

# 重庆走马岭隧道岩溶及岩溶水发育特征

李 瑾, 夏克勤, 张 强

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 走马岭隧道通过方斗山背斜可溶岩地区, 岩溶发育强烈。在分析隧址区地质环境的基础上, 详细论述隧址区岩溶发育分布规律和特征, 岩溶水补、径、排条件及化学特征, 为隧道安全施工提供科学依据并提出建议。

关键词: 岩溶; 岩溶水; 发育特征; 发育深度; 方斗山背斜

中图分类号: P588. 18

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005) 06-0036-03

## The Characteristic and Impact of Karst in Zoumaling Tunnel

LI Jin, XIA Ke-qin, ZHANG Qiang

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Zoumaling tunnel passes through the Fangdoushan anticline where the karst development is strong. Based on the brief geologic condition in this area, the authors particularly discuss the developing characteristic and karst water's recharge, runoff and outflow and chemical features. It offers the scientific basis and rational suggestion in safety tunnel construction.

**Key words:** karst; karst water; developing characteristic; developing depth ; Fangdoushan anticline

### 1 隧道概况

走马岭隧道是石万(石柱-万州)公路关键性控制工程, 距重庆万州区 27 km, 隧道进口位于走马镇白草村, 经由平坝村, 至盐井乡高家村出口。隧道全长 2.469 km, 隧道标高约 690 m, 最大埋深约 350 m, 隧道穿越的主要地质构造单元为方斗山背斜。

### 2 地质背景

#### 2.1 自然地理

隧址位于四川盆地东部边缘方斗山山脉, 区内标高为 700~1 600 m, 相对高差 500~800 m, 属中低山剥蚀地貌, 峰峦起伏, 连绵不断, 山脉走向及其间呈平行展布的槽谷与构造线走向基本一致, 呈 NE-SW 向。主要受亚热带季风影响, 气候垂直分带明显; 多年平均降水量 1 181.2 mm, 历年最大降水量 1 635.2 mm, 降水主要集中在 5~9 月, 约占全年降水的 70%。

#### 2.2 地层岩性

本区地层属四川盆地分区万县小区, 从寒武纪至白垩纪均有出露, 均为沉积岩, 第四系零星分布(工程区主要地层见表 1)。

#### 2.3 地质构造

本区属新华夏系一级构造四川沉降带之川东北缘万县弧形构造。主要由铁峰山背斜、方斗山背斜、齐耀山背斜等梳状背斜及其间的宽阔平缓的向斜组成。弧形构造结构面具扭性, 构造线总体由 NNE-EW 走向。褶皱多呈雁形排列。主要压性结构面倾向 N-NW, 地应力从 NW-SE 推挤逐渐减弱。背斜核部强烈挤压, 多小褶皱, 小断裂。

隧址区位于方斗山背斜中段, 背斜核部发育茨竹垭正断层; 并且横张、纵张裂隙和其它构造节理裂隙较发育。隧道呈 NW 向横穿背斜核部和茨竹垭正断层 F<sub>18</sub>。这些构造行迹在隧址区地貌上也表现出明显特征, 主要表现为“三峰夹两谷”; 背斜和断层在地貌上分别表现为 NE-NEE 向弯曲延伸的“峰”和“谷”(图 1)。

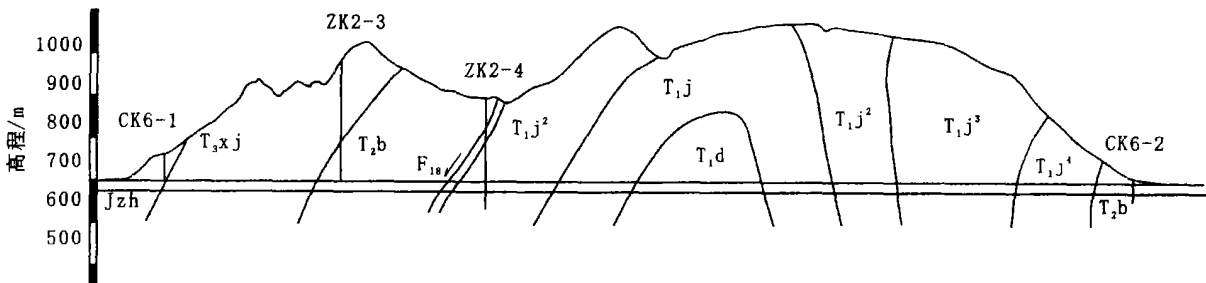


图1 隧道纵剖面图

3 水文地质条件

区域内出露地层为三叠系下统大冶组(T<sub>1d</sub>)至侏罗系中统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>),其中大冶组、嘉陵江组及巴东组第三段为可溶性碳酸盐岩层,岩性为灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩及少量的非可溶岩夹层,为区内主要岩溶裂隙含水岩层。须家河组砂岩岩层,为区内裂隙含水层。其余泥岩、砂质泥岩、泥灰

岩地层为隔水层。  
隧址区位于方斗山背斜为四周被侏罗系-三叠系砂泥岩隔水层完全圈闭的、主要由可溶岩构成的一个相对独立的水文地质单元。东西两侧边界分别为T<sub>3xj</sub>、T<sub>2b</sub><sup>3</sup>形成的悬崖峭壁和陡坡,内部为T<sub>1d</sub>、T<sub>1j</sub>、T<sub>2b</sub><sup>1-2</sup>灰岩形成的规模不一的槽谷与洼地,且该区的新构造运动较活跃,这些因素的综合使得方斗山背斜区碳酸盐岩的岩溶作用极为发育。

表1 区域地层简表

地层名称				厚度/m	地 层 简 述
系	统	组	代号		
第四系	全新统		Q <sub>4</sub>		崩、坡、残积的黏土、粉土、角砾土及碎块石土,零星分布于斜坡、槽谷,与下伏地层不整合接触
侏罗系	下 统	珍珠冲组	J <sub>1zh</sub>	247~361	灰色中厚层细粒岩屑石英砂岩,泥质粉砂岩,夹页岩及泥岩,下部含薄层煤及菱铁矿结核,与下伏地层整合接触
	上 统	须家河组	T <sub>3xj</sub>	193~553	浅灰、灰绿色厚层状岩屑石英砂岩,夹泥岩、炭质泥岩及薄煤层,上部夹含砾砂岩及砾岩透镜体,下部夹菱铁矿结核
	中 统	巴东组	T <sub>2b</sub>	341~559	上部为灰色薄-中厚层状泥灰岩夹黄灰色泥岩,中部为紫红色泥岩夹薄-中厚泥灰岩,下部为灰色薄-中厚层泥灰岩夹白云质灰岩及泥岩
	下 统	嘉陵江组	T <sub>1j</sub>	552~748	浅灰色、灰色白云质灰岩,灰岩,夹角砾状灰岩,生物碎屑灰岩,局部夹紫红色薄层泥质白云岩及鲕状灰岩,具缝合线构造
三叠系		大冶组	T <sub>1d</sub>	310~524	顶部24~50 m为紫红色泥岩,泥质灰岩,白云质页岩,中部、下部为灰、浅灰色灰岩,泥灰岩夹泥岩

根据地形地貌特征、构造形迹、暗河(泉)分布与标高及对隧道施工影响程度等因素,将背斜复兴场-茨竹垭段(图2)作为一个单独水文地质单元来考虑。区内补给量全部来自大气降水,无地下水的侧向补给。在F<sub>18</sub>正断层以北,背斜东、西两翼,顺走向展布两条以发育溶蚀洼地、漏斗、落水洞等岩溶形态为主的低洼槽谷,其间为串珠状展布的梳状山丘。形成了地下水的补给、径流区。

在背斜西翼,槽谷一般标高为500~600 m,隧道出口附近标高685 m左右,据地表水文地质调查,隧道出口附近存在分水岭,将其分为南北两部分。南部地下水沿纵向向南径流,在复兴场一带大泉排出,可从复兴场一带泉点密集得以说明;北部地下水纵向向北径流,向盐井龙洞排泄。  
总体而言,隧址区地下水由大气降水补给,部分蒸发排泄,大部分都是通过地下和地下-地表径流的方式排出背斜的。单元的排泄系统由位于背斜西侧边界,即T<sub>2b</sub>与T<sub>1j</sub>灰岩交界面附近的一系列暗河出口、泉构成,主要排泄点为隧址区以北的盐井龙洞,枯季流量达390 L/s。

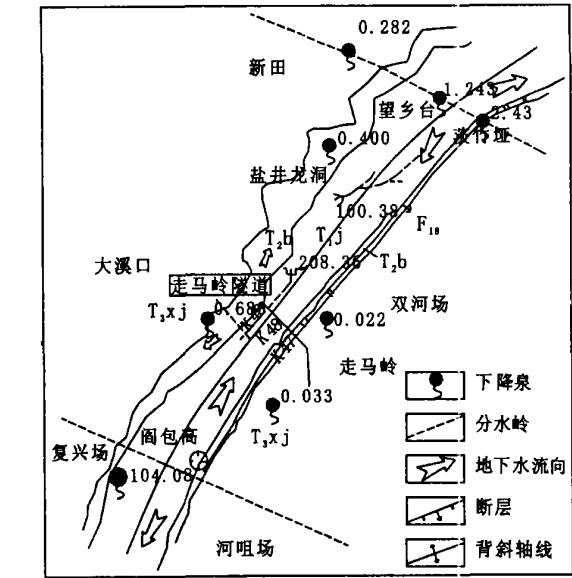


图2 复兴场-茨竹垭段水文地质图  
背斜东翼南、北两侧边界地下分水岭分别为河咀场一带(标高1 050 m左右)和茨竹垭-望乡台一线(标高620 m左右)。南侧分水岭的地下水经溶蚀裂隙和构造裂隙向切割较低图的沟谷处沿纵向向北径流,途中经隧道轴线后,横向径流穿越背斜核部;北边界沿纵向向南径流,两侧地下水在双河场一带横向径流,最终由背斜西翼盐井龙洞排出,这可由西翼河咀场-茨竹垭一带大面积没有大的岩溶水排泄点得到证明。

为进一步分析证明隧址区岩溶水补给、径流、排泄和流动系统,取样分析常规水样9组(包括泉点、暗河及岩溶裂隙、溶洞水)和同位素样12组。从常规水样分析看:本区地下水矿化度较低,介于172.59~361.86之间,平均为253.52; pH 介于6.9~8.3之间,平均值7.7,表明本区岩溶水大致处于相似的循环交替条件,地下水径流途径较短,径流条件较好,与大气降水关系密切,循环交替作用强烈。本区地下水类型主要以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,其次为HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Ca-Mg和HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Ca型水。

同位素样分析结果(表2),根据同位素组成在δD-δ<sup>18</sup>O关系图上是否落在当地降水线上,可判断地下水的来源是否为大气降水。本次采用西南地区降水线方程:

$$\delta D = 7.96\delta^{18}O + 9.52 (r = 0.993)$$

从图3可以看出,大部分水点的同位素组成都分布在降水线附近,说明岩溶地下水以大气降水为主要补给来源。

同位素氦值可反映地下水相对年龄,推测其径流、存储的相对时间差,进而分析地下水循环交替条件。根据测定结果,区内岩溶水可分为两类:

(1) 氦值<2T<sub>U</sub>。这类岩溶水渗流速度缓慢,循环交替作用较弱,属于T<sub>2b</sub>岩溶裂隙水。样品中有6属于这类,其中2个取自隧道掌子面,4个取自泉点,除草屋院子采样点外,其他点均出露于T<sub>2b</sub>地层,反映出地下水埋藏较深,径流途径长的特点。草屋院子采样点氦值偏小可能与泉周围植被和泉口蒸发有关。

表 2 走马岭隧道地下水同位素分析结果

样号	出露 地层	标高 / m	$\delta D$ (SMOW) / ‰	$\delta^{18}O$ (SMOW) / ‰	$\delta H$ (TU)
Q1014	T <sub>2b</sub>	911	- 52. 8	- 7. 98	6. 09
Q1019	T <sub>2b</sub>	878	- 49. 1	- 7. 67	3. 17
Q1021	T <sub>2b</sub>	868	- 50. 0	- 7. 41	< 2
A1001	T <sub>1j</sub>	482	- 49. 0	- 7. 75	4. 01
A1002	T <sub>1j</sub>	498	- 49. 7	- 7. 62	2. 97
A1003	T <sub>1j</sub>	577	- 43. 2	- 7. 45	2. 15
A1004	T <sub>1j</sub>	504	- 37. 0	- 5. 45	< 2
S2- 03	T <sub>2b</sub>	910	- 45. 4	- 7. 47	7. 13
S2- 08	T <sub>2b</sub>	999	- 44. 7	- 6. 54	< 2
S2- 10	T <sub>2b</sub>	1080	- 48. 5	- 7. 52	< 2
K47. 01	T <sub>2b</sub>		- 56. 3	- 8. 37	< 2
K46. 86	T <sub>2b</sub>		- 54. 3	- 8. 02	< 2

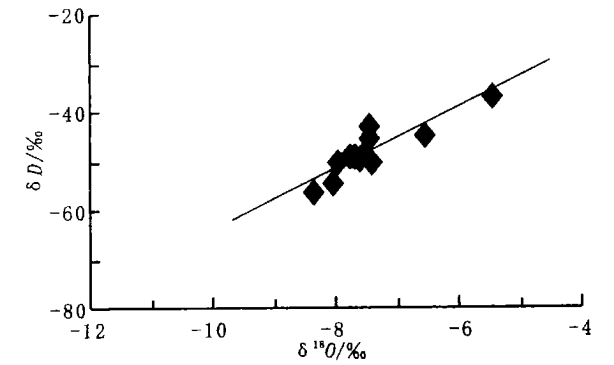


图 3  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图

(2) 氕值> 2TU。这类岩溶水出露于T<sub>1j</sub>灰岩地层, 循环交替能力强, 属于管道岩溶水。

综上可知, 隧址区岩溶水具有“分散补给、集中排泄”的特点。地下水接受大气降水补给, 岩溶水按出露地层分为裂隙水和管道水两类, 随埋深增加地下水径流时间增长。

4 岩溶发育规律

隧址区地表共调查岩溶点 234 个(见表 3), 根据规模可分为两类岩溶形态, 一为规模较小的溶沟、溶槽; 二为独立的岩溶洼地、落水洞、漏斗、溶洞、天窗、塌陷。二类按岩溶发育方向可分为水平方向发育和垂直方向发育两种, 这些岩溶地貌的有机组合, 使得背斜区吸收降水能力大大增强。

地下岩溶发育的最直接表现是岩溶贮水空间的高度管道化, 几乎所有的岩溶水排泄点均为暗河出口形式, 该区地下水已高度河流化、渠化。

表 3 岩溶调查统计表

含水层	出露面积 /km <sup>2</sup>	落水洞 /个	洼地 /个	漏斗 /个	溶洞 /个	天窗 /个	塌陷 /个	小计 /个	所占比例 / %	单位面积岩溶 数/(个·km <sup>-2</sup> )
T <sub>1j</sub> <sup>1~4</sup>	7. 84	128	54	22	11	2	1	218	93. 2	13. 9
T <sub>2b</sub> <sup>3</sup>	0. 64	2	13	1	0	0	0	16	6. 8	7. 8
合计	8. 48	130	67	23	11	2	1	234	100. 0	13. 4
占岩溶总数/ %		55. 6	28. 6	9. 8	4. 7	0. 9	0. 4		100. 0	

根据地面地质调查及钻孔揭露情况, 分析隧址区岩溶发育具有以下规律:

①隧址区岩溶平面分布上具带状分布特征。岩溶集中发育于两个溶蚀槽谷带, 呈 NE- SW 走向, 标高 800 ~ 850 m, 位于 F<sub>18</sub> 断层以北, 方斗山背斜东、西两翼。

②隧址区可溶岩具较好的接受降水垂直下渗补给能力。两个岩溶地层 T<sub>1j</sub><sup>1~4</sup>、T<sub>2b</sub><sup>3</sup> 中主要分布于 T<sub>1j</sub><sup>1~4</sup>, 其地表出露面积大, 岩溶发育形态复杂, 规模大, 数量多( 占岩溶总数的 93. 2% ), 单位面积发育个数达 13. 9 个/km<sup>2</sup>( T<sub>2b</sub><sup>3</sup> 约 7. 8 个/km<sup>2</sup> ), 且以落水洞为主, 占岩溶总数的 55. 3%。

③岩溶发育与地层、构造的关系密切。区内地层为可溶性岩层与非可溶性岩层互层, 岩层走向对岩溶发育方向起控制作用; 地面调查, 区内构造裂隙主要以 NNE 向的张裂隙最为发育与区域构造线走向一致, 地表岩溶一般亦沿北北东向成排展布; F<sub>18</sub> 断层为顺走向正断层, 沿断层破碎带也分布一定数量的岩溶点。因此地层、构造对岩溶发育方向起控制作用。溶洞的发育主要受层间滑动面、纵张裂隙及北西向断裂( 包括它们的低序次) 及横张节理等构造形迹的控制。

④岩溶发育具有成层性。溶洞分布在两个不同的标高带上, 即 887 ~ 920 m( 无水溶洞), 502 ~ 720 m( 有水溶洞); 500 ~ 700 m、850 ~ 700 m 标高为两个岩溶集中发育带, 表明晚近时期受新构造运动影响, 地壳运动在隧址区有不少于 2 次间断抬升。

⑤岩溶发育与岩层化学成分有关。岩层中 CaO、CO<sub>2</sub> 含量越高, 岩溶越发育。T<sub>3xj</sub><sup>1~4</sup> 岩石层厚、质纯, 泥质含量极低; T<sub>2b</sub><sup>3</sup> 岩石层薄, 泥质含量高, 且夹部份泥灰岩, 因此 T<sub>3xj</sub><sup>1~4</sup> 较 T<sub>2b</sub><sup>3</sup> 岩溶发育程度高。

⑥岩溶发育及岩溶水具有垂直分带性。地面水文地质调查和钻孔揭露资料表明: 浅部垂直循环带岩溶发育数量多, 以垂直类型的落水洞、漏斗、塌陷为主; 深部水平循环带为近水平的岩溶管道, 是地下水径流的主要途径, 也是对隧道涌水影响最大的带。

5 岩溶发育深度

岩溶发育深度指具有一定规模的岩溶管道存在的最低标高, 其对隧道施工及环境有较大的影响。可能对方斗山背斜复兴场- 茨竹垭段的岩溶发育深度起到控制作用的基准面包括: (1) 背斜西翼标高在 550 m 左右的盐井龙洞暗河; (2) 背斜西翼的长江。

隧址区主要排泄点主要为盐井龙洞暗河, 出露于 T<sub>1j</sub> 地层, 以地表形式最终向长江排泄, 故长江对该区域岩溶发育深度不具有直接控制作用, 直接控制该区岩溶的发育深度的只有盐井暗河, 最低发育标高为 550 m。

根据隧址区碳酸盐岩岩溶发育程度及发育规律, 结合区域水文地质资料及隧道标高, 推断拟建隧道洞身段及以上处于岩溶地下水垂直循环带之中。

6 结论与建议

通过对隧址区岩溶及岩溶水的调查, 方斗山背斜区碳酸盐岩的岩溶作用极为发育, 隧道施工中可能揭露的岩溶水有 T<sub>2b</sub> 岩溶裂隙水和 T<sub>1j</sub> 管道岩溶水。T<sub>2b</sub> 地层地下水位较高, 施工时揭露改含水层会使隧道涌水量增加及地表泉水干涸, 但不会造成灾害性突水事故; T<sub>1j</sub> 管道岩溶水的水平径流带标高一般在 500 ~ 600 m, 而隧道标高为 690 m, 故隧道穿越 T<sub>1j</sub> 地层时岩溶发育以垂直形态为主, 推断不会造成大的突水现象。但在通过 F<sub>18</sub> 断层时要防止断裂带突水, 建议在隧道施工中加强岩溶易发点及存在岩溶水文地质问题的施工地质预报, 营造良好施工环境, 同时保护天然水环境。