

# 贵州德江隧道区岩溶蓄水构造特征及涌水量预测

靳俊奇<sup>1\*</sup>, 杜毓超<sup>2#</sup>, 左杰<sup>1</sup>, 王国丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南  
Email: 290065518@qq.com, #dyckarst@126.com

收稿日期: 2021年3月10日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月29日

## 摘要

以德江隧道出口段岩溶蓄水构造为研究对象,在岩溶水文地质调查的基础上,我们论述了岩溶地貌类型、岩溶及岩溶蓄水构造特征,分析了隧道区内岩溶蓄水构造与隧道的水力关系。对德江隧道出口段进行了分区段水文地质评价。同时,采用大气降水入渗系数法和地下水疏干法,对地下河及管道型蓄水构造的影响段(隧道ZK9+650~ZK10+500段)进行涌水量预测,涌水量达 $18.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该研究成果为隧道防治水设计提供了依据。

## 关键词

德江隧道, 岩溶蓄水构造, 地下河及管道, 涌水

# Characteristics of Karst Water Storage Structure and Prediction of Water Inflow at the Dejiang Tunnel in Guizhou Province

Junqi Jin<sup>1\*</sup>, Yuchao Du<sup>2#</sup>, Jie Zuo<sup>1</sup>, Guofeng Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan Shandong  
Email: 290065518@qq.com, #dyckarst@126.com

Received: Mar. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2021

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 靳俊奇, 杜毓超, 左杰, 王国丰. 贵州德江隧道区岩溶蓄水构造特征及涌水量预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(4): 497-504. DOI: 10.12677/ag.2021.114045

## Abstract

Taking the karst water storage structure in the exit section of Dejiang tunnel as the research object, based on the karst hydrogeological survey, we discussed and analyzed the karst landform types, the characteristics of karst and karst water storage structure, and analyzed the hydraulic relationship between the karst water storage structure and the tunnel. Further, we conducted hydrogeological evaluation of the exit section of Dejiang tunnel. Meanwhile, the methods of atmospheric precipitation infiltration coefficient and groundwater drainage are used to predict the water inflow of the affected section (tunnel ZK9+650~ZK10+500), where there is underground river and pipeline-typed water storage structure, and the water inflow reaches  $18.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The research results provide a basis for the design of tunnel water control.

## Keywords

Dejiang Tunnel, Karst Water Storage Structure, Underground Rivers and Pipelines, Water Inflow

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

为适应贵州经济的发展,贵州省正在大力的建设高速公路。然而,贵州省地处我国西南岩溶集中连片典型发育区,洼地、落水洞、地下河广泛分布[1][2],对高速公路尤其是隧道建设提出了很高的挑战,岩溶隧道突涌水事故屡有发生。因此,查明隧道岩溶地区水文地质条件,分析岩溶发育规律以及岩溶地下水系统特征[3][4][5][6],确定岩溶蓄水构造类型,分析岩溶蓄水构造特征及与隧道的空间位置关系,对预防隧道涌水突水灾害、保障隧道施工安全具有重要意义。

1990年钱学溥等系统总结了我国蓄水构造类型,将蓄水构造分为四类二十五型,其中岩溶蓄水构造八型;2000年,张之淦和陈伟海通过研究广西来宾小平阳地区的岩溶蓄水构造类型,有效缩小了找水打井的靶区。2008年魏云杰等研究了贵州某岩溶隧道中的岩溶蓄水构造特征,预测了隧道各部位涌水情况,并采用径流模数法预测了隧道的正常涌水量和最大涌水量,进而提出了隧道的施工建议。2011年朱庆俊等通过物探勘查并结合水文地质资料分析,研究了广西隆安县岩溶石山区断裂带、溶洞、岩溶管道三种储水构造的地质-地球物理模型及其电性响应特征。2014年曹崇本等通过对贵州省岩溶地下水富集条件的分析、归纳,将贵州地区岩溶蓄水构造分为两个大类共七个类型。并利用地质体电阻率的统计结果建立了各类型岩溶蓄水构造的电阻率物理模型,对提高岩溶山区找水打井的成功率具有指导意义。因此,对蓄水构造特征的研究,不论是找水打井、物探解译,还是隧道涌水预测,都具有重要意义。

德江隧道位于贵州省德江至务川段,为德务高速段内一特长隧道,该隧道全长5500.00 m;进出口底板设计标高分别为690.49 m、795.10 m,最大埋深557.11 m。德江隧道工区内岩溶水文地质条件复杂、岩溶强烈发育,特别是隧道出口段处于富水向斜构造区,发育岩溶地下河,为典型的地下河及管道型蓄水构造[7]。施工证实,通过对德江隧道区岩溶蓄水构造特征及与隧道的空间位置关系的调查分析,评价深埋隧道岩溶水文地质条件,并采用适宜的方法预测涌水量,是确保隧道施工安全及全线顺利贯通的有力保障。

## 2. 地质背景

可溶岩分布受地层岩性、地形地貌和构造控制[8]。隧道区内出露地层以奥陶系、志留系及二叠系分布最广，三叠系仅涉及下统夜郎组灰岩。第四系仅洼地、谷地底部偶见分布。其中，桐梓-红花园组(O<sub>1t-h</sub>)上部为中厚层灰岩夹白云质灰岩和白云岩，中下部页岩、介壳结晶灰岩，底部含燧石石灰岩；栖霞-茅口组(P<sub>2q-m</sub>)中上部为厚层灰岩，局部夹燧石灰岩，下部为厚层灰岩为主，夹瘤状泥质灰岩；吴家坪-长兴组(P<sub>3w-c</sub>)中至厚层灰岩，夹炭质页岩及煤层。其中，隧道出口段主要穿越志留系及二叠系地层。

德江隧道依次近似以正交横穿文新断层、长丰背斜和石朝向斜。其中，石朝向斜核部位于隧道出口段，桩号 ZK10+195 附近。该向斜平缓开阔，地貌上呈向斜谷地，形成盆状蓄水构造。向斜轴部走向北东 20°~30°，核部由三叠系夜郎组、二叠系灰岩组成，南端翘起封闭；两翼不对称，北西翼较平缓，倾角 15°~30°，南东翼较陡，倾角 20°~50°，两翼主要发育二叠系和志留系地层。该向斜区的横张裂隙及纵张裂隙分布广泛，沿横张裂隙发育串珠状洼地，沿轴部纵张裂隙发育的落水洞、洼地密集分布，地下河管道即沿向斜核部延展。该向斜构造与地下水关系密切，为岩溶地下水的补给、赋存及运移提供的良好的地质构造条件。见图 1。

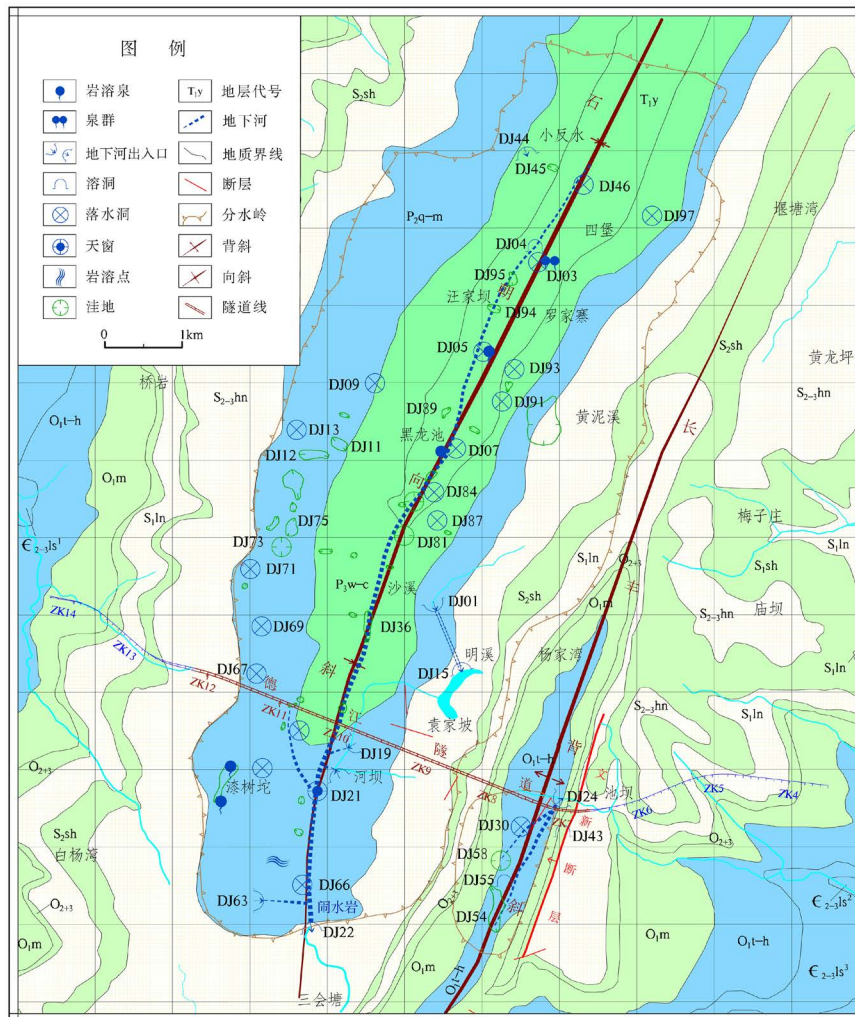


Figure 1. Hydrogeologic map of the tunnel area  
图 1. 隧道区水文地质图

### 3. 岩溶发育特征及蓄水构造类型

#### 3.1. 岩溶地貌及个体形态特征

区内根据地貌形态的不同，可划分为岩溶峡谷、溶丘谷地和溶丘洼地等三大类地貌。

岩溶峡谷，分布于研究区东侧，主要发育于奥陶系碳酸盐岩地层，沟谷深切、山峰耸立，高程范围在 700~1300 m 间，地形高差普遍较大、坡度较陡，以垂向岩溶作用为主，纵深发育的溶洞、溶缝常见，地表水及地下水的冲刷作用明显。

溶丘谷地，分布于石朝向斜轴部，小反水至沙溪村一带，呈长条状展布，主要发育于二叠系上统碳酸盐岩地层，地势略向南倾斜，整体较平坦，高程范围为 980~1100 m，地形高差约 100 m；谷内溶丘散布，丘顶多浑圆，丘高在数米到数十米不等；岩溶作用以水平发育为主，地下形成宽大、复杂的地下河管道，地表洼地、落水洞多沿谷地轴向成片分布。

溶丘洼地，主要沿石朝向斜两翼、二叠系中统栖霞 - 茅口组灰岩地层分布，于南部闹水岩村北侧陡崖处圈闭，呈环形条带状。溶丘多成倒锥状或馒头状，各溶丘间以大小不等、形态各异的洼地相连，洼地多为漏斗状和锅底状，其底部常发育有落水洞，洼地底部与溶丘顶部的相对高差一般在几十米，高程范围为 1100~1300 m。

岩溶区，在水流冲刷和溶蚀的作用下形成独特的地表和地下岩溶形态[9]，这些多样的岩溶形态成因及发育均有一定相关性，因此它们中的一些可以形成岩溶的组合类型。根据隧道区岩溶形态特征调查，区发育的主要岩溶个体形态划分为溶沟溶槽、岩溶洼地、落水洞、溶洞、溶蚀裂隙、地下河管道六种类型。

#### 3.2. 隧道区蓄水构造类型

通过地面水文地质调查，结合水文地质条件特征分析，从自然地理和空隙性质[7]看，隧道涉及裂隙蓄水构造和岩溶蓄水构造两大类型。若考虑裂隙的成因、火成岩活动和埋藏条件等因素，隧道区裂隙蓄水构造，可分为节理裂隙型、断层裂隙型和层间裂隙型；若碳酸盐岩区考虑裂隙的成因、形态、火成岩活动和埋藏条件等因素，隧道区岩溶蓄水构造，可分为地下河及管道型、层间岩溶型和裂隙岩溶型[10] [11]。如图 2 和表 1。

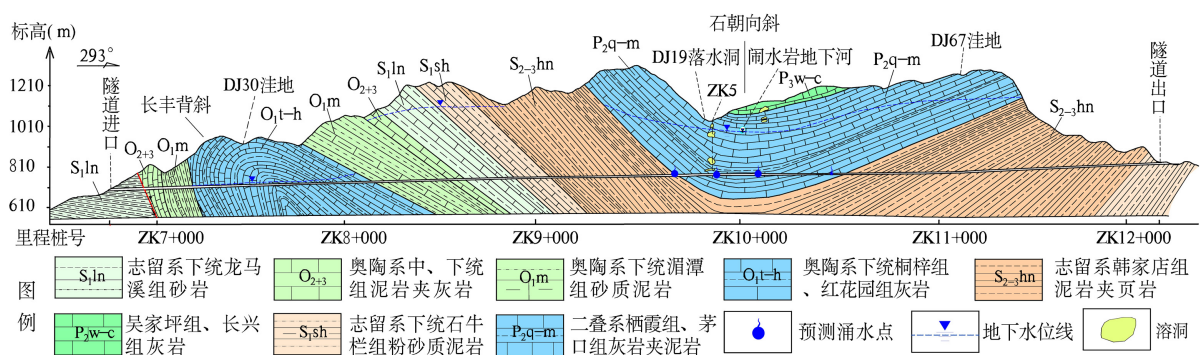


Figure 2. Longitudinal section of the tunnel

图 2. 隧道纵剖面图

#### 3.3. 典型岩溶蓄水构造特征

区内岩溶地下水系统的空间分布主要受地形地貌、地质构造共同控制[12] [13]，如：闹水岩地下河系



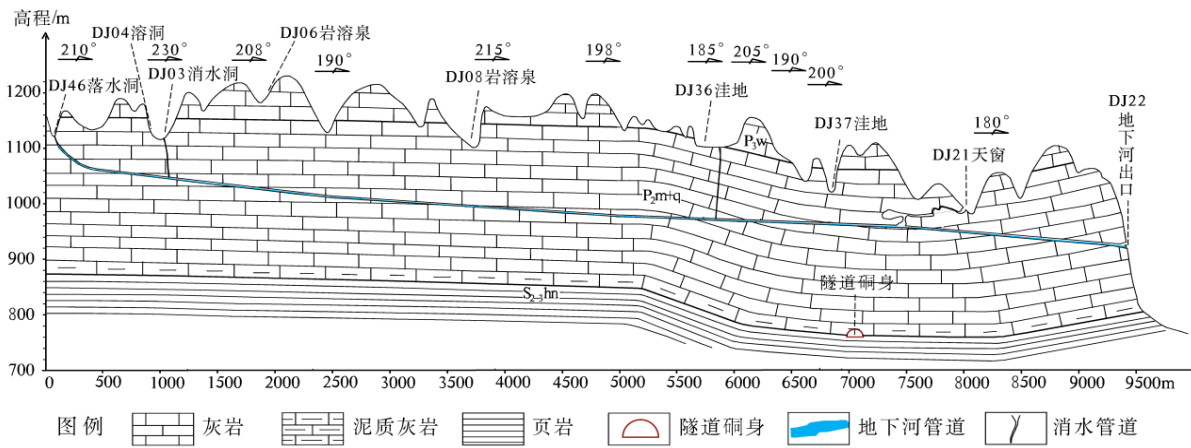
**Table 1.** List of water storage structure types in tunnel sections  
**表 1.** 隧道区段蓄水构造类型一览表

隧道分段	蓄水构造类型	地质构造
ZK6+760~ZK7+200	断层裂隙型和层间裂隙型	文新断层
ZK7+200~ZK8+150	地下河及管道型	长丰背斜
ZK8+150~ZK8+550	节理裂隙型和层间裂隙型	单斜
ZK8+550~ZK9+100	层间岩溶型和裂隙岩溶型	单斜
ZK9+100~ZK9+650	节理裂隙型和层间裂隙型	单斜
ZK9+650~ZK10+500	地下河及管道型	石朝向斜
ZK9+500~ZK12+170	节理裂隙型和层间裂隙型	单斜

统，其空间总体展布是受北北东向展布的石朝向斜控制。

闹水岩地下河系统处于溶丘洼地，沿石朝向斜发育。石朝向斜核部为夜郎组(T<sub>1y</sub>)，翼部由吴家坪 - 长兴组(P<sub>3w-c</sub>)和栖霞 - 茅口组(P<sub>2q-m</sub>)等灰岩组成，向斜核部洼地、落水洞非常发育，两翼较完整，地下水汇水条件良好，各含水岩组之间具有良好的水力联系。补给方式以消、落水洞及地表溪沟水伏流灌入补给为主。系统东北部地表水系发育，主要接受明溪地表水汇流补给。地下河管道经煤厂 DJ04 洼地 - DJ03 (消水洞) - DJ05 (消水洞) - 沙溪岩溶洼地 - DJ21 (地下河天窗)径流补给于闹水村出露。汇水面积 29.1 km<sup>2</sup>。

地下河总体由北向南方向径流，在向斜南西翘起端，受灰岩与页岩的接触面上形成的水平溶洞出露，层控型地下河系统。因此，该岩溶蓄水构造为典型的地下河及管道型蓄水构造[10] [11]。该类岩溶蓄水构造，对隧道施工安全影响极大。从地下河的剖面图可以看出，隧道位于地下河下方。见图 3。因此，地下河管道为隧道涌水最大的风险来源。



**Figure 3.** Hydrogeologic profile of the Naoshui Yan underground river system

**图 3.** 闹水岩地下河剖面图

## 4. 蓄水构造水文地质分析及涌量预测

### 4.1. 典型蓄水构造水文地质分析

裂隙蓄水构造均处于碎屑岩中，围岩多处于弱风化状态，破碎地带风化较严重，有裂隙水渗漏，在

裂隙发育带可能涌现裂隙水及滴渗水,涌水量不大[14]。然而,岩溶蓄水构造是造成岩溶涌水的重要因素。特别是断层影响带、背斜和向斜核部,岩溶往往较发育,极易形成地下河及管道型蓄水构造,往往造成大型、特大型岩溶涌水,对隧道施工安全影响极大。如:隧道 ZK9+650~ZK10+500 段。

本段(ZK9+650~ZK10+500)隧道横穿石朝向斜,地层为二叠系中下统灰岩夹泥质条带灰岩,属于区域中强岩溶发育地层。隧道区处于闹水岩地下河系统的下游补给——径流区,汇水范围较大,隧道洞身处于枯水期地下水位以下地下河排水口以上的饱水含水带,地下水位高出隧道洞身约 210 m,地表有岩溶干谷及大量洼地及落水洞。从钻孔数据分析,隧道洞体上部岩层夹的 6.3 m 厚钙质泥岩,从一定程度上制约了岩溶向下发育的程度和规模,但在向斜部面附近构造裂隙较发育往往发育裂隙状为主的溶洞、溶隙。因此,具备了岩溶涌水的必要条件,其涌水机率大,可能遇到裂隙状溶洞或岩溶管道并产生有压突水、突泥,其涌水量  $Q$  由动储量  $Q_1$  和静储量  $Q_2$  两部份组成。

### 4.2. 典型岩溶蓄水构造涌水量预测

岩溶隧道突涌水预测方法主要有水文地质比拟法、径流模数法、水文地质数值法等,但采用何种方法、如何确定参数使得隧道的涌水量大小预测更加符合实际涌水量的大小,一直是个难题[15][16][17]。《隧道岩溶涌水专家评判系统》在深入分析隧道岩溶涌水的机理上,构建了评判模型,并提出了参数的选取,在我国铁路、公路隧道建设中得到了广泛应用[18][19][20][21]。本隧道采用该方法评价,涌水量  $Q$  由动储量  $Q_1$  和静储量  $Q_2$  两部份组成。

动储量( $Q_1$ )为强降雨期引起的最大涌水量,采用大气降水入渗系数法估算:

$$Q_1 = N \cdot \alpha \cdot A \cdot F / T \quad [20] [21] \quad (1)$$

式(1)中:  $Q_1$  为强降雨期引起的最大涌水量,  $m^3/d$ ;  $N$  为涌入系数;  $\alpha$  为入渗系数;  $A$  为一个降雨过程的最大降雨量,  $mm$ ;  $F$  为汇水面积,  $km^2$ ;  $T$  为降雨周期,  $d$ 。

本文静储量( $Q_2$ )采用地下水疏干法进行计算:

$$Q_2 = \mu \cdot L \cdot H \cdot R / T \quad [20] [21] \quad (2)$$

式(2)中:  $L$  为按多个涌水带,  $m$ ;  $H$  为隧道底板以上水头,  $m$ ;  $R$  为漏斗扩散半径,  $m$ ;  $\mu$  为给水度;  $T$  为疏干时间,  $d$ 。

隧道涌水部位的外水压力( $P$ )采用下式估算:

$$P = 0.001\beta \cdot \gamma \cdot H \quad [20] [21] \quad (3)$$

式(3)中:  $P$  为外水压力,  $MPa$ ;  $\gamma$  为水容重,  $KN/m^3$ ;  $H$  为计算点水头,  $m$ ;  $\beta$  水头折减系数。

上述有关参数按《隧道岩溶涌水专家评判系统》给出,计算参数见表 2,涌水量计算结果见表 3。

**Table 2.** Calculation parameters of tunnel water inflow in typical karst water storage structure area

**表 2.** 典型岩溶蓄水构造区隧道涌水量计算参数表

隧道段	动储量参数					静储量参数					外水压力参数	
	$N$	$\alpha$	$A$	$F$	$T$	$L$	$H$	$R$	$\mu$	$T$	$\beta$	$\gamma$
ZK9+650~ZK10+500	0.2	0.3	200	29.1	2	90	210	4200	0.0005	5	0.75	9.8

**Table 3.** Calculation results of tunnel water inflow in typical karst water storage structure area

**表 3.** 典型岩溶蓄水构造区隧道涌水计算结果表

隧道段	动储量 $m^3/d$	静储量 $m^3/d$	最大涌水量 $m^3/d$	外水压力 $MPa$
ZK9+650~ZK10+500	$17.46 \times 10^4$	$0.79 \times 10^4$	$18.25 \times 10^4$	1.54

## 5. 结论

德江隧道为典型的特长强岩溶隧道, 隧道洞身大部分穿越岩溶蓄水构造。地层上以  $O_1t-h$  和  $P_2q-m$ 、 $P_3w-c$  的灰岩为主, 构造上横穿文新断层、长丰背斜和石朝向斜, 且地表、地下岩溶发育, 发育大型地下河系统——闹水岩地下河。本文在前人划分岩溶蓄水构造类型的基础上, 结合地层地质构造和地下水系统结构, 对隧道涉及的不同蓄水构造进行水文地质分析, 着重分析了典型岩溶蓄水构造与隧道洞身的空间位置关系及水力联系。指出涉及地下河及管道型岩溶蓄水构造区段, 为施工揭露岩溶管道的机率较高地段, 特别是大雨过后极易产生突水、突泥等灾害。并采用大气降水入渗系数法、地下水疏干法, 参照《隧道岩溶涌水专家评判系统》选取参数, 对典型地下河及管道型岩溶蓄水构造区段(ZK9+650~ZK10+500段)涌水量进行综合计算与评价。给出暴雨期, 涌水量达  $18.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  [22], 涌水部位外水压力约为 1.54 MPa, 隧道施工过程应予以特别注意的建议。施工证实, 依据上述工作方法进行隧道岩溶涌水分析, 预测的涌水位置、涌水量及涌水部位外水压力值更接近实际, 是确保隧道施工安全及全线顺利贯通的有力保障。

## 基金项目

贵州省交通厅科技项目(2020-123-004)。

## 参考文献

- [1] 杨振华, 宋小庆, 屈秋楠, 等. 岩溶地区水资源-环境系统服务功能评价修正——以贵州省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1259-1268.
- [2] 王明章, 贵州省地质调查院. 贵州岩溶石山生态地质环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [3] Kiraly, L. (2003) Karstification and Groundwater Flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1, 1-26.
- [4] 柴春阳, 巫锡勇, 张广泽. 丽香铁路岩溶发育特征及对隧道工程的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 114-117+123.
- [5] 田清朝, 万军伟, 黄琨, 等. 高家坪隧道岩溶水系统识别及涌水量预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(5): 13-19.
- [6] Estrela, T. and Sahuquillo, A. (1997) Modeling the Response of a Karstic Spring at Arteta Aquifer in Spain. *Ground Water*, 35, 18-24. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00055.x>
- [7] 钱学溥. 中国蓄水构造类型[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [8] 高奋飞, 刘宏, 邓杰文. 贵州省岩溶洼地地质成因分析[J]. 路基工程, 2012(6): 23-26.
- [9] 冯文凯, 杨星, 周强, 等. 贵州某机场场地岩溶发育特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 227-233.
- [10] 曹崇本, 周世恩. 岩溶蓄水构造电阻率模型建立及其在物探找水中的应用[J]. 贵州地质, 2014, 31(3): 223-228.
- [11] 魏云杰, 陶连金, 许有俊. 贵州某岩溶隧道构造特征及涌水危害分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(S): 78-82.
- [12] 罗云菊, 张瑞, 王新敏, 等. 岩溶槽谷区多条隧道条件下拟建隧道对岩体渗流场的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 83-89.
- [13] 曾红彪, 邵莲芬, 余宏明, 等. 贵州平坝县龙井岩溶水系统发育特征研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 155-159.
- [14] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2406-2414.
- [15] 王晓明, 曹正波. 基于水均衡方法的隧道涌水量概率预测[J]. 交通标准化, 2014, 42(23): 112-114+118.
- [16] 刘佳, 刘晒搏, 曹文翰, 等. 隧道涌水量预测计算方法总结探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(2): 33-37.
- [17] 李亮经, 马广海, 田佳辉, 等. 坎上铁矿水文地质特征及涌水量预测[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 37-41.
- [18] 杜毓超, 韩行瑞, 李兆林. 基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统及其应用[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 281-287.
- [19] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218.
- [20] 杜毓超, 李兆林, 韩行瑞, 等. 沪蓉高速公路乌池坝隧道区岩溶发育特征及其涌水分析[J]. 中国岩溶, 2008,

27(1): 11-18.

- [21] 韩行瑞, 徐健, 白山云, 等. 隧道岩溶涌水预报与处治——专家评判系统在沪蓉高速公路的应用[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2010.
- [22] 林永生, 杜毓超, 朱丹尼, 等. 贵州省德江隧道岩溶水文地质特征及涌水量预测[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 63-70.