

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.014

GIS 中的通用水文模型数据结构研究

卢家波, 向小华, 李 超, 王志伟

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对水文模型与 GIS 平台数据结构不一致这一数字流域集成的最大障碍,从模型角度研究地理数据与 GIS 融合的标准方法,并设计了标准化地理数据接口和可复用地理数据组件。自定义 GIS 兼容的地理数据结构,解决了 GIS 与水文模型高度集成的时空特征和拓扑结构不匹配问题。以软件工程中常用的组件接口技术为核心方法,提炼水文模型所采用的地理数据共同点。提出 ArcGIS 平台能够接受的模型通用地理数据标准并编列相应的标准接口和组件,推动 GIS 与水文模型紧密耦合的研究与应用。

关键词:水文模型;GIS;模型耦合方法;通用地理数据标准;数字流域平台

中图分类号:TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0089-05

Research on data structure of general hydrological model in GIS // LU Jiabo, XIANG Xiaohua, LI Chao, WANG Zhiwei (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The inconsistency between the hydrological model and the data structure of the GIS platform has been the biggest obstacle to the integration of digital basin. This paper studied the standard method of fusion of geographic data and GIS from the perspective of the model and designed standardized geographic data interfaces and reusable geographic data components. Geographical data structure compatible with GIS was customized to solve the problem of the mismatch between the temporal and spatial characteristics and topological structure of the highly integrated GIS and hydrological model. Using component interface technology commonly used in software engineering as the core method, the common points of geographic data used in hydrological models were extracted. The model general geographic data standards and corresponding standard interfaces and components that can be accepted by the ArcGIS platform were proposed to promote the research and application of close coupling between GIS and hydrological models.

Key words: hydrological model; GIS; model coupling method; general geographic data standard; platform of digital basin

模型作为水文研究工具的重要性已经得到广泛认可,针对水文过程的每个环节目前已经发展了大量模型。“数字流域”的目标是采用数字化手段刻画整个流域,在此基础上模拟流域水文现象、预测水文行为、揭示水文规律、最终服务于流域管理^[1-2]。在现代信息技术基础上,对支撑流域水文多过程模型耦合互馈机制的数字流域体系和方法的研究,必将促进流域水文过程的研究,也能更好地促进“数字流域”这一理念的实践与完善。

由于水文模型所需要的大量信息本质上都与时间和空间相关,因此现代 GIS 成了水文模型资料管理、分析以及存储的最佳工具^[3-4]。随着分布式水

文模型的发展,GIS 与水文模型的紧密集成受到关注^[5-7]。理论层面上,王船海等^[8]在其构建的双对象结构中引入共享体,解决水文模型与 GIS 对象数据交换效率低的问题。Bhatt 等^[9]开发出 GIS 与分布式水文模型耦合框架,提高模型数据集成程度。应用层面上,Bruins 等^[10]基于 GIS 建立水文模型估计古农业梯田的径流量;Rahmati 等^[11]提出子流域自动精确划分 GIS 工具;朱亮等^[12]运用 GIS 技术研究面源污染控制方案;李兰等^[13]利用 DEM、土地利用等地理信息数据构建数字流域水文模型,增强了模型的实用性。水文模型和 GIS 结合能极大提高模型的效率和精度,因此也能够提高水文研究和决策

基金项目:国家重点研发计划(2016YFA0601000)

作者简介:卢家波(1998—),男,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail:1847096852@qq.com

通信作者:向小华(1981—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xxhxiang@hhu.edu.cn

的能力^[14-17]。

水文模型和 GIS 耦合面临的一个最大难题是双方之间的数据传递和交换。模型的数据结构是根据模型自身的需要而设计的,与 GIS 的数据结构并不一致;GIS 采用通用的矢量数据结构,无法适应水文模型的需求。以 ArcGIS 系统为例,虽然其在地理相关领域应用广泛,但其相对封闭的数据结构使之很难做到与水文模型紧密耦合,只能作为水文模型的前后处理工具^[18-21]。从水文模型的角度出发,如果模型数据结构能够完全融入 ArcGIS 等地理信息系统软件中,使得模型和 GIS 完全集成,实现最高效率和最优分析方式,将会有力推动水文模型的发展和应用^[22-23]。

本文的目标是实现以 ArcGIS 为平台的水文模型通用地理数据标准,研究以模型数据视角为核心的 GIS 通用数据标准,实现不同尺度和维度下的模型地理数据标准化接口,以 ArcGIS 平台兼容任意水文模型数据为目标,支撑模型的显示、建模、运行、分析和结果展示。

1 问题的提出

水文模型地理数据能够无缝接入 GIS 平台,并被有效管理是实现数字流域模型框架的首要条件。然而,由于水文模型和 GIS 各自的研究领域目标不同,两者之间均不能较好地适应对方的需求,存在时空特征问题和拓扑结构问题^[24]。一方面,水文模型需要从反演过去到预报未来,是了解水文过程的连续时序模型,其模型地理拓扑表达因人而异,不具有标准性;而另一方面,虽然 GIS 具有水文模型所需的存储、显示及分析地理资料的能力,但几乎所有的 GIS 都不是专为时序模型设计的,多数只能用来分析静态过程而不符合水文模型的需求。

一个较复杂的水文模型地理数据常由多种类型地理单元按照一定拓扑结构组合。以子流域型水文模型为例,其地理数据就包括一定数量的多边形子流域和折线构成的河道,每个子流域包含一条河道,而子流域之间又按照上下游关系形成固定汇流顺序。流域中还存在堤线、湖库、河道地形区域等复杂地理对象,它们内部有着自身特定的拓扑关系。常规方法采用一般 GIS 软件中既有图层之间的组合来代表模型的地理数据,如在 ArcGIS 中分别采用一个面图层和一个线图层来表达子流域型水文模型的地理数据,数据之间上下游拓扑关系采用复杂的字段关联加以维护。然而,这种地理数据管理方式存在两个问题:一是水文模型的地理数据拓扑关系往往由模型编制人员按照某种方式固定下来,模型自身

无法控制 GIS 图层;二是 GIS 中图形的增删将导致模型数据与 GIS 数据对应关系错乱,当模型复杂时维护对应关系极其困难。

2 解决方法

2.1 自定义数据结构

为实现水文模型中地形、子流域、河道、站网、湖库、堤线等地理数据的一体化,本文自定义 GIS 兼容的地理数据结构,实现 GIS 中的地理数据与模型中数据结构的一致化。首先,利用 GIS 对地理数据进行计算单元划分、流域水文特征提取、模型参数获取及空间分析等预处理工作,再以自定义数据结构将多图层单对象管理方式发展为单图层多对象管理方式。这种方式既处理了复杂对象的拓扑关系,实现对地理数据的操作即是对模型对象的修改,又充分利用了 GIS 在流域划分、空间分析等方面的优势。自定义 GIS 兼容的地理数据结构见图 1。

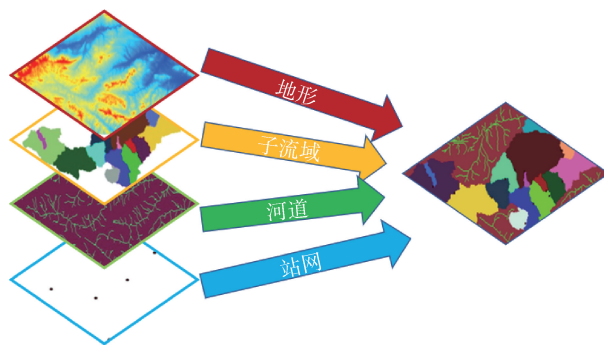


图 1 自定义 GIS 兼容的地理数据结构示意图

Fig. 1 Custom GIS compatible geographic data structure diagram

2.2 模型地理接口及组件设计

流域水文模型中,子流域和河道作为基本单元不可再细分,可以理解为 GIS 中简单的子对象;整体流域在对象的特征之外还需要包容子流域与河道,为集合对象,形成“集合-子对象”拓扑关系。可以将子对象定义为简单对象,其组件接口应具有唯一标识符、名称、地形坐标、参数获取/设置等特性和操作;集合对象除了具有简单对象的特征外,还应具有一个集合接口管理子对象;所有的对象都应该实现微软标准序列化接口方便存取。模型地理对象通用接口和组件设计见图 2。

2.3 数字流域模型框架体系构建

在定义通用地理数据接口后,在逻辑上具备实现 GIS 与模型完全集成的可能,但实现目标还需要有一个数字流域平台实现模型数据录入、模型地理数据显示、动静态计算过程渲染、结果查询与输出、通用辅助组件服务等顶层功能。以 ArcGIS 平台为

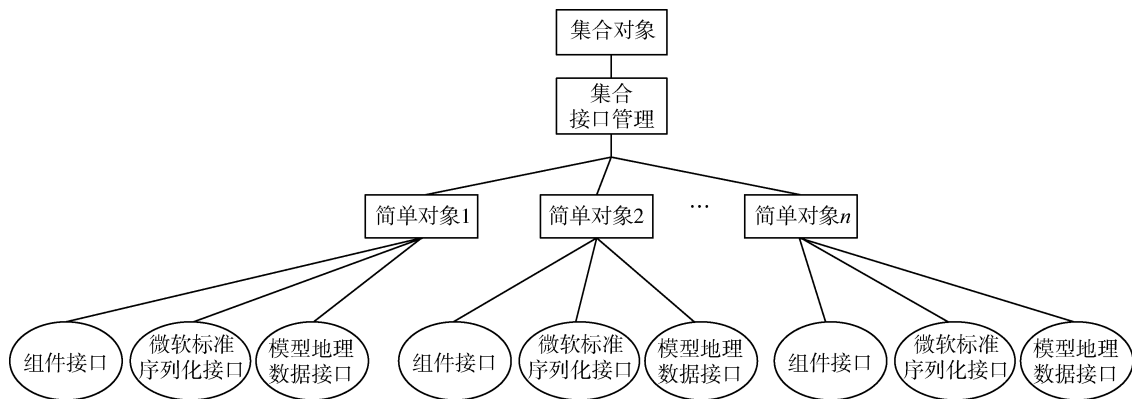


图2 模型地理对象通用接口和组件设计

Fig. 2 General interface and component design of model geographic object

例,由于平台没有直接支持自定义数据的显示模块,因此需要构建平台对自定义数据的显示以及渲染模块。大多数 GIS 平台都以图层为基本的显示单元,在分析 ArcGIS 平台的图层显示方法后,首先可以设计一个自定义的图层来容纳任意类型的模型地理数据,并建立地理数据渲染模块;然后将图层加入 ArcGIS 平台中接受平台的管理和渲染。此设计应作为数字流域模型框架的通用功能,模型编制人员采用较简单的方法即可直接复用。自定义图层及渲染器设计如图 3 所示。

3 数字流域平台示例

分析 ArcGIS 平台关于组件容纳、管理、通信控制的框架,研究能够在 GIS 平台下对未知多过程模型组件进行统一管理、装配、结果存储与展示的数字流域平台,并建立不从属于模型的部分通用组件,如水文站网管理组件、水文序列管理组件、自定义模型可视化渲染组件等,方便外部模型组件直接应用,最终建立支撑模型互馈机制的数字流域模型自由扩展框架。以位于浙江省建德市的寿昌江流域作为

示例。

3.1 ArcGIS 地理数据结构

在 ArcGIS 中,将该流域划分为若干子流域,并利用工具提取河道。子流域划分及河道提取结果见图 4。

打开子流域和子河道图层属性表,可以看到该流域的地理数据结构,见图 5。

子流域和子河道都采用下游标识符 NextDownID 构建拓扑关系,并在子河道属性表中添加流域标识符 GridID 记录该子河道所属流域。ArcGIS 地理数据管理方式存在两个问题:一是水文模型的地理数据拓扑关系按照字段关联方式固定下来,模型自身无法控制 GIS 图层;二是 GIS 中图形的增删将导致模型数据与 GIS 数据对应关系错乱,当模型复杂时维护对应关系极其困难。

3.2 数字流域水文模型数据结构

在水文模型中,通常将一个大流域划分成多个子流域,分块计算出流过程再汇总。为了满足数字流域的构建需求,以面向对象的思想,将 ArcGIS 地理数据结构转化为数字流域水文模型数据结构,把

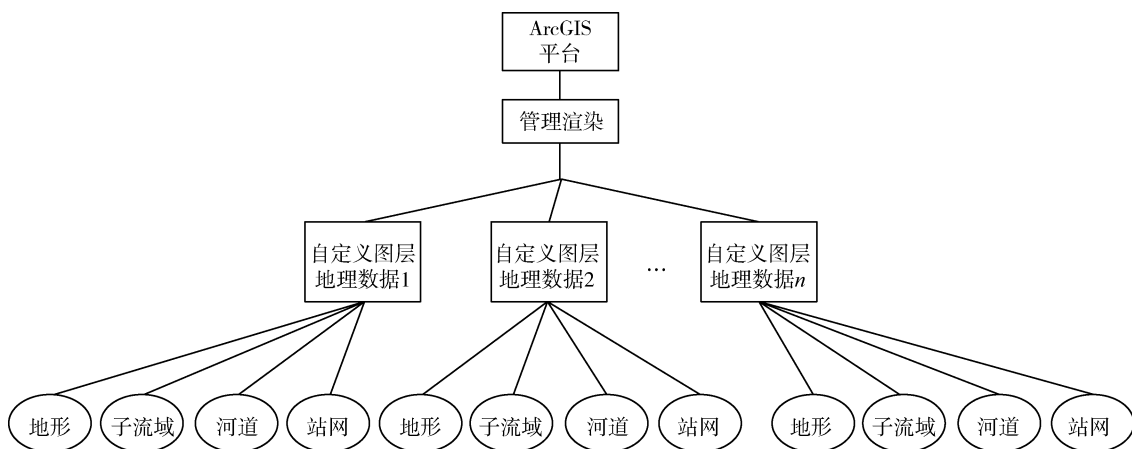


图3 自定义图层及渲染器设计

Fig. 3 Custom layer and renderer design

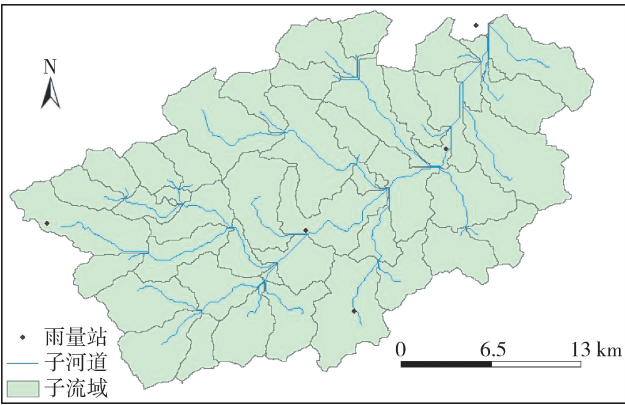


图4 寿昌江流域示意图

Fig.4 Sketch map of Shouchangjiang Basin

HydroID	GridID	NextDownID
32	32	31
68	68	62
46	46	47
36	36	32
88	88	83
73	73	76
37	37	36
71	71	68
56	56	48
44	44	37
75	75	76

(a) 子流域属性表

HydroID	GridID	NextDownID	DrainID
143	32	137	32
145	36	143	36
149	42	150	42
150	37	145	37
151	43	143	43
152	40	155	40
153	41	155	41
154	45	170	45
155	46	170	46
156	44	150	44
160	50	145	50

(b) 子河道属性表

图5 ArcGIS 流域地理数据结构

Fig.5 Watershed geographic data structure in ArcGIS

子流域内地形、河道、站网等数据作为一个整体对象,方便水文建模和数据管理,有效解决 GIS 与水文模型耦合中存在的问题。水文模型数据结构见图 6。

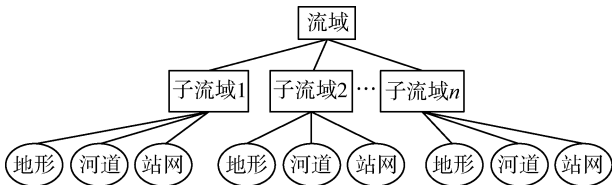


图6 数字流域水文模型数据结构

Fig.6 Data structure of hydrological model in digital watershed

4 结 语

为实现数字流域体系下的流域综合过程模拟,

针对 GIS 与水文模型耦合存在的时空特征和拓扑关系不匹配这两个具体问题,提出了自定义 GIS 兼容的地理数据结构,通过分析目前水文、水动力、地下水等模型的地理数据结构,提炼了各模型内部地理数据之间的关联关系和拓扑关系,探讨了采用软件工程中的组件“包容”“聚合”等技术构建“集合-子对象”包容关系的模型地理数据表达方法,结合 ArcGIS 组件框架抽象出模型地理对象接口,可实现以 ArcGIS 为平台的水文模型通用地理数据标准。

参考文献:

- [1] 张勇传,王乘. 数字流域:数字地球的一个重要区域层次[J]. 水电能源科学,2001,19(3):1-3. (ZHANG Yongchuan, WANG Cheng. Digital valley: an important regional level of digital earth [J]. International Journal Hydroelectric Energy,2001,19(3):1-3. (in Chinese))
- [2] 刘家宏,王光谦,王开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报,2006,37(2):240-246. (LIU Jiahong, WANG Guangqian, WANG Kai. Review on advancement of study digital riverbasin in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(2):240-246. (in Chinese))
- [3] WOJDA P, BROUYÈRE S. An object-oriented hydrogeological data model for groundwater projects[J]. Environmental Modelling & Software,2013,43:109-123.
- [4] AL-SABHAN W, MULLIGAN M, BLACKBURN G A. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW computers [J]. Environment and Urban Systems,2003,27:9-32.
- [5] 杨华容,文路军,彭文甫,等. 基于 DEM 和 GIS 的流域水文信息提取——以巴中市为例[J]. 人民长江,2016,47(8):34-38. (YANG Huarong, WEN Lujun, PENG Wenfu, et al. Extraction of watershed hydrological information based on DEM and GIS: case of Bazhong, Sichuan [J]. Yangtze River, 2016, 47(8):34-38. (in Chinese))
- [6] 陈文龙,张煜,曹波,等. 分布式水文模型与网络 GIS 技术集成的研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(11):49-53. (CHEN Wenlong, ZHANG Yu, CAO Bo, et al. An integration of distributed hydrologic model and web-based GIS technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(11):49-53. (in Chinese))
- [7] PONTES P R M, FAN F M, FLEISCHMANN A S, et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS[J]. Environmental Modelling & Software,2017,94:1-20.
- [8] 王船海,杨勇,丁贤荣,等. 水文模型与 GIS 二元结构集成方法与实现[J]. 河海大学学报(自然科学版),

- 2012,40(6):605-609. (WANG Chuanhai, YANG Yong, DING Xianrong, et al. Dual-structured hydrological model and GIS integration method and its implementation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (6):605-609. (in Chinese))
- [9] BHATT G, KUMAR M, DUFFY C J. A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework [J]. Environmental Modelling and Software, 2014, 62:70-84.
- [10] BRUINS H J, BITHAN-GUEDJ H, SVORAY T. GIS-based hydrological modelling to assess runoff yields in ancient-agricultural terraced wadi fields (central Negev desert) [J]. Journal of Arid Environments, 2019, 166:91-107.
- [11] RAHMATI O, SAMADI M, SHAHABI H, et al. SWPT: an automated GIS-based tool for prioritization of sub-watersheds based on morphometric and topo-hydrological factors [J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10 (6): 2167-2175.
- [12] 朱亮, 刘畅, 陈琳, 等. 基于 GIS 技术的方便水库面源污染控制方案研究 [J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 50-57. (ZHU Liang, LIU Chang, CHEN Lin, et al. Study on control scheme for non-point source pollution in Fangbian Reservoir based on GIS technology [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 50-57. (in Chinese))
- [13] 李兰, 陈攀, 孟洁. 基于 GIS 的 LLCHEN-A 分布式水文模型与水资源预测 [J]. 武汉大学学报 (工学版). 2015, 48(5): 591-598. (LI Lan, CHEN Pan, MENG Jie. LICHEN-A distributed hydrological model based on GIS and water resources prediction [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 591-598. (in Chinese))
- [14] MAIDMENT D R. GIS and hydrological modeling [C]//Environmental Modeling with GIS. New York: Oxford University Press, 1993: 147-167.
- [15] ABEL D J, KILBY P J, DAIS J R. The systems integration problem [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1994, 8 (1): 1-12.
- [16] KOPP S M. Linking GIS and hydrological models: where have we been, where are we going? [C]//HydroGIS 96: application of geographic information systems in hydrology and water resources. Rennes: IAHS Publ, 1996: 13-21.
- [17] DECKMYN J, PANICONI C, GIACOMELLI A., et al. A modular approach to integrated environmental modeling systems incorporating GIS and visualization functionality, CRS4-TECH-REP-96/26 [C]//Proceeding of an International Workshop on New Development in Geographic Information Systems. Milano, Italy: ERIM International, Ann Arbor, 1997: 85-95.
- [18] 李肖杨, 陈亚宁, 刘璐, 等. 博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 53-59. (LI Xiaoyang, CHEN Yaning, LIU Lu, et al. Design and implementation of water resources management decision support system in the Bosten Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 53-59. (in Chinese))
- [19] 高磊, 黄华东, 谈震, 等. 基于 GIS 网格化的河长制信息资源模型 [J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 66-69. (GAO Lei, HUANG Huadong, TAN Zhen, et al. Information resource model of river chief information system based on GIS grid [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 66-69. (in Chinese))
- [20] 李博, 甘恬静. 基于 ArcGIS 与 GAP 分析的长株潭城市群水安全格局构建 [J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 80-88. (LI Bo, GAN Tianjing. Construction of water security pattern of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on ArcGIS and GAP analysis [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 80-88. (in Chinese))
- [21] 成波, 江波, 李红清. 菜子湖湿地生态数据库管理系统的设计与实现 [J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 46-52. (CHENG Bo, JIANG Bo, LI Hongqing. Design and realization of Caizi Lake wetland ecological database management system [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 46-52. (in Chinese))
- [22] 孔祥意, 刘志雨, 周国良, 等. 计算单元边长对分布式流域水文模型模拟结果的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49(4): 309-315. (KONG Xiangyi, LIU Zhiyu, ZHOU Guoliang, et al. Influence of calculation unit size on simulation results of distributed watershed hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 309-315. (in Chinese))
- [23] 殷绪华, 朱亮, 陈琳, 等. ArcGIS 在水源地污染源强度空间分析中的应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46(5): 395-401. (YIN Xuhua, ZHU Liang, CHEN Lin, et al. Application of ArcGIS in the spatial distribution analysis of pollution source intensity in water source [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5): 395-401. (in Chinese))
- [24] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 11-19. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-22 编辑: 彭桃英)