

# 五指山隧道地下水化学特征与水动力分带模式\*

李扬红, 邓英尔, 贾疏源

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:**五指山隧道施工时面临涌水量大及动态变化强烈等复杂水文地质问题。该文调查了隧址区地质环境,分析了隧址区地下水补给、径流、排泄特征,对比分析了隧址区不同时期的地下水化学特征,以及隧址区地下水动力垂直分带。结果表明:(1)隧道涌水属于深循环地下水,进口段隧道涌水主要来自砂页岩含水层内的水,而出口段隧道涌水含有大量石膏溶滤水。(2)样品硫、氧同位素组成证实了五指山隧道主要涌水带均与浅表地下水的直接下渗有关。(3)隧道开拓过程中可以揭露到多个相互隔绝的地下水起源略有差异的含水带,而在浅表部存在一个沟通这些含水系的横向含水带将它们连接起来。

**关键词:**五指山隧道; 地下水; 水化学特征; 水动力分带; 隧道涌水

中图分类号: P343

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0172-03

## Hydrochemistry Characteristics and Hydrodynamic Zone of Groudwater of Tunnel in Wuzhi Mountain

LI Yang-hong, DENG Ying-er, JIA Shu-yuan

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** There are complicated hydrogeology problems such as a large quantity of inflow water and a great of dynamic changes during construction of the tunnel in Wuzhi mountain. These jobs were presented in this paper in details such as surveying geological environment of the tunnel area, analyzing track characteristics of groundwater and contrasting hydrochemistry characteristics of groundwater in different periods. And the hydrodynamic zones at the tunnel were also analyzed. Results show that the inflow water is circulating groundwater in the deep earth. The inflow water at the entrance of the tunnel is from the sandy shale region. And the inflow water at the exit of the tunnel is mainly composed of gypsum-dissolved water. The results also show that there are direct relation between the tunnel inflow water and the groundwater on the earth's surface proved by the composition of samples of sulfur and oxygen isotopes. The difference of the water-bearing zone in the isolated groundwater was disposed when the tunnel was exploited. And the transverse water-bearing zones were connected by the one at the earth's surface.

**Key words:** Tunnel in Wuzhi mountain; groundwater; hydrochemistry characteristic; hydrodynamic zones; inflow water

在水文地质条件相对复杂的隧道施工过程中,隧址区可能发生地质灾害现象,影响正常施工,特别是大量高压涌水的情况常常酿成重大事故。例如,渝怀铁路圆梁山隧道发生特大岩溶涌水,对施工造成极大影响<sup>[1]</sup>。国外在欧洲阿尔卑斯山隧道及其它一些越岭隧道也发生过类似的现象,无不对施工造成极大的

危害。地下水与岩土体之间可发生离子交换、氧化还原、吸附解析等复杂的物理化学过程<sup>[2]</sup>。地下水记录了流经途径的水文地质条件等环境信息<sup>[3]</sup>。进行地下水化学分析,可研究地下水中化学组分的形成、分布、迁移和富集规律等<sup>[4]</sup>。通过水化学资料分析可以提取有关地下水赋存环境、循环深度、渗流途径等地

\* 收稿日期: 2008-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40202036, 40572163)

作者简介: 李扬红(1982-), 女, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: liyanghong888@163.com

质环境与水动力条件的信息。水化学成分分析是研究水文地质条件的重要途径<sup>[5]</sup>。五指山隧道施工时面临涌水量大等复杂水文地质问题。本文对比研究隧址区不同时期的水化学特征,并探讨五指山隧道地下水动力带的划分问题,为研究隧道涌水的原因和地下水的循环特征提供科学依据。

## 1 隧址区地质环境

五指山是金沙江及其支流中都河、屏山河与岷江水系马边河、沐川河、龙华河等支流的分水岭。次级水系沿背斜两侧呈羽状分布,相对切割深度达 300~400 m。横切五指山的这些沟谷常成为当地侵蚀基准面,控制了地下水的排泄。隧址区出露地层包括二叠系、三叠系及侏罗系,隧道穿越的山体主要由三叠系组成。三叠系嘉陵江组( $T_{1j}$ )及雷口坡组( $T_{2l}$ )为岩溶含水层,富水性强,地表有岩溶大泉出露。

五指山隧道全长 3 911 m,进出口设计标高分别为 882.17 m, 802.45 m, 高差 80 m, 最大埋深约为 790 m。隧道岩溶段总长 2 262 m, 占隧道总长 58%, 处于隧道的中部。自 2004 年开工以来的施工过程中,揭露涌突水含水带达 7 个之多。同时还揭露了极为少见的石膏岩,石膏岩厚达 60 m, 伴生有多膏溶角砾岩渗水带。另外,隧道涌水物理性质及化学组分变化大且复杂,同时涌水量巨大,动态变化强烈。

## 2 隧址区地下水补径排分析

隧址区地下水主要获得大气降水补给。嘉陵江组—雷口坡组岩溶化地层广泛暴露于山脊地带,有利于获得大气降水的补给。

地下水排泄区分布于五指山两侧。在五指山北东坡,有大量泉水出露,其中水洞子泉从嘉陵江底部涌出,为悬挂于陡壁上的岩溶大泉。段家湾泉从铜街子组顶部涌出。岩湾头冒水湾泉从嘉陵江组涌出。山脊附近的碳酸盐岩出露地带有季节性泉水涌出,如撕竹坪、捞林沟等处。五指山南西坡龙洞坪的雷口坡组有岩溶大泉出露;冷水溪雷口坡组顶部有岩溶大泉出露。

分水岭附近,ZK4 钻孔揭露的溶洞最低高程为 1 226.03 m,在分水岭两侧,低于此高程的斜坡地带均有岩溶泉出露,排泄岩溶水。因此推测岩溶水向分水岭两侧径流,地表分水岭与地下分水岭基本重合,岩溶演化趋势是:岩溶地下水分水岭将不断向北东侧移动,北东坡一侧将成为岩溶地下水的主要径流区。

分水岭北东坡为地层产状比较平缓的逆向坡,因下伏相对隔水岩体的阻隔,三叠系灰岩岩溶水,从

$T_{1j}$ 与 $T_{2l}$ 的界面附近排泄(老段家湾泉 1 150 m,水洞子 1 140 m)。另有部分岩溶水越层补给 $T_{2l}$ 后再向地表排泄。

分水岭南西坡为地层产状较陡的顺向坡,发育于顺向坡上的沟谷上游段往往可切割下伏的碳酸盐层,如冷水溪、捞林沟、龙深塘沟等。其中,除冷水溪外,如捞林沟、龙深塘等均为干沟,表明这些沟谷的地表水已转化为岩溶水,由于上覆 $T_{3x}$ 砂页岩的阻隔,束缚在碳酸盐岩地层内的岩溶水,总体沿走向向冷水溪方向流动并排泄,排水点高程 925 m。冷水溪流域径流模数异常之大,显然获得了该单元各小流域岩溶水的横向补给,而长距离纵向径流的缘故。

## 3 隧址区地下水化学特征分析

通过野外勘察,采集隧址区隧道涌水、泉水及沟水,进行化学分析,分析项目包括宏量组分、微量组分以及氧硫同位素组成。并将其结果与隧址区详勘和补勘的地下水化学资料进行对比分析。

### 3.1 隧道涌水和宏量组分

利用三角图解,可对天然水 6 大离子的相互关系进行统计分析。左下角三角图为阳离子:钙、镁、钠+钾三者百分比例关系;右下角三角图为阴离子:氯、硫酸、碳酸三者百分比例关系;中央菱形为阴阳离子:氯+硫酸、碳酸、钙+镁、钠+钾四者百分比例关系<sup>[6]</sup>。由此可判断所分析水的类型。

宏量组分三角图解结果如图 1。隧址区天然水的宏量组分可分为 4 类: I A, II A, I B, II B。I 类水与 II 类水差异在于各种阴离子含量的差异。前者阴离子以 $HCO_3^-$ 为主,后者以 $SO_4^{2-}$ 为主。A 类水与 B 类水的差异在于各种阳离子含量的差异。前者以含 $Ca^{2+}$ 为主,而后者以含 $Ca^{2+}$ 及(Na+K)离子为主,其中隧道出口段涌水为 II A 类,进口段涌水为 II B 类。地表泉水及溪沟水为 I A 类水。只有一种水样属 I B,为进口段迂回道涌水。

对于 I 类水,阴离子主要由 $HCO_3^-$ 组成,矿化度偏低。 $HCO_3^-$ 起源于大气降水或者对岩石的溶滤。其中岩溶水的阳离子主要是 $Ca^{2+}$ 及 $Mg^{2+}$ ,对循环于砂页岩中的水,Na+K 含量较高。

为了分析 II 类水中 $SO_4^{2-}$ 的形成,绘制了 $SO_4^{2-}$ 与 $Ca^{2+}$ 关系曲线,如图 2, $SO_4^{2-}$ 与矿化度关系曲线如图 3。这两个图表明 $SO_4^{2-}$ 与 $Ca^{2+}$ 呈正相关直线关系。图 2 表明 $SO_4^{2-}$ 是 $CaSO_4$ 溶解的产物,而且还是隧道水矿化度升高的主要原因(图 3)。但由图 2 还可见,当 Ca 含量较低时, $SO_4^{2-}$ 与 $Ca^{2+}$ 相关性不大,表明水中 $SO_4^{2-}$ 除石膏溶解以外还有另外一

种成因。宏量组分研究表明,隧道涌水属于深循环地下水。进口段隧道涌水主要来自砂页岩含水层内的水,而出口段隧道涌水含有大量石膏溶滤水。

### 3.2 微量组分

水与岩石相互作用,岩石中一部分物质转入地下水。它既包括在不破坏矿物结晶格架的情况下部分化学物质进入水中的作用,也包括岩石中可溶岩的溶解,难溶岩以及不溶岩的风化。隧址区  $Sr^{2+}$  含量与  $SO_4^{2-}$  含量成正比直线关系,表明其起因于石膏溶解; $F^{-}$  含量主要来源于下三叠统的砂页岩的溶滤。进口段水主要为砂页岩溶滤,而出口段水主要为石膏的溶解,但同时也具有下渗的地表水及浅表地下水的特征。

隧址区的含水岩体铁、锰含量比较丰富,因此水样中的  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  含量较高,其中出自  $T_{11}$  的裂

隙水以及进口段的隧道涌水含量最高。说明该涌水带是浅部地下水下渗的主要通道。

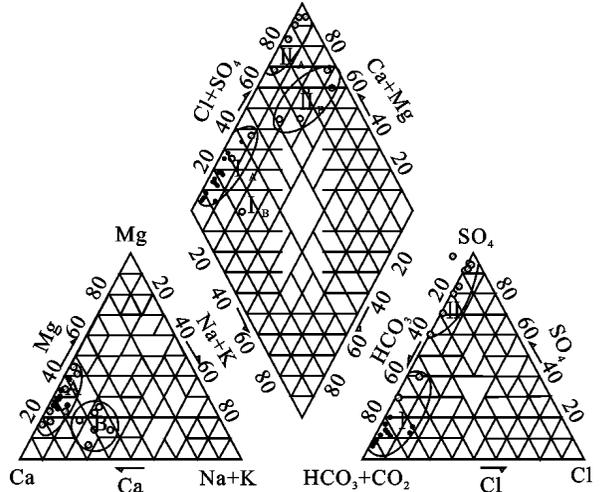


图 1 五指山隧址区水化学宏量组分三角图

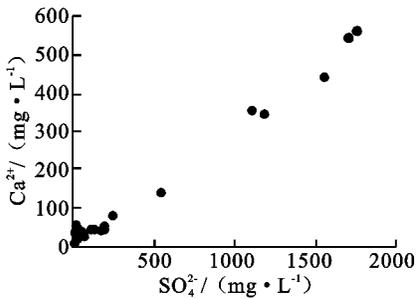


图 2  $SO_4^{2-}$  与  $Ca^{2+}$  的关系曲线

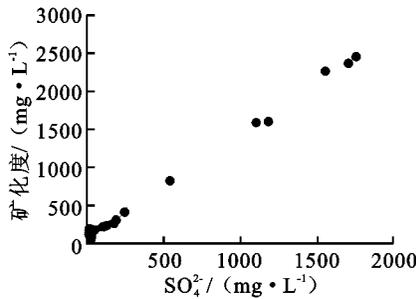


图 3  $SO_4^{2-}$  与矿化度关系的曲线

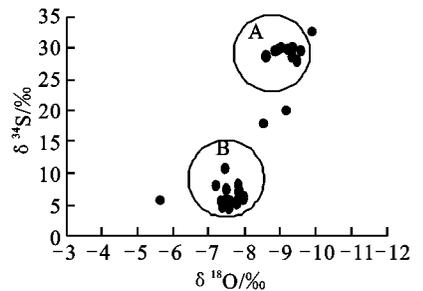


图 4 水中氧同位素与硫同位素的关系

### 3.3 同位素组分

通常地下水  $\delta^{18}O$  值与地表、地下水的补给高程有关<sup>[7]</sup>,  $\delta^{34}S$  值反映水中  $SO_4^{2-}$  的起因。对采集的样品进行水中氧同位素和硫同位素的测定,结果表明:  $SO_4^{2-}$  来源于石膏的溶解以及含硫矿物的氧化。在通常情况下,前者  $\delta^{34}S$  值高于 22‰, 后者  $\delta^{34}S$  值在 5‰左右。隧道水普遍在 25‰以上,这是因为地史时期有含石膏水进入砂页岩地层形成次生矿物,但在进口段和出口段有少部分水样  $\delta^{34}S$  低于 20‰,该同位素的组成表明硫的来源是石膏起源硫与硫化物起源硫的混合,进一步说明该涌水带是浅部地下水下渗的主要通道。根据  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{34}S$ , 得到水中氧同位素与硫酸根含量硫同位素关系,如图 4。可见隧址区天然水可划分为 A、B 两类。A 类水起因于地势较高的大气降水,硫起因于石膏溶滤水, B 类水起因于地势相对较低的补给水。

## 4 五指山隧道地下水动力分带模式

根据上述分析,结合国道 213 乐山沐川至宜宾新市镇段二级公路五指山隧道 K29+600- K30+900 段工程地质详勘结果,参考相关文献<sup>[8]</sup>,将五指山隧道地下水动力带垂直分为 6 个带。

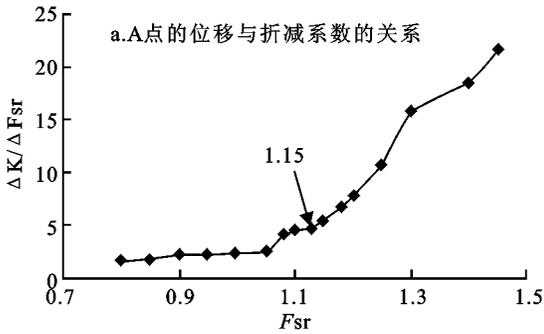
(1) 表层岩溶带。五指山岩溶山地表岩溶带水,储存于可溶岩地表至浅部溶隙溶孔中,其下界面是溶蚀相对微弱,完整性较好的可溶岩面,一般厚度 5~20 m,部分地段可达 50 m。此带形成的储水体受地形起伏影响互不相续,表层岩溶泉流量较小,一般小于 1 L/s,属于淡水化学类型。

(2) 包气带。指岩溶下渗带,位于表层岩溶带以下,丰水期区域地下水位以上的地带。本带通过可溶岩体发育不均一的溶隙,溶蚀管道,将大气降水与地表径流导入地下。此带水流在时空方面是不连续的,一般不具静水压力,是隧道岩溶涌水的补给空间。

(3) 季节交替带。由地下季节变化而引起的地下水位升降波动地带,位于包气带和包水带之间,本带厚度可达数十米,属淡水化学类型。

(4) 浅包水带。本带位于枯水期地下水位以下,地下水排泄口影响带以上的饱水含水带,水平管道比较发育,处于岩溶含水层上部的循环带,岩溶发育强烈。导水系统主要是平卧洞穴,地下河主管道,充水溶洞,宽大的冲水溶隙等形态,对隧道涌水的威胁极大,一般具有压突水、突泥、沙。本带厚度逾百余米。此带岩层中如含石膏岩成分,水的溶滤作用可能出现  $SO_4-Ca$  型微咸水。  
(下转第 178 页)

限元计算位移图和特征点的位移与折减系数的关系曲线可以看出, 滑坡首先是中前部产生大尺度位移, 随强度折减系数的增大在存在  $F_{sr}=1.05 \rightarrow F_{sr}=$



1.15 区间存在明显的变形加速阶段, 当  $F_{sr}=1.15$  时滑坡处于极限平衡状态, 当  $F_{sr} \geq 1.15$  时滑坡中前部率先进入失稳破坏状态。

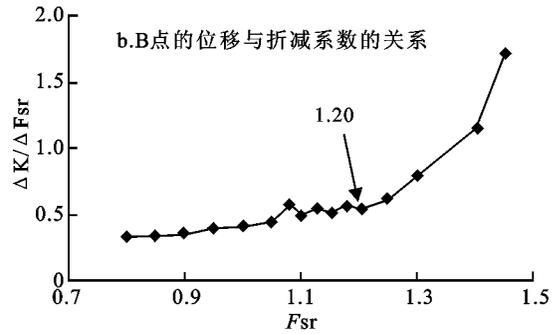


图 5 位移与折减系数的关系曲线

通过比较, 有限元折减系数法和不平衡推力法的计算结果十分相近, 两者误差仅为 0.9% 和 3.3%, 但是有限元强度折减法提供了滑坡的应力、应变、位移以及塑性区分布等, 为滑坡发展趋势预测和工程治理提供了更为科学合理的依据。

参考文献:

[1] 殷跃平. 三峡地质灾害与防治[J]. 科学中国人, 2002 (2): 37-39.  
 [2] 安光明, 毛彦龙, 李滨, 等. 重庆市涪陵区植物油厂滑坡成因机制分析与稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 593-598.

[3] Griffith D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.  
 [4] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 408-412.  
 [5] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.  
 [6] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.  
 [7] 李红, 宫必宁, 陈琰. 有限元强度折减法边坡失稳判据[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 79-82.  
 [8] 徐卫亚, 肖武. 基于强度折减和重度增加的边坡破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 505-511.

(上接第 174 页)

(5) 压力饱水带。位于地下水排泄口以下, 当地主要河流排泄基准面影响带以上的含水层。受当地主要河流侵蚀基准面控制的岩溶水循环带, 岩溶发育不如浅饱水带, 但沿构造破碎带和各种结构面(包括古风化壳, 古岩溶等), 岩溶发育较深较强, 由于水头高, 压力大, 对隧道涌水威胁仍然很大。河谷地段岩溶地下水水力坡度很大, 水化学类型为  $HCO_3-Ca$  型淡水或  $SO_4-Ca$  型微盐水。

(6) 深部缓流带。隧道平面以下地下热水埋藏带为深部缓流带。因隧道开拓减压, 而由下至上涌入隧道。如果不是隧道的开拓, 该处地下水近于静止。因此, 虽在隧洞中揭露地下热水, 但在该区就近地表未发现地下热水。

参考文献:

[1] 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.

[2] 邓英尔, 刘慈群, 黄润秋, 等. 高等渗流理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
 [3] 王大纯, 张人权, 史毅红, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.  
 [4] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.  
 [5] 李海华, 程温莹, 罗丽, 等. 水化学分析方法在水电站调压室渗水途径调查中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 259-262.  
 [6] 沈照理, 朱宛华. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.  
 [7] 史维浚, 孙占学. 应用水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.  
 [8] 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.