

谭家华. MODFLOW-CFP 软件在岩溶水系统数值模拟应用中的若干关键问题[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 636-647.
DOI: 10.11932/karst20230402

MODFLOW-CFP 软件在岩溶水系统数值模拟应用中的若干关键问题

谭家华

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: MODFLOW-CFP 软件很好地解决了管道流与含水层连续介质地下水渗流的耦合问题以及管道中水流运动的层流-紊流转换问题, 为岩溶管道型地下水系统的定量研究提供了一个适用的数值模拟平台, 近年来也在工程实际中得到了较多的应用。为了更好地利用和推广该软件在岩溶地下水系统定量评价和研究中的应用, 避免新方法在实际应用中的盲目性, 文章结合 MODFLOW-CFP 软件自身的特点、岩溶水系统常见的水循环特征及其在实际应用中存在的一些关键问题, 从地下水数值模拟的基本要求出发, 探讨如何通过一些有针对性且相对比较容易开展的野外岩溶水文地质调查、降雨-流量(水位)高分辨率监测、地下水示踪试验和综合分析研究等工作, 提取 MODFLOW-CFP 模型所需的关键结构要素、水文地质参数以及模型识别的目标函数, 进而提高复杂岩溶水系统地下水数值模型的仿真度和预测精度, 推动岩溶地下水定量研究的发展。

关键词: 岩溶水系统; 数值模拟; MODFLOW-CFP; 模型识别; 仿真度

中图分类号: P641.134 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 04-0636-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

我国碳酸盐岩分布广泛, 尤其在西南山区裸露型碳酸盐岩广布, 岩溶强烈发育, 管道化程度高, 岩溶含水介质存在着高度非均质性, 岩溶管道与裂隙、溶蚀裂隙共存现象十分普遍, 岩溶地下水循环和流动状态十分复杂, 层流、紊流共存; 同时, 由于岩溶山区勘探程度通常较低, 尤其是铁路、公路、水利等线状工程, 水文地质钻探和水位动态等资料相对较缺乏, 总体而言岩溶水定量研究的深度远不如孔隙水。近年来, 随着西部大开发进程的不断推进, 一些交通、水利、能源和矿产开发等地下工程都面临大量的岩溶水资源高效开发利用、岩溶水害防治以及岩溶水

环境保护等实际问题, 急需高精度的地下水定量评价和预测成果的支撑。

岩溶水定量评价一直是岩溶学科领域的难题, 尤其是我国西南以溶蚀裂隙-岩溶管道双重介质为典型特征的复杂岩溶水系统的定量评价, 在理论上存在高度非均质各向异性含水介质及其层流-紊流不同流态的数学描述等困难; 在实际应用中又面临岩溶管道空间展布特征、降雨入渗条件以及模型识别过程中目标函数的选择和确定等实际困难。经过国内外水文地质学家多年来的不懈努力, 岩溶地下水系统数学模型和数值模拟方法得到了快速发展, 如陈崇希 1995 年提出的“岩溶管道-裂隙-空隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法”和之后研发的

资助项目: 铁四院科研资助项目 (2017K021)

作者简介: 谭家华(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文地质工程地质工作。E-mail: 350056332@qq.com。

收稿日期: 2023-03-09

“地下水流模拟系统 PGMS(1.0 版) 软件”等^[1-4], 近年来, 随着 MODFLOW-CFP(Conduit Flow Process) 渗流-管道流耦合模型的出现, 开始运用数值模拟方法开展复杂岩溶含水介质地下水流场的定量研究^[5-17], 这些研究有效推动了岩溶水系统定量研究的发展, 但是在 MODFLOW-CFP 数值模拟软件应用研究中仍然存在一些难点和容易忽视的实际问题, 例如模型边界位置及边界水力条件、降雨入渗补给量、岩溶管道几何参数等条件和参数的确定。为了进一步提高 MODFLOW-CFP 模型的仿真度, 本文先从方法上对 MODFLOW-CFP 数值模型构建、模型识别和模型参数确定过程中的一些关键问题进行了分析阐述, 另外通过实例重点探讨了岩溶槽谷、洼地地貌区降雨入渗补给量、岩溶管道等效直径的确定方法以及模型识别的目标函数的选取等, 供同行参考, 探索岩溶管道系统地下水数值模拟方法的改进, 提高定量评价和预测精度。

1 岩溶水系统数值模拟的难点问题

地下水数值模拟的核心和关键是防止模型失真, 各种数值模拟软件仅是给我们提供了一个平台, 但再好的平台若使用者操作不当就很容易偏离初衷。MODFLOW-CFP 软件在岩溶水系统数值模拟应用中容易导致模型失真的难点和关键点是: 结构模型的构建、目标函数的选择及其代表性、模型边界条件和参数的识别等。

1.1 MODFLOW-CFP 软件原理及特点

美国地质调查局(U.S. Geological Survey)研发的 MODFLOW 软件已在地下水数值模拟领域得到广泛应用, 但是早先的 MODFLOW 版本主要是针对

相对比较均匀的、以层流(满足达西线性渗透定律)为主的地下水数值模拟, 它无法刻画岩溶管道与裂隙、溶隙基岩含水层共存的高度非均质、层流和紊流(非线性渗流)并存的复杂岩溶地下水运动特征。2008 年 Shoemaker^[5]在 MODFLOW 的基础上开发了 MODFLOW-CFP 软件, 其实质是在 MODFLOW 软件中插入能够模拟管道流运动特征的 CFP 模块(图 1), 通过管道边界与基岩含水层之间的水流交换实现了两种运动规律截然不同的含水介质之间的水流运动耦合, 其特点是能够更真实刻画岩溶管道中水流运动特征及其对周边含水层水流运动的影响, 但同时在 CFP 模块中增加了描述岩溶管道的一些特征参数, 如管道的平剖面特征、直径、曲折率、粗糙度等, 这些参数不仅对管道流的流场有重要影响, 同时对周边裂隙-溶隙介质的流场也有重要的控制作用。近年来该软件在岩溶水系统定量研究中得到了快速推广。

1.2 模型范围及边界条件的确定

由前述 MODFLOW-CFP 软件的原理可见, 该软件的基础模型仍然是常规的地下水流模型(MODFLOW), 在地下水数值模拟中模型的范围和边界条件决定了地下水流场和流量的宏观格局, 因此, 在 MODFLOW-CFP 模型构建时模型的范围和边界条件仍然十分重要, 个别地下水数值模型文献中常缺乏对模型范围和边界条件的论述, 甚至随意地截取一个矩形区域就开始建模, 这是极其可怕的。

模型范围与边界条件在实际研究中往往是同步进行的, 它是所有地下水数值模型构建的基础, 这其中边界条件(包括边界的位置以及边界的水力性质)的确定又是核心。模型范围的确定既要考虑模型识别过程, 还要兼顾未来预测, 尤其是对于一些深部的

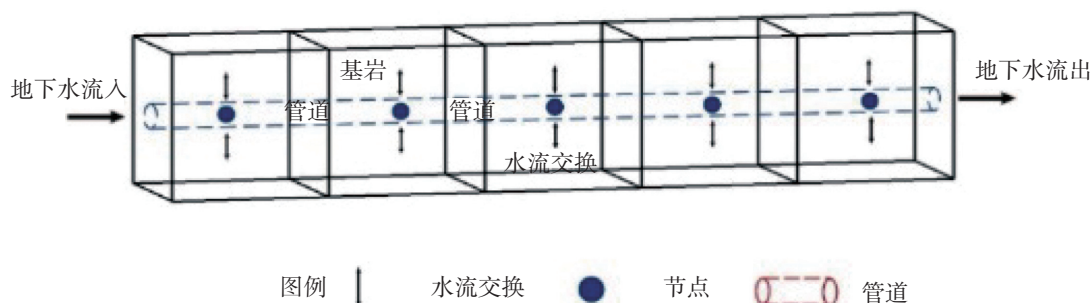


图 1 MODFLOW-CFP 软件原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MODFLOW-CFP software

地下工程,例如深部采矿工程、深埋隧道、硐室开挖等,预测工况的地下水补径排条件可能与天然条件下地下水系统范围差异很大,天然的地下水分水岭会发生偏移、甚至消失,因此,在数值模型构建时首先需要进行分析研究。

总的来说,模型范围的确定原则为:首先应选取一个完整的地下水补径排系统,其次是对系统的边界进行划分,对于分水岭等一类软边界,应考虑工程对地下水系统平衡状态的改变。

1.3 岩溶管道结构特征的确定

由上述 MODFLOW-CFP 的基本原理可知,该数值模拟软件的优势就是它提供了岩溶管道流模拟的模块(CFP),能够更精确地刻画岩溶管道和均匀裂隙、溶隙两者共存情况下的高度非均匀介质地下水的运动规律。建模时它需要提供岩溶管道的几何特征,在其它条件完全相同的情况下,岩溶管道几何特征不同其流场会存在很大差异,因此,岩溶管道的结构特征非常重要。岩溶管道的几何特征虽然是一个非常简单的几何要素,但是在目前科学技术水平条件下,除了人能够进入探测和测量的大型岩溶管道外,很多岩溶管道的几何特征,尤其是管道直径是很难准确获得的,很多模型在岩溶管道结构模型构建过程中对岩溶管道发育特征、影响因素的分析很少,管道直径的取值也比较随意,缺乏论证和敏感性分析及检验。

1.4 水文地质参数的确定

水文地质参数是地下水数值模型识别的核心,目前岩溶水系统数值模拟研究中对渗透系数关注比较多,但是对降雨入渗系数、给水度等参数的关注非常不够,甚至忽略了这些参数对模型识别的影响,众所周知,岩溶地下水水位或流量动态常常呈现出“陡涨陡落”的现象,这其中最主要的原因是降雨入渗补给系数及给水度的时空差异的影响,因此,降雨入渗系数和给水度是不可忽视的重要水文地质参数。

1.5 目标函数的选择

地下水数值模拟中的目标函数一般是指在数值模型调参、识别过程中用于判断模型识别精度的物理量,即数值模型预测的某个物理量随时间和空间的变化函数。比较常用的目标函数如某时刻地下水等水位线(某时刻地下水水位的空间函数)、钻孔地

下水水位动态(某空间点地下水水位的时间函数)、泉水流量动态(某空间点流量的时间函数)、泉水离子浓度曲线(某空间点某离子浓度的时间函数)等,地下水数值模型识别过程中目标函数的选择和确定是十分重要的,目标函数类型越多、变化越大、序列越长,越有利于模型识别精度的提升,虽然岩溶地区整体的勘探程度比较低、钻孔少、地下水水位监测资料缺乏,但是也正是基于这些原因在模型识别过程中更需要去发掘能够用于模型识别和检验的目标函数,提高模型识别的精度,避免模型失真。在 MODFLOW-CFP 模型的识别过程中,岩溶管道不同断面的流量变化过程,地下暗河天窗、竖井的水位动态曲线以及地下暗河的温度、电导率等理化指标都是很好的数值模型识别的目标函数。

2 提高岩溶水系统数值模拟精度的方法

2.1 合理构建水文地质概念模型

在开展地下水的定量研究之前,对研究区水文地质条件的定性认知程度越高越有利于提高定量研究的精度,不应该有依赖软件、依赖计算机的错误思想。对于非均质性更强的岩溶水系统,更需要加强岩溶水文地质调查,以查明岩溶发育和岩溶水循环特征主控因素。通过岩溶发育和岩溶地下水的调查,重点分析研究区岩溶发育和岩溶水循环的时空分布特征及其主控因素,合理构建岩溶水系统的水文地质概念模型和数学模型。

2.2 准确确定岩溶水系统范围及边界条件

在岩溶水文地质调查基础上,对于岩溶管道化程度较高的地区建议尽可能多地开展地下水示踪试验。在查明并验证岩溶地下水来源及途径的基础上,进行岩溶水系统划分和特征分析,为数值模型范围和边界条件的确定提供支撑。

在岩溶水系统模拟范围的确定时建议最好以研究区所在的完整的岩溶含水系统为研究对象,即以岩溶含水系统的自然边界为界,如含(透)水性截然不同的岩性或构造边界、具有稳定补给或排泄的地表水体、天然的地下水分水岭或者以相对稳定的流线或等势线为界,如果存在模型预测问题,且预测工况与模型识别的条件相差较大时,例如深部采矿条件、深部地下水硐室开挖情况,需要分析未来预测工

况条件下岩溶含水系统的范围是否会扩大,当涉及相邻的岩溶含水系统时,则应该建立可能影响的所有岩溶含水系统的范围。

边界条件的确定:在以岩溶含水系统作为模型范围时,其边界条件绝大多数可以用已知流量或已知水头边界条件来描述。由于岩溶区勘探程度较低、含水介质非均质极强,最好避免选择第三边界条件。

另外,岩溶地区经常遇到岩溶含水系统和岩溶水流系统在空间上不一致的情况,如有外源水补给的情况,此时,建议仍然以岩溶含水系统为边界,将外源水的补给在模型的源汇项中予以描述。具体方法:一是通过野外调查确定外源水特征,如补给范围、补给位置、补给方式等;二是通过外源水的监测,获得外源水补给量的变化特征,例如通过以小时为步长的降雨-流量(水位)监测,建立外源水水量(水位)随时间和降雨变化的关系等。

2.3 岩溶管道及管径的确定

MODFLOW-CFP 软件增加了对岩溶管道形态和模拟管道水流运动的计算模块,该模块在理论上更符合岩溶管道岩溶含水系统地下水运动的机理,要让该模块充分发挥作用就必须在数值模型构建过程中对岩溶管道空间展布特征和管道直径进行较准确的刻画,前者通过岩溶水文地质调查,结合地下水示踪试验对进出口的验证一般较容易确定,但是岩溶管道的直径除了极少数人能进入探测的地下暗河外,绝大多数岩溶管道直径是无法直接得到的,地球物理探测技术方法对岩溶管道的探测精度也非常有限,且实施难度、成本均较高。因此,岩溶管道直径成为了 CFP 模型构建中非常关键的参数之一。

地下水示踪试验已经成为岩溶水文地质调查比较常用的试验方法,目前该方法主要用于确定岩溶管道的空间展布和水力联系^[18-27]。人工地下水示踪试验实际上就是在岩溶管道中开展的地下水溶质运移试验,在岩溶管道的空间展布特征基本确定的情况下,可以根据岩溶管道出口监测得到的示踪剂浓度随时间变化曲线(穿透曲线)依据管道流溶质迁移理论,确定岩溶管道的水力等效直径^[28]。当岩溶管道系统为结构比较简单的单支岩溶管道时,则可近似为一维管道流水动力弥散问题,可以采用美国环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency)研发的 Qtracer2 模型^[29]较方便地确定该类型岩溶管道

(暗河)的几何和水力参数(如等效直径、弥散度、雷诺数),杨平恒等^[30]已利用该方法开展过很多研究,取得了较好的效果。

Qtracer2 模型确定岩溶管道等效直径的基本原理就是将岩溶管道视为一等径的管道,当在管道(暗河)入口处瞬时投入某种示踪剂时,则该示踪剂在管道中的溶质迁移服从一维水动力弥散过程,在此情况下根据管道(暗河)出口处监测得到的示踪剂浓度穿透曲线和流量曲线就可以计算得到相应的水文地质参数和管道的有效直径,具体的计算公式详见杨平恒等^[30]基于在线高分辨率监测和定量计算的岩溶地下水示踪试验。

当实在缺乏管道直径的确定方法时,也可以将管道直径作为一个水文地质参数通过 CFP 模型来反演识别,但此时模型识别中最好能有对岩溶管道直径比较敏感的监测资料作为模型识别的目标函数,比如暗河流量动态、暗河及天窗或竖井的水位动态等。

2.4 降雨入渗补给源汇项的确定

降雨是地下水最普遍的补给来源,地下水研究中通常用降雨入渗系数来描述该源汇项的空间变化,岩溶管道型地下水系统的降雨入渗方式及入渗量与均匀孔隙、裂隙介质存在显著差异,首先在空间分布上不仅有面状的分散入渗,还有沿岩溶谷地的线状和通过落水洞等的点状集中入渗;此外在时间上随降雨特征的不同其入渗补给方式和补给量的时空变化也较大,例如小雨时常以面状分散入渗为主,而大雨、暴雨时则以线状和点状集中入渗为主。岩溶区降雨入渗补给量的计算是非常重要和困难的,但它又是 CFP 模型中最重要的源汇项,对模拟精度影响很大。

制约岩溶地区降雨入渗补给量确定精度的关键是现状对岩溶地下水系统降雨-流量(水位)动态响应监测工作的程度总体较低,传统的地下水动态监测一般是以天为时间步长,但是岩溶水系统的动态变化往往非常剧烈,尤其是西南管道型岩溶水系统,一次降雨引起的水位或泉流量过程往往在几天内就完成了。目前以天或几天为时间步长的监测无法准确刻画管道型岩溶水系统降雨-水文响应特征,随着现代地下水自动监测技术的发展已经具备了开展以小时(甚至分钟)为时间步长的高分辨率地下水动态

监测技术方法,该方法应该在岩溶地区加以推广使用^[31-35]。高分辨率降雨-水文(水位、流量)过程的监测不仅能够直接作为地下水数值模型中源汇项的输入依据,同时还有助于进一步提升对岩溶水循环特征和影响因素的认识,并利用一些统计学、随机理论、神经网络以及人工智能等新技术方法提高其确定精度。

2.5 目标函数的选择和获取

除了前述水文地质概念模型构建、结构模型刻画、边界条件确定、岩溶管道几何特征以及源汇项的确定等等一些因素会直接影响到地下水数值模型的识别精度外,在模型参数反演识别过程中也还有一些情况会间接地影响到模型识别的精度,比如目标函数的选择,目标函数就是用来检验计算结果与实际监测结果的物理量,一般该物理量都是随时间或空间变化的函数。

地下水数值模型的识别通常是依据模型预测的目标函数与实际监测的目标函数值之间的差异程度,通过不断调整水文地质参数来实现两者达到较好、较合理的吻合程度,从而实现地下水数值模型的识别。常规的地下水数值模拟通常以地下水系统中不同空间位置的钻孔水位动态作为目标函数来进行模型识别。这种目标函数的选择对于岩溶区尤其是岩溶山区存在很多限制,因绝大多数岩溶山区地下水水位埋深大,实施水文地质钻孔的难度大、周期长、成本高,水文孔缺乏是南方岩溶地下水系统比较普遍的现象,另外实际岩溶管道在岩溶水系统中的空间占比是非常小的,钻孔往往很难直接揭示岩溶管道,很难掌握岩溶管道流的水位动态。基于此,结合

MODFLOW-CFP 软件的特点,在模型识别过程中更需要去发掘能够用于模型识别和检验的目标函数,例如在钻孔、泉水较少的地区,是否能够寻找到岩溶天窗、竖井、地下河的不同地段,同时开展水位、流量的动态观测,弥补目标函数空间分布的不足。

另外,根据岩溶管道系统的水位、流量等目标函数往往具有随降雨变化十分敏感的特点,可以采用自动化监测设备加密监测,获取以“小时”(甚至“分钟”)为时间步长高分辨率目标函数,并且还可以开展多个不同强度降雨-水文(水位、流量)响应过程的高分辨率监测,弥补数据量和敏感程度的不足;另外,还可以利用天然和人工示踪剂的浓度、温度、电导率的变化等作为目标函数,进行多目标约束下数值模型的高分辨率识别。

综上所述,随着对岩溶水系统认知程度的不断提高,先进的监测、试验技术方法的推广应用,提升岩溶水系统结构、边界条件和水文地质参数的识别精度,提高地下水数值模型的仿真度,减少模型的多解性和不确定性。

3 案例分析

本文选择湖南永顺县呆业洞岩溶水系统作为案例介绍 MODFLOW-CFP 模型实际应用中的一些关键问题。

3.1 水文地质概况

呆业洞岩溶水系统是一单斜地层结构的相对比较简单的小型岩溶水系统(图 2),该系统发育于寒武

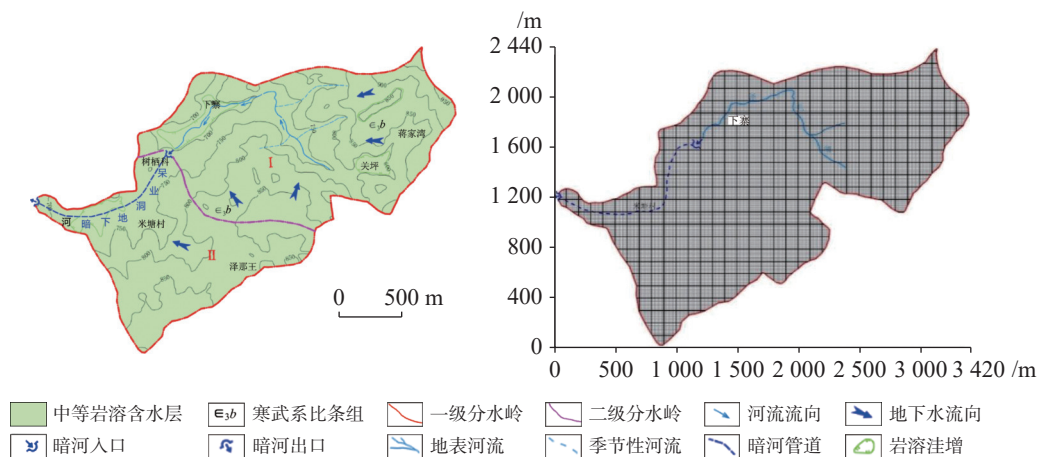


图 2 呆业洞系统水文地质和网格剖分图

Fig. 2 Hydrogeology and mesh generation of the Daiye cave system

系比条组(C_3b)中厚层条带状灰岩中等岩溶化地层中,含水介质主要为裂隙和溶蚀裂隙,但在其下游段发育一小型地下暗河,构成了岩溶管道-溶隙、裂隙双重介质结构,其下伏寒武系车夫组(C_3c)地层为薄层泥质灰岩和钙质页岩组成,岩溶发育程度低,其含(透)水性远小于上覆比条组岩溶含水层,构成了呆业洞岩溶水系统的隔水底板。根据区域岩溶水文地质调查、地下水示踪试验、暗河流量-降雨量的高分辨率监测等,确定呆业洞暗河是一个相对完整的全排型岩溶水系统,与周边其它岩溶水系统之间均由地下分水岭构成零流量边界,汇水面积为 3.74 km^2 ,呆业洞暗河入口高程 700 m ,出口高程 660 m ,长约 1180 m ,平均水力梯度 3.39% ,流量 $10\sim 2100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,受降雨影响变化极大,是比较简单而典型的岩溶管道-溶隙、裂隙型岩溶水系统,它与周边其它岩溶水系统均以地下分水岭为界。

3.2 模型构建及单元剖分

根据上述呆业洞岩溶水系统的水文地质条件将其概化为岩溶管道-溶隙、裂隙非均质潜水非稳定流模型。模型周边以呆业洞岩溶水系统的天然地下水分水岭为界,处理为零流量边界,下边界以车夫组隔水层作为隔水底板,上边界以潜水面为界按入渗边界考虑,暗河出口按定水头边界处理。

本次模拟用 MODFLOW 中的预处理模块对整个含水系统采用正方形网格进行剖分离散化(如图 3),南北向剖分为 244 行、东西向剖分为 342 列,网格单

元 Δx 、 Δy 均为 10 m 。模拟含水层岩性较为单一,岩溶发育程度随深度变化不大,故垂向上按单层结构考虑。CFP 模块中的暗河进出口位置、标高以及暗河的平面和剖面展布主要根据水文地质调查结果赋值,管道分段长度也与网格剖分长度一致取 10 m ,管道直径根据后续地下水示踪试验曲线确定的等效管径赋值。

3.3 管道直径等参数的确定

为了查明呆业洞岩溶水的来源及岩溶管道的等效管径等参数,2018 年又专门补充开展了地下水示踪试验和同步的降雨、暗河流量过程监测,2018 年 5 月 17 日 14:00 在下寨岩溶谷地的暗河入口瞬时投放 160 g 荧光素钠示踪剂,此时暗河入口的流量约 $20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,然后在呆业洞暗河出口采用瑞士 Albillia 公司生产的 GGUN-FL30 型野外荧光分光光度计进行实时监测,同时对暗河的流量也进行了同步监测,监测结果如图 3 所示,根据示踪剂浓度曲线和流量动态曲线积分得到本次示踪剂的回收率为 46% ,分析回收率偏低的原因可能是由于示踪剂投放后 34 h 研究区 5 小时内发生 23.6 mm 的强降雨,雨后暗河出口流量快速上升、水变浑浊,导致流量和浓度监测误差以及泥沙的吸附等。

由图可见示踪剂浓度曲线呈近似对称的单峰曲线,说明该岩溶管道系统为结构比较简单的单支岩溶管道,其中的地下水溶质运移基本满足一维管道流水动力弥散方程,因此可以根据这次示踪试验的

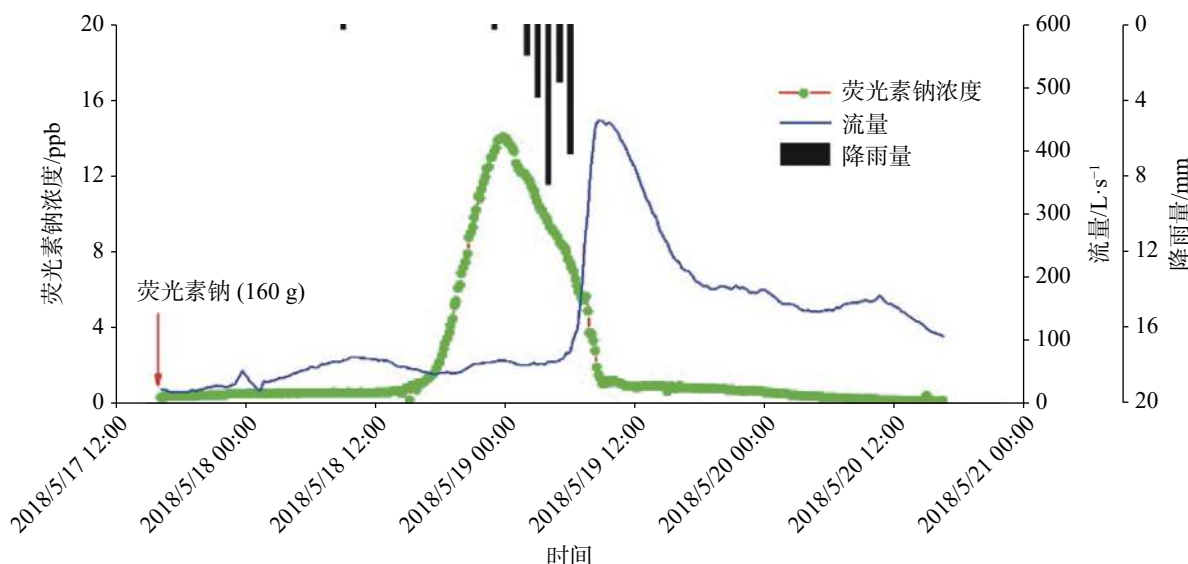


图 3 呆业洞暗河示踪试验浓度穿透曲线(荧光素钠)

Fig. 3 Concentration breakthrough curve of the tracer test in Daiye cave underground rivers (fluorescein sodium)

穿透曲线,应用前述 Qtracer2 模型来确定岩溶管道的横截面积为 5.65 m^2 ,根据现场调查呆业洞暗河为一全充水岩溶管道,据此可以折算得到相应的等效管径为 2.683 m ,并以此作为 MODFLOW-CFP 模块中岩溶管道的直径;管壁平均粗糙度取值 0.001 m ;交换系数取 $4 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$;平面上沿 x 、 y 方向发育的管道弯曲程度设置为 1,其他弯曲处的管道弯曲程度设置为 0.7;下临界雷诺数取 2 300,上临界雷诺数取 4 000。

3.4 降雨入渗及源汇项的确定

本次研究采用水箱模型来简单描述岩溶地区降雨-入渗-产流过程,如图 4 所示某次降雨过程 P 除去蒸发 E 返回大气后的净降雨 H 可以分解为三个部分:(1) z —通过面状分布的裂隙、溶蚀裂隙下渗补给岩溶含水层的水量—相当于传统的降雨入渗补给量;(2) y_1 —降雨在岩溶区表面土壤和表生岩溶带形成的壤中流;(3) y_2 —当降雨强度较大时形成的地面径流。地表总径流量 Q 可以用(7)式来确定。在非岩溶区一般只将第 1 部分的水量作为地下水源汇项赋值给模型,但是在岩溶区尤其是封闭的岩溶谷地区第 2、3 部分的水量 Q 实际最终也都会再次通过落水洞等补给下伏岩溶管道中构成岩溶水系统的补给来源。

$$H = P - E \quad (1)$$

$$H = z + y_1 + y_2 \quad (2)$$

$$z = b \cdot P \quad (3)$$

$$y_1 = a_1 \cdot (H - h_1) \quad (4)$$

$$y_2 = a_2 \cdot (H - h_2) \quad (5)$$

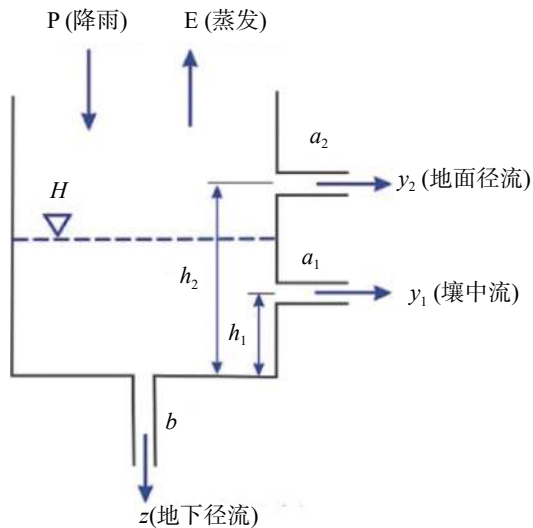


图 4 水箱模型结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of water tank model

$$y = y_1 + y_2 = \begin{cases} 0 & H \leq h_1 \\ a_1 (H - h_1) & h_1 < H \leq h_2 \\ a_1 (H - h_1) + a_2 (H - h_2) & H > h_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$Q = \frac{y \cdot F}{\Delta t} \quad (7)$$

式中: P -降雨强度(mm); E -蒸发强度(mm); H -净降雨强度(mm); y_1 -壤中流的径流深(mm); h_1 -发生壤中流的起始水深(mm); a_1 -壤中流的产流系数; y_2 -地面径流的径流深(mm); h_2 -发生地面径流的初始水深(mm); a_2 -地面径流的产流系数; y -地表总径流深(mm); z -降雨入渗补给强度(mm); b -降雨入渗系数; F -某控制流域的面积(m^2); Δt -时间步长; Q -某流域范围的地表总径流量。

在实际工作中我们首先在研究区建立降雨-流量监测站,然后根据野外多次降雨-流量过程的监测资料对上述水箱模型涉及的参数进行单独识别和检验,再结合水箱模型识别的各参数和数值模型识别或预测过程中的降雨强度分析各种情况下的降雨入渗补给方式和补给位置,例如是否存在封闭的集中灌入式补给,其入渗的位置及其上游的控制流域面积等,然后根据前述率定的水箱模型确定 MODFLOW-CFP 中分散的降雨入渗补给强度以及点状或线状集中灌入式补给强度,直接作为已知值给 CFP 模型赋值。

呆业洞岩溶水系统从水循环和降雨入渗补给条件上可分为上游(I)和下游(II)两大区域(图 3)。

I 区:暗河入口以上区域,地形上是一个封闭的岩溶谷地,该区的降雨除了被蒸发-蒸腾返回大气之外,其余全部入渗补给下伏岩溶水,但是不同降雨强度下其入渗补给方式在时空上会有很大变化,导致岩溶水循环的显著差异,进而会对地下水流场产生明显影响。当降雨强度小于表层岩溶带的下渗速率时,降雨全部以面状分散入渗的形式补给岩溶水;当降雨强度大于表层岩溶带的下渗速率时,就会有一部分降雨形成地表径流汇入岩溶谷地,然后经谷地线状入渗或从落水洞点状集中入渗补给下伏岩溶水。

本次研究在暗河入口和出口处都设置了矩形堰,通过自动监测堰口水位标高获得暗河进出口的流量,同时通过自动雨量计进行小时降雨量监测,根据 2016 年 7 月中旬 300 个小时的降雨-暗河入口流量过程的监测曲线(如图 5),采用前述水箱模型(图 2)可以确定暗河入口集中点状补给水箱模型的相应参数,如表 1 所示。根据这些参数就可以利用前述水

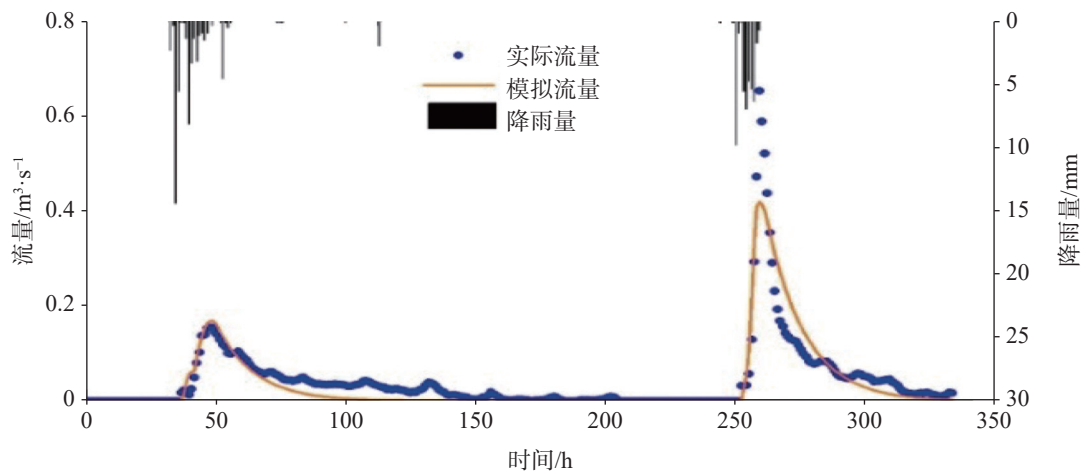


图 5 水箱模型模拟流量与实测流量
Fig. 5 Simulated and observed flux of water tank model

表 1 水箱模型参数
Table 1 Water tank model parameters

参数	壤中流水箱 出口高度 h_1/mm	地面径流水箱 出口高度 h_2/mm	壤中流 出流系数 a_1	地面径流 出流系数 a_2	地下水面状 入渗系数 b	拟合精度 R^2
取值	13.15	22.79	0.132	0.634	0.100	0.79

箱模型的(1)~(7)式计算得到暗河入口处不同降雨强度下的流量,并将其作为 MODFLOW-CFP 模块岩溶管道入口的源汇项输入模型。对于其它有外源水补给的岩溶水系统,当外源水进入岩溶水系统后若以落水洞或伏流的形式集中补给时,也可以采取此方法确定外源水的补给量及其随降雨强度的变化。

Ⅱ区:为岩溶斜坡地貌,这种地貌条件下当降雨强度小于表层岩溶带的下渗速率时,降雨全部以面状分散入渗的形式补给岩溶水;当降雨强度大于表层岩溶带的下渗速率时,就会有一部分降雨形成地表径流流出岩溶水系统,与通常地下水系统水循环特征(降雨-面状入渗-地下径流)一致,因此,仍然可以采用常规的降雨入渗系数法确定降雨入渗补给量,本次模拟先取降雨入渗系数猜测值为 0.3,经模型识别后确定该区降雨入渗系数为 0.265。

3.5 模型识别中目标函数的确定

呆业洞岩溶地下水系统缺乏地下水水位监测的钻孔和天窗等条件,对所构建的 MODFLOW-CFP 数值模型的识别主要以暗河出口流量作为目标函数,为了提高模型的识别精度我们选取了雨季(6—8月)包含了 4 次强降雨过程的以小时为时间步长的多个降雨-流量响应过程作为目标函数开展模型识别。

如图 6 是经模型识别得到的暗河出口降雨-流量模拟曲线,与实际监测的动态达到了较好的拟合精度,最大相对误差为 10.2%,平均相对误差为 4.65%,模型效率系数(NSE)达 0.972。本次模型识别的不足是由于该系统缺乏水位等其它监测资料,仅由暗河出口流量 1 个物理量作为目标函数,模型虽然对流量的拟合度较高,但其它如水位等可能效果不佳,建议有条件的岩溶水模型可以将流量、水位等结合开展多目标的数值模型识别。

4 结 论

综上所述,MODFLOW-CFP 软件能够大大提升高度非均质岩溶管道型地下水系统的数值模拟精度,为复杂岩溶水系统定量研究提供了有效的平台。该软件的最大特点是能够在结构模型中增加岩溶管道介质,大大提高了管道流与裂隙溶隙层流共存条件下的数值模拟精度,其中岩溶管道的直径是该模型的重要参数,该参数直接获取非常困难,但可以通过地下水示踪试验的浓度和流量动态监测工作,运用 Qtracer2 模型得到其等效直径,这对提高该模型的精度是十分有效的方法。另外由于岩溶地下水系统的水位动态监测资料往往较少,因此模型识别可以采

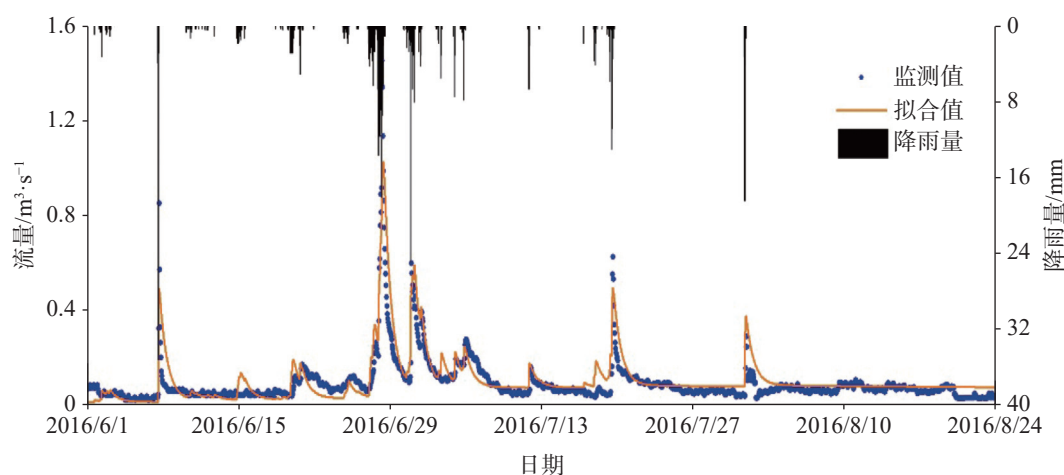


图6 呆业洞暗河出口流量拟合结果

Fig. 6 Fitting result of outlet discharge in the Daiye cave underground rivers

用不同降雨强度下的多个暗河流量变化过程作为模型识别的目标函数,克服地下水水位资料的不足。

总体而言,在数值模型构建和模型识别以及预测过程中不能仅仅将该数值模拟软件作为一个定量评价的工具,应该结合更细致的岩溶水文地质调查和高分辨率的多水文要素的动态监测、多种水文地质试验等工作进行综合分析,不断创新,才能够提高定量评价的精度,避免模型失真,不断推动水文地质学科的发展。目前 MODFLOW-CFP 软件主要应用于以地下水流量或地下水水位作为单独的目标函数来进行模型识别的研究,而将两者同时作为多目标函数的模型应用较少,未来可以进一步开展流量-水位等多目标函数的 MODFLOW-CFP 数值模拟研究,规避岩溶管道-溶蚀裂隙共存条件下,复杂岩溶含水介质地下水数值模拟的多解性和不确定性。

致谢: 本论文得到了铁四院科研课题《岩溶系统高分辨率识别及其在水害预测中的应用研究》项目的资助,在此诚挚感谢参与此项目的各位同事及中国地质大学万军伟教授科研团队。

参考文献

- [1] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-空隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学, 1995, 20(4): 361-366.
CHEN Chongxi. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore[J]. Earth Science, 1995, 20(4): 361-366.
- [2] 成建梅, 陈崇希. 广西北山岩溶管道-裂隙-孔隙地下水流数值模拟初探[J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(4): 50-54.
CHENG Jianmei, CHEN Chongxi. Preliminary probe on numerical simulation of groundwater flow in karst tube-fissure-pore triple media model in Beishan, Guangxi[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, 25(4): 50-54.
- [3] 陈崇希, 万军伟, 詹红兵, 沈仲智. “渗流-管流耦合模型”的物理模拟及其数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 1-8.
CHEN Chongxi, WAN Junwei, ZHAN Hongbing, SHEN Zhongzhi. Physical and numerical simulation of seepage-pipe coupling model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(1): 1-8.
- [4] 陈崇希, 胡立堂, 王旭升. 地下水流模拟系统PGMS(1.0版)简介[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 129-130.
- [5] W Barclay Shoemaker, Eve L Kuniansky, Steffen Birk, Sebastian Bauer, Eric D Swain. Documentation of a conduit flow process (CFP) for MODFLOW-2005[J]. Techniques and Methods, 2007, 6(A24): 50.
- [6] Tomas Reimann, Melissa E Hill. MODFLOW-CFP: A new conduit flow process for MODFLOW-2005[J]. Groundwater, 2009, 47(3): 321-325.
- [7] Hill M E, Stewart M T, Martin A. Evaluation of the MODFLOW-2005 conduit flow process[J]. Groundwater, 2010, 48(4): 549-559.
- [8] Gallegos J J, Hu B X, Davis H. Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW-CFP[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(8): 1749-1760.
- [9] Reimann T, Giese M, Geyer T, Liedl R, Maréchal J C, Shoemaker W B. Representation of water abstraction from a karst conduit with numerical discrete-continuum models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(1): 227-241.
- [10] 杨杨, 唐建生, 苏春田, 潘晓东, 赵良杰. 岩溶区多重介质水流模型研究进展[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 419-424.
YANG Yang, TANG Jiansheng, SU Chuntian, PAN Xiaodong, ZHAO Liangjie. Research advances on multi-medium flow model for karst aquifers[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(4): 419-424.
- [11] 秦就国, 蒋亚萍. CFP管道流数值模拟方法综述[J]. 地下水, 2014, 36(3): 98-100.

- QIN Jiuguo, JIANG Yaping. A survey of numerical simulation methods for CFP pipeline flow[J]. *Ground Water*, 2014, 36(3): 98-100.
- [12] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
HAN Xingrui. *Karst Hydrogeology*[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [13] 赵良杰, 夏日元, 杨杨, 邵景力, 曹建文, 樊连杰. 基于CFP的岩溶管道流数值模拟研究: 以桂林寨底地下河子系统为例[J]. *地球学报*, 2018, 39(2): 225-232.
ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, YANG Yang, SHAO Jingli, CAO Jianwen, FAN Lianjie. Research on numerical simulation of karst conduit media based on CFP: A case study of Zhaidi karst underground river subsystem of Guilin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(2): 225-232.
- [14] 杨杨, 赵良杰, 苏春田, 夏日元. 基于CFP的岩溶管道流溶质迁移数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 51-57.
YANG Yang, ZHAO Liangjie, SU Chuntian, XIA Riyuan. A study of the solute transport model for karst conduits based on CFP[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 51-57.
- [15] 焦友军, 潘晓东. 岩溶管道结构影响泉流量变化的数值模拟研究[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(5): 736-742.
JIAO Youjun, PAN Xiaodong. Numerical modeling of the influence of karst-conduit structure on variation of spring flow[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 736-742.
- [16] 杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文. 西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究: 以寨底地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 111-123.
YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 111-123.
- [17] 郑小康, 杨志兵. 岩溶含水层饱和-非饱和流动与污染物运移数值模拟[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 357-366.
ZHENG Xiaokang, YANG Zhibing. Numerical simulation of saturated-unsaturated groundwater flow and contaminant transport in a karst aquifer[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 357-366.
- [18] 蔡伍田, 戴爱德, 袁钢坤, 赵草著, P 比多. 应用多种示踪剂研究岩溶泉系统的补给边界[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(4): 378-383.
CAI Wutian, DAI Aide, YUAN Gangkun, ZHAO Caozhu, PASCAL Bidaux. Study the recharge boundary of a karst spring system by means of tracers[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(4): 378-383.
- [19] 吴泓瑶, 杨艳娜, 曾宪明. 基于水动力量化因子的岩溶强发育深度研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(1): 319-327.
WU Hongyao, YANG Yanna, ZENG Xianming. Depth of strong development of karst based on quantitative factors of hydrodynamic conditions[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(1): 319-327.
- [20] 邓振平, 周小红, 何师意, 罗英. 西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析: 以湖南湘西大龙洞为例[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(2): 163-169.
DENG Zhenping, ZHOU Xiaohong, HE Shiyi, LUO Ying. Analysis and tracing-test to karst groundwater in Southwest China karst rocky mountain area: A case study in Dalongdong, western Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(2): 163-169.
- [21] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 张蓉蓉, 黄币娟, 王彬彬. 基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(4): 717-721.
LU Chengpeng, SHU Longcang, YUAN Libo, ZHANG Rongrong, HUANG Bijuan, WANG Binbin. Determination of hydrogeologic parameters of karst aquifer based on tracer test[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(4): 717-721.
- [22] 何师意, L Michele, 章程, 汪进良, 李强. 高精度地下水示踪技术及其应用: 以毛村地下河流域为例[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 673-678.
HE Shiyi, L Michele, ZHANG Cheng, WANG Jinliang, LI Qiang. A high precision underground water tracing test technique and its applications: A case study in Maocun karst system, Guilin, Guanxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(5): 673-678.
- [23] 张志强, 张强, 班兆玉, 胡元进. 基于示踪试验的岩溶管道及水力参数定量解析[J]. *人民长江*, 2015, 46(11): 80-83.
ZHANG Zhiqiang, ZHANG Qiang, BAN Zhaoyu, HU Yuanjin. Quantitative analysis of karst conduit and its hydraulic parameters based on tracer test[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(11): 80-83.
- [24] 於开炳, 徐蔓, 严竞雄, 李剑. 地下水示踪试验在岩溶隧道勘察中的应用: 以利万高速齐岳山隧道为例[J]. *工程勘察*, 2017, 45(10): 46-51.
YU Kaibing, XU Man, YAN Jingxiong, LI Jian. Application of groundwater tracer tests for karst tunnel investigation: Taking Qiyueshan tunnel of Lichuan-Wanzhou expressway as the example[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2017, 45(10): 46-51.
- [25] 赵一, 李衍青, 覃星铭, 洪涛, 程瑞瑞, 蓝芙宁. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 226-233.
ZHAO Yi, LI Yanqing, QIN Xingming, HONG Tao, CHEN Ruirui, LAN Funing. Tracer tests on distribution and structural characteristics of karst channels in Nandong underground river drainage[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 226-233.
- [26] Parise M, Ravbar N, Živanović V, Mikszewski A, Kresic N, Mádl Szőnyi J, Kukurić N. Hazards in karst and managing water resources quality[J]. *Karst aquifers—Characterization and Engineering*, 2015: 601-687.
- [27] 常威, 谭家华, 黄琨, 程焱, 黄镇, 万军伟. 地下水多元示踪试验在岩溶隧道水害预测中的应用: 以张吉怀高铁兰花隧道为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 400-408.
CHANG Wei, TAN Jiahua, HUANG Kun, CHENG Xi, HUANG

- Zhen, WAN Junwei. Application of groundwater multi-element tracing tests to water hazard prediction of karst tunnels: An example of the Lanhua tunnel on the Zhangjiajie-Jishou-Huaihua high-speed railway[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 400-408.
- [28] 陈崇希, 成建梅. 地下水溶质运移理论与水质模型[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- CHEN Chongxi, CHENG Jianmei. Theory and applied modeling of solute transport in subsurface flow[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [29] Field M S. QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for karst aquifers and other hydrologic systems[R]. The United States Environmental Protection Agency, 2002.
- [30] 杨平恒, 袁道先, 蓝家程, 陈雪彬, 张笑微. 基于在线高分辨率监测和定量计算的岩溶地下水示踪试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 103-108.
- YANG Pingheng, YUAN Daoxian, LAN Jiacheng, CHEN Xuebin, ZHANG Xiaowei. Tracing test of a karst aquifer based on online, high-resolution monitoring and quantitative calculation[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(2): 103-108.
- [31] 罗明明, 周宏, 郭绪磊, 陈乾龙, 齐凌轩, 况野. 峡口隧道间歇性岩溶涌突水过程及来源解析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 246-254.
- LUO Mingming, ZHOU Hong, GUO Xulei, CHEN Qianlong, QI Lingxuan, KUANG Ye. Processes and sources identification of intermittent karst water inrush in Xiakou tunnel[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(6): 246-254.
- [32] Sutton J E, Sreaton E J, Martin J B. Insights on surface-water/groundwater exchange in the upper Floridan aquifer, north-central Florida (USA), from streamflow data and numerical modeling[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(2): 305.
- [33] Boersma Q, Prabhakaran R, Bezerra F H, Bertotti G. Linking natural fractures to karst cave development: a case study combining drone imagery, a natural cave network and numerical modelling[J]. *Petroleum Geoscience*, 2019, 25(4): 454-469.
- [34] 尹德超, 罗明明, 张亮, 周宏, 陈植华, 史婷婷. 基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 11-16.
- YIN Dechao, LUO Mingming, ZHANG Liang, ZHOU Hong, CHEN Zhihua, SHI Tingting. Methods of calculating recharge coefficient of precipitation event based on spring recession analyses[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(3): 11-16.
- [35] 刘仙, 蒋勇军, 叶明阳, 杨平恒, 扈志勇, 李元庆. 典型岩溶槽谷区地下河水文动态响应研究: 以重庆青木关地下河为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 149-154.
- LIU Xian, JIANG Yongjun, YE Mingyang, YANG Pingheng, HU Zhiyong, LI Yuanqing. Study on hydrologic regime of underground river in typical karst valley: A case study on the Qingmuguan subterranean stream in Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(2): 149-154.

Several key issues in the application of MODFLOW-CFP software to the numerical simulation of karst water systems

TAN Jiahua

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract The MODFLOW-CFP software effectively addresses the coupling issue between pipe flow and groundwater seepage in porous media, as well as the transition from laminar to turbulent flow in pipe water movement. It provides a valuable numerical simulation platform for the quantitative study of karst conduit groundwater systems and has been applied in practical engineering by some researchers in recent years. However, due to limitations in survey methods, particularly for linear projects such as railways, highways, and water conservancy, the survey accuracy is relatively low. It is challenging to accurately characterize the structure of karst conduit systems in the presence of fractures and dissolution channels in karst aquifers, and the simulation results are often unsatisfactory. To better utilize and promote the application of this software in the quantitative evaluation and study of karst groundwater systems, and to avoid the blind use of new methods in practical applications and improve the simulation accuracy and prediction precision of numerical models for complex karst water systems, further development of quantitative hydrogeological research in karst geology is needed. Based on an analysis of the basic principles of MODFLOW-CFP

simulation software and the authors' extensive experience in karst hydrogeology, this study conducts an in-depth analysis in various aspects. These include determining the model scope and boundary conditions, quantifying karst conduit structures, acquiring hydrogeological parameters, and selecting objective functions. Additionally, this study discusses key technical issues and possible solutions in the simulation process, taking the Daiye cave karst groundwater system in Yongshun county, Hunan Province, as a case.

The research results indicate as follows. ① Detailed investigations of karst hydrogeology, including groundwater tracing, drilling, and geophysical exploration, are essential for understanding the hydrogeological conditions, finely partitioning the karst water system, and establishing accurate conceptual hydrogeological models as the basis for numerical simulations. ② For the determination of the model scope, we should first consider selecting a complete groundwater system based on engineering requirements. In terms of the boundary conditions, we should then consider the changes in groundwater system equilibrium caused by the engineering activities, especially for soft boundaries such as watersheds. ③ Conducting groundwater tracing test, obtaining breakthrough curves of tracer concentration, and using the Qtracer2 model can effectively characterize the conduit structures and acquire the relevant parameters required by the CFP module. ④ Comprehensive and long-term monitoring data on rainfall, flow rate, water level, water chemistry, temperature, etc. are crucial to accurately obtain hydrogeological parameters, select appropriate objective functions, and improve the simulation accuracy of the model. ⑤ Currently, model identification mostly relies on the groundwater flow rate or the groundwater level as the sole objective function. Incorporating multiple conditions simultaneously as objective functions for model identification is less common but requires further research to improve the predictive accuracy of models.

Key words karst water system, numerical simulation, MODFLOW-CFP, model identification, simulation degree

(编辑 杨杨张玲)