

文章编号: 1006—2106(2009)12—0060—05

街子坡向斜岩溶水系统及隧道涌突水危险性研究^{*}

杜宇本^{1**} 张 强² 蒋良文¹ 许 模²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 成都理工大学, 成都 610059)

摘要: 研究目的: 大瑞铁路大柱山隧道横穿街子坡复式向斜富水构造, 分为街子坡向斜和搬家寨两个水文地质单元, 褶皱和断裂构造复杂, 岩溶水活动活跃, 存在较大的岩溶隧道施工工程风险。通过街子坡复式向斜岩溶水系统及隧道涌突水危险性研究, 有效预测评价岩溶隧道的涌突水危害, 以期能对工程的顺利实施和安全有所裨益, 对类似岩溶富水构造涌突水危险性分析具有一定的借鉴意义。

研究结论: 通过隧道涌突水危险性评价体系研究表明, 大柱山街子坡复式向斜涌突水危险等级主要集中在高危险区、中危险区, 隧道发生涌突水风险大, 属施工涌突水风险大的储水构造。

关键词: 复式向斜; 岩溶水系统; 隧道涌突水; 危险性研究

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

Research on the Jiezi po Syncline Karst Water System and Hazard of Water—gushing— and— bursting in Tunnel

DU Yu—ben, ZHANG Qiang, JIANG Liang—wen, XU Mo

(1. China Railway Erwan Engineering Group Co. Ltd. Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Research purposes: The Dazhushan Tunnel of the Dali—Ruili Railway goes through Jiezi po multiple syncline water—rich geological structure composed of Jiezi po multiple syncline hydro—geological unit and Banjiazhai hydro—geological unit. The folding and fracture structure are complicated and the karst water is active, so there is relatively high risk for karst tunnel construction. BY researching the Jiezi po multiple syncline karst water system and the hazard of water gushing— and— bursting water in tunnel, the hazard of water—gushing— and— bursting is predicted and evaluated effectively for helping a safe and successful construction of the tunnel and providing the reference to the analysis of the hazard of water—gushing and bursting in the similar karst water—rich structure.

Research conclusions: The research on the risk assessment system for water—gushing and bursting in tunnel shows the high risk grade of water—gushing and bursting in Jiezi po multiple syncline of Dazhushan tunnel mainly belongs to the high—risk and medium—risk range, and the Jiezi po multiple syncline is a water storage structures with high risk of water—gushing and bursting in construction of the tunnel.

Key words: multiple syncline; karst water system; water—gushing and bursting; hazard study

在我国南方修建的长大岩溶隧道中, 隧道施工遇到的岩溶水害及其伴生的涌泥砂、诱发的地表塌陷和水源枯竭灾害, 久治未安, 引起了人们的高度重视。大

瑞铁路经永平县杉阳车站后, 紧坡而下至澜沧江, 以线路标高约 1 408 m 桥高约 237 m 的澜沧江大桥跨澜沧江后, 设长 14 508 km 的越岭隧道—大柱山隧道穿越

^{*} 收稿日期: 2009—09—08

^{**} 作者简介: 杜宇本, 1972 年出生, 男, 高级工程师。

大柱山,紧坡而上爬升至线路标高 1 700 m的保山坝子,标高抬高约 292 m;线路长仅约 16 km。因线路纵坡原因,无法设置大“人”字坡,加之隧道穿越浑厚的山体,无设置辅助坑道条件,只能以贯穿平导降低施工风险,加快施工进度。

大柱山隧道地处印度板块与欧亚板块相碰撞缝合带澜沧江断裂带西侧,断裂和褶皱发育强烈,可溶性的白云岩与灰岩等碳酸盐岩地段占大柱山隧道总长近 55%。隧道横穿保山褶皱带东翼之街子坡复式向斜,岩溶水活动活跃,富水的溶蚀管道和宽大裂隙发育,岩溶水、构造岩溶水相互混杂,形成复杂的地下水网络,存在较大的岩溶隧道施工工程风险。针对这一特殊情况,本文就以分析研究街子坡复式向斜储水系统地下水的活动运移规律,了解其补给、径流与排泄特征,进而划分地下水的径流系统,有针对性地分析评价其对隧道涌突水的危害,显得尤为必要。

表 1 含水岩组及其富水性一览表

岩组富水特征	含水岩组名称	地下水类型	地层	分布区域和主要水文地质特征
强含水岩组	碳酸盐岩含水岩组	碳酸盐岩岩溶水	C_1, T_2h, T_3d	C_1 呈带状分布于花家、周家山、龚家山、宝石山一线,出露宽度 500~2 500 m 不等。与下伏泥盆系上统大寨门组 (D_3d) 呈平行不整合接触。常以泉和暗河出口的形式排泄于地表,地下径流模数大于 $6 L/s \cdot km^2$
中含水岩组	碳酸盐岩与碎屑岩互层型裂隙岩溶水	裂隙—岩溶水	S_2r, D_1, D_2h, P_1	S_2 区内受断层影响,仅在三台子、大坟、苏家坟及东大沟出露, D_1w 弱风化带分布于澜沧江东岸,地下水赋存和运移于砂岩裂隙和灰岩岩溶溶隙中。地下径流模数 $3\sim 6 L/s \cdot km^2$
弱含水岩组	碎屑岩裂隙含水岩组	基岩裂隙水	D_3d	泥岩多为粉砂质泥岩、钙质泥岩;砂岩多为泥质粉砂岩;灰岩为生物碎屑灰岩,中厚层状;地表多出露强风化层,岩石呈碎块状,角砾状,质软。野外出露宽度一般大于 1 000 m,主要分布于太元背斜核部。地下径流模数小于 $3 L/s \cdot km^2$
隔水岩组	—	基岩裂隙水	$\beta\mu^5, S_1r, C_3w, T_3d$	碎屑岩及侵入岩体浅表部风化裂隙带中(风化层厚度 15~50 m)的网状裂隙水。水量中等,属相对隔水岩组,地下径流模数 $1\sim 3 L/s \cdot km^2$

碳酸盐岩类岩溶水赋存于隧道区含水层 C_1, T_2h 地层中,岩性为厚~中厚层状灰岩。大部分岩溶大泉和地下暗河出口均出露在该碳酸盐岩地层中,流量 $2\sim 80 L/s$ 地下径流模数为 $6\sim 23 L/s \cdot km^2$,属于中等~强富水岩组。

1.3 地质构造

隧址区地处印度板块与欧亚板块相碰撞缝合带澜沧江断裂带附近,隧道横穿保山褶皱带东翼之街子坡复式向斜和太元背斜,主要发育区域性的深大活动澜沧江断裂带及伴生断裂。

1 隧址区地质条件

1.1 地形地貌

隧址区地处云南高原西部边缘,横断山脉中南段,区内峰峦重叠、坡陡谷深。隧道进口位于澜沧江东岸陡崖下,高程约 1 408 m;出口位于山保村,高程约 1 700 m;相对高差 300~1 000 m。

1.2 地层岩性

隧道洞身主要通过三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系及印支—燕山期辉绿岩、辉长灰绿岩脉及断层角砾 ($Fb\eta$) 等地层。

隧址区地层岩性组合比较复杂,富水性强烈不均,地下水类型可分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水、碳酸盐岩及碎屑岩裂隙—岩溶水、碳酸盐岩类岩溶水,其中以碳酸盐岩类岩溶水为主。隧址区含水岩组特征如表 1 所示。

隧址区位于 2 个大型向斜构造——街子坡向斜及多罗拐向斜和大元背斜的北端。由于受到不均匀的构造挤压和扭动联合作用,以及早期断裂的限制、同期或后期断层的强烈挤压逆冲,褶皱形态遭到不同程度的破坏:(1)褶皱在北段扬起,甚至尖灭,如线路位于多罗拐向斜北侧;(2)地层呈不对称出露,尤其是水寨断层上盘的向西逆冲,导致该盘内较老的石炭系和二叠系在断层东侧的中二叠统河湾组内重复出现;(3)街子坡向斜发生多级褶皱,并发生倒转(见图 1)。

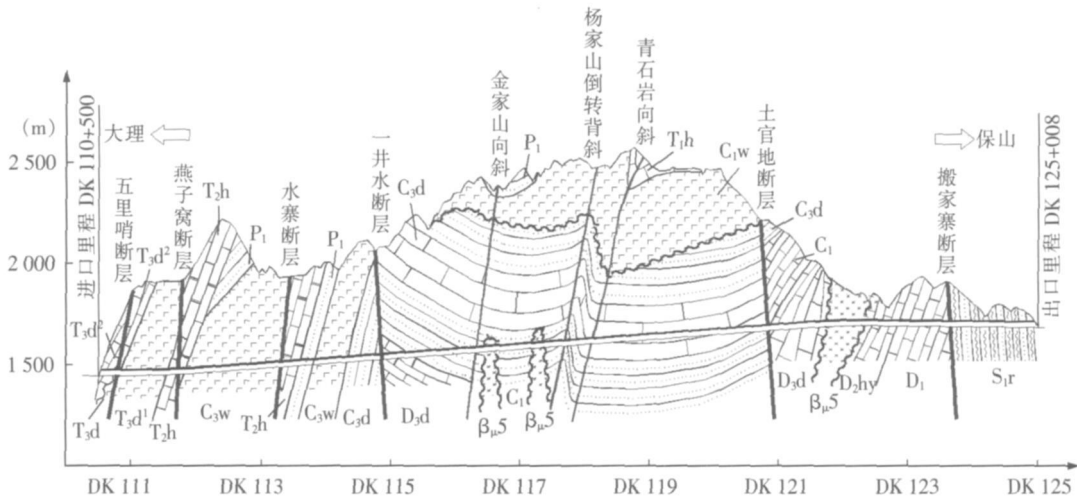


图 1 街子坡复式向斜地质构造剖面示意图

1.3.1 街子坡复式向斜

街子坡复式向斜轴总长约 28 km, 由中上三叠统及石炭—二叠系组成, 总体成近南北走向, 枢纽时有起伏和偏转, 呈“S”形弯曲。东翼略缓, 西翼稍陡, 轴面微向西倾。该向斜呈复式向斜, 东侧以一井水断层为界, 中部为杨家山倒转背斜, 东西两侧分别为金家山向斜和青石岩倒转向斜, 向斜内发育区域性的深大活动澜沧江断裂带伴生断裂一井水断层、土官地断层和搬家寨断层。

1.3.1.1 金家山向斜

轴向呈 N10°W 走向, 局部地层缺失, 西翼稍陡。两侧为三叠系中统河湾街组 (T₂h) 白云质灰岩、灰岩, 西翼为二叠系下统 (P₁) 砂岩、页岩夹灰岩, 向斜东翼受构造破坏, 保存不完整。

1.3.1.2 青石岩倒转向斜

呈 SN 走向, 局部舒缓波状, 东翼略缓, 西翼稍陡, 轴面微向东倾。两翼为三叠系中统河湾街组 (T₂h) 白云质灰岩、灰岩, 两翼为 (C₃w) 玄武岩。

1.3.1.3 杨家山倒转背斜

呈 N58~70°W 走向, 而呈“S”形弯曲, 东翼略缓, 西翼稍陡, 轴面微向东倾。核部为石炭系上统卧牛寺组 (C₃w) 玄武岩, 两侧为三叠系中统河湾街组 (T₂h) 白云质灰岩、灰岩, 两翼为丁家寨组 (P₁) 砂岩、页岩夹灰岩, 背斜东翼受构造破坏, 保存不完整。

1.3.2 澜沧江断裂带

隧址区发育区域性的澜沧江断裂带及次级断层五里哨断层、燕子窝断层、水寨断层、一井水断层、土官地断层、搬家寨断层等组成。街子坡向斜东翼发育一井水断层, 西翼发育土官地断层、搬家寨断层。

1.3.2.1 一井水断层

压扭性断层, 呈舒缓波状起伏, 产状 N10°W, 倾向

SW, 倾角较陡, 断裂破碎带宽约 60 m 呈角砾状。断裂附近岩层产状紊乱, 牵引褶曲、小断裂极发育。下盘为 C₃w 玄武岩, 上盘为 C₃d 砂岩、页岩及灰岩。

1.3.2.2 土官地断层

压性断层, 断层走向约 N42°W 断面西倾, 倾角 70°, 呈波状弯曲, 破碎带宽 20~50 m 在土官地附近被大注子平移断层错断。断层东盘为 C₃w 玄武岩、C₃d 泥岩夹砂岩、灰岩, 西盘为 C₁ 灰岩。

1.3.2.3 搬家寨断裂

呈南北走向, 中段隐伏于保山第四系之下, 长约 74 km 倾角 60°以上。此断裂对保山、施甸区上古生代以来的地层有一定的控制作用。使东西两侧泥盆纪沉积物有所差异, 对中生代上三叠统地层控制尤为明显。另外, 新第三纪含煤地层亦受其控制, 沿断裂基性岩颇为发育。在矿化方面, 东侧为中低温热液铅锌矿床, 西侧为低温热液汞矿床, 均表明搬家寨断裂规模较大, 且多期活动。断裂产状 N52°W/72°SW 压性断层, 断裂破碎带宽约 80 m 呈角砾状。断裂附近岩层产状紊乱, 牵引褶曲、小断裂发育。东盘岩层为 D₃ 灰岩, 西盘岩层为 S₂ 灰岩夹砂岩。

2 街子坡复式向斜岩溶水系统划分

隧道区地势中间高、东西两侧低, 近南北向地表分水岭为梅花山—施家山—青石岩—虎龙大坡—齐登坎一线 2 400~2 600 m 的山脊既构成了地表分水岭所分割, 同时也成为两侧水系流域内地下水活动的天然屏障, 形成了以澜沧江、保山盆地排泄基准的两个独立的水文地质单元, 其中又以街子坡复式向斜单元一级系统为主。街子坡复式向斜单元可划分为街子坡向斜、搬家寨单元两个次级水文地质单元。

2 1 街子坡向斜水文地质单元

街子坡向斜根据碳酸盐岩出露程度又可分为表浅部位 T₁h 金家山向斜段、中深部的 C₃w 玄武岩与 C₃d 砂页岩段、深部的 C₁ 灰岩段 3 个部分。

2 1 1 表浅部

位于测区中部街子坡向斜构成的山岭地带, 为一套碳酸盐岩, 基岩赋水性好, 地下水运移过程中少量侧向补给中深部地下水, 其余则以泉水方式排泄;

2 1 2 中深部

地下水遇到 C₃w 玄武岩等相对隔水层后溢出地表, 以泉水形式排泄 (梅花山—贼洞山—施家山一带沟槽出露的泉群, 金家山、海棠凹、水磨房水库、乾塘邓泉点)。出露高程 2 338 ~ 2 483 m, 泉水流量 0.5 ~ 15 L/s, 补给地表水沟或水库。这些泉点除个别外, 一般具有流量小, 径流途径短, 动态变化大, 出水点高程不一的特点。

2 1 3 深部的 C₁ 灰岩段

地下水则沿向斜核部向南侧方向运移, 沿低洼处以岩溶大泉的形式集中排泄 (如四川地附近的龙潭, 出露高程 1 895 m, 流量 106 L/s)。隧址区北侧出露的 C₁ 地层, 受到旧地基附近发育的大冲沟的强烈切割, 发育一系列的岩溶大泉, 汇集后集中排泄至澜沧江, 该大沟可作为隧址区水文地质单元的北侧边界。由于街子坡向斜周边岩溶水在地表的大量出露、排泄, 推断隧道通过段的深部岩溶发育程度总体较弱, 但局部受断层和褶皱转折端影响, 可能发育深部岩溶管道。

2 2 搬家寨水文地质单元

位于测区西南部, 保山盆地边缘, 以碎屑岩为主, 地表沟谷发育, 地下水主要向保山盆地排泄, 水量极小。

3 街子坡复式向斜隧道涌突水危险性评价研究

3 1 隧道涌突水危险性评价体系

隧道可能涌水量的大小决定了灾害的危险程度, 目前隧道涌水预测理论与方法, 都是建立在连续、均匀介质基础上的线性公式 (如达西定律), 对岩溶含水介质的极不均匀性无法确切量化或考虑不够, 总体上预测精度较差。

隧道可能发生涌突水灾害的部位和几率大小受隧道区介质的岩溶化程度和其间地下水的富集程度控制, 水力梯度越大、围岩岩溶发育程度越高的隧道段, 发生涌突水灾害的几率越大。可溶岩的岩溶化空间主要受岩石的可溶性、透水性和水的溶蚀能力影响, 隧道

附近水力梯度的大小主要受地下水系统运移过程控制。隧道涌突水危险性分级体系主要考虑选取岩石的可溶性 (K_1)、地质构造因素 (K_2)、地表岩溶地貌 (K_3)、地下水的水化学特征 (K_4)、隧道埋深与地下水水位的关系 (K_5) 5 个指标作为评价因子, 采用定量、半定量及定性相结合的原则, 对各个指标进行信息的量化处理, 预测精度就较为合理。

根据测区的岩溶发育特征, 初步考虑将隧道涌突水危险性划分为 5 个等级, 其危险程度从高到低分别为极危险区 (V)、高危险区 (IV)、中危险区 (III)、较危险区 (II)、低危险区 (I)。分值满分设置为 100 分, 危险性越高给的分值越高, 反之亦然, 划分的五个等级所对应的分值依次为 > 75 分、75 ~ 55 分、55 ~ 35 分、35 ~ 15 分、< 15 分。隧道涌突水危险性分值是由所选取的 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 五个评价指标评分值的相加, 见式 1;

$$THK = \lambda_1 K_1 + \lambda_2 K_2 + \lambda_3 K_3 + \lambda_4 K_4 + \lambda_5 K_5 \quad (1)$$

式中 THK——岩溶隧道涌突水危险性指数, 其值越大, 隧道越易突水;

λ_i ——评价指标权重;

K_i ——第 i 个评价指标。

考虑到所选取的 5 个控制性指标对隧道不同段涌突水贡献复杂性, 初步认为它们的贡献是相同的, 即 λ_i 恒等于 1, K_i 单项赋值 20 分。

3 2 隧道分段涌突水的危险性分级研究

根据隧道涌突水危险性分级体系, 大柱山岩溶隧道街子坡复式向斜划分了 28 小段, 其中包括 3 个断裂带, 3 个褶皱轴部; 非可溶岩为 11 段, 可溶岩和半可溶岩为 11 段。

综合分析, 大柱山街子坡复式向斜根据评价指标划分为 4 个高危险区 (IV), 16 个中危险区 (III), 8 个较危险区 (II) (图 2)。街子坡复式向斜长 10 169 m, 其中 IV 区长 297 m 占复式向斜总长的 2.93%; II 区长 7 551 m 占复式向斜总长的 74.25%; II 区长 2 321 m 占复式向斜总长的 22.82% (图 3.4)。研究表明街子坡复式向斜隧道发生涌突水风险大, 长度达 7 848 m 占总长的 77.18%, 属施工涌突水风险大的储水构造。

街子坡复式向斜涌突水高危险区 (IV) 主要位于一井水断层及影响带 (DK 114+840 ~ DK 114+875)、金家山向斜轴部 (DK 116+249 ~ DK 116+375)、杨家山倒转背斜轴部 (DK 117+699 ~ DK 117+802)、搬家寨断层破碎带 (DK 123+641 ~ DK 123+674), 主要因褶皱轴部及断裂带受构造的影响, 形成纵张裂隙, 断裂

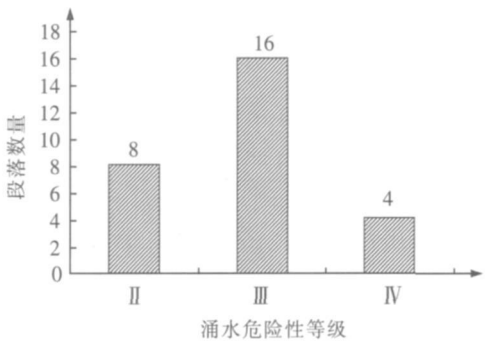


图 2 街子坡复式向斜涌突水危险性等级

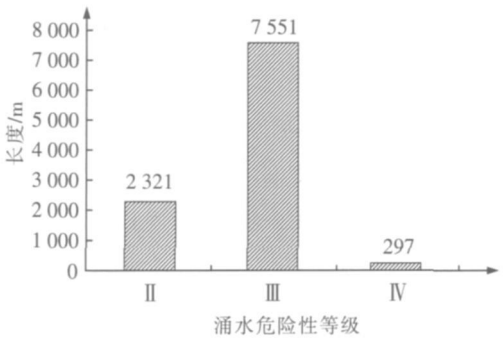


图 3 大柱山隧道街子坡复式向斜危险等级划分长度

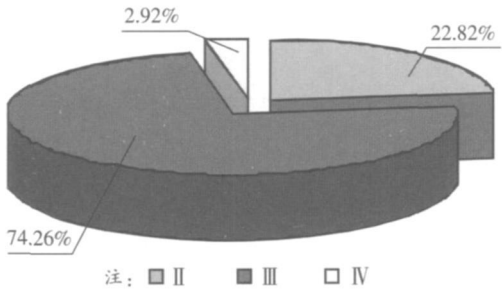


图 4 危险等级长度占向斜长度比例

带的岩体较破碎，完整性较差，易成为地下水的活跃通道，隧道施工过程中，发生突泥、突水的可能性较大，属于重点防治段。

中危险区（III）主要都在灰岩、白云质灰岩、泥灰岩岩层中，主要是岩性组合特征、隧道与地下水的位置

和规模相对小的断层起主导因素。岩层中方解石的含量高，有利于岩溶的发育，加上规模相对小的断层，更有利于岩溶地下水的运动，易形成岩溶管道和地下暗河，再加上高水头，在隧道开挖过程中出现涌突水可能性较大，是需重点防范段。

4 结论

大瑞铁路大柱山隧道通过区域地质构造复杂，可溶性的白云岩与灰岩等碳酸盐岩地段占大柱山隧道总长近 55%。隧道横穿保山褶皱带东翼之街子坡复式向斜，可分为街子坡向斜和搬家寨两个水文地质单元，前者岩溶水活动活跃，属富水构造。

通过隧道涌突水危险性评价体系研究，大柱山街子坡复式向斜根据评价指标划分为 4 个高危险区（IV），16 个中危险区（III），8 个较危险区（II），涌突水危险等级主要集中在高危险区（IV）、中危险区（III）。其中 IV 区长 297 m 占总长的 2.93%；II 区长 7 551 m 占总长的 74.25%；II 区长 2 321 m 占复式向斜总长的 22.82%。研究表明街子坡复式向斜隧道发生涌突水风险大，长度达 7 848 m 占隧道穿越街子坡复式向斜总长的 77.18%，属施工涌突水风险大的储水构造。

参考文献：

[1] 康小兵，等. 走马岭隧道岩溶涌水初步研究[J]. 工程地质学报，2005(2)：68—71

[2] 王科，蒋良文，许模，等. 圆梁山隧道毛坝向斜段岩溶洞穴的发育深度探讨[J]. 成都理工学院学报，2001(2)：139—143

[3] 蒋良文，易勇进，杨翔，等. 渝怀铁路圆梁山隧道桐麻岭背斜东翼岩溶涌水突泥灾害与整治方案比选[J]. 地球科学进展，2004(19)：340—345

[4] 巫锡勇，王鹰，罗健. 侵蚀性环境水形成与地下水运动特征的关系研究[J]. 铁道学报，1998(4)：106—112

[5] 秦小林，蒋忠信. 用岩溶地质学方法对铁路隧道溶洞进行定性预测[J]. 铁道工程学报，1998(1)：115—119

(编辑 赵立兰)