

Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型研究综述

崔素芳¹, 张保祥², 崔峻岭³, 潘英华⁴, 张振华⁴, 吴泉源⁵, 衣华鹏⁴

(1. 山东农业工程学院国土资源与测绘工程系, 山东 济南 250100;
2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014; 3. 青岛市水文局, 山东 青岛 266071;
4. 鲁东大学地理与规划学院, 山东 烟台 264025; 5. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014)

摘要: 由于目前在地表水与地下水的联合模拟研究中备受青睐的 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型能否应用于水文模拟尚缺少实证性研究, 通过查阅大量文献资料, 分析这两个水文数据模型的功能和优点, 以及存在的问题和未来发展趋势。指出 Arc Hydro 模型虽然具备强大的水文分析与提取功能, 但其本身并不能实现水文模拟, 必须与独立的水文模型利用数据交换来完成水文模拟; Arc Hydro Groundwater 模型虽然包含 MODFLOW 分析模型, 但只能对 MODFLOW 模型输出的结果进行可视化处理, 目前还不具备独立的地下水模拟功能。认为地表水与地下水联合模型与 GIS 耦合集成平台的开发将是未来研究的热点。

关键词: 水文数据模型; Arc Hydro; Arc Hydro Groundwater; 云架构; 水文分析; 综述

中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)04-0089-06

Review on research progress of Arc Hydro and Arc Hydro Groundwater hydrological data model// CUI Sufang¹, ZHANG Baoxiang², CUI Junling³, PAN Yinghua⁴, ZHANG Zhenhua⁴, WU Quanyuan⁵, YI Huapeng⁴ (1. Department of Land, Resources and Surveying Engineering, Shandong Agricultural and Engineering University, Ji'nan 250100, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China; 3. Hydrological Bureau of Qingdao, Qingdao 266071, China; 4. Institute of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China; 5. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Arc Hydro and Arc Hydro Groundwater hydrological data model are favored by scholars in the joint simulation of surface water and groundwater, but empirical researches on whether hydrological simulation can apply Arc Hydro and Arc Hydro Groundwater model are lack. According to this problem, the functions and advantages of these two hydrological models were analyzed, furthermore, the remaining problems and the development trend were also discussed by a review of a large number of documents. It is pointed out that although Arc Hydro has function of strong hydrological analysis and extraction, this model cannot realize hydrological simulation, data exchange is necessary to complete hydrological simulation with independent hydrological model. Arc Hydro Groundwater contains MODFLOW analysis model, however, it only can visualize process for MODFLOW model outputs and does not yet have independent groundwater simulation function. The development of integrated platform combining joint simulation model of surface water and groundwater with GIS coupling is supposed to be a hot research.

Key words: hydrological data model; ArcHydro; Arc Hydro Groundwater; cloud architecture; hydrological analysis; review

自从 20 世纪 70 年代 GIS 出现在水文模型中以后^[1-2], 随着计算机技术和数字化信息技术的迅猛发展, 其已成为流域水文模拟的重要工具^[3-4]。虽然 GIS 在水文水资源信息处理上具备较强的数据存

储、管理和输入输出功能, 但在准确表达地理空间水文对象特征以及水文现象空间分析和支持决策等方面还存在着巨大缺陷, 如各种数据库系统存储格式存在差异, 输入输出数据格式并无统一标准格式支

基金项目: 国家自然科学基金(41371395); 水利部公益性行业科研专项(201301089); 科技部国际科技合作与交流专项(2007DFB70200)
作者简介: 崔素芳(1981—), 女, 讲师, 博士, 主要从事地图学与地理信息系统研究。E-mail: cuisufang1981@163.com
通信作者: 吴泉源(1959—), 男, 教授, 博士, 主要从事地图学与地理信息系统研究。E-mail: wqy6420582@163.com

持等,给系统集成带来了很大困难^[5-8]。因此,如何将不同类型的 GIS 数据和水文水资源数据、地理空间水文数据等更好地集成起来已成为水文水资源领域的重要研究任务。随着 GIS 在水文水资源领域的应用,迫切需要对水文地理空间数据和其他水资源信息进行规范化和标准化,构建一个通用的水文地理空间数据库的基础框架。

长期以来,国内外学者对地表水和地下水运动过程分别进行了模拟研究,近年来也出现了一些地表水、地下水耦合模型,如 SWATMOD^[9]、GSFLOW^[10]、MODHMS^[11]等。Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型基于 Arc GIS 创造了一种表达水资源数据的新方式,它具备水文数据和水资源建模与决策方法的数据结构,使水文水资源模型和信息系统与 GIS 更加紧密地耦合在一起,并且提供了一种管理各种水文信息的规范格式,有利于实现复杂水文系统的模拟与分析,实现水文水资源模型和信息系统与 GIS 的紧密结合^[12-14],而且能够方便地将地理数据、水文数据和水资源模拟同决策过程联系起来,在一定程度上克服了耦合与集成模型的缺点,为流域信息的管理和流域水文现象的模拟奠定了基础。国内目前主要是将 Arc Hydro 水文数据模型和工具集应用到特定流域以论证其在流域水资源管理中的可行性,能否将 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型应用于水文模拟尚缺少实证性研究,本文通过对 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的分析,指出这两个水文数据模型的功能和优点,以及存在的问题和未来发展趋势。

1 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型简介

1.1 Arc Hydro 水文数据模型

Arc Hydro 水文数据模型由美国德克萨斯州奥斯汀大学水资源研究中心分校和美国环境系统研究所(ESRI)于 1999 年开始合作设计,2003 年基于 Arc GIS 环境的 Arc Hydro 水文数据模型以及相应的 Arc Hydro Tools 得以成功开发。

Arc Hydro 水文数据模型的构建思路为在基于行为的数据模型上集成基于存储的数据模型,既能描述水文要素,又能描述水流运动,数据模型基于面向对象的思想,将要素、空间单元等作为对象,很好地将对象的属性和行为结合在一起,表达流域系统的结构,将不同对象的属性特征进行分析处理,记录各要素之间的联系,实现了最接近流域现实的水文模拟。

Arc Hydro 水文数据模型是一个时空地理数据

模型,旨在为区域水资源研究提供一个不考虑空间尺度的通用数据框架,可以通过增加某个特定任务或应用程序所需的数据库结构和功能进行扩展,为海量流域数据提供有效的存储框架。它主要由水文地理要素集、流域要素集、河槽要素集、几何网络要素集和时间序列对象集五大部分组成,其中几何网络要素集是数据模型的骨架。Arc Hydro 水文数据模型的工具集可以方便、高效地提取地理数据,从而节省采集地理数据所需的时间,进而高效地支持水文模型的模拟。另外,Arc Hydro 水文数据模型还包括分析图和术语表,分析图的主要功能是帮助使用者更清晰地了解数据的框架;术语表的主要功能是让使用者对水文模型中的概念有统一的认识。

1.2 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型

Arc Hydro Groundwater 水文数据模型最早于 2003 年在美国德克萨斯州奥斯汀大学水资源研究中心分校进行讨论和初步设计,由 ESRI 与美国杨伯翰大学环境模型实验室(AQUAVEO)共同开发。2007 年,在 ESRI 用户大会上发布了 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型。2009—2010 年, Arc Hydro Groundwater 水文数据模型对外发行。

Arc Hydro Groundwater 水文数据模型可用于实现各类水位图、水质图、流向图的创建与制作;创建、归档和可视化 MODFLOW 模型;创建和可视化二维、三维地质模型,实现水文专题数据的存储与分析。主要功能包括:地下单元分析、MODFLOW 分析和地下水分析。该模型对应的 Arc Hydro Groundwater Tools 可以帮助用户导入、编辑和管理地下水数据并储存在 Arc Hydro Groundwater 的地理数据库中,此外,还可以对地下岩层数据进行地理配准。

2 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型功能及优点

2.1 模型功能

2.1.1 Arc Hydro 水文数据模型

Arc Hydro 水文数据模型已开发了 5 个版本,目前最高版本为 Arc Hydro 2.0。Arc Hydro 水文数据模型操作工具均集成在 Arc Hydro Tools 菜单中,Arc Hydro Tools 的许多功能需要 Spatial Analyst、3D Analyst 等 Arc GIS 中的空间分析扩展模块的支持。Arc Hydro Tools 的主要功能为:①地形预处理(terrain preprocessing),通过对输入的 DEM 进行预处理,为水文分析提供基础数据。②地形形态分析(terrain morphology),通过分析原始的非树状图流域结构模型,计算汇流区的平均高程、流域面积和流

量曲线,生成三维边界线,计算边界线截面的宽度、周长和横剖面面积,产生汇流区间连通性的信息。③流域处理(watershed processing),在地形预处理的数据基础上,实现流域划分、流域特征提取等功能。④网络分析(network tools),生成水文几何网络和水文逻辑网络,定义网络中的水流方向。⑤属性处理(attribute tools),结合已有的几何网络,对流域特征进行定量分析并赋值,对水文要素更新 Hydro ID,建立水文要素间的连通性,网络关联要素属性,计算要素属性的各类统计量,显示多种相关图等。⑥管理工具(AP utilities),设定处理结果储存路径,分配要素唯一标识码,管理要素 Hydro ID 值和 Arc Hydro 工程基本属性。

应用 Arc Hydro Tools 可以完成以下任务:①由矢量和栅格数据源生成和填充 Arc Hydro 地理数据库;②建立核心的空间层之间的关系;③对上游和下游水流路径进行追踪;④执行水资源功能区划,如流域划分和鉴定;⑤建立节点连接的水文模式;⑥使用 XML 数据交换框架实现数据与外部模型的连接。

2.1.2 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型

Arc Hydro Groundwater 水文数据模型基于地表水和地下水数据模型所共享的 Arc Hydro 框架,可以根据需要在框架内添加地下水和地表水组件或开发新的组件。Arc Hydro Groundwater 水文数据模型已开发了 10 个版本,目前最高版本为 Arc Hydro Groundwater 3.2.0。Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的主要功能主要包括地下单元分析、MODFLOW 分析和地下水分析。地下单元分析可以创建和可视化二维、三维地质模型,分类和可视化钻孔记录,创建和编辑横剖面以及产生三维剖面体。MODFLOW 分析可以在 Arc GIS 中创建、归档和可视化 MODFLOW 模型,也可在 Arc GIS 中导出和运行 MODFLOW 模型。地下水分析可以导入各种类型的数据集(如井、时间序列、横剖面)到 Arc Hydro Groundwater 地理数据库中,管理关键属性并显示数据,在 Arc Map 和 Arc Scene 中管理图层,创建水位、水质和流向地图。

2.2 模型优点

Arc Hydro 水文数据模型基于面向对象的思想建立数据库,与单一的地下水、地表水模型或地表水与地下水耦合模型相比,具有以下优点:①高度的同源性和数据结构的共享性。Arc GIS、Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 都是 ESRI 公司研发的产品,克服了目前国内水文信息共享机制不健全,共享技术不成熟,技术标准不统一、不完善,缺少合适的信息共享平台等问题^[15-18],实现了水文模型和 GIS 的

紧密耦合,模型创建的所有阶段在同一环境下完成,大幅度提高了模型数据分析与决策的效率。②统一存储。Arc Hydro 水文数据模型从不同的数据源中获取各种要素,分门别类统一存储在数据库中,摒弃了分片存储和空间分离的缺点。③利用几何网络实现了 GIS 网络分析功能。Arc Hydro 通过已有要素生成几何网络,并且利用 GIS 的网络分析功能,设置水的流向,进行流向分析、汇流分析等。④实现更为丰富的空间拓扑关系。Arc Hydro 水文数据模型通过拓扑关系定义要素间的相邻关系,详细描述某要素在相关要素被移动、改变或删除时所发生的行为,能方便定位或检查有关的要素。⑤加强了数据库中的对象间逻辑关系。赋予要素 Hydro ID 值,建立关系类,表达各要素之间、对象类之间或要素类与对象类之间的关系,让现实中的关系更加准确地在地表数据模型中得到反映。⑥数据录入与编辑更加精确。通过阈值控制和智能化的校验行为,减少数据录入和编辑的错误。使用 Arc Hydro 工具集可以自动提取流域物理结构、河网结构、断面等数据,为数据的获取节省了大量的时间。

3 Arc Hydro 与 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的应用

自 Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型发布以来,已在洪水演进模拟、河流网络分析、流域数据管理、流域水资源数据库构建、不同区域水文模型建立等方面发挥了重要的作用。Bourne 等^[19]通过增强的 Arc Hydro 数据库架构,自定义了一套数据库管理、可视化以及决策支持工具的集成系统。Graham 等^[20]将 Arc Hydro 水文数据模型用于佛罗里达州 5 个水管理区域内的诸多水资源项目,如防洪、水质和供水管理以及自然系统保护计划中。Thompson 等^[21]使用 Arc Hydro 水文数据模型划定研究流域并提取每个流域的模型参数,得到较满意的结果。加拿大测绘局建立了河流数据共享平台,采用 Arc Hydro 水文数据模型构建水网模型,用户不仅能够查看与下载水利专题数据,还能够进行在线的河流网络分析。

凭借 Arc Hydro 水文数据模型强大的水文分析功能,国内学者也逐步将该模型应用到区域水资源研究中。主要应用于以下几个方面:

a. 构建流域水资源数据库。易卫华^[22]基于 Arc Hydro 水文数据模型构建了宛川河流域水文数据库,实现了宛川河流域空间整体性的水文连接,为国内流域信息合理组织存储提供了范例。林时君等^[23]基于 Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 水文

数据模型的数据整合理念,构建了香日德河流域的水资源地理数据库,为该流域的科学管理和决策提供支持。陈榕等^[24]基于 Arc Hydro 水文数据模型,将水文及空间地理数据组成一个有机的整体,更加真实地展现水文现象的时空特性,为数字化流域管理等奠定基础。

b. 建立不同区域的水文模型。常占锋等^[25]在中国西北尤其是河西走廊一带,基于 Arc Hydro 水文数据模型,通过分析灌区中各种要素特征以及它们之间的时空关系,建立灌区水文数据模型。

c. 进行流域水文分析,主要包括数字河网提取、流域及子流域划分、流域连续地表水系的构建以及流域水文特征的自动提取、可视化分析等。黄硕^[26]提出了在水电规划设计中采用卫星遥感影像图提取地形信息并采用 Arc Hydro 水文数据模型进行水文分析的新方法,该方法在实际的工程项目中取得了良好的社会及经济效益。于淼等^[27]基于 Arc Hydro Tools 对辽河流域河网进行自动提取,提取精度总体上符合要求。李金益等^[28]以贵州省平湖流域为例,克服了利用 DEM 和 GIS 构建数字流域的困难,基于 DEM 和 Arc Hydro 利用 burn in 方法构建了岩溶地区连续的地表水系,解决了岩溶地区河道不连续问题。曾红伟等^[29]以洮儿河流域为研究对象,利用 Arc Hydro Tools 及多源 DEM 分析了有(无)河网辅助条件下 3 种初始 DEM 在不同地貌类型中数字河网提取以及流域及子流域划分的准确性,证实了 Arc Hydro Tools 提取河网的精度比 River Tools 等工具更高,提取的子流域面积与量测子流域面积比较接近,准确度较高。石春力等^[30]基于 Arc Hydro 水文数据模型对沙河流域的水文特征进行提取,结果表明:Arc Hydro 水文数据模型在数据管理和可视化分析上优势明显,但其对大型平坦流域的处理效果一般。李勇等^[31]运用 Arc Hydro 水文数据模型对松花江流域的水文信息进行自动提取,并利用图像比对软件 Alike Duplicate Image Finder 对所提取河网与实际河网进行相似度比较,表明 Arc Hydro 水文数据模型提取的松花江流域的河网与实际河网基本一致。康敏捷等^[32]对环渤海地区多尺度的陆源水污染输出分区应用 Arc Hydro Tools 进行地形修复和河道校正,很好地解决了平原地区河网提取及流域提取的问题。钟敏等^[33]利用 Arc Hydro Tools 分别实现了浙江八大水系(除运河流域)的边界提取和流域划分。Scanlon 等^[34]利用 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的 MODFLOW 分析模型开发了模拟美国德克萨斯州爱德华兹含水层地下水利用量的工具。Lindgren 等^[35]利用 Arc Hydro

Groundwater 水文数据模型的 MODFLOW 分析模型模拟了美国德克萨斯州南部爱德华兹含水层的水力传导分布。Islam 等^[36]在美国内布拉斯加州和科罗拉多州利用 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型成功创建了三维钻孔模型。

4 存在问题及未来发展趋势

4.1 存在问题

a. 目前国内研究主要侧重于将 Arc Hydro 水文数据模型和工具集应用到特定流域,论证其在流域水资源管理中的可行性,但对数据模型和工具集的构建理论、两者之间的联系以及如何使用 Arc Hydro 水文数据模型进行辅助水文分析缺乏深入的研究。

b. Arc Hydro 水文数据模型虽然具备强大的水文分析与提取功能,但它本身不能实现水文模拟,必须与独立的水文模型之间利用数据交换来完成水文模拟,用于支持地理时空数据分析。另外,在提取流域出水口时,要求计算机的运行速度比较快,如果计算机的内存较小或者版本较低,都会影响提取速度。

c. Arc Hydro Groundwater 水文数据模型虽然包含 MODFLOW 分析模型,但是只能对 MODFLOW 模型输出的结果进行可视化处理,本身还不具备独立的地下水模拟功能。

4.2 发展趋势

a. 目前 GIS 已有的 Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型将地表水和地下水数据模型进行了系统的耦合,而且 Arc Hydro Groundwater 中包含 MODFLOW 模型的扩展模块,未来可以将数据模型与水文模型相结合,从而实现在数据模型基础上的模型数据处理、模型模拟、结果可视化等集成工作。

b. 基于互联网云计算方式的发展,可以充分利用 Arc GIS Online“云架构”的在线资源库,利用 Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 创建的水文数据库及各种成果,协同创建流域水文数据共享应用,建立一个更加完善的流域观测数据库,构建一个真正的流域水文信息系统,更好地集成各种水文水资源数据并提供流域水文数据服务,可随时随地访问数据资源。

c. Arc Hydro 水文数据模型可以与 Arc GIS、Visual Basic、Microsoft Excel、Relational Database (Microsoft Access) 进行数据的相互使用,将有利于开发出更好的水文模型。随着 Arc GIS 版本的不断升级,Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的版本也将不断调整以便与不同版本的 Arc GIS 相兼容,不仅能够提高性能和运行速度,而且功

能将更强大,研究结果也将更加精确。

d. Arc Hydro Groundwater 水文数据模型的开发
虽然晚于 Arc Hydro,但是版本更新快,可将其与其他地下水软件如 GMS 等软件实现数据的共享,进行地下水的模拟,以发挥其在地下水污染治理方面的重要作用。

e. Arc Hydro 和 Arc Hydro Groundwater 水文数据模型提供了管理各种水文信息的规范标准格式。
这种规范标准格式和多途径的水文模型接口为未来水文模型的开发设计提供了成功范例,有助于系统地、有效地进行复杂水文系统的模拟与分析。伴随着 3S 信息技术在水文研究中的应用,地表水与地下水联合模型与 GIS 耦合集成平台的开发,将是未来研究的热点。

参考文献:

- [1] 何延波,杨琨. 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用[J]. 地质地球化学, 1999, 27(2): 99-103. (HE Yanbo, YANG Kun. Remote sensing and geographic information system applied to hydrologic modeling[J]. Geology Geochemistry, 1999, 27(2): 99-103. (in Chinese))
- [2] 赵坤,傅海燕,李薇,等. 流域水文模型研究进展[J]. 现代农业科技, 2009(23): 267-270. (ZHAO Kun, FU Haiyan, LI Wei, et al. Research progress of watershed hydro[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(23): 267-270. (in Chinese))
- [3] 陈华,郭生练,熊立华,等. 面向对象的 GIS 水文水资源数据模型设计与实现[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 556-563. (CHEN Hua, GUO Shenglian, XIONG Lihua, et al. Design and implementation of the object-oriented GIS hydrology and water resource data model[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 556-563. (in Chinese))
- [4] 刘新仁. 数字水文系统建设[J]. 水文, 2000, 20(4): 5-8. (LIU Xinren. Digital hydrology[J]. Hydrology, 2000, 20(4): 5-8. (in Chinese))
- [5] 王光明,梁秀娟,肖长来,等. GIS 技术在水文水资源领域中的应用现状与发展趋势[J]. 吉林水利, 2009(6): 1-5. (WANG Guangming, LIANG Xiujuan, XIAO Changlai, et al. The status of the application of GIS technology in the field of hydrology and water resources and development trend[J]. Jilin Water Resources, 2009(6): 1-5. (in Chinese))
- [6] 刘佳,于福亮,李传哲,等. GIS 在水文水资源领域中的应用进展[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 20-24. (LIU Jia, YU Fuliang, LI Chuanzhe, et al. Application development of GIS in hydrology and water resources[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 20-24. (in Chinese))
- [7] 张建云, DOWLEY A, BRUEN M. 地理信息系统及其在

- 水文水资源中的应用[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 290-296. (ZHANG Jianyun, DOWLEY A, BRUEN M. GIS and its application in hydrology and water resources[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(4): 290-296. (in Chinese))
- [8] 赵军凯,赵庆良,赵秉栋. 地理信息系统及其在水文水资源方面的应用[J]. 天中学刊, 2005, 20(2): 30-32. (ZHAO Junkai, ZHAO Qingliang, ZHAO Bingdong. Geographic information system and its application for hydrology and water resources[J]. Journal of Tianzhong, 2005, 20(2): 30-32. (in Chinese))
- [9] SOPHOCLEOUS M A, KOELLIKER B J K, GOVINDARAJUC R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management; the case of the rattlesnake creek basin in south-central Kansas [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214: 179-196
- [10] MARKSTROM S L, NISWONGER R G, REGAN R S, et al. GSFLOW-coupled groundwater and surface water flow model based on the integration of the precipitation-runoff modeling system (PRMS) and the modular groundwater flow model (MODFLOW-2005) [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2008.
- [11] PANDAY S, HUYAKOM P S. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27: 361-382.
- [12] 甘郝新,吕能辉,罗惠红,等. Arc Hydro 水文地理数据模型及其应用[J]. 人民珠江, 2011(2): 32-36. (GAN Haoxin, LÜ Nenghui, LUO Huihong, et al. Arc Hydro hydrological geological data model and its application[J]. Pearl River, 2011(2): 32-36. (in Chinese))
- [13] 梁钊雄,王兮之. 基于 GIS 与 SWAT 模型集成的水资源管理信息系统设计[J]. 佛山科学技术学院学报, 2009, 27(4): 46-49. (LIANG Zhaoxiong, WANG Xizhi. Design of the water resources management information system based on the GIS and SWAT model integration technology [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2009, 27(4): 46-49. (in Chinese))
- [14] 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): 560-566. (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): 560-566. (in Chinese))
- [15] 朱思蓉,吴华意. Arc Hydro 水文数据模型[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(5): 87-90. (ZHU Sirong, WU Huayi. Introduction of ERSI Arc Hydro data model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2006, 29(5): 87-90. (in Chinese))
- [16] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等. Arc GIS10 地理信息系统教程[M]. 北京:测绘出版社, 2012.
- [17] 邢超,李斌. Arc GIS 学习指南: Arc Toolbox[M]. 北京:科学出版社, 2010.

- [18] 朱星明,章树安,陈蓓玉,等.可持续发展水文水资源信息共享探索及实践[J]. 水利学报,2006,37(1):109-114. (ZHU Xingming, ZHANG Shuan, CHEN Beiyu, et al. Investigation and practice of information sharing for sustainable development of water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 109-114. (in Chinese))
- [19] BOURNE S F, SAM F, ROBERT L, et al. Gwinnett-Arc Hydro: setting the foundation for integrated water resources decision support [C]//Proceedings of the 2007 Georgia Water Resources Conference. Athens: University of Georgia, 2007:102-105.
- [20] GRAHAM W, FOLEY A, MAIDMENT D, et al. Arc Hydro in Florida: core principles and collaboration meeting notes [R]. Florida: University of Florida, 2004.
- [21] THOMPSON D B, CLEVELAND T G. Subdivision of Texas watersheds for hydrologic modeling [R]. Texas: Texas Tech University College of Engineering, 2009.
- [22] 易卫华. 基于 Arc Hydro 数据模型构建宛川河流水文数据库[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [23] 林时君, 贾绍凤. 香日德河流域水资源地理数据库的构建与应用[J]. 广东水利水电, 2010(8): 43-45. (LIN Shiyun, JIA Shaofeng. Xiangride River Basin water resources construction and application of geographic database [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(8): 43-45. (in Chinese))
- [24] 陈榕, 赵庆亮. 基于 Arc Hydro 数据模型的金沙江水文数据库设计及应用[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 8-10. (CHEN Rong, ZHAO Qingliang. Design and application of hydrographic database for Jinsha River based on Arc Hydro data model[J]. Water Power, 2011, 37(2): 8-10. (in Chinese))
- [25] 常占锋, 易善桢. 基于 Arc Hydro-Feature 的数据模型在中国西北灌区中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 76-78. (CHANG Zhanfeng, YI Shanzhen. Application of data model based on Arc Hydro-Feature in irrigation district of Northwest China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(3): 76-78. (in Chinese))
- [26] 黄硕. 水电规划中基于 ASTER/GDEM 和 Arc Hydro 的地形提取及水文分析实用方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [27] 于淼, 陈雪莲. 基于 Arc Hydro Tools 对辽河流域的自动提取[J]. 微计算机信息, 2010, 26(21): 199-201. (YU Miao, CHEN Xuelian. Automatic extraction of Liaohe Basin based on Arc Hydro tools [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(21): 199-201. (in Chinese))
- [28] 李金益, 舒栋才, 梁虹, 等. 基于 Arc Hydro 的岩溶地区数字流域的构建[J]. 水电能源科学, 2010, 28(1): 25-27. (LI Jinyi, SHU Dongcai, LIANG Hong, et al. Construction of digital watershed in Karst region based on Arc Hydro [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(1): 25-27. (in Chinese))
- [29] 曾红伟, 李丽娟, 柳玉梅, 等. Arc Hydro Tools 及多源 DEM 提取河网与精度分析: 以洮儿河流域为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 22-29. (ZENG Hongwei, LI Lijuan, LIU Yumei, et al. Accuracy analysis of multisource DEMs on extracted river networks and drainage basin by Arc Hydro Tools: a case study of Taorhe River Basin [J]. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(1): 22-29. (in Chinese))
- [30] 石春力, 李雪, 孙韧, 等. Arc Hydro 模型在流域水文特征提取中的应用: 以蓟县沙河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 73-80. (SHI Chunli, LI Xue, SUN Ren, et al. Application of Arc Hydro model to extracting hydrological information of Shahe River Watershed [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(1): 73-80. (in Chinese))
- [31] 李勇, 于宏兵, 艾丽娜, 等. Arc Hydro 模型提取流域水文信息及精度分析: 以松花江流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 120-123. (LI Yong, YU Hongbin, AI Lina, et al. Application of Arc Hydro model to extract hydrological information and accuracy analysis: Songhua River Basin as an example [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(6): 120-123. (in Chinese))
- [32] 康敏捷, 栾维新, 王辉, 等. 环渤海陆源水污染输出分区研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 452-456. (KANG minjie, LUAN weixin, WANG hui, et al. Output partition of land-origin water pollution in Bohai Rim [J]. China Sciencepaper, 2013, 8(5): 452-456. (in Chinese))
- [33] 钟敏, 葛莹, 王巍巍. 基于 SRTM DEM 的浙江八大水系特征提取与精度分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 22(13): 6544-6548. (ZHONG Min, GE Ying, WANG Weiwei. Feature extraction and precision analysis of the eight drainages in Zhejiang based on the SRTM DEM [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 22(13): 6544-6548. (in Chinese))
- [34] SCANLON B R, MACE R E, SMITH B, et al. Groundwater availability of the barton springs segment of the edwards aquifer, Texas: numerical simulations through 2050 [R]. [S. l.]: The University of Texas, Bureau of Economic Geology, 2001: 1-99.
- [35] LINDGREN R J, DUTTON A R, HOVORKA S D, et al. Conceptualization and simulation of the edwards aquifer, San Antonio Region, Texas [C]//Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. [S. l.]: ASCE, 2014: 122-130.
- [36] ISLAM M R, JEWETT D, WILLIAMS J R, et al. Calibration of groundwater flow and contaminant transport modeling for Ogallala, Nebraska [C]//Proceedings of the 2nd International Water Resources Engineering Conference. Memphis: ASCE, 1998: 105-110.

(收稿日期: 2016-03-11 编辑: 骆超)