



隧道工程建设对华蓥山中部岩溶地下水环境的影响

成 胜, 许 模, 夏 强

Influence of tunnel construction on karst groundwater environment in central Huaying Mountain

CHENG Sheng, XU Mo, and XIA Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究

Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie

冯海波, 董少刚, 张涛, 李铱, 刘晓波, 李政葵, 王超 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 163–163

地下水环境中的硫代砷研究进展

Advances in thioarsenic in groundwater systems

严克涛, 郭清海 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 132–141

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41–47

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62–71

川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究

Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan–Xizang Railway

李向全, 马剑飞, 张春潮, 王振兴, 付昌昌, 白占学 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 34–45

鄂尔多斯浩勒报告水源地开采地下水的环境影响分析

Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at the Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia

王旭升, 尹立河, 方坤, 张俊, 王晓勇 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 5–5



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311024](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311024)

成胜, 许模, 夏强. 隧道工程建设对华蓥山中部岩溶地下水环境的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 214-224.
CHENG Sheng, XU Mo, XIA Qiang. Influence of tunnel construction on karst groundwater environment in central Huaying Mountain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 214-224.

隧道工程建设对华蓥山中部岩溶地下水环境的影响

成 胜¹, 许 模², 夏 强²

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 华蓥山中部地质构造复杂, 碳酸盐岩广泛出露, 已建的地下工程均遭遇了不同程度的涌突水灾害并对地下水环境造成了一定程度的影响, 华蓥山现有岩溶研究精度、广度无法满足工程建设的需要, 亟需系统全面地分析岩溶涌突水原因及其对地下水环境的影响。文章通过野外调查与收集整理大量地下工程涌突水资料, 运用地下水系统理论方法, 分析了华蓥山背斜地下水径流特征、已建的 G42 华蓥山隧道及绿水洞煤矿工程活动对地下水环境的影响, 研究了新建广邻高速公路华蓥山隧道对岩溶地下水环境造成的潜在影响。结果显示: 已建地下工程活动使得华蓥山中部天池向斜岩溶槽谷及绿水洞背斜内的诸多泉点、暗河减流或断流, 对地下水的影响范围面积约为 29.6 km², 仅 G42 华蓥山隧道泄水洞每年排水量约为 $94.60 \times 10^4 \sim 730.00 \times 10^4$ m³; 计算得出新建广邻高速公路华蓥山隧道正常涌水量约 12.05×10^4 m³/d, 新建广邻高速公路隧道施工对岩溶地下水位的影响范围在东北—西南方向上为 1.0 ~ 2.1 km, 对绿水洞背斜两翼栖霞组、茅口组内地下水位的影响范围在东北—西南方向上为 1.5 ~ 2.0 km, 对隧道北侧岩溶地下水有一定影响, 而对隧道南侧饮用水源地水量及天池湖水影响微弱。该研究成果可为华蓥山及川东平行岭谷区线路选线、岩溶隧道涌突水预测、生态环境保护提供一定的科学参考与理论支撑。

关键词: 岩溶地下水; 环境影响; 隧道工程; 华蓥山中部

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0214-11

Influence of tunnel construction on karst groundwater environment in central Huaying Mountain

CHENG Sheng¹, XU Mo², XIA Qiang²

(1. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute Co. Ltd., Urumqi, Xinjiang 830063, China; 2. State Key Laboratory for Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: With complex geological structures and extensive exposure of carbonate rocks in the middle section of Huaying Mountain, the underground projects have suffered from water inrush disasters of varying degrees and have impacts on the groundwater environment. Current karst studies in the region are insufficient to meet the needs of engineering projects, highlighting the need for a more systematic and comprehensive analysis of the causes of karst water inrush and its effects on the groundwater environment. This study, based on field

收稿日期: 2023-11-13; 修订日期: 2024-01-04

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072283)

第一作者: 成胜(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地下水资源开发与保护工作。E-mail: 1320859143@qq.com

通讯作者: 许模(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质科研与教学工作。E-mail: xm@cdut.edu.cn

investigation and extensive data collection of underground engineering water inrush events, utilized groundwater system theory to analyze the groundwater runoff characteristics in the Huayingshan anticline. The study also assessed the influence of the existing Huayingshan Tunnel on highway G42 and the Lvshuidong coal mine engineering activities on the groundwater environment, and explored the potential impact of the new Huayingshan Tunnel of Guang'an-Linshui highway on the karst groundwater environment. The results show that human activities, particularly underground engineering, have altered the hydrology of the central Huaying Mountain area, transforming multiple spring points into reduced or disconnected subsurface river flows, especially in the Tianchi synclinal karst valley and Green Water Cave. The influence area of groundwater is 29.6 km², with the annual displacement of drainage hole of Huayingshan Tunnel on highway G42 of 94.60×10^4 – 730.00×10^4 m³/year; the normal inflow of the new tunnel of Guang'an-Linshui highway is approximately 12.05×10^4 m³/d, with the influence range of karst groundwater of 1.0–2.1 km. The impact on karst groundwater to the north of the new tunnel is significant, while the influence on the drinking water source and the lake water of Tianchi Lake to the south of the new tunnel is relatively weak. This study can provide basic information and theoretical support for route selection in the Huaying Mountain and parallel ridge-valley area of eastern Sichuan, as well as for water inrush prediction of karst tunnel and ecological environment protection.

Keywords: karst groundwater; environmental implication; tunnel engineering; central part of Huaying Mountain

岩溶山区地下工程建设主要面临两方面岩溶水问题,一是岩溶涌突水灾害,二是持续排水引起的地下水环境负效应。据学者统计,我国西南岩溶山区有近1/3的隧道发生过涌突水(泥)灾害,其诱发的地质灾害占隧道工程重大安全事故总数的77.3%^[1–2]。仅在川东高陡背斜区,半数以上隧道或地下采矿活动均遭遇了不同程度涌突水灾害,如G42明月山隧道揭露岩溶强发育区,隧道涌水量在 5.0×10^4 m³/d以上,持续15个月之久,最大涌水量达 1.8×10^5 m³/d^[3]。岩溶地区修建隧道工程还易引起区域地下水位下降、地面沉降、岩溶塌陷、地下水污染、结构腐蚀和生态环境退化等一系列地下水环境问题^[4–7],如重庆“四山”地区因隧道排水造成地表井、泉干枯共计363处、水库(小二型以上)漏失42处、溪沟断流16处,水田旱化面积超过33.33 km²,诱发地面塌陷达300余处^[8]。

华蓥山背斜区碳酸盐岩分布广泛,煤矿开采及隧道施工面临的涌突水灾害及对地下水环境的影响程度与岩溶发育程度、工程堵水措施等密切相关,需要对工程区的岩溶发育规律有充分的认识,诸多学者对其进行研究。华蓥山背斜多为“一山一槽二岭”地貌,岩溶水运动可分为多种岩溶水动力模式^[9–10],岩溶发育受构造控制明显,主要沿构造裂隙主发育方向发育^[11],地下水纵向运动,在雷口坡组、嘉陵江组底部形成大流量泉点,区内最低排泄基准为州河^[12–13]。段贵

安等^[14]、陈绍林等^[4]对G42华蓥山隧道涌突水灾开展研究得出隧址区背斜西翼嘉陵江组、飞仙关组四段岩溶强烈发育,发育部位为可溶岩与非可溶岩接触带、背斜轴部及断层破碎带,涌突水灾害发生原因主要是隧道北侧负地形汇集大量地表降水、泥沙,通过暗河管道直通施工隧道而造成涌突水事故。何兴江^[15]通过对华蓥山中部龙滩煤矿“10·4”突水事故研究发现二叠系长兴组厚层灰岩具有较强的可溶性和更快的溶蚀速率,且在构造应力影响下伴生有大量的纵向张性裂隙及层间脱空区域。康小兵等^[16]计算得出华蓥山中部每年地下水资源流失量约 9.1×10^8 m³,西翼流失量大于东翼,流失原因有气候、社会发展、人类活动等因素。

目前华蓥山及川东岩溶山区的岩溶相关研究一是时间久远,部分水文地质条件已发生变化,二是研究广度、精度不够,前人研究主要服务于某个具体工程建设,未系统研究华蓥山岩溶发育的区域性规律,而基础地质、水文地质区域调查报告精度较低,无法满足工程建设的需要。本文从地下水系统理论角度,以华蓥山背斜整体的地下水径流及研究区岩溶水系统的补径排特征为基础,通过分析已建的煤矿、隧道工程发生涌突水原因,地下工程对地下水环境的影响,预测研究新建隧道建设对地下水环境造成的影响,可为华蓥山及川东平行岭谷区交通线路选线、岩

溶隧道涌突水预测、生态环境保护提供一定的理论支撑。

1 研究区地质概况

华蓥山复式背斜位于川东隔挡式褶皱带西缘,喜山运动Ⅰ幕后,川东地区的沉积盖层全部褶皱隆起,结束了侏罗纪内陆湖盆的沉积环境,形成了现今的宽缓向斜与狭窄背斜相间排列的构造格局^[17~19]。华蓥山背斜地层出露相对较全,除缺失泥盆系(D)、下石炭统(C₁)外,老至寒武系中上统($\in_{2,3}$)、新至侏罗系(J)均有出露,大面积出露的可溶岩地层有中三叠统雷口坡组(T₂l),下三叠统嘉陵江组(T₃j)、飞仙关组二段(T₃f²)、飞仙关组四段(T₃f⁴),中二叠统长兴组(P₂c)、龙潭组(P₂l),下二叠统茅口组(P₁m)等。侏罗系(J),上三叠统须家河组(T₃j),下三叠统飞仙关组一段(T₃f¹)、飞仙关组三段(T₃f³)、飞仙关组五段(T₃f⁵)岩性为泥岩、泥质灰岩、泥灰岩等,为相对隔水层。

研究区位于华蓥山中部,主要构造有宝顶山背斜、天池向斜、绿水洞背斜,天池断层、仰天窝断层等,其中断层走向20°~40°,倾角60°~75°,破碎带宽6.0~20.0 m,具压扭性特征,主要出露二叠系、三叠系可溶岩地层,地下水类型可划分为碳酸盐岩类岩溶水(碳酸盐岩裂隙溶洞水、碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙溶洞水)、碎屑岩类裂隙-孔隙水、基岩裂隙水,由于侏罗系及上三叠统须家河组相对隔水层的分割圈闭,可划分成相对独立的一级岩溶水系统(图1)。

2 华蓥山背斜中深部岩溶地下水径流特征

排泄基准面是控制地下水循环的重要因素,不同类型的排泄基准面控制着不同的地下水循环方式与径流路径,从而影响着岩溶的发育,川东隔挡式构造带排泄基准面主要分3类^[20~22]:(1)贯穿河谷型排泄基准面;(2)横向深切沟谷型排泄基准面;(3)横向浅切沟谷型排泄基准面。

嘉陵江、州河分别贯穿华蓥山背斜南、北两端,即贯穿型河谷排泄基准面,其控制着整个华蓥山大区域性地下水的径流。由于嘉陵江在观音峡处高程(180.0 m)相较于州河贯穿背斜核部处(250.0 m)更低,且华蓥山背斜在州河附近处于倾覆端,故嘉陵江控制的大区域、深循环的地下水范围较州河更广,推测嘉陵江控制的中深部地下水循环范围至华蓥山中部的高登山一带,州河控制的中深部地下水循环大致至渠县卷硐一带,而整个深部地下水循环均为由北至南到嘉陵江甚

至更南的长江进行排泄,见图1(b)。

华蓥山横向深切沟谷型排泄基准面有龙门峡河、华蓥山大峡谷、杨家河,这些深切沟谷均深入背斜核部,且切入可溶岩处的高程相对较低,主要控制小区域中深部地下水的循环。据此可大致将华蓥山中深部地下水循环分为南、中、北段,其控制的中深部地下水径流范围分别是嘉陵江至华蓥山大峡谷(杨家河)、华蓥山大峡谷至龙门峡河、龙门峡河至州河,研究区所处的华蓥山中段地下水中深部循环主要受控于华蓥山大峡谷(杨家河)、龙门峡河,而州河、嘉陵江对华蓥山中段地下水中深部循环影响较小。浅部循环地下水主要向横向浅切沟谷、流量较小的泉点进行就近排泄,其受横向深切沟谷及贯穿型河谷的影响随距离增加而逐渐减小。

3 研究区岩溶水系统及天然流场补径排特征

研究区位于华蓥山中部,南、北两侧横向深切沟谷型排泄基准面分别是华蓥山大峡谷(杨家河)、龙门峡河,岩溶地下水的补给来源均为大气降水,地下水的径流、排泄则受岩性(非可溶岩)、构造、水文网的控制,与各部位岩溶发育程度有关。以飞仙关组一段、飞仙关组三段、飞仙关组五段相对隔水层和深切横向沟谷等系统边界为划分依据,研究区可划分为3个相对独立的二级岩溶水系统,见图1(c)。

天池向斜岩溶水系统:天池向斜南端仰起,北端平缓,东、西侧山脊耸立,地下水主要受大气降水补给,并向核部槽谷运动,在地势有利部位出露成泉或排泄至地表水系,如桂兴镇一天池镇一带岩溶槽谷的桂兴河作为地下水的排泄基准,桂兴河冬季流量在200.0~300.0 L/s,夏季流量可达每秒数十方;天池镇—红岩乡一带有李家大洞暗河及南湾村暗河(现流量减流或断流),在20世纪70—80年代,这些暗河流量可达每秒数十升,槽谷内地下水埋深较浅,一般在数米内。天池湖(正常蓄水位485.0 m)位于岩溶槽谷中部地势相对较低的位置,南、北两侧的地下水均汇集至此,周边出露或发育了大量的泉水、暗河,流量大者有冒水眼暗河,流量达86.0 L/s,老码头旁的大泉,流量53.1 L/s,除此之外,还有数量众多流量0.1~5.0 L/s的泉水出露。天池湖水经暗河管道继续向南西侧的龙洞河排泄,龙洞河的流量约200.0~3 500.0 L/s。

宝顶山背斜岩溶水系统:地下水多顺构造线运动,主要受杨家河、华蓥山大峡谷控制,宝顶山背斜东翼及北部倾伏端二叠系的地下水向北或南运移至杨

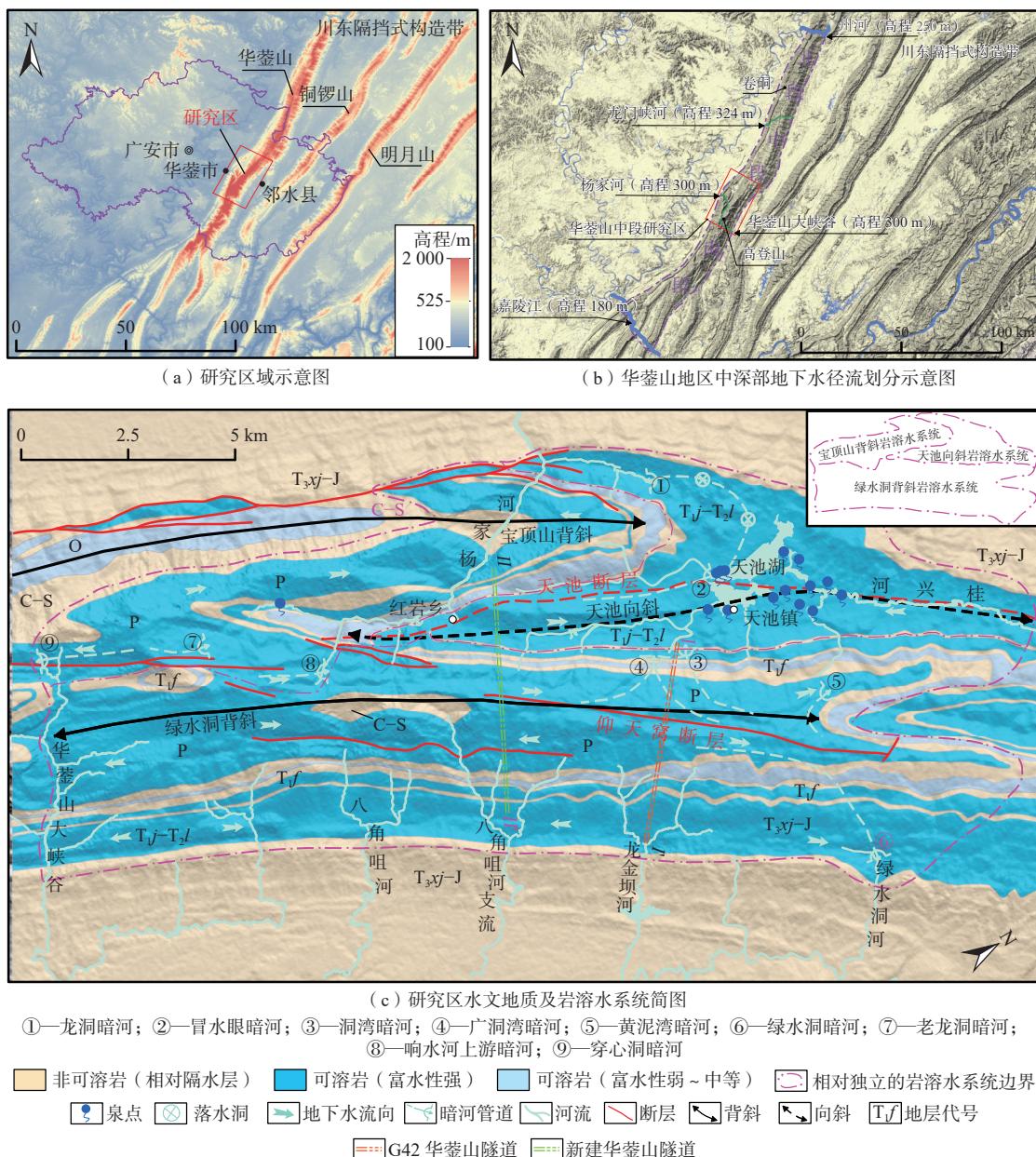


图 1 研究区位置及水文地质简图
Fig. 1 Location and hydrogeology of the study area

家河排泄, 杨家河冬季流量约 200.0~500.0 L/s; 而绿水洞背斜西翼的华蓥山大峡谷至高石坎一带的岩溶地下水向南或北分别遇华蓥山大峡谷、响水河排泄, 华蓥山大峡谷处的暗河流量达 144.0 L/s, 响水河上游的暗河冬季流量约 15.0~20.0 L/s。

绿水洞背斜岩溶水系统: 地下水多顺构造线运动, 主要向横向沟谷、暗河排泄, 背斜核部及西翼的二叠系岩溶地下水向南或北至洞湾、广洞湾暗河排泄(现已被 G42 华蓥山隧道泄水洞袭夺而断流), 20 世纪 90 年代最大流量分别可达 1.45, 3.46 m³/s, 与背斜倾伏端洼地、落水洞联系紧密; 背斜东翼二叠系岩溶

地下水在南部的排泄基准为华蓥山大峡谷排泄, 中间段浅层地下水排泄为八角咀支流所在横向沟谷; 背斜东翼飞仙关组二段、飞仙关组四段, 嘉陵江组, 雷口坡组中岩溶地下水主要向横向浅切沟谷分散排泄, 北部绿水洞暗河沟通着飞仙关组四段与嘉陵江组、雷口坡组岩溶地下水, 最大流量可达 0.86 m³/s。

4 研究区已建工程活动对岩溶地下水环境的影响分析

4.1 煤矿开采活动对地下水环境的影响

研究区二叠系龙潭组含煤层, 为大型国营煤矿——

华蓥山广能集团公司的主要采煤矿区,包含绿水洞煤矿、高顶山煤矿、天池煤矿(关闭),除此之外,区内还存在数十个大大小小的私营小煤矿,现已全部关闭。这些煤矿平硐及采空区严重恶化了华蓥山中部的水文地质条件,改变了地下水天然流场,对地下水环境造成难以恢复的影响,引发了一系列生态环境地质问

题^[6, 23],通过野外调查与前人研究成果,仅绿水洞煤矿、天池煤矿对地下水位的影响范围达 16.6 km^2 ,造成地下水位下降,部分泉点减流或断流(图2),每年流失地下水水量达 $1078.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ (相比于G42华蓥山隧道修建前)^[4, 16]。

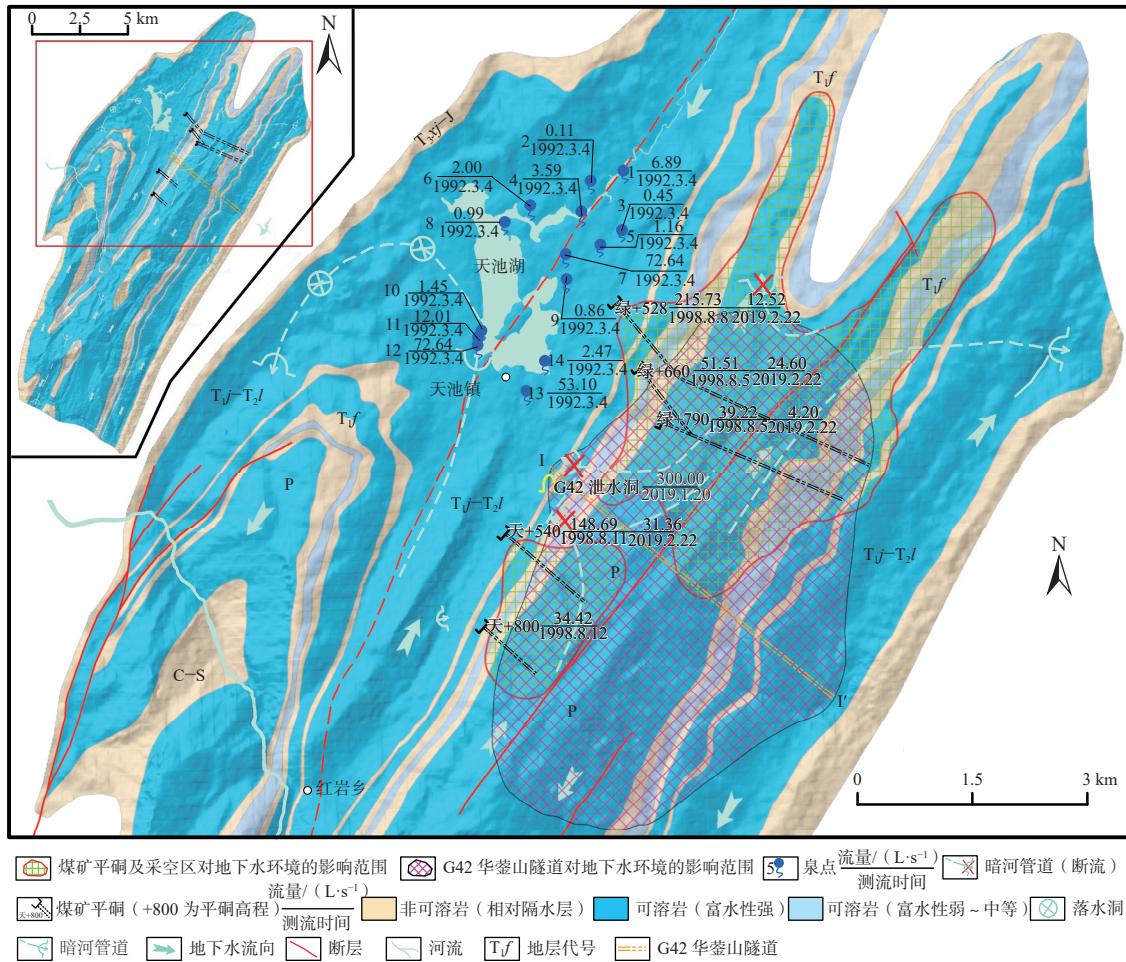


图2 煤矿平硐及G42华蓥山隧道对研究区地下水的影响范围

Fig. 2 Influence range of coal mine adit and Huaying Mountain Tunnel of highway G42 on groundwater in the study area

4.2 G42华蓥山隧道对地下水环境的影响

G42华蓥山隧道连接四川华蓥、邻水,横穿华蓥山主背斜—绿水洞背斜(图3)。1998年4月30日至8月28日,华蓥山地区出现9次较大的降雨过程,在建的华蓥山隧道相伴发生了9次大规模的岩溶突水、涌砂(泥)灾害,最大突水量 $7.95 \text{ m}^3/\text{s}$,涌砂(泥)总量 $2.70 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成了严重的经济损失^[4]。

据本次调查及前人研究成果^[4, 14, 24],G42华蓥山隧道隧址区背斜西翼嘉陵江组、飞仙关组四段岩溶强烈发育,长兴组、茅口组次之;隧道西段突水主要是

在飞仙关组四段、长兴组揭露洞湾、广洞湾暗河管道分支,这些暗河管道与隧道北侧大面积分布的岩溶负地形相通,导致负地形汇集的大量降水、泥沙等直通施工隧道。G42华蓥山隧道采用泄水洞排水,地下水源源不断地向新的排泄基准径流排泄,两侧山体及周边水点地下水被其袭夺,直接造成洞湾、广洞湾暗河断流,绿水洞煤矿、天池煤矿平硐减流,地下水位的影响范围约为南侧 3.3 km ,北侧 5.0 km ,影响范围面积大致为 23.2 km^2 (图2),目前水位基本达到稳定,每年排水量为 $94.60 \times 10^4 \sim 730.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[4, 6]。

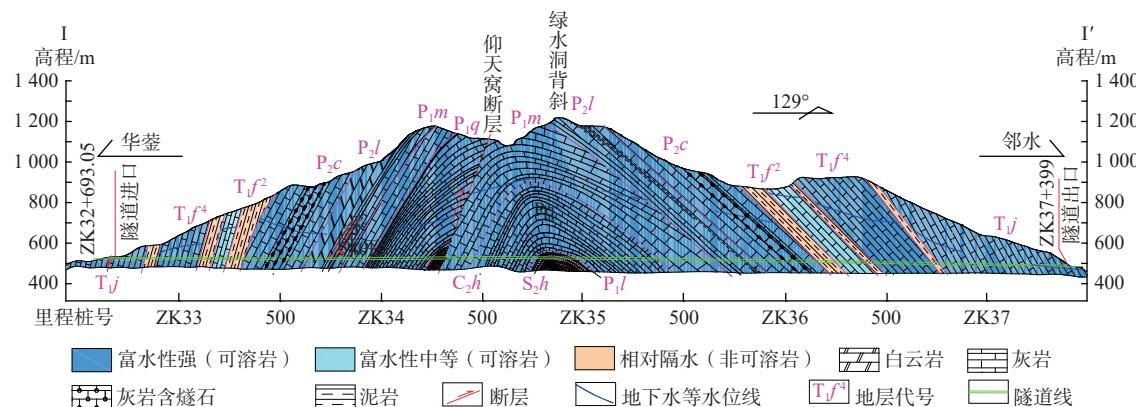


图 3 G42 华蓥山隧道水文地质剖面

Fig. 3 Hydrogeological section of Huaying Mountain Tunnel on highway G42

煤矿开采及隧道建设对地下水位及多数水文点流量造成了不同程度的影响, 地下水位影响范围面积约29.6 km², 在天池向斜岩溶槽谷内的泉点, 由于地下水人工排泄的加剧, 使得地下水位下降, 部分泉点减流或未出露(天池湖周边2—9、13号泉, 图2), 同时受煤矿采矿过程中的爆破影响, 部分泉点的径流通道被堵塞或因继续下渗而断流(1、10—12号泉), 绿水洞煤矿、天池煤矿平硐排水因受G42泄水洞袭夺, 水量减流或断流(图2)。

5 新建广邻高速公路华蓥山隧道对岩溶地下水环境的影响预测

5.1 新建隧道对地下水环境的影响预测分析

新建广邻高速公路华蓥山隧道(图4、图5)是华蓥至邻水的一条扶贫道路的关键工程, 绿水洞背斜段与G42华蓥山隧道水文地质条件相似(两者相距约3.0 km), 均穿越绿水洞背斜, 地层岩性、所在岩溶水系统均一致, 现场调查显示除G42华蓥山隧道西段隧道进口处岩溶强烈发育外, 其余段两者的岩溶发育程度基本一致, 故采用水文地质比拟法来预测新建隧道绿水洞背斜段涌水量, 其中G42华蓥山隧道西段隧道进口处为涌水之后的稳定流量, 计算公式如下:

$$Q = Q' \frac{F \times S}{F' \times S'} \quad (1)$$

$$F = B \times L, \quad F' = B' \times L' \quad (2)$$

式中: Q 、 Q' —新建、既有隧道的正常(或最大)涌水量/(m³·d⁻¹);

F 、 F' —新建、既有隧道的集水面积/m²;

S 、 S' —新建、既有隧道含水体中以静止水位起算的水位降深/m;

B 、 B' —新建、既有隧道衬砌前洞身宽度/m;

L 、 L' —新建、既有隧道通过含水体长度/m。

G42华蓥山隧道涌水量数据来自施工监测涌水资料^[24], 计算出新建隧道穿越绿水洞背斜段的总正常涌水量约为 9.10×10^4 m³/d,

新建隧道天池向斜段涌水量采用铁路规范经验式预测, 该方法预测华蓥山北部的G5515隧道正常涌水量与实测施工涌水量最为接近^[25], 且两者水文地质条件具有一定相似之处, 经验公式如下:

$$Q = KH_1(0.676 - 0.06K) \quad (3)$$

式中: Q —隧道正常涌水量/(m³·d⁻¹);

K —含水层的渗透系数/(m·d⁻¹);

H_1 —静止水位至洞身横断面等价圆中心的距离/m。

水文地质参数来自新建隧道勘察及G42华蓥山隧道勘察施工阶段的水文地质试验成果, 计算出隧道穿越天池向斜段的涌水量在 2.95×10^4 m³/d。

新建广邻高速公路华蓥山隧道总的正常涌水量在 12.05×10^4 m³/d, 分析认为涌水量较大的段落在天池向斜核部、绿水洞背斜西翼飞仙关组四段、二叠系地层, 主要为高压致裂型突水的风险, 可能也存在小型的岩溶管道突水的风险, 二叠系龙潭组存在采空区, 主要存在老窑水透水的风险。

隧道施工除工程面临涌突水风险外, 还会对地下水环境造成一定程度的影响, 主要是通过改变赋存地下水的地质环境从而改变影响范围内地下水天然补径排条件, 使地下水以隧道为中心形成新的排泄基准, 造成隧道所在山体地下水位下降, 地表泉水、井水消失或流量减少, 地下水位影响范围计算公式如式(4):

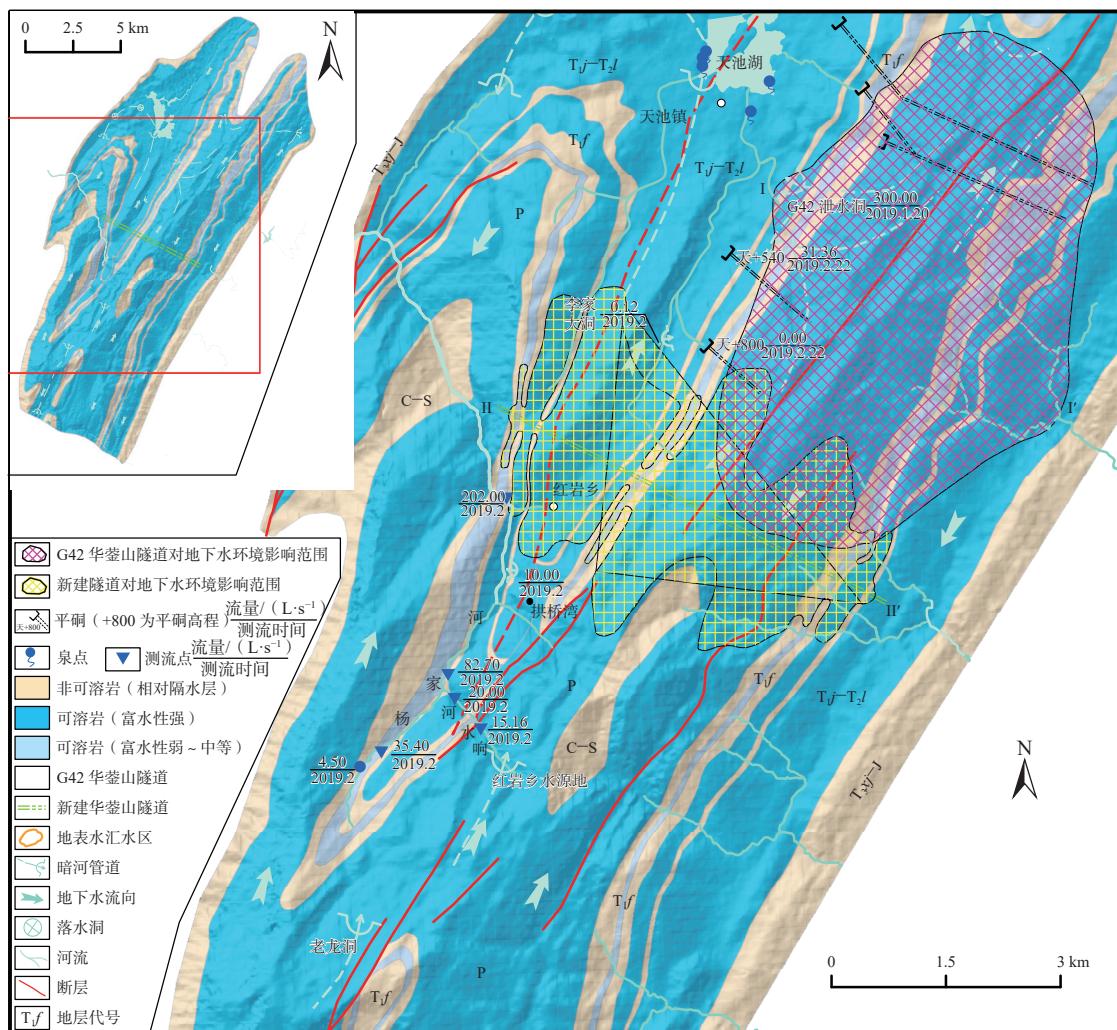


图 4 新建广邻高速公路华蓥山隧道对地下水的影响范围

Fig. 4 Influence of the new Huaying Mountain Tunnel of the Guang'an-Linshui Expressway on groundwater

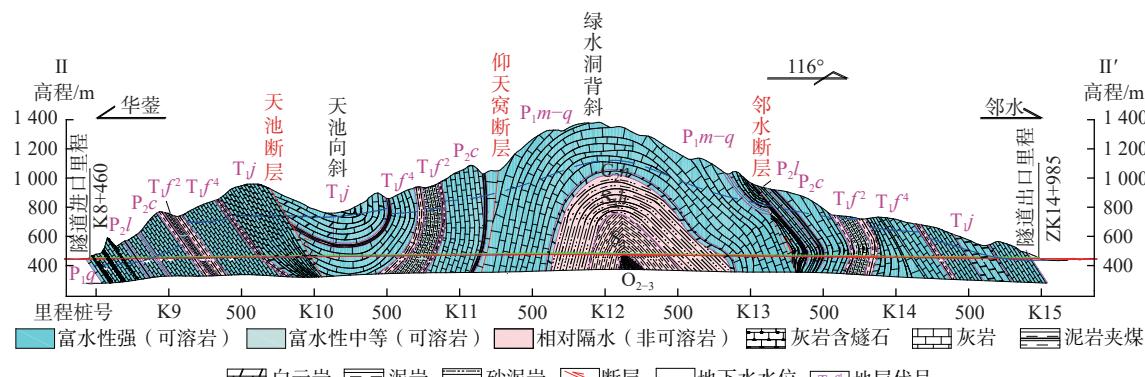


图 5 新建广邻高速公路华蓥山隧道水文地质剖面

Fig. 5 Hydrogeological section of the new Huaying Mountain Tunnel in the Guang'an-Linshui Expressway

$$R = H \sqrt{\frac{K}{2W} \left[1 - \exp \left(\frac{-6Wt}{\mu H} \right) \right]} \quad (4)$$

式中: R —影响半径/m;

H —潜水含水层厚度/m;

K —含水层渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

W —降水补给强度/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

M —重力给水度;

t —时间/d;

μ —给水度。

根据新建隧道及 G42 华蓥山隧道勘察试验成果, 结合大量煤矿水文地质勘察成果, 综合分析确定水文地质参数值, 计算得出隧道建设对可溶岩地层地下水位的影响范围相对更广, 飞仙关组四段、二叠系可溶岩地层地下水位的影响范围在东北—西南方向上均

在 1.0 km 以上, 绿水洞背斜两翼栖霞组、茅口组内地下水位的影响范围在东北—西南方向甚至达到近 2.1 km 的范围(图 5、表 1), 对地下水的影响向南可至拱桥湾, 向北至吴家垭口一带, 势必会造成地下水位下降, 地表井泉减流或消失。

表 1 新建广邻高速公路隧道建设对地下水的影响半径

Table 1 Influence radius of the new tunnel construction of the Guang'an-Linshui Expressway on groundwater

隧道名称	构造部位	编号	隧道里程(起、止)	地层或构造	长度/m	渗透系数/(m·d ⁻¹)	含水层厚度/m	重力给水度	入渗补给系数	补给强度/(m·d ⁻¹)	时间/d	影响半径/m	
天池向斜		1	K9+152	K9+193	T _j f ¹	41.0	0.005	93	0.150	0.10	0.000 3	1 825	122.51
		2	K9+193	K9+245	T _j f ²	52.0	0.040	144	0.008	0.35	0.001 1	1 825	680.50
		3	K9+245	K9+310	T _j f ³	65.0	0.002	150	0.050	0.12	0.000 4	1 825	158.57
		4	K9+310	K9+626	T _j f ⁴	316.0	0.150	240	0.008	0.45	0.001 4	1 825	1 731.82
		5	K9+626	K9+672	T _j f ⁵	46.0	0.001	260	0.150	0.10	0.000 3	1 825	95.27
		6	K9+672	K9+976	T _j	304.0	0.150	310	0.008	0.50	0.001 6	1 825	2 121.52
		7	K9+976	K10+076	F/T _j f/T _j f ⁴	100.0	0.200	285	0.100	0.55	0.001 8	1 825	1 506.03
		8	K10+076	K10+590	T _j f ⁴	514.0	0.150	285	0.150	0.50	0.001 6	1 825	1 131.45
拟建华蓥山隧道	绿水洞背斜	9	K10+590	K10+655	T _j f ³	65.0	0.002	300	0.150	0.12	0.000 4	1 825	144.60
		10	K10+655	K10+806	T _j f ²	151.0	0.040	312	0.008	0.35	0.001 1	1 825	1 313.59
		11	K10+806	K10+836	T _j f ¹	30.0	0.005	330	0.050	0.10	0.000 3	1 825	403.46
		12	K10+836	K11+135	P ₂ c	299.0	0.100	380	0.008	0.50	0.001 6	1 825	2 120.93
		13	K11+135	K11+235	F/P ₂ lt/P ₁ q-m	100.0	0.200	400	0.150	0.55	0.001 8	1 825	1 580.34
		14	K11+235	K11+606	P ₁ q-m	371.0	0.200	530	0.120	0.50	0.001 6	1 825	2 056.04
		15	K11+606	K11+644	C ₂ h	38.0	0.010	520	0.050	0.12	0.000 4	1 825	725.08
		16	K11+644	K12+790	S	1 146.0	0.001	500	0.008	0.10	0.000 3	1 825	477.44
		17	K12+790	K12+861	C ₂ h	71.0	0.010	450	0.050	0.12	0.000 4	1 825	670.41
		18	K12+861	K13+167	P ₁ q-m	306.0	0.200	369	0.120	0.50	0.001 6	1 825	1 667.58
		19	K13+167	K13+513	F/P ₁ q-m/P ₂ l	346.0	0.200	300	0.150	0.55	0.001 8	1 825	1 334.69
		20	K13+513	K13+687	P ₂ c	174.0	0.100	270	0.100	0.50	0.001 6	1 825	1 042.84
		21	K13+687	K13+714	T _j f ¹	27.0	0.005	260	0.008	0.10	0.000 3	1 825	655.86
		22	K13+714	K13+821	T _j f ²	107.0	0.040	220	0.050	0.25	0.001 1	1 825	762.13
		23	K13+821	K13+872	T _j f ³	51.0	0.002	200	0.008	0.12	0.000 4	1 825	310.88
		24	K13+872	K14+281	T _j f ⁴	409.0	0.150	180	0.150	0.50	0.001 6	1 825	851.48
		25	K14+281	K14+319	T _j f ⁵	38.0	0.001	130	0.008	0.10	0.000 3	1 825	159.68

注: 表中水文地质参数值由新建隧道及 G42 华蓥山隧道水文地质试验成果结合大量煤矿水文地质勘察成果综合分析确定。

5.2 新建隧道建设对居民生活用水的影响分析

隧道建设会对地下水产生影响, 可能造成地表井、泉减流或枯竭, 对影响范围内的居民生活用水造成一定程度的影响。研究区居民主要分布绿水洞背斜西翼、天池向斜岩溶槽谷及杨家河沿岸, 故重点分析隧道建设对背斜西翼居民生活用水的影响。

新建隧道以北即天池向斜岩溶槽谷, 由于煤矿开采的影响, 基本无浅层地下水以泉的形式出露地表, 仅人工排泄山体地下水, 如 G42 华蓥山隧道泄水洞的水沿沟渠直接排入天池, 枯季流量 200.0~300.0 L/s, 天池煤矿平硐排水经第四系覆盖层排入天池, 流量约 20.0~40.0 L/s, 李家大洞流量枯季仅 0.1~0.2 L/s(图 5),

目前天池岩溶槽谷居民生活用水来源于集中供水, 水源多来自暗河管道或煤矿矿洞。隧道建设排水可能造成天池向斜岩溶槽谷内的李家大洞、天池煤矿矿洞等居民生活用水水源点减流或断流, 同时对 G42 泄水洞水量也有一定影响。

新建隧道以南岩溶地下水除顺背斜走向运动至 G42 华蓥山隧道泄水洞排泄外, 部分地下水在山体半山腰以小型暗河形式排泄, 如响水河上游暗河(红岩乡主要水源地)、老龙洞等(图 5)。由于这些居民水源地位于隧道排水形成的地下水影响区之外, 其补给区位于红岩乡—响水河—老龙洞一带背斜两翼二叠系可溶岩区, 新建隧道对红岩乡水源地、老龙洞水量

影响微弱。

5.3 新建隧道建设对天池湖的影响

天池湖南距新建隧道约6.0 km, 总库容 $5548 \times 10^4 \text{ m}^3$, 正常蓄水位483.0 m, 20世纪90年代修建的G42华蓥山隧道为避免对天池的影响而选择了高线位穿

越华蓥山, 新建的广邻公路华蓥山隧道与天池湖之间有天池断层连接, 新建隧道对环境的影响或面临的威胁一是有可能会造成天池水渗漏, 地下水补给量减少, 水质恶化; 二是天池湖水与隧道之间可能存在水力联系, 隧道施工可能会引发涌突水事故(图6)。

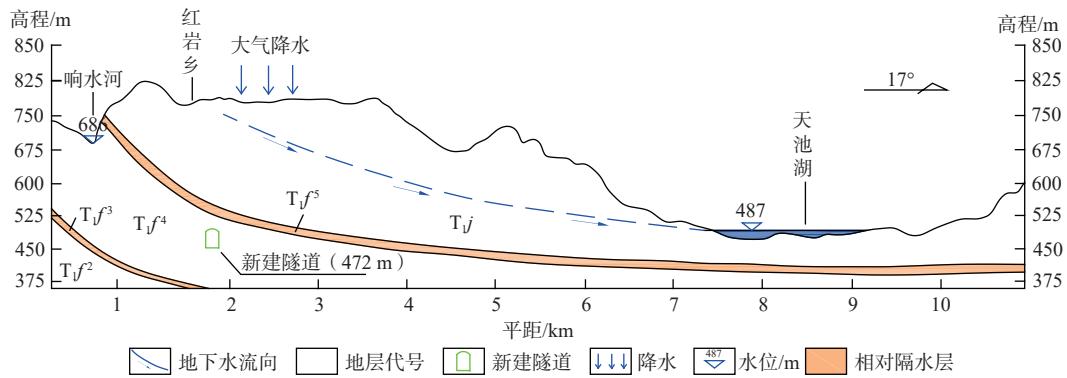


图6 天池向斜地下水径流特征^[26]

Fig. 6 Characteristics of groundwater runoff in the Tianchi syncline

野外调查显示: (1)新建隧道位于飞仙关组五段非可溶岩(相对隔水层)之下; (2)天池断层为逆冲断层, 破碎带为挤压密实的断层角砾岩或泥岩; (3)断层经过的区域地表未见泉水、负地形等; (4)穿越断层段的高程在471.0 m, 与天池湖的正常水位480.0 m的水位差在10.0 m, 两者之间的水力坡度约1.8‰, 相对较小。

上述分析可以确定天池湖水导入隧道的可能性较小, 新建隧道施工建设对天池湖影响微弱。

6 结论

(1)华蓥山背斜大区域性地下水径流主要受嘉陵江、州河控制, 而中深部地下水主要受横向深切沟谷控制, 诸如龙门峡河、华蓥山大峡谷、杨家河等。研究区中深部岩溶地下水主要受华蓥山大峡谷、杨家河横向深切沟谷控制, 而浅层地下水则分散排泄, 主要向天池湖及各暗河排泄。

(2)煤矿开采活动及G42华蓥山隧道建设运营持续排水已造成天池向斜岩溶槽谷及绿水洞背斜内的诸多泉点、暗河减流或断流, 对地下水的影响范围面积约 29.6 km^2 , 仅G42华蓥山隧道泄水洞每年排水量约为 $94.60 \times 10^4 \sim 730.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3)新建广邻快速公路隧道穿越绿水洞背斜段正常涌水量约 $9.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 穿越天池向斜段正常涌水量约 $2.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 隧道总的正常涌水量约为12.05×

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 新建广邻快速公路隧道施工对岩溶地下水位的影响范围在东北—西南方向上为1.0~2.1 km, 对绿水洞背斜两翼栖霞组、茅口组内地下水位的影响范围在东北—西南方向上为1.5~2.0 km。

(4)新建广邻快速公路隧道施工对隧道北侧岩溶地下水有一定影响, 可能会导致天池向斜岩溶槽谷中部分泉点减流或断流, 影响部分居民生活用水, 对隧道南侧饮用水源地水量影响微弱; 天池湖水进入施工隧道可能性微弱, 也即隧道施工对天池湖水影响微弱。

参考文献 (References) :

- [1] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009. [YANG Yanna. Research of karst tunnel water bursting hazard riskassesssment system in the southwest mountainous area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李术才, 周宗青, 李利平, 等. 岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1858~1867. [LI Shucui, ZHOU Zongqing, LI Liping, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in Karst tunnels and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1858~1867. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 秦仁佩, 肖均, 蒋锋. 明月山特长隧道涌水突泥综合处理措施 [J]. *现代隧道技术*, 2007, 44(6): 66 – 69. [QIN Renpei, XIAO Jun, JIANG Feng. Comprehensive treatment of the water gushing and mud outburst in Mingyueshan super long tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2007, 44(6): 66 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈绍林, 李茂竹, 陈忠恕, 等. 四川广(安)—渝(重庆)高速公路华蓥山隧道岩溶突水的研究与整治 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1344 – 1349. [CHEN Shaolin, LI Maozhu, CHEN Zhongshu, et al. Study and treatment on Karst water outburst in Huayingshan tunnel for anyu expressway from Guangan of Sichuan to Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1344 – 1349. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(2): 107 – 110. [FU Kailong. An analysis of the Karst ground collapse and water yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusui Expressway [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(2): 107 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘丹, 杨立中, 于苏俊. 华蓥山隧道排水的生态环境问题及效应 [J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(3): 308 – 313. [LIU Dan, YANG Lizhong, YU Sujun. On ecological environment problems and effects caused by discharge from Huayingshan tunnel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2001, 36(3): 308 – 313. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴远斌, 殷仁朝, 雷明堂, 等. 重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策 [J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 246 – 252. [WU Yuanbin, YIN Renchao, LEI Mingtang, et al. Triggering factors and prevention-control countermeasures of Karst collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 246 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 南江水文地质工程地质队. 重庆四山交通通道地质环境调查研究报告 [R]. 重庆: 南江水文地质工程地质队, 2015. [Nanjiang Hydrogeological Engineering Geology Team. Geological environment investigation report of Chongqing Sishan traffic channel [R]. Chongqing: Nanjiang Hydrogeological Engineering Geology Team, 2015. (in Chinese)]
- [9] 徐文汉. 华蓥山褶皱带岩溶水的水动力条件及锶矿找矿标志的研究 [J]. *中国岩溶*, 1988, (增刊 2): 123–130. [XU Wenhan. Study on hydrodynamic conditions of Karst water in Huayingshan fold zone and prospecting criteria of strontium ore [J]. *Carsologica Sinica*, 1988, (Sup 2): 123–130. (in Chinese)]
- [10] 陈盟. 华蓥山区域岩溶水系统及其与龙潭煤系组合关系研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [CHEN Meng. Research on regional karst water system and its combination relationship with longtan coal measures in Huaying Mountain [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 余磊, 杨艳娜, 许模, 等. 川东明月峡背斜区岩溶形态分异与构造裂隙表征参数的关系 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 92 – 100. [YU Lei, YANG Yanna, XU Mo, et al. Relationship between Karst morphology differentiation and structural fracture characterization parameters in Mingyuexia anticline area, eastern Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(1): 92 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 沈芳兴. 华蓥山北部地下水系统及其对隧道涌水的影响研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017. [SHEN Fangxing. Study on groundwater system and its influence on tunnel water inwelling in the north of Huaying Mountain [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 熊道锟, 傅荣华. 华蓥山隧道岩溶发育强度垂直分带 [J]. *岩土工程技术*, 2005, 19(4): 186 – 190. [XIONG Daokun, FU Ronghua. Vertical zonation of Karst development intensity in Huayingshan tunnel [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(4): 186 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 段贵安, 张勇. 华蓥山隧道涌突水、涌泥、涌砂原因分析及综合整治措施 [J]. *铁道建筑技术*, 2001(1): 36 – 39. [DUAN Gui'an, ZHANG Yong. Analysis and treatment of the inflow of water, mud and sand in Huayingshan Tunnel [J]. *Railway Construction Technology*, 2001(1): 36 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 何兴江. 地下采矿与地质环境互馈机理及矿山地质环境治理研究——以四川华蓥山矿区为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008. [HE Xingjiang. Study on mutual feedback mechanism between underground mining and geological environment and mine geological environment control: Taking Huayingshan mining area

- in Sichuan as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 康小兵, 罗声, 许模, 等. 华蓥山中段地区地下水资源量评价 [J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 527–534. [KANG Xiaobing, LUO Sheng, XU Mo, et al. Evaluation of groundwater resource loss in middle regions of Huaying mountain [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(4): 527 – 534. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李忠权, 冉隆辉, 陈更生, 等. 川东高陡构造成因地质模式与含气性分析 [J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(6): 605 – 609. [LI Zhongquan, RAN Longhui, CHEN Gengsheng, et al. Genetic geologic model and gas-bearing analysis of high and steep structures in east Sichuan [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(6): 605 – 609. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化 [J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 2046 – 2052. [ZOU Yutao, DUAN Jinbao, ZHAO Yanjun, et al. Tectonic characteristics and evolution of the high and steep fault folding belt in East Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2046 – 2052. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. Study on spatial differentiation characteristics and evaluation system construction of Karst in high and steep anticline area of eastern Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 成胜, 许模, 杨艳娜, 等. 川东褶皱带明月峡背斜区地下岩溶发育规律 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(11): 114 – 120. [CHENG Sheng, XU Mo, YANG Yanna, et al. Development rules of underground Karst in the mingyue gorge anticline area of the eastern Sichuan tectonic belt [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(11): 114 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 钟玲敏, 许模, 吴明亮, 等. 多级水流系统耦合下深部岩溶分异研究——以川东隔挡式构造区中梁山背斜南段为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 45 – 51. [ZHONG Lingmin, XU Mo, WU Mingliang, et al. Development of deep Karst under the coupling of multistage flow systems: A case of southern part of the Zhongliang Mountain anticline of the parallel barrier structure in eastern Sichuan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 45 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李雅依, 夏强, 许模, 等. 隔挡式构造区岩溶地下水流系统多级次嵌套结构的水化学识别 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 405 – 413. [LI Yayi, XIA Qiang, XU Mo, et al. Hydrogeochemical indicators of hierarchically nested structure of Karst groundwater flow systems in the ejective folds area [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 405 – 413. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李彩霞. 华蓥市矿山地质环境评价及防治措施研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. [LI Caixia. Study on mine geological environment evaluation and prevention measures in Huaying city [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 四川省煤田地质工程勘察设计研究院华蓥山隧道突水研究组. 华蓥山隧道西段岩溶突水研究报告 [R]. 成都: 四川省煤田地质工程勘察设计研究院, 1998. [Sichuan Coal field Geological Engineering Survey and design Research Institute Huaying Mountain Tunnel Water Inrush Research Group. Research report of karst water inrush in the west section of Huaying Mountain Tunnel [R]. Chengdu: Sichuan Coal Geological Engineering Design & Research Institute, 1998. (in Chinese)]
- [25] 黄绍模. 南大梁高速公路华蓥山隧道地质特征分析 [J]. *路基工程*, 2020(2): 158 – 162. [HUANG Shaobin. Analysis on geological characteristics of Huaying Mountain tunnel on nandaliang expressway [J]. *Subgrade Engineering*, 2020(2): 158 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 唐科行, 万川, 谭钢, 等. 广邻路华蓥山特长隧道岩溶地质问题与对策 [J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 480 – 487. [TANG Kehang, WAN Chuan, TAN Gang, et al. Karst geological problems and countermeasures of the Huayingshan super-long tunnel on the Guang'an-Linshui highway [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 480 – 487. (in Chinese with English abstract)]