

文章编号: 1674—8247(2023)05—0075—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.05.014

隧道影响浅层泉点的量化方法

高楠 毛邦燕 张广泽 徐学渊

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:隧道开挖后会使隧道周围一定范围内地下水位下降,造成地表出露的泉点减流与疏干,这种环境负效应在岩溶地区尤其突出。本文对岩溶地区隧道影响浅层泉点的量化方法进行研究。首先,根据浅层岩溶水循环特征,将浅层岩溶泉点划分为接触型(Ⅰ)、侵蚀型(Ⅱ)和暗河型(Ⅲ),分析泉点泉域边界条件,确定了泉域圈闭原则。其次,总结归纳了隧道对于浅层泉点影响范围的预测方法。最后,提出了隧道影响泉点的4种模式,即无影响型(A)、减流影响型(B)、泉点疏干型(C)和泉域疏干型(D),以及不同模式泉点流量受影响程度的量化方法。以川东隔挡式构造某隧道为例,对提出的隧道影响浅层泉点的量化方法进行应用,预测隧道对5个地下水有疏干影响,对3个地下水点有不同程度的减流影响。

关键词:岩溶泉; 泉域; 环境负效应;

中图分类号: U452.1⁺1 **文献标志码:** A

A Method for Quantizing the Impact of Tunnel on Shallow Springs

GAO Nan MAO Bangyan ZHANG Guangze XU Xueyuan

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Tunnel excavation can cause a decrease in groundwater level within a certain range around the tunnel, resulting in reduced flow and dewatering of springs exposed on the surface. This negative environmental effect is particularly prominent in karst areas. This paper studied the method for quantizing the impact of tunnels on shallow springs in karst areas. Based on the characteristics of shallow karst water circulation, shallow karst springs were classified into contact type (Ⅰ), erosion type (Ⅱ), and underground river type (Ⅲ). The boundary conditions of spring catchments were analyzed, and the principles for delineating catchment areas were determined. The paper summarized the methods for predicting the impact range of tunnels on shallow springs, and proposed four modes of tunnel impact on springs, namely, no impact (A), reduced flow impact (B), spring dewatering (C), and catchment dewatering (D) and the methods for quantizing the degree of impact on spring flow in different modes were also proposed. Taking a tunnel with a barrier-type structure in the eastern Sichuan as an example, the proposed method was applied, and it was predicted that the tunnel would dewater 5 groundwater points and had varying degrees of reduced flow impact on 3 groundwater points.

Key words: karst spring; spring catchment; negative environmental effect

随着西南地区铁路建设的快速发展,隧道在修建过程中常需要穿越错综复杂的含水岩组,特别是在穿越可溶岩段落时,容易引发一系列水文地质问题与地

下水环境负效应^[1]。其中最突出与直观的是隧道工程对泉点的疏干和减流的效应。近年来,环境问题得到重视,越来越多的学者开始研究隧道建设引起的地

收稿日期:2022-11-14

作者简介:高楠(1996-),男,助理工程师。

引文格式:高楠,毛邦燕,张广泽,等. 隧道影响浅层泉点的量化方法[J]. 高速铁路技术,2023,14(5):75-80.

GAO Nan, MAO Bangyan, ZHANG Guangze, et al. A Method for Quantizing the Impact of Tunnel on Shallow Springs [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5):75-80.

下水环境负效应。受限于复杂多变的水文地质条件,岩溶地区隧道地下水涌水问题是长期以来的水文地质难题,而隧道涌突水对地下水环境影响的预测更为困难,这主要是由于对岩溶水系统的划分认识的不足和隧道对地下水环境影响范围定量判定方式的局限性造成的。

在天然条件下,地下水循环分为补给、径流、排泄3个环节,泉点为地下水排泄的一种形式。隧道修建后作为临空面形成集水廊道,使隧道周围地下水有了新的汇势,地下水位下降,影响泉点地下水循环。从地下水动力学角度分析,泉点作为汇点1,隧道作为汇点2。若两汇点汇势范围在空间上存在交集,那么汇点2将会对汇点1造成影响。然而,两汇势在三维空间中的形态刻画比较困难,若忽略汇势场中垂向分量,将汇势范围投影在二维的平面,则判断两汇势范围有无交集将更为直观和方便。

将单个泉点看作独立的岩溶水系统,“泉域”则表征子系统边界范围内的区域面积,也就是泉点的汇势范围^[2]。大尺度的岩溶水系统的岩溶水文地址条件往往很复杂,查明整个地下水的循环难度较大。因此,研究大区域的岩溶水系统时,往往将其划分为数个小尺度的岩溶水系统进行分析^[3]。美国水文地质学家 Toth^[4]在水力连续性概念的基础上,指出流域盆地中地下水位存在高程差,在重力驱动下可以自组织地形成嵌套式多级次水流系统;钟玲敏^[5]认为川东高陡背斜岩溶区在不同切割深度的排泄基准面控制下形成多级地下水循环系统;李潇^[6]通过分析重庆铜锣峡背斜与贵州铜锣井水文地质条件,将次背斜构造体系控制下的浅层岩溶水系统细分为4类小尺度模式:隙流集排型、隙流散排型、管流集排型、隙-管流集排型,并对各模式岩溶水系统特征做了精细刻画和对比分析。

众多学者针对地下水影响范围做了大量的研究。早在1863年,法国学者 Dupuit 在圆岛模型(即 Dupuit 模型)中提出了“可渗透环岛半径”。在此基础上,德国学者 Thiem^[7]通过近似假设对上述模型进行修改,把“环岛模型”在无限均值含水层中应用,即 Thiem 模型,建立了 Dupuit-Thiem 潜水径流公式,并提出了现实中降位漏斗范围的确定方法:从井壁到观测不到水位下降的点之间的水平距离^[8]。美国学者 Todd^[9]更加形象地将其改称为“影响半径”;后人根据其见解创立了许多“R”的计算公式,其中最常用的就是库萨金公式及奚哈德公式;Bear^[10]首次提出在概念上将其明确为一个水文地质参数。自此,影响半径在实际工程

中得到了应用,但学者对影响半径的概念及其应用存在争议^[11]。以上研究讨论的是影响范围的理论基础及规律,对实际工程应用仍缺少直接的判断依据和具体方法。

本文选取岩溶地区浅层地下水排泄点(以下简称“泉点”)作为研究对象,归纳总结泉点的补给、径流及排泄的特征和模式,并引入“泉域”概念,探讨隧道工程对泉点的影响形式及半定量其影响程度,最终结合工程实例分析其实用性,以期为隧道工程对泉点的影响评价提供参考。

1 泉域范围

在岩溶地区,相较于深层岩溶水循环中复杂多源的补给方式及长距离的径流途径,局部浅层岩溶水的循环模式更简单、更易于探查,并且更容易受到隧道工程的影响。浅层岩溶地下水在特定的岩溶地貌单元中接受降雨补给,以管道或裂隙等方式进行径流,然后在就近高程较低的位置以泉和暗河两种方式出露和排泄,形成了稳定的天然地下水资源。

水文地质学者根据泉点出露形式将其分为接触(带)泉、侵蚀泉、溢流泉及断层泉4种类型^[12]。泉域形态主要受地下水补给区与径流上游区的地质条件及边界条件控制,而不同成因的浅层岩溶泉点补、径、排特点存在差异。通过研究各类型泉点地下水循环的过程,确定水系统的边界,得到各类型泉点泉域形态及分布面积。溢流泉主要在平原地区出现,断层泉因为断层构造特点难以准确考虑,因此本次研究主要针对山区浅层泉点,暂不考虑溢流泉和断层泉。将典型山区浅层岩溶泉点类型总结为3种:接触泉型、侵蚀泉型和暗河型,相应的泉域形态特征如表1所示。

基于水均衡的原理,对地下水点的泉域面积进行计算,然后半定量地圈闭地下水点的泉域面积,泉域面积计算公式为:

$$M_0 \times F = Q \quad (1)$$

式中: M_0 ——地下水补给模数($L/s \cdot km^2$),其碳酸盐岩常见值为 $0.5 \sim 5 L/s \cdot km^2$;

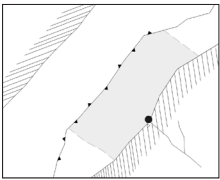
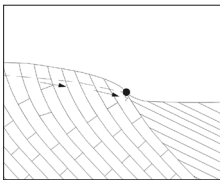
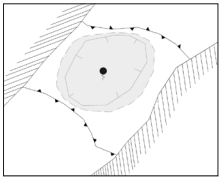
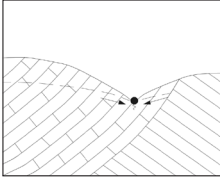
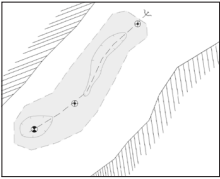
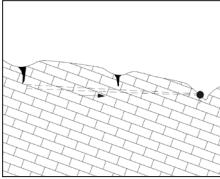













F ——补给面积(即泉域面积)(km^2);

Q ——地下水水点流量(m^3/d)。

2 隧道影响范围

将隧道概化为一系列垂直井的排列,其影响范围可视为一系列降位漏斗的叠加。将隧道影响边界定义为:隧道到地下水位没有明显降深范围,如图1所

表 1 典型地下水类型点及其泉域形态特征表

类型	名称	平面图	剖面图	特征
I	接触下降泉			泉点通常于可溶岩与非可溶岩交界的局部排泄点(如切沟)处出露,水点出露后顺切沟以地表水的形式向外径流。该种类型地下水点径流较短,径流区不太明显,而补给区域主要受地形及地质条件的控制,限制在岩溶区内,一般为切沟附近的岩溶区的地表分水岭(如山脊线)及可溶岩和非可溶岩的界线所圈闭。该种类型地下水点的泉域主要由补给区域构成,少部分为径流区,形态受地表分水线及可溶岩与非可溶岩界线控制
II	侵蚀下降泉			地下水点通常于可溶岩区内地形低洼(如洼地)处出露,水点出露后,如有地表溪流则汇入表水;若没有地表水流,泉点被限制在地形低点,通常形成水塘。该种类型泉点径流途径短甚至没有水平方向的径流,补给区域主要受地形的控制,限制在地表分水岭圈闭的负地形区域,并不局限于岩溶区。该种类型泉点的泉域主要由补给区域构成,形态一般与负地形形态相近
III	暗河			地下水点通常于可溶岩区内岩溶管道与地面交汇处出露,出露位置较低,一般在地表水体,水点出露后,汇入地表水。该种类型地下水点径流途径较长,沿径流的方向不断地获得补给,因此补给区域主要受地形及岩溶管道的控制,限制在岩溶管道沿线的负地形区域。由于岩溶管道的存在,使管道成为地下水流动的优势通道,管道附近的地下水在一系列串珠状的负地形汇集,通过垂向通道(如落水洞、竖井等)向下径流至管道内,然后顺着管道主要做水平的径流,最后在管道与地面的交汇点排泄出地表。该种类型地下水点的泉域由补给区域及径流区域构成,形态一般为长条状
备注	<div><div>可溶岩</div><div>非可溶岩</div><div>泉域范围</div><div>地下水流向</div><div>落水洞、竖井</div><div>地下水位线</div><div>泉点</div><div>地表分水岭</div><div>地表水系</div><div>洼地</div><div>暗河</div><div>暗河天窗</div><div>充水落水洞</div></div>			

示。由于复杂的地质条件和围岩的不均一性,尚未有针对隧道影响范围的定量化计算方式。实际工程应用中常用以下 3 种方法确定隧道影响半径。

2.1 计算公式

按照国家环境保护部发布的 HJ 610 – 2016《环境影响评价技术导则—地下水环境》中的线性工程影响范围计算公式进行计算^[13],应用最广泛的为库萨金公式和奚哈德公式,分别计算潜水含水层及承压含水层中的工程影响范围,表达式为:

$$R = 2S \sqrt{HK}$$
 (2)

$$R = 10S \sqrt{K}$$
 (3)

式中: R ——影响半径(m);

S ——水位降深(m);

H ——潜水含水层厚度(m);

K ——含水层渗透系数(m/d)。

2.2 数值模拟法

随着数值模拟方法在地下水资源方面的应用,越来越多的研究者利用数值模拟方法来预测隧道影响范围。目前常用的数值模拟方法包括有限单元法和有限差分法,常用的软件平台有 Visual MODFLOW、FEFLOW、GMS^[14]。

针对岩溶含水介质的不均一性,专家和学者提出了等效多孔介质法、双重连续介质法和三重介质法等

多种方法^[15]。等效多孔介质法和双重连续介质法基于达西流假设,将岩溶含水层的介质概化为均质的多孔介质含水层,其中等效多孔介质法因为模型构建相对容易得到了广泛应用。然而,这两种方法都忽略了岩溶含水层高度非均质性特征^[16]。三重介质法将岩溶含水层概化为孔隙、裂隙、管道 3 种介质,水流则涵盖了达西流、非达西流,这种对岩溶含水介质全面的刻画受到广大学者的认可,但受限其精度的高要求,国内对此方面的研究还不够充分。

2.3 工程类比法

对拟建隧道的水文地质条件进行分析,调查收集区域内具有类似水文地质条件的已建隧道信息。根据收集信息对该种类型的隧道影响半径作回归分析,以此计算出拟建隧道影响半径。该方法应用受限于区域内相似工程数量,但在实际工程应用中具有较高参考意义。学者在分析华蓥山隧道所处水文地质条件后,收集研究了川东隔挡式构造中的 4 座隧道的资料,建立了相似隧道平均埋深 S 与平均影响范围 R 的回归方程,有效预测了南大梁华蓥山隧道的影响范围。

3 隧道影响模式及程度

在天然条件下,隧道修建时涌水形成集水通道,隧道附近地下水流场产生改变,地下水水位降低,形

成降位漏斗。当泉点位置处于隧道形成的降位漏斗范围内, 泉点疏干; 当泉点补给范围与隧道降位漏斗范围有交集, 隧道会袭夺原有泉点补给来源, 从而导致泉点减流甚至疏干, 如图 1 所示。

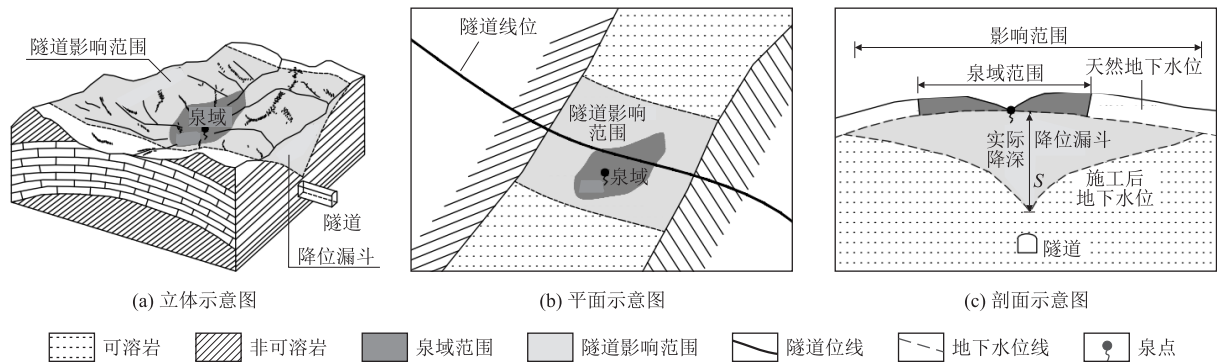


图 1 隧道工程对泉点影响示意图

采用泉域和影响范围量化泉点及隧道汇势范围, 的影响分为 4 种模式: 无影响型、部分减流型、泉点疏干型和泉域疏干型, 如表 2 所示。

表 2 隧道影响泉点模式类型表

编号	影响模式	平面示意图	剖面示意图	影响结果及程度
A	无影响型			泉域与影响范围无交集; 隧道对泉点无影响
B	部分减流型			泉域与影响范围有交集, 且泉点位置不处于隧道影响范围内; 泉点减流, 减流程度大致为交集面积占整个泉域面积的百分比
C	泉点疏干型			泉域与影响范围有交集, 且泉点位置处于隧道影响范围内; 泉点疏干, 但该泉点存在部分补给。在丰水期, 地下水位上涨时, 泉点恢复部分流量, 此时泉点呈季节性泉点特性
D	泉域疏干型			隧道影响范围完全包含泉域; 地下水点疏干, 仅在极端降雨条件下, 排泄表层滞水, 但随着降雨减小, 会很快速干
备注				

4 工程实例

川东隔挡式构造某隧道全长 6.788 km, 区内褶皱构造以背斜为主, 核部为三叠系嘉陵江组的灰岩, 向两翼展布依次为三叠系巴东组的灰岩、泥灰岩, 三叠

系须家河组的砂岩及侏罗系砂岩、泥岩。其中嘉陵江组与巴东组一段、三段地层为含水层, 须家河组、巴东组二段及侏罗系地层为隔水层。隧道大角度穿越背斜山, 其剖面如图 2 所示。

隧址区内无深切河谷贯穿整个背斜, 浅层地下水

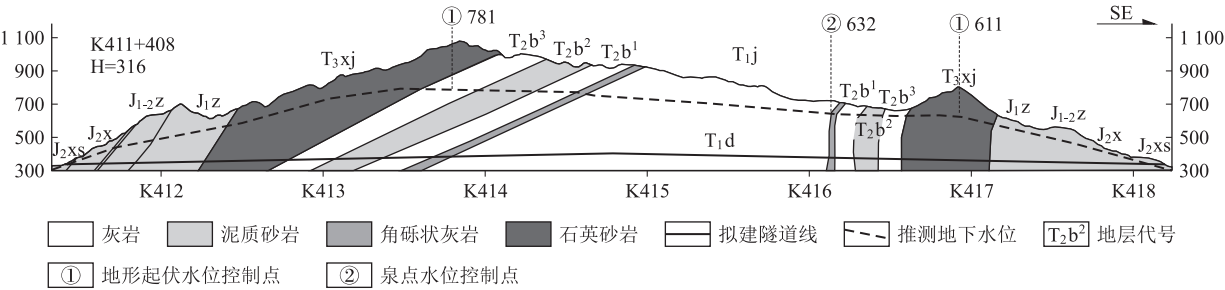


图 2 假角山隧道剖面图(m)

被挟持在背斜核部的可溶岩内径流。受地形和河流水文网的制约, 地下水点大多在横切沟谷切穿嘉陵江组地层与巴东组地层界线部位排泄, 无暗河发育。隧道附近地下水点特征如表 3 所示。

表 3 隧址区泉点特征及与隧道影响模式表					
编号	层位	高程/m	流量 L/s	类型	影响模式
JS01	T _{1j}	676	12	I	D
JS02	T _{2b}	667	9.3	I	D
JS03	T _{1j}	633	18.2	I	D
JS18	T _{1j} /T _{2b}	547	128.00	I	B
JS21	T _{2b}	589	50.00	I	D
JS23	T _{1j} /T _{2b}	596	30.00	I	C
JS36	T _{1j} /T _{2b}	689	1.38	I	C
JS37	T _{2b} /T _{3xj}	921	0.71	I	A
JS40	T _{1j} /T _{2b}	731	15	I	C

由表 3 可知, 隧道附近泉点均为 I 类型, 泉域范

围集中在嘉陵江组地层中。现场实验测得嘉陵江组含水岩组 M_0 为 $6\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$, 用式(1)计算出各泉点泉域面积, 再根据地形线、岩性界线在平面图上画出泉域。考虑到隧道区域内无类似工程, 使用库萨金公式对隧道影响范围进行计算, 并分析隧道工程对泉点的影响程度, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 隧道在嘉陵江组地层中的影响范围最大, 在须家河组地层中的影响范围最小, 主要归因于隧道穿越嘉陵江组地层时埋深 H 较大, 并且嘉陵江组地层以灰岩为主且岩溶发育程度高, 渗透系数 K 值较大。JS01、JS02、JS03、JS21、JS23、JS36、JS40、JS18 泉点泉域与隧道影响范围存在交集, 其中 JS01、JS02、JS03、JS21 隧道影响模式为泉域疏干型(D), 泉点疏干; JS23 隧道影响模式为泉点疏干型(C), 泉点疏干呈季节性特征; JS36、JS40、JS18 对应局部减流型(B),

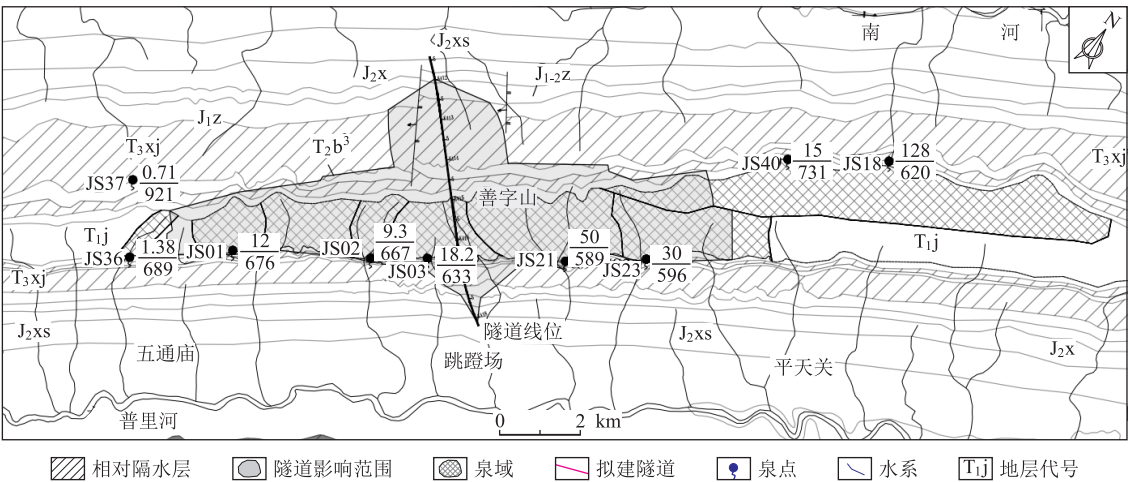


图 3 假角山隧道对地下水点影响示意图

泉点减流,将泉点泉域面积假定为均匀补给,减流程度对应交集面积占泉域面积百分比,分别为10%、30%和10%。

5 结论

本文选取岩溶地区浅层地下水排泄点(以下简称“泉点”)作为研究对象,归纳总结泉点的补给、径流及排泄的特征及模式,得出主要结论如下:

(1)在岩溶地区,泉域面积的确定取决于泉点的补给和径流范围。

(2)总结了3种岩溶区典型浅层地下水点类型,分别为:接触下降泉型(Ⅰ)、侵蚀下降泉型(Ⅱ)及暗河型(Ⅲ),分析了地下水循环特点并总结了泉域形态特征。

(3)总结了3种隧道影响范围的预测方法,即计算公式法,类比工程法与数值模拟法,分析了各类方法的原理和适用性。

(4)分析了泉域与隧道影响范围的空间关系,总结了隧道对泉点的4种影响模式及特征,分别为无影响型(A)、局部减流型(B)、泉点疏干型(C)、泉域疏干型(D),并通过泉域与隧道交集面积的百分比量化泉点受影响程度。

(5)以某隧道为例,运用量化方法对隧道影响浅层泉点进行了分析。结果表明,隧道附近泉点均为接触型(Ⅰ),通过分析计算泉点泉域与隧道影响范围空间关系,预测8个泉点受隧道工程存在影响,其中3个泉点为局部减流型(B)、1个泉点为泉域疏干型(D)、4个泉点为泉域疏干型(D)。

参考文献:

- [1] 赵瑜,胡波,陈海林,等. 岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 1-8.
ZHAO Yu, HU Bo, CHEN Hailin, et al. Impact of Tunnel Engineering on Groundwater Environment in Karst Area [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 1-8.
- [2] 梁永平,申豪勇,赵春红,等. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363-380.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, et al. Thinking and Practice on the Research Direction of Karst Water in Northern China [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 363-380.
- [3] 王家乐. 济南岩溶水系统多级次循环模式分析及识别方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
WANG Jiale. Analysis and Identification of Hierarchical Groundwater Flow System in Jinan [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [4] TÓTH J. A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(11): 4375-4388.

- [5] 钟玲敏. 川东高陡背斜区岩溶空间分异特征及评价系统构建研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
ZHONG Lingmin. Research on the Karst Development Characteristics of High-steep Anticline in Eastern Sichuan and Evaluation System Construction [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [6] 李潇,漆继红,许模. 西南典型狭窄褶皱小尺度浅层岩溶水系统特征及隧道涌水分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 375-383.
LI Xiao, QI Jihong, XU Mo. Analysis on the Characteristics of Small-scale Shallow Karst Water Systems in Typical Tight-narrow Folds and Tunnel Water Inrush in Southwestern China [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 375-383.
- [7] DUPUIT J. Etudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement des Canaux de Couverts et a Travers les Terrains Permeables [M]. 2nd ed. Paris: Dunod, 1863.
- [8] THIEM G. Hydrologische methoden. [M]. Leipzig: J. M. Gebhardt's verlag, 1906.
- [9] TODD D K. Groundwater Hydrology [M]. New York: Wiley, 1959.
- [10] BEAR J. Hydraulics of Groundwater [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1979.
- [11] 王军辉,王峰. 论抽水的降落漏斗范围、影响半径与环境影响范围[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 827-834.
WANG Junhui, WANG Feng. Discussion on the Range of Groundwater Depression Cone, Radius of Influence and Scope of Environmental Impacts during Pumping [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 827-834.
- [12] 张人权,梁杏,靳孟贵. 水文地质学基础[M]. 6版. 北京: 地质出版社, 2011.
ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui. Foundation of Hydrogeology [M]. 6th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [13] HJ 610-2016 环境影响评价技术导则—地下水环境[S].
HJ 610-2016 Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment-Groundwater Environment [S].
- [14] 孙从军,韩振波,赵振,等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 9-13, 17.
SUN Congjun, HAN Zhenbo, ZHAO Zhen, et al. Advances in Research and Application of Groundwater Numerical Simulation [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(5): 9-13, 17.
- [15] 徐中平,周训,崔相飞,等. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 475-483.
XU Zhongping, ZHOU Xun, CUI Xiangfei, et al. Research Advances of Numerical Simulation of Groundwater in Karst Areas [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 475-483.
- [16] 陈明浩,邓宏科,张广泽,等. 昭通隧道岩溶水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 34-39.
CHEN Minghao, DENG Hongke, ZHANG Guangze, et al. Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics and Risk Assessment of Water Inrush for the Zhaotong Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 34-39.