

流域水文时空数据模型初探

陈 华 郭生练 林凯荣 熊立华 徐高洪

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 : 简要分析流域水文过程模拟方法 , 在面向对象的 GIS 水文数据模型的基础上 , 讨论了水文时空数据模型的时间域表达概念和方式 , 应用水文时空数据模型显示降雨数据的时空变化过程。

关键词 : GIS ; 水文水资源 ; 时空数据模型 ; 水文模型 ; 面向对象

中图分类号 : P33 ; P208 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2006)06-0016-04

Spatio-temporal hydrological data model for watershed hydrological process simulation//CHEN Hua , GUO Sheng-lian , LIN Kai-rong , XIONG Li-hua , XU Gao-hong (*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science , Wuhan University , Wuhan 430072 , China*)

Abstract : An introduction is given to the method for simulation of watershed hydrological processes . The concept and method to reflect the hydrological data in time domain by the spatio-temporal model are discussed based on the object-oriented GIS hydrological data model . Then , the model is employed to visualize the spatio-temporal variation of rainfall data .

Key words : GIS ; hydrology and water resources ; spatio-temporal data model ; hydrological model ; object-oriented

随着计算机科学和数字化信息技术的发展 , 水文科学正经历着一场前所未有的革新 , 水文研究的技术手段发生了根本性的变化 , GIS 及其他信息科学技术在水文学上的交叉应用 , 形成了数字水文学^[1-3]。GIS 在水文科学中的应用经历了不同的阶段 , 早期的 GIS 主要侧重于水文空间对象地理信息的存储、查询、更新和制图 , 到了近期逐步加强了水文空间分析功能。

时间对流域水文过程模拟具有特别的意义 , 这是由于组成水循环的各个分过程(如降水、入渗、蒸发、径流等) 都是随时间变化的。流域水文模型是对水体运动的自然过程的概化表达 , 注重于模拟流动水体的时间过程以及地表、地下水体中物质的输移过程。几乎在所有的水文模型中 , 水文过程的时间变化比水文现象的空间变化更为重要^[4]。然而在当前的 GIS 中 , 水文现象的时间变化仅作为空间环境结果来进行模拟。目前四维 GIS 的出现 , 大部分 GIS 软件能支持时间维 , 随着面向对象技术的出现 , 面向对象的数据模型以丰富的语义、描述复杂对象的功能和数据抽象技术等优点受到地理信息系统专家的关注。龚健雅^[5]、曹志月等^[6]都曾经利用面向对象的思想进行时空数据模型的研究。为促进 GIS

在水文领域中的深入应用 , 更好地使水文模型和空间信息结合 , 这就要求 GIS 水文数据模型能有效地表达时间变量和时空拓扑。

1 流域水文过程模拟的方法

1.1 模拟流域水文过程的水文模型

反映地理环境中水流运动空间变化能力的水文模型有集总式水文模型和分布式水文模型。集总式水文模型以集总式途径模拟发生在流域上不同的水文过程 , 很难获得满意的水文响应模拟结果 , 分布式流域水文模型采用偏微分方程结构 , 反映了采用水文变量和参数空间分布来进行水文产汇流的研究 , 该模型充分考虑了单元降水量的空间变化、参数的空间分布 , 真实地反映了流域产汇流的物理机制。

1.2 分布式水文模型与 GIS 的集成

目前水文模拟技术趋向于将分布式水文模型与 GIS 集成 , 以便充分利用 GIS 在空间分析、数据管理及可视化方面的功能。数字高程模型(DEM) 是 GIS 在水文模拟应用中的一个基础数据 , 利用 DEM 可以提取流域的许多重要水文特征参数 , 如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等。国内外许多学者对基于 DEM 的分布式水文模型展开了深入的

研究^[7-12]。然而,成功集成 GIS 和基于 DEM 的分布式水文模型还有许多障碍。基于 DEM 的分布式水文模型是独立于 GIS 的,同时空间数据的复杂性也增加了 GIS 和基于 DEM 的分布式水文模型集成的难度,使得流域分布式水文模型时空概念的表达与 GIS 中的时空概念表达不兼容。目前 GIS 几乎不能表达复杂水文系统的动态相互作用。那么,如何把水文过程的时间序列数据与描述周围环境的地理空间数据集成或耦合在一起将是一个重要的问题。

2 面向对象的 GIS 水文数据模型

美国环境系统研究所(ESRI)和美国德克萨斯州立大学 Austin 分校水资源研究中心联合开发了一种水文地理空间数据和时间序列数据模型——Arc Hydro 数据模型^[13],该数据模型应用面向对象技术,将水文要素时变特性同水文空间对象融合,能支持在 GIS 中进行流域水文过程模拟。在 Arc Hydro 数据模型的基础上,笔者对面向对象的 GIS 水文数据模型的整体设计进行探讨和研究,并实现了面向对象的 GIS 水文数据模型^[14-15]。

面向对象的 GIS 水文数据模型的时间序列对象仅考虑时间序列数据,没有考虑流域下垫面及其结构的时变特性。而流域下垫面的变化对水文模型参数有较大的影响,在时空数据模型中不可以忽略流域下垫面的时变特性。本文针对流域水文过程模拟,进一步对水文空间对象的时态问题进行研究,将面向对象的 GIS 水文数据模型扩充到时间维。

3 基于时空过程模拟的水文数据模型

对水文现象完整而准确地表达和分析是 GIS 在水文学科应用的核心所在,空间对象的时间、空间和属性 3 个要素具有不可分割性(非独立性),即只有对这 3 个要素的完整表达才能揭示水文现象的特征和规律。然而有关水文现象的地理要素之间的“非独立性”与要素获取和分析的“独立性”之间必然存在着矛盾,这一矛盾使得独立获取的地理信息与分析问题所需的信息并不完全一致^[16],从而使现有 GIS 在水文学科中的应用仅局限于对空间和属性数据的表达和分析上,而未能对水文现象随时间变化特征和规律的认识提供有效手段。要解决这一矛盾,真正实现对水文现象完整、准确的描述,必须能够将独立获取的水文信息集成为地理空间、时间、属性完整描述的数据。

GIS 在水文学科应用的时态问题同在其他学科上应用的时态问题有所不同,这是由于流域的下垫面,即空间地物对象具有时间变化的特点,而流域暴

雨洪水等水文要素也具有明显的时间变化特点,这些要素一般都具有几十年的时间序列数据。这两个方面的时态变化信息是流域水文过程模拟的基本信息,忽略任一项,流域水文过程模拟的结果都是不完整的,因此水文时空数据模型的构造应从水文空间对象的时态变化特点和水文变量的时间序列数据两个方面考虑,并且要将两者有机地融合,才能够使 GIS 真正地支持流域水文过程模拟。

3.1 时空数据模型的构造

在对空间对象的时间维进行处理和表达时,应在数据模型原有数据结构的基础上进行构造,而不应该修改和变更原有的数据结构。

3.1.1 空间地物对象时态变化及其处理

龚健雅提出了面向对象的时空数据模型,该模型应用对象标识记录对象版本的新方法,将空间对象变化的时间转化成版本编号,将时态信息标志在具体的属性字段上,并通过定义一个专门的对象来记录它们的对应关系^[5]。这种面向对象的时空数据模型可以按照统一的模式和方法,同时考虑空间对象的几何、拓扑甚至栅格数据的时态问题,因此可以应用这种时空数据模型来处理水文空间对象的时态变化问题。

水文空间对象时态变化有属性数据变化和图形几何数据变化两种情况。对于属性数据变化,应用面向对象方式相对来说比较简单,因为面向对象模型直接支持变长记录、多元组和子对象的嵌套^[5],可以为某些将会发生时态变化的字段进行特殊的定义,允许它变长。而对于图形几何形状发生变化、处理相对比较麻烦、每个空间对象可能有量变和质变两种形式,如测站的迁移和撤销、河道的变迁和消失、大坝加固前后的信息和流域、水库等水体集水面积的变化等,这些时态变化信息对流域洪水预报、水资源规划与管理等都具有重要的参考价值。

在空间对象几何形状发生变化的时态处理中,专门定义了一个版本信息对象来表达空间对象的版本信息,如图 1 所示。将版本信息标志在版本信息(EditionID)上,并且可以用一个长整型数字表示一个版本信息^[5]。版本号用来表征版本的信息,每个对象的版本号依自身的变化依次递加,且每个对象可能由多个版本号不同的多个对象组成,版本号相同的对象其发生的时间也可能不同。事件信息专门用来记录版本发生变化的时间,对象来源和对象去处定义了对象发生变化的具体情况,如某一河段由于裁弯取直发生变化,原来弯的一段消失了,产生了新的一段。

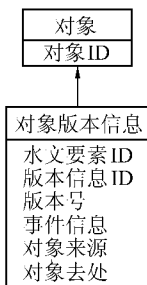


图 1 版本信息对象模型

3.1.2 时间序列数据的表达

时间序列数据能以各种形式被获得或者存储,为了满足大的数据集和许多变量如水质数据、气候数据等,GIS的水文数据核心模型必须被扩展,使得不同的水文变量有独立的时间序列表。在GIS中水文时间序列数据信息能被描述为三维空间,空间坐标分别是:空间、时间、被测量的变量,分别以空间位置 L 、时间信息 T 和变量信息 V 作为标志,因此在该坐标体系中变量的数据值 D 能被写成 $D(L, T, V)$,如图 2 所示。

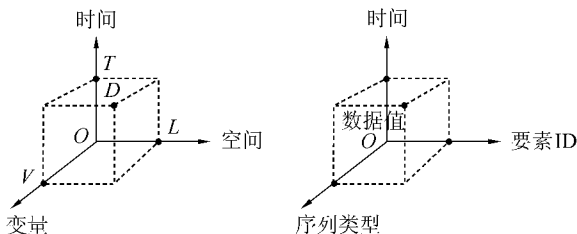


图 2 时间序列空间体系^[13]

在一个相关的数据库中,字段名称被用来表征各种变量,FeatureID(Feature Identity)代表空间数据要素或者要素的具体位置(L),TsDateTime 代表时间信息(T),TsTypeID 表征被测量的变量(V),这样,任何一个测量值都能够被表示为所定义的三维空间的一个点,且该点有相应的 FeatureID, TsDateTime, TsTypeID 属性。

时间序列对象的三维空间结构是比较简单和全面的(图 3),通过一系列垂直平面和水平平面的相交,能够组成三维空间结构。三维空间结构的交点代表了一个由 FeatureID, TsDateTime 和 TsTypeID 属

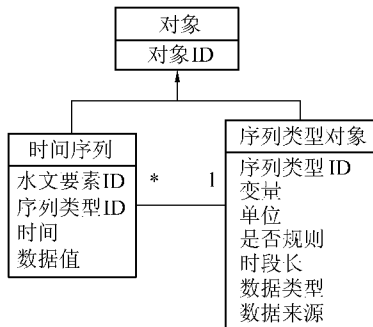


图 3 时间序列对象模型

性共同确定的唯一的值($TsValue$)。

根据上述构造,利用面向对象的方法,可以设计水文时间序列对象。水文时间序列对象的核心模块包含两个对象类:时间序列对象类和序列类型对象类。

时间序列类从GIS的对象类中继承,定义了4个属性:要素ID(FeatureID)、序列类型ID(TsTypeID)、时间(TsDateTime)和数据值(TsValue)。要素ID通常设置为描述时间序列值的水文要素的水文标志符(HydroID);序列类型ID用来表征上述不同的序列类型,如降雨序列、流量序列、蒸发序列等。

时间序列类中的序列类型ID同序列类型对象类有一个一一对应的关联关系,一个序列类型ID指向序列类型对象表中的相应纪录,该纪录描述了时间序列类型数据的详细信息。

3.2 时间序列对象的组成

时间序列对象定义成4个部分:时间序列、属性序列、要素序列和栅格序列^[17]。时间序列描述了传统的、没有空间属性的时间序列数据;属性序列描述了具有动态属性值的静态要素;要素序列描述了具有动态属性值的动态要素;栅格序列描述了随着时间发生变化的一系列栅格数据集。

3.2.1 时间序列

一个时间序列的时间序列类型描写时间序列记录,这些记录以变量(如TsValue和TsTypeID)和时间(如TsDateTime)作为索引。GIS世界外的许多水文模拟模型在处理时间序列的时候主要参照上述两个参数。因此,时间序列类型是GIS外部世界的水文过程模拟和GIS世界的时空分析之间的一个关联。尽管时间序列类型同空间信息没有直接的关联,但是时间序列可以通过一个中间表同空间要素建立关联。

3.2.2 属性序列

一个属性序列的时间序列类型描写以变量(如TsValue和TsTypeID)、时间(TsDateTime)和空间要素(FeatureID)作为索引的时间序列记录。它主要用来存储带有动态时间属性的静态要素。对于存储测点的观测值非常有用,如径流、水质和降雨等。在属性序列中,一个空间要素能同个或者更多的时间序列记录相关联,但是一个时间序列记录只能关联一个要素。这样,要素和时间序列记录是以一对多的关系进行关联的,有效地提高了存储和检索的效率。

3.2.3 要素序列

一个要素序列的时间序列类型描写以变量(如TsValue和TsTypeID)、时间(TsDateTime)和版本信息(EditionID)作为索引的一系列要素。要素序列被设计用来存储随着时间改变形状和位置的要素,如不断发生变化的河漫滩范围、随着环境发生变化的河道等。

3.2.4 栅格序列

一个栅格序列的时间序列类型描写了以变量 (如 TsTypeID) 和时间 (TsDateTime) 作为索引的一系列 的栅格序列记录。栅格数据被收集和存储在一个 栅格目录中,在这个目录中栅格数据的 TsTypeID 和 TsDateTime 字段被不断的增加。字段 TsTypeID 和其他时间序列类型的 TsTypeID 一样,描述了栅格上变量被测量的具体细节。使用栅格序列,一个空间的连续变化能被存储为一系列按照一定时间步长变化的栅格数据,并且所有的栅格数据都能被存储在一个栅格目录中。

3.3 时间序列对象同其他要素数据集的融合

在面向对象的 GIS 水文数据模型中,水文对象间的关系是根据对水文对象的水文要素 ID (HydroID) 的引用来表示的,在数据模型中 HydroID 就是通过一个复杂水文网络的一个方便的导航手段。利用 HydroID,时间序列对象的几个组成部分能够同数据模型的其他要素数据集之间很容易地建立关联,很好地融合,使得面向对象的 GIS 水文数据模型的结构和内容更加完整。

3.4 时空数据模型的实现

在 Arc Info8.3 环境下,使用 ESRI 公司研制的 Arc Hydro Tools 和 Time Series Tools 工具,能够实现水文时空数据模型。应用时空数据模型,在 GIS 中生成一个降雨时间序列,如图 4 所示,流域降雨随时间和空间变化的完整过程能够被很直观、很精确地显示出来。

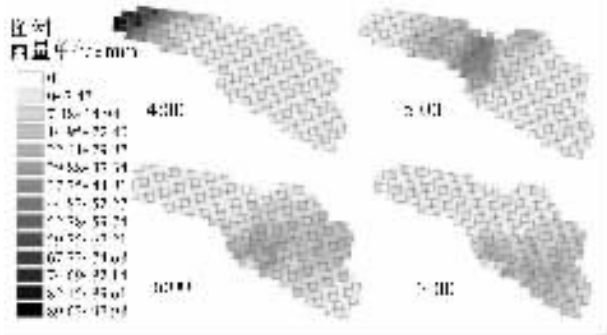


图 4 时空数据模型应用实例

4 结 语

本文所讨论的水文时空数据模型,应用面向对象技术,将水文空间对象的时间信息转化成版本号,并在水文空间对象标识里包含对象版本号。在将面向对象的水文数据模型扩充到时间维的过程中,无须更改原有的水文数据模型的数据结构,使得扩充后的水文数据模型具有良好的兼容性,同样适用于无时态变化数据。水文时空数据模型充分考虑了水

文时间序列数据和空间对象的时态变化,能够很好地支持流域水文过程分析与模拟,有利于进一步促进 GIS 在水文学科上的应用,反过来 GIS 在水文学科上的深入应用也有利于促进水文学科的进一步发展,更好地揭示流域水文过程的自然物理机制。

时空数据模型在 GIS 应用研究中已经是一个非常热门的问题,本文在总结前人工作的基础上,针对水文学科的特点,分析和研究适用于水文学科的时空数据模型。今后,随着“3S”(GIS、RS、GPS)技术在水文科学上的不断深入应用,水文时空数据模型的完善、数据的输入输出接口及其实现的可操作性还有待于进一步深入研究。

参考文献：

- [1] 刘新仁. 数字水文系统建设[J]. 水文, 2000, 20(4): 5-8.
- [2] 任立良. 流域水文模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(4): 1-7.
- [3] 任立良, 刘新仁. 数字时代水文模拟技术的变革[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(5): 1-6.
- [4] 万洪涛, 周成虎, 万庆, 等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 13(4): 560-567.
- [5] 龚健雅. GIS 中面向对象时空数据模型[J]. 测绘学报, 1997, 26(4): 289-298.
- [6] 曹志月, 刘岳. 一种面向对象的时空数据模型[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 87-92.
- [7] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439.
- [8] GARROTE L B, RAFAEL L. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167: 279-306.
- [9] 郭生练, 熊立华. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
- [10] 任立良, 刘新仁. 数字高程模型信息提取与数字水文模型研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 463-469.
- [11] 郭生练, 熊立华. 分布式流域水文物理模型的应用和检验[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(1): 1-5.
- [12] 熊立华, 郭生练, O'CONNOR K M. 利用 DEM 提取地貌指数的方法述评[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 775-780.
- [13] MAIDMENT D R. Arc Hydro GIS for water resources[M]. California: ESRI Press, 2002.
- [14] 陈华, 郭生练, 熊立华, 等. 地理信息系统中水文数据模型的研究与探讨[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2): 32-34.
- [15] 陈华, 郭生练, 熊立华, 等. 面向对象的 GIS 水文数据模型设计与实现[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 556-563.
- [16] 陈晋, 史培军, 李京. 时空一体化数据的 TGIS 设计的初步探讨[J]. 环境遥感, 1995, 10(2): 143-151.
- [17] GOODALL J, MAIDMENT D, SORENSON J. Representation of spatial and temporal data in Arc GIS[EB/OL]. [2005-07-15]. [Http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro04/index.htm](http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro04/index.htm).

(收稿日期:2005-11-29 编辑:高建群)