

# 地理信息系统空间分析能力探讨

王劲峰 柏延臣 朱彩英 王国

(中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 首先回顾了当前商业 GIS 软件包已有的空间分析能力, 以及 GIS 所服务的地球科学对空间分析的需求, 然后以典型案例剖析了当前独立的空间分析商业软件包具有的空间分析功能; 据此, 探讨了 GIS 数据分析新增能力的内容和设计策略。

**关键词** 地理信息系统 空间分析 软件包 系统设计

中图法分类号: TP208 TP311 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)09-0849-05

## Research and Development of Spatial Analysis Functions in GIS

WANG Jin-feng, BO Yan-chen, ZHU Cai-ying, WANG Guo

(State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Science and Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** Various spatial analysis problems exist in many scientific fields such as geology, geophysics, oceanography, agriculture, ecology, environmental science, geography, sociology, politics, anthropology among others. So far, commercial GIS software provided only very simple analytic functions of overlay and classic statistics, which are far from being sufficient. However, many spatial analysis software packages were developed independently. Compared to the 500-years development history of modern mathematics, the mathematical theoretic foundations of spatial analysis have been developed for just 20~30 years. It is still in very preliminary stage and far from being mature. In this paper, after a brief review of the spatial analysis functions in existing GIS software and the need of spatial analysis functions of geoscience, a comparative study was conducted between two typical spatial analysis packages. Based on these, the further development of spatial analysis functions is explored in both contents and strategies. We conclude that for a short-term objective, the existing spatial analysis packages can be integrated with the GIS in different level based on the practical need. However, for a long-term consideration, a mathematical framework of spatial analysis needs to be developed.

**Keywords** Geographic information system, Spatial analysis, Software packages, System design

## 0 引言

空间分析是地理学当前最有价值的财富之一<sup>[1~5]</sup>, 它在地理学之外也具有广泛的实用价值, 例如土地利用战略和交通规划、环境分析和规划、服务分配, 如教育、健康和警力等。因此, 越来越多的市场

公司、大的零售商、连锁超市、环境咨询公司、汽车交易者和石油公司开始使用空间分析。GIS 的核心功能包括数据管理、数据表达和数据分析。前两项的能力建设基于计算机科学, 而 GIS 数据分析能力建设则主要基于空间数据分析领域的研究进展。

## 1 当前 GIS 数据分析已有的功能

目前国内外市场流行的 GIS 商业软件在空间分析方面通常具有空间叠加和简单经典统计两大功能。

空间叠加包括并、交和切。空间并是指两层多边形叠加相交后生成的新的多边形层中各多边形的属性项等于原始两多边形的属性项之和；空间交是指两层多边形叠加相交后生成的新的多边形层中各多边形的属性项等于原始两多边形的属性项之差；空间切是指两层多边形叠加相交后生成的新的多边形层，其属性值等于原被切多边形属性值。

简单经典统计包括最大最小值、直方图、均值方差、正态分布等。

这些功能虽然简单，但是覆盖了地学分析的最基本需求，成为 GIS 软件功能和效率的基本测试单位。

但是，地学的各种空间分析对 GIS 的空间分析能力提出了更多、更高的要求。

## 2 地球科学的空间分析

从定量空间分析的角度，地球科学的研究工作大体可归结为以下 5 大类。

### (1) 空间统计和格局

例如，自然灾害的空间分布、犯罪的空间分布、疾病的空间分布、物种的空间分布以及遥感影像上识别对象的空间分布。

地学要素的空间分布格局是地学过程机理的空间体现，反过来又构成新一轮地学过程的边界和初始条件。因此，对于地学要素空间格局的描述、识别和统计对认识地学机理、因果关系有极大的帮助。

目前空间分析理论成果主要体现在空间点格局统计和地统计上，空间点格局统计可以识别判断点的空间分布类型：聚集、分散、均匀、随机等；地统计或 Kriging 源于找矿，计算物质分布的空间关联性，进行插值、空间预报和模拟。

在这一领域，空间分析学者起主导作用。

### (2) 空间过程模拟

例如，洪水演进、流行病传播、技术扩散、交通流等，可以根据其物理机制建立常微分或偏微分方程。

微分方程的解析求解是头脑的逻辑推理过程。目前有的商业化数学软件已经能够用计算机将几种简单的和规范的微分方程自动推导出解析解，但对一般的实际问题即使不复杂，通常也需要事先进行

人工规则化后才有可能交由计算机求解。微分方程的数值解首先需要空间剖分，这一步骤可以交由 GIS 方便而形象地完成。参数和边初始条件亦由 GIS 提供。

在这一领域，数学家起主导作用，GIS 起数据支撑和运行平台的作用。

### (3) 空间相互影响

例如城镇体系规划、元胞自动机、空间相互作用等，利用状态变量和影响因素之间的关系类比建立数学模型，是一种唯象方程，并用实测数据回归获得参数，然后进行分析预测。

这项工作以地理学家为主体，可以认为是空间分析学者的研究领域。

### (4) 空间运筹

例如水资源时空配置、自然灾害保险、污染物排放时空优化、空间监测采样优化设计等。

当前世界许多城市和地区面临缺水的威胁，随着全球气候变暖，这一趋势更为加剧。水资源的空间配置是一个优化问题，其目标是在区域水资源总量不足的背景条件下，有效地将水资源在不同的子区域、行业和时间上进行配置，以使全区域社会经济和生态效益最佳。

自然灾害保险是根据自然灾害空间发生的强度和频度计算出其风险，然后据此进一步算出保费、准备金等。保险公司的策略就是在给定风险空间和具有购买能力的潜在被保险人空间分布的信息条件下，制定保险计划，实现利益最大化。由于地球科学的长足进展，自然灾害在不同的时空尺度上不再被看作是完全随机和不可预测的。这一特性与经典财产保险精算对样本属性的假设是相悖的。因此有必要开发融合地学机理和信息的模型。

污染排放是一个时空优化问题。社会经济发展必然伴随以污染排放，而污染排放必须限制在环境质量区划的标准之内。同时，环境本身具有一定的容量，它在一定的时段内分解一定量的污染物。另一方面，良好的大气、土壤和水环境可以带来新的经济效益。因此，必须确定安排污染物在不同时间和不同空间位置的排放，以使得地区经济发展和环境保护得到最佳配置。

空间监测与采样是地学研究的基础。空间采样设计就是要在考虑空间关联性的前提下，获得采样方式、采样密度(费用)和采样精度之间的最优关系。

虽然数学家发明了运筹学的基本方法，但以上

这些问题必须通过极大的简化和信息压缩才有可能套用典型模型和解法。因此,要获得有地学价值和内容丰富的结论,还需要发展新的空间分析模型。

### (5) 其他

**不确定性** 不确定性是物质和精神世界的固有属性。地学信息源具有不确定性,信息处理和判断具有不确定性,因此结论的表达也存在不确定性。在进行地学分析模拟研究的同时,只有伴随以各环节和最终结果的不确定性估计,每一项地学研究才可能完整并具有说服力的。

**空间扩展** 区域性和全球性的地学属性观测数据常出现非常离散的现象。进行推论时常以点带面,从而造成结论的不确定性很大。因此,除了纯粹的基于数据的空间插值方法之外,研究建立融合定位观测和空间机理,或者综合利用高低分辨率遥感照片的地理信息空间扩展模型是地理学的关键技术之一。

GIS 已经提供了空间数据管理的强大功能,由于地学研究的需要,独立的空間分析软件包也已出现。对照地学对空间分析工具的需求和已有软件包的功能,可以确定进一步的工作内容。

## 3 空间分析软件包已有的功能

空间数据大体上可分为空间离散或连续型数据(可互相转化),以及多边形数据两大类。自然科学多涉及前者,而社会经济科学多涉及后者。

目前空间分析软件包已有不少,主要来自两大学科领域:地理学和地质学。由于地理学和地质学所涉及的数据特点不同,对应的分析方法不同,造成了两大流派软件的功能、结构、风格不同。

在欧美,60年代经历了地理学计量革命,其主流是试图将社会经济时空格局和过程无条件地全盘数学公式化,而近十几年来,从事空间分析理论研究的一些著名学者多是当时地理学计量革命的积极分子,因此源于地理学者开发的空间分析软件包多有以处理多边形数据为主要任务的特点。

与地理学空间分析软件包特点相反,源于地质学的空间分析软件包一般适用于分析离散和连续型数据。

SpaceStat 和 GS<sup>+</sup> 分别是地理学和地质学有代表性的空间分析软件包。

### 3.1 SpaceStat 主要功能模块

(1) 空间权重特征(Characteristics of Spatial Weights) 社会和经济地理学常处理多边形数据和

基于多边形的空间模型,变量之间的空间关联性是通过空间连接也就是多边形之间的相临关系实现的,这与自然科学中微分方程求数值解时的空间正方形或不规则三角网剖分有可比之处。空间权重矩阵的构建是空间分析的基本前提。

(2) 异常点分析(Outlier Analysis) 在用观测数据对空间模型参数进行标定时,异常分布的点常使方程总体与实际真实状态产生较大偏差,因此应当事先剔除异常点。

(3) 空间步长(Spatial Lag) 这可与时间序列分析中所使用的时间步长概念相类比。空间影响通过相临多边形产生作用,甚至对次临或更远的多边形产生作用。

(4) 空间联系的全局指标(Global Indicators of Spatial Association) 度量区域单变量空间关联性,通常是 Moran's I, Geary's C 等指标。

(5) 空间联系的局域指标(Local Indicators of Spatial Association) 空间联系的全局指标掩盖了空间格局的局域特征,例如空间热点(Hot Spot)的探测。为此,Getis 和 Ord (1992)提出了 Gi 指标。

(6) 普通最小二乘法回归(OLS Regression) 其通常是空间回归的第1步,然后通过 EDA 探测残差的性质,选择适合的统计指标和空间回归方程。

(7) 空间滞后模型(Spatial Lag Model) 包括联立自回归模型(SAR)和条件自回归模型(CAR)两类。

(8) 空间误差模型(Spatial Error Model) 指移动平均模型(MA)。

### 3.2 GS<sup>+</sup> 主要功能模块

(1) 综合半变差分析(Comprehensive Semivariance Analysis) 提供各向同性和各向异性变差图。其参数可由最小二乘法或用户给定。

(2) 变差云分析(Variance Cloud Analysis) 提供在指定空间步长范围内每一队点之间变差随分离距离而变化的图形,这一功能可以迅速地探测奇异点并进行编辑。

(3) Kriging 是地统计估计技术 它假设任意一个测量值是一个自由函数(或自由过程、自由场或随机场)的一次实现,并且任何变量的空间变化被表示成三部分和:结构分量,指常数均值或多项式趋势;空间关联分量和白噪音(或称空间不关联的残差项)。Kriging 使用周围样点值来进行这项预报,提供点在空间域上的优化插值,包括块和点 kriging,以

及在此基础上演化而来的指示 Kriging、Cokriging 等。用户可以选择最恰当的变差模型进行插值。

### 3.3 其他有关软件包

除了以上综合性的空间分析软件包外,又针对专门领域开发了空间专项软件包,例如进行空间各种流(物流、人流、资金流、信息流、交通流等)的分析模拟和预测的软件包 SIM;进行各种空间点格局统计的软件包 PPA;分析景观结构的 Fragstats;分析犯罪事件空间特征的 Crimstat 等。

在进行非空间数据和问题的统计和模拟分析时,或在空间数据进行了重采样而消除空间关联性的条件下,可以使用基于经典统计学和经典数学的商业软件包 SPSS, SAS、MATLAB 或 MATHEMATICA 等。但在后一种情形下,分析结论的信息量显然减小。

### 3.4 空间分析理论体系

有关内容参见文献[6]。

## 4 GIS 数据分析新增能力设计

假设 GIS 数据分析已有能力为  $A$ , 地球科学空间分析问题为  $B$ , 已有独立空间分析软件包功能和空间分析理论体系为  $C$ , GIS 数据分析新增能力设计为  $D$ , 则可以合理地认为:

$$B > A, B > C, C \cap A = \emptyset$$

$D$  的目标应当是  $B$ , 内容应当是  $C$ , 而  $C$  应当不断被发展以满足  $B$ 。从研发策略分,  $D$  可以有 4 种。

(1) 应急设计:  $D = A + C$ 。就是为了紧急使用的需要, 将现有的空间分析软件与 GIS 软件集成。

(2) 实用设计:  $D = (B - A) \cap C$ 。根据地学研究遇到的实际问题, 在当前空间分析已有工具的框架内实现面向当前应用目标的空间分析功能。

(3) 正规设计:  $D = (C - A) \cap B$ 。根据空间分析理论体系, 结合地学具体实际问题, 研发空间分析功能。

(4) 完整设计:  $D = C$ 。完全按照空间分析的理论体系进行软件设计和实现。

在 GIS 软件中, 空间分析功能可以根据其常用程度分为核心级、紧密级和松散级 3 类。核心级空间分析模块成为 GIS 基本核心功能, 常驻在首页菜单上; 紧密型空间分析模块可在 GIS 系统运行时临时根据需要选择添加(Extension)使用; 松散型空间分析模块用于专业化的空间分析工作, 如洪水模拟、交通流预测等, 表现为专用独立的空间分析软件包。

空间分析模块集成到 GIS 之中主要可以通过数据文件读写和程序融合两类途径实现。研发一套 GIS 变量及其运算符系统, 有可能将一些空间分析任务和数学模型进一步分解写为一套简单的 GIS 操作, 这样地学分析学者只要列出和解出方程的分析解, 交由 GIS 初级操作员, 而不必自己懂得 GIS 操作, 就可以迅速地得到计算结果, 并通过 GIS 表达出来。这将大大提高地理信息系统的空间分析效率, 同时大大鼓舞不懂 GIS 技术的地学工作者使用 GIS 进行地学分析, 大大推进 GIS 向各行业和研究者的渗透。研发一套 GIS 变量及其运算符系是一项提高 GIS 空间分析效率和推进 GIS 普及的全新关键理论和技术。

总而言之, 需要根据地学研究的需要和空间分析理论内容的难易程度轻重缓急进行空间分析能力的建设。

## 5 结 论

空间分析是地球科学的基本工具, 地理信息系统目前在这方面的能力有待于大力加强。作为权宜之计, 可以将已有的独立的空间分析软件包与 GIS 集成, 供科研人员非盈利使用; 或者将空间分析理论体系中的实用部分编制成软件包, 形成自行知识产权, 并与 GIS 集成, 构成具有较强空间分析能力的商业化 GIS 软件包。

从长远讲, 需要根据地球科学研究的需要, 潜心研究发展空间分析的理论体系和工具箱, 并分步将其编制成为 GIS 的空间扩展模块, 以大力提高 GIS 除空间数据管理和表达之外的分析能力。

地学研究越来越多地依靠模型, 目前模型与 GIS 集成的主要方法并未从根本上解决问题, 它需要科研人员既要是模型专家又至少是一种 GIS 专用语言的专家。研发 GIS 变量及其运算符系统将可以建立数学模型与 GIS 之间的便洁通道, 地学分析工作者的模型或空间分析流程可以通过这一系统的简单转化而变为 GIS 中几个简单命令而迅速实现, 使 GIS 真正成为广大普通地学工作者的有力工具。

## 参 考 文 献

- 1 陈述彭. 地球系统科学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.
- 2 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- 3 Haining R. Spatial data analysis in social and environmental sciences[M]. Cambridge University Press, 1990.

- 4 Fischer M, Getis A. Recent developments in spatial analysis [M]. Berlin: Springer, 1997.
- 5 Anselin L. Spatial econometrics: Methods and models [M]. Dordrecht: Kluwer, 1988.
- 6 王劲峰,李连发,葛咏等. 地理信息空间分析的理论体系探讨 [J]. 地理学报,2000,55(1):92~103.

王劲峰 1965 年生,博士,研究员,从事地理信息系统和空间分析研究. 在 Transactions in GIS, Int. J. of Remote Sensing. 发表论文 40 余篇,由科学出版社和中国科技出版社出版专(合)著等 5 部.

柏延臣 1972 年生,博士研究生. 从事遥感图象处理与模式识别、地面参数遥感定量反演模型、GIS、空间分析与空间数据不确定性研究. 发表论文 10 余篇.

朱彩英 1963 年生,1985 年获解放军测绘学院学士学位,1990 年获解放军测绘学院硕士学位,1997 年任该院副教授. 主要研究领域为 GIS 和微波遥感图象处理与应用.

王 国 1963 年生,硕士生导师,中国科学院知识创新基地责任副研究员. 长期从事环境变化研究. 发表论文 20 多篇.