

# 五指山隧道岩溶发育及涌水的特征研究

李扬红, 邓英尔, 于 静, 张 伟, 翟小平

(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:**五指山隧址区有 10 种岩溶形态,在隧址区地质调查基础上,分析了五指山地区岩溶发育的演化历史。采用径流模数法、年降雨有效渗入时间系数法及地下水动力系数法对各区段隧道涌水进行了计算,并对隧道贯通前后涌水动态变化进行了分析。五指山隧道主要涌水位置有 5 处,其中进口段的“8.6”断层突水和出口段的石膏角砾岩突水,突水量大,给隧道施工和隧址区环境带来严重影响。

**关键词:**五指山隧道;岩溶发育特征;涌水动态变化

中图分类号:P641.134

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)02-0138-04

## Study on Characteristics of Development of Karst and Gushing in Wuzhi Mountain Tunnel

LI Yang-hong, DENG Ying-er, YU Jing, ZHANG Wei, ZHAI Xiao-ping

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

**Abstract:** There are ten types of Karstic Features in Wuzhi mountain tunnel. The evolvement of karst in Wuzhi mountain was analyzed based on geology investigation. Water gushing in each sections of the tunnel was predicted by using methods of runoff modulus, effective infiltration of rainfall at different time intervals annually and dynamics of groundwater. And dynamic changes of water gushing were also analyzed in the tunnel before and after its completion. Water gushing in Wuzhi mountain tunnel have five sections. And the large gushing yields from the fault ‘8.6’ at the entrance section and from the Gypsum breccia at the exit section cause serious effects on the construction and environment in the tunnel.

**Key words:** Wuzhi mountain tunnel; characteristics of development of karst; dynamic changes of water gushing

## 1 前言

五指山隧道为国道 213 线沐新路控制性工程,位于四川盆地西南部的沐川县与屏山县的交界处(K28+418 至 K32+329)。进口在沐川县永福镇楠木村的水洞子沟(张家沟)沟口;出口在屏山县太平乡龙潭村境内的龙深塘沟口。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。设计纵坡 -1.9% ~ -2.23%,为单向下坡的山岭重丘区二级公路。隧道岩溶段总长 2 262 m,占隧道总长 58%,处于隧道的中部。本区属亚热带季风气候,具气温高,湿度大,雨量充沛,垂直分带明显的特点。据沐川、屏山县气象站资料,多年平均降水量 1 115 ~ 1 379 mm,全年降雨达 181 ~ 219 d,主

要集中在 6 - 9 月,占全年降水量的 65% ~ 70%,其中 7 - 8 月占全年降水量的 44% ~ 46%。年平均湿度 83%,年平均蒸发量 697.51 ~ 847.7 mm。多年平均气温 11.6 ~ 17.7,最高 35.4,最低 -4。区内植被繁茂。主要调查和分析五指山隧址区岩溶发育及隧道涌水的特征。

## 2 隧址区地质概况

隧址区出露地层从新至老有:第四系、白垩系、侏罗系、三叠系以及二叠系。隧址区处于 NW 向峨眉 - 宜宾构造带褶皱和断层的五指山背斜中段。隧道进口段主要处于背斜顶部,隧道出口段主要处于背斜翼部,隧道进、出口段结合部处于背斜转折段。背斜顶部主要出露  $T_{1f}$  和  $T_{1t}$ ,产状平缓,倾角仅 2° ~ 5°,背斜

\* 收稿日期:2008-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(编号 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:liyanghaihong888@163.com

两翼由三叠系和侏罗系组成。隧址区还发育断层( $F_1$ 、 $F_2$ ),其中, $F_1$ 断层发育于五指山背斜顶部,水洞子-大坪桥沟谷一线,断层走向 $NE20^\circ$ , $F_2$ 断层发育于马中里-湿竹坪-冒水湾一线,断层走向 $SE100^\circ$ 。

### 3 岩溶发育特征及演化历史

五指山是由半箱状背斜组成的构造隆起山体。岭脊海拔1700~2000 m,主要出露 $T_{1j}$ 及 $T_{2L}$ 碳酸盐岩地层;南西侧是陡倾的 $T_{3x}$ 碎屑岩地层构成的顺向坡;北东侧为背斜顶部,由三叠系下统及部分二叠系上统组成为台状、脊状山,NE坡为地层缓倾的逆向坡。岩溶地貌主要依附于 $T_{1j}$ 及 $T_{2L}$ 地层出露带发育于山脊脊部及北东坡一侧。隧址区植被茂密,地表多被松散层覆盖,但在撕竹坪一带岩溶地貌形态相对集中。区内发育的岩溶形态,地表主要以石芽、漏斗、溶蚀洼地、溶沟、峰丛、槽谷为主,地下主要以溶隙、竖井、落水洞、溶洞为主。

影响岩溶发育的基本因素是地层岩性、构造、地形地貌、地表水文网等<sup>[1]</sup>,其中地层岩性对岩溶具体形态的影响最为突出。一个地区岩溶组合形态的发育主要受地表及地下水的循环交替条件所控制,而地表及地下水循环又受地貌条件控制。因此,地貌演化过程控制了一个地区岩溶发育的总体特征<sup>[2]</sup>。结合地质概况,可以对五指山地区岩溶发育的演化历史概述如下:老第三纪末期的鄂西期,五指山地区地层剥蚀已达三叠系碳酸盐岩层埋藏的高度,碳酸盐岩暴露地表发育侵蚀、溶蚀台地。进入山原期,晚第三纪末至早更新世( $Q_1$ )地壳抬升,在五指山山脊两侧形成次一级夷平面,在山脊及其北侧的碳酸盐岩分布区形成侵蚀溶蚀台地,如百丈岩、撕竹坪、龙洞坪等,台面上有溶丘、洼地,地下有岩溶洞穴发育。山脊附近现有南坡龙洞坪溶洞遗留。 $Q_2$ 以后进入山盆期五指山两侧沟谷迅速下切,在北东坡地表碳酸盐岩出露区继承并改造山原期岩溶形态的发育。山盆期早期( $Q_2$ )形成了水洞子、冒水湾岩溶泉群和相关的地下岩溶洞穴系统,山盆期晚期随着地壳上升,( $Q_3$ 以来)在北西坡受非可溶地层的阻隔地终止岩溶发育。然而在南坡为适应金沙江水系的强烈切割,随着横向沟谷的溯源侵蚀,伴随碳酸盐岩地层被切割,形成溶蚀沟谷。随着下伏碳酸盐岩在较低位置暴露,岩溶水排泄点的位置不断降低,加剧该地层内深部岩溶的发育。长时期的演化,形成现今的冷水溪地下岩溶系。从发展的趋势看五指山岩溶发育的特点是主要集中于南东坡的地下深部。

五指山是金沙江及其支流中都河、屏三河与岷江水系的分水岭。隧址区岩溶水向分水岭两侧径流,地表分水岭和地下分水岭基本重合。分水岭北

东坡地下水的径流通道是切割砂页岩的 $F_2$ 断裂破碎带,分水岭南西坡岩溶水沿冷水溪方向流动并排泄,排泄高程925 m。

### 4 五指山隧道涌水特征

#### 4.1 隧道涌突水

自2004年五指山隧道施工以来,至2007年8月15日彻底贯通,先后揭露了多个涌水带,主要的涌水位置有5处。涌水量计算可采用径流模数法、年降雨有效渗入时间系数法、地下水动力系数法<sup>[3-5]</sup>。进行了各区段涌水量综合计算,各区段涌水特征为:

(1)进口第一次涌水。2004年10月17日,进口段开挖至K28+880段时,隧道出现较大的涌水,最大涌水量约1.1万 $m^3/d$ ,主要为 $F_1$ 影响带基岩裂隙水,呈暴雨状和多处股水泄出。

(2)进口第二次涌水。隧道进口于2005年8月6日,当掘进到K29+542时掌子面突然出现巨大的涌突水引发坍方。涌水量突然从每小时数十立方米增大到3800 $m^3/h$ 。随后水量逐渐稳定在800 $m^3/h$ 左右,主要为 $F_2$ 断裂带裂隙水。该次涌水称为“8.6突水”,导致了进口端停工1a左右。2006年8月以后降至1万 $m^3/d$ 。

(3)出口第一次涌水。2005年2月,当隧道出口段开挖至K31+390至K31+638段时,隧道出现较大的涌水,最大涌水量约3.5万 $m^3/d$ ,主要为 $T_{3x}$ 基岩裂隙水,压力大,呈暴雨状和多处股水泄出。

(4)出口第二次涌水。2005年7月底,当隧道开挖至K30+900时,隧道开始出现大的涌水,总涌水量约4.3万 $m^3/d$ ,主要为膏溶角砾岩岩溶水,水温达25℃,压力大,呈暴雨状和四处大股水射出,射程达8~10 m。2005年11月15日,随着含水地段的不断开挖揭露,总水量增大至6.6万 $m^3/d$ 。

(5)出口第三次涌水。通过出口第二次涌水后,从K30+700至K30+566进入膏溶段及石膏段,掌子面基本不涌水。但是,2006年5月16日,当掘进到K30+750至K30+686时,出现较大涌水,5月30日最大涌水量5.9万 $m^3/d$ ,呈暴雨状和股状,岩体岩溶裂隙发育,水型黄色。另外,8月15日进口和出口贯通,进口水流依隧道坡度从出口段流出,加上连续降暴雨,出口段涌水量剧增达9万 $m^3/d$ 。

#### 4.2 隧道涌水动态变化

根据五指山隧道施工监测的隧道涌水量资料作入口段与出口段流量变化曲线与降雨的关系图,分别如图1及图2所示。由图可见隧道涌水量可分解为三部分,即隧道基本流量、隧道施工突水量和降雨洪流量。

隧道施工揭露的大小涌水点,其涌水分别来自不

同的含水体系。隧址区形成一个由多个含水体系被疏干的复合型降位漏斗。降位漏斗形成后地下水进入隧道的流量称为基本流量,属动储量。施工引起涌水消耗的静储量称为施工突水量。在降雨过程中,降位漏斗范围内吸收的下渗降水将形成洪流量涌入隧道,该流量被称为强降水瞬时增量。由图 1 及图 2 可以进一步判断出:隧道进口段显著揭露了 2 个含水体系,而隧道出口段显著揭露了 3 个含水体系。

进口段第一含水体系被揭露,突水中心位置 K28+880,显示为裂隙带的突水,其突水量约为 6 万  $\text{m}^3$ ,基流量为  $750\text{m}^3/\text{d}$ 。第二含水体系,即“8.6”突水体系。突水量达 11 万  $\text{m}^3$ ,基流量最初为 2 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。经对坍塌体的处理,调整了衬砌,基流量减小为 1 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。据施工方反应,受暴雨季节的影响,流量可从  $700\text{m}^3/\text{d}$ ,上升到  $1\,000\text{m}^3/\text{d}$ ,但总洪流量的大小难于计算。

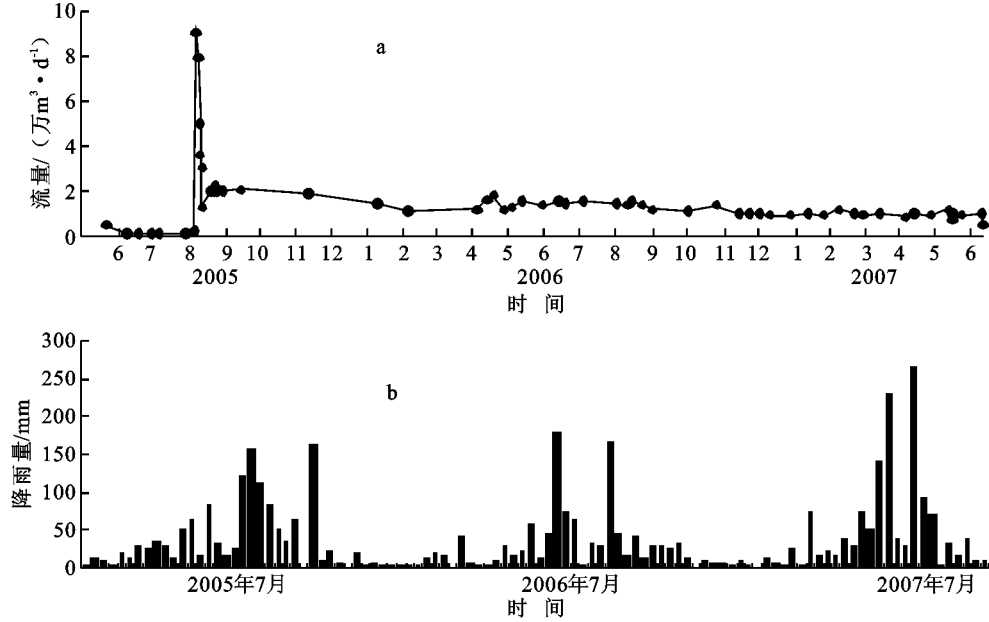


图 1 进口段总流量变化 a 与沐川旬降雨量 b 关系

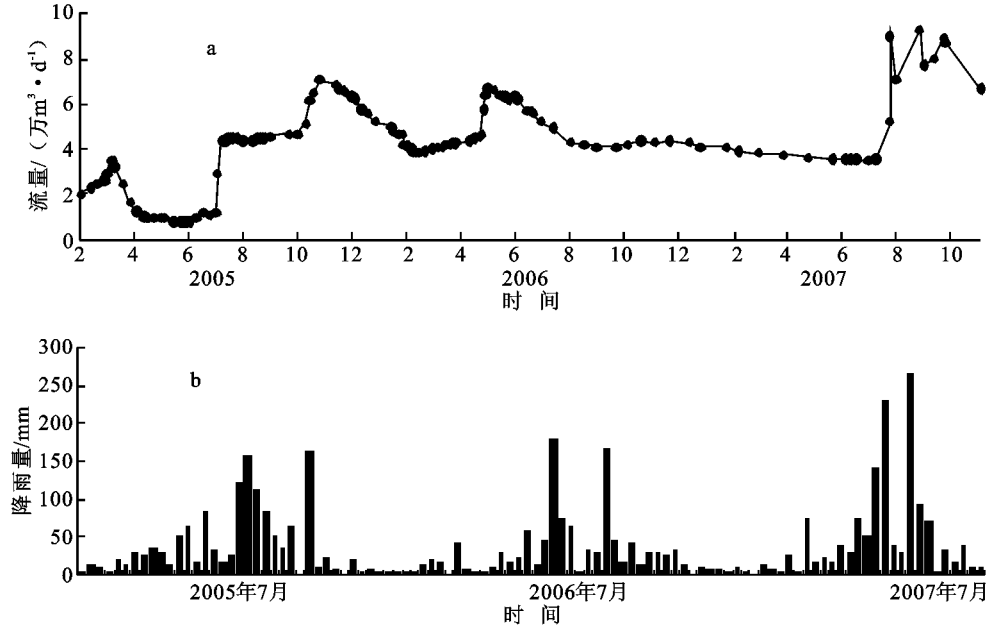


图 2 出口段总流量变化 a 与沐川旬降雨量 b 关系

出口段第一含水体系被揭穿,突水中心位置在 K31+370,但在 K31+500 左右。涌水量开始递增。显示揭露了较宽的断层影响带。突水后迅速形成降位漏斗以及稳定的基流量。第二含水体系,其突水中心位于 K30+850,掘进至 K30+900 时发生突水,隧

道涌水量从 1 万  $\text{m}^3/\text{d}$  上升到 4.5 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,并持续了 4 个月之久,而没有出现显著变化的迹象。已揭露了另一个分布范围较广的补给径流量较大的含水体系。流量没出现显著变化的另一个原因,可能与突水期处于 2005 年雨季集中期,获得了大气降水补给,但难以

计算。当进一步揭露突水中心时,突水量突然剧增出现峰值,达 6.6 万 m<sup>3</sup>/d,延续约 3 个月的涌水量逐渐降低后趋于稳定。出现 4 万 m<sup>3</sup>/d 的基流量。疏干空间为 165 万 m<sup>3</sup>。代表膏溶角砾岩层的储集空间的大小。隧道贯通后总涌水量的剧增,主要有 2 个原因。

(1) 进口段隧道排水的方式发生改变,进口段地下水位进一步下降。隧道贯通后,进口段涌水不再是利用集水池泵抽排水方式,而是让涌水沿隧道自然坡降向出口段排泄,其排泄条件大为改善,促进地下水径流。泵抽排水时隧道壁地下水的最低排水位受集水坑高程的限制。隧道排水时地下水位受隧道排水系统控制,而进出口水位相差达 80 m。于是引起洞壁外侧地下水位降低,进而扩大降位漏斗的深度和范围。如果隧洞外壁地下水位降低至“8.6”突水后,二衬处理前的位置,则进入进口段的地下水可达 2 万 m<sup>3</sup>/d 左右。于是可以认为在现有的排水

方式下隧道上方形成统一的降位降位漏斗后,总的基流量可达到 5 万 m<sup>3</sup>/d。

(2) 时逢强降雨。根据沐川县气象局提供的 2005 - 2007 年各旬降雨资料,如表 1 所示。若将 3 a 内旬降雨量的二次极大值进行比较,降水极大值出现的旬内多为特大暴雨。在贯通之后约一周后,隧道涌水的增大显然与降雨的影响有关。由图 2 直观判断二次旬强降雨影响导致涌水量增加,大体都要滞后 10 ~ 20 d。对隧址区进行了强降水突入隧道的突水量计算<sup>[6-8]</sup>,认为在隧道穿越岩溶段,如果极端降水量为 91.3 mm,两侧影响带宽为 0.5 km 的地面面积内,隧道涌水的最大瞬时增量为 43 708 m<sup>3</sup>/d。该计算值与隧道贯通后的降水实际增量极为巧合。在计算时采用的计算模式与实际的水文地质条件比较接近,因此该计算值可解释出口段总涌水量增加的原因。

表 1 2005 - 2007 年 11 月沐川县各旬降水量										mm
月份	2005 年			2006 年			2007 年			
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
1 月	5.8	13.5	10.7	5.5	5.9	4.2	7.7	8.1	3.6	
2 月	4.6	19.3	12.6	11.5	20.0	15.8	10.2	5.5	0.6	
3 月	27.9	25.1	34.4	0.3	43.8	8.3	13.8	7.6	5.9	
4 月	27.9	11.5	54.4	4.6	5.3	10.6	25.7	2.0	73.8	
5 月	63.5	16.2	82.8	31.3	18.2	22.4	17.4	22.5	18.8	
6 月	32.8	16.8	25.4	59.3	13.6	45.9	38.8	30.8	72.9	
7 月	123.1	157.4	112.0	177.1	73.3	64.2	52.2	142.9	230.1	
8 月	84.0	50.1	35.0	3.9	32.4	31.6	41.2	26.8	267.7	
9 月	63.8	0.3	163.5	166.9	46.3	15.4	93.3	72.0	5.9	
10 月	10.1	23.7	7.7	42.5	12.4	27.1	33.0	14.3	37.0	
11 月	1.0	19.8	1.9	31.2	24.7	31.8	10.8	11.4	-	
12 月	8.3	5.1	6.0	13.8	0.8	11.4	-	-	-	

5 结 论

五指山隧址区有 10 种岩溶形态。在地质构造的关键部位,如褶皱核部及断裂作用区,顺裂隙延伸方向可能发育大的岩溶管道(溶洞),这也是容易发生涌水的部位。五指山隧道主要涌水位置有 5 处。对隧道涌水量进行计算,依据时间和涌水的关系曲线,成功分割出了隧道涌水的组成:隧道基流量、工程突水量、降雨瞬间补给量。为隧道涌水预测提供了可靠依据。

参考文献:

[1] 沈继方,李焰云,徐瑞春,等. 清江流域岩溶研究[M]. 北京:地质出版社,1996:12-17.  
[2] 陈先国,祁海军. 五指山隧道坍方原因分析[C] //

2005 年中国公路学会学术年会论文集,乌鲁木齐:中国公路学会,2005:433-426.  
[3] 陈先国,罗春雨,祁海军. 五指山特长隧道特大涌突水坍方原因分析及处理方案的思考[J]. 公路交通技术, 2007(2):152-156.  
[4] 王鹰,陈强,魏有仪,等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学,2004,25(4):55-58.  
[5] 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,2004(4):50-54.  
[6] 蒙彦,雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J]. 中国岩溶,2003,22(4):287-297.  
[7] 何发亮,李苍松,陈成宗. 岩溶地区长大隧道涌水灾害预测预报技术[J]. 水文地质工程地质,2001(5):21-23.  
[8] 杜毓超,李兆林,韩行瑞,等. 沪蓉高速公路乌池坝隧道区岩溶发育特征及其涌水分析[J]. 2008,27(1):11-18.