

黄盛财, 成建梅, 巴净慧, 等. 基于滇中典型狭窄单斜岩溶水系统特征的隧洞涌水条件分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 528-537.
DOI: 10.11932/karst20230305

基于滇中典型狭窄单斜岩溶水系统特征的 隧洞涌水条件分析

黄盛财¹, 成建梅¹, 巴净慧², 李仲夏¹, 徐文杰², 王 研²

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430078; 2. 云南地质工程第二勘察院有限公司, 云南 昆明 650218)

摘 要: 中国西南地区分布着大面积的碳酸盐岩, 地层和构造的空间组合结构差异形成了多种复杂而各具特色的岩溶水系统。当隧洞穿越岩溶水系统时, 涌水问题表现各异, 涌水条件难以识别, 这一直是隧洞工程建设面临的重要挑战。滇中引水工程小扑隧洞隧址区发育线状延伸、紧密互层的可溶与非可溶岩地层, 构成典型的狭窄单斜岩溶水系统。文章细致梳理研究区岩溶水系统特征的控制性因素, 结合地下水监测信息和水化学特征识别小扑隧洞的涌水条件。结果表明: 狭窄单斜构造影响了岩溶发育的空间格局和地下水的径流及转换方式, 控制着含水层介质发育和地下水补径排分布的特征, 进而可将研究区细分为4个特征各异的小尺度岩溶水系统。小扑隧洞不同段穿越的岩溶水系统特征差异较大, 隧洞涌水经历的水文地球化学作用过程不尽相同, 综合认为隧洞1#洞段涌水来源于暗河管道, 2#洞段涌水为揭露岩溶裂隙所致, 补给高程分别为2 165.4 m和2 234.69 m, 并初步确定各自的充水水源补给范围。研究结果可为后续隧洞防排水工程方案设计以及突涌水灾害防治提供依据。

关键词: 狭窄单斜构造; 岩溶水系统; 水化学特征; 涌水条件

中图分类号: P641; U456 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 03-0528-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

中国西南岩溶高原是由诸多地体与缝合带构成的, 各个地体之间的运动, 致使地层断裂和强烈褶皱, 形成了不同形态的构造形迹, 以及岩溶层组多样化的空间联系形式。其中, 平面上线状延伸的地层, 以及碳酸盐岩与非可溶岩紧密相间的间互状岩溶层组类型分布广泛^[1-4], 组成狭窄型构造。并且, 在狭窄型构造控制下可溶岩产生出不同的岩溶发育条件, 形成了独具特色的岩溶水系统^[5-7]。

在滇中溶蚀山区普遍分布着狭窄型单斜构造控

制的岩溶水系统。单斜构造的岩溶含水层组与非可溶岩相对隔水层(体)在水平向上线状延伸, 呈间隔状分布, 从而形成了诸多水文地质特征不同、相对独立、更小尺度的岩溶水系统^[8], 称为狭窄单斜岩溶水系统。在此类山区建设的交通线路和引水工程常需布设横穿构造线的地下隧洞, 如穿越牛恋村—王家湾带状岩溶含水层的小扑隧洞, 是线状工程大角度穿越构造线的典型代表之一。小扑隧洞隧址区地层与断裂构造总体向东陡倾, 出露地表呈狭窄狭长状, 可溶岩地层与非可溶岩地层间互式排列, 属于线状延伸的狭窄单斜构造。狭窄单斜的空间结构, 阻碍

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172278)

第一作者简介: 黄盛财(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩溶水文地质。E-mail: hscug@163.com。

通信作者: 成建梅(1971—), 女, 教授, 主要从事地下水水流和污染数值模拟方面的教学与科研工作。E-mail: jmcheng@cug.edu.cn。

收稿日期: 2022-08-08

了地下水的垂向渗透,因此地下水以水平运动为主,使得地下引水隧洞的建设存在很大的涌突水隐患。隧洞涌水条件的研究是解决涌水问题的核心,对涌水量预测和堵、排水方案设计起到决定性作用^[9]。人工示踪技术、水文地球化学、环境同位素和水文分析等方法在隧洞涌水条件的识别中应用广泛^[10-11]。小扑隧洞穿越多个相互独立的地下水系统,各系统水岩作用程度不同,利用水化学和同位素等信息识别涌水条件较为合适^[12]。

因此,本文以小扑隧洞隧址区牛恋村—王家湾一带为研究对象,分析滇中典型紧窄单斜岩溶水系统的特征,并利用水化学和氢氧同位素等多种手段,结合涌水的监测信息,探讨小扑隧洞的涌水条件。

1 研究区地质背景

滇中地区牛恋村—王家湾一带地处云南省昆明与玉溪两市交界处,地层出露较齐全,自元古界至新生界,除奥陶系地层在此处有沉积间断外,其他地层从昆阳群至第四系均有出露。平面上震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系以及侏罗系地层平行于构造线呈狭长条带状近南北向间互式展布(图1a)。空间上岩溶含水岩组与非可溶岩构成的相对弱透水层相间排列,整体向东陡倾,呈紧窄单斜空间结构(图1b、c、d)。岩溶地下水赋存于古生界与元古界碳酸盐岩地层中,包括二叠系阳新组(P_{ly})、石炭系中统威宁群(C_2w)、泥盆系上统(D_3)和震旦系上统灯影组(Z_{dn})、陡山沱组(Z_d)。岩溶水主要从周边含水层组裸露的山区获得大气降水补给,顺地势与构造线南北向径流,部分通过地下暗河、岩溶泉点集中排泄于岩性分界线附近,部分分散排泄于地表水体,各排泄点的分布特征和出露原因具有一定的规律性。

研究区分属扬子准地台滇东台褶带之昆明台褶束,区内发育王家湾断裂带构造(图1a)。该断裂带以两条近平行的正断层为主体,北起牛恋村附近,南至干洞村,展布长度约21 km。局部发育次级断裂。断层主体约60°东倾,断层角砾岩十分发育。由于断裂带内发育多条断层,使得附近地层被切割错动,断层两侧震旦系至二叠系之间的多套岩溶含水岩组在切割作用下相互贯通,部分含水层之间的隔水岩层失去隔水作用,进而影响小尺度岩溶水系统的边界

及特征。

岩溶层组的空间结构与断层的切割作用,造成了岩溶含水岩组空间规模、地表及地下岩溶发育程度等存在差异,进而影响岩溶水系统的边界条件和地下水补给、径流、排泄特征。

2 岩溶水系统特征分析

复杂多样的可溶岩及其与非可溶岩的组合类型,决定着区内岩溶形态及其发育规模。灰岩、白云岩、砂岩等相间分布,各地层岩石成分与可溶性岩纯度存在较大差异,导致岩溶发育程度区域性严重不均匀。在碳酸盐岩成分极高的阳新组地层(P_{ly})出露的地区,地表岩溶槽谷、洼地、落水洞等沿构造线呈串珠状分布,地下洞管发育,形成典型的地表地下双层空间结构^[13];而可溶岩与非可溶岩互层的陡山沱组(Z_d),主要岩溶形态为溶孔、溶隙。不同的岩溶发育程度,造成岩溶地下水系统补给、径流、排泄特征存在差异,主要表现在地表岩溶形态影响大气降雨补给地下水的汇水条件,地下岩溶形态构成的网络空间则影响着地下水的径流、排泄状态。为了精细刻画岩溶水系统特征,分析小扑隧洞各段的涌水条件,本文基于研究区地质环境背景,以岩溶含水介质、地下水埋藏条件、补给、径流、排泄特征差异将研究区划分为4个小尺度岩溶水系统(图1,表1)。

2.1 裸露—覆盖隙—管流集中排泄型

该类型是指岩溶含水层组由裸露岩溶山区延伸至松散土层覆盖区、地下水沿溶隙—溶管组合介质通道径流并以岩溶泉或暗河形式集中排泄的岩溶水系统,分布于对门—大梨园—牛恋村一带。阳新组(P_{ly})与玄武岩组(P_{β})、宰格组(D_{3zg})与海口组(D_{2h})的界线分别构成系统的东、西边界,南边界为地下分水岭,北边界为滇池南岸。阳新组(P_{ly})、泥盆—石炭系($D+C$)和灯影组(Z_{dn})含水岩组在断层切割作用下,形成一套区内规模最大、富水性强的含水系统,是对隧洞威胁最大的充水水源。系统内岩溶非常发育,为地下水接受降雨汇集下渗补给、快速径流循环创造了有利的条件。地下水在裸露区接受大气降雨集中贯入补给,由南向北径流,埋深较浅的地下水在观音村遇第四系覆盖层下伏出露成泉排泄,埋深较大的地下水继续往北径流至牛恋村排泄(图2a)。

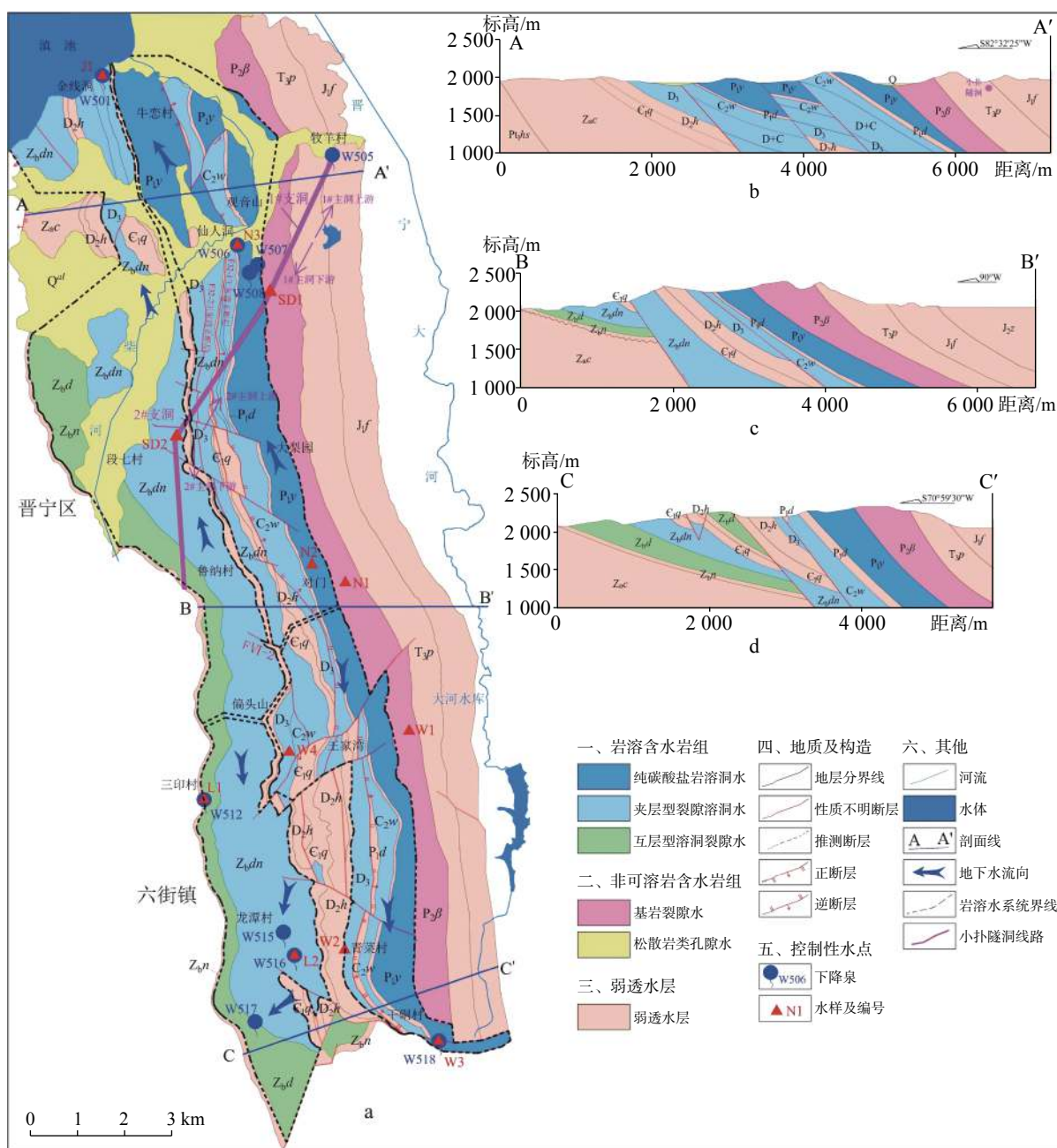


图1 研究区水文地质略图及小补隧洞位置

Fig. 1 Sketch map of hydrogeology and location of Xiaopu tunnel in the study area

2.2 裸露管流集中排泄型

该类型是指岩溶含水层组由岩溶山地补给区延伸至排泄区基本呈裸露展布、地下水沿溶管通道径流并以岩溶泉或暗河形式集中排泄的岩溶水系统，分布于王家湾—青菜村—干洞村一带。系统东、西、南边界分别为阳新组(P_{1y})与玄武岩组($P_{2\beta}$)、宰格组(D_{3zg})与海口组(D_{2h})、阳新组(P_{1y})与澄江组(Z_{4c})的界线，北边界为地下分水岭。阳新组(P_{1y})和泥盆—石炭系($D+C$)构成系统主要含水岩组，在断层

切割作用下相互连通。系统内地下暗河管道发育，受构造和岩性的控制，其走向与地层走向和构造线方向一致，暗河与岩溶竖井、落水洞等直接连通，雨季降雨迅速汇集顺层向下运移补给地下水，在紧窄单斜构造控制下，地下水径流深度较浅，沿岩溶管道由北向南集中径流至干洞村成泉排泄(图2b)。

2.3 裸露—覆盖隙流复合排泄型

该类型是指岩溶含水层组由裸露岩溶山区延伸至松散土层覆盖区、地下水沿裂隙、溶隙介质通道

表 1 紧窄单斜小尺度岩溶水系统特征

Table 1 Characteristics of the tight-narrow monoclinic karst water system at a small scale

岩溶水系统名称	对门—大梨园—牛恋村	王家湾—青菜村—干洞村	偏头山—鲁纳村—金钱洞	三印村—龙潭村
特征	裸露-覆盖隙-管流集中排泄型	裸露管流集中排泄型	裸露-覆盖隙流复合排泄型	裸露隙流集中排泄型
含水岩组	二叠系阳新组、泥盆系—石炭系、震旦系灯影组	二叠系阳新组、泥盆系—石炭系	震旦系灯影组、陡山沱组	
含水介质	溶隙、溶管	溶管	裂隙、溶隙	
空间结构	单斜、陡倾			
补给方式	集中贯入		分散入渗	
补给特点	量大、集中、迅速		连续、面广	
径流方式	顺岩层走向集中流		顺岩层走向散流	四周散流
径流面积	25.6 km ²	15 km ²	23.4 km ²	13.9 km ²
排泄方式	集中排泄		集中排泄和湖盆排泄带分散排泄	集中排泄
排泄高程	1 886~1 932 m	2 149 m	1 890 m	2 105~2 114 m
泉成因	溢流	溢流	侵蚀	溢流、侵蚀
动态特征	季节性、水文响应快		水量稳定、水文响应滞后	
岩溶水系统边界	岩性界线、分水岭、滇池南岸	岩性界线、分水岭	岩性界线、分水岭、滇池南岸	岩性界线、分水岭

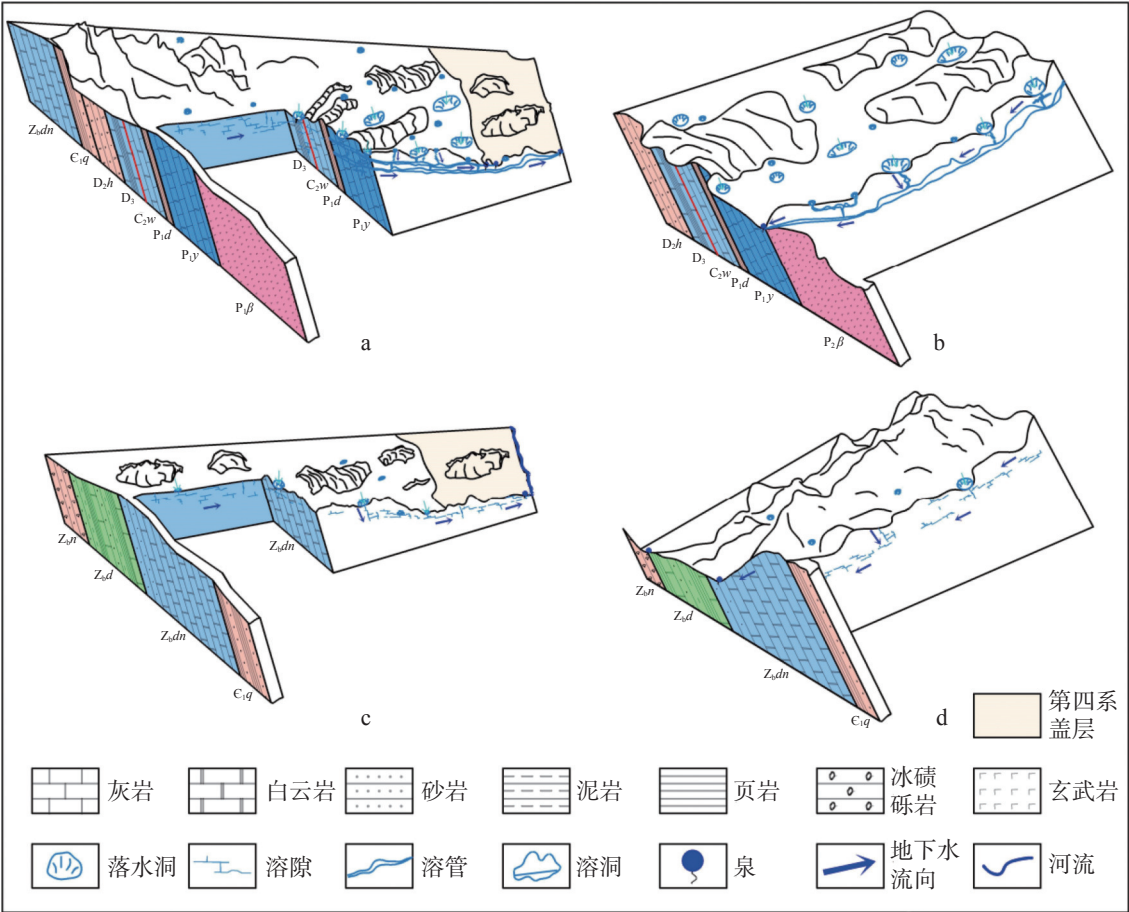


图 2 滇中典型紧窄单斜岩溶水系统结构示意图

a-裸露-覆盖隙-管流集中排泄型 b-裸露管流集中排泄型 c-裸露-覆盖隙流复合排泄型 d-裸露隙流集中排泄型

Fig. 2 Schematic diagram of the typical tight-narrow monoclinic karst water system in central Yunnan Province

a.bare-covered fissure flow and conduit flow with concentrated discharge, b.bare conduit flow with concentrated discharge, c.bare-covered fissure flow with multiplex discharge, d.bare fissure flow with concentrated discharge

径流并在盆地边缘或分散或集中排泄的岩溶水系统,分布于偏头山—鲁纳村—金线洞一带。灯影组(Z_{6dn})与筇竹寺组(C_{1q})、陡山沱组(Z_{6d})与南沱组(Z_{6n})的岩性界线分别构成系统的东、西边界,南边界为地下分水岭,北边界为滇池南岸。该系统主要含水岩组为灯影组(Z_{6dn})和陡山沱组(Z_{6d})。系统内岩溶较发育,在岩溶裸露区,沿构造线偶有岩溶洼地、落水洞分布,大气降雨汇集顺层向下运移补给岩溶含水层。在水平径流带,地下水沿溶隙、裂隙网络由南向北流动,部分在金线洞出露成泉集中排泄,部分沿滇池南岸边缘分散排泄(图 2c)。

2.4 裸露隙流集中排泄型

该类型是指岩溶含水层组基本呈裸露展布、地下水沿裂隙、溶隙介质通道径流并以岩溶泉形式集中排泄的岩溶水系统,分布于三印村—龙潭村一带。系统东边界为灯影组(Z_{6dn})与筇竹寺组(C_{1q})岩性分界线,西、南边界为陡山沱组(Z_{6d})与南沱组(Z_{6n})岩性分界线构成的物理隔水边界,北边界为偏头山一带的地下分水岭。灯影组(Z_{6dn})和陡山沱组(Z_{6d})构成系统主要的含水岩组。地下水主要通过地形坡面上的裂隙及溶蚀裂隙接受大气降雨分散入渗补给,在地形地貌控制下,径流至山前沟谷切割处以泉形式出露,径流途径短,埋深较大的地下水沿裂隙、溶隙至岩性界线附近成泉集中排泄(图 2d)。

3 隧洞涌水条件研究

小扑隧洞位于云南省玉溪市境内,隧洞底板设计高程 1 882~1 850 m。自施工以来,在多个洞段出

现不同程度的涌水现象,涌水量大且持续时间长,涌水变化过程的复杂性为隧洞施工带来极大困扰,因此迫切需要查明涌水段的充水水源和充水途径。

3.1 隧洞涌水条件分析

小扑隧洞 1#支洞布置于观音山南侧,距隧洞进口 1.9 km; 2#支洞布置于段七村,距隧洞进口 6.8 km。支洞贯通后分别向进口段和出口段进行上游和下游的双向施工(图 1a),隧洞发生涌水时,采用疏导方式分别向支洞出口进行排水。1#洞段最大涌水量 $42.9 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$,历时 60 天后以 $28.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$ 的涌水量保持稳定,涌水段围岩为阳新组灰岩; 2#洞段最大涌水量为 $26.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$,稳定涌水量为 $12.9 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$,涌水段围岩为白云岩,岩石强烈砂化,局部存在破碎带(图 3)。

分清岩溶水系统是分析隧洞涌水的首要前提条件^[14]。小扑隧洞先后穿越了研究区内两个岩溶水系统(图 3),底板高程低于暗河管道发育高程(1 910~1 930 m)和岩溶水系统排泄基准(1 890 m),隧洞开挖可能构成岩溶水系统新的最强势汇,破坏隧洞高程以上的地下水循环,影响岩溶水系统的排泄。研究区岩溶水文地质条件作为影响小扑隧洞涌水灾害的客观因素之一,系统特征差异将导致隧洞 1#洞段和 2#洞段涌水条件的不同。

1#支洞及其主洞段穿越对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统裸露的山区,为岩溶水系统的补给、径流区,隧洞埋深低于泉点高程,施工后将成为岩溶水流系统新的排泄通道,对径流量进行截排。据监测信息,1#洞段排水量急剧增大的同时,位于隧洞下游的浅层岩溶水排泄泉 W507 和 W508(出露高程 1 930~

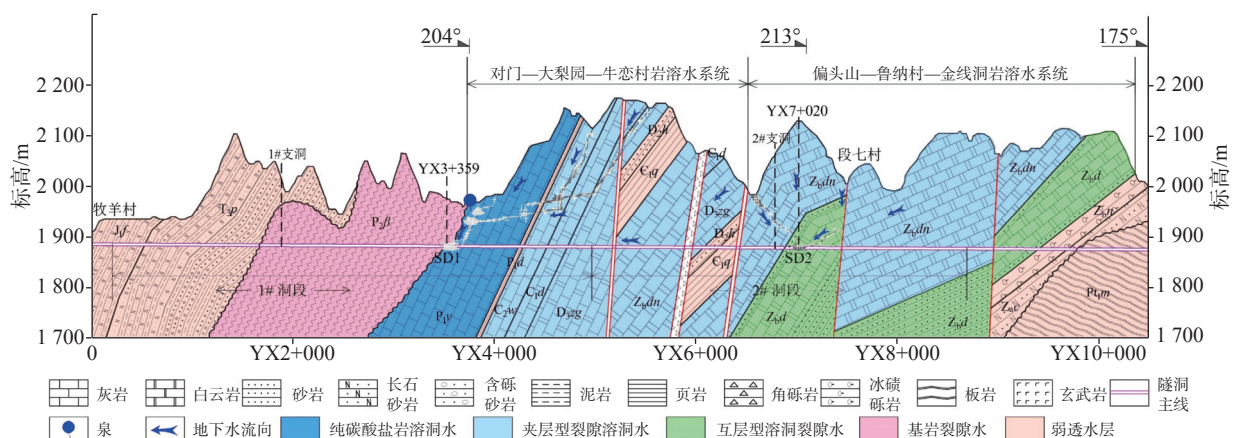


图 3 小扑隧洞沿线水文地质剖面图

Fig. 3 Hydrogeological profile along Xiaopu tunnel

1 932 m)流量迅速衰减至干涸,说明隧洞涌水与泉 W507 和 W508 充水途径相同,为系统内发育的浅层岩溶管道。对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统地下水以近水平溶管径流为主,地下水循环深度相对较浅,汇水面积大,因而隧洞施工时涌水量较大。2#支洞及其主洞段穿越偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统,同 1#洞段一样位于系统的补给、径流区,但该岩溶水系统以裂隙、溶隙型含水介质为主,相较于以溶管为主的岩溶水,岩溶裂隙水的水动力条件较弱,涌水量较小且稳定。

3.2 水化学特征

水化学与环境同位素信息作为天然示踪剂,可为隧洞涌水水源的判断提供可靠的识别结果^[12, 15]。于 2021 年 4 月在研究区多处水点进行了取样分析,TDS 和HCO₃⁻在取样现场分别通过便携式 HACH 水质参数仪和滴定法完成测试,水样中的其他阴阳离子在中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心分别用离子色谱仪(883 Basic IC plus)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)完成测试,测试结果见表 2。

研究区各小尺度岩溶水系统因含水岩组的差异,水岩作用不同,导致地下水的水化学类型存在明显区别。西侧偏头山—鲁纳村—金线洞和三印村—龙潭村两个岩溶水系统地下水化学类型主要为 HCO₃-Ca·Mg 型,与 2#洞段涌水水化学类型一致,为较纯的

岩溶水,地下水中较高的 Ca²⁺和 Mg²⁺表明灯影组地层白云岩溶蚀作用是控制岩溶水水质的主要水化学过程。而东侧对门—大梨园—牛恋村、王家湾—青菜村—干硐村两个岩溶水系统含水岩组较多,地下水水化学类型主要为 HCO₃·SO₄-Ca·Mg,含量偏高的 SO₄²⁻表明岩溶地下水水质可能受到了赋存于地层中的石膏等矿物溶蚀的影响。1#洞段涌水与对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统的泉水的水化学类型相似,再一次指示了相同的成因和来源。

微量成分 Ba²⁺在不同岩溶水系统中也表现出明显差异,偏头山—鲁纳村—金线洞和三印村—龙潭村两个岩溶水系统的地下水中 Ba²⁺浓度较低,为 0.003~0.006 mg·L⁻¹,而对门—大梨园—牛恋村、王家湾—青菜村两个岩溶水系统地下水中 Ba²⁺却沿着地下水径流方向浓度升高(图 4a)。这是由于研究区石炭系中统威宁群组和泥盆系上统地层岩石中含有重晶石矿物^[16],重晶石溶解是研究区地下水中微量成分 Ba²⁺的主要来源。在对门—大梨园—牛恋村与王家湾—青菜村—干硐村岩溶水系统中,由于王家湾断层及其次级断层的错动切割,阳新组、泥盆—石炭系、灯影组三套含水岩组具有水力联系,沿着地下水径流方向,随着碳酸盐岩矿物与重晶石矿物的溶解,地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和 Ba²⁺浓度逐渐增大。而偏头山—鲁纳村—金线洞和三印村—龙潭村岩溶水系统含水岩组为灯影组和陡山沱组,地下水中 Ba²⁺浓度

表 2 小扑隧洞区水样的水化学测试结果
Table 2 Hydrogeological test results of water samples in Xiaopu tunnel area

编号	取样位置	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ba ²⁺	HCO ₃ ⁻	TDS	舒卡列夫水 化学分类
		mg·L ⁻¹					
N1	对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统	7.67	3.71	0.001 9	18.3	32	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg·Na
N2		31.65	10.48	0.007 6	48.8	100	HCO ₃ -Ca·Mg
N3		143.50	36.19	0.060 0	97.6	385	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
J1	偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统	10.80	2.46	0.003 3	115.9	222	HCO ₃ -Ca·Na
W1	王家湾—青菜村—干硐村岩溶水系统	12.01	4.87	0.012 6	30.5	45	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
W2		13.40	8.26	0.003 7	18.3	59	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Mg·Ca
W3		—	14.99	0.040 1	—	—	—
W4		43.90	19.33	0.112 2	79.3	147	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
L1	三印村—龙潭村岩溶水系统	55.39	20.26	0.003 6	134.2	208	HCO ₃ -Ca·Mg
L2		13.49	1.04	0.004 0	51.3	102	HCO ₃ -Ca
SD1	1#洞段涌水	51.26	18.22	0.018 5	81.8	172	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
SD2	2#洞段涌水	40.34	18.92	0.006 2	85.4	134	HCO ₃ -Ca·Mg

注：“—”未检测。
Note: “—” Not detect.

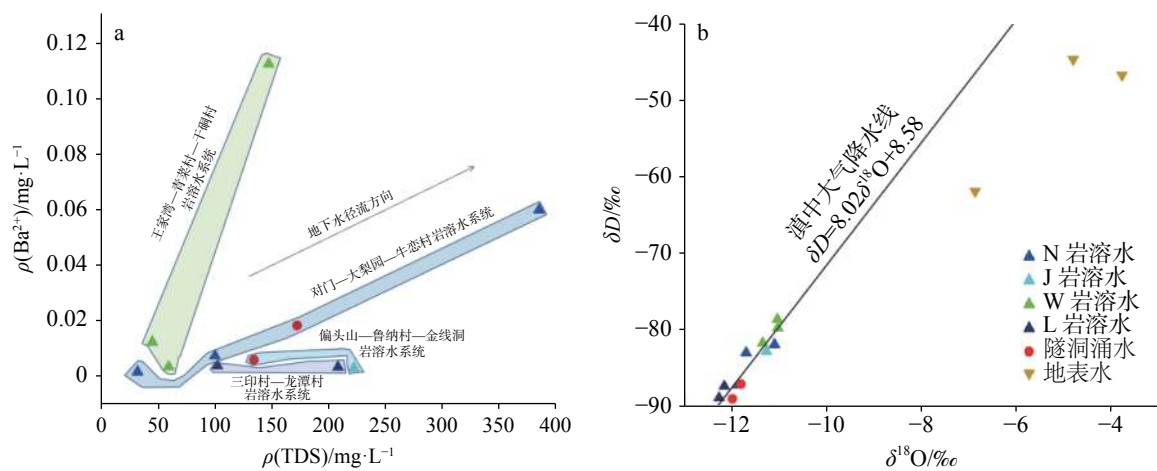


图4 a-地下水中 Ba^{2+} 质量浓度沿地下水流向变化曲线, b-小扑隧洞涌水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图

N- 对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统 J-偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统 W- 王家湾—青菜村—干洞村岩溶水系统 L- 三印村—龙潭村岩溶水系统

Fig. 4 a-Variation curves of mass concentration of Ba^{2+} in the groundwater flow direction;

b-Plot of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ in water inflow of Xiaopu tunnel

N.Duimen-Daliyuan-Niuliancun karst water system; J.Piantoushan-Lunacun-Jinxiandong karst water system; W. Wangjiawan-Qingcaicun-Gandongcun karst water system; L. Sanyincun-Longtancun karst water system

较低。

3.3 氢氧同位素特征

各岩溶水系统地下水同位素组成较为集中地分布在滇中降水线附近^[17](图 4b), 说明岩溶水来自于大气降水的补给。王家湾—青菜村—干洞村岩溶水系统地下水以浅层发育的洞管径流为主, 地下水埋深浅而径流途径较长, 相对于其他岩溶水系统, 该系统的地下水受到的蒸发作用较强而富集重同位素。对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统地下水具有分层排泄的特点, 浅层岩溶水径流途径短而深层岩溶水径流途径长, 因而同位素分布较为离散。偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统也因径流途径长, 加之地下水以裂隙网络慢速流为主, 滞留时间较长, 蒸发作用或水岩相互作用相对强, 更加富集重同位素。而三印村—龙潭村岩溶水系统地下水就近补给就近排泄, 地下水径流途径最短, 蒸发作用弱, 氢氧同位素偏负。

隧洞涌水的同位素组成明显区别于地表水, 而与地下水的同位素组成相似(图 4b), 可以排除隧洞涌水来源于地表水涌入的可能。1#洞段涌水在对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统地下水同位素组成中相对偏负, 指示其为径流途径短的浅层管道水涌入所致, 这与前文分析的结果一致。2#洞段位于偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统的补给径流区, 因而相较于下游排泄区金线洞泉的氢氧同位素贫化。

山区大气降水氢氧同位素组成具有高程效应, 表现为氢氧同位素组成随高程的增加呈线性贫化^[18]。研究区地下水主要接受大气降雨补给, 循环更替较快, 因此可以根据高程效应利用涌水的氢氧同位素组成推算其补给高程。于津生(1980)指出西南地区海拔每增加 100 m, $\delta^{18}\text{O}$ 减少 0.26‰^[19]。基于于津生的研究, 选取研究区补给高程确定的大庄村泉 W516, 测定泉水氢氧同位素组成 ($\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}=-87.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=-12.15\text{‰}$), 根据其补给高程 2300 m, 建立研究区现代大气降雨入渗成因地下水补给高程计算式:

$$H = 2300 - \frac{\delta^{18}\text{O} + 12.15}{0.26} \times 100$$

式中: H 为地下水推算补给高程(m); $\delta^{18}\text{O}$ 为地下水 ^{18}O 同位素组成(‰)。

测定同一时间采取的隧洞涌水的氢氧同位素组成, 推算其补给高程(表 3)。

表 3 隧洞涌水补给高程计算结果

Table 3 Calculation results of the recharge elevation of tunnel water inflow

项目	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}/\text{‰}$	推算补给高程/m
1#洞段涌水	-87.12	-11.8	2165.4
2#洞段涌水	-89.05	-11.98	2234.6

研究区王家湾一带的岩溶洼地高程约 2 201 m,

由此可推断 1#洞段涌水的补给范围主要为王家湾以北的区域,这一区域的平均高程较王家湾岩溶洼地的平均高程要低,王家湾—青菜村—干砣村岩溶水系统的补给范围则覆盖了王家湾岩溶洼地及其以南的区域(图 1a)。王家湾以北区域的岩溶洼地和落水洞接受大气降雨补给后向北径流,小扑隧洞 1#洞段的施工改变了局部的地下水流动场,对原本向北排泄于泉 W507 和 W508 的地下径流产生了截引作用,这是泉 W507 和 W508 断流的主要原因。2#洞段涌水高于 1#洞段涌水的补给高程,二者涌水高程相近,反映出 2#洞段涌水的循环深度较深,推断其补给范围为偏头山北部的脊岭斜坡地带,地下水以慢速溶隙扩散流为主,水量稳定,储存量大。隧洞施工后,改变了局部的水动力条件,上游的地下水通过裂隙、溶隙汇集后稳定涌入隧洞。

4 结 论

(1)小扑隧洞隧址区可溶岩地层与非可溶岩地层条带状间互式排列,呈紧窄单斜空间结构。在这种构造体系控制下,研究区可溶岩与非可溶岩组合类型复杂多样,岩溶发育程度不同,造成岩溶地下水系统补给、径流、排泄特征及系统边界存在差异。因而将研究区精细划分为裸露-覆盖隙-管流集中排泄型、裸露管流集中排泄型、裸露—覆盖隙流复合排泄型和裸露隙流集中排泄型 4 类小尺度岩溶水系统;

(2)岩溶水系统特征差异,导致小扑隧洞不同洞段涌水条件不同。小扑隧洞 1#洞段涌水为揭穿暗河管道,截引下游浅层岩溶排泄泉流量所致,岩溶管道构成主要充水途径,暗河水为充水水源,补给高程 2 165.4 m,主要位于王家湾以北区域的岩溶洼地;2#洞段涌水为揭露岩溶裂隙所致,裂隙网络构成主要充水途径,灯影组地下水为充水水源,补给高程 2 234.6 m,主要位于偏头山北部的脊岭斜坡地带;

(3)岩溶隧洞涌水来源的识别应结合岩溶水系统特征选用合适的技术手段。小扑隧洞穿越不同的岩溶水系统,不同洞段涌水经历了不同的水岩作用和蒸发作用,反映在地下水组分上较大的差别。1#洞段穿越的对门—大梨园—牛恋村岩溶水系统地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$,因含水岩组中重晶石矿物的溶解,水中 Ba^{2+} 浓度偏高;2#洞段穿越的

偏头山—鲁纳村—金线洞岩溶水系统地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$,是较纯的岩溶水,且因以裂隙网络慢速流为主,水岩作用和蒸发作用相对较强,更加富集重同位素。因而水化学和同位素组成信息可以用作指示不同洞段涌水来源的示踪剂。

参考文献

- [1] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Karst Research Group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Karst research in China[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [2] 刘训, 李廷栋, 耿树方, 游国庆. 中国大地构造区划及若干问题[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1024-1034.
LIU Xun, LI Tingdong, GENG Shufang, YOU Guoqing. Geotectonic division of China and some related problems[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1024-1034.
- [3] 王宇. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
WANG Yu. Storage rule of karst water in fault basin[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003.
- [4] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 裴建国, 何师意, 梁彬. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报, 2006(5): 495-502.
JIANG Zhongcheng, XIA Riyuan, SHI Jian, PEI Jianguo, HE Shiyi, LIANG Bin. The application effects and exploitation capacity of karst underground water resources in Southwest China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006(5): 495-502.
- [5] 李潇, 漆继红, 许模. 西南典型紧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.
- [6] 郭绪磊, 周宏, 罗明明, 黄琨, 况野, 曾圆梦, 陈一帆, 张苏雅. 黄陵穹隆周缘岩溶水流系统特征及成因[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 328-340.
GUO Xulei, ZHOU Hong, LUO Mingming, HUANG Kun, KUANG Ye, ZENG Yuanmeng, CHEN Yifan, ZHANG Suyu. Characteristics and genesis of karst water flow system around Huangling anticline[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 328-340.
- [7] 裴建国, 梁茂珍, 陈阵. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 6-10.
PEI Jianguo, LIANG Maozhen, CHEN Zhen. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in Southwest China karst mountain[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(1): 6-10.
- [8] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3):

- 283-295.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong. Zoning of environmental geology and functions in karst fault depression basins[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 283-295.
- [9] 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.
- [10] 郭纯青, 田西昭. 岩溶隧道涌水量综合预测: 以朱家岩岩溶隧道为例[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 1-8.
- GUO Chunqing, TIAN Xizhao. A comprehensive forecast of water inflow in karst tunnels: Exemplified by the Zhujiayan karst tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 1-8.
- [11] 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.
- [12] Luo Mingming, Chen Zhihua, Criss Robert E, Zhou Hong, Huang He, Han Zhaofeng, Shi Tingting. Dynamics and anthropogenic impacts of multiple karst flow systems in a mountainous area of South China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(8): 1993-2002.
- [13] 张华, 王宇, 柴金龙. 滇池流域石漠化特征分析[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(2): 181-186.
- ZHANG Hua, WANG Yu, CHAI Jinlong. Analysis on the desert's characteristics in Dianchi watershed[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(2): 181-186.
- [14] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春. 特长岩溶隧道涌水预测的系统辨识方法[J]. *水文地质工程地质*, 2002, 29(4): 50-54.
- XU Zemin, HUANG Runqiu, LUO Xingchun. Identification of karst water system in long tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 29(4): 50-54.
- [15] 连会青, 刘德民, 尹尚先. 水化学综合识别模式在矿井水源判别中的应用[J]. *煤炭工程*, 2012(8): 107-109, 113.
- LIAN Huiqing, LIU Demin, YIN Shangxian. Application of hydrochemistry comprehensive identification mode to distinguish mine water resources[J]. *Coal Engineering*, 2012(8): 107-109, 113.
- [16] 谈树成, 周家喜, 罗开, 向震中, 何小虎, 张亚辉. 云南毛坪大型铅锌矿床成矿物质来源: 原位S和Pb同位素制约[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3461-3476.
- TAN Shucheng, ZHOU Jiayi, LUO Kai, XIANG Zhenzhong, HE Xiaohu, ZHANG Yahui. The sources of ore-forming elements of the Maoping large-scale Pb-Zn deposit, Yunnan Province: Constraints from in-situ S and Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(11): 3461-3476.
- [17] 彭晓红, 丁文荣. 滇中高原岩溶区典型植物旱雨季水分来源的差异特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 204-211.
- PENG Xiaohong, DING Wenrong. Different characteristics of water sources of typical plants in dry and rainy seasons in karst area of central Yunnan Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(1): 204-211.
- [18] 黄荷, 罗明明, 陈植华, 周宏, 张亮, 周彬, 史婷婷. 香溪河流域大气降水稳定氢氧同位素时空分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 36-42.
- HUANG He, LUO Mingming, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, ZHANG Liang, ZHOU Bin, SHI Tingting. The spatial and temporal distribution of stable hydrogen and oxygen isotope of meteoric water in Xiangxi river basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 36-42.
- [19] 王梅, 许模. 滇池盆地东侧黑龙潭与白龙潭水力关系研究[J]. *地下水*, 2018, 40(2): 15-17.
- WANG Mei, XU Mo. On the hydraulic connection between Heilongtan and Bailongtan in the eastern part of Dianchi basin[J]. *Ground Water*, 2018, 40(2): 15-17.

Analysis of tunnel inflow conditions based on the characteristics of typical tight-narrow monoclinic karst water system in the central Yunnan Province, China

HUANG Shengcai¹, CHENG Jianmei¹, BA Jinghui², LI Zhongxia¹, XU Wenjie², WANG Yan²

(1. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China; 2. No.2 Yunnan Institute for Geological Engineering Survey Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650218, China)

Abstract The southwest China is covered by large areas of carbonate rock strata, in which the movement of many terranes results in strong folds and rock fractures. The spatial structure diversity of strata and tectonics has formed various complex and distinctive karst water systems. Therefore, tunnels for traffic lines and water diversion projects are often built in southwest China, but when tunnels cross karst water systems, the tunnel inflow conditions are

difficult to be identified due to the complexity of water inflow, which has been a challenge in tunnel construction projects. In the Xiaopu tunnel area of the central Yunnan Province, linear extension and closely interbedded soluble and non-soluble rock strata are developed, forming a typical tight-narrow monoclinic karst water system. Since the tunnel construction, the water inrush has respectively occurred in Section 1 and Section 2 with large and long-lasting water inflow. The complexity of the water inflow brings a great challenge for the tunnel construction. Therefore, it is urgent to find out the source and mode of water inflow in Xiaopu tunnel. Focusing on specific engineering problems, this study carefully sorts out the controlling factors of the characteristics of the tight-narrow monoclinic karst water system in Xiaopu tunnel. The division of the karst water system is reduced to a small scale, and the water inflow conditions of the tunnel are identified according to the groundwater monitoring data as well as the inflow conditions such as the hydrochemical characteristics and hydrogen and oxygen isotopes of water inflow.

The results show that the tight-narrow monoclinic structure affects the spatial pattern of karst development, the runoff and the transformation mode of groundwater. This structure also controls the characteristics of aquifer media development and groundwater recharge, runoff and discharge distribution. Hence, the study area can be subdivided into four small-scale karst water systems with different characteristics, i.e., the bare-covered fissure flow and conduit flow with concentrated discharge, bare conduit flow with concentrated discharge, the bare-covered fissure flow with multiplex discharge, and the bare fissure flow with concentrated discharge. The hydrochemical type of groundwater in the Duimen-Daliyuan-Niuliancun karst water system, which is crossed by the Section 1 of Xiaopu tunnel, is mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$. And the concentration of Ba^{2+} in groundwater is higher than that in other karst water systems due to the dissolution of barite minerals in the strata of the Weining group of the middle Carboniferous and the upper Devonian. The hydrochemical type of groundwater in the Piantoushan-Lunacun-Jinxiandong karst water system crossed by Section 2 is $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, indicating relatively pure karst water. This shows that dolomite dissolution is the main hydrochemical process for controlling water quality. Due to the slow flow of the karstic fracture network, the groundwater has a long residence time in the runoff path, and the water-rock interaction and evaporation are relatively strong, thus the heavy hydrogen and oxygen isotopes are more enriched. Huge differences in hydrogen and oxygen isotope composition also rule out the possibility of surface water flooding into the tunnel. It is concluded that the water inflow in Section 1 is caused by the uncovering of the underground conduit and the interception of the discharge spring of the shallow karst downstream. The karst conduit developed in the contact zone of igneous rock constitutes the main water inflow channel, in which the groundwater in the conduit is the water source with a recharge elevation of 2,165.4 m, mainly located in the karst depression in the north of Wangjiawan. The water inflow in Section 2 is caused by the exposure of karst fissures. The fissure network constitutes the main water flow passage, and the groundwater in Dengying formation is the water source, with a recharge elevation of 2,234.6 m, mainly located in the slope area on the north ridge of Piantou mountain.

The groundwater in different karst water systems has experienced different water-rock interaction and evaporation processes. Therefore, the hydrochemistry and stable hydrogen and oxygen isotopes of groundwater are good natural tracers for tracing the source of water inflows in tunnels crossing different karst water systems. Comprehensive utilization of multiple approaches and information verification can improve the accuracy of identifying tunnel water inflow conditions, which may provide a basis for the subsequent design of tunnel drainage projects and the prevention of water inrush disasters in the tunnel.

Key words tight-narrow monoclinic structure, karst water system, hydrochemical characteristics, tunnel inflow conditions

(编辑 张玲)