 ArcView，而目前的 ArcGIS 软件包对应的数据模型为 Geodatabase。其中 Coverage 和 Shapefile 属于地理关系数据模型，其最大的特点是采用一个分离的系统，分别存储空间数据和属性数据，两者通过唯一的标识号一一对应，相互关联。而 Geodatabase 属于基于对象的数据模型，它把空间数据和属性数据存储在一个系统中，把空间数据以 BLOB（Binary Large Object）格式的特定字段存储在属性数据表格。在 ArcGIS 中，不但可以使用 Coverage、Shapefile 和 Geodatabase 等格式存储矢量数据，而且不同格式之间是可以相互转换的。

另外，还有一种将点、线和面合成应用，可以更好表示空间复合要素的矢量数据，最常见的就是不规则三角网（Triangulated Irregular Network，TIN），其他还有分区和路径。TIN 把地表近似描绘成一组相互不重叠的三角面，每一个三角面在 TIN 中都有一个恒定的倾斜度。TIN 的基本组成要素包括点、线和面。可以由高程点和等高线创建 TIN，

也可以将线要素如河流、山脊线、道路及面要素如湖泊和水库相结合，以提高地表拟合的精度。平坦的地区可以用少量的样点和大三角形描绘，而地势复杂的区域则需要更加密集而较小的三角面来描绘。TIN 数据通常用于地形制图和分析，以及三维地表的创建。

矢量数据可以是拓扑的，也可以是非拓扑的。拓扑在 GIS 中的含义是利用表格或图形来研究几何对象的排列及其相互关系。对一个矢量数据模型而言，拓扑可以定义一条弧段的方向，以及弧段会聚或相交处的节点。Coverage 矢量数据的拓扑关系有三种：连接性、面的定义及邻接性。连接性确保弧段间通过节点彼此连接；面是由一系列相连的弧段定义的；邻接性规定了弧段的方向性，且具有左多边形和右多边形。Geodatabase 将拓扑定义为关系规则，可以让用户去选择规则，并在要素数据集中执行（表 8-1）。Shapefile 是 ESRI 产品中一种标准的非拓扑的矢量数据格式，尽管在 Shapefile 中，点、线、多边形的表达与拓扑矢量数据模型一样，但是没有描述几何对象空间关系的文件。虽然非拓扑数据在保证数据质量和完整性，以及 GIS 分析中有一定的缺陷，但是非拓扑矢量数据比拓扑数据能更快速地进行计算及显示，而且非拓扑数据具有非专有性和互操作性的特点，使得 Shapefile 可以在不同的软件包之间通用，减少了数据生产的重复工作。

表 8-1　Geodatabase 数据模型的拓扑规则

要素类	规则
多边形	不重叠，没有间隙，不与其他图层重叠，必须被另一要素覆盖，必须相互覆盖，必须被覆盖，边界必须被覆盖，区域边界必须被另一边界覆盖，包含点
线	不重叠，不相交，没有悬挂弧段，没有伪结点，不相交或内部接触，不与其他图层重叠，必须被另一要素覆盖，必须被另一图层的边界覆盖，终结点必须被覆盖，不能自重叠，不能自相交，必须是单一部分
点	必须被另一图层的边界覆盖，必须位于多边形内部，必须被另一图层的终结点覆盖，必须被线覆盖

二、栅格数据模型

尽管矢量数据对表示具有特定位置及离散特征的几何要素比较理想，但是对一些具有连续特征的几何要素的表示就不是很理想了，如高程、降水量、温度、土壤侵蚀等。而栅格数据可以很好地弥补矢量数据在表示连续现象的地理特征数据方面的不足。

栅格结构是用大小相等、分布均匀、紧密相连的像元（网格单元）阵列来表示空间地物或现象分布的数据组织。栅格数据的每一个像元值可以表示与其对应位置的空间特征属性，像元值的变化可以反映地理要素在空间上的变异。栅格数据是最简单、最直观的空间数据结构，它将地球表面划分为大小、均匀、紧密相邻的网格阵列。每一个单元（像素）的位置由它的行列号定义，所表示的实体位置隐含在栅格行列位置中，数据组织中的每个数据表示地物或现象的非几何属性或指向其属性的指针。其实，栅格数据也是日常生活中接触最多的一种数据模型，如图形文件（bmp、JPEG、tif、gif）、航空像片、遥感影像、数字正射影像、二值扫描文件等都属于栅格数据。这些栅格文件都可以利用 GIS 软件包对其进行转换，得到 GIS 软件支持的特定栅格数据格式，如 ArcGIS 的

ESRI 格网格式（grid）。

与矢量数据不同的是，栅格数据在过去的 40 年中，其概念或数据格式并未改变，仅仅在数据结构及数据压缩领域不断取得进展。对于栅格结构，点实体由一个栅格像元来表示；线实体由一定方向上连接成串的相邻栅格像元表示；面实体（区域）由具有相同属性的相邻栅格像元的块集合来表示。栅格数据在 GIS 中又称为格网或影像，由行、列和像元组成。其中，行为 x 坐标，列为 y 坐标，用来确定空间要素的位置，像元是栅格的最小单位，表示由行列确定的该位置上空间现象的特征。依据像元值的编码格式，栅格可以划分为浮点型或整型栅格。整型栅格的像元值不带小数位，而浮点型的带小数位。通常情况下，整型栅格可以用来表示具有类别性质及次序特征的空间现象。例如，表示类别型的土地利用模型，用数值 1 表示农田、2 表示林地、3 表示居民用地等；表示次序型的土壤侵蚀模型，用数值 1 表示不严重、2 表示严重、3 表示非常严重等。而浮点型栅格通常用来表示具有连续特征的空间现象，如海拔、降雨量等可能具有浮点数值的空间现象。两者之间最大的区别在于浮点型栅格需要更大的计算机存储空间，这在很多涉及大范围的 GIS 项目中是必须要考虑的问题。另外，在 GIS 软件中，整型栅格可以通过读取数值属性表来了解像元值的基本情况，而浮点型栅格由于存在大量的像元值而没有属性表。图 8-4 为点、线、面要素的栅格数据和矢量数据的表示。

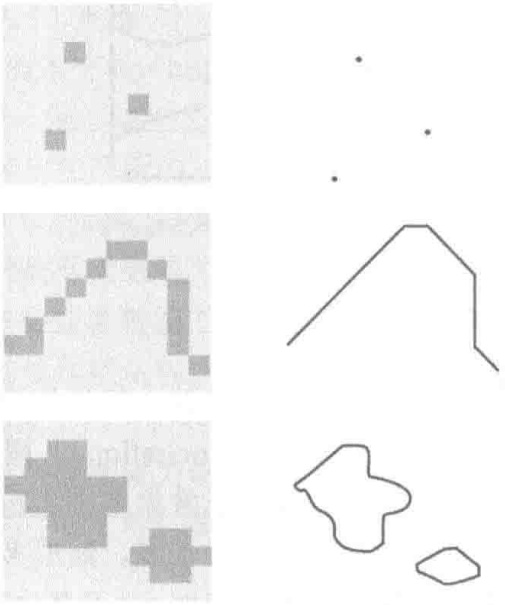


图 8-4　点、线和面要素的表示（Chang，2010）

左边为栅格数据；右边为矢量数据

另外，像元的大小决定了栅格数据的空间分辨率。10m 分辨率的像元代表 100m^2（10m×10m）的实际地表空间，而 50m 分辨率的像元意味着 2500m^2 的范围。有些遥感影像的空间分辨率甚至为几十公里。像元越小，意味着地理空间特征越精细，位置越精确，但相应的像元数量基数更大，存储空间也随之增大，数据处理的时间也会增加。像元很大则无法表示空间要素的精确位置，但是会降低存储空间，提高数据处理的时间。然而，大像元还会带来另外一个问题，即混合像元的问题。混合像元表示一个像元内包含了一种以上的地物类型，如何对混合像元进行赋值也是 GIS 研究人员必须考

虑的问题。一般情况下主要有以下几种赋值方式可供参考，中心点法、面积占优法、重要性法及百分比法。用处于栅格中心处的地物类型或现象特性决定栅格代码，在图 8-5 所示的矩形区域中，中心点 O 落在代码为 C 的地物范围内，按中心点法的规则，该矩形区域相应的栅格单元代码为 C，中心点法常用于具有连续分布特性的地理要素，如降雨量分布、人口密度图等。面积占优法以占矩形区域面积最大的地物类型或现象特性决定栅格单元的代码，在图 8-5 所示的例子中，B 类地物所占面积最大，故相应栅格代码定为 B。面积占优法常用于分类较细，地物类别斑块较小的情况。重要性法根据栅格内不同地物的重要性，选取最重要的地物类型决定相应的栅格单元代码，假设图 8-5 中 A 类是最重要的地物类型，即 A 比 B 和 C 类更为重要，则栅格单元的代码应为 A。重要性法常用于具有特殊意义而面积较小的地理要素，特别是点、线状地理要素，如城镇、交通枢纽、交通线、河流水系等，在栅格中代码应尽量表示这些重要地物。百分比法根据矩形区域内各地理要素所占面积的百分比数确定栅格单元的代码，如可记面积最大的两类 BA，也可以根据 B 类和 A 类所占面积百分比数在代码中加入数字。

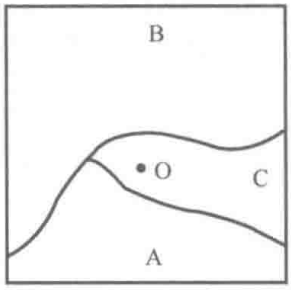


图 8-5　栅格单元代码的确定

三、数据转换

栅格数据与矢量数据之间是可以相互转换的。将矢量数据转换成栅格数据称为栅格化（Rasterization），反之称为矢量化（Vectorization）。栅格化一般分为三个基本步骤：第一步，需要建立一个可以覆盖整个矢量数据范围且指定像元大小的栅格面，所有像元的初始值为 0。第二步，改变那些对应于点、线或多边形界限的像元值。对于点和线的像元值使用矢量数据的属性值直接赋值，对于多边形的边界线赋予多边形值。第三步，利用多边形的边界值填充多边形内部所有像元值。目前已经开发出了很多高效的关于内部点的填充算法，比较具有代表性的包括：内部点扩散算法、复数积分算法、射线算法和扫描算法及边界代数算法。矢量化就是提取有相同编号的栅格集合表示多边形区域的边界和边界的拓扑关系，并采用矢量数据模型存储由多个小直线段组成的边界线的过程，包括线的细化、线的提取和拓扑关系重建三个主要步骤。由于像元精度的限制曲线可能不够圆滑，需采用一定的插补算法进行光滑处理，常用的算法有线形迭代法、分段三次多项式插值法、正轴抛物线平均加权法、斜轴抛物线平均加权法和样条函数插值法。

第四节　空间数据与属性数据编辑

本节首先介绍 GIS 数据的获取方法，包括从现有数据交换中心获取数据及创建新的数据，然后介绍空间数据和属性数据的编辑方法。

一、GIS 数据获取

GIS 数据获取是执行一个项目的前提条件，也是在一个 GIS 项目中花费最大的部分。我们可以在一些开放的数据中心寻找与项目有关的数据，也可以自己创建新的数据。目前，各级政府机构（如农业部、国土资源部、交通运输部、国家测绘地理信息总局、气象局等）已经建立了很多数据共享网站，不但包含了大量的基础 GIS 数据库，如国界、省界、道路、河流等，以及土地利用、草地类型等专题 GIS 数据库，而且包括大量的遥感数据。目前我国比较成熟的数据交换中心主要有寒区旱区科学数据中心（http://westdc.westgis.ac.cn）、地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）、中国气象数据网（http://data.cma.gov.cn/）、中国科学院数据云（http://www.csdb.cn/）、全球变化科学研究数据出版系统（http://www.geodoi.ac.cn）等。国外也有很多类似的数据交换中心，如美国的地质调查局（http://www.usgs.gov）、人口普查局（http://www.census.gov）、自然资源保持局（http://soils.usda.gov）和欧洲太空局（http://www.esa.int/ESA）等。很多数据资源都可以注册后免费申请使用。另外，除了这些公共资源，许多私人公司也介入了 GIS 的数据市场，有些公司可以直接为客户生产新的 GIS 数据，也有利用公共数据生产增值型 GIS 数据。因此，在执行一个项目前，首先要在这些公共资源和私人资源中寻找有什么数据资料可以提供，避免建立新数据所需的大量时间与精力。但是，在无法寻找到所需数据的情况下，建立新的数据是必须要做的工作。通常，将纸质地图通过扫描数字化是最常见的建立新数据的方法，其他包括从包含 x、y 坐标的文本文件创建数据，利用野外测量数据（GPS、全站仪、测距仪、方位仪等），通过交换式终端转换成 GIS 数据。目前航空像片和卫星遥感数据已经逐渐成为最主要的 GIS 数据源，尤其是搭载在不同卫星上的各类传感器，提供了大量的可见光到微波的对地观测信息，极大地丰富了 GIS 的数据来源（图 8-6）。

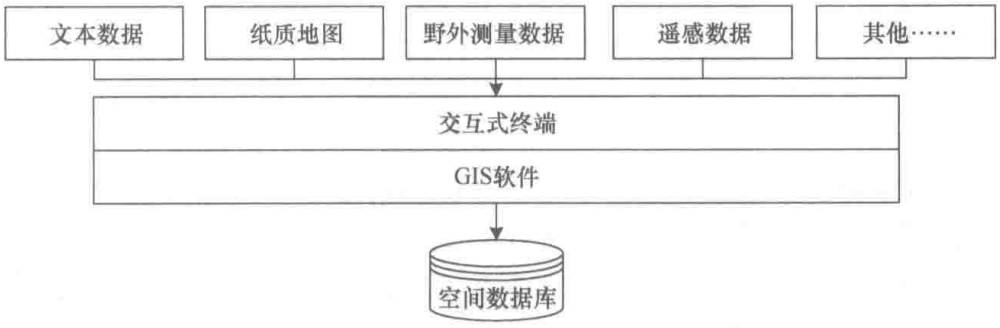


图 8-6　GIS 数据来源

从数据交换中心获取的数据，都包含了元数据（Metadata）信息。元数据是对数据

进行描述的数据。一份完整的元数据应该包括标识信息、数据质量、空间数据组织、空间参照信息、实体和属性、出版信息、元数据参考、引文、时段和联系方式。元数据可以帮助用户更好地理解数据，方便用户对数据的使用。而遥感数据的元数据一般称作头文件（Head File），主要描述遥感数据的获取时间、处理时间、行列信息、空间参考、空间分辨率、波段等。

（一）x、y 坐标文件

地理空间数据可以从包含 x、y 地理坐标（十进制）或投影文件的文本文件（*.txt、*.xls）中直接生成，一对坐标生成一个点。例如，在草地野外调查中，使用 GPS 可以记录样方的经纬度，同时记录的其他草地信息可以在室内作业中直接转换成空间参考数据。也可以将记录的气象台站经纬度信息文本直接导入 GIS 软件包，生成气象台站空间分布图。

（二）扫描数字化

数字化是将数据由模拟格式转换成数字格式的过程。以前的数字化工作大多用手扶跟踪数字化仪完成，但是该仪器的工作量非常繁重，目前逐渐被屏幕数字化取代。因为屏幕数字化可以方便地对数字地图进行放大、缩小、漫游等操作，加快了数字化的过程，并且可以在一定程度上提高数字化的精度。具体步骤如下。

1）地图扫描：利用宽幅扫描仪将纸质地图扫描成数字图像。扫描文件要保证扫描精度至少在 300dpi 以上（即每英寸[①]300 个点）。

2）几何变换：根据纸质地图的经纬网格选取控制点，对地图进行几何变换，配准到现实坐标系统。

3）数字化：将几何变换后的数字地图作为背景图，利用屏幕数字化的方式逐线段进行数字化。

4）空间数据编辑：将数字化的矢量数据进行编辑，消除误差。

5）拓扑编辑：如果生成的是基于拓扑的矢量文件，还需进行拓扑编辑。

6）属性数据录入：根据完成的矢量数据文件，录入属性数据，并进行校验。

（三）野外观测数据

利用 GPS 和其他测量工具如中星仪、经纬仪或全站仪，获取方位角、距离、地块边界、海拔等地理空间信息，经过交互式终端的转换，可以直接转换成 GIS 支持的数据格式，导入到 GIS 空间数据库中。

（四）遥感数据

遥感数据是 GIS 最主要的数据来源之一。通过数字化或解译卫星影像，可以生成一系列专题数据库，如土地覆盖类型、植被类型、土壤侵蚀、积雪图等。遥感资料可以提供从可见光到微波所有波段的地物反射辐射信息，结合 GIS 技术，可以在陆地资源监测、水环境、生态、灾害监测与预警、气候变化等领域发挥巨大的作用。由航空摄影获取的

① 1 英寸=2.54cm

数字正射影像也在土地利用、军事等领域广泛应用。遥感数据还能提供动态的信息，对更新现有的 GIS 数据库也有很大的帮助。

目前，遥感数据的处理与分析软件包和 GIS 软件包的功能界限越来越不明显，可以预见，在未来的 GIS 软件的发展中，会逐步加强对遥感数据的处理能力，整合目前遥感数据分析软件的功能。ENVI（The Environment for Visualizing Images）是一套完整的遥感图像处理平台，原本是美国 Exelis Visual Information Solutions 公司的旗舰产品。它是由遥感领域的科学家采用交互式数据语言 IDL（Interactive Data Language）开发的一套功能强大的遥感图像处理软件。2007 年 6 月，ESRI 公司和 ITT Visual Information Solutions 公司宣布了两者的商务合作计划，对 ArcGIS 地理信息系统平台进行功能拓展，大大地提高了用户的影像处理能力。随着遥感与 GIS 一体化的发展，最新版本的 ENVI 已经成为与 ArcGIS 系列一体化集成的最佳遥感平台。

二、空间数据编辑

空间数据编辑是指在数字地图上添加、删除和修改要素的过程。其主要目的是消除数字化的错误。无论是采用手扶跟踪数字化还是屏幕数字化，人为的误差都是无法避免的，总会出现错误。这些错误有些是由数字化源文件造成的，但大多数是由人为的操作误差造成的。这些误差基本上可以分为两种类型：定位误差和拓扑误差。定位误差是指数字化过程中造成的几何误差，如多边形缺失或与空间要素几何错误有关的线条扭曲。拓扑误差是与空间要素之间的逻辑不一致有关，如悬挂弧段和多边形未闭合等。

（一）定位误差

对数字化后的地图进行定位误差的修正，可以通过用于数字化的源数据来检查是否出现定位错误。因为无论是什么方式的数字化操作，都会产生一定的误差，尤其是人为操作的手扶跟踪数字化和屏幕数字化，大量的手眼并用操作势必会导致数字化后的线条与源地图产生一定的偏差。但是如何评价二者之间的匹配程度，目前还没有一个统一的标准，通常的定位误差都是由数字化地图的制作者决定的。例如，美国自然资源保持局规定，在土壤地理调查数据库中，每一条数字化的土壤界线必须落在源地图的 0.01in（0.245mm）线宽之内。对于 1∶24 000 比例尺的地图，这一偏差代表的实际地面距离为 20ft（6～7m）。另外，源地图的精度受比例尺的影响较大，随着比例尺的变小，地图细节的表现就越综合，趋势线的概化程度的增加也会对数字化后的图像产生影响。如果是采用自动跟踪扫描算法，当二值图像的栅格线条相遇或相交，线条靠得太近或者线条太宽并且出现断裂时，跟踪算法往往会产生较大的误差，会导致生成的线条出现坍塌、变形或产生多余的线条。还有一种定位误差主要是纸质地图在转换成现实地理坐标的过程中产生的。地面控制点选取的偏差，导致整个数字化地图在现实坐标系统中出现偏移，这种误差只能通过重新数字化控制点并进行几何变换才能矫正。

（二）拓扑误差

拓扑误差会影响到 GIS 软件或用户自定义的拓扑关系，从而影响到 GIS 数据的空间

分析。例如，ESRI 公司开发的 Coverage 矢量数据模型对拓扑关系的定义可以归纳为三个方面：①连接性，弧段间通过节点彼此连接；②多边形，由一系列相连的闭合弧段组成；③邻接性，弧段有方向性，且具有左多边形和右多边形。而 Geodatabase 数据模型包含了 25 种应用于点、线和多边形的拓扑规则。如果数字化的要素不能遵循这些关系，就会产生错误。图 8-7 为拓扑误差的示例图。

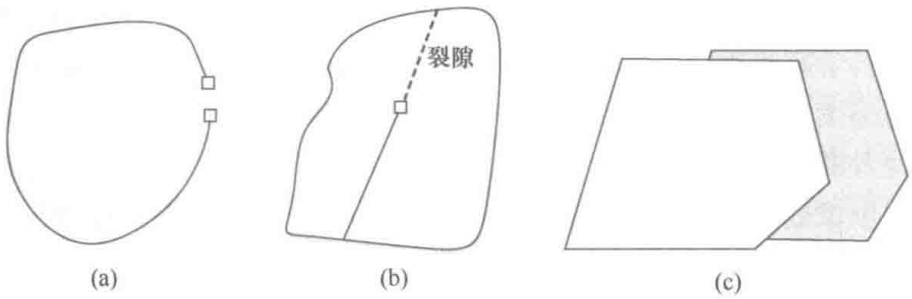


图 8-7　拓扑误差示例图

（a）为闭合多边形；（b）两个多边形之间有裂隙；（c）多边形重叠

（三）拓扑编辑

拓扑编辑的目的主要是确保数字化的空间要素遵循数据模型固有的和用户指定的拓扑规则。GIS 软件包可以根据这些规则发现和显示拓扑错误，并提供了消除拓扑错误的工具。以 ESRI 公司开发的 Coverage 矢量数据模型为例，要对一个 Coverage 图层进行拓扑编辑，首先要建立拓扑。ArcGIS 软件包提供了可以创建拓扑关系的 Clean 命令，这个命令可以对整个图层根据拓扑规则进行拓扑构建，在构建的过程中可以设定模糊容差或指定悬挂弧段长度的方式消除拓扑错误（图 8-8）。其中悬挂弧段设定为输出图层悬挂弧段的最小长度，如果一条悬挂弧段的长度小于预设的悬挂弧段将被直接删除。模糊容差是指容许的两点之间的最短距离，输出图层中如果两条弧段之间的两点间小于模糊容差，则会自动合并成一条弧段（图 8-9）。但是拓扑错误的编辑不能完全依赖于拓扑的建立，因为悬挂弧段与模糊容差设置的不合理会导致不该删除的线段被误删，或者不该闭合的线段闭合（图 8-10）。因此，建立拓扑时对悬挂弧段和模糊容差的设置一定要谨慎。完成拓扑构建后，还需对输出图层进行校验，使用 ArcGIS 提供的基本编辑工具（delete、move、add、split、unsplit 和 flip）来修正数字化的错误。

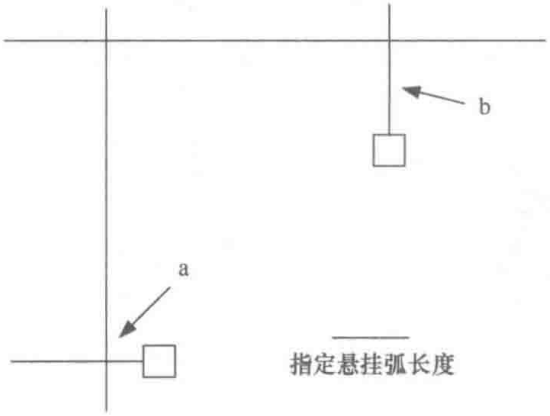


图 8-8　自定义的悬挂弧段长度可以消除过伸的弧段，如弧段 a，但是小于自定义弧段的 b 被保留（Chang，2010）

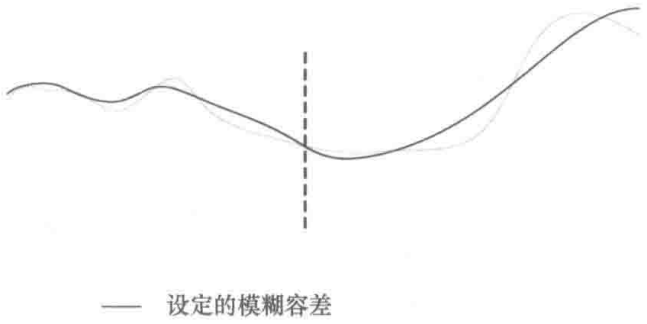


图 8-9　若双重弧段之间的缝隙距离小于设置的容差距离，则双重线会合并为一条线。图中虚线左侧的双重线被接合而右侧保持不变（Chang，2010）

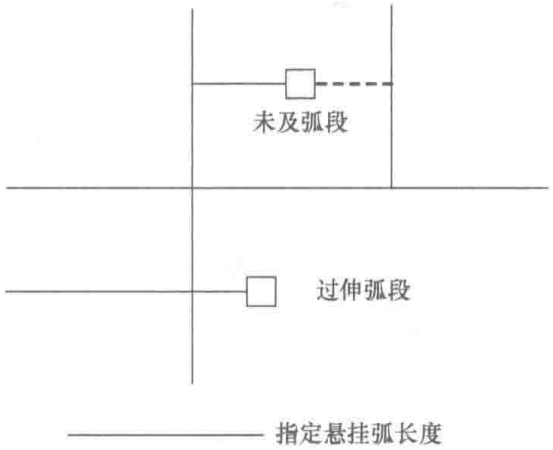


图 8-10　指定悬挂弧段过长会删除应该删除的过伸弧段及不应该删除的未及弧段（Chang，2010）

除了上述的拓扑编辑方法，有时也会用到地图拓扑（Map Topology）的方式对数字化地图进行拓扑编辑，但这种方式主要是针对 Shapefile 文件或 Geodatabase 模型要素。例如，同一个研究区要求不同图层之间的边界必须重合，通过建立地图拓扑可以使它们的外部轮廓重合。除此之外，也可以用拓扑规则对图层进行拓扑编辑。如 Geodatabase 总共有 25 种拓扑规则，通过定义参与要素的类型、每个要素类型的排序、拓扑规则和聚合容差，创建新的拓扑。完成后进行拓扑关系的验证，对错误进行修正。

（四）非拓扑编辑

非拓扑编辑主要是指不涉及拓扑关系的图层编辑，可以修正简单要素、基于现有要素创建新的要素等基本编辑操作。图 8-11 为非拓扑编辑示例图。ArcGIS 对现有要素的编辑工具主要有以下 4 种。

1）延伸或修饰（extend/trim line）。

2）删除或移动（delete/move features）。

3）整形（reshaping features）。

4）分割（split lines and polygons）。

由现有要素创建新要素的工具主要有以下 4 种。

1）合成（merge features）。

2）缓冲（buffer features）。

3） 联合（union features）。

4） 相交（intersect features）。

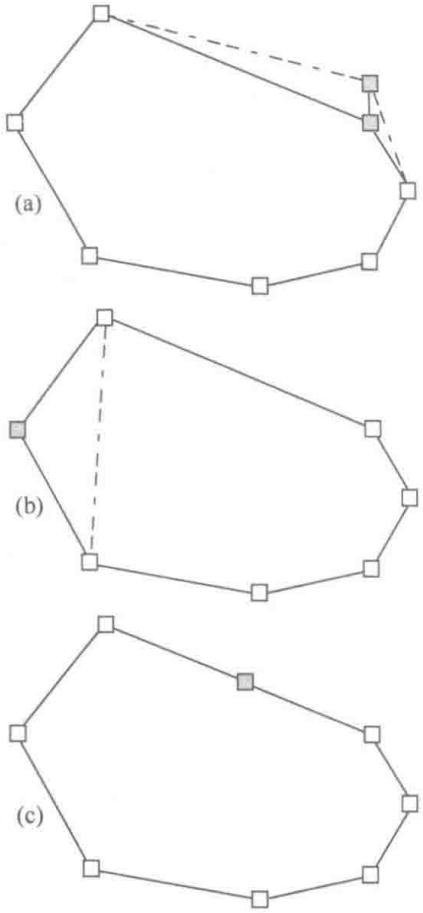


图 8-11 非拓扑编辑示例图（Chang，2010）

（a）移动节点；（b）增加节点；（c）对线条进行整型

（五）其他编辑

除了上述图层的编辑操作外，还有图幅拼接和线的简化与平滑。图幅拼接主要是将若干个相邻图层利用边缘匹配的方式拼接成一个完整的图层（图 8-12）。线的简化是利用简化算法消除线条上的某些点，在不影响图层整体轮廓的情形下，达到简化或概化线条的目的，从而提高计算机对图层的处理速度。代表性的算法有 Douglas-Peuker 算法（Douglas and Peucker，1973）（图 8-13），有时为了图形美观，不显得那么突兀，也会采用弯曲简化算法消除线条明显的角，生成质量更高的简化线条。而线的平滑与线的简化正好相反，是通过增加一些点的方式，改变线的形状，从而使线条显得更加平滑美观，增强数据显示的效果。

三、属性数据编辑

（一）属性数据录入

在数字化一幅纸质地图或遥感影像后，需要录入属性数据。属性数据的输入包括人

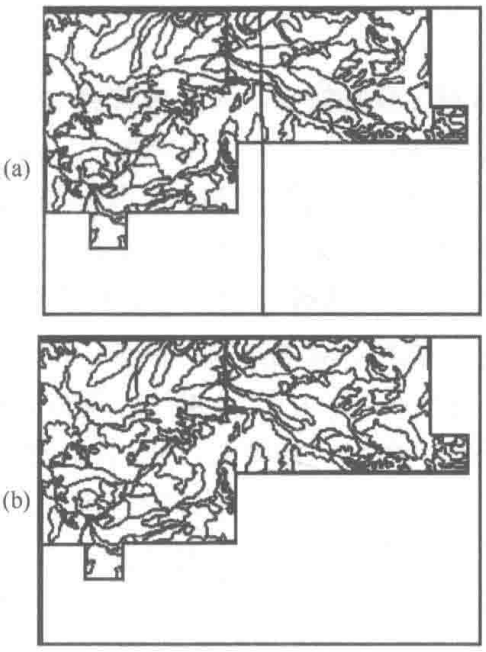


图 8-12　图幅拼接（Chang，2010）

把两个邻近的图层的线段进行匹配，使边界的线段连续，生成一幅完整的图层

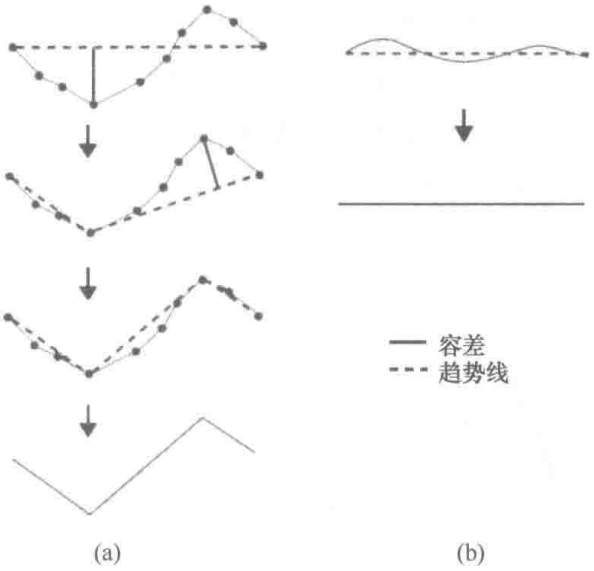


图 8-13　Douglas-Peucker 算法（Chang，2010）

工录入和现有属性表导入两种方式。前者在录入属性数据前，要根据需要录入的属性建立新的字段。建立字段首先要定义字段的名称、宽度、类型和小数位。GIS 软件包对属性字段的定义可以使用字符型、浮点型、整型及 OLBD（二进制块文件）。根据属性字段的类型，可以选择相应的字符类型。需要注意的是，字段的宽度和小数位的选择要尽可能地与属性表最长字符保持一致，太短则会导致录入数据不完整，太长则会占用大量的存储空间，减缓计算机处理的速度。如果能在公共资源或私人资源中找到已经完成的属性数据表格，可通过空间要素标识码将属性表格直接导入 GIS 中，可以减少属性数据输入的时间与人力。如多数 GIS 软件包可以导入分隔符文本文件、dBASE 文件和 Excel 文件。数据录入完成后，为保证属性数据与空间数据的正确关联及属性数据表的准确性和完整性，还需对属性数据表格进行校验核对。

（二）属性数据操作

对属性数据的操作包括对字段的管理，即添加和删除字段，以及属性数据的分类与计算及属性表的合并、关联操作。

对于大部分空间数据，其包含的属性数据中很多属性字段是不需要的，这时就要删除一些不需要的字段，以减少数据的冗余，节省计算机的显示及处理时间。当缺乏一些字段的时候，就要添加字段，尤其在属性数据的分类和计算中，添加字段是首要的一步，新添加的字段可以用来保存分类和计算的结果。例如，将一个属性表中的坡度字段划分为小于 5、5～20、20～40、40～60 和大于 60 共 5 个等级，然后新建一个字段，用来保存分类后的结果，分别是平坦、缓坡、中陡坡、陡坡和极陡坡。也可以组合不同的字段对其进行分类，如将海拔和坡度、温度和降水等进行组合，形成新的分类字段。对属性字段的计算也是如此，可以使用算数表达式和逻辑表达式对一个或多个字段进行计算和判断，将结果保存在新建的字段中。

第五节　空 间 分 析

空间分析是对分析空间数据有关技术的统称，是 GIS 最为核心的内容，也是 GIS 区别于其他信息管理系统的主要特征。本章介绍 GIS 中实现空间分析的基本功能，包括空间查询、缓冲区分析、叠加分析、栅格数据分析、地形制图与分析、流域分析、空间插值等，并描述了相关的算法，以及其中的计算公式。

一、数据查询

数据查询是 GIS 最主要的功能之一。从庞大的空间数据库中，通过查询分析可以发现数据的趋势及数据可能存在的关系。GIS 数据库中图形与属性通过唯一的标识码相互关联，可以按属性信息来查询空间数据的定位信息，如在草地经济价值分级图上查询年内草地产量最高月份的干草产量大于 4000kg/hm^2 的地区有哪些，这和一般非空间的关系数据库的 SQL 查询没有区别，查询到结果后，再利用图形和属性的对应关系，进一步在图上用指定的显示方式将结果定位绘出。也可以通过空间数据查询属性信息，例如，在空间数据中通过鼠标点选的方式查询一个气象台站，与之关联的属性信息也会同时以表格的形式显示。有时也会结合空间特征及属性信息进行查询，如查询距离草原站周边 100km 范围内养殖家畜大于 100 头的牧民有哪几户。这里既涉及空间信息的查询（100km 范围内），又涉及了属性信息的查询（养殖家畜大于 100 头）。这种交互式的、动态链接的查询方式是 GIS 区别于其他信息系统的最大特征。GIS 数据查询工具可以从不同角度探查数据，使用户可以更好地了解数据，为进一步对数据进行分析奠定基础。另外，GIS 软件包还提供了基本的描述性统计变量（值域、中值、分位数、平均值、方差、标准差、Z 得分等），可以以图形（线状图、直方图、散点图、泡状图、QQ 图等）、表格的形式显示查询结果，使用户更好地了解数据的趋势及相互关系。

在大多数 GIS 中，提供的空间查询方式有以下几种。

（一）属性数据查询

针对属性的查询可以从属性表中获取满足条件的子集，可以用表格和图形的方式显示出查询的结果，同时与之相对应的空间数据也会高亮显示。属性数据查询需要用到逻辑表达式，在 GIS 系统中使用结构化查询语句 SQL（Structure Query Language）作为查询表达式。SQL 是一种专门针对关系数据库设计的处理语言，由 IBM 公司于 20 世纪 70 年代开发，被许多商业数据库管理系统采用。SQL 的基本语法如下所示：

Select<属性列表>

From<关系>

Where<条件>

其中，Select 关键字表示从数据库中选择一个或若干个字段，From 关键字表示从数据库中选择的表格，Where 表示选择的条件。例如，从植被类型数据库中选择植被类型为高寒草地，满足条件为地上生物量大于 700kg/hm^2 的区域。

条件语句通常使用查询表达式，由布尔表达式和连接符组成。其中布尔表达式由两个操作符和一个逻辑运算符组成。例如，Alpine_Grassland.Biomass > ‘700’ 表达式中，“Biomass”和“700”就是操作符，而“>”是逻辑运算符。其他的逻辑运算符还包括=、>、<、>=、<=和<>等几种类型。布尔连接符包括 AND、OR、XOR 和 NOT，用于连接两个或更多的逻辑表达式，进行数据的查询。

（二）空间数据查询

空间数据查询是直接对空间数据进行查询获取子集的过程。对空间数据进行查询，与之相对应的属性数据也会被刷亮，并且可以以统计图的形式显示。空间数据查询的方式主要包括：利用指针（鼠标）、图形或地图要素之间的空间关系来选择空间要素。

利用指针选择要素是最简单的对空间要素进行查询的方式，可以用鼠标点选或者拖画出矩形区域来选择地图要素。用图形的方式选择空间要素是指可以使用圆形、矩形、线条或者多边形进行要素的选取，所有落在目标图形范围内或者与线条相交的要素都会被选中。例如，选择以市政府为中心的周边 1km 范围内的餐馆，海拔大于 3000m 的区域包含的草地类型。GIS 还可以提供基于空间关系进行查询的方式。这种查询方式主要是利用要素的空间关系，可以在同一图层中进行选择，但更常见的是在不同图层中进行查询。要素间的空间关系可以归纳为三种类型：包含、相交和邻近。如在指定区域内查找符合条件的要素（包含），选择与某条道路相交的省份（相交），选择落在某一要素指定距离内的要素（邻近）。邻近的一个特殊例子是空间邻接，此时指定的距离为 0，如查找与甘肃省邻接的省份。图 8-14 为以太阳谷为圆心其周边区域的气象台站情况。

（三）基于空间和属性特征查询

GIS 软件不但可以分别利用属性或空间进行查询，而且可以将二者组合起来同时进

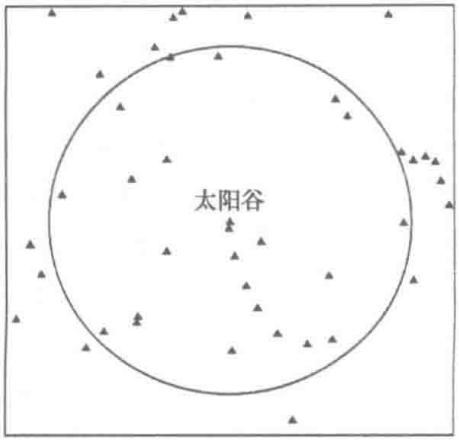


图 8-14　以太阳谷为圆心其周边区域的气象台站
查询以太阳谷为圆心，半径为 10km 的圆心图形，选择落入圆形区域内的气象台站

行查询，拓宽数据查询的深度与广度，如上面介绍的查询距离高速路入口周边 100km 范围内年收入大于 100 万元的加油站就是个很好的例子。

（四）栅格数据查询

针对栅格数据的查询，无论是概念还是方法都与矢量数据查询基本一致，但是由于栅格数据的像元值代表了像元位置的空间特征，在查询表达式中操作数据是栅格本身，而不是矢量数据属性表中的字段，因此对栅格数据的查询与矢量数据是不太一样的。另外，对栅格数据查询会生成一个新的栅格数据，用来保存查询获取的结果。如图 8-15 所示，查询符合坡度为 2 且坡向为 1 的栅格像元，其查询表达式为 Slope = 2 and Aspect = 1，在生成的查询结果中，满足条件的像元被赋值为 1，否则赋值为 0。从这一点上讲，对栅格数据的查询类似于矢量数据的叠加分析，下面会讲到。因此，很多 GIS 学者把栅格数据的查询当作数据分析来对待，而且 GIS 软件包中的栅格数据查询界面也通常与栅格数据分析放在一起。

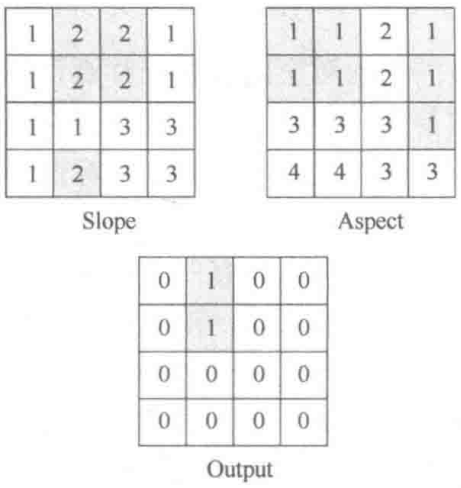


图 8-15　Slope 是坡度图，Aspect 是坡向图，Output 是满足条件 Slope = 2 and Aspect = 1 的查询结果。其中满足条件的赋值为 1，否则为 0（Chang，2010）

除了上述的栅格数据查询方法，也可以使用点、圆形、矩形或多边形等要素特征对栅格数据查询。查询结果在新生成的栅格中，像元值对应于定位点或查询区域范围内的

数值保持不变，其他像元则赋值为无数据（No Data）。

二、矢量数据分析

GIS 具有强大的对空间数据的分析功能，依据对不同领域的应用提供不同的功能模块及扩展模块。水文学领域的 GIS 用户更注重地貌分析和水文建模，因此 GIS 专门开发了水文建模的扩展模块。其他类似的还有三维分析、地统计分析、网络分析、跟踪分析、空间分析等扩展模块。除了这些扩展模块，GIS 软件还为用户提供了一套基本的数据编辑与空间分析工具。下面将对 GIS 软件的基本空间分析功能进行简单的介绍。

（一）缓冲区分析

建立缓冲区的目的主要是选择一个目标要素，基于邻近的概念，将地图分为两个区域，一个区域位于选定要素指定距离之内，另一个区域在指定距离之外。缓冲区通常作为保护区或中立地带应用于管理和规划。可以基于点、线或者面建立指定距离范围的缓冲区。如以沙漠边缘建立一个 5km 的缓冲区，对缓冲区域内的草场长期禁牧；建立沿河流两岸 150 m 的缓冲区，缓冲区内建植草坪以保持水土等；自然保护区缓冲带禁止人类活动，可以更好地保护动植物的栖息环境。将缓冲区作为中立地带，也是解决矛盾冲突的有效手段。例如，众所周知的中立地带（38°N）非军事区将朝鲜分为南北两方。

图 8-16 显示了分别依点、线和面建立缓冲区的事例。其中针对点的缓冲区建立，

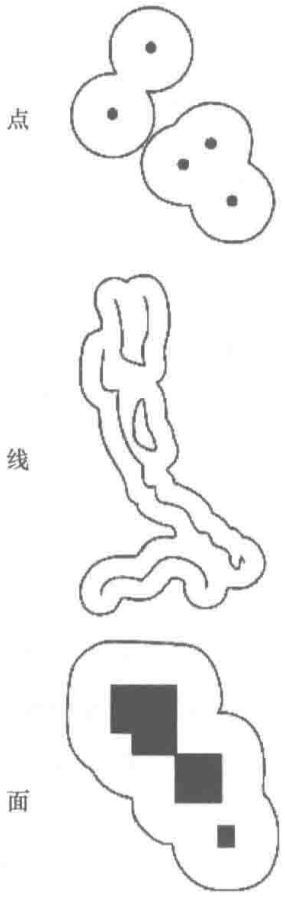


图 8-16　缓冲区分析（Chang，2010）

可以建立一个或多个缓冲区，在建立过程中，还可以对多个点的缓冲区进行边界融合或不融合。对线要素建立缓冲区，未必在线的两侧都有缓冲区，可以只在线的左侧或者右侧建立缓冲区。而多边形缓冲区的建立，可以沿外围或者内围建立缓冲区。如果缓冲区的边界有重叠，可以将重叠边界融合，甚至可以将融合边界设定为圆形或平直。

（二）叠加分析

地图叠加分析是将两个及以上的矢量图层的几何形状和属性组合在一起，生成新的输出图层的操作。输出图层的几何形状代表来自各个输入图层的空间要素的几何交集，因此用于叠加分析的图层必须在空间上进行配准，即具有相同的坐标系统。地图叠加分析可以在点与多边形、线与多边形及多边形与多边形之间进行。其中，点与多边形的叠加主要用于提取输入点图层相应位置的多边形的属性，如将气象台站的点图层文件与植被类型或者土壤类型的多边形图层叠加，可以提取气象台站位置的植被和土壤类型信息。线与多边形的叠加分析类似于点与多边形的叠加，可以提取线段在每一个相交多边形的属性信息。如将一条公路的线图层与行政区划图层叠加，可以提取被每个行政单元分割的公路及其相交的行政单元的属性集合。最常见的叠加分析是多边形与多边形的叠加，输出图层将输入图层和叠加图层的多边形组合在一起，生成一系列的新多边形，新多边形的属性组合了输入图层和叠加图层的所有属性（图 8-17）。

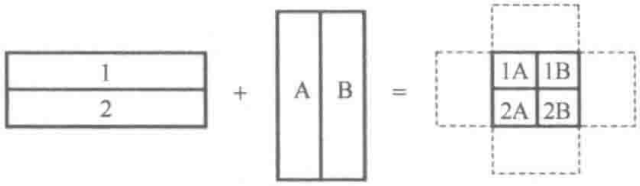


图 8-17　多边形的叠加分析

输出图层的几何范围是输入图层与叠加图层的交集。虚线部分在输出图层中并不存在

地图叠加分析方法都是基于布尔连接符的运算，即 AND、OR、XOR，相对应的操作分别是交集（Intersect）、合集（Union）、差异（Difference）。交集保留了来自输入图层共同区域范围的要素；合集保留了来自输入图层的所有要素；差异仅保留输入图层各自独有的区域范围内的要素。还有一种特殊的叠加分析方法识别（Identity），输出结果仅仅保留落在输入图层定义的区域范围的要素，输入图层可以是点、线或者多边形，但识别图层必须是多边形图层（图 8-18）。

叠加分析的结果对查询和建模方面非常有帮助。例如，在农作物生长适宜区分析中，只要熟悉作物的生长需求环境，结合温度、降水及土壤空间数据库，利用叠加分析就能很方便地找出适合某种农作物种植的区域。如果将不同输入图层的结果进行进一步的地统计分析，还能得出比叠加分析更加丰富的结果。例如，在兰州大学草地农业科技学院陈全功教授依据“中国草业开发与生态建设专家系统”提供的空间数据库，利用 GIS 叠加分析方法，结合全国 2000 多个气象台站提供的气象观测资料，逐点计算适宜度，制成《基于 GIS 的中国农牧交错带分布图》，将中国农牧交错带的研究推向了一个新的高度（陈全功等，2007）。基于 GIS 的叠加分析结果表明，中国农牧交错带大致沿胡焕庸、

赵松乔两位先生指出的方向与区域分布，涉及黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、四川、云南、西藏等 13 个省（区）的 234 个县（市、旗），总面积 $81.3459\times10^4\ km^2$。

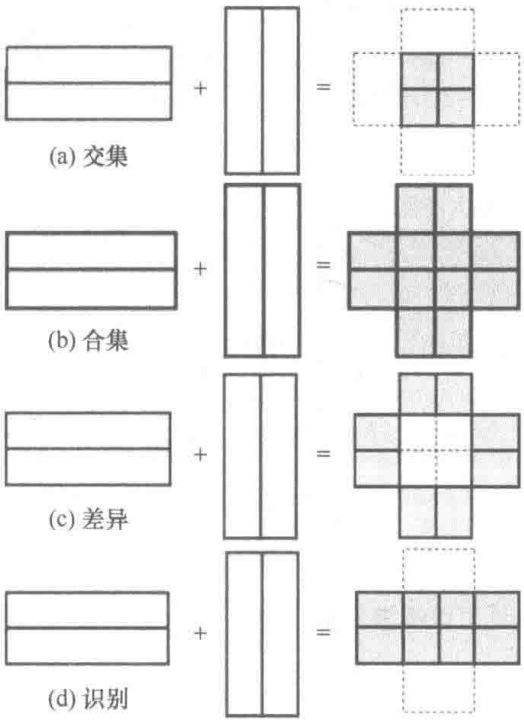


图 8-18　不同的叠加分析方法对比
灰色代表输出结果的保留区域

GIS 软件包还提供了很多类似于叠加分析的操作工具，但是这些工具属于图层编辑操作，不会对输入图层的空间数据和属性数据进行组合，如 Dissolve（边界融合）（图 8-19）、Clip（裁剪）（图 8-20）、Append（拼接）（图 8-21）、Select（选择）、Eliminate（消除）（图 8-22）、Update（更新）（图 8-23）、Erase（擦除）（图 8-24）、Split（分割）（图 8-25）等。

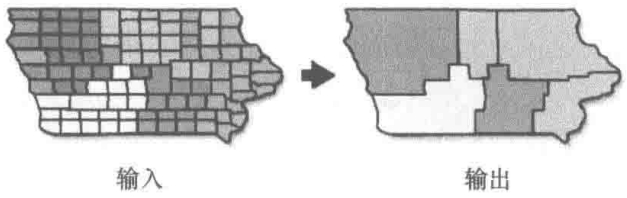


图 8-19　Dissolve 工具可以将属性表中包含相同属性且在空间上邻接的多边形融合成一个多边形

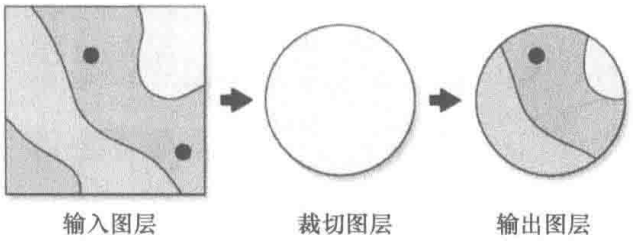


图 8-20　Clip 工具可以利用裁切图层对输入图层进行裁切

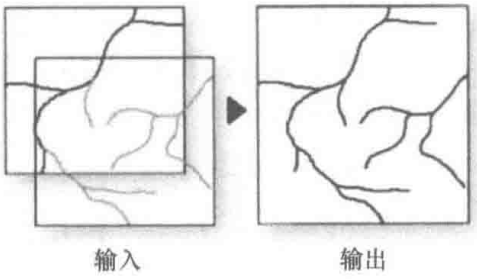


图 8-21　Append 工具将两个或多个图层在空间上拼接成一个新的图层

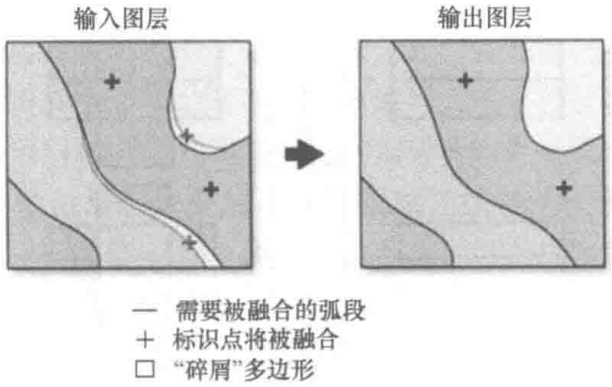


图 8-22　Eliminate 工具可以根据自定义最小制图单元消除图层中的“碎屑”多边形

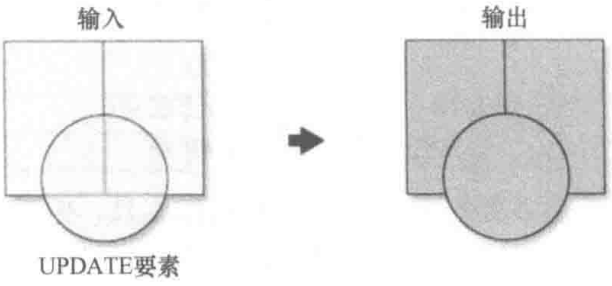


图 8-23　Update 工具用更新图层及其要素替换输入图层

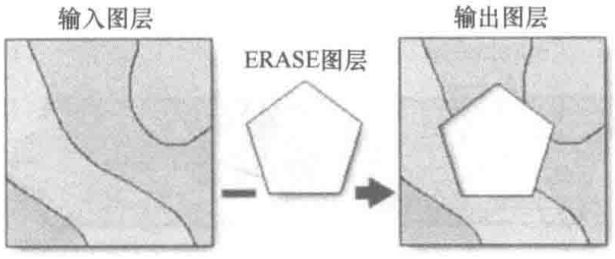


图 8-24　Erase 工具从输入图层消除落入擦除图层区域范围内的要素

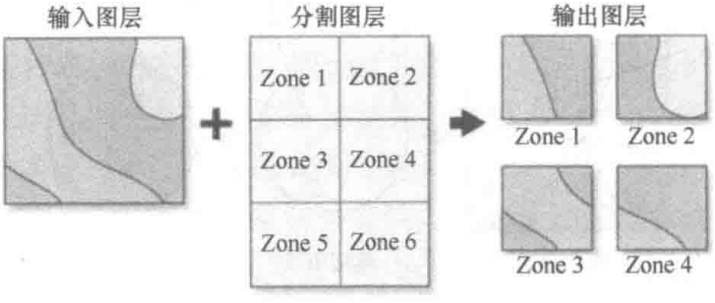


图 8-25　Split 工具利用分割图层将输入图层进行分割

三、栅格数据分析

与矢量数据分析不同，栅格数据分析是基于栅格像元的，能在独立像元、像元组或整个栅格像元上进行分析。虽然存在不同类型的栅格数据，但是栅格数据分析的操作只针对 GIS 软件指定的栅格数据类型，如 ArcGIS 的 ESRI/GRID 格式。因此，在做栅格数据分析前，一定要把数据格式转换成 GIS 软件包支持的格式。栅格数据分析的两个重要方面包括分析的区域范围和输出像元的大小。其中，分析区域可以指定需要分析的栅格像元，而输出像元的大小可以重新定义，像元填充值可利用像元重采样方法计算，包括最邻近法、双线性插值法及三次卷积插值法。

（一）局域运算

局域运算是基于单个像元的运算，即利用函数关系式对输入像元进行逐像元运算，生成新像元的过程（图 8-26）。输入栅格可以是单一栅格，也可以是多个栅格。对单一栅格，局域运算可以利用 GIS 软件包提供的大量的数学函数计算输出栅格的每个像元值，如算术运算、对数运算、三角函数及幂运算。

15.2	16.0	18.5
17.8	18.3	19.6
18.0	19.1	20.2

(a)

8.64	9.09	10.48
10.09	10.37	11.09
10.20	10.81	11.42

(b)

图 8-26　栅格数据局域运算（Chang，2010）

利用公式[slope_d] = 57.296 * arctan [（slope_p）/100]将坡度栅格数据的像元值由百分数（a）转换为度数（b）

重新分类是通过对像元值进行归类生成一个新栅格数据的局域运算方法，也称像元值重新编码，以达到简化栅格数据的目的。例如，将高程栅格数据进行重新分类，大于 5000m 为极高山区，3500～5000m 为高山区，1000～3500m 为中高山区，500～1000m 为中低山区，小于 500m 为平原丘陵区。然后分别用数值 1、2、3、4 和 5 来代表新的分类结果。除此之外，局域分析也可以在多个栅格之间进行，类似于矢量数据的叠加分析。不同栅格之间可以使用统计值或逻辑运算方法对多个栅格进行分析，得出一个新的栅格数据。

张剑等（2012）参考牟新待所建立的生态适宜度模型，建立了中国南北分界带适宜度模型，也是一个基于多栅格局域运算的例子，该计算表达式如下

$$S = \sum_{i=1}^{n} W_i \mu S_i(\theta, T, P, M, J, F, H, R)$$

其中，S 为南北分界带适宜度，W_i 是各因子的权重，μS_i 为各因子的隶属函数，θ、T、P、M、J、F、H 和 R 分别代表≥10℃年积温、多年平均温度、多年平均降水量、多年平均地表湿润度指数、多年 1 月平均气温、多年平均无霜期、多年平均相对湿度、水旱地面积比例，i 依次表示从 1 到 n（n=8），即 θ 到 R。各因子的权重 W_i 采用专家打分的层次

分析法加以确定，各因子的隶属函数μS_i通过模糊集合理论建立。

（二）邻域运算

邻域运算涉及一个焦点像元和一组环绕像元。环绕像元的邻域类型可以是矩形、圆形、同心圆或楔形（图 8-27）。用环绕像元的值进行运算（可以包括焦点像元或不包括）焦点像元的值，如最大值、最小值、平均值、众数、中值、标准差等统计值来替换焦点像元的值。

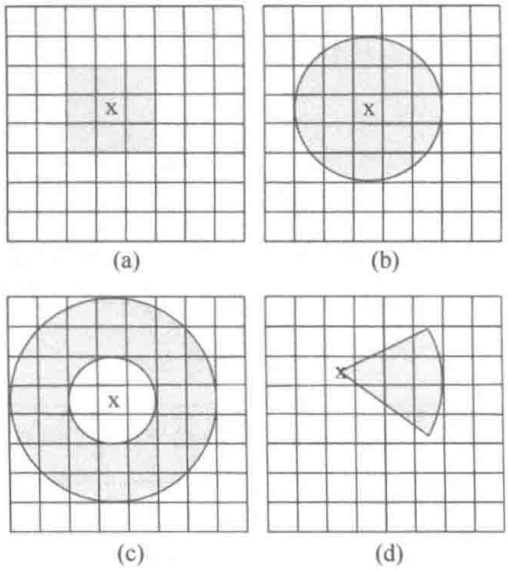


图 8-27　邻域分析类型（Chang，2010）

（a）矩形；（b）圆形；（c）同心圆；（d）楔形

邻域运算经常用于数据的平滑运算。例如，遥感资料获取的植被指数影像（Vegetation Index，VI），会存在一些噪声点（异常值），利用邻域运算求取焦点像元的平均值就可以对影像进行滑动平均，有效地去除噪声。邻域运算在图像处理中的应用也比较多，如空间滤波、卷积和视窗移动等。在地形分析中也非常依赖邻域运算，因为利用数字高程模型计算坡度、坡向、地表曲率用到的就是邻域运算。

（三）分区运算

分区运算用于处理相同值或相似要素的像元分组。分组又称为分区，在空间上可以是连续的（像元在空间上相连），也可以是不连续的（像元在空间上不相连）。分区运算可以针对单个栅格数据层或两个栅格数据层之间进行。如果是单个栅格数据层，分区运算可以测量每个分区的几何特征，包括面积、周长、厚度和重心。其中，面积为分区内像元数与像元大小的乘积；周长是其边界长度，如果是不连续分区，周长为每个区的周长之和；厚度是每个分区内可画的最大圆的半径；重心是分区的几何中心，即与分区最匹配的椭圆长短半轴的交点。如果输入栅格数据层为两个，其中一个为分区栅格，分区运算输出的结果可以统计输入栅格数据层在每个分区内的统计值和量测值，包括面积、最大值、最小值、总和、值域、平均值、标准差、中值、众数、少数和种类数。

四、地形制图与分析

人类把陆地表面作为制图对象已历经数百年，制图者设计了各种用于地形制图的方法，如大家比较熟悉的等高线法，可以根据等高线了解一个区域的地形、地貌及海拔等信息。其他技术还包括晕渲法、垂直剖面法、分层设色法、三维透视图等。地貌学家还发展了包括坡度、坡向和地表曲率等地表参数来对陆地表面进行量测。

用于地形制图与分析的两种常用数据模型包括基于栅格的数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和基于矢量的不规则三角网（Triangulated Irregular Network，TIN）。GIS 软件包可以将这两种数据模型作为输入数据进行地形制图与分析，并且可以对这两种数据进行相互转换。

（一）等高线法

等高线是高程值相同的点连接起来的等值线，是地形制图最常用的方法。认识等高线首先要理解等高线的两个参数，即等高距和基准等高线。等高距是指等高线之间的垂直距离，通常都是以整数表示，如 5、10、100 等。基准等高线是开始计算高程的等高线。等高线的排列模式可以反映地形的变化。例如，平坦的地表等高线间距较稀疏而陡峭的地形等高线间距较紧密，等高线向河流的上游弯曲（图 8-28）。

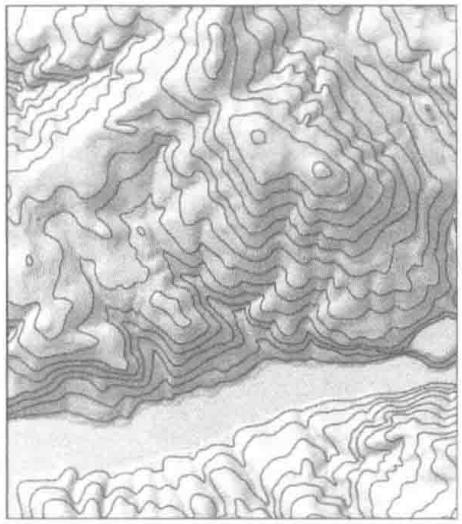


图 8-28　等高线地图（Chang，2010）
背景图是由 DEM 生成的三维透视图

（二）地貌晕渲法

地貌晕渲法是模拟太阳光与地表要素的相互作用下显示出的地形地貌。通常面向光源的山坡明亮，背光的山坡阴暗，更具坡度与坡向的变化，明暗度也相应地发生变化，从而在视觉上给人一种立体的感觉。在 GIS 软件包提供的地形制图与分析模块中，提供了四个参数可以控制地貌晕渲图的视觉效果，分别是太阳方位角、太阳高度角、坡度与坡向。太阳方位角表示光线的方向，变化范围为顺时针方向 0°～365°。通常默认的太阳方位角为 315°，即左上方西北方向。太阳高度角是入射光线与地平面的夹角，变化范围

为 0°～90°。另外两个影响因子是坡度和坡向，变化范围分别为 0°～90°和 0°～365°。图 8-29 显示了太阳方位角为 315°，太阳高度角为 45°的地貌晕渲图。

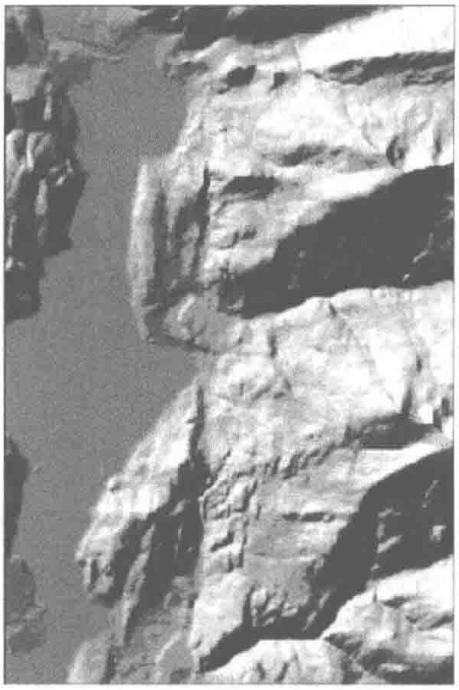


图 8-29　地貌晕渲图示例，太阳方位角为 315°，太阳高度角为 45°（Chang，2010）

（三）三维透视图

三维透视图是地形的三维显示效果图（图 8-30）。通过模拟观察者的观察方位、观察角度、观察距离对地形进行立体制图，还可以通过控制垂直缩放因子来突出微地形的特征。观察方位是观察者到地表的方向，变化范围为顺时针方向 0°～365°。观察角度是观察者所在高度与地平面的夹角，变化范围为 0°～90°。当观察角度为 0°时表示观察者从正对方观察地表，此时三维效果最明显。观察角度为 90°，表示观察者与地表垂直，此时的三维效果最不明显。

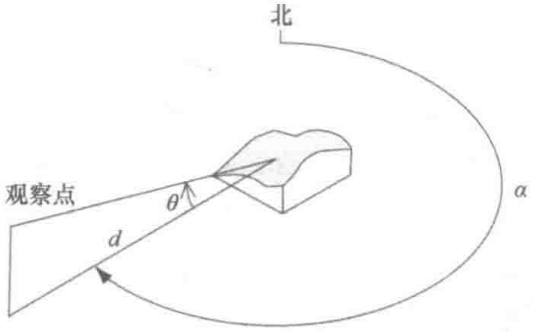


图 8-30　控制三维透视效果的三个基本参数（Chang，2010）

观察方位角 α（自北顺时针方向计算），观察角度 θ（自地平面开始计算），观察距离 d（观察点到三维表面的距离）

三维透视图经常用作地形地貌的背景演示图，另外可以叠加道路、河流、建筑物等要素，甚至是遥感影像，用于生成更加真实的三维数字地图。

（四）地形参数计算

利用 DEM 还可以计算一些基本的地形参数，如坡度、坡向、地表曲率等。其中，坡度是标准地表位置在高度上变化率的度量，坡向是斜坡的度量，而地表曲率表示在数字高程模型中某一个像元是上凸还是下凹。一个像元的曲率值为正值，表明该像元向上凸起；如果为负值，则是下凹；像元曲率值为 0，表明该像元表面是平的。利用栅格数据邻域计算的方法，可以获取这些地表参数。例如，可以采用中心点周边 8 个像元，利用计算公式估测中心点的坡度、坡向和地表曲率。

坡度的表示方法可以是百分数或度数。其中，百分数坡度等于垂直距离与水平距离之比再乘以 100，度数坡度是垂直距离与水平距离之比的反正切（图 8-31 显示的是度数坡度）。坡向的单位是度，从正北为 0°开始，顺时针旋转，回到正北以 360°结束。坡向的度量常分为 4 个基本方向或 8 个基本方向（图 8-32）。坡度和坡向的测量精度直接影响到以坡度、坡向作为输入参数的模型的准确度。除了坡度、坡向的算法对测量精度的准确性有影响外，另一个重要影响因素就是 DEM 的精度及分辨率。图 8-33 显示了不同分辨率的 DEM 生成的坡度图，不难发现，随着 DEM 分辨率的提高，地形的细节可以被更详细地显示出来。另外，局部地形也会影响坡度和坡向的计算准确性，通常情况下，陡坡地区的坡度估算误差较大，而平坦地区坡向的估算误差较小。

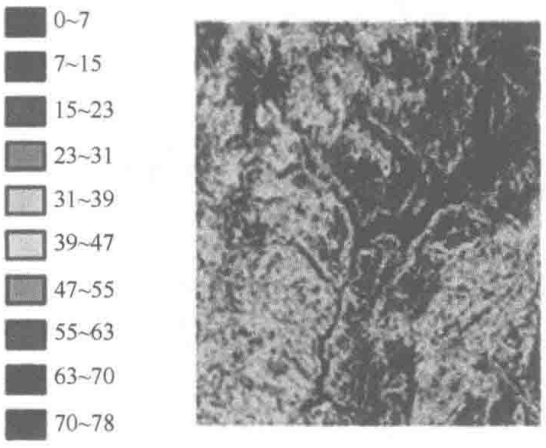


图 8-31　坡度示意图

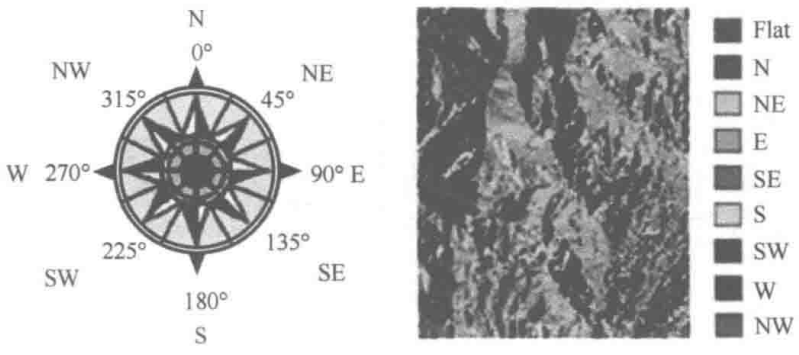
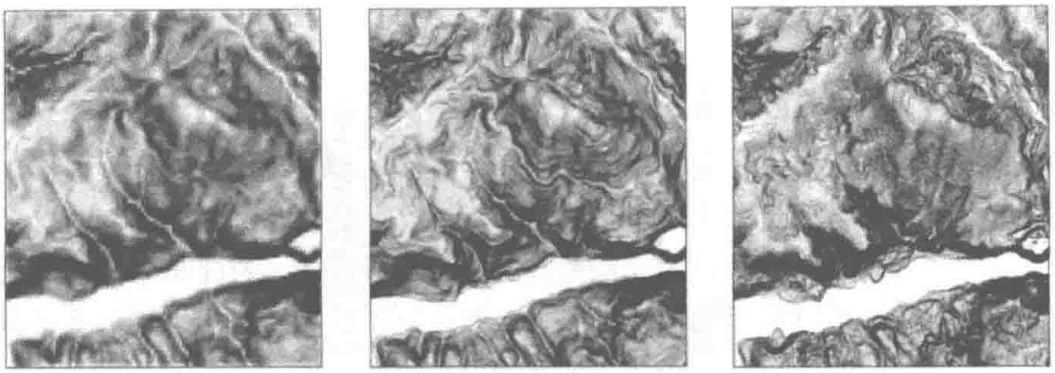


图 8-32　坡向示意图



(a) (b) (c)

图 8-33 不同分辨率 DEM 生成的坡度图（Chang，2010）
（a）30m；（b）10m；（c）1.83m

五、流域分析

流域是自然资源管理与规划的水文单元，是具有共同出水口的地表水流经的集水区域。流域分析是指利用 DEM 和栅格数据运算来勾绘流域并提取河网等地形要素的方法。GIS 软件包提供了两种勾绘流域的方法，一种是基于区域，另一种是基于点。基于区域的方法可以将区域划分成一系列小的子流域，每个子流域对应一个河段；基于点的方法是选择一个点来勾绘流域，这个点被称作泻流点或出水口。点可以是出水口、水文站或水坝，也可以在任意河段的位置选择一个点。

具体的操作步骤如下。

（一）DEM 填洼

无论是基于区域或者基于点的流域勾绘，都是在一个已填洼的 DEM 上进行。如果一个或多个像元被周围海拔值较高的栅格像元所包围，就是一个洼地，代表一个内排水区域。在对流向进行判别之前，首先要消除这些洼地（即使现实中真的存在，如采石场、壶穴等），常用方法是将像元值加高到周围最低海拔值，避免流向判断的误差。

（二）流向

流向是指水流离开每一个已填洼栅格单元时的方向。通常利用八方向法确定流向，生成流向栅格。

（三）流量累积

流量累积栅格是利用流向栅格，计算每个像元流经它的像元数，即每一个像元的流向累计值是所有来自上游像元流向它的像元数（但不包括被计算的栅格像元本身）。

（四）河网

河网是由流量累积栅格导出的。通过设定一个维持河道水流的阈值，就可以输出河网。阈值设置过大，生成的河网密度就越小，反之密度就越大。

（五）河流链路

河流链路是将河网的每一个栅格线赋予唯一的值，且与流向相关联的格网。类似于基于拓扑的河流图层，包括交汇点、河段和出水口。

（六）全流域勾绘

最后一步是将流向栅格和河流链路栅格作为输入数据，为每一个河段勾绘流域，生成整个区域的流域范围。

基于点的流域勾绘与全流域勾绘步骤基本相同，唯一的差别在于基于点的流域勾绘采用点栅格来替代河流链路栅格。在点栅格中，代表一个泻流点的像元必须位于河流链路的像元上，否则会导致生成偏小、不完整的流域。

六、空间插值

空间插值是利用已知点的数值来估算未知点数值的过程，常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面，以便与其他空间现象的分布模式进行比较。在自然现象中，有些类型不像地形可以用实体的形式去显示，如温度、降水量、人口密度等，但是在 GIS 分析中，需要将这些要素生成与地形一样的可视表面，这个可视表面就是一个统计表面。为了构建一幅区域的降水量图，可以使用该区域内气象台站提供的降水量数据，借助空间插值方法，将气象台站之间的数据进行填充，形成一个统计表面（图 8-34）。

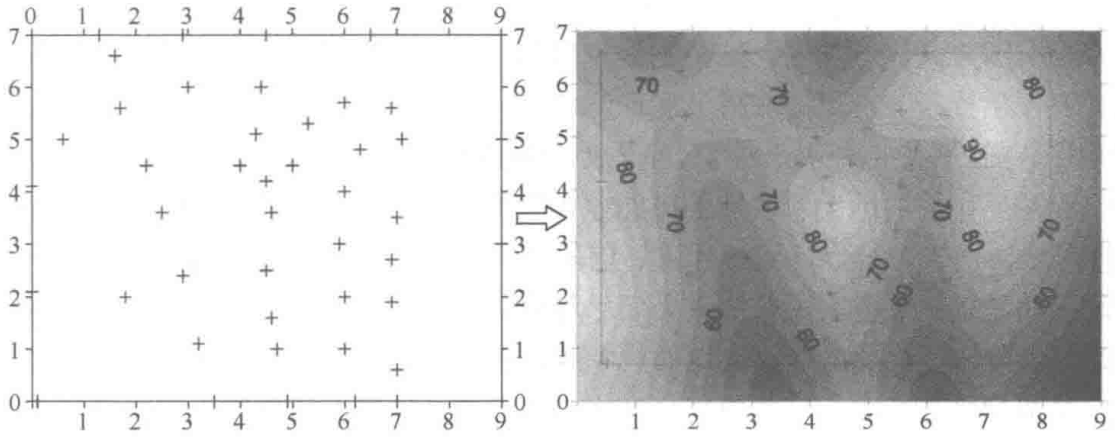


图 8-34　离散的气象台站数据经过空间插值方法生成的连续降水面栅格数据

空间插值最重要的两个方面是控制点和插值方法的选择。其中控制点是已知数值的点，也称为样本点或观测点。控制点是建立空间插值方法的基础，控制点的数目及分布都会对插值结果产生影响。无论用哪种插值方法，根据统计学假设可知，样本点越多越好，而样本的分布越均匀越好。但自然界控制点的分布大多趋于离散，很少出现控制点分布非常合理的理想状况。空间插值的思路是估算点的数值受邻近控制点的影响比受较远控制点的影响较大，因此空间上分布均匀且具数量较大的控制点是保证插值结果更为

可靠的保证。任何一种空间数据插值法都是基于空间相关性的基础上进行的，即空间位置上越靠近，则事物或现象就越相似；空间位置越远，则越相异或者越不相关，体现了事物/现象对空间位置的依赖关系。

空间插值包括全局插值和局部插值两种方式。全局插值利用所有的控制点来估算未知点的值，而局部插值只使用邻近若干个已知点的值来估算未知点的值，类似于栅格数据的局域分析。全局插值倾向于估算整体的趋势，而局部插值用于估算局部或短程的变化，因此在估算精度上局部插值更为有效。根据估算结果，空间插值可以分为精确插值和非精确插值。精确插值得出估算值与相同位置的已知点的值相同，而非精确插值得到的估算值和已知值不同。另外，空间插值方法还可以分为确定性插值和随机性插值。确定性插值法不提供估测值的误差检验，而随机性插值法可以对估测误差进行评价。该部分内容的详细介绍参见第 3 章第 2 节。

第六节　数据显示与地图编制

地图是人类认识地球的媒介。GIS 查询与分析的结果，最终是以地图的形式呈现给用户的。GIS 有强大的地图制图功能，但是，单纯依靠 GIS 难以完成一副完美合理的地图，它需要人工的交互干预，如制图综合，目前还没有任何 GIS 软件能够很好地解决这些问题。本节的主要内容包括地图的元素、地图符号及种类、地图注记及地图设计。

一、地图符号及种类

普通地图元素包括图名、地图主体、图例、比例尺、指北针、文字说明和图廓，其他元素还包括格网、投影、附图及质量信息等。根据地图的用途可以把地图分为普通地图和专题地图。普通地图用于综合、全面地反映制图区域内的自然要素和社会经济现象，具有一般特征目的的地图。该地图可能包含有地形、水系、土壤、植被、居民点、交通网、境界线等内容，被广泛用于经济、国防和科学文化教育等方面，并可作为编制各种专题地图的基础。专题地图是指突出而尽可能完善、详尽地表示制图区内的一种或几种自然或社会经济（人文）要素的地图。专题地图的制图领域宽广，凡具有空间属性的数据和信息都可用其来表示。其内容、形式多种多样，能够广泛应用于国民经济建设、教学和科学研究、国防建设等行业部门，如自然地图（地貌图、植被图、土壤图等）、社会经济（人文）地图（交通图、人口分布图、行政区划图等）及其他专题地图（规划图、旅游图、军事图等）。

无论何种类型的地图，都是采用特定的地图符号，辅以不同的色彩和形状对地图要素进行表达。地图符号可以指示要素在空间的位置，而颜色和大小可以表示要素的属性。例如，蓝色的粗线可以表示一条河流，而浅蓝色的细线表示这条河流的支流。其中线要素显示了河流在空间中的位置信息，而色彩和宽度将不同等级的河流表现出来。因此，适当的地图符号（点、线、面）与视觉变量（色彩、大小）的选择是数据显示与地图制

图的基本。

常见专题地图的表现类型主要有等值线法、质地法、范围法、点值法、符号法、动线法、统计图法等。

二、地图注记

地图上的文字和数字总称为地图注记，它是地图内容的重要部分。没有注记的地图只能表达事物的空间概念，而不能表示事物的名称和某些质量及数量特征。因此，地图注记是地图的重要组成元素，没有注记的地图是无法被理解的。地图上的注记可分为名称注记、说明注记和数字注记三种。名称注记说明各种事物的专有名称，如居民点名称；说明注记用来说明各种事物的种类、性质或特征，用于补充图形符号的不足，它常用简注表示；数字注记用来说明某些事物的数量特征，如高程等。注记也可以使用不同的视觉变量增强地图的表现力，如不同的字体、字号和颜色。另外，注记的排列与配置是否恰当，常常会影响读图的效果。汉字注记通常有水平字列、垂直字列、雁形字列（注记的字向指向北方或图廓上方）和屈曲字列（注记的字向与注记文字中心线垂直或平行）等。注记配置的基本原则是不应该使注记压盖图上的重要部分。图 8-35 表示了点、线、面注记的不同配置方式。GIS 软件为地图制图提供了自动注记的功能，但是完全依赖自动注记往往会产生较大的问题，必须借助人工的方式对注记进行配置，达到既不影响注记的标注又美观的效果。

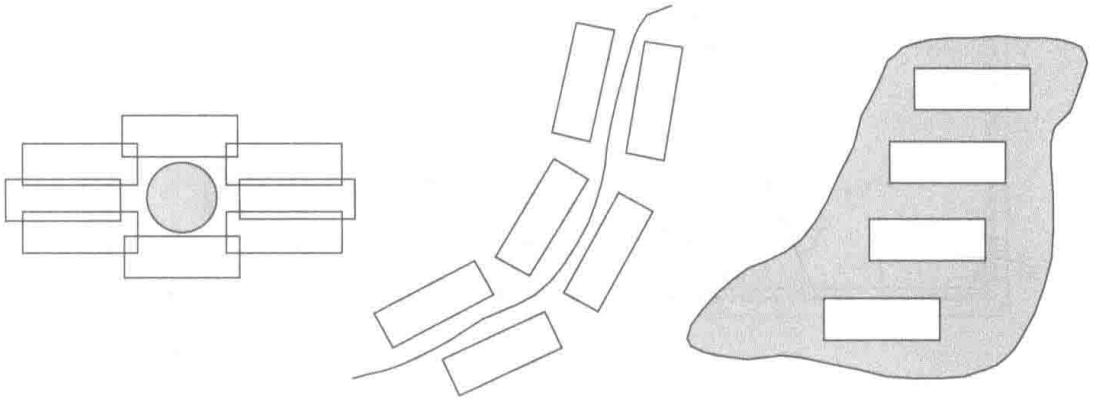


图 8-35　针对点、线和面的几种注记配置方式（邬伦等，2001）

三、地图设计与生产

专题地图的设计，是指任务和要求明确后初步提出的图幅基本轮廓，包括投影选择、明确比例尺、划定图幅范围、进行图面规划和绘制设计略图等内容。图幅基本轮廓的设计需要了解该图幅是专用还是多用，是否已出版了类似专题地图，以及地图使用者有哪些特殊要求。在弄清上述图幅的用途与要求之后，就要明确总体设计的指导思想，拟定专题内容项目，突出重点，提出图幅总体设计的方案。图 8-36 展示了一些不同风格的图面设计。

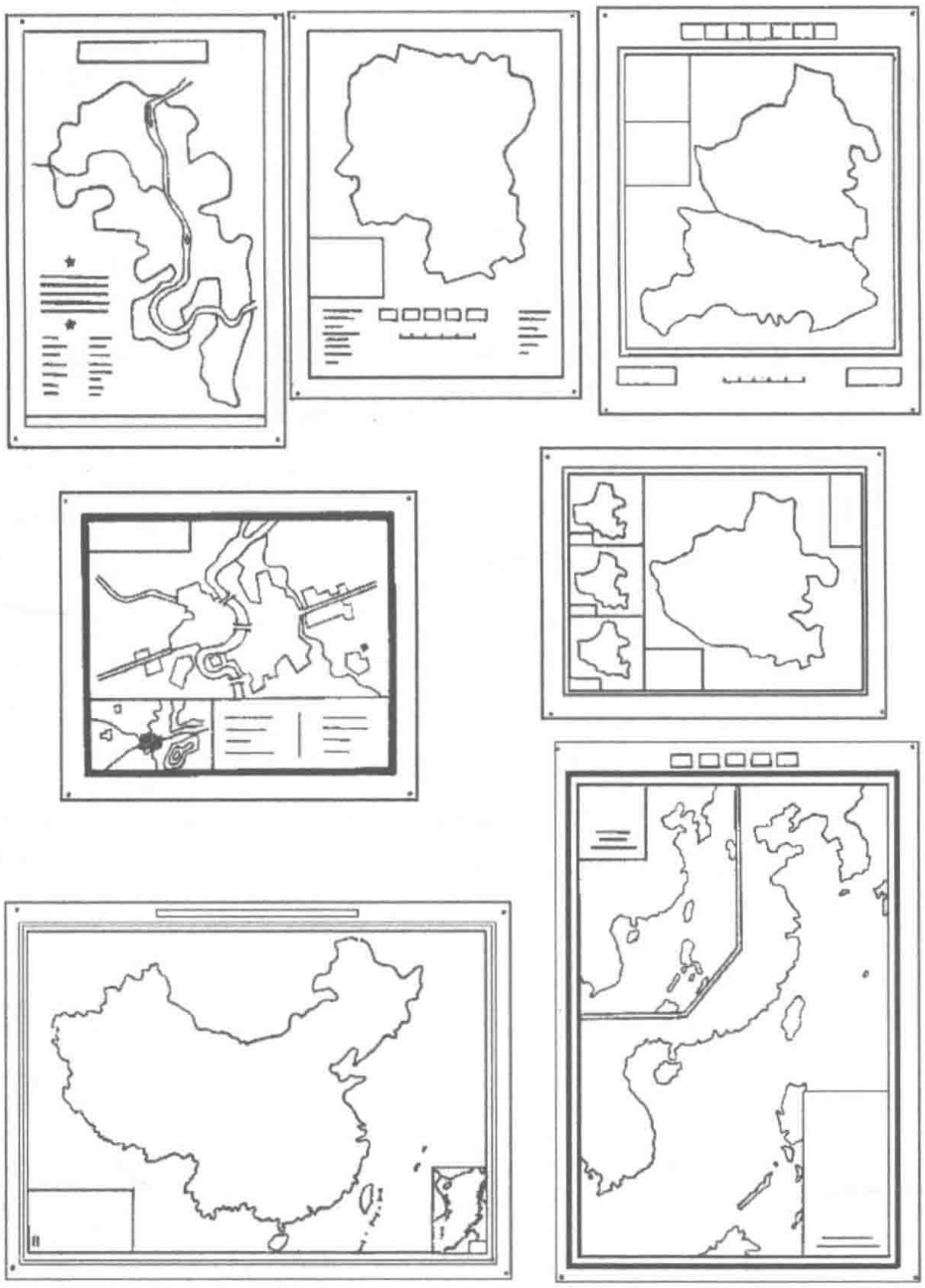


图 8-36　图面设计示例（邬伦等，2001）

思　考　题

1. GIS 软件按功能可分为哪几个模块？简述各模块的作用？
2. GIS 有哪些空间分析方法？
3. 简述格网 DEM 的主要应用领域？
4. 什么是空间数据的元数据？简述空间数据元数据的作用？
5. 简述像元重采样的三种方法及其区别？
6. 简述地图投影的分类？
7. 如何用验证技术来比较不同的插值方法？
8. 论述矢量数据与栅格数据空间分析方法及其区别？

9. 论述利用 GIS 技术建立草地类型外业调查地图数据库的基本步骤及方法？

10. 举例说明“3S”技术在草业科学研究中的应用领域及方法？

参 考 文 献

陈全功, 张剑, 杨丽娜. 2007. 基于GIS的中国农牧交错带的计算和模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 43(5): 24-28.

陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 1999. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社.

黄杏元, 汤勤. 1990. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社.

邬伦, 刘瑜, 张晶, 等. 2001. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社.

张剑, 柳小妮, 谭忠厚, 等. 2012. 基于 GIS 的中国南北地理气候分界带模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 48(3): 28-33.

Chang KT. 2010. 地理信息系统导论(原著第五版)[M]. 陈建飞, 张筱林译. 北京: 科学出版社.

Douglas DH, Peucker TK. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. The Canadian Cartographer, 10(2): 112-122.

第九章　草业决策支持系统

本章在介绍决策支持系统的概念、结构、类型和核心功能，以及其产生的背景、发展过程及现状的基础上，论述了草业决策支持系统的类型，以及每种类型的特征及其适用对象，详细介绍了草业决策支持系统的类型和应用案例。

第一节　决策支持系统的概念与功能

本节介绍决策支持系统的内涵及其概念的延伸后，从决策支持系统形成的四个方面论述了决策支持系统的结构，然后详细介绍了当前较为重要的四种决策支持系统，并论述了各种决策支持系统的特征，最后介绍了决策支持系统产生的历史背景及其发展过程。

一、决策支持系统的内涵

（一）决策支持系统的定义

决策支持系统（Decision Support System，DSS）是一种协助人类做决策的资讯系统，通过人机对话界面为人类解决半结构和非结构性问题提供辅助规划与各种方案，帮助人类做出决策的计算机应用系统（高洪深，2009）。一般而言，决策支持系统利用管理科学和计算机科学等相关学科的理论及方法，采用信息技术手段解决两方面的问题，一方面为解决半结构化和非结构化的决策问题提供背景材料与明确问题的特征，另一方面通过修改和完善模型，列举多种行动方案，为管理者正确解决半结构化和非结构化问题时提供帮助（陈德军等，2003）。决策支持系统融合了多种学科知识和技术，因此研究者的专业背景、原有专业领域及所处的时代，均影响人类对决策支持系统的认知过程，理所当然形成多个定义，其中三个定义对决策支持系统内涵的完善发挥了极其重要的作用：Spraque 和 Carlson 认为，决策支持系统具有交互式计算机系统特征，其目的是帮助决策者利用数据和模型解决半结构化的问题；Keen 将决策支持系统分为“决策”（D）、“支持”（S）和“系统”（S）三个模块，三个模块汇集为一体，从而形成一个人机交互系统，核心是利用不断发展的计算机建立技术系统（System），通过增加模块逐渐扩展其支持能力（Support），从而更好地为管理者提供辅助决策（Decision）；Mittra 则认为决策支持系统是从数据库中找出必要的数据，利用数学模型处理这些数据，然后产生用户认为有用的信息，并将这些用户所需的信息提供给用户（王辉鹏和董春游，2009）。因此，决策支持系统主要解决三类决策问题，分别是结构化决策、非结构化决策和半结构化决策（刘博元等，2011）。结构化决策，是指对某一决策过程的环境及规则，运用确定模型或语言描述，以适当算法产生决策方案，并能从多种方案中选择最优解的决策；

非结构化决策，是指决策过程复杂，不可能用确定模型和语言来描述其决策过程，更无所谓最优解的决策；半结构化决策，是介于结构化和非结构化决策之间，这类决策可以建立适当算法产生决策方案，使决策方案得到较优的解答。

无论决策支持系统定义如何拓展和延伸，其核心是建立不同类型的数据模块，然后通过控制模块将不同模块连接，通过定量或定性描述，用户根据自己决策问题的需求，从多种可选方案中，遴选出适合自己需求的答案。

（二）决策支持系统的结构

决策支持系统是为决策者提供决策支持，而决策支持是通过决策过程来实现的。决策过程包括提出问题、分析问题、求解问题和评价问题四个步骤。提出问题是指决策者根据自己需求提出的一种具体目标、思想或意向。分析问题主要指明确与问题相关的因素，决定问题所属的求解类型，特别是当决策支持系统介入到较高层次或综合性应用时，其涉及决策环境更加复杂，存在大量不确定因素，决策者很难明确自己需要决策支持系统帮助解决的问题是什么，此时需要决策者和决策支持系统共同解决，从而启用决策支持系统中的背景知识库，以启发思维的方式多次人机交互，明确影响问题的因素，再利用获得影响问题的因素，通过决策支持系统规则推理，将决策问题中的不确定因素用知识系统中的确定值替换，实现将决策意向转换为明确的一个决策问题。求解问题是根据问题的特点，确定模型求解或推理分析，或二者结合共同完成。评价问题是决策者根据问题的背景，决策评价所得结论，若所得结论与决策者开始所需的问题不相符，则需调整问题求解参数，重新求解，多次反复，直到决策者获得满意结果为止。

基于上述决策过程的分析，决策支持系统结构虽然随着计算机科学发展和人类需求的多元化，呈现出与时俱进的特征，但不同时期和不同专业领域内决策支持系统的主要结构是一致的，而辅助组分主要是根据决策支持系统的性质外挂不同的数据模块和模型模块，增加决策支持系统的输出功能（Spague，1980）。因此，决策支持系统的主要结构包括用户、人机交互系统、问题生成系统、问题求解系统、问题评价系统、广义知识系统（图 9-1）。

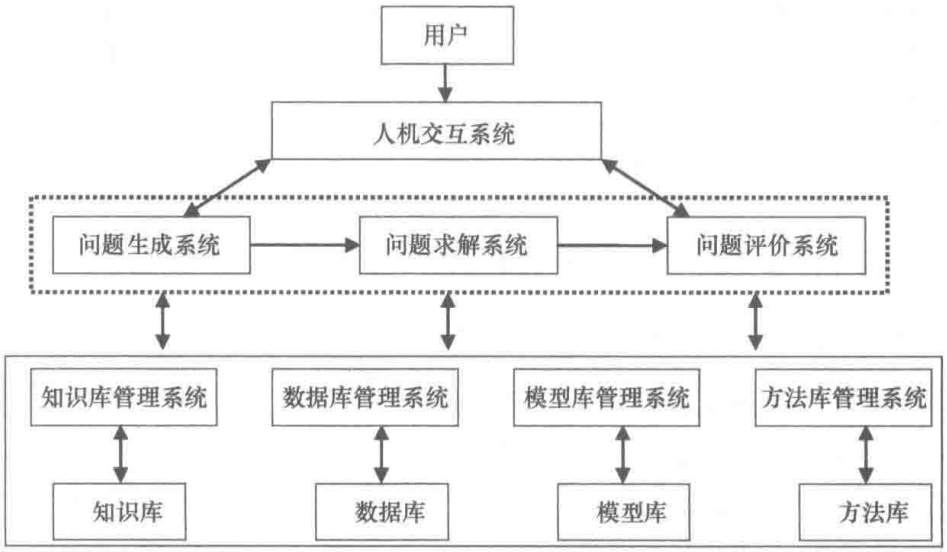


图 9-1　决策支持系统的一般结构（仿陈德军等，2003）

用户是决策支持系统的应用者或使用者。

人机交互系统又称人机交互界面，包括交互语言系统和问题处理系统两部分，由硬件和软件两部分组成，实现决策者与计算机间的对话，将信息的内部形式转换为人类可接受的形式，其连接着可编程序控制器、变频器、直流调速器、仪表等控制设备，利用显示屏显示，通过输入单元（如触摸屏、键盘、鼠标等）写入工作参数或输入操作命令，实现人与机器信息交互的数字设备。

问题生成系统是将决策者的问题进行具体化描述。由于决策问题的复杂性和不确定性，需要给问题求解模块提供准确的求解信息，因此明晰决策者所提问题的准确含义是十分关键的。当面临结构化决策问题时，可直接生成问题的描述框架；若遇到半结构化或非结构化决策问题时，则需要根据决策问题的环境条件，通过人机交互，分解问题，利用知识系统中的一阶谓词替换问题中的不确定因素，最终将问题表述为定量化与定性化的描述方式。

问题求解系统是借助知识系统中的模型和产生式规则等知识，获取所要决策问题答案的过程。决策问题具有多样性，不同决策者对决策问题的层次、决策目标、具体决策环境、约束条件、时间跨度等方面的重要性认识不同，因此获取决策问题的回答结果应包括定量的、定性的、定量加定性的一套具体问题求解方法。计算机在获取一个具体问题的回答时，可充分运用知识系统提供的模型和知识，选择适当的数据、模型、算法、规则等，从而形成一个特定问题的求解过程。

问题评价系统是利用知识系统中的知识和模型，评价计算机提供给决策者的回答是否符合需要的过程。若获取的决策问题的回答满足需要，决策者得到了答案；若获取的决策问题的答案满足不了决策者的需求时，则需要精确描述决策问题，或者再次核定决策问题的层次、决策目标、具体决策环境、约束条件、时间跨度，或者重新遴选合适方法再次决策。

广义知识系统是为整个决策支持系统中其他各种模块提供知识支持。决策过程是智能化的，因此决策支持系统是一个开放系统，它不断吸收各类学科最新成果，为各类问题提供智能决策。智能决策所依靠的是将问题领域的相关事实、经验知识、表示模型的过程看作广义知识模式的知识系统。广义知识系统包括传统的数据库、模型库、方法库、知识库等内容。

决策支持系统一般结构为多库结构，这种结构是一种显式结构，具有透明性和模块化等特点，较为直观。然而，这种显式结构不能直接反映决策者的思维方式和决策风格等智能品质，而这些智能品质往往对决策过程产生重要影响。

（三）决策支持系统的主要类型

随着知识爆炸和信息化的融合，决策支持系统因其良好的交互式和强大的扩展性特点，广泛地被应用于各行各业的决策过程。因此，决策支持系统自产生以来，发展十分迅速且类型多样（刘博元等，2011）。从 1985 年开始，随着集体讨论和效果评估等领域的发展，群决策支持系统（Group Decision Support System，GDSS）应运而生，其主要目的是为集体讨论和效果评估提供更方便和高效的支持。网络的快速发展与应用，使多

个物理分离的信息处理能够融合于计算机网络，这促进了分布式决策支持系统（Distributed Decision Support System，DDSS）的诞生。人工智能领域（Artificial Intelligence，AI）的发展促进了 DSS 与 AI 的结合，形成了智能决策支持系统（Intelligent Decision Support System，IDSS），且成为目前决策支持系统研究领域的热点。

1. 群决策支持系统

群决策支持系统主要解决半结构化和非结构化决策问题的求解过程，为决策群体的共同目标提供决策支持。所谓群体决策是相对个人决策而言的，两人或多人召集在一起，讨论问题的实质性，提出解决某一问题的若干方案或策略，然后对这些方案或策略的优势做出客观评价，最后做出决策，这种决策过程称为群决策。事实上，群决策支持系统通过结合通信、计算机和决策技术，使决策问题的求解更加条理化和系统化。群决策支持系统可提供三个级别的决策支持：第一层次的群决策支持系统旨在减少群决策中决策者之间的通信、信息沟通和交流，障碍消除，如及时将各个决策者的各种意见显示在大屏幕，然后可以投票表决和汇总，也可以输入无记名意见和偏好；第二层次的群决策支持系统提供改善认识过程和系统动态分析的技术，以及决策分析建模和分析判断方法的选择技术；第三层次的群决策支持系统主要特征是将第一层次和第二层次的技术结合起来，用计算机来启发、指导群体的通信方式。

2. 分布式决策支持系统

分布式决策支持系统是由地域上分布在不同地区或城市的若干个计算机系统所组成的，其终端机与大型主机进行联网。系统中的每台计算机上都有 DSS，利用大型计算机语言和软件实行整个系统功能分布式的决策过程。决策者在个人终端机上利用人机交互界面，通过系统共同完成分析、判断，从而得到正确的决策。分布式决策支持系统与一般决策支持系统的区别主要包括五个方面：第一，分布式决策支持系统是一类专门设计的系统，能支持处于不同节点的多层次的决策，提供个人支持、群体支持和组织支持；第二，分布式决策支持系统不仅支持问题结构复杂不良的决策过程，还能支持信息结构不良的决策过程；第三，分布式决策支持系统能为节点间提供交流机制和手段，支持人机交互、机与机交互、人与人交互；第四，分布式决策支持系统具有处理节点间可能发生冲突的协调能力；第五，分布式决策支持系统内的节点作为平等成员而不形成递阶结构，每个节点有自治权。

3. 智能决策支持系统

将人工智能、知识推理技术和决策支持系统基本功能模块有机结合的一种系统，其实质是决策支持系统和人工智能相结合的产物。一方面，将传统决策支持系统的设计思想结合于人工智能开发的要求，形成智能决策支持系统的系统结构；另一方面，在求解决策问题时，知识推理机和库管理模块既相对独立、又相互依赖，类似数据字典，建立库字典，模型库为库信息的控制中心。最具典型的智能决策支持系统由语言系统（LS）、问题处理系统（PPS）和知识系统（KS）3 个子系统构成，其关键技术是自然语言处理，

目前为人工智能研究的一个主要领域。

4. 战略决策支持系统

决策支持系统在战略管理中的应用和实践，也是目前决策支持系统研究的重要内容。其基本系统构成包括 6 个方面：①数据库系统，主要由数据库、查询语言和数据输入与修改等部分组成；②模型与方法库系统，包括模型和方法库，存储着不同类型的模型及其求解方法；③知识库系统，主要由知识库、推理策略、知识获取等功能组成；④案例分析系统，包括案例资料库、动态存储已解决的问题和案例等；⑤输入和输出系统，具有标准的图形生产器和问题求解报告生产系统，使问题求解过程更加透明，以获得用户对结果的认识；⑥控制与通信系统，控制整个问题求解过程，负责子系统之间的交互和通信。

（四）决策支持系统的核心功能

决策支持系统的主要基本功能包括四个方面：首先，解决高层管理者经常碰到的半结构化和非结构化问题；其次，通过模型或分析技术，将传统的数据存储和检索功能有机结合；再次，采用对话方式使用决策支持系统；最后，能适应环境和用户要求的变化（陈文伟，2000）。基于上述基本功能，决策支持系统能够实现以下核心功能：首先，用户能够比较几种方案，通过试探几种“如果，将如何”（What if…）的方案，通过对比各个方案的回答，从而做出自己的决策；其次，决策支持系统必须具备一个数据库管理系统，既包括一组以优化和非优化模型为形式的数学工具，又包括一个能为用户开发决策支持系统资源的联机交互系统；最后，决策支持系统的结构是由控制模块将数据存取模块、数据变换模块（检索数据、产生报表和图形）、模型建立模块（选择数学模型或采用模拟技术）三个模块有机偶联，从而为用户决策问题提供可靠回答的功能。

二、决策支持系统的产生与发展

（一）决策支持系统的产生

决策支持系统是随着科学技术，特别是电子计算机技术的发展而出现的，其产生过程基本经历了三个主要阶段，包括电子数据处理阶段、管理信息系统阶段和决策支持系统的产生阶段（冯珊，1993；倪金生等，2007）。

电子数据处理（Electronic Data Processing，EDP）阶段。20 世纪 50 年代，电子计算机逐渐应用于管理领域，办公采用电子计算机处理数据和编制报表等，通常把这一类系统所涉及的技术称作电子数据处理（EDP）。主要优点是系统以报表方式驱动，通过办公自动化而节省人力、财力和时间，提高工作效率。主要缺点是仅局限于具体信息处理，不共享，不考虑整体或部门间的交互情况。

管理信息系统（Management Information System，MIS）阶段。20 世纪 60 年代中期，计算机技术、网络技术和数据库技术的快速发展，为计算机系统与其他各种任务及各种

因素的协调与配合提供了可能，此背景下管理信息系统应运而生。管理信息系统是一个由人和计算机等组成的、能进行管理信息的收集、传递、储存、加工、维护和使用的系统，从而使信息处理技术进入到一个新阶段，可以利用以往数据预测未来，利用信息控制企业行为，大幅度提高了信息的效能（倪金生等，2007）。但是，MIS 只能帮助管理者处理和管理基本信息，难以适应多变的内、外部管理环境，对管理人员的决策帮助十分有限。

决策支持系统（Decision Support System，DSS）阶段。由于信息管理系统无法给决策者提供更大的决策支持，仅能完成例行的日常信息处理任务。20 世纪 70 年代，人们期望通过计算机辅助解决复杂的决策问题，这种背景催生了决策支持系统（DSS）。DSS 最早源自美国麻省理工学院 Scott Morton 教授的《管理决策系统》。DSS 提出后发展十分迅速，被广泛应用于系统工程、管理科学和人工智能等领域。经过 40 多年的发展，DSS 的理论与应用在国内外取得了长足的进步和较大的发展，主要应用于企业预算和分析、预测与计划、生产与销售等部门，也用于社会科学、宏观经济与市场分析及投资效益分析等方面。

（二）决策支持系统的发展

DSS 产生以来，已从最初仅通过交互技术辅助管理者对半结构化问题进行管理，发展到运算学和决策学等多个领域，且成为信息系统领域发展的热点。传统 DSS 成功应用的实例并不多，一方面是因为传统决策支持系统只能提供辅助决策过程中的数据级支持，而现实决策所需的数据却往往是分布的、异构的；另一方面是实践中大多 DSS 的应用对决策者有较高的要求，不仅要有专业领域知识，还要有较高的 DSS 建模知识。由于传统 DSS 在实践中的缺陷，不同类型 DSS 应运而生，以满足社会的各种需求。

20 世纪 70 年代至 80 年代，群决策支持系统理论获得了相当的发展。随着市场竞争的日益复杂和动态多变，知识和信息数量较原来大大增加，一个组织、机构和团队需要解决的问题趋于复杂，远远超出个人的认识能力、独立完成的能力和精力，需要不同专业、不同经验的人才互相配合才能完成。此时，GDSS 平台将通信技术、计算机技术和决策理论融合为一体，将不同知识结构、不同经验、但负有共同责任的群体整合在一起实施决策，解决半结构化和非结构化问题，尽可能地减少决策过程中的不确定性，最大限度地提出合理的可接受的问题答案，提高决策质量，特别是需要群体决策的问题，如国家草原政策的制定。随着网络技术的发展，参与决策的人员不必聚集一起，可以采用网络决策，形成基于 Web 的决策支持系统（Web Decision Support System，WDSS）。WDSS 不仅能够实现单机版 DSS 中的大部分功能，而且还大大扩充了传统 DSS 的功能。WDSS 是将 DSS 原来的单机架构通过网络转换为基于 Internet 和 Web 的浏览器/服务器（B/S）架构，这样用户可以通过 Web 浏览器登录决策系统，不需要安装单机版软件，这解决了软件安装、维护和升级中存在的诸多问题（史明昌和王维瑞，2011）。因此，基于 Web 的决策支持系统（WDSS）成为决策支持系统研究领域新的发展趋势。

第二节　草业决策支持系统的类型

本节主要介绍基于牧草生长模型的决策支持系统、基于知识规则的草地管理决策支持系统、基于知识模型的草地管理决策支持系统、基于知识模型和生长模型的草畜管理决策支持系统等 4 种草业决策支持系统的特征和基本组成。

草业决策支持系统是通过计算机应用系统，建立人机对话界面，从而协助草业工作者解决草业建设和发展中的半结构和非结构性问题，提供各种决策问题的辅助规划与解决方案（杨锦忠和董宽虎，1999）。其源于决策支持系统在草业科学领域的应用，其基本结构和决策过程遵循决策系统的基本框架。草业决策支持系统发展相对较晚，主要用于栽培草地和天然草地的智能管理。我国草业决策支持系统始于草原生产力的监测与评价，后来发展到草畜平衡管理和决策支持系统。近十多年以来，随着我国草业科学课程体系的建立和不断完善，草业作为一个相对独立的产业从畜牧业中分离出来，草业科学与信息学的交叉融合得到快速发展，利用 DSS 理念及方法正在探索和研发多种类型的草业决策支持系统，主要包括基于牧草生长模型的决策支持系统、基于知识规则的草地管理决策支持系统、基于知识模型的草地管理决策支持系统、基于知识模型和生长模型的草畜管理决策支持系统等。

一、基于牧草生长模型的决策支持系统

基于牧草生长模型的决策支持系统是对牧草整个生长过程通过模型加以描述，从而预测各种条件下牧草的生长情况，对牧草生产提供多种管理决策措施，提高牧草生产的最大效益。基于牧草生长模型的决策支持系统是数字化草业技术研究和应用的重要组成部分，可以相对精确预测不同情景下牧草生产的可能性，从而为牧草生产者提供各种辅助规划和管理方案。该系统的核心是可以采用牧草生长模型对牧草生长过程通过跨越时间、季节、土壤类型和气候带进行描述，这是该类决策支持系统的基础，其准确性决定于牧草过程模型的准确性。

基于牧草生长模型的决策支持系统主要由数据库、模型库、模型应用及人机接口等部分组成（图 9-2）。

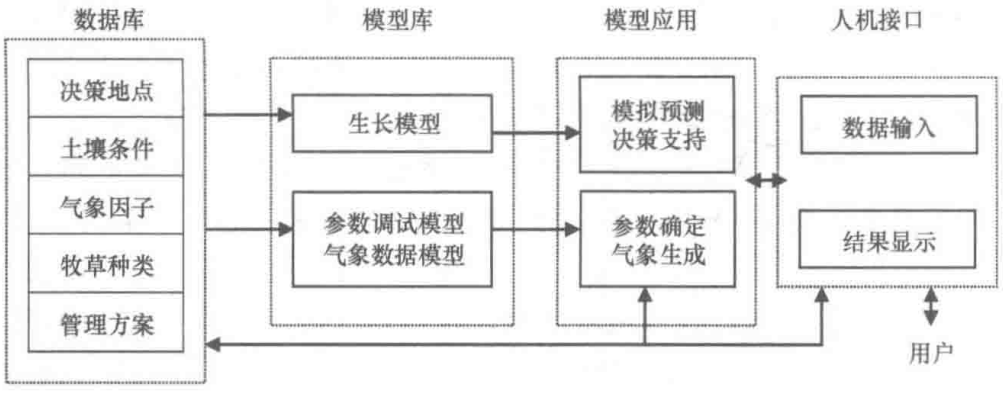


图 9-2　基于牧草生长模型的决策支持系统结构图（仿汤亮等，2006）

（一）数据库

系统数据库由气象数据库、土壤数据库、牧草种类数据库、管理方案数据库和地点数据库组成（朱艳等，2004）。气象数据库包括地理位置信息、日期、日最高气温、日最低气温、日照时数及降水量等信息。

土壤数据库包括两种土壤数据，一类是反映耕作层土壤性质的数据，包括土壤类型、pH、土壤速效磷、速效钾、全氮、氨态氮、硝态氮、有机质、缓效钾含量等；另一类是不同土层的土壤特性数据，包括各土层厚度、容重、黏粒含量、土壤含水率、田间持水量和萎蔫含水量等。

牧草种类数据库主要包括品种特定的基本遗传参数，如温度敏感性、光周期效应、生理春化时间、比叶面积、千粒重、收获指数及株高等。

管理方案数据库主要储存牧草栽培管理措施数据，通常包括播栽期、播种量、水分管理措施（包括水分灌溉时间和灌溉量），以及氮、磷、钾的养分管理措施（包括施肥时间和施肥量）等。对于天然草地，主要储存草地改良措施、放牧时间、放牧率等。

地点数据库包括省份、市县及经纬度等数据。

（二）模型库

包括牧草生长模拟模型和气象因子模型。

1. 牧草生长模拟模型

牧草生产模型主要包括基于发育阶段的物候期子模型和基于形态发生的器官建成子模型。

物候期子模型的研究主要是根据不同牧草各自物候期的生长参数，建立其与气象、土壤、管理措施之间的相关关系模型，将其用于牧草产量模型之中，最终预测不同物候期牧草生长过程与牧草产量的关系，预测区域内哪个物候期对牧草生产最为敏感，从而制订出相对应的规划和预案（魏玉蓉等，2007）。

器官建成子模型主要研究牧草不同器官生长过程的模型，目前主要包括6种类型（汤亮等，2006）：第一，以油菜发育的生理生态过程为基础，通过引入热效应、光周期效应、生理春化时间及基本灌浆因子4个品种参数来定量不同品种之间的差异，它们之间的互作共同决定了每日生理效应的大小，其积累形成每日生理发育时间，并采用生理发育时间作为定量生育进程的尺度，构建了预测油菜阶段发育与物候期子模型。其中到达抽薹、初花、终花、成熟的生理发育时间分别为:16.9、22、31、51。第二，通过定量叶片、根、茎、花和籽粒的长度或质量与生理发育时间之间的关系，引入氮素及水分影响因子来调节器官的生长和消亡，并定义不同品种各器官最大潜在生长来反映品种之间的遗传差异，建立叶片、根、茎、花和籽粒生长的子模型，实现对牧草单个植株形态建成的全面模拟。第三，以光合作用与干物质积累为基础建立模型，通过分别计算花、籽粒、叶片三层的光合作用，引入高斯积分法简单有效地计算每层的光合量，得出每日的冠层总同化量，并建立生理年龄、氮素、温度等因子对牧草光合作用的影响模型及呼吸作用与光合产物消耗的子模型，构建光合作用与干物质积累的子模型。第四，以物质分配与