文章编号：1006 - 544X（2008）04 - 484 - 05

锦屏二级水电站隧洞工程岩溶涌突水机理

刘宝臣[1,2]，向志坤[2]，林玉山[3]，卢春名[2]，张炳晖[2]

（1. 中国地质大学（武汉）工程学院，武汉　430074；2. 桂林工学院 土木工程系，广西 桂林　541004；
3. 中国地质科学院 岩溶地质研究所，广西 桂林　541004）

摘　要：锦屏二级水电站引水隧洞是一座高外水压力、大涌水量的岩溶越岭深埋长隧洞。交通辅助洞工程中各涌水点有直涌型、冲溃型、劈裂型 3 种涌水形式，其中冲溃型涌水的可预见性小而破坏性最大。对辅助洞中各涌水点的统计分析表明：白山组中没有出现特大型（ >1 000 L/s）的涌水点，涌水类型一般为直涌型；而在盐塘组和杂谷脑组中都发生了特大型涌水，3 种涌水类型都可能会出现。在隧洞洞线高程部位白山组岩溶发育较盐塘组和杂谷脑组弱，且白山组岩溶整体发育微弱。

关键词：岩溶；引水隧洞；涌突水机理；锦屏

中图分类号：TU672.1；P641.134　　**文献标志码**：A

位于四川凉山彝族自治州境内的锦屏二级电站，利用雅砻江锦屏山 150 km 大河湾约 300 m 的天然落差修建过山隧洞，截弯取直引水发电，设计装机容量 4 400 MW（图 1）。关键工程是 4 条平行布置的引水隧洞，长约 17 km，开挖直径约 12 m，最大埋深 2 525 m，是一组直径大、埋深深的长岩溶越岭隧洞。为了配合引水洞线勘查，在下游端施工了 2 条试验探洞（PD1 长 3 948 m，PD2 长 4 168 m），后来因涌水封堵。目前正在施工 2 条长 17.5 km 的交通辅助洞，其作用是沟通锦屏山两侧的交通，并作为锦屏二级水电站主引水隧洞的施工辅助洞和超前探洞[1]。

锦屏二级水电站引水隧洞 90% 以上穿过三叠系浅变质大理岩，高压、大流量的涌水是制约工程的关键问题之一[2-4]。目前辅助洞接近贯通，截至 2008 年 1 月，余 1 200 m，辅助洞与引水隧洞平行布置，二者处于同一高程线上，研究分析辅助洞的涌水机理、规律，对于引水隧洞岩溶涌水的预测预报和防治处理无疑具有重要意义。

1　地质环境背景

1.1　一般地质环境

雅砻江锦屏山大河湾位于青藏高原向四川盆地过渡的斜坡地带，呈高山峡谷景观。锦屏山以南

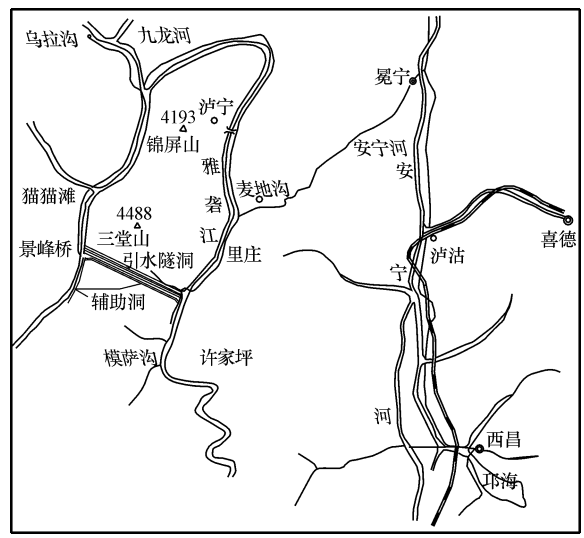


图 1　锦屏二级水电站工程地理位置示意图[1]

Fig. 1　Location of tunnels in Jinping Stage 2 Hydropower Station

收稿日期：2008 - 03 - 13

基金项目：国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金资助项目（50539080）

作者简介：刘宝臣（1968 - ），男，博士研究生，高级实验师，研究方向：地质工程与岩土工程，E-mail：Liubch@ glite. edu. cn。

北向展布，山势雄厚，沟谷深切，峭壁陡立，3 000 m 以上的山峰甚多，最大高差达 3 150 m。山脊多呈棱状，主脊两侧山梁呈梳状排列。雅砻江是本区内的干流水系，自洼里向北经淇木林后折向东，继又南折，经沪宁、里庄、大水沟、巴折等出区外，形成一个向北凸出、长约 150 km 的大河湾（图 1）。河谷一般为“V”型，岸坡陡峭、河谷狭窄、水流湍急。

本区在大地构造部位上处于松潘—甘孜地槽褶皱带的东南部，以断块学说的观点来分析，本区处于鲜水河断裂、安宁河断裂、则木河断裂、小江断裂、金沙江断裂和红河断裂所围的“川滇棱形断块”之内。工程区内褶皱即断裂构造发育，为锦屏复型向斜，核部为三叠系地层。复型向斜内次一级褶皱发育，可分为东、中、西 3 个褶皱带。区内的主要构造形迹近 SN 向，主要断裂有安宁河断裂、理塘－前波断裂、金呵－菁河断裂、锦屏山断层、小金河断裂和青纳断裂等。大河湾地区新构造运动特征主要是大面积的整体性、间歇性的急速抬升，主要迹象有广布的三级夷平面和断续分布的数级阶地，其次主要是以一些大断裂为边界的断块间的差异运动。

隧洞工程区主要出现的地层为：①下三叠统绿泥石片岩、砂岩。②中三叠统分为东部的盐塘组（T_2y）、西部的杂谷脑组（T_2z）及中部的白山组（T_2b）。盐塘组分上、中、下 3 段：上段为灰白色—白色粗晶大理岩、厚层块状；中段为粉红色大理岩，厚层状；下段为灰—褐色条带状或角砾状中厚层大理岩，局部见有黑色含泥质灰岩。杂谷脑组为条带状灰色灰黑色大理岩、白色大理岩。白山组为臭大理岩及角砾状大理岩，分布在隧道中段。③上三叠统（T_3）为细砂岩、中砂岩、板岩等。

1.2　岩溶水文地质条件

锦屏二级水电站隧洞工程区岩溶类型属于高山峡谷型，整体岩溶发育微弱，但沿洞线差异大，垂直分带明显。总体上表层岩溶发育程度中部相对较强而两侧较弱，上部较强而下部微弱，至隧道所在高程段就变成沿洞线两端岩溶发育较强而中部较弱。岩溶发育的制约因素很多，本区主要受到了地层岩性、地质构造、地下水动力条件、地形地貌及新构造运动的制约[5－7]。

雅砻江谷坡地带的地下水具有自身的特征：大河湾“河间地块”为无区外水补给的水文地质单元，大气降水补给，降水量具有典型的随山体高度而递增的高程效应。地块内各类岩溶含水层分布面积约占河湾内总面积的 75%，大气降水补给，大泉排泄为主。天然条件下以磨房沟泉和老庄子泉为代表的上部排泄基准和三股水泉为典型的下部排泄基准，构成空间立体的分布[8]。区域宏观地可分为东、西两部分：东部的地下水自西向东，西部的地下水自东向西流动。南北边界地下水有向工程区中部（磨房沟泉、老庄子泉一带）汇集的趋势。文献［1］将工程区划分为 4 个水文地质单元（图 2）。水文地质单元之间存在水力联系的“窗口”，地下水运移为分散慢速流或局部线状中速流为主的径流。

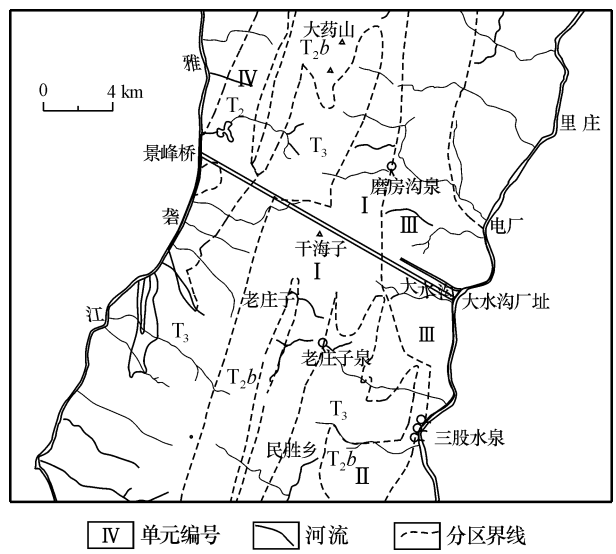


图 2　工程岩溶区水文地质分区图

Fig. 2　Karst hydrogeological map of Jinping Stage 2 Hydropower Station

2　隧洞涌突水机理

2.1　涌水机理

通过对辅助洞涌水点的分析，其岩溶涌突水机理主要类型有直涌型、冲溃型和劈裂型。

2.1.1　*直涌型*　岩体中本身存在有连通性好的、穿过掌子面前方岩体的岩溶管道或者较宽的岩溶裂隙，随着隧道掘进，一旦揭露随即发生涌水，水沿基本无充填的溶隙、溶孔、小型岩溶管道涌出。通常初期沿多个面出水，揭露溶蚀裂隙或管道后，涌水相对集中，出水量短时间内可有所增

大。涌水点相对分散，通常呈带状出现，单点涌水量相对较小，长期出水量相对稳定。一般这种涌水点的出水在时间上没有滞后性、水量不太大、压力衰减快，且水质清澈，可以提前在涌水预报中知道并做好防范措施。所以这种涌水的可控制性高，对施工机械和施工人员可能造成的威胁较小。东端 T_2y 和中部 T_2b 的大部分涌水均属于此种类型，典型的流量曲线如图 3a。

2.1.2 *冲溃型* 隧道掌子面前方岩体中存在溶隙或岩溶管道，且管道或裂隙中有充填物，但充填物充填堵塞段有弱胶结或者尚未胶结但比较密实。隧洞挖掘形成临空面，在隧道掘进到达此处时在后缘高水头压力下，充填物与溶隙洞壁之间的摩擦力被克服而产生冲溃；或者隧道开挖安全通过后，后方临空面上初期涌水量很小，水流从充填物边界流出，充填物渗流使得水流浑浊且逐渐加大直至充填段失稳破坏被冲溃，形成涌突水，这种涌水在时间上往往具有滞后效应，即在掌子面通过后，发生突然性的涌突水。具有突发性、瞬间水量大、泥沙碎石含量高、危害性大的特点，事发之前没有明显的预兆，对施工机械和施工人员的安全造成很大的隐患。例如，2006 年 1 月，宜万铁路马鹿箐隧道涌水点为一充填溶隙，隧道开挖已安全通过，但前方施工爆破导致充填物冲开，形成突水，造成 11 人被困伤亡的惨剧[9]。冲溃型涌水由于高速水流中夹带大量的泥沙和碎石，所以一旦发生涌水，破坏性很强。其长期出水量取决于后缘储水空间及其连通性。典型的流量曲线如图 3b。

2.1.3 *劈裂型* 锦屏电站隧洞工程埋深大、地下水丰富、水头高、岩性脆，外加隧洞开挖形成的临空面及地应力共同作用下，易劈裂突涌。劈裂包括两种类型：纯劈裂型和洞壁应力劈裂型。纯劈裂型指岩体内已有的微细裂隙，此裂缝在天然状态下张开度很小、没有水流通过。但隧道开挖以后，造成应力场的重分布，临空面的微裂缝在高水头地下水压力作用下胀开、劈裂，进而突涌水。这种水流水质清澈，携带物较少，压力相当大，流速很急，破坏性较高，对施工机械和施工人员的安全威胁很大。洞壁应力劈裂型是指隧洞掘进过程中没有揭露岩溶管道和溶隙，即主要过流管道与洞身之间存在相对完整、隔水的岩体，相对隔水层因掘进而变薄，在管道高压水头的压力下，产生洞壁劈裂。这类劈裂发生过程中会有岩石的爆裂声，出水发生相当突然，且在施工掌子面通过以后才发生，危险性大。图 3c 属于应力劈裂型涌水。

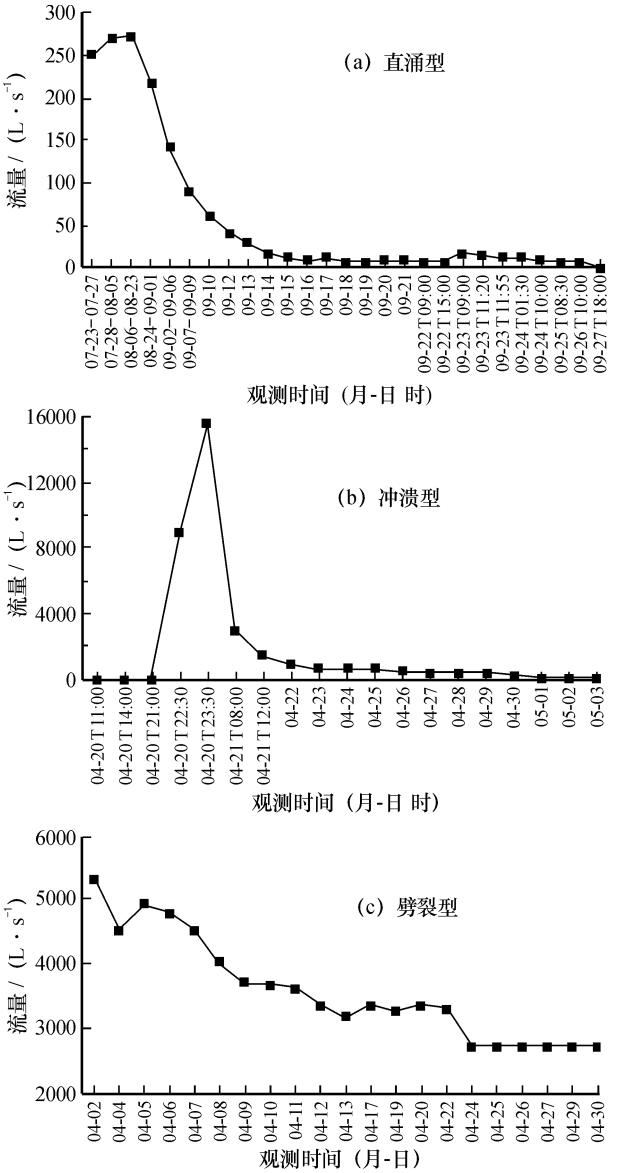


图 3 3 种类型的隧道涌水典型流量曲线

（据二滩水电公司锦屏二级水电站项目部资料）

Fig. 3 Typical flow curve of 3 kinds of water gushing

2.2 辅助洞涌水机理统计分析

对水电站交通辅助洞东西端总计 84 个流量大于 10 L/s 的涌水点统计分析，冲溃型和劈裂型所占比重较小，直涌型占绝大部分（图 4a）。但是，从大于 1 000 L/s 的超大型涌水点来分析，情况刚好相反（图 4b），劈裂型和冲溃型占大型涌水的绝大部分，直涌型占一部分。从地层来看，白山

组只有直涌型而没有其他涌水类型出现，杂谷脑组中没有出现劈裂型涌水，盐塘组中 3 种涌水类型都有出现；具有严重破坏性的涌水类型都出现在杂谷脑组和盐塘组中，白山组中出现较少。

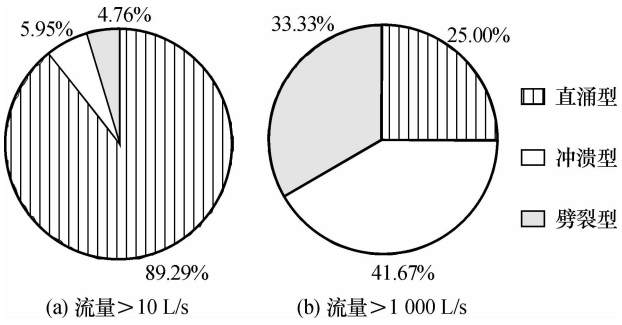


图 4　涌水类型所占的比重
Fig. 4　Ratio of different water gushing

2.3　辅助洞涌水规律分析

统计分析可以看出，辅助洞东端的盐塘组和西端的杂谷脑组中都出现了多次大型涌水，而中间的白山组却很少出水，特别是特大型涌水（流量大于 1 000 L/s）。从理论上分析是中间可溶性好、岩层厚而单一且雨水更加充足的白山组岩溶应该最发育。但从实际揭露的岩溶和涌水来看，中间白山组却是岩溶最不发育、特大型涌水最少的一段，其原因分析如下。

2.3.1　*地层岩性和构造因素*　白山组的岩石性质比较单一，盐塘组和杂谷脑组都有间层，有碎屑岩沉积。层间容易发育岩溶管道和裂隙，对形成突涌水有利。工程区内褶皱发育，为锦屏复式向斜。中部白山组岩石整体性好，盐塘组和杂谷脑组处于复式背斜，且受到断层切割，相对白山组破碎。

2.3.2　*岩溶发育程度的影响*　前期勘探成果和已开挖揭露的地层都说明了隧洞沿洞线高程的岩溶发育分布不均。盐塘组和杂谷脑组处于山体两侧，岩溶相对较发育。老庄子泉附近前期勘探钻孔显示：白山组中，前部岩溶发育，在高程 1 735 m（孔深 425 m）以下没有发现溶孔和岩溶裂隙。

2.3.3　*地下水运移规律的影响*　长探洞在埋深近 2 000 m 下的涌水比较普遍和分散，显示了深部裂隙岩溶涌水特征。根据长探洞 PD2 洞 2 845.5 m 涌水的衰减分析，高程在 2 098 m 以上为大含水介质，此高程以下含水介质变小[12]。其原因可推测为地下水在白山组中没有到达洞线高程就已经流向山体两侧。

综上所述，白山组岩体整体性较好，岩溶没有盐塘组和杂谷脑组发育。

3　结　论

（1）在高压水头和深埋可溶岩的共同作用下，隧洞中的涌水方式主要有：直涌型、冲溃型和劈裂型 3 种形式。直涌型和劈裂型都可以在涌水之前有一定的预兆，可预见性相对较好，事发之前可做好应对措施，减轻或者避免灾害发生；冲溃型涌水可预见性差，而且携带大量泥沙和碎石，破坏性最大。

（2）从涌水曲线来看，涌水过程中随时间的推移涌水量会有所减小，但减小的幅度不太一样，而且涌水持续的时间也会各有长短。

（3）从统计的涌水点涌水机理分析来看，隧道中部白山组岩体整体性好，出现破坏性大的涌水类型少，特别是破坏性大的涌水的几率较小。而在隧道两端的盐塘组和杂谷脑组中出现破坏性大的特大涌水的可能性较大。一般来讲，白山组出现的涌水是直涌型，且水量不会太大；而盐塘组和杂谷脑组中则会出现各种涌水类型，且可能多次出现破坏性大的涌水。

在今后的工作中，对冲溃型涌水的准确预测预报是工作的重点和难点。中部白山组工作的重点应是处理岩爆，而盐塘组和杂谷脑组中工作重点应是涌水的预测预报。

在资料收集过程中得到了二滩水电公司锦屏办事处工程二部的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

参考文献：

[1] 国家电力公司华东勘测设计研究院. 锦屏二级水电站岩溶水文地质专题研究报告（咨询本）[R]. 杭州：国家电力公司华东勘测设计研究院，2000.

[2] 李术才，李树忱，张庆松，等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2007，26（2）：217－225.

[3] 黄润秋，王贤能，陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析 [J]. 岩石力学与工程学报，2000，19（5）：573－576.

[4] 林玉山，李术才，李树忱，等. 岩溶区隧道涌水超前预报——回顾与展望［J］. 地球学报，2006，27：279－283.
[5] 张之淦. 岩溶发生学［M］. 桂林：广西师范大学出版社，2006.
[6] 袁道先，朱德浩，翁金桃，等. 中国岩溶学［M］. 北京：地质出版社，1994.
[7] 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.
[8] 任旭华，王美芹，王树洪，等. 锦屏二级水电站深埋隧洞外水压力研究［J］. 水文地质工程地质，2004，31（3）：85－88.
[9] 林玉山，张之淦，李术才，等. 锦屏二级水电站引水隧洞岩溶水防治思想的演变［J］. 水文地质工程地质，2007，34（6）：19－23.

Karst Tunnel Water Gushing Mechanism in Jinping Stage 2 Hydropower Station

LIU Bao-chen[1,2], XIANG Zhi-kun[2], LIN Yu-shan[3], LU Chun-ming[2], ZHANG Bing-hui[2]
(1. *Faculty of Engineering*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*;
2. *Department of Civil Engineering*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541004, *China*;
3. *Institue of Karst Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Guilin* 541004, *China*)

Abstract: The features of water gushing points in traffic tunnel are studied. Washout water gushing is most dangerous because of unpredictability and destruction. Statistical analysis on each water gushing point in traffic tunnel shows that large water gushing (>1 000 L/s) appears in Yantang formation and Zagunao formation, but not in Baishan formation. A general analysis of water gushing attenuation in tunnel exploration finds karst well developed in Yantang and Zagunao formation, but not so well in Baishan formation. A general view is given to the diversion tunnel construction area.

Key words: karst; diversion tunnel; water gushing mechanism; Jinping