

西香高速公路B4段牦牛山特长隧道水文地质条件分析研究

王明秋¹ 郑东²

1. 重庆工程职业技术学院, 中国·重庆 402260

2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 中国·重庆 400000

摘要: 针对牦牛山特长高速公路隧道建设中可能出现的水文地质问题, 本文在野外调查和现有研究资料基础上, 系统分析研究了隧址区含水岩组特征、地下水补径排条件及岩溶发育规律。查明地下水主要接受大气降水补给, 总体自北向南径流, 并于清水河右岸集中排泄; 分析得到隧址区以碳酸盐岩岩溶水为主, 含水不均且富水性强—中等。研究认为, 隧道施工将面临较高突涌水风险, 需重点防范岩溶管道及暗河系统的影响。本文对其他隧道建设具有一定的参考意义。

关键词: 特长隧道; 岩溶; 含水岩组; 水文地质条件

Hydrogeological Condition Analysis of the Maoniu Mountain Super-Long Tunnel, B4 Segment, Xixiang Expressway

Wang Mingqiu¹, Zheng Dong²

1. School of Geomatics and Geographic Information, Chongqing Vocational Institute of Engineering, College, China Chongqing 402260

2. Geotechnical Engineering Branch, Sichuan Geological Engineering Survey Institute Group Co., Ltd, China Chongqing 400000

Abstract: In view of the possible hydrogeological problems in the construction of the Niu Mountain long expressway tunnel, based on field investigations and existing research data, this paper systematically analyzes and studies the characteristics of water-bearing rock groups, groundwater recharge, drainage and discharge conditions, and the development laws of karst in the tunnel site area. It is found that the groundwater mainly receives recharge from atmospheric precipitation, flows generally from north to south, and is concentratedly discharged on the right bank of the Qingshui River. The analysis shows that the tunnel site area is mainly characterized by karst water in carbonate rocks, with uneven water-bearing and strong to moderate water-richness. The study suggests that the tunnel construction will face a relatively high risk of sudden water gushing and needs to focus on preventing the influence of karst pipes and underground river systems. This paper has certain reference significance for the construction of other tunnels.

Keywords: Super-long tunnel; Karst; Water-bearing rock formation; Hydrogeological conditions

0 引言

随着我国高速公路建设不断向西部复杂地质山区延伸, 隧道工程面临的突涌水灾害风险日益凸显, 特别是穿越岩溶发育区的特长隧道, 水文地质条件的准确研判成为制约工程安全的关键因素^[1]。近年来, 国内外学者在隧道水文地质研究领域取得了显著进展, 周胜森等采用“天—空—地”一体化综合遥感技术, 实现了对拟建高速公路廊道不良地质体的早期识别与稳定性评价^[2]; 曾斌等基于地

下水流系统理论, 深入分析了岩溶隧道涌突水的来源及路径, 为隧道涌水预测提供了理论依据^[3]; 李录等应用改进的区间层次分析—模糊综合评价法 (IAHP-Fuzzy) 构建了岩溶隧道突水风险预测模型, 提升了风险评估的准确性^[4]; 毛永强等针对富水破碎带隧道施工, 建立了涌水突泥风险评估模型, 为类似工程地质灾害防控提供了参考^[5]。西香高速公路 B4 段牦牛山特长隧道地处盐源丽江台缘拗陷带, 区内碳酸盐岩广泛分布, 岩溶发育强烈, 地下水系统复杂,

隧道施工面临较高的突涌水风险。本文通过资料分析、野外地质调查、水文地质测绘等手段，系统研究隧址区含水岩组特征、地下水补径排条件及岩溶发育规律，旨在为隧道施工中的水害防治提供科学依据，对保障工程安全、降低地质灾害风险具有重要实践意义。

1 工程概况

西香高速公路初设阶段牦牛山特长隧道，地理位置属西昌市盐源县棉桠乡与大草乡，为高速公路的控制性工程^[4]。研究区交通较差，进口区域稻攀公路从工作区东侧通过，有新民村支路到达进口区域，出口区域有国道 S307 经过村道到处出口下部坡脚，距离出口约 500m 距离。

2 区域水文地质背景

隧址区位于滇西北横断山高山峡谷与云贵高原接壤地带东侧，四川盆地西南，地势高差悬殊，区内地势整体上西高东略低，属构造剥蚀、侵蚀深切高山地貌。隧址区最高峰高程约 4242 米，东侧进口附近河谷高程约 2710m，西侧出口附近沟谷高程约 1900 米，最大高差约 2300 米。地形切割强烈，山峦起伏，沟谷纵横。

3 隧址区水文地质类型

3.1 隧址区水文地质类型

隧址区地下水类型为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类溶洞裂隙水，其中碳酸盐岩类溶洞裂隙水为本区重要地下水类型。

3.2 含水岩组的划分及富水性

根据地下水类型及富水性分区，划分为三大类九个区。

3.2.1 松散层孔隙水

(1) 砾卵石层孔隙水，中等富水。该区地层包括分布于河漫滩、一级阶地的第四系全新统冲积层和分布于二级阶地的第四系上更新统冰水堆积层，主要为砾卵石，砂土及少量粘性土充填，富水性中等，单井涌水量 100~500 m³/d。主要受降雨入渗及河水侧向补给，径流途径较短，主要受地形控制，一般就近于坡脚以下降泉方式排泄，主要分布于隧道进口段。

(2) 砾卵石层孔隙水，水量贫乏。该区地层包括第四系全新统沟口洪积层及第四系中下更新统冰水堆积层，主要为含泥的砾卵石层，局部为粘土夹砾卵石层，富水性差，水量贫乏，井涌水量 10~50 m³/d。主要受降雨补给，就近排泄。主要分布隧道洞身浅埋段山区洪水堆积层，地表调查堆积层有少量泉点出露，流量一般 1~5L/s。

3.2.2 碎屑岩裂隙水

该区地层包括三叠系青天堡组、博大组及盆地南部的下第三系红崖子组地层，主要为长石砂岩、粉砂岩、砾岩等，含构造裂隙及风化带裂隙水，泉流量较小，一般 0.1~1L/s，地下径流模数约 1L/s·km²。主要受大气降水补给，径流受构造及地形控制，径流途径一般不长，多以下降泉方式排泄，或补给邻近岩溶水。

3.2.3 岩溶水

(1) 灰岩裂隙溶洞水，溶洞暗河强烈发育。该区地层主要为三叠系白山组灰岩、白云质灰岩，溶洞暗河强烈发育，富水性好，岩溶大泉与暗河流量 100~1000L/s。岩溶水主要受大气降水补给，局部地段受河水补给，邻近基岩

表1 盐源盆地含水层组划分表

含水层组		地层代号	含水层特征
松散层含水层组	砂砾卵石层含水层组	Q ₄ ^{al} 、Q ₄ ^{pl}	为第四系全新统冲积、洪积砂砾卵石层，富水性较好，与其他含水层间水力联系较密切，地下水多为潜水。主要分布于河谷两岸及山口地带。
	泥夹砂砾卵石层含水层组	Q ₃ ^{gl} 、Q ₂ ^{gl} 、Q ₁ ^{gl}	为第四系更新统冰水和冰碛堆积泥夹砾卵石层，富水性差，地下水分布不均匀，为潜水或承压水。主要分布于盆地底部。
	第三系半成岩含水层组	N _{2x}	为上第三系昔格达组粉砂岩、粘土岩、砾岩，呈互层或夹层，半成岩状。富水性极不均匀，地下水多为承压水。主要分布于盆地底部和盆底边缘，大多埋藏于更新统地层以下。
碎屑岩含水层组		T _{3xb} 、T _{3jb} +sb、T _{1q}	T _{3b} 薄—中厚层状，局部厚层状岩屑长石砂岩、长石石英砂岩、粉砂岩、中细粒砂岩夹薄层状灰岩、泥灰岩、泥质灰岩、泥岩、炭质页岩及煤线，碳酸盐岩含量10~30%，岩溶不发育，仅见溶隙；T _{1q} 为粗粒岩屑长石砂岩夹砾岩、砂砾岩、细砂岩及粉砂岩，节理、裂隙较发育，富水性较差，水位埋深较大，多具承压性，呈条带状。
岩溶含水层组	灰岩含水层组	T _{2b} 、Eh	为中—厚层状、块状灰岩、（含）白云质灰岩和巨砾岩，岩质较纯，岩溶很发育，多发育溶洞、暗河。地下水水量丰富，是本区最主要的岩溶含水层。
	碳酸盐岩碎屑岩互层含水层组	T _{2y2}	T _{2y} 上部为薄—厚层状灰岩、白云质灰岩夹薄层状粉砂岩、页岩，岩溶发育，富水性好，东部稍差。该含水层组是本区主要的岩溶含水层，分布面积广。
	碎屑岩夹碳酸盐岩含水层组	T _{2y1}	为灰色长石岩屑砂岩、粉砂岩、炭质页岩夹灰岩或含硅质结核灰岩。

裂隙水少量补给, 径流途径一般较长, 以岩溶泉、暗河方式排泄。

(2) 灰岩裂隙溶洞水, 溶洞暗河不发育。该区地层主要为红崖子组砾岩, 岩溶发育程度一般, 溶洞暗河不发育, 岩溶泉流量一般 $1 \sim 10 \text{ L/s}$ 。主要受大气降水补给, 径流途径不长, 多以下降泉方式排泄。

(3) 碳酸盐岩碎屑岩溶洞裂隙水, 溶洞暗河中等发育。该区地层主要为三叠系盐塘组上段灰岩、白云质灰岩夹粉砂岩、页岩, 溶洞暗河中等发育, 岩溶泉流量一般 $10 \sim 100 \text{ L/s}$ 。主要受大气降水补给, 沿构造线方向向盆地底部径流, 多以泉的方式排泄。

(4) 碎屑岩夹碳酸岩裂隙溶洞水, 岩溶不发育。主要为三叠系盐塘组下段长石砂岩、粉砂岩、页岩夹灰岩地层, 岩溶不发育, 以裂隙水为主, 溶隙水次之, 地下径流模数 $1 \sim 3 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$, 泉流量 $0.1 \sim 1 \text{ L/s}$ 。

3.2.4 碳酸盐岩岩类溶洞溶隙含水岩组

根据地层含水特征划分含水层组。调查区主要划分为松散层含水层组、碎屑岩含水层组和岩溶含水层组(表1)。测区岩溶含水层组分布面积最大, 地表分布面积约 122 km^2 , 占测区总面积的 45%; 其次为碎屑岩含水层组, 地表分布面积约 140 km^2 , 占测区总面积的 52%; 松散层含水层组分布面积 7 km^2 , 占测区总面积的 3%。

3.3 地下水的补给、径流、排泄特征

3.3.1 水文地质单元的划分与补给排泄特征

调查区由于构造弧和断层的影响, 调查区可溶岩主要隧道山顶高原连续分布, 调查区简略分为一个岩溶水系统, 一个岩溶水系统是指具有共同补给边界和地下径流场的某一岩溶地下水系统的流域范围, 具有独立且完整的补给、径流、调蓄、排泄条件, 边界条件清楚, 水力联系密切。岩溶水系统边界可能是隔水地层、阻水断裂, 也可能是地下分水岭或地表分水岭。本次划分以暗河、岩溶大泉为基础, 若相互间水力联系密切则合并处理, 对于中小于流量泉点、分散排泄点或无明显排泄口的区域视具体情况而定。对于补给区相同的不同泉(暗河)点合并处理。调查区整个牦牛山脉地表水流向为, 北侧深山峡谷区地表水主要沿着陡崖直接流向卧罗河, 对地下水补给很小; 东西两侧山脉主要以页岩、砂岩夹灰岩为主, 地形陡峭, 地表水沿山间沟谷流入两侧河道, 少量入渗补给地下水; 山顶台原地势平缓, 岩溶强烈发育, 发育多处大型岩溶洼地, 落水洞广泛分布于整个山顶平原, 大气降雨主要入渗补给地下水, 少量沿着山间沟谷流入两侧河道, 地下水流向与地表水方向

基本一致, 岩溶水总体由北向南方向径流, 于清水河右岸受西格达组地层阻水溢出, 在清水河右岸黑山村一带形成以清水龙塘及多处岩溶大泉的集中排泄带, 根据前人长期观测资料: 泉、暗河排泄总量为 13184.61 L/s , 根据暗河动态监测资料及其他各泉偶测流量结合调查访问情况推算该系统平均径流模数为 $17.5 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$, 枯期径流模数为 $4 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ 。

3.3.2 岩溶地下水垂直分带

区内最低排泄基准面为清水及卧罗河, 地下水由北向南以纵向流为主, 水力坡度大, 纵向畅通无阻。分期抬升也造就了岩溶发育随深度的增加而减弱的大格局。在近地表地带, 岩溶水交替循环剧烈, 岩溶十分发育, 岩溶洞隙规模大、数量多。而在地下深处, 地下水交替运动十分缓慢, 仅发育一些溶孔和小溶隙。故形成了岩溶发育的垂直分带特征, 根据水文地质调查, 调查区自地表至地下可分为三带。

(1) 垂直循环带(I): 该带垂直岩溶发育, 地表形态以岩溶洼地和漏斗为主, 地下水接受大气降水补给, 经漏斗、洼地汇集后储存于岩溶孔隙及岩溶管道中, 部分经短途径流遇沟谷切割排泄于地表, 部分补给深部岩溶水。局部地下水交替循环剧烈, 其深度一般为数十米至数百米, 包括包气带与季节变动带。调查区内标高 $3000 \sim 4200 \text{ m}$ 以上为垂向洞隙带(竖向补给带)。

(2) 水平循环带(II): 指侵蚀基准面以上含季节变动带的下限, 该带岩溶形态以水平管道为主, 为强透水带, 岩溶水活动强烈, 为强透水带。岩溶水主要沿走向方向径流, 遇横向深切沟谷, 以大泉和暗河形式集中排泄, 部分经纵向沟切割后向倾向集中排泄。该带标高主要受区内最低排泄点(暗河出口标高)标高控制。根据清水右岸出露的岩溶大泉、暗河标高, 将标高 2300 m 确定为本区水平循环带的底界标高, 因而工作区内水平循环带的底标高为 $2300 \sim 3000 \text{ m}$, 在拟建隧道位置标高 2600 左右。

(3) 深部循环带(III): 发育于水平循环带以下, 无近代溶蚀现象, 涌水量较小, 其单位涌水量小于 $0.0001 \text{ L/s} \cdot \text{m}$, 但矿化度较高。其顶界为水平循环带的底界($1800 \sim 2300 \text{ m}$)。

综上所述, 研究区垂直循环系统位于高程 $3000 \sim 4200.0$ 以上, 水平循环带位于高程 $2300 \sim 3000 \text{ m}$ 米, (在拟建隧道附近顶标高为 2600 m 左右)。拟建 C5 隧道标高 2600 米, 线路位于分水岭最北端区域。为补给区处主要以垂直循环带为主, 线路 C3、C6 位于水文单元中部, 因

此拟建隧道位于垂直循环带与季节水平循环带附近。

3.3.3 地下水动态特征

根据已有的以往的资料和本次水文地质调查,岩溶水的动态与降雨量关系密切,呈同步变化特点。补给面积较大岩溶大泉流量大,一般其流量峰值滞后降雨峰值约 1~2 天。而岩溶水的动态变化与其赋存形式及补给条件有关,以溶隙渗入补给的泉,变幅较小,为 2~6 倍左右。根据前人监测资料调查区清水河右岸出水点泉量与降雨的关系曲线(如图 1)。

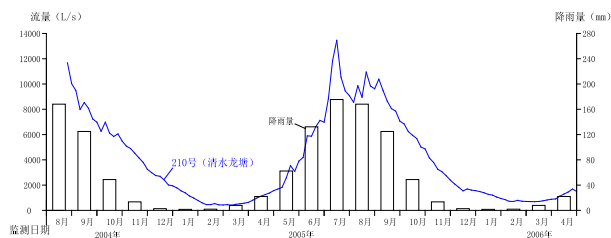


图1 调查区清水河右岸泉量与降雨动态监测曲线图

4 结语

隧址区地下水类型为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类溶洞裂隙水,其中碳酸盐岩类溶洞裂隙水为本区重要地下水类型。调查区主要划分为松散层含水层组、碎屑岩含水层组和岩溶含水层组。从本次调查来看,区内最低排泄基准面为清水及卧罗河,地下水由北向南以纵向流为主,水力坡度大,纵向畅通无阻。由于隧道开挖将形成新的人工地下水排泄通道,改变当地水文地质环境,建议在进行隧道施工中加强水文地质长期观测工作,以利于隧道涌做好超前调研,同时为地面变形、水源枯竭的预测研究提供资料。

参考文献:

[1] 周胜森,李为乐,陈俊伊等.西昌—香格里拉拟建

高速公路廊道不良地质体遥感识别[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(6):90-102.

[2] 曾斌,陈植华,邵长杰等.基于地下水流系统理论的岩溶隧道涌突水来源及路径分析[J].地质科技通报,2022,41(1):99-108.

[3] 李录,秦本东,郭佳奇等.基于IAHP-Fuzzy的岩溶隧道突水风险预测[J].高压物理学报,2022,36(5):190-202.

[4] 毛永强,张子平,袁青等.隧道穿越富水破碎带涌水突泥风险评估模型研究[J].人民长江,2022,43(12):88-95.

[5] 曾斌,陈植华,邵长杰等.基于地下水流系统理论的岩溶隧道涌突水来源及路径分析[J].地质科技通报,2022,41(1):99-108.

[6] 李远远,李春鹏,和大钊等.基于流固耦合作用的富水断层区隧道初期支护优化分析[J].水文地质工程地质,2025,(52):145-152.

[7] 郑东,沈昌君,刘明等.西香高速公路B4段牦牛山特长隧道专项水文地质调查报告[R].重庆:四川省地质工程勘察院集团有限公司,2022.

基金项目:本文受重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202203404, KJQN202503406);重庆市职业教育学会课题(2025ZJXH580053);重庆工程职业技术学院教学改革研究项目(JG231028)资助。

作者简介:王明秋(1983-),男,苗族,重庆彭水人,硕士,副教授,工程师。研究方向:水文地质、工程地质及地质灾害的教学与研究工作。