基于 MODFLOW-CFP 模型的岩溶隧道涌水量预测

潘毅[1,2]，王思琪[1,2]，谭家华[3]，赵恒[1]，林宇航[1]，童紫茹[1]，万军伟[1*]

1. 中国地质大学（武汉）环境学院，武汉 430078；
2. 湖北省地质局水文地质工程地质大队，湖北 荆州 434020；
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司，武汉 430063

第一作者，E-mail：903090634@qq.com

* 通信作者，E-mail：Wanjw@cug.edu.cn

2024-03-20 收稿；2024-06-03 修回；2024-06-04 接受

基金项目：中铁第四勘察设计院集团有限公司项目（五峰至恩施段岩溶发育规律及对长大隧道工程影响研究）

中图分类号：P641.134　　文章编号：2096-8523(2026)01-0247-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240106

摘　要：隧道工程穿越岩溶地区时往往面临着高危害性的突涌水灾害，尤其当隧道穿越地下暗河系统时，施工和运营安全有巨大风险，因此准确预测隧道涌水量不仅是工程建设关注的焦点，同时也是隧道涌水量预测方法的难点。以鄂西后湾暗河系统为例，开展基于 MODFLOW-CFP 模型的隧道涌水量预测模拟方法研究，尤其是数值模型构建、模型识别过程中容易被忽视的岩溶水文地质调查、降雨与暗河流量响应过程监测以及地下水示踪试验等基础工作方法的研究，在此基础上构建岩溶地区隧道涌水量预测的 MODFLOW-CFP 模型，开展不同隧道设计方案的涌水量预测和对比分析，为隧道工程设计优化提供依据。研究查明了后湾岩溶水系统的范围、边界条件、地下水循环特征和降雨与水文响应规律，准确识别了后湾暗河地下管道的特征参数，为 MODFLOW-CFP 数值模拟方法的准确应用提供了基础，最终模型的线性相关系数 R^2 为 0.831，纳什效率系数 *NSE* 为 0.71，能够良好地反映系统的水文过程。涌水量预测结果显示：极端强降雨（日降雨量 P=325 mm）情景下，不同的隧道设计标高（1 350，1 330，1 318，1 270 m），涌水量峰值差异极大，分别为 0，0.52，8.17，14.88 m^3/s。研究表明抬高隧道设计标高能够有效减小隧道突涌水量，降低隧道突涌水风险。本研究采用的岩溶地下水系统调查、监测、试验和数值模拟方法可以为类似地区提供借鉴。

关键词：管道型岩溶水系统；调查方法；隧道涌水量预测；数值模拟；MODFLOW-CFP

近年来我国西南地区铁路、水利、公路等基础设施的规划和建设力度不断加强，但由于地形和地质条件限制，隧道工程成为山区引调水、铁路、公路等工程的主要组成部分。而我国西南地区岩溶地貌分布极广，穿越岩溶地区的隧道工程面临着高危害性强突涌水灾害，对施工和运营安全带来巨大风险[1]。在规划和施工阶段，关键问题之一是如何通过有针对性的水文地质工作准确评估隧道可能的涌水量，为隧道工程设计和水害防治提供科学依据。

岩溶隧道的涌水量预测是一个复杂的水文、工程地质问题[2]，目前常用的隧道涌水量计算方法有：水文地质比拟法、水均衡法[3]、地下水动力学法[4-5]、随机数学法[6]、数值模拟法[7] 等，受岩溶地下水非均质性和各向异性以及复杂边界条件的影响，很多预测方法并不适用，数值模拟法适应介质非均质性以及复杂边界条件的能力较强，但是对模型结构和模型识别目标函数的信息量要求较高，如何结合数值法的要求开展岩溶隧道区的水文地质调查、监测和试验等工作，并运用最新的数值模拟方法提高岩溶隧道涌水量预测的仿真度是目前关注的焦点

著录信息：潘毅，王思琪，谭家华，等. 基于 MODFLOW-CFP 模型的岩溶隧道涌水量预测［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：247-257.
PAN Yi，WANG Siqi，TAN Jiahua，et al. Prediction water inflow in a karst tunnel based on MODFLOW-CFP model［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2026，45(1)：247-257.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

问题。

西南地区岩溶水系统通常包含有管道、溶蚀裂隙、裂隙等不同级次的介质类型，不同介质类型在空间上分布不均匀，传统的对岩溶含水介质的概化模型包括：①等效孔隙介质模型[8-9]；②等效双重连续介质模型[10]；③离散−连续介质耦合模型[11-12]，这些模型都无法有效刻画岩溶管道介质的特征，而岩溶管道是造成隧道突涌水的关键。最新的 MODLFLOW-CFP 模型的数值模拟法提供了详细刻画碳酸盐岩含水层中集中管道流的模块（CFP），较其他软件更符合岩溶地区管道−裂隙双重含水介质的水流运动特征[13-16]。该模型基于美国地质勘探局研发的模块化三维有限差分法地下水流模型 MODFLOW 增加了 CFP 模块，在传统的满足达西定律的多孔介质含水层中插入 1 个圆管[17]，地下水在该管道中的流动满足一维管道流公式，既存在层流状态也存在紊流状态，管道与多孔介质间的水量可以相互交换[18-20]。

数值模拟法计算隧道涌水量的前提和基础是对研究区的水文地质条件有着准确的认知，特别是对于非均质性和各向异性更明显的强岩溶发育区，更应该加强对研究区水文地质条件和特征的调查[21]。本研究拟以后湾暗河系统为例，探讨在利用 MODFLOW-CFP 模型定量预测评价岩溶隧道涌水量的过程中，如何通过各种水文地质调查方法更准确地查明研究区的岩溶发育规律、岩溶水系统的范围和边界条件、地下水补给、径流、排泄的循环特征，开展研究区地下水水文过程监测和水文地质试验、获取模型参数等，从而更好地构建研究区水文地质模型，提高岩溶隧道涌水量预测和定量评价的精度。

1　研究区概况

本研究的岩溶隧道位于湖北省鹤峰县燕子镇，全长 9040 m，该隧道仅进口段位于岩溶分布区，其余区段位于穿越后湾暗河系统的下游段，隧道沿近 EW 方向穿越该暗河系统，长度为 1680 m（图 1a），该隧道平面上与后湾暗河管道近似正交，存在隧道突涌水风险，在平面上无法绕避该暗河的情况下，隧道在剖面上设计了 1350，1330，1318，1270 m 4 个不同的标高，以定量评价这 4 个不同设计标高情况下的隧道最大涌水量，为隧道设计提供依据。

1.1　地形地貌及气象水文

研究区地处鄂西褶皱山地，地形地貌主要受区域构造线及地层岩性控制，呈 NE 向展布，研究区南高北低，以岩溶台地和斜坡地貌为主（图 1b），整体位于 1300 ~ 1500 m 的岩溶台地之上，地表峰丛洼地槽谷发育，地表水通过落水洞潜入地下形成树枝状暗河，排泄至区域排泄基准。系统东西两侧还分布有地表水侵蚀形成的岩溶斜坡，相对高差不大，但坡度较大，达 15° ~ 50°。

研究区雨热同期，平均气温 10 ~ 22℃，年平均降雨量为 1882 mm，每年 12−2 月降水量最少，6−9 月降水量最多，且多为大雨或暴雨，历史最大降雨量约为 325 mm。研究区最主要的地表水为暗河出口东北侧的董家河，是系统的最低排泄基准，其下游被水坝拦截，水位稳定在 1315 ~ 1318 m。

1.2　地质构造与地层岩性

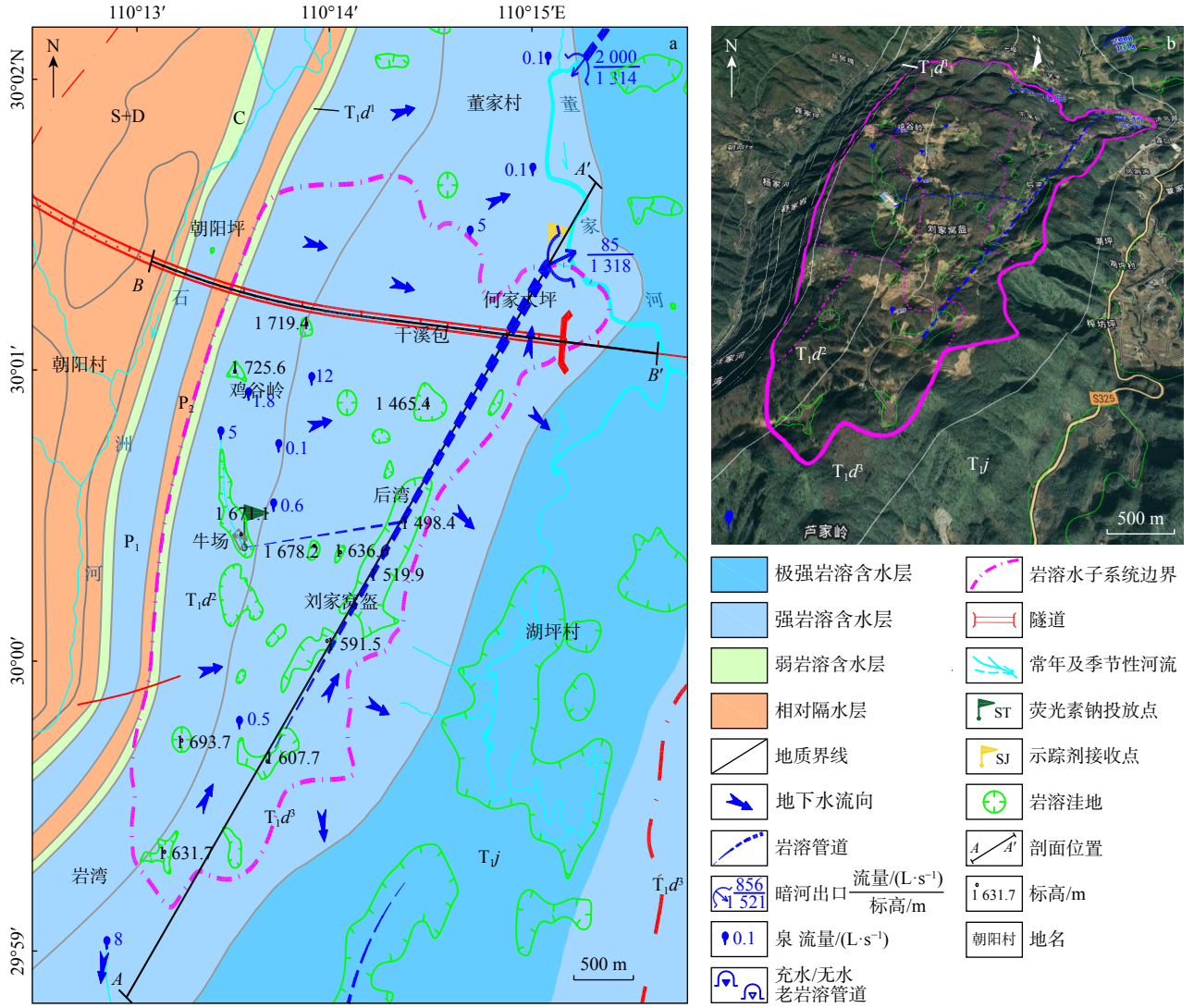
后湾暗河系统位于八面山台褶带南部来凤−鹤峰向斜核部偏西翼，地层因受该构造线控制呈 NE-SW 向的带状展布，倾向 SE，倾角 10° ~ 15°。研究区出露地层的主要岩性为：①三叠系嘉陵江组（T_1j）中厚层灰岩夹白云岩；②大冶组二、三段（$T_1d^{2\text{-}3}$）中薄层灰岩夹少量页岩；③大冶组一段（T_1d^{1}）薄层泥灰岩与页岩互层；④上二叠统（P_2）煤系地层；⑤下二叠统（P_1）中厚层瘤状灰岩；⑥石炭系（C）砾屑白云岩；⑦志留系−泥盆系（S+D）砂页岩。区内地层中的层面裂隙是地下水的良好的含水介质，根据碳酸盐岩的纯度、连续沉积厚度、岩溶发育程度等，将上述地层划分为以下 4 类富水性的岩溶含（隔）水岩组：溶洞−裂隙水极强岩溶含水层（T_1j）；溶洞−裂隙水强岩溶含水层（$T_1d^{2\text{-}3}$，P_1）；裂隙−溶隙水弱岩溶含水层（T_1d^{1}，C）；隔水层（P_2，S+D）。

2　岩溶水系统特征调查

2.1　调查内容及方法

岩溶水文地质调查中最基本的是地质结构和构造的调查[22]，其中最重要的调查内容包括：①岩溶含水岩组的划分、组合及其空间分布[23]；②起到控制岩溶发育作用的构造[24]：断层的产状、导（阻）水性，向斜或背斜构造的核部翼部岩性、产状、空间形态等；③区域内裂隙的发育程度与方向及对岩溶发育的控制作用[25] 等。这些有助于我们全面理解研究区的岩溶水文地质条件及其控制因素，帮助建立水文地质概念模型，辅助参数识别，提高模型的准确性和精度。

准确识别研究区岩溶水系统结构，对于建立 MODFLOW-CFP 模型至关重要。通过地面调查和绘制水位地质剖面，辅助水化学分析[26-27]、环境稳定



S+D. 志留系–泥盆系; C. 石炭系; P_2. 上二叠统; T_1d^1. 下三叠统大冶组一段; T_1d^2. 下三叠统大冶组二段; T_1d^3. 下三叠统大冶组三段; T_1j. 下三叠统嘉陵江组; 下同

图 1　后湾暗河系统综合岩溶水文地质图 (a) 及卫星影像图 (b)

Fig. 1　Comprehensive karst hydrogeological map (a) and satellite image (b) of the Houwan underground river system

同位素分析[28-29]、地下水示踪试验方法, 可以确定岩溶水系统的边界范围和性质, 地下水的补给来源、方式和径流途径, 排泄点的位置、方式和特征等[30-32]。利用地下水示踪试验可以准确确定岩溶区暗河管道的补给来源, 并通过示踪剂浓度曲线判断暗河结构, 分析地下水循环特征, 计算管道参数。

地表岩溶形态和发育规律的调查可以帮助识别和理解研究区地下水系统, 利用卫星影像和遥感数据, 可以快速、简单地判断研究区的岩溶地貌类型, 统计岩溶洼地槽谷特征, 分析岩溶发育强度, 有助于模型参数分区。通过洞内测量和垂直暗河走向的连续剖面的物探等, 开展研究区地下岩溶形态(特别是岩溶含水介质的类型和特征、岩溶管道的空间结构)的调查, 可以获取 CFP 模块中的暗河管道发育的位置、走向、高度和尺寸变化等多项空间结构特征。

2.2　岩溶发育特征

后湾暗河系统主要为中高山溶丘洼地地貌, 发育有岩溶洼地、槽谷等多种地表岩溶形态。研究区内岩溶洼地主要分布在管道上游的补给区一带, 沿暗河管道及其支管道, 岩溶槽谷强烈发育, 在刘家窝盔–干溪包一线形成串珠状岩溶洼地。系统内最重要的地下岩溶形态为后湾暗河管道。后湾暗河的主管道沿刘家窝盔–后湾–何家大坪一带串珠状的岩溶洼地和槽谷发育, 走向 36°, 总长 4039 m, 暗河入口标高 1607 m, 出口位于何家大坪董家河支流右岸, 标高 1318 m, 平均水力坡度约 7.16%。在刘家窝盔西侧牛场洼地处, 存在 1 支岩溶管道, 进口标高 1671 m, 通过示踪试验确认该支管道与主管道相连。区内还

至少发育一级古暗河管道，沿现暗河管道形成干溶洞或充水溶洞，部分构成了暗河天窗。

2.3　岩溶水系统特征

后湾暗河出口为董家河右岸溶潭及溶蚀裂缝，枯季流量为 80 ~ 150 L/s，最大流量可达 11.6 m^3/s。研究区内地表水系的流向与暗河发育的方向均由 NE 至 SW 方向。通过示踪试验和地面调查，查明了牛场至刘家窝盔一带地下水向北流至董家河，确定了后湾暗河系统的边界范围：系统东北角的边界为董家河，且为暗河系统的最低排泄基准，其余边界为隔水边界或地表分水岭。系统总面积约 9.14 km^2，主要的含水层为 $T_1d^{2\text{-}3}$ 强岩溶含水层。

后湾暗河系统内地下水整体表现为由 SW 向 NE 方向流动的格局，暗河沿管道走向的纵剖面图和沿隧道走向横剖面图如图 2 所示。地下水系统的补给来源为大气降水入渗补给。不同岩溶地貌条件降雨入渗补给形式和补给强度各不相同：研究区主要位于岩溶台地上，大气降水沿坡面向封闭的岩溶洼地槽谷汇集，在沿坡面流动的过程中不断沿垂向裂隙入渗补给地下水，剩下未完全下渗的水在洼地和槽谷底部汇集经落水洞入渗补给地下水，此区域降雨入渗补给条件相对较好，入渗系数较大；研究区西侧等边界处分布少量岩溶斜坡地貌，此处地表溪沟较发育，沟谷中的地表溪流通往系统外甚至地表溪流就在系统之外，中小雨时，坡面产流较弱，降水主要入渗补给地下水，而大暴雨条件下，降水往往达大部分沿斜坡流出系统，故降雨入渗条件相对较差，入渗系数较小。

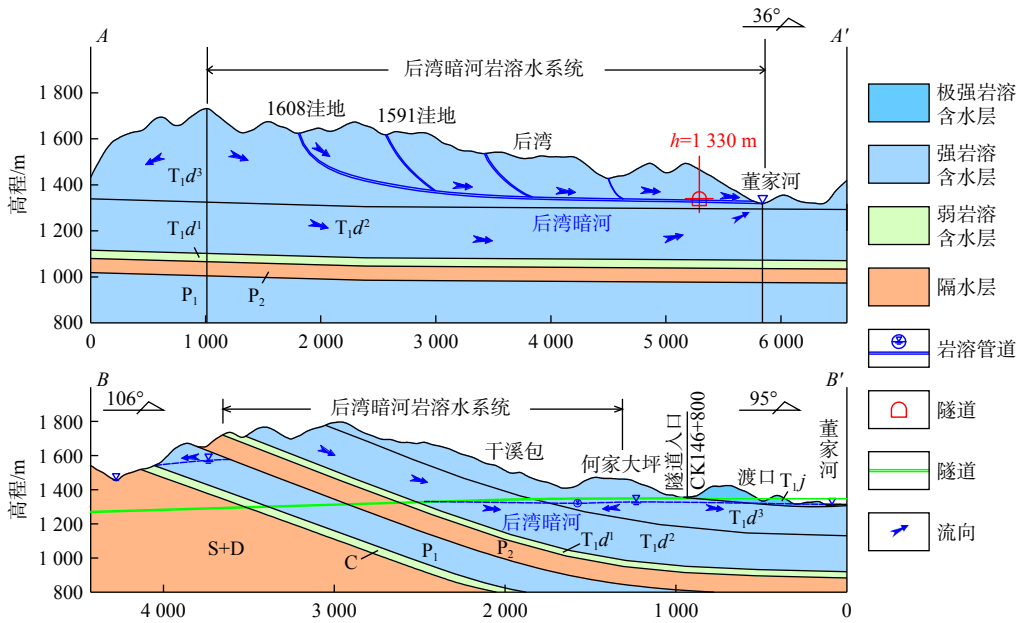


图 2　后湾暗河水文地质剖面图（剖面位置见图 1a）

Fig. 2　Hydrogeological profile of the Houwan underground river

3　岩溶水系统水文监测与试验

3.1　降雨与流量监测及水文地质试验方法

在定性掌握研究区的水文地质特征、建立研究区的概念模型后，可以通过高分辨率的降雨与流量监测、示踪试验、钻孔抽注水试验等手段获取模型的具体参数[33]，如：降雨入渗系数，各岩溶含水岩组的渗透系数、给水度，暗河管道的位置、尺寸、管道交换系数等。岩溶地下水系统的动态随降雨变化十分敏感，因此长期高分辨率的降雨与流量监测十分重要。通过对研究区降雨、地下水水位、泉或暗河流量的高精度监测，建立降雨与水位或降雨与流量降雨响应的时间序列曲线，可以帮助实现模型的精细化参数识别和检验，提供模型精度、减少参数的多解性。通过在管道型岩溶介质区开展地下水示踪试验，可以分析岩溶管道的通畅程度等特征，并利用溶质运移模型计算管道的直径及管道流估计雷诺数等，用于为模型 CFP 模块赋值[34]。钻孔抽注水试验，可以用于粗略计算单钻孔附近和 2 个钻孔间区域的含水层参数，如：渗透系数、导水系数、给水度、弹性释水系数等；还通过其获取的不同方向上含水层渗透性能的差异辅助判断地下水系统的边界条件、断层的导(阻)水性等。这些信息可以帮助建立水文地质实体模型，并为 MODFLOW-CFP 模型的参数识别提

供初始值和调参范围。

3.2 降雨与流量响应特征及应用

3.2.1 监测方案

为准确获得后湾暗河系统降雨−流量数据，查明系统水文特征、识别暗河管道参数和水文地质参数，在系统补给区牛场洼地布置雨量记录仪，并展开了暗河出口流量的监测。后湾暗河出口流量动态变化极大，出口至下游河道较宽且极不规整，水流浅而分散。为监测其流量，建造如图 3 所示渠道，并利用 Solinst 多参数仪监测水位、水温及电导率。

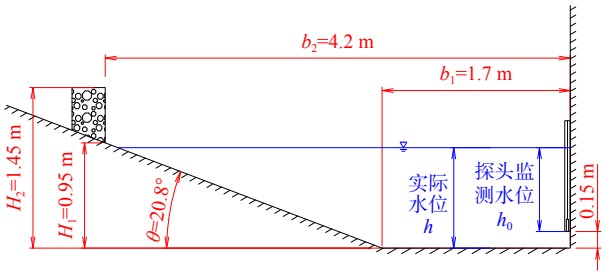


图 3 暗河出口渠道示意图（b_1，b_2，H_1，H_1，θ 均为渠道尺寸参数）

Fig. 3 Schematic of the outlet of the underground river

整个监测期间渠道均完整有效，根据渠道流基本公式推导得出该渠道的流量公式。经多次实测流量校正监测数据，监测得到的结果准确度高。

$$Q=\begin{cases}\dfrac{1}{n}i^{\frac{1}{2}}\left(b_1h+\dfrac{h^2}{2\tan\theta}\right)^{\frac{5}{3}}\left(b_1+h+\dfrac{h}{\sin\theta}\right)^{-\frac{2}{3}}, & h\leqslant H_1\\ \dfrac{1}{n}i^{\frac{1}{2}}\left[b_2(h-H_1)+\dfrac{1}{2}(b_1+b_2)h\right]^{\frac{5}{3}}\left(b_1+2h+\dfrac{H_1}{\sin\theta}-H_1\right)^{-\frac{2}{3}}, & H_1<h\leqslant H_2\end{cases} \tag{1}$$

式中：Q 为渠道流量，L^3/T；i 为渠底坡度；n 为渠道壁面的粗糙系数；h 为相对渠道底部的实际水位；b_1，b_2，H_1，H_2，θ 为渠道尺寸参数。

3.2.2 监测数据分析

监测期间，获取了 2023 年 6 月 14 日−9 月 18 日共约 3 个月的雨季降雨、流量等数据(图 4)。

后湾暗河出口流量对降雨的响应很敏感，即使在降雨比较分散的时候，暗河出口泉流量起伏也较大。流量曲线波峰尖锐，波峰呈现出不对称的形态，流量曲线急升缓降，表明该系统裂隙、溶蚀裂隙及岩溶管道发育，岩溶发育程度高，暗河管道通畅，地下水在岩溶管道中快速运移。

3.2.3 降雨入渗系数确定

不同特征的岩溶地下水系统，面对同样的降雨事件输入，其暗河流量响应输出特征(延迟与滞后等)不同[35]，往往存在较长的拖尾，导致集中降雨时流量

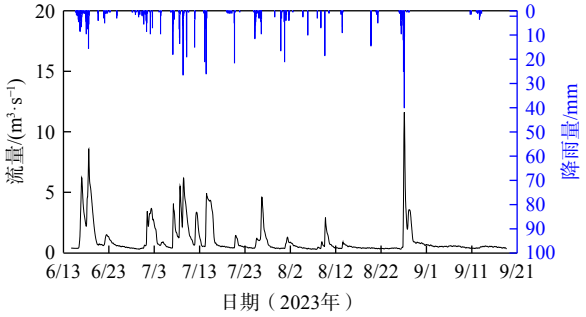


图 4 降雨−流量监测数据

Fig. 4 Monitoring data of rainfall and discharge

响应重叠，故采用流量衰退曲线来分割次流量响应，从而求取次降雨入渗系数[36]。通过该方法计算得到监测期 17 场降雨的入渗系数(图 5)可知，当总降雨量＜50 mm 时，降雨入渗系数在 0.189 ~ 0.361 之间，均小于 0.4；当总降雨量＞50 mm 时，降雨入渗系数在 0.426 ~ 0.558 之间，均小于 0.6。当降雨量逐渐增大时，降雨入渗系数并未持续增长，而是稳定在 0.5 左右。

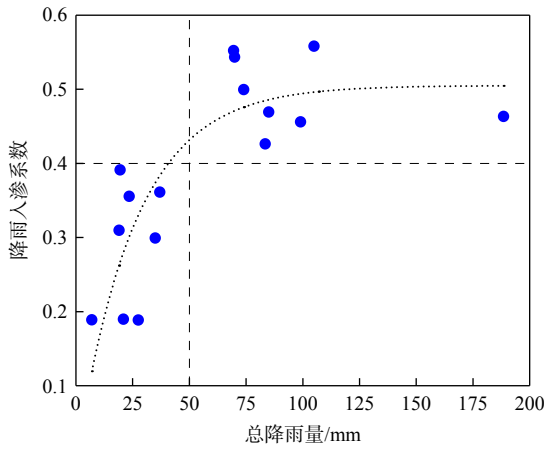


图 5 降雨入渗系数与总降雨量的关系

Fig. 5 Relationship between rainfall infiltration coefficient and total rainfall

3.3 地下水示踪试验及特征参数的确定

地下水示踪试验是水文地质调查的重要方法，通过监测示踪浓度与暗河流量变化，可以明确暗河径流方向、获取管道参数，辅助模型参数识别。简单的单支岩溶管中的溶质运移可简化为一维流水动力对流−弥散问题，利用 Qtracer2 软件确定几何与水力参数。该软件基于管道等径假设，通过瞬时投入示踪剂，监测暗河出口示踪剂浓度和地下水流量，计算岩溶管道的几何和水力参数(如：等效直径、弥散度、雷诺数)[37]。

为查明后湾暗河管道的特征，本研究专门设计开展了以下地下水示踪试验：2023 年 6 月 15 日 10:45

在牛场洼地落水洞 ST 处投放荧光素钠 1 000 g，并在后湾暗河出口 SJ 接收(图 1a)，示踪试验结果如图 6 所示。本次试验投放点至接受点直线距离为 3 400 m，结果显示：降雨−浓度响应曲线呈不对称钟形，整体滞后、延迟时间均偏短；地下水溶质运移最快流速为 512.82 m/h，平均流速为 317.86 m/h；示踪剂回收率为 63.7%，偏低可能是因为示踪剂被厚度较大的包气带中的泥砂大量吸附，或被岩溶管道内的小型溶潭和涡流滞留；暗河管道直径为 6.9 m；地下水流运动的估计雷诺数为 5.39×10^5，以紊流为主。示踪试验结果表明牛场洼地落水洞至后湾暗河出口之间存在单一、通畅的岩溶管道。

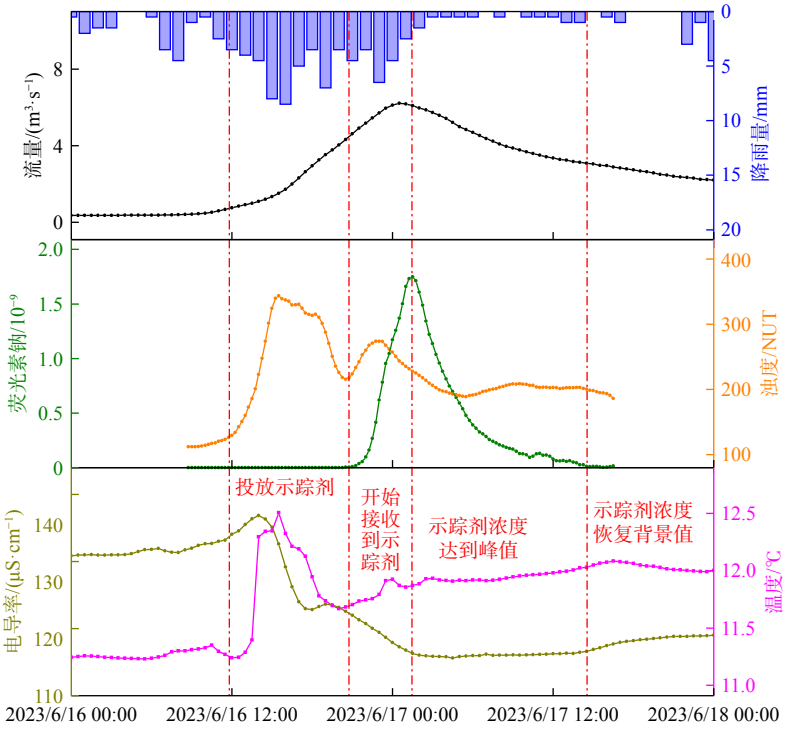


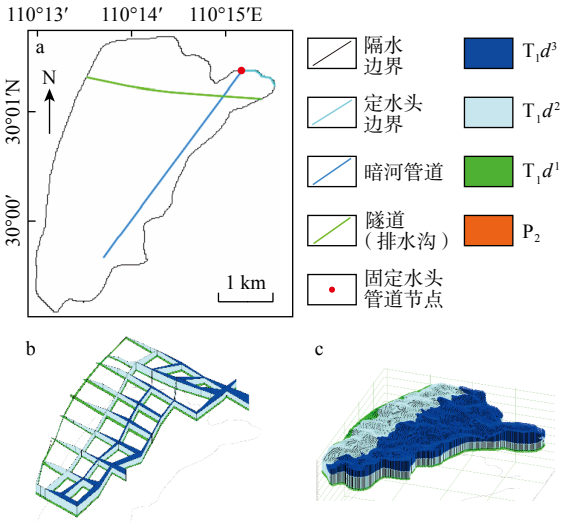
图 6　后湾暗河示踪试验响应曲线图

Fig. 6　Response curves from the tracer test in the Houwan underground river

4　研究区水文过程模拟及隧道涌水量预测

4.1　MODFLOW-CFP 模型设置

通过上述多种水文地质调查手段，确定了研究区的边界条件及暗河管道布置(图 7a)：董家河为给定水头边界，西端水位 1 318 m，东端水位 1 315 m；其余边界为零流量隔水边界；暗河管道仅保留主管道，标高 1 318 m；暗河出口处设置为固定水头节点，水位 1 318 m；隧道设为排水沟，高程值等于隧道标高。利用地面调查的岩性分界、产状及地层厚度，设立了 87 个虚拟钻孔并生成了相应的虚拟地层剖面(图 7b)，得到了研究区的三维地质结构模型(图 7c)。模型共 232 行、202 列、3 层，地表高程由数字高程模型 DEM 数据获取，隔水底板高程由钻孔数据插值得到，每个单元长宽均 20 m，共有 68 977 个有效单元。模型的拟合和校正期为 2023 年 6 月 14 日−9 月 6 日



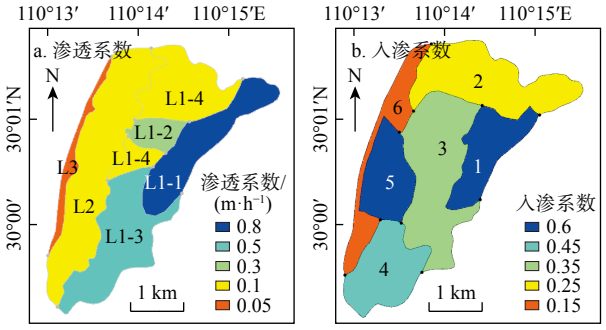
a. 研究区范围及边界条件；b. 模型虚拟钻孔及剖面设置；c. 模型三维网格剖分

图 7　研究区模型结构

Fig. 7　Model structure of the study area

共 2 000 h, 时间步长 1 h。

根据地形地貌、岩溶发育程度等, 将暗河管道主要发育的 T_1d^3 含水层分为 L1-1 岩溶主管道区、L1-2 支岩溶管道区、L1-3 主管道上游区域和 L1-4 其他岩溶中等发育区 4 个部分(图 8), 暗河管道下部的 T_1d^2(L2)、T_1d^1(L3)不做区分。后湾暗河管道明确通畅, 利用 CFPM1 模块概化。经参数和检验[38-40] 后, 模型各区的 x, y, z 方向上渗透系数 K_x, K_y, K_z 和给水度 SY 设置见表 1, 管道参数见表 2。



L1-1. T_1d^3 地层岩溶主管道区; L1-2. T_1d^3 地层支岩溶管道区; L1-3. T_1d^3 地层主管道上游区域; L1-4. T_1d^3 地层其他岩溶中等发育区; L2. T_1d^2 地层区域; L3. T_1d^1 地层区域; 下同

图 8　模型参数分区图

Fig. 8　Parameters zoning of the model

表 1　模型多孔介质参数取值

Table 1　Values of porous-media parameters in the model

分区	K_x/(m·h^{-1})	K_y/(m·h^{-1})	K_z/(m·h^{-1})	SY
L1-1	0.8	0.96	0.4	0.008
L1-2	0.5	0.6	0.25	0.005
L1-3	0.3	0.36	0.15	0.003
L1-4	0.1	0.12	0.05	0.001
L2	0.1	0.12	0.033 33	0.001
L3	0.05	0.06	0.016 67	0.000 5

注: K_x, K_y, K_z分别为模型x, y, z方向上的渗透系数; SY为给水度

表 2　模型管道参数取值

Table 2　Values of conduit parameters in the model

参数	取值	参数	取值
直径/m	6.9	下雷诺数	2 300
弯曲度	1	上雷诺数	4 000
实际长度/m	5 480	管道交换系数/(m^2·h^{-1})	0.549 78
粗糙度/m	0.1	水温/℃	12.6

模型主要的补给项为大气降水入渗的面状补给, 补给量等于降雨量乘以降雨入渗系数。根据 3.2.3 节, 研究区的总降雨入渗系数最大不超过 0.6, 且随着降雨的增大, 逐渐稳定在 0.5 左右。以 0.5 作为模型的平均降雨入渗系数, 并根据 2.2 节及图 1a 中地表岩溶发育程度的分区及地层岩性、地表坡度等, 综合设置模型的入渗系数(图 8b)。模型的初始水头设置为连续 2 次参数识别期模拟后暗河流量无变化时的稳定水头。

4.2　模型的结果分析与讨论

以暗河出口流量作为目标函数, 以相关性系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 评估模型拟合度, 经参数识别和检验, 当拟合优度最大时, 模拟结果如图 9 所示, 此时 R^2 为 0.831, NSE 为 0.71, 可以较好地反映系统的降雨量有流量响应过程。模型的模拟结果大部分情况下与观测值拟合度很好, 但是对脉冲式的短时强降雨, 模型给出了明显的实际未监测到的流量响应。这可能是因为后湾暗河的岩溶管道内存在小型的溶潭等储水结构, 在短时间高强度的降雨的条件下, 虽然雨强很大, 但总的降雨量较小, 溶潭具有一定的消纳功能, 将入渗补给储存了起来; 而在长时间中高强度的降雨条件下, 溶潭的储水能力不足, 还有就是在 2 次间隔很短的短时强降雨时, 第 1 次降雨将溶潭贮满, 第 2 次降雨就无法被溶潭消纳, 故而表现出第 1 次降雨无响应、第 2 次降雨强响应。由于本次模拟的主要目的是预测强降雨条件下的隧道涌水量, 且模型概化得相对简单, 因而出现偏差, 但对总体的模拟优度和后续的涌水量预测影响不大, 符合预期效果。

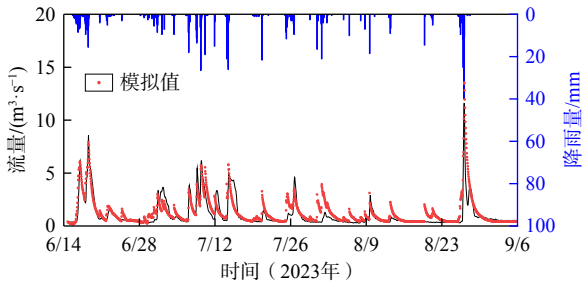


图 9　模型流量模拟结果图

Fig. 9　Simulated flow results of the model

4.3　隧道涌水量预测

由于近年来极端天气频发, 以历史极端强降雨的日降雨量(P=325 mm)预测隧道最大涌水量, 降雨形态为夏季常见的急起缓落且持续时间较长情景, 小时降雨量接近对数正态曲线分布。根据可能出现的隧道与暗河的关系, 模拟了以下 4 种场景: ①隧道标高 1 350 m, 位于地下水水位以上的垂直渗流带; ②隧道标高 1 330 m, 位于雨季时地下水水位以下、旱季时地下水水位以上的季节变动带; ③隧道标高 1 318 m,

位于地下水水位以下的水平径流带；④隧道标高 1 270 m，位于暗河管道以下。各情景下隧道涌水过程特征的相关参数见表 3，涌水量预测结果如图 10。

表 3　不同标高场景下的隧道涌水过程特征参数

Table 3　Characteristic parameters of tunnel water inflow under different elevation scenarios

场景	①	②	③	④
隧道标高/m	1 350	1 330	1 318	1 270
正常涌水量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0	0	0.21	7.56
最大涌水量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0	0.52	8.17	14.88
涌水体积/(万m^3)	0	3.87	108.8	640.1
滞后时间/h	0	16	5	5
延迟时间/h	0	82	169	>180

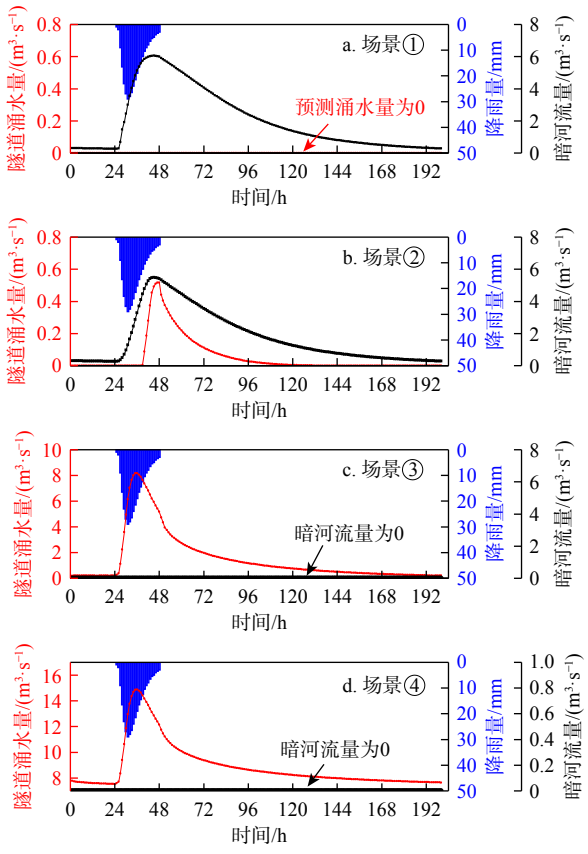


图 10　不同标高隧道涌水过程

Fig. 10　Tunnel water inflow for different elevations

根据隧道涌水量预测结果，当隧道位于地下水水位以上，仅有过路水存在时，模型预测涌水量为 0；当隧道位于季节变动带时，仅当地下水水位高于隧道标高后才开始涌水，且最大涌水量仅为 0.52 m^3/s，总涌水量占原暗河流量的 3.35%，延迟时间约 3.5 d，整体可控；当隧道标高位于暗河出口附近且接近暗河标高时，隧道会袭夺暗河的全部流量，当暗河出口附近存在有地表水时，甚至会引起地表水倒灌，造成极大的突涌水灾害；当隧道标高低于暗河而又未确保达到深循环带岩溶弱发育区时，隧道不仅会袭夺全部的暗河流量，还会造成极大程度的地表水倒灌，十分危险。

预测结果显示在隧道设计过程中，应尽量保证隧道标高高于暗河标高，当隧道位于季节变动带或垂直渗流带时，隧道的涌水量整体可控，突涌水风险较小；一旦隧道标高低于暗河管道标高，隧道的涌水量将成倍数的增加。

5　结　论

（1）通过地面调查、地下水示踪试验、长期高分辨率水文监测等手段，查明了研究区岩溶水系统的范围、边界条件、岩溶发育规律及水文循环特征，并获取了研究区的降雨与流量数据及示踪剂浓度穿透曲线；利用一维圆形管道流溶质运移模型计算得到了暗河管道的平均直径为 6.9 m，为构建 CFP 模块中管道的空间位置及相关参数提供了依据；利用流量衰退曲线，计算得到研究区暴雨时平均降雨入渗系数约为 0.5。

（2）根据上述水文地质调查手段获取的结果，构建了后湾暗河系统的 MODFLOW-CFP 模型，大大提高了管道流岩溶水系统数值模型的精度。通过参数识别和检验，模型拟合度高。开展了不同隧道标高情景下的涌水量预测，最终模拟计算得到：在 325 mm 极端强降雨的情况下，当隧道标高设计为 1 350，1 330，1 318，1 270 m 时，隧道涌水量的峰值分别为 0，0.52，8.17，14.88 m^3/s。结果表明抬高隧道标高能够有效减小隧道突涌水量，降低隧道突涌水风险。

所有作者声明无利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　常威. 复杂岩溶水系统识别及其在隧道涌水量预测的应用研究：以张吉怀高铁大青山隧道为例 [D]. 武汉：中国地质大学(武汉)，2021.
CHANG W. Study on identification of complex karst water system and its application in tunnel water inflow prediction: Taking Daqingshan tunnel of Zhangjihuai high-speed railway as an example[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2021. (in Chinese with English abstract)

[2]　王健华，李术才，李利平，等. 富水岩层隧道区域涌水量预测方法及工程应用 [J]. 人民长江，2016，47(14)：40-45.
WANG J H, LI S C, LI L P, et al. Prediction method of water in-

rush tunnels in water rich area and its engineering application[J]. Yangtze River, 2016, 47(14): 40-45. (in Chinese with English abstract)

[3] YADETA D, KEBEDE A, TESSEMA N. Potential evapotranspiration models evaluation, modelling, and projection under climate scenarios, Kesem sub-basin, Awash River basin, Ethiopia[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6(4): 2165-2176.

[4] AFTES. Recommendations for the treatment of water inflows and outflows in operated underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1989, 4(3): 343-407.

[5] ZHOU J Q, LIU H B, LI C D, et al. A semi-empirical model for water inflow into a tunnel in fractured-rock aquifers considering non-Darcian flow[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126149.

[6] ZANG C W, HUANG H W, ZHANG Z X. Forecasting the strata condition of a long road tunnel by using fuzzy synthetic judgement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 406-407.

[7] 肖竞, 万军伟, 成建梅, 等. MODFLOW-CFPv2 模型在岩溶隧道突涌水及对地下水环境影响中的应用: 以云南鹤庆锰矿沟岩溶水系统为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 301-310.
XIAO J, WAN J W, CHENG J M, et al. Application of MODFLOW-CFPv2 model in karst tunnel water inrush and its impact on groundwater environment: Example of the Mengkuanggou karst water system in Heqing County, Yunnan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 301-310. (in Chinese with English abstract)

[8] SCANLON B R, MACE R E, BARRETT M E, et al. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA[J]. Journal of Hydrology, 2003, 276(1/2/3/4): 137-158.

[9] WORTHINGTON S R H. Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA)[J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17(7): 1665-1678.

[10] GHASEMIZADEH R, HELLWEGER F, BUTSCHER C, et al. Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast limestone aquifer system of Puerto Rico[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(8): 1441-1461.

[11] CHANG Y, WU J C, JIANG G H. Modeling the hydrological behavior of a karst spring using a nonlinear reservoir-pipe model[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(5): 901-914.

[12] ASSARI A, MOHAMMADI Z. Assessing flow paths in a karst aquifer based on multiple dye tracing tests using stochastic simulation and the MODFLOW-CFP code[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(6): 1679-1702.

[13] CHANG Y, WU J C, LIU L. Effects of the conduit network on the spring hydrograph of the karst aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 517-530.

[14] JUKIĆ D, DENIĆ-JUKIĆ V, LOZIĆ A. An alternative method for groundwater recharge estimation in karst[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126671.

[15] 陈迪, 闫海涛, 乔翔宇, 等. 巨厚非均质含水层中超深孔涌水量预测 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 302-310.
CHEN D, YAN H T, QIAO X Y, et al. Prediction of ultradeep pore water inflow in giant thick heterogeneous aquifers[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 302-310. (in Chinese with English abstract)

[16] 赵良杰. 岩溶裂隙–管道双重含水介质水流交换机理研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
ZHAO L J. Study on water exchange mechanism of karst fracture-pipeline dual water-bearing medium[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)

[17] FU T G, CHEN H S, ZHANG W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of Southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2381-2391.

[18] REIMANN T, HILL M E. MODFLOW-CFP: A new conduit flow process for MODFLOW-2005[J]. Groundwater, 2009, 47(3): 321-325.

[19] 常勇. 裂隙–管道二元结构的岩溶泉水文过程分析与模拟 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
CHANG Y. Analysis and simulation of karst spring water process of fracture-pipeline binary structure[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese with English abstract)

[20] 赵良杰, 夏日元, 杨杨, 等. 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 L J, XIA R Y, YANG Y, et al. 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. (in Chinese with English abstract)

[21] 罗利川. 岩溶水系统识别及水文过程模拟研究: 以香溪河岩溶流域为例 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023.
LUO L C. Characterizing the karst groundwater systems and simulating the springdischarge: A case study of the Xiangxi River karst basin, Central China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2023. (in Chinese with English abstract)

[22] 陈仲达, 齐国庆, 刘剑锋, 等. 基于属性识别理论的隧道突涌水危险性评价 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(2): 101-107.
CHEN Z D, QI G Q, LIU J F, et al. Hazard analysis of tunnel water inrush based on attribute recognition theory[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(2): 101-107. (in Chinese with English abstract)

[23] 李玲玲, 陈植华. 鄂西丹水流域岩溶水流系统圈划与结构模式 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 135-144.
LI L L, CHEN Z H. Boundary determination of karst groundwater flow system and its structural model in Danshui basin, western Hubei Province[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 135-144. (in Chinese with English abstract)

[24] 陈兴聪. 滇中引水工程龙树隧洞出口段开挖对平诺村岩溶大泉影响评价 [J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(4): 73-77.
Chen X C. Evaluation of the impact of Longshu tunnel excavation on Pingnuocun karst spring[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(4): 73-77. (in Chinese with English abstract)

[25] 王泽君, 周宏, 齐凌轩, 等. 岩溶水系统结构和水文响应机制的定量识别方法: 以三峡鱼迷岩溶水系统为例 [J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4512-4523.
WANG Z J, ZHOU H, QI L X, et al. Method for characterizing structure and hydrological response in karst water systems: A case study in Y-M system in Three Gorges area[J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4512-4523. (in Chinese with English abstract)

[26] 王楠, 胥芹, 孙小艳, 等. 趵突泉泉域岩溶水化学特征及成因研究 [J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 279-290.
WANG N, XU Q, SUN X Y, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in Baotu Spring watershed[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(2): 279-290. (in Chinese with English abstract)

[27] 宋词, 杨锐锋, 谢詹, 等. 川东向阳岩溶隧道水化学特征及成因机制研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(10): 44-51.
SONG C, YANG R F, XIE Z, et al. Hydrochemical appraisal and formation mechanism of Xiangyang karst tunnels in eastern Sichuan Province[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(10): 44-51. (in Chinese with English abstract)

[28] 杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 等. 基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 154-162.
YANG N, SU C L, ZENG H B, et al. Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 154-162. (in Chinese with English abstract)

[29] 袁建飞, 徐芬, 刘慧中, 等. 基于水化学和同位素的典型岩溶水系统溶质演化过程: 以西昌市仙人洞为例 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 76-83.
YUAN J F, XU F, LIU H Z, et al. Application of hydrochemical and isotopic analysis to research a typical karst groundwater system: A case study at Xinrendong, Xichang City[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(17): 76-83. (in Chinese with English abstract)

[30] 朱静静, 周宏. 水文地质剖面分析在岩溶水系统研究中的应用: 以鄂西响水洞岩溶水系统为例 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24(3): 1-7.
ZHU J J, ZHOU H. Application of hydrogeological profile analysis to karst water system: A case study on Xiangshuidong karst water system in western Hubei Province[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(3): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[31] 陈含, 张冰冰, 邓刚, 等. 钻孔抽水试验水位降深计算公式推导及其应用 [J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(增刊1): 422-427.
CHEN H, ZHANG B B, DENG G, et al. Derivation and application of calculation formula for water level drop in borehole pumping test[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 422-427. (in Chinese with English abstract)

[32] 罗明明, 尹德超, 张亮, 等. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探 [J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 543-550.
LUO M M, YIN D C, ZHANG L, et al. Identifying methods of karst aquifer system structure in South China[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(6): 543-550. (in Chinese with English abstract)

[33] 杨闪. 基于放水试验和示踪试验的岩溶通道研究 [J]. 现代矿业, 2023, 39(8): 47-50.
YANG S. Study on karst channel based on water discharge test and tracer test[J]. Modern Mining, 2023, 39(8): 47-50. (in Chinese with English abstract)

[34] 陈亚洲, 董维红. 利用示踪试验时间−浓度曲线分析岩溶管道结构特征 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 41-47.
CHEN Y Z, DONG W H. Analysis of structural characteristics of karst conduit by timeconcentration curve of tracer test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 41-47. (in Chinese with English abstract)

[35] 康凤新, 郑婷婷, 冯亚伟, 等. 北方岩溶区降水入渗补给系数及补给机制: 以羊庄岩溶水系统为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 268-282.
KANG F X, ZHENG T T, FENG Y W, et al. Recharge coefficients and recharge mechanisms of precipitation to groundwater in karst areas of North China: A case study of Yangzhuang karst water system[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 268-282. (in Chinese with English abstract)

[36] 尹德超, 罗明明, 张亮, 等. 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 D C, LUO M M, ZHANG L, et al. Methods of calculating recharge coefficient of precipitation event based on spring recession analyses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 11-16. (in Chinese with English abstract)

[37] 杨平恒, 袁道先, 蓝家程, 等. 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 P H, YUAN D X, LAN J C, et al. 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. (in Chinese with English abstract)

[38] 李兴男, 金江跃, 降亚楠. 地下水数值模型结构不确定性对模拟结果的影响分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 179-185.
LI X N, JIN J Y, JIANG Y N. Analysis of groundwater numerical model structural uncertainty on simulation results[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 179-185. (in Chinese with English abstract)

[39] 焦友军, 潘晓东, 曾洁, 等. 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 Y J, PAN X D, ZENG J, et al. Numerical modeling of the influence of karst-conduit structure on variation of spring flow[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 736-742. (in Chinese with English abstract)

[40] 武亚遵, 李彦涛, 林云, 等. 管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 68-75.
WU Y Z, LI Y T, LIN Y, et al. A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 68-75. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于 MODFLOW-CFP 模型的岩溶隧道涌水量预测”

Prediction water inflow in a karst tunnel based on MODFLOW-CFP model

PAN Yi[1,2]，WANG Siqi[1,2]，TAN Jiahua[3]，ZHAO Heng[1]，LIN Yuhang[1]，
TONG Ziru[1]，WAN Junwei[1*]

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China；
2. Hydrogeology and Engineering Geology Institute of Hubei Geology Bureau, Jingzhou Hubei 434020, China；
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China

First author，E-mail：903090634@qq.com

* Corresponding author， E-mail：Wanjw@cug.edu.cn

Abstract：[**Objective**] Tunnel construction in karst areas often faces the high-risk sudden water inflow, posing serious threats to construction and operational safety. This risk is particularly critical when tunnels intersect underground river systems, where accurately prediction of water inflow is not only a key concern in engineering design but also a major challenge for existing prediction methods. [**Methods**] This study develops a tunnel water inflow prediction approach based on MODFLOW-CFP, using the Houwan underground river system in western Hubei as a case study. Particular emphasis is placed on several foundational tasks that are often overlooked during model construction and calibration, including detailed karst hydrogeological surveys, monitoring of rainfall-underground river discharge responses, and groundwater tracer tests. On this basis, a physically reasonable MODFLOW-CFP model for predicting tunnel water inflow in karst areas is constructed, and simulations under different tunnel design schemes are carried out to compare inflow processes and provide a basis for optimizing tunnel design. [**Results**] The study delineates the spatial extent and boundary conditions of the Houwan karst water system, clarifies its groundwater circulation characteristics, and rainfall-runoff response patterns, and accurately identifies the key parameters of the underground conduit network, thereby providing a foundation for the accurate application of the MODFLOW-CFP numerical model. The calibrated model yields a linear correlation coefficient (R^2) of 0.831 and a Nash-Sutcliffe Efficiency (*NSE*) of 0.71, indicating that it can satisfactorily reproduce the hydrological behavior of the system. Under an extreme heavy rainfall scenario (P=325 mm), the predicted peak tunnel inflows differ markedly for design elevations of 1 350, 1 330, 1 318 and 1 270 m, with peak values of 0, 0.52, 8.17 and 14.88 m^3/s, respectively. [**Conclusion**] The results demonstrate that raising the tunnel design elevation can effectively reduce the magnitude of sudden water inflow and thus lower the risk of water inrush during tunnel construction and operation. The integrated methodology of karst groundwater investigation, monitoring, testing and numerical simulation presented in this paper can provide a useful reference for similar projects in other karst regions.

Key words: karst water system with conduit； survey method； tunnel water inflow prediction； numerical simulation；MODFLOW-CFP

Received：2024-03-20；Revised：2024-06-03；Accepted：2024-06-04

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240106