

张华,康晓波,王波,等.滇东南高原斜坡区某拟建铁路岩溶水文地质问题及对策建议[J].中国岩溶,2022,41(5):718-727.
DOI: 10.11932/karst20220506

滇东南高原斜坡区某拟建铁路岩溶水文地质问题及对策建议

张华¹,康晓波¹,王波¹,柴金龙²,周翠琼¹,蔡双乐³,侯旭涛³,黄晨晖⁴,潘晓东⁴

(1. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室/云南省地质环境监测院,云南昆明650216; 2. 云南省地质调查局,云南昆明650051; 3. 中铁工程设计咨询集团有限公司,北京100055; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林541004)

摘要:研究区位于云贵高原南缘滇东南高原斜坡区,属珠江源头河段南盘江流域与红河流域的地表分水岭地带,侵蚀切割强烈,地形条件复杂,广泛出露的三叠系中统个旧组含水层组富水性强,岩溶强烈发育,地下河管道、洼地、落水洞等广布。通过野外调查、观测、示踪试验、实验测试等手段,利用水文地质学、岩溶学等理论方法,分析研究区岩溶含水层富水性、岩溶发育强度、大泉地下河及管道分布、地热分布情况,及其对拟建铁路选线的影响,计算隧道涌水量,提出隧道施工尽量避开地下水富集区、岩溶强发育区、大泉地下河主管道径流区、地热异常区、岩溶砂岩地层区等建议措施,减少拟建铁路施工可能面临的岩溶水文地质危害及其对地下水环境造成的破坏,为强岩溶发育区的工程建设提供参考建议。

关键词:水文地质;岩溶地质问题;选线建议;滇东南

中图分类号:U212.23;P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2022)05-0718-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

云南位于高原山区,属青藏高原南延部分,是多种构造带交织复合的地区,地质构造复杂、岩溶发育强烈、地形地貌特征多样,工程建设特别是线状工程实施难度较大。近年来,云南能通则通的县县通高速公路建设不断实施,铁路建设也紧罗密布的开展,基础建设取得了重大进展。工程建设过程中水文地质、环境地质和灾害地质问题突出,在岩溶、风化、深部水文地质作用、重力作用、地震和高地温等影响下^[1-5],岩溶水水害、溶洞、岩溶塌陷和隧道突水、突泥等灾害频发^[6-8],如大理—瑞丽铁路、玉溪—磨憨铁路、云

凤高速公路等。针对工程建设带来的问题,国内学者进行了大量的研究,提出复杂岩溶地质条件勘察方法、灾害防治、对策研究、岩溶工程地质分区等^[9-12],并采用GIS等进行生态选线评价和选线适宜性评价^[13-14],并建立相应的预警、预报体系^[15-16],为工程建设施工安全、灾害安全、生态环境安全提供保障。本文以滇东南高原斜坡区某拟建铁路建设的水文地质调查初测工作为例,通过野外水文地质调查、示踪试验、地下水动态监测等手段,利用MAPGIS结合大气降水入渗法和地下水径流模数法评价隧道涌水量,提出岩溶水文地质问题及对策建议。同时建议工程建设的前期必须按照相应勘察规范开展详细的水文地质调

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502502);广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题(KDL202101)

第一作者简介:张华(1982—),男,高级工程师,主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: ynddysghs.zh@163.com。

通信作者:柴金龙(1981—),男,高级工程师,主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: chajinlong@126.com。

收稿日期:2022-02-20

查工作,结合地下水监测、示踪试验、物探、钻探等手段^[17-19],查清水文地质条件、岩溶发育特征、计算隧道最大涌水量等,为铁路建设选线提供参考依据和建议,减少施工过程中带来的水文地质灾害。

1 地质环境及工程概况

研究区位于云南省东南部红河哈尼族彝族自治州和文山壮族苗族自治州境内,地理坐标范围为东经 $103^{\circ}15' \sim 104^{\circ}30'$,北纬 $23^{\circ}10' \sim 23^{\circ}40'$,总面积 $7\,077.03\text{ km}^2$ 。研究区地处云贵高原南缘,属珠江源头河段南盘江流域与红河流域的地表分水岭地带,侵蚀切割强烈,地形条件复杂,西部为蒙自构造侵蚀湖积平原,东部为文山构造溶蚀断陷盆地,中部为构造溶蚀侵蚀中山地貌,总体地势中部高、两端低。研究区属亚热带季风气候,大部分地区冬无严寒、夏无酷暑,具有雨热同季、干湿季节分明的特点。由于地处低纬地区,受地形条件影响,气候垂直分带明显,山区比盆地降雨量大,蒸发量小,气温低。其中:蒙自年均气温 $18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 795 mm ,降雨集中在6-9月,年均水面蒸发量 $1\,334.1\text{ mm}$;文山年均气温 $17.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 $1\,062\text{ mm}$,5-9月为雨季,年均蒸发量 $1\,699\text{ mm}$ 。研究区地表水系发育,主要发育有珠江水系的盘龙河、小新寨河、砂拉河、黎江河和河水系的南溪河^[20]。

区域上属华南地层区个旧小区,除志留系、侏罗系缺失外,其他地层均有出露。其中下古生界广泛分布于南部地区,东部零星出露,上古生界广泛分布于中部、东部地区,中生界广泛分布于北部、西部和东部地区,新生界主要分布于蒙自、文山等山间盆地,局部零星分布。

拟建线路途经红河哈尼族彝族自治州的蒙自市、屏边县和文山壮族苗族自治州的文山市、砚山县,工程包括组合(贯通线)、南线、中线、北线四个区域走向方案:组合(贯通线)方案全长 124.99 km ,其中隧道13座(设计总长度 64.57 km),为推荐方案;南线方案全长 116.148 km ,其中隧道19座(设计总长度 64.84 km);中线方案全长 122.21 km ,其中隧道15座(设计总长度 71.96 km);北线方案全长 121.983 km ,其中隧道16座(隧道总长度 68.54 km ,文山至薄竹镇段与中线方案一致,拟建3座,薄竹镇至蒙自段拟建13座)。线路起点为文山市,高程 $1\,418\text{ m}$,终点为蒙自

市,高程 $1\,324\text{ m}$,线路最大高程 $1\,865\text{ m}$,最大埋深 370 m 。

2 岩溶水文地质条件

2.1 含水层组富水性特征

根据含水层的性质、地下水赋存介质的空隙特征,将研究区内含水层组划分为孔隙含水层组、裂隙含水层组和岩溶含水层组三大类型^[21]。孔隙含水层组和裂隙含水层组对铁路施工影响不大,故本文主要分析富水性中等以上的岩溶含水层组(图1),将其细分为均匀状岩溶含水岩组、碳酸盐夹碎屑岩型岩溶含水岩组、碎屑岩夹碳酸盐岩型岩溶含水岩组、互层型岩溶含水岩组四类,按富水性分级指标,各类岩溶含水层组富水性划分结果^[22]见表1。

2.2 地下水系统

区内地下水的径流与排泄受地表水文网及地质构造、地层岩性、地形地貌的制约。因此,地下水系统的划分以地表水文网、局部地下分水岭以及控制性构造为基础^[23],按照“地下水系统相对独立、流域相对完整”的原则,在三级系统内将大泉、地下河系统单独划分为四级系统。当地下水系统边界不清,且与其他系统有水力联系时,不再划分出单独的地下河系统。根据《地下水系统划分技术要求》(GWI-A5),将研究区划分为珠江水系统和河水系统2个一级水系统,7个二级系统,27个三级水系统,35个四级水系统(图2),划分结果均为独立且完整的补给、径流、排泄系统,边界清楚、水力联系密切^[24-25]。

2.3 地下水的补给、径流和排泄条件

2.3.1 地下水的补给条件

(1)补给源 区内地下水的补给源主要为大气降水,其次为地表水体补给。研究区碳酸盐岩分布面积广,岩溶发育强烈,基岩裸露,地表溶隙、裂隙、洼地、落水洞及溶洞十分发育,透水性极高,为大气降水垂向补给提供了有利的途径^[26],特别是高原面上发育较多的洼地、落水洞,是地下水的重要补给通道。研究区地表水体补给主要包括碎屑岩区沟谷中的地表溪流在流经岩溶区时,通过溶洞、落水洞、伏流入口等直接注入补给的地下水,以及地表水库、农田灌溉用水通过溶隙等以渗入方式补给的地下水^[27]。

(2)补给形式 包括集中补给和分散补给两种

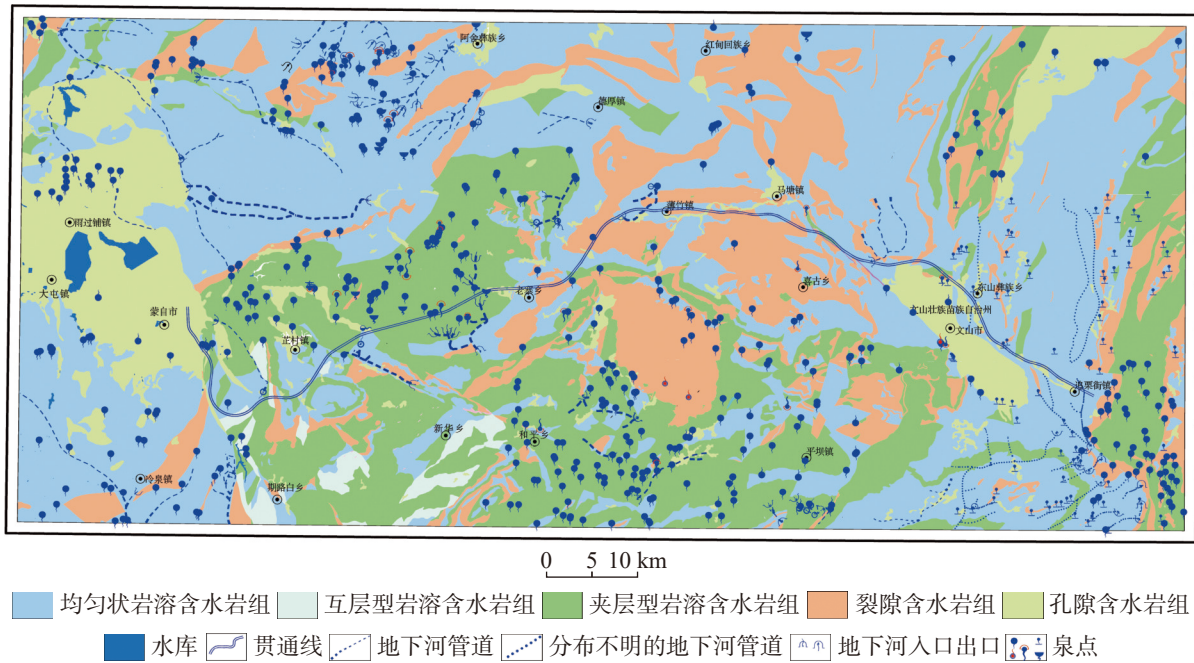


图1 研究区含水层组和地下水出露点分布图

Fig. 1 Distribution map of aquifer group and groundwater dewpoint in the study area

表1 岩溶含水层组特征表

Table 1 Characteristics of karst aquifer group

含水层组类型	地层代号	岩性	岩溶发育特征	富水性
均匀状岩溶含水层组	T_2g^3 、 T_2g^2 、 T_1y^3 、 C_3m 、 C_2h 、 C_1b 、 C_1d	灰岩、白云岩、白云岩夹灰岩、泥晶灰岩、泥晶泥质白云岩	地表洼地、漏斗、落水洞广布，地下发育较大的洞穴、地下河系统	地下水循环交替迅速，以大泉、地下河集中排泄为主，枯雨期流量变幅1~30倍； $Mk=9.0\sim 13.1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ， $Qd=0.83\sim 28.1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $Cv=0.1\sim 2.73$ ， $pH=7.82$ ；富水性极强
	T_2f^2 、 T_2g 、 T_2g^1 、 P_1y 、 D_3g 、 D_2g 、 D_2d 、 Dg 、 O_1x	灰岩、白云岩、灰岩、白云质灰岩、白云岩	含水层呈条带状展布，岩溶发育强烈，落水洞、洼地、地下河发育	枯雨期泉水流量变幅1~10倍，最大15倍； $Mk=3.28\sim 12.81\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ， $Qq=0.13\sim 21.11\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ， $pH=7.10\sim 8.15$ ， $Cv=0.68\sim 10.03$ ；富水性强
碳酸盐夹碎屑岩	O_1hn 、 C_3b	泥质灰岩、白云岩夹粉砂质泥岩；白云岩、砂质白云岩	岩体破碎，完整性较差，岩溶较发育，以网状溶蚀裂隙、小溶洞为主	$Mk=6.07\sim 10.13\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ， $Qd=18.79\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $Cv=3.99$ ， $pH=6.71\sim 7.86$ ；富水性强
碳酸盐与碎屑岩互层	C_2t 、 C_1m	石英砂岩、粉砂岩、泥岩与灰岩、白云质灰岩互层；白云质灰岩、灰岩、板岩互层	发育以网状溶蚀裂隙、基岩裂隙、溶孔、小溶洞为主，地下水主要以分散排泄的泉水为主	$Mk=4.5\sim 10.55\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ， $Qd=19.71\sim 43.15\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $Cv=1.22\sim 2.44$ ， $pH=6.86\sim 7.83$ ；富水性中等—强
碎屑岩夹碳酸盐岩	T_2f^4 、 T_1y^2 、 T_1y^1 、 C_1d 、 C_1ch 、 D_1p 、 D_1l	泥岩夹灰岩、砂岩夹白云岩、灰岩；石英砂岩、粉砂岩、白云岩；硅质岩夹灰岩	发育基岩裂隙、网状溶蚀裂隙、小溶洞为主，地下河、岩溶大泉少见，分散排泄的泉点较多，流量小	$Mk=2.48\sim 6.6\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ， $Qd=2.5\sim 33.05\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $Cv=0.47\sim 1.39$ ， $pH=7.11\sim 7.60$ ；富水性中等—强

类型。集中补给在可溶岩的强岩溶化区最为明显，分布在峰丛洼地、峰丛谷地等地区，该区域地表落水洞、竖井、天窗及地下河入口发育，大气降水经地表汇流后通过落水洞、地下河入口直接补给地下水，补给量大。分散补给表现为大气降水、地表水通过较

小的溶隙、溶孔等表层溶蚀形态呈分散状渗入补给地下水，补给缓慢、均匀，补给量小。

2.3.2 地下水的径流条件

区内地下水径流途径受地层岩性、地质构造及

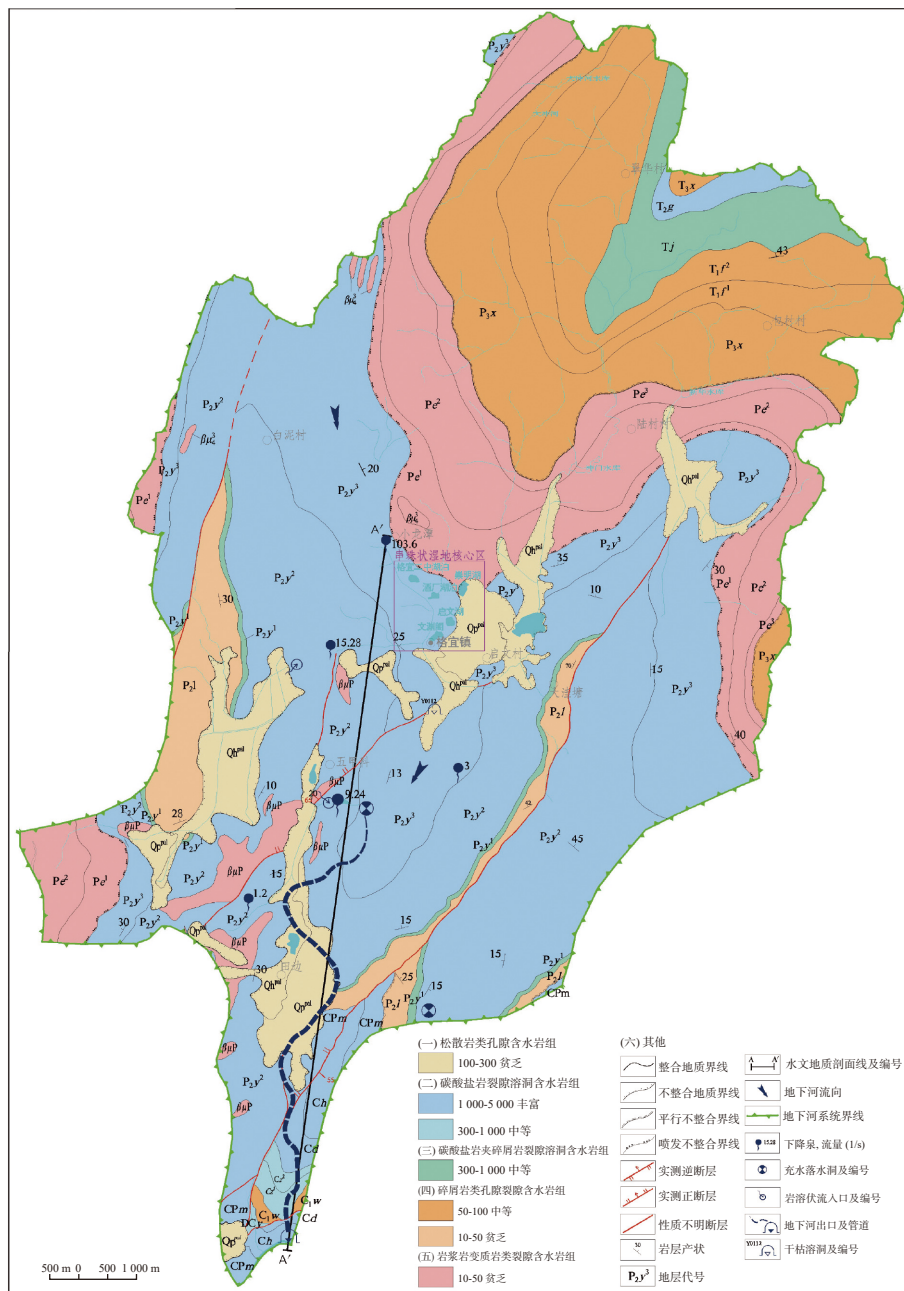


图 2 研究区地下水系统划分图

Fig. 2 Groundwater system division map of the study area

地形地貌等因素的控制。地下水以裂隙流、管道流为主, 交替变化较强。地下水在上游多以裂隙流为主, 逐渐汇入主管道中形成管道流, 溶蚀作用中等, 径流速度中等。岩溶强烈发育区地下水以管道流为主, 管道发育规模大, 地下水径流速度快。在可溶岩与非可溶岩互层或夹层的区域, 地下水常沿着接触面运动, 运移规模、速度大小和流向受岩溶地层展布、岩溶发育规模、岩层产状的倾斜角度控制; 碎屑岩区, 地下水常沿基岩裂隙运动, 呈线状、小股状, 运移速度缓慢, 流量稳定。

2.3.3 地下水的排泄条件

研究区地下水的排泄条件受地层岩性、地质构造及地形地貌等因素的控制。纯可溶岩类地区, 岩溶强烈发育, 地下水以管道流为主, 泉点及地下河出口数量较多, 流量较大, 多出露于切割河谷和岩溶洼地及褶皱断裂复合带边缘、盆地边缘; 在可溶岩与非可溶岩互层或夹层的岩层中, 其地下水常沿着接触面运动, 流量大小受其补给面积、岩层产状的倾角控制; 碎屑岩区, 地下水常沿裂隙运动, 呈线状、小股状,

分散排泄,流量较小,动态一般较稳定。

2.4 地下水埋藏条件

路线位于滇东南岩溶高原面,是南盘江流域与红河流域的地表分水岭地带,研究区东侧文山市一带远离深切河谷,地形起伏平缓,相对高差小,通常一般小于300 m;地表河流和湖泊通常为当地地下水和地表水排泄基准面,岩溶水系统的地表分水岭和地下分水岭基本重合,地下水埋藏较浅;常见地貌组合形态为断陷盆地、宽浅的大型溶蚀洼(谷)地、低矮的缓丘,溶洞较少、穿洞可见;岩溶水系统具有小型化特点、岩溶管道单支状为主。研究区西侧蒙自一带岩溶高原面边缘及河谷斜坡地带,地形切割明显,地形高差极大,地形高差通常大于300~500 m,甚至近千米及以上;当地小河不再形成地下水排泄基准面,地下水向远处更深的河谷及盆地排泄,地表分水岭与地下分水岭不重合,地下水埋藏较深;地貌组合形态为深切河谷、伏流及盲谷等,溶洞多见,水土漏失严重;岩溶水系统规模较大,岩溶管道以树枝状为主。从整个贯通线走向看,由于区域地下水以管道流为主,路线设计更多地展布于大泉、地下河管道的补给区,且标高高于主管道的顶端并远离主管道,将施工开挖影响地下水的工程活动影响降至最低。老芷村岩溶大泉、龙潭寨地下河、大红舍地下河、白革地下河与管道水位持平或低于地下水位线。

3 岩溶水文地质环境地质特征

3.1 岩溶水富水性强

区域上碳酸盐岩地层广布,地下水主要赋存于三叠系中统个旧组(T_2g)、二叠系下统阳新组(P_2y)、石炭系上统马平组(C_3m)、石炭系中统黄龙组(C_2h)、石炭系下统坝达组(C_1b)灰岩、白云质灰岩、灰岩夹白云岩、灰质白云岩等地层中,地下水中80%为岩溶水,碳酸盐岩含水岩组富水性中等至极强,含水层富水性极不均匀,地下水赋存以岩溶管道为主,山区地下水水位埋藏较深,可达数百米,山间峰丛洼地区地下埋深为10 m左右。

3.2 岩溶强烈发育

研究区碳酸盐岩地层分布广、厚度大,铁路选线穿越岩溶高原面、岩溶高原面边缘及河谷斜坡地带,地质构造复杂多样,降水丰富、水动力作用强,不同地

貌区岩溶发育分异明显、地域特征显著。岩溶环境经历了新生代,特别是第三纪的溶蚀过程,使岩溶在垂直上呈现出多层的溶洞分布,深度在100 m内出现了多则3~4层的强岩溶溶洞。地下、地表岩溶发育强烈,形态齐全,地表落水洞、漏斗、溶洞、洼地发育,峰丘洼地发育密度10~30个 $\cdot\text{km}^{-2}$;地下河管道、干溶洞、石钟乳、石笋等发育,溶洞宽度2~5 m,高度2~3 m。含水介质以岩溶管道、裂隙、溶洞为主,垂向岩溶分带明显,地表水垂向补给地下水^[28],地下水以管道流形式集中径流、排泄,常出露有岩溶大泉或地下河。

3.3 大泉、地下河及管道分布广泛

研究区拟规划的四条线路5 km范围内分布有大泉9个,地下河(伏流)20条,一般泉水近200余个(图1)。大泉偶测流量55.0~156.5 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,平均流量105.33 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$;地下河(伏流)偶测流量0~3 000 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,平均流量505.25 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,坡降12.69‰~114‰,岩溶管道长6~37.75 km。研究区流量较大的老腊底地下河,据动态监测,出口流量712.45~6 320.66 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$,8~9月流量巨大,一般1 000 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,旱雨季动态变化约9倍(图3)。通过4条地下河的示踪试验可以推测地下河岩溶管道发育情况,推断出局部地下水系统主管道中串联有地下溶潭、地下水池或暗湖等。

3.4 隧道涌水量大

结合各隧址区地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件及降雨等因素,采用大气降水入渗法和地下水径流模数法对超过3.0 km的隧道涌水量进行计算。对于跨越2个或多个地下水系统且具有不同含水岩组的长大隧道,进行分段涌水量预测。

大气降水入渗法:

$$Q_s = 2.74a \times X \times F$$

式中: Q_s 为隧道正常涌水量($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); F 为隧道集水面积(km^2),即隧道通过含水地段的水体范围,通过1:5万地形地质图量测得出; X 为年平均降水量(mm),即隧道处于不同地区的多年平均降水量; a 为降水入渗系数,即隧道所通过的不同地层单元及岩性组合,参照1:5万水文地质调查报告中得出各地层单元岩性组合的入渗系数取值。

地下水径流模数法:

$$Q_s = 86.4 \times M \times F$$

式中: Q_s 为隧道正常涌水量($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); F 为隧道集水面积(km^2),隧道通过含水地段的水体范围,在1:5

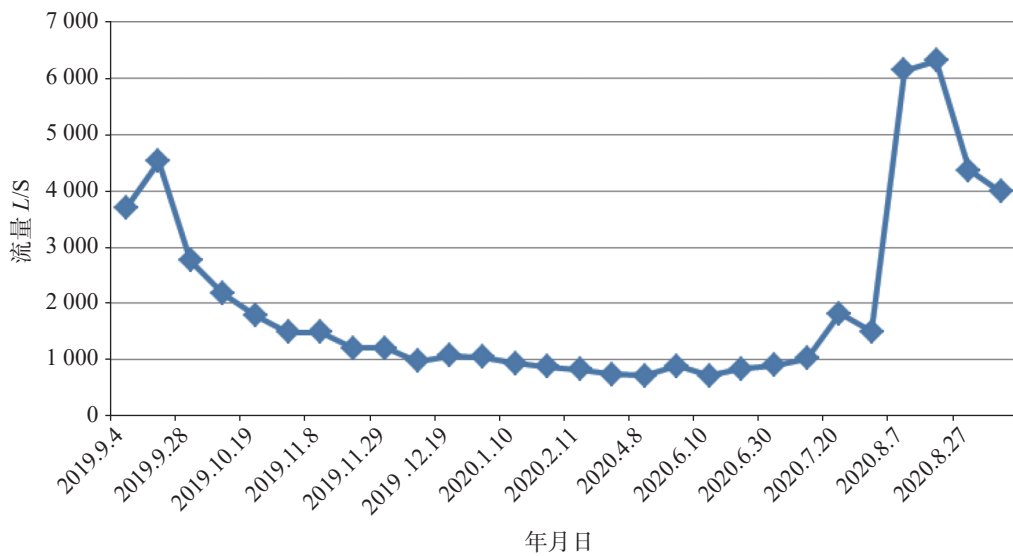


图 3 老腊底地下河出口动态监测曲线图

Fig. 3 Dynamic monitoring curve of outlet of Laoladi underground river

万地形地质图上量测; M 为地下水径流模数 ($L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$), 取年平均径流模数计算。地下水径流模数主要参考《云南重点岩溶区 1:5 万水文地质调查(阿舍大寨幅、鸣就幅)成果报告》及相关的 1:20 万水文地质普查报告。

据两种方法计算结果对比,取大气降水渗入法计算结果为隧道正常涌水量。由于隧道施工一般周期较长,因此应考虑由于降水的丰水期动态变化而引起的隧道涌水量的变化,降水量越大,其涌水量会随之增大。通过对收集的相关降水量数据进行测算,丰水年降水量与多年平均降水量之比约为 1.5、2.0、3.0,因此动态系数在地势较高段取 1.5,地势低洼汇水面积较大段取 2.0,隧道浅埋段、岩层破碎段、岩溶发育地段取 3.0。

选用以下公式来预测隧道最大涌水量:

$$Q_o = Q_s \times \text{动态系数}$$

式中: Q_o 为隧道最大涌水量 ($m^3 \cdot d^{-1}$); Q_s 为隧道正常涌水量。计算结果见表 2。

3.5 地热异常

地热异常区位于文山西部的薄竹山花岗岩与寒武系地层接触带附近,该区岩浆活动频繁,主要为印支期、燕山期和喜马拉雅期,岩浆岩类型以基性、酸性两类岩为主。从区域地质资料调查情况看,出露地层为白垩纪(K)细—中粒似斑状黑云二长花岗岩,花岗岩岩体附近沿 NE 向断层带发现多个温泉,温度一般在 $45^\circ \sim 50^\circ$,属中温温泉,按地热资源温度分

级属低温地热资源温热水。其水化学类型为 HCO_3^-Na 型,主要为大气降水补给,补给高度在海拔 2000 m 以上,地热水循环深度 2580~2977 m。区内没有相对的隔热层,区域内发育的张性断裂及岩溶通道起主要导水作用,区内发育的构造裂隙网起导热作用。断裂破碎带在深部既是储热导热空间,又是对流通道。在构造薄弱地段常见地热异常现象,热储结构类型为带状型,热储温度以邻区类比推算为 $70 \sim 110^\circ C$ 。根据水文地质调查,温泉与大气降水有一定关系。受不同地层岩性对渗流的控制作用,当浅层水与深层上涌热水混合,就会导致水温降低。此外热水流运移过程中热量扩散,也会使水温降低。区域上温泉成因模式为大气降水补给的断裂深循环型地热系统^[29]。由于热储温度高,施工会导致隧道内温度高,且气体中一氧化碳、甲烷、硫化氢等有毒有害气体含量超标。

3.6 岩溶砂化

研究区南西部蒙自盆地边缘向山区过度带的响河村以东、大鸡冲—新田,出露的寒武系中统龙哈组(C_2l)灰色薄—中层状白云岩夹钙质白云岩,灰、浅灰色中厚层粉晶灰岩,白云质粉细晶灰岩、结晶白云岩,厚度 118~300 m。由于白云岩岩溶现象,溶蚀沿结构面扩展,在出露地表的部分形成宽度不等的砂化现象,呈强溶蚀状态,岩体强度较低,残留物为砂夹粒径不均的白云岩块石,手捏即散成砂状,称之为白云岩岩溶砂化^[30]。随着白云岩岩溶砂化作用的不

表2 线路隧道最大涌水量预测结果表
Table 2 Prediction results of maximum water inflow in line tunnel

序号	隧道规模 /m	隧道正常涌水量 $Q_s / m^3 \cdot d^{-1}$	预测隧道最大涌水量 $Q_o / m^3 \cdot d^{-1}$	线路
1	8 955	24 970.97	49 941.94	中线方案
2	7 215	22 708.96	45 417.93	
3	7 395	20 760.43	62 281.3	
4	7 695	19 728.00	59 184	
5	7 715	15 243.17	30 486.34	
6	16 635	89 703.81	269 111.4	
小计		193 115.34	516 422.91	
7	4 150	10 328.61	15 492.91	南线方案
8	12 215	102 075.96	306 227.9	
9	12 783.1	72 461.36	108 692	
10	4 350	7 414.44	22 243.32	
11	6 219	15 747.47	23 621.2	
小计		208 027.84	476 277.33	
12	3 725	6 492.81	19 478.44	北线方案
13	4 295	15 760.78	47 282.34	
14	7 115	15 845.37	47 536.1	
15	5 805	25 093.19	75 279.58	
16	138 535	57 829.54	173 488.6	
17	13 650	16 171.37	24 257.06	
小计		137 193.06	387 322.12	
18	3 558	7 065.76	10 598.64	贯通方案
19	4 635	8 610.34	25 831.03	
20	4 225	7 408.08	22 224.25	
21	3 019.71	5 279.35	15 838.05	
22	6 535.3	8 918.25	26 754.75	
23	6 273.35	18 548.92	55 646.77	
24	4 466.85	13 918.10	20 877.16	
25	3 504.23	10 766.01	32 298.02	
小计		80 514.81	210 068.67	
合计		618 851.06	1 856 553.17	

断发展,白云岩砂化物质结构演化为白云岩砂—白云岩(粉)—粉质细砂。其分布受地层岩性、地质构造破坏影响较大,平面上表现为不均一性^[31]。地表出露的砂化白云岩破碎,稳定性差,用手能扣碎,隧道开挖极易形成围岩坍塌、冒顶等安生生产事故,不但影响施工进度、成本和工艺,而且在开挖顶板低于地下水水位时可能形成突泥,危害较为严重。

4 结论与建议

研究区地质构造、地形地貌等地质环境条件复杂、多样,铁路沿线岩溶含水层富水性极强,构造导水、碎屑岩与碳酸盐接触带导水,大泉、地下河

分布密集、流量大,补给径流排泄高差大,流速快。岩溶面积分布广,岩溶发育强烈,地表洼地、落水洞、溶洞、天窗等岩溶形态多样,地下岩溶管道发育,规模大、管道长,是地下水的径流通道,地表地下水转化快。从勘察孔中得出,溶洞分布多达5层,最大溶洞高3 m。薄竹山出露的花岗岩地热资源丰富,热储温度推算为70~110℃,含有毒气体超标。蒙自边缘山区出露的寒武系中统龙哈组(C_2l)存在砂化现象,岩体结构破碎、稳定性极差。研究区内复杂的地质构造、水文地质条件、强发育的岩溶、地热、砂化等问题对工程建设影响极大,工程的建设势必会造成区域水生态环境的破坏。为了减少人类活动对水资源和生态环境的影响,在从经济成本、施工安全方面考虑,强岩溶发育区拟建工程建设线路的规划和选择尽量避开地下水富集区、岩溶强发育区、地下水主管道径流区、地热异常区、岩溶砂化地层区。线路规划建议以下:

(1)避开地下水富集区 由于碳酸盐岩地层分布面积广,地下水出露点多,因此在线路布置时避开大泉、主要水源径流区和地下水富集的水位以下,以免施工导致隧道涌水和泉水断流、干枯,影响农村生活饮用水,引发生态缺水问题;

(2)尽量避开岩溶强发育区 研究区地表、地下岩溶发育,垂向岩溶发育深度达百米,路基和施工易出现隧道顶部的洞穴充填物坍塌诱发岩溶塌陷,使隧道底部地层松软或洞穴顶、底板的稳定性差,巨大岩溶空洞使隧道悬空等问题,在前期勘查中采用电磁波CT透视技术等进行探测,查清溶洞规模、特征、发育方向;

(3)避开大泉、地下河的主管道径流区 大泉、地下河极为发育,规模大、流量大,旱雨季流量相差十几倍,极易发生突水突泥等地质灾害,因此在查清和探明岩溶管道的基础上,将线位布置地下水位和主管道的径流区之上;

(4)避开地热异常区 大瑞铁路等工程遇到地热,给施工难度、生产成本和施工环境带来了巨大的挑战和困难。在研究区薄竹山一带花岗岩温泉出露点温度高,储热层分布面积广,储热条件较好,可能会遇到地热危害,在隧道施工中温度还会高于出口温度,也可能受有毒气体危害,建议线路布置时尽量避开,而选择岩浆岩分布的以北区域;

(5)避开岩溶砂化地层区 随着岩溶水的运移、

渗透,微裂隙在溶蚀作用下不断扩大,溶蚀作用使新生溶蚀次生裂隙的空间加大,而这又在一定程度上加强了地下水的流通和运移能力。在这种循环渗透溶蚀作用下,地下水继续向裂隙两侧岩体渗透,在宏观上表现为砂化条带向两侧岩体扩展,厚度增大,白云岩砂化导致岩体质量降低,目前强烈砂化围岩强度类别为IV~V类。选线过程中利用钻孔勘察查清岩溶砂化的埋深厚度和岩体结构、构造、强度等参数;

(6)对于在地面调查过程不能解决的水文地质条件、深部岩溶发育、导水构造等问题,应开展物探、钻探、测试分析等手段,详细剖析地质结构特征,为线路的布设、调整提供更多有利的地质数据支撑,减少岩溶水文地质问题和生态环境问题。

致谢: 本次研究成果数据得到了云南省地质环境监测院新建文山至蒙自铁路水文地质调查项目组的大力支持,在此深表感谢!

参考文献

- [1] 张加桂. 云南大理-瑞丽铁路工程地质问题探讨[C]. 2011年全国工程地质学术年会论文集. 2011: 397-404.
ZHANG Jiagui. Discussion on engineering geology of Dali - Ruili railway in Yunnan [C]. Proceedings of the 2011 National Academic Conference on Engineering Geology. 2011: 397-404.
- [2] 毛晓长, 吴中海, 李贵书, 尹福光. 泛亚铁路大理至瑞丽沿线地质构造综合研究主要进展和成果[J]. 中国地质调查, 2015, 2(4): 13-23.
MAO Xiaochang, WU Zhonghai, LI Guishu, YIN Fuguang. The main progress and achievements on comprehensive research of geological structure along the Dali-Ruili segment of the Pan-Asia railway network in Yunnan, Chian[J]. Geological Survey of China, 2015, 2(4): 13-23.
- [3] 吴中海, 赵希涛, 范桃园, 叶培盛. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征[J]. 地质通报, 2012, 31(Z1): 191-217.
WU Zhonghai, ZHAO Xitao, FAN Taoyuan, YE Peisheng. Active faults and seismologic characteristics along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(Z1): 191-217.
- [4] 周春景, 吴中海. 滇西大理至瑞丽铁路沿线地温场特征及其工程地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(Z1): 326-336.
ZHOU Chunjing, WU Zhonghai. The characteristics of geothermal field along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province and their implications for geo-engineering[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(Z1): 326-336.
- [5] 康晓波, 王宇, 张华. 杞麓湖泄水暗河淤塞的不良环境效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 121-124.
KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua. An analysis of bad environmental effects of clogging of the discharging underground river of the Qilu Lake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 121-124.
- [6] 宗宁, 付开隆, 马建军. 黔桂铁路扩容改造工程主要岩溶问题及对策[J]. 路基工程, 2007(2): 152-154.
ZONG Ning, FU Kailong, MA Jianjun. Main karst problems and countermeasures of Qiangui railway expansion reconstruction project[J]. Subgrade Engineering, 2007(2): 152-154.
- [7] 王章琼, 柯茂东, 张兵, 李元松, 王亚军. 湖北鹤峰太平隧道特大溶洞发育特征及稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 48-53.
WANG Zhangqiong, KE Maodong, ZHANG Bing, LI Yuan-song, WANG Yajun. Characteristics and engineering evaluation of extra large-scale karst cavern of Taiping Tunnel in Hefang of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30 (4): 48-53.
- [8] 杜世回. 西康铁路增建二线岩溶问题概述[J]. 铁道勘察, 2009, 35(3): 16-18.
DU Shihui. Summary for karst problems in the supplemented second Xikang railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, 35(3): 16-18.
- [9] 杜宇本, 蒋良文, 胡卸文, 许模, 雷明堂, 胡清波. 高速铁路复杂岩溶地质勘察及灾害防治[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(4): 16-21.
DU Yuben, JIANG Liangwen, HU Xiewen, XU Mo, LEI Ming-tang, HU Qingbo. Geological investigation and disaster prevention of complex karst on highspeed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(4): 16-21.
- [10] 李小和, 曹柏树. 宜万线的主要工程地质问题及勘察方法[J]. 铁道工程学报, 2005(S1): 260-267.
LI Xiaohe, CAO Baishu. The main geology problems and survey methods of Yichang-Wangzhou railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(S1): 260-267.
- [11] 杜宇本, 蒋良文, 胡清波, 崔建宏, 毛邦燕, 冯涛. 西南及邻区高速铁路岩溶工程地质分区研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 11-16.
DU Yuben, JIANG Liangwen, HU Qingbo, CUI Jianhong, MAO Bangyan, FENG Tao. Study on karst engineering geological zoning of high speed railway in southwest and adjacent areas in China[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(6): 11-16.
- [12] 吴治生. 岩溶隧道的环境地质问题[J]. 铁道工程学报, 2006(1): 70-73,99.
WU Zhisheng. Environmental geology problem of tunnel in karst zone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(1): 70-73,99.
- [13] 李杰, 薛正年, 杨宏志, 杨少伟. 基于RS和GIS的岩溶地质公路选线生态评价方法研究[J]. 公路, 2018, 63(6): 220-226.
LI Jie, XUE Zhengnian, YANG Hongzhi, YANG Shaowei. Research on ecological evaluation method of karst geological highway route selection based on RS and GIS[J]. Highway, 2018, 63(6): 220-226.
- [14] 高伟, 杨艳娜, 李豫馨, 许模. 岩溶地区隧道工程地质选线适宜性评价[J]. 人民珠江, 2016, 37(3): 32-37.

- GAO Wei, YANG Yanna, LI Yuxin, XU Mo. Evaluation of rationality of tunnel engineering geological line selection in karst area[J]. *Pearl River*, 2016, 37(3): 32-37.
- [15] 郑宗利, 关惠军, 苟想伟, 石恒岳, 于咏妍. 岩溶隧道突涌水预警体系的建立[J]. *灾害学*, 2022, 37(1): 41-46.
ZHENG Zongli, GUAN Huijun, GOU Xiangwei, SHI Hengyue, YU Yongyan. Establishment of early-warning system for water inrush in karst tunnel [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(1): 41-46.
- [16] 黄新连. 隧道超前地质预报中几个问题的探讨[J]. *铁道勘察*, 2010, 36(4): 48-50.
HUANG Xinlian. Some issues in geological prediction on tunnels[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2010, 36(4): 48-50.
- [17] 张华, 张贵, 王宇, 方永林, 代旭升, 王波, 何绕生, 罗为群, 蓝芙宁. 岩溶断陷盆地跨孔CT成像探测岩溶孔隙及赋水状态的实验研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 737-744.
ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Yu, FANG Yonglin, DAI Xusheng, WANG Bo, HE Raosheng, LUO Weiqun, LAN Funing. Experimental study on the detection of karst poros by cross-hole CT imaging and groundwater occurrence in the Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 737-744.
- [18] 何禹, 李永涛, 朱亚军. 钻孔电磁波CT技术在深部岩溶勘探中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2010, 7(4): 451-455.
HE Yu, LI Yongtao, ZHU Yajun. Application of drilling electromagnetic CT to deep cavern and fracture prospecting[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(4): 451-455.
- [19] 韦建昌, 邵羽, 梁铭, 翟少磊, 蓝日彦, 黄彬华. 超前水平钻探在岩溶隧道地质预报中的应用研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(3): 220-226.
WEI Jianchang, SHAO Yu, LIANG Ming, ZHAI Shaolei, LAN Riyan, HUANG Binhua. Application of advanced horizontal drilling in geological prediction of karst tunnel[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(3): 220-226.
- [20] 张华, 任世川, 王劲. 新建文山至蒙自铁路水文地质专题研究报告[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院: 2021.44-47.
ZHANG Hua, REN Shichuan, WANG Jin. Investigation report on hydrogeology of newly built Wenshan-Mengzi Railway[R]. Kunming: Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring: 2021.44-47.
- [21] 张贵, 何绕生, 王波, 张文鋈, 周翠琼. 云南华宁县盘溪大龙潭水文地质特征[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(5): 40-45.
ZHANG Gui, HE Raosheng, WANG Bo, ZHANG Wenjun, ZHOU Cuiqiong. Hydrogeological characteristics of Dalongtan, Panxi, Huaning county of Yunnan province[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science Edition)*, 2020, 37(5): 40-45.
- [22] 王宇, 张贵, 张华. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Hua. Investigation and study of karst hydrogeology and environmental geology in Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [23] 王波, 张华, 王宇, 张贵, 张文鋈, 高瑜, 罗为群. 泸西喀斯特断陷盆地地表水与地下水流域边界与水动力性质[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 319-326.
WANG Bo, ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Wenjun, GAO Yu, LUO Weiqun. Watershed boundaries and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 319-326.
- [24] 莫美仙, 王宇, 李峰, 虞慧. 云南南洞地下河系统边界及性质研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 173-185.
MO Meixian, WANG Yu, LI Feng, YU Hui. Study on underground river system boundaries and properties of Nandong in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 173-185.
- [25] 赵一, 李衍青, 覃星铭, 洪涛, 程瑞瑞, 蓝芙宁. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 226-233.
ZHAO Yi, LI Yanqing, QIN Xingming, HONG Tao, CHENG Ruirui, LAN Funing. Tracer tests on distribution and structural characteristics of karst channels in Nandong underground river drainage[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 226-233.
- [26] 王宇, 王梓澈. 岩溶地下水富集的地貌组合形态[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(4): 314-324.
WANG Yu, WANG Ziwei. Patterns of karst geomorphologic combination in areas with rich groundwater[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 314-324.
- [27] 张华, 康晓波, 杨文兴. 云南通海县岳家营暗河管道水质评价[J]. *云南地质*, 2014, 33(4): 588-593.
ZHANG Hua, KANG Xiaobo, YANG Wenxing. The assessment of tube water in Yuejiayin buried river in Tonghai [J] *Yunnan Geology*, 2014, 33(4): 588-593.
- [28] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.
- [29] 陶时雨, 张世涛, 张东泽, 张磊, 黄威虎. 滇东南薄竹山地区温泉地质特征及成因分析[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(6): 65-69.
TAO Shiyu, ZHANG Shitao, ZHANG Dongze, ZHANG Lei, HUANG Weihu. Analysis of geologica characteristics and genesis of hot springs in Bozhushan area in southeast of Yunnan Province[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Science)*, 2015, 35(6): 65-69.
- [30] 张良喜. 白云岩岩溶砂化形成机理及其工程特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
ZHANG Liangxi. Study on formation mechanism and engineering characteristics of dolomite karst sanding [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [31] 张良喜, 张海泉, 赵其华, 何文秀. 四川坪头水电站白云岩砂化特征及发育分布规律[J]. *人民长江*, 2012, 43(19): 42-44, 78.
ZHANG Liangxi, ZHANG Haiquan, ZHAO Qihua, HE Wenxiu. Characteristics and distribution of dolomite sandification at Pingtou hydropower station[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(19): 42-44, 78.

Karst hydrogeological problems and countermeasures of a proposed railway in plateau slope area of southeast Yunnan

ZHANG Hua¹, KANG Xiaobo¹, WANG Bo¹, CHAI Jinlong², ZHOU Cuiqiong¹, CAI Shuangle³, HOU Xutao³, HUANG Chenhui⁴, PAN Xiaodong⁴

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China/Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China; 3. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The study area is located in the plateau slope area of southeast Yunnan at the southern margin of Yunnan-Guizhou Plateau, which is the surface watershed zone between Nanpanjiang River Basin and Honghe River Basin at the source of the Pearl River. There exist intense erosion and cutting, complicated topographic and geomorphic conditions and geological structure. The study area belongs to Gejiu sub-region in the stratigraphic region of South China. The widely exposed middle Triassic Gejiu formation and other aquifer groups are rich in water. Due to the complicated hydrogeological conditions, the study area is divided into 2 first-level water systems, 7 second-level water systems, 26 third-level water systems, and 12 fourth-level water systems. Karst is strongly developed with abundant precipitation and strong hydrodynamic effect. Underground river pipelines, depressions and sinkholes are also widely distributed. There are 9 large springs and 20 underground rivers (underflows). Through field investigation, observation, tracer tests and experiments, the influence of karst hydrogeological conditions and problems on the route selection of a proposed railway in the study area are analyzed and assessed under the guidance of geological and karstological theories. The study shows that 80% of the aquifers are the carbonate aquifer group with uneven water abundance from the intermediate to extremely strong degrees. Groundwater mainly exists in karst pipeline. Karst is intensively developed in the study area where the tertiary dissolution process creates the vertical distribution of multi-layer karst caves. At the depth of 100 m, strong karst caves are developed with at least 1 layer or at most 3-4 layers. Large springs, underground rivers and pipelines are also widely distributed. The length of karst pipelines ranges from 6 km to 37.75 km. The maximum $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ tracer test results show that there exist underground dissolved pools, or lakes in the main pipeline of underground rivers. It is predicted that the middle line of the tunnel will suffer the largest water inflow, followed in turns by the south line, the north line and the through-line. The through-line is expected to experience relatively small risk of water inflow in tunnel excavation, and hence it is recommended in route selection. Geothermal resources are distributed near the contact zone between the Bozhushan granite body and the Cambrian strata in the west of Wenshan. The temperature of hot springs generally ranges from 45° to 50° . In the belt-shaped geothermal reservoir, temperatures are $70\text{-}110^\circ \text{C}$ by analogy of those in the neighboring area. The gray and thin medium dolomite intercalated with calcareous dolomite in the middle Cambrian Longha formation (C_2I) shows serious desertification. The surface sanding dolomite is broken with poor stability, and can be broken by hand. Consequently, accidents such as surrounding rock collapse and roof falling are quite possibly to occur in tunnel excavation. In this study, suggestions to solve karst geological problems in the study area are put forward. Several areas should be avoided in tunnel excavation, such as the areas with rich groundwater, especially those with strong water abundance, the areas with intense Karst development, especially the vertical development areas of underground and surface karst, the runoff area of the main pipeline of Daquan underground river where the route should be planned as far as possible above the recharge area or water level of the main pipeline, the geothermal anomaly area exposed by granites, and the areas distributed with the karst sandstone stratum. These suggestions are expected to reduce the karst hydrogeological hazards and the damage to groundwater environment that the proposed railway construction may face, and to provide reference for the engineering construction of karst areas with intense development.

Key words hydrogeology, karst geology, suggestions on route selection, southeast Yunnan

(编辑 杨杨 张玲)