

# 基于 GIS 的空间过程模拟建模方法研究

刘学 王兴奎 王光谦

(清华大学水电系泥沙室, 北京 100084)

**摘要** GIS空间过程建模分析功能是GIS走向广泛应用的基础。为了实现这一目标,不仅要求GIS的数据模型能够充分表达过程模拟所需的基本数据集和模拟模型的输出数据集,还要求GIS提供更加丰富的空间分析功能,尤其是多时相空间分析功能。但现有GIS本质上都是静态系统,不仅无法完善地表达时间变量及时空拓扑,也没有提供充足的时空分析功能。完全改变或较大修改数据模型,并开发大量的但可能只具有较窄的应用范围的时空分析模型不会被GIS开发者所接受。因此,针对空间过程模拟问题,提出了扩展现有GIS以支持过程模拟的方法。

**关键词** 地学空间过程 过程模拟模型 GIS集成 数据模型

## 0 引言

空间分析是GIS的核心。但许多GIS分析空间数据的功能相对来说还十分有限<sup>[1]</sup>,无法适应复杂多样和不断发展的环境与地学分析。出现这种状况的主要原因不仅是早期市场对GIS信息管理功能的需求,更重要的是人们对空间分析概念的模糊不清、对时空数据模型缺乏深刻的理解<sup>[4]</sup>和地学与环境过程分析方法的专业性与GIS内嵌功能的通用性之间的矛盾。

随着GIS在资源与环境等领域中的广泛应用,人们愈来愈认识到,空间分析能力的缺乏可能成为GIS进一步发展的障碍<sup>[5]</sup>。而各种空间过程是地学与环境研究的主题,因此,从90年代中期开始,如何在GIS框架内建立空间过程数学模型成为GIS研究的一个重点。

空间过程分析不同于一般的空间统计,其特殊性在于过程模型明显表示和处理时间变量,从而要求GIS的数据模型必须能有效表达时间变量和时空拓扑,并同时支持多时相数据分析建模。由于能够体现空间过程结构的数据模型对GIS过程建模具有根本的重要性,导致国内外大量的研究都集中在时空数据模型上,因此,近期出现了许多扩展或重新设计的时空GIS数据模型<sup>[2,3,6-9]</sup>。这些模型与传统的GIS数据模型有很大差异,实现这些模型都将要求

对现有GIS数据模型进行较大修改或重新设计,不易被GIS开发者所接受。一种经济可行的方案是对现有GIS进行应用扩展,使之能支持时间变量的处理和空间过程建模。本文就是从这一角度,针对地学与环境空间过程模拟,提出了扩展现有GIS以支持过程模拟的方法,并结合洪水过程进行了实验分析。

## 1 GIS空间过程模拟建模的条件

### 1.1 GIS在空间过程建模中的作用

基于GIS进行空间过程模拟建模在如下2个方面对模型研究与开发有益:

(1) 可以从GIS空间数据库产生过程模拟模型计算所需的基本数据集。

(2) 利用GIS可以对过程模拟输出数据集进行统一管理、进一步处理分析与解释和过程模拟可视化。

### 1.2 空间过程模拟模型

空间过程模拟模型一般具有如下特点:

(1) 同一时间断面上的数据具有同一般静态数据集相同的特性;

(2) 所有的数据都有时间标记,即任意空间单元的特征数据都包括时间( $T$ )、空间位置( $S$ )以及属

性(A)

空间单元特性  $\Leftrightarrow (T, S, A)$  (1)

(3) 过程模拟模型基本上都是二维(2D)或三维(3D)的,未来的发展是精确的三维模拟模型,因此,空间数据可能是三维的,甚至已经是三维的如气候过程模拟;

(4) 过程模拟模型输入数据集(模型操作数据集和计算控制参数所需的数据集)与模型计算输出数据集一般具有相同的结构与特性。

地学空间过程模拟模型基本上分为2类,它们对应2种过程研究模式。

(1) 过程研究的动力学方法与动力学过程模拟模型。过程研究的动力学方法假设系统运动的物理规律已知。根据过程物理规律,可以建立过程模拟的数学模型,即动力学过程模拟模型。这些模型常常是在系统运动初始条件与边界条件约束下的一组偏微分方程组。

动力学过程模拟模型的建立与解算一般是在非语义空间单元上进行(网格单元或不规则三角形单元)。模型的输入数据一部分作为模型操作数据直接操作,另一部分则用于计算模型控制参数。这些数据的时间分辨率一般要求不高,只有当这些数据的变化已经达到使过程模拟模型不能较好地代表系统行为时才需要更新,即重新计算控制参数并输入当前时刻的系统状态实测数据。但模型计算产生的数据集则常常是时间分辨率(计算步长)较高的数据层序列。另外,这类模型常常遇到三维模型如三维气候过程模拟模型、三维泥沙数学模型等。

(2) 过程研究的随机过程方法与随机过程模拟模型。过程研究的随机过程方法一般用于事先并不知道过程运动规律的那些过程,如土地利用变化等。为此,研究必须首先在不同的过程时间断面上进行状态观测,获得多时相的过程断面数据,然后,利用统计学与随机过程理论建立随机过程模型。随机过程模拟模型一般是不同时刻状态变量的联合分布函数,而且常常针对每个空间单元进行。计算模型控制参数所需数据集与模型操作数据集一般是相同的,模型输出数据是基于条件分布或其它统计分析方法产生的新的时间断面上的状态数据。

这类模拟模型的操作单元常常是具有明确语义的区域(Area or Region),如土地利用类型或土地性质或非语义的空间单元。但很少用这种方法处理三维过程。

### 1.3 空间过程模拟对GIS的要求分析

动力学模拟模型的计算结果是微观的分布式的非语义数据,只有通过分析与解释环节这些数据才能成为关于相应过程的有意义的信息。不仅需要过程模拟数据本身进行分类、聚集、综合、统计等分析,还要结合相应空间区域内其它种类的数据进行综合分析。随机过程模拟模型如果其建模与计算模式是针对非语义的空间单元的,那么其数据处理结果(内插或预测)也与动力学模型一样需要进一步分析与解释;即使其建模与计算模式是针对有意义的空间单元的,常常也需要结合其它数据进行分析以便找出引起相应结果的可能原因。

此外,无论对于动力学模型还是随机过程模型,它们模拟的都是空间过程,形成的都是过程数据或时空分布数据,具有如下的基本结构:

$$\begin{aligned} t_1 & \text{ (空间单元集合: } s_1, s_2, s_3, \dots, s_p) \leftrightarrow \text{过程特征值} \\ t_2 & \text{ (空间单元集合: } s_1, s_2, s_3, \dots, s_p) \leftrightarrow \text{过程特征值} \\ & \vdots \\ t_n & \text{ (空间单元集合: } s_1, s_2, s_3, \dots, s_p) \leftrightarrow \text{过程特征值} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $t_i$  表示时间断面,  $s_i$  表示空间单元位置,过程特征值如泥沙淤积厚度,洪水水深,污染物含量等。

由此看来,为了实现基于GIS的空间过程模拟建模,要求GIS:

- (1) GIS的数据模型不仅能表达空间与属性变量,还能明确表达时间变量;
- (2) 提供多时相空间数据分析功能,或易于扩展定义多时相操作;
- (3) 对于三维过程模拟,还要求其能够支持三维空间变量表达和三维分析。

## 2 基于现有GIS的空间过程模拟建模方法

### 2.1 现有GIS数据模型表达能力与分析方法的局限性

据统计,目前世界上GIS软件系统达几百种,不同GIS软件系统开发使用的并不是相同的数据模型,彼此之间或多或少都存在差别。尽管如此,归纳起来,GIS数据模型不外乎两种:层片模型(Layer Model)与面向对象模型(Object-oriented Model,简称OO模型),它们对应两种现实世界观:由区域(Re-

gions)和线段(Segments)近似形成的无限数量的元组(Tuples)集合——域观(Field View);由分散独立存在的目标(Object)组成的空间目标集合——对象观(Object View)。根据GIS数据结构的不同,还可进一步将其分为基于栅格的层片模型(如ERDAS与GRASS)、基于矢量的层片模型(如ARC/INFO)、基于矢量的面向对象模型、基于栅格的面向对象模型(如GEOSTAR是矢量-栅格一体化的面向对象模型)。

但现有大多数GIS一般都没有考虑时间维变量的表达,基本上还是静态数据模型。所进行的处理与分析也常常是静态的处理与分析,虽然定义了基本变化函数如地图代数,但所有操作都不能直接与时间变量建立联系。不仅如此,现有的GIS都是在二维空间中定义各种变量的,至多是将第三维 $z$ 当作一个独立的属性进行表达与处理,因此,是二维或2.5维的数据模型,不是真正的三维模型,难以支持三维过程模型与分析。

## 2.2 应用扩展现有GIS以支持空间过程模拟的方法

一个能够较好地支持空间过程模拟的GIS数据模型应该能够有效地表达时间变量及各种时空关系,并支持多时相空间分析。对于三维的过程模拟,还应该能够支持三维空间变量的表达。重要的是,一个GIS产品中其数据模型是已经确定了的,修改系统数据模型将引起基于数据模型的所有操作与算法的改变,将从根本上改变系统的结构与功能,无异于重新开发一个全新的GIS产品。因此,这种改变数据模型的方式是不可能为GIS开发者所接受的。但一般的GIS都为用户提供了应用宏语言或高级语言开发环境。为此,可以探索应用扩展现有GIS产品使其能够适合空间过程模拟建模的可能性。

### (1) 时间维数据表示上的扩展

由于动力学模拟模型定义空间单元是非语义的而且常用的是栅格结构,因此,不宜使用面向对象模型进行数据表达,而适宜使用栅格的层片模型:

层: (空间矩形网格集合:  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_p$ )  
 $\leftrightarrow$  过程特征值 (3)

即使对于不规则三角形划分(相当于TIN)即矢量结构的空表示方式,由于空间单元也是非语义的,因此也适合使用层片模型但是矢量结构的层片模型:

层: (空间三角形单元集合:  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_p$ )  
 $\leftrightarrow$  过程特征值 (4)

对于基于网格结构或TIN结构的随机过程模

拟,其空间表达方式与式(3)和式(4)一样。对于基于语义单元矢量结构的随机过程模拟,适宜于使用矢量结构的层片模型式(4)或面向对象模型表达空间信息:

```
Class( )
{
  Data sets;
  Operations;
}
```

(5)

在不改变GIS数据模型与数据结构的条件下,可以考虑使用如下的方法以“外部挂接”的方式明确地表示时间变量并建立其与空间信息之间的联系。

对于采用栅格层片模型的GIS,由于模型输出的每一个网格单元都可能发生变化,因而适宜采用连续快照模型(Time-slice snapshots)。明确表示时间变量的方法是对应每个时间断面上的数据文件,在其相应的工作空间中,建立一个存储时间变量及其前后时间拓扑关系的ASCII文件,并通过文件名联系实现时间与空间的连接。即假设层片数据文件名为Layer,则时间文件名为Layer\_t,文件的数据结构为:

{ $t, t$ 的前一时刻,  $t$ 的后一时刻} (6)

使用这种方法,应用时只要根据层片数据文件名,就可通过字符操作方便地确定时间信息文件进而获得时间变量并与相应的层片空间数据建立联系。增加时间变量并不影响GIS的任何原有结构。

对于采用矢量层片模型的GIS,无论是非语义的TIN还是语义的多边形结构,在不改变GIS自身数据模型与数据结构的条件下,以典型的ARC/INFO Coverage模型为例,可以通过为每个Coverage建立一个可与其属性表关联的DBF文件的方式表示时间变量及其拓扑,这个DBF文件的结构为

{Feature\_id,  $t, t$ 的前一时刻,  $t$ 的后一时刻} (7)

其中,Feature\_id可以是任意一个三角形目标或多边形目标,它是建立时间与空间信息联系的关键。通过这种方式可以只记录那些发生变化的目标,从而节省信息的存储空间。

对于采用面向对象模型(OO)的GIS,由于每个空间目标都被归类并以对象的方式进行表示,所有与其相关的数据集和允许操作集都被封装于对象内,从而可以极其灵活地表示目标的特征。可以采用如下的方法表达时间变量及其前后时间拓扑:将所有具有相同时间特征对象聚合为一个时间类,并通过设置使其只能被这些对象继承来实现。

```

Super_class( )
{ t; t 的前一时刻; t 的后一时刻;
  时间变量的 I/O();

  时间变量的 Edit();
  .....
}
(8)

```

## (2) 时间数据处理与多时相空间分析的应用扩展

现有 GIS 的空间分析功能一般包括:空间实体属性的布尔运算( Boolean operations),线求交,点在多边形内,多边形叠置,缓冲区分析,实体属性的各种空间统计,栅格模式的地图代数运算,地形分析和网络分析等。这些分析功能中并没有提供直接进行时间数据处理的方法和多时相分析空间过程数据的模型。

空间过程的动力学模拟模型一般归结为迭代地解算一组代数方程组,产生空间分布格局的时间序列;空间过程的随机过程模拟模型有些归结为迭代地计算一组代数函数,有些也归结为迭代地解算一组代数方程组,最后产生的输出同样是空间分布格局的时间序列。从现有 GIS 的空间分析功能可以知道,这些计算功能显然是没有包含的。必须借助系统提供的宏语言(ML)和高级语言如 C/C++ 开发环境进行开发。

这种应用开发包括三个部分:时间数据的提取与处理,包括时间信息检索与编辑;空间过程模拟模型的独立建立及其与 GIS 的连接;模拟结果的进一步分析,主要是聚合与分类、空间统计、结合其它数据进行综合分析等。

## 3 洪水过程的模拟实验

河道洪水过程是典型的地表空间过程,本文对某库区的上游来水过程进行了 GIS 模拟建模分析实验。由于洪水过程模型的计算是基于栅格结构的,因此,选择典型的栅格 GIS-ERDAS 为建模与分析平台。利用 C 语言在 ERDAS 之外独立建立洪水二维过程模拟计算模块。根据本文设计的时间维数据表达与处理方法,利用 C 语言建立时间数据的提取与编辑模块。这些模块与 ERDAS 的连接是通过其提供的宏语言 EML 和 SML 实现的。首先 ERDAS 要向模拟模型模块提供必要的初始时刻洪水状态数据、边界条件以及模型参数数据。其中模型参数中的坡度数据是利用 ERDAS-3D Surface 功能对河道断面数据进行内插 DEM,进而利用 ERDAS-Topographical

Analysis 功能产生的。其次,利用 ERDAS 的宏语言环境以内嵌的方式调用洪水模拟模块,将模拟计算的结果以前文设计的式(6)的方式产生过程时空数据表达,并分别由 ERDAS 和时间数据处理模块进行管理。最后,利用 ERDAS 自身的聚合分类、空间统计、层间变化分析功能对过程模拟结果进行分析解释。实验产生的洪水过程模拟结果的动态显示如图 1。



图 1 某库区上游洪水过程模拟结果的动态显示

## 4 结论

空间过程是各种地学与环境领域研究的核心。过程模拟是空间过程研究的主要手段。以现有的 GIS 为平台,对空间过程进行模拟建模研究无论对模型研究还是模型开发都具有重要价值。通过本文的研究,可以得到如下结论:

(1) 基于现有 GIS 的空间过程模拟建模,必须明确地表示时间信息;

(2) 在不改变现有 GIS 的数据模型与数据结构的前提下,可以以“挂接”方式在集成系统中明确表示和处理时间信息;

(3) 过程模拟模型计算所需的计算函数现有 GIS 本身并不能支持,但可以通过其提供的宏语言和与高级语言的接口进行独立开发和连接;

(4) 基于 ERDAS 的洪水过程模拟实验,证明了本文提出的应用扩展现有 GIS 支持空间过程模拟建模方法的实用性。

## 参考文献

- Burrough P A. Methods of spatial analysis in GIS. Inter National Journal of Geographic Information Systems, 1990, (3): 221 ~ 223.
- Raper J et al. Development of a geomorphological spatial model using object-oriented. Design. International Journal of Geographic Information Sys-

- tems, 1995, (4):359 ~ 383.
- 3 Peuquet D J *et al.* An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographic Information Systems*, 1995, (1):7 ~ 24.
  - 4 Goodchild M F. Geographic data modeling. *Computers & Geosciences*, 1992, (4):410 ~ 408.
  - 5 Dobson J E. Commentary: A conceptual framework for integrating RS, GIS and geography. *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, 1993, (10):491 ~ 1496.
  - 6 张 犁. GIS系统集成的理论与实践. *地理学报*, 1996, 51(4):306 ~ 313.
  - 7 陈 晋等. 时空一体化数据的 TGIS 设计的初步探讨. *环境遥感*, 1995, 10(2):144 ~ 151.
  - 8 舒 红等. 面向对象的时空数据模型. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(3):229 ~ 233.
  - 9 郭达志等. 矿山 GIS 中的空间和时间四维数据模型. *测绘学报*, 1993, 22(1):33 ~ 40.



刘 学 1965 年 12 月出生, 博士, 现为清华大学水电系博士后。主要研究领域为遥感 (RS) 图象处理, 时态地理信息系统 (GIS), 空间过程的 3D 动态可视化, 基于 RS 与 GIS 的环境过程分析等。

王兴奎 1951 年 10 月出生, 清华大学水电系教授。主要研究领域为河流动力学, 遥感与 GIS 在河流水文与泥沙过程分析中的应用等。

王光谦 1962 年 5 月出生, 清华大学水电系教授。主要研究领域为河流动力学, 遥感与 GIS 在水资源, 水环境与水灾害中的应用等。

## Study on GIS-Based Modeling of Spatial Processes Simulation

Liu Xue, Wang Xingkui and Wang Guangqian

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The functionality of spatial process analysis is the foundation of GIS's comprehensive application. To realize such a goal, it is desirable that not only the data model of GIS can represent the datasets needed by spatial process models and output datasets, but also GIS is able to do multitemporal spatial analysis. But most of current GISs are static in essence, they cannot represent temporal information and temporal topology, and have not rich functionality of multitemporal analysis. Completely changing or largely modifying data model of current GISs and developing a lot of spatial process models which may have very narrow applications could not be accepted by the GIS vendors. Based on this point of view, a method to extend current GIS to support spatial process simulation modeling is proposed.

**Keywords** Spatial process, Process simulation, GIS modeling, Data model