

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.002

# 水文模型与 GIS 二元结构集成方法与实现

王船海<sup>1,2</sup>, 杨勇<sup>3</sup>, 丁贤荣<sup>2</sup>, 任立良<sup>2</sup>, 张晓祥<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 从系统论、解析论两个角度出发, 分别剖析水文模型对象与 GIS 对象二元结构的差异, 提出在兼容现有的水文模型与 GIS 的基础上, 以水文模型及其应用需求为主, 以 GIS 为支撑, 构建具有相同地理空间、统一数据结构的双对象结构, 在双对象结构中引入共享体的概念, 解决水文模型对象与 GIS 对象之间交互效率低的问题, 实现了水文模型与 GIS 更加紧密的集成。

**关键词:** 水文模型; GIS; 二元结构共享; 复杂地理对象; 双对象共享体

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)06-0605-05

## Dual-structured hydrological model and GIS integration method and its implementation

WANG Chuanhai<sup>1,2</sup>, YANG Yong<sup>3</sup>, DING Xianrong<sup>2</sup>, REN Liliang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoxiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The difference in the objects of hydrological models and a geographic information system (GIS) were analyzed based on systematology and analytics theories. According to the application requirements of hydrological models, hydrology and geography need to be integrated. Based on integration of current hydrological models and the GIS, a new structure with two object entities of hydrology and geography was built with the same geographical space and database. To improve the low interaction efficiency between hydrology and geography objects, a concept of a share structure body was introduced into this double-object entities structure. Then, the integration between hydrological models and the GIS were realized.

**Key words:** hydrological model; GIS; dual-structure sharing; complex geographic object; double-object sharing body

20 世纪 60—70 年代, GIS 和水专业建模技术独立发展, 而到 80 年代后期, 才开始 GIS 和水文模型的集成研究<sup>[1]</sup>。这种发展一方面是由于 GIS 界渴求提高 GIS 的分析功能<sup>[2]</sup>, 另一方面也是由于水科学研究人员对精确地理信息越来越多的需求<sup>[3]</sup>。

Goodchild 等<sup>[4]</sup>认为, GIS 与水文模型的集成已成为改进 GIS 技术空间分析和建模能力研究的重要组成部分。当前 GIS 的表示方法和分析功能适合于地图图层和几何变换, Gatrell<sup>[5]</sup>将一个隐含的基于经典牛顿力学的绝对空间概念化的方法, 空间通过平面强制进行概化, 这种概化将空间强制为几何索引, 并且时间作为离散的“时间片段(timeslice)”。“时间片段”模型能满足很多研究的需要, 但动态表达方法中断了地理对象的连续性, 可能导致错失时序中所包含的地理事件的连续性, 以及无法完成水文模型的时空建模。因此,

收稿日期: 2012-01-09

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101024); 海洋公益性行业科研专项(200905013-8)

作者简介: 王船海(1963—), 男, 江苏海安人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源及数字流域等研究。E-mail: wangchuanhai@vip.sina.com

支持复杂地理对象及连续地理现象的表达、建模与模拟成为 GIS 研究的热点<sup>[6]</sup>。

Karimi 等<sup>[7]</sup>认为 GIS 与水文模型的集成与基于 GIS 环境的其他建模不相同,主要表现为水专业建模相对于其他专业建模,实践性更强。目前,水文模型发展已经较成熟,模型几乎可以模拟水循环的各个环节,而 GIS 广泛应用于建立各种不同尺度的空间数据库管理和决策支持系统,促使涉水行业和水科学技术的发展愈来愈依赖 GIS 技术。

## 1 国内外研究现状

目前,水文模型和 GIS 集成的表现主要分为 4 种方式<sup>[8]</sup>:(a)GIS 功能嵌入水文模型,如 RiverCAD,HEC-RAS,RiverTools 和 MODFLOW。(b)水文模型嵌入 GIS 平台,如 USACE 的 HEC-SAS,ESRI 的 ArcGIRD。(c)水文模型与 GIS 的松散耦合,多个单独的软件集成,如 GIS 软件包和水文/水利建模程序或者统计软件集成。(d)水文模型与 GIS 的紧密耦合,定制统一的应用程序界面,将多个软件的功能集成在一起。

以上 4 种集成方式都只是单纯的技术驱动,是采用开放简单的接口,以数据形式进行的集成,耦合程度是浅表性的,是数据而不是结构上的集成,因此这类集成方式在结构上存在以下问题:

**a. 时空特征问题。**水文要素的地理空间主要描述水体的运行环境,这些水文要素随着时间不断地变化。这种时空变化特征是水文分析与模拟过程中一个不可缺少的基本条件。而传统的 GIS 侧重于空间数据与属性数据的表达和分析,在时态性方面比较欠缺<sup>[9]</sup>,虽然在多年前就已经提出了时态 GIS 的概念,但近几年此方面进展缓慢。水文模型是偏重于与时间相关的过程性模型,而 GIS 大多解决的是与时间无关的地质模型问题,这就严重阻碍了两者之间的集成。

**b. 拓扑关系问题。**矢量 GIS 中的拓扑是一个严格、基础的概念。拓扑是研究地理实体在空间上如何关联的重要基础。GIS 中,地理数据主要由定位特征数据、属性特征数据和拓扑特征数据等 3 种数据类型组成,其中定位特征数据与拓扑特征数据归为空间特征数据,所以拓扑关系是 GIS 中不可缺少的一部分,它记录了各对象相互之间的空间结构关系。

拓扑关系水文数据模型是以“结点-弧段-多边形”拓扑关系为基础的数据模型。传统的 GIS 拓扑关系表达方法在常规的地理信息表达方面有着较好的应用。但水文是一个专业性较强的领域,它所研究的对象往往是一些复杂的地理对象,如堤线、一般地形区域、河道地形区域等。这些复杂的地理对象是由很多简单的 GIS 对象(点、线、面)组成,它们内部有着自身特定的拓扑关系,如上下游断面位置。如果以传统的 GIS 拓扑关系,即对线等简单 GIS 对象记录起始点及左右多边形的方法来描述水文中的复杂 GIS 对象,工作将相当繁琐,难以完成复杂的水文分析<sup>[10]</sup>,所以解决水文模型中复杂对象的拓扑关系非常重要。

**c. 二、三维地理对象表现一致性问题。**现行的二维 GIS 中已有成型的标准数据结构,如点、线、面、栅格、TIN 等。真实的地理对象结构通过标准数据结构进行组合,三维 GIS 中关于地理对象的表达方面目前还没有一个一致认可的基本结构表述模型<sup>[6]</sup>,更谈不上二、三维地理对象结构表述的一致性问题,而对于二、三维地理对象表述一致性问题,实际上是二、三维 GIS 的融合集成问题。

**d. GIS 地理分析功能不足问题。**GIS 地理分析功能不足制约 GIS 应用发展最主要的因素。GIS 在地质学统计分析模型方面功能完善。地质学统计分析模型是指:数字高程模型、空间统计分析模型、路径分析模型、地形特征值提取模型、缓冲区分析模型、叠置分析模型等,这些模型均是非过程性静态模型,对于这些模型目前的 GIS 处理比较完善;但 GIS 在处理过程性动态模型(如水文模型)方面能力不足,这就是所谓的时态 GIS 相关的问题,而过程性动态模型是目前 GIS 应用的关键,流域管理模型中的主要模型均是过程性动态模型。GIS 只有解决了过程性动态模型的应用问题,才能解决 GIS“用”的问题,才能扩充 GIS 的分析能力。

笔者认为造成 GIS 模型与水文模型无法有效集成的根本原因还是在于它们的基本时空概念不同,GIS 时空概念基于拉格朗日运动观,而水文模型的时空概念主要基于欧拉运动观,兼备拉格朗日运动观,两者空间数据表达模式不同。朱雪芹等<sup>[11]</sup>提出水文模型和 GIS 集成的“高层次共实体”的概念,基于此概念框架,研究运用面向对象技术实现 GIS 环境下的互操作。

## 2 水文模型与 GIS 模型的二元方法论

GIS 时空概念基于拉格朗日运动观<sup>[11]</sup>。Goodchild 等<sup>[4]</sup>的地理信息科学的学科,新型地理概念的模型、

地理概念的计算实施和信息社会的地理 3 个核心要素,从理论上论证了目前 GIS 中关于基于拉格朗日运动观的时空概念,对于基于地理信息科学的水文建模的研究很重要,但无法解决基于欧拉运动时空概念观的过程性模型(如流域水文模型)的问题。

流域水文模型的时空概念主要基于欧拉运动观,兼备拉格朗日运动观<sup>[11]</sup>。如用水文模型分析计算某一河段的洪水过程,需要将流域的降雨、蒸发、土壤水、地下水、河道径流等的时空分布及其相互转换相关参数,产汇流计算的过程与结果符合水量平衡和能量平衡原理<sup>[12]</sup>。从地理对象角度,降雨、蒸发、土壤水、地下水、河道径流属于不同类型的地理对象,每个对象都不是简单的地理对象,每种转换关系都不是简单的地理关系。简单地理对象、简单地理关系可赋予一个均值,而复杂地理对象及关系是非均值。

GIS 模型的数据结构属于空间对象并联式离散结构,水文模型结构属于地理对象串、并联混合式有机整体结构<sup>[13]</sup>。在讨论 GIS 模型与水文模型集成问题方面,本文将 GIS 模型与水文模型之间不同的模型对象结构称为二元结构。

### 3 二元结构共享理论基础

在解决具体流域地理空间问题时,水文模型对象与 GIS 对象是一个问题的两个方面,只是两者的服务目的、关注的问题、解决的方法均不同,各自数据要求不同。但两者共同关注的地理对象是相同的,如流域、水系、地形等。

水文模型对象与 GIS 对象绝大部分具有空间、对象、基本数据结构均相同的特征,即水文模型与 GIS 的对象具有重合性,如图 1 所示。但水文模型对象需要在基本数据结构的基础上进行系统重组。对象的可重合性是水文模型与 GIS 信息需要并可以结合在一起的理论基础。因此,笔者认为水文模型与 GIS 可共建一个复杂 GIS 对象共享体,即公共的复杂 GIS 对象体。复杂 GIS 对象具有空间特征与地理过程的复合属性,而且是由系列基本 GIS 对象有机组合而成。其基本 GIS 对象的空间信息通过普通 GIS 和专业 GIS 获取,但其水文地理特性是通过水文监测或模型计算赋予的,所以 GIS 具有地理过程机理分析属性,水文模型具备地理空间关系分析与表达能力。这与朱雪芹等<sup>[11]</sup>的水文模型和 GIS 集成的“高层次共实体”概念的展望一致。



图 1 GIS 模型对象结构与水文模型对象结构存在重合部分

Fig. 1 Overlap of GIS model object structure and hydrological model object structure

### 4 二元结构共享体

基于水文模型与 GIS 在结构上具有重合性的客观现实以及构建复杂 GIS 对象共享体的可行性,笔者认为要跨越水文模型与 GIS 二元结构信息交互的鸿沟,需要构建水文模型与 GIS 之间公共的复杂 GIS 对象,其技术路线为在兼容现有的水文模型与 GIS 结构的基础上,以水文模型及应用需求为主,以 GIS 为支撑,构建相同地理空间的双对象二元结构共享体。双对象是指 GIS 对象与水文模型对象,其模型的系列信息结构保持一致,以保证 GIS 对象与水文模型对象二者之间的信息交互与共享。

如图 2 所示,在 GIS 对象中引入水文模型对象簇系列,形成新的双对象二元结构共享体,共享体既包括原来的 GIS 对象,又包括水文模型对象,因此能与单独的某一类数据进行交互。由于不同水文模型对 GIS 对象的需求不同,可以通过不同 GIS 对象与不同水文模型对象重组实现一一对应的关系。

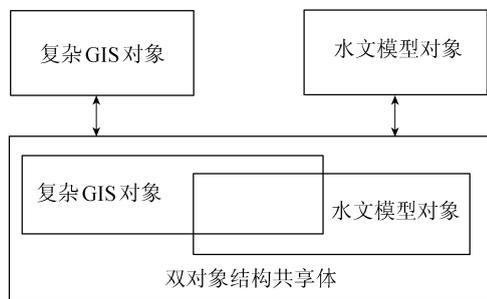


图 2 双对象二元结构共享示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double-object structure sharing

虽然 GIS 对象与水文模型对象的数据结构通过一一

对应的形式实现集成,但两者的数据结构大部分不一致,依旧无法解决两者信息交互高效、流畅的问题。所以在构建一一对应二元结构共享体时还要分析2个对象的数据结构,重新定义两者共用的统一数据结构,实现GIS对象与水文模型对象的集成。

笔者认为双对象二元结构共享体具有2个特征:(a)在共享体内部2个对象簇系列间的对象一一对应;(b)共享体两者通过相同的数据结构实现合二为一。由本文可知,流域管理模型中的过程性动态模型(如数字水文模型)是基于欧拉运动观的时空概念,因此,运用二元结构共享体可以使GIS在2种不同的时空运动观(拉格朗日运动观与欧拉运动观)概念之间共享并兼容。

## 5 构建二维河道共享体

河道二维模型相应的GIS对象主要要求能够反映河道二维曲线网格信息并通过该二维曲线网格信息查询河道二维模型计算成果。成果主要包括:节点水位、节点水深、流速矢量、断面流量等水力要素信息。

作为GIS对象的河道二维模型需要表现的有:河道的区域边界、垂直水流方向的线、平行水流方向的线、节点地形高程、对象要素的颜色及宽度等属性。在水文模型计算中,需要河道二维模型对象的边界线、网格编号、节点地形高程、节点水位、节点流速( $u, v$ )及模型计算所需的基本网格派生的计算参数。

通过分析得到GIS与水文模型都需要河道的区域边界、垂直水流方向的线、平行水流方向的线、节点地形高程等信息。如表1所示,复杂GIS对象共享体一般分为3个部分:(a)GIS对象与水文模型对象共同需要的数据结构;(b)GIS对象表现必须的基础数据结构;(c)表现模型计算成果的数据结构。

图3为河道二维模型对象共享体数据结构构建流程。通过分析河道二维GIS与水文模型的特征,在兼容两者模型结构的基础上,以河道的二维水文模型应用需求为主,以二维GIS对象模型为支撑,构建相同地理空间的双对象二元结构共享体。

从河道二维共享体参数以及构建流程可见,在河道二维GIS对象中,如果采用点、线、面组合形式非常复杂,而在共享体中通过二维数组就可以方便地将河道二维网格信息、节点水位、节点流速( $u, v$ )及节点间的拓扑关系表达清楚。

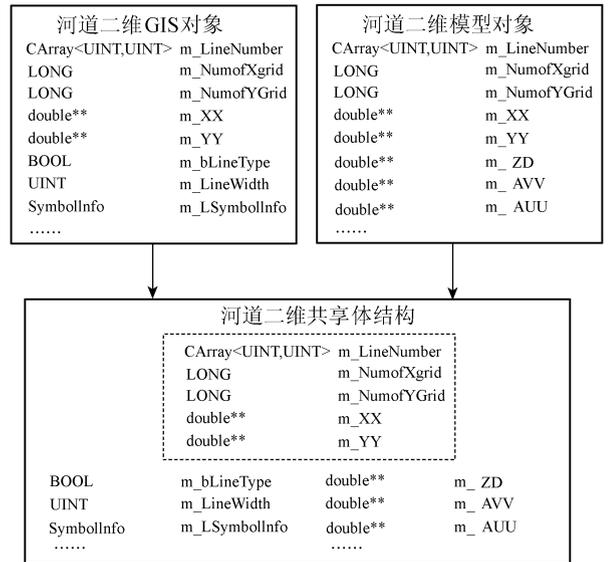


图3 河道二维共享体构建流程

Fig. 3 Construction process of two-dimensional river model double-object structure sharing body

表1 河道二维模型部分参数

Table 1 Parameters of two-dimensional river model

变量类型	变量名称	变量信息	分类
CArray<UINT,UINT>	m_LineNumber	区域边界的多连通边界信息	共用
LONG	m_NumofXGrid	X方向上网格的总数目	共用
LONG	m_NumofYGrid	Y方向上网格的总数目	共用
double**	m_XX	存放网格X坐标	共用
double**	m_YY	存放网格Y坐标	共用
double**	m_ZD	网格节点地形高程	共用
double**	m_AVV	流速v节点变量	模型对象
double**	m_AUU	流速u节点变量	模型对象
double**	m_TZZ	水位z节点变量	模型对象
double***	m_CTT	浓度场的变量	模型对象
BOOL	m_bLineType	线要素的类型	GIS对象
UINT	m_LineWidth	线要素的宽度	GIS对象
SymbolInfo	m_LSymbolInfo	线要素的样式	GIS对象

基于双对象二元结构共享体的设计方法,构建二元结构共享体,将模型对象与GIS对象一一对应,实现了GIS与水文模型的集成。二元结构共享方法已成功运用到生产实践中,河海大学数字流域系统就是基于这一设计思路研发而成,该系统已在太湖、淮河等流域得到广泛运用。河道二维模型在数字流域系统中的效果见图4。

## 6 结 语

二元结构共享方法的核心在于共享体,共享体内部强调GIS对象与模型对象的一一对应,实现了将拉格朗日运动观与欧拉运动观2种不同的时空概念在共享体中兼容与共享;共享体使地理对象与与之对应的水文模型对象具有相同的数据结构,解决了两者间交互效率低的问题。运用二元结构共享方法设计研发的数字流域系统在太湖、淮河等流域的生产实践中得到了广泛应用。因此,二元结构共享方法可以实现水文模型与GIS更加紧密的集成,是实现GIS模型化与水文模型GIS化行之有效的办法。

### 参考文献:

- [ 1 ] WESTERVELT J. 流域管理的模拟建模[M]. 程国栋,李新,王书功,译. 郑州:黄河水利出版社,2004.
- [ 2 ] FOTHERINGHAM A S,ROGERSON P. Spatial analysis and GIS[M]. London:Talyor & Francis,1994.
- [ 3 ] SINGH V P,FIORANTINO M. Geographical information systems in hydrology[M]. Dordrecht, Netherlands:Kluwer Academic Publishers,1996:56-74.
- [ 4 ] GOODCHILD M,HAINING R,WISE S. Integrating GIS and spatial data analysis:problems and possibilities[J]. International Journal of Geographical Information Systems,1992,6:407-423.
- [ 5 ] GATRELL A C. Concepts of space and geographical data[M]//MAGUIRE D J,GOODCHILD M F,RHIND D W. Geographical Information Systems:Principles and Applications. London:Taylor & Francis,1991:119-134.
- [ 6 ] 俞肇员. 基于几何代数的多维统一-GIS数据模型研究[D]. 南京:南京师范大学,2011.
- [ 7 ] KARIMI H A,HOUSTON B H. Evaluating strategies for integrating environmental models with GIS:current trends and future needs[J]. Computers,Environment,and Urban Systems,1996,20:413-425.
- [ 8 ] SUI D Z, MAGGIO R C. Integrating GISwith hydrological modeling: practices, problems, and prospects [J]. Computers Environment and Urban Systems,1999,23:33-51.
- [ 9 ] 杨军耀,王哲,王铭,等. 水资源管理时态GIS时空数据模型研究[J]. 科学之友,2011(22):6-7. (YANG Junyao,WANG Zhe,WANG Ming,et al. Study of spatio-temporal data model of water resources management[J]. TGIS,2011(22):6-7. (in Chinese))
- [ 10 ] 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,2001,12(4):560-568. (WAN Hongtao,ZHOU Chenghu,WAN Qing,et al. Integration of geographical information system technology and hydrological model [J]. Advances in Water Science,2001,12(4):560-568. (in Chinese))
- [ 11 ] 朱雪芹,潘世兵,张建立. 流域水文模型和GIS集成技术研究现状与展望[J]. 地理与地理信息科学,2003,19(3):10-13. (ZHU Xueqin,PAN Shibing,ZHANG Jianli. Review of the integration of watershed hydrological model and geographic information system[J]. Geography and Geo-Information Science,2003,19(3):10-13. (in Chinese))
- [ 12 ] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006.
- [ 13 ] 王船海. 数字流域二元结构体系与原型实现[D]. 南京:河海大学,2007.

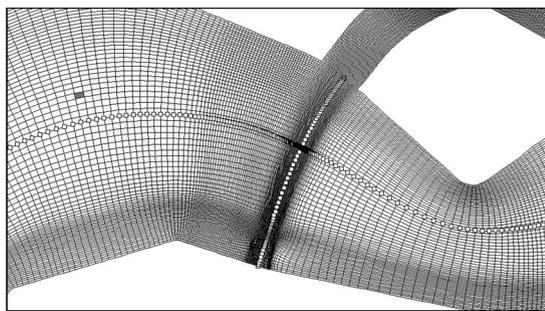


图4 河道二维模型对象共享体效果图

Fig. 4 Rendering of two-dimensional river model object sharing body