

文章编号: 1009-3850(2006)02-0101-05

“南水北调”西线工程地质灾害危害分析

郑万模, 段丽萍

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: “南水北调”西线工程区域工程地质条件复杂, 活动断裂发育、新构造运动强烈、地震活动频繁, 地质灾害的影响很大。本文具体分析了活动断层、地震、冻土及深埋长隧洞地质灾害对工程的危害。

关键词: “南水北调”; 西线工程; 地质灾害; 危害

中图分类号: P694

文献标识码: A

1 前言

“南水北调”西线工程主要从长江上游的金沙江、雅砻江、大渡河调水, 整个工程规划分 3 期: 第一期雅砻江支流达曲—黄河支流贾曲自流线路, 调水 40 亿立方米; 第二期雅砻江干流阿达—黄河支流贾曲自流线路, 调水 50 亿立方米; 第三期金沙江干流侧仿—雅砻江干流阿达—黄河支流贾曲的自流线路, 调水 80 亿立方米(图 1)。

工程区位于青藏高原的东北部, 海拔 3000 ~ 4500m。根据规划方案, 在长江上游的通天河、雅砻江和大渡河上游筑坝建库, 总库容最大为 $318.2 \times 10^8 \text{m}^3$, 采用深埋长隧洞穿过长江—黄河分水岭巴颜喀拉山引水至黄河上游。考虑可调水量及工程规模, 目前选取通天河的歇马—直门达、雅砻江的宜牛—仁青里和大渡河的灯塔—斜尔杂为规划的重点引水河段, 黄河贾曲口以上为受水河段。

2 工程区背景条件

“南水北调”西线工程主要布设在四川省甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州、青海省果洛藏族自治州及甘肃省甘南藏族自治州境内。工程区的气候大致以巴颜喀拉山为界分为两种类型, 以北受中

亚西风干冷气流控制, 居高原亚寒半干旱气候特征, 以南受西南气流的影响, 具亚寒—寒温带半湿润气候特征, 太阳辐射强, 日照时间长, 气温低, 冬季严寒且持续时间长, 夏季凉爽, 旱、雨季分明, 雨天多, 但暴雨稀少, 降雪日数多, 降雪量大。引水区径流主要来源于降水, 并由季节性融雪与融冰补给, 通天河还有少量冰川融水补给, 枯水期一般地下水补给, 丰水过渡期为融雪和春雨补给, 丰水期由降雨补给^[1,2]。

工程沿线地貌以巴颜喀拉山为界大致可分为两个区: 巴颜喀拉山—北都曲至黄河间为浅切割高山区, 海拔 3900 ~ 4300m, 地形起伏平缓, 地表切割轻微, 相对高差小于 400m, 以浅谷—宽谷型河道为主, 河床比降平缓, 岛状多年冻土和季节冻土发育; 巴颜喀拉山以南至雅砻江为中等切割的高山区, 海拔 3900 ~ 4300m, 地形切割较为强烈, 呈波状起伏, 相对高差一般为 600 ~ 800m, 以峡谷型河道为主, 河床比降较大^[3]。

工程区的大地构造单元为巴颜喀拉山印支地槽褶皱系, 该区强烈水平挤压形成的复式背、向斜构造极为发育, 与众多断层交织在一起, 构成了复杂的地质构造格局。区域内的主要断裂多形成于印支构造运动时期, 在第四纪早期构造运动较为强烈^[4]。该区位于可可西里—金沙江地震带内, 震级多以中等水

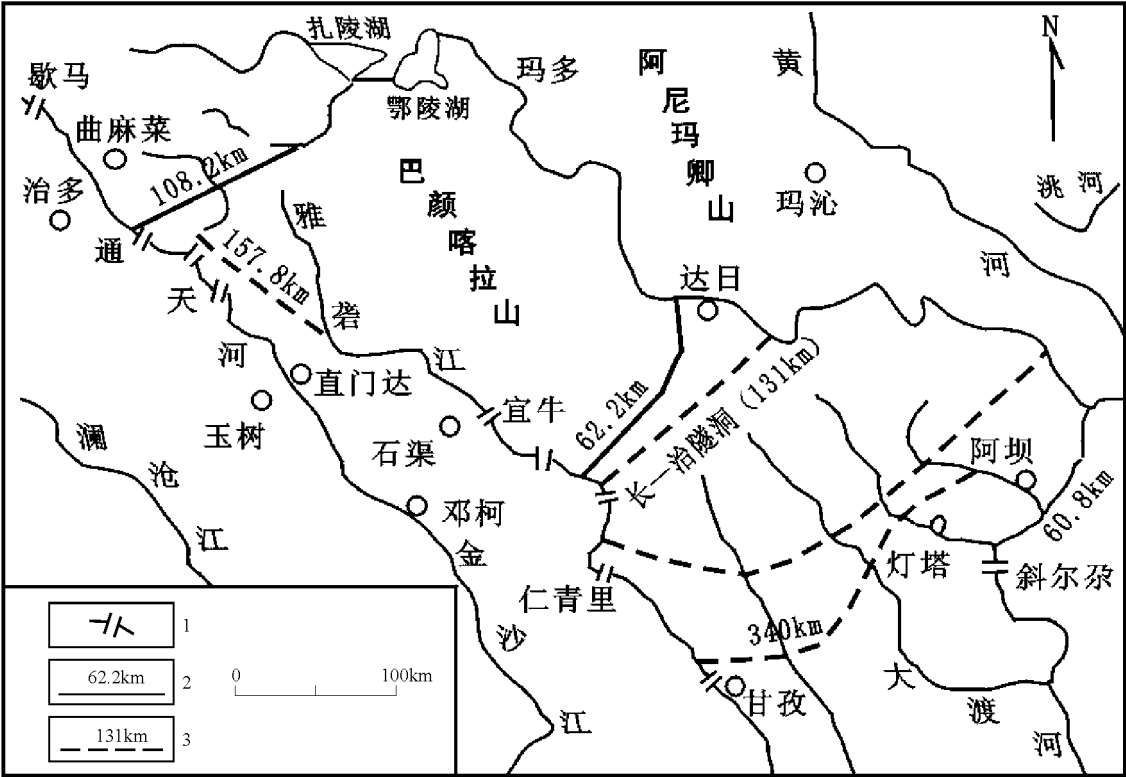


图 1 南水北调西线工程方案示意

1. 坝址; 2. 抽水线路及长度; 3. 自流线路及长度

Fig. 1 Sketch of the Western Route Project for Transferring Water from Southern to Northern China

1= dam site; 2= pumping route and its length; 3= artesian route and its length

平为主, 强震相对较少, 其中有两次震级大于7.0的地震。根据地震烈度区划资料, 工程区地震基本烈度为7~8度。沿线出露的地层主要为三叠系巴颜喀拉组的浅变质砂岩、板岩及灰岩和第四系松散堆积物, 其次为印支期、燕山期的中酸性岩浆岩侵入体^[5]。

3 地质灾害对工程的危害

工程区自然条件恶劣, 是中国地震多发区之一, 也是新构造活动发育相对强烈的地区, 在地理上又属于高寒区, 地质灾害严重, 地震、活动断层、泥石流、冻土和高地应力是主要的地质灾害。区域地质灾害在某种程度上制约着西线工程的实施, 轻则使得工程延期或投资规模膨胀, 重则危及工程的安全。

3.1 活动断层

西线工程区的活动构造发育(图2), 大型的走滑断层基本上都是继承性的。晚更新世以来, 北西向断裂的活动方式以水平左旋走滑为主, 水平滑动速率最大可达16mm/a。进入全新世, 大部分断裂停止活动, 活动的断裂主要分布在巴颜喀拉山北缘与阿尼玛卿山的交界地带及玉树—甘孜一带, 全新世

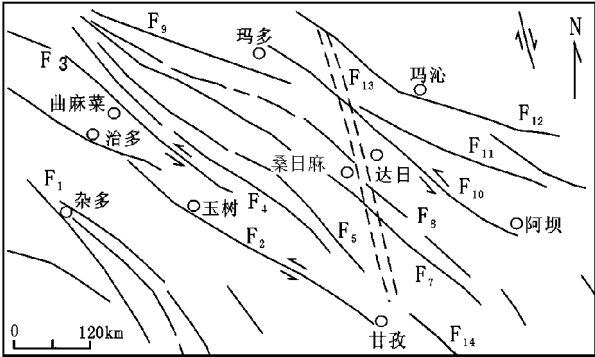


图 2 工程区活动断层分布示意

F₁. 澜沧江构造带; F₂. 甘孜-玉树断裂; F₃. 曲麻莱断裂; F₄. 宜牛断裂; F₅. 长须贡玛大塘坝断裂; F₇. 主峰断裂; F₈. 桑日麻断裂; F₉. 鄂陵湖南断裂; F₁₀. 甘德南断裂; F₁₁. 久治断裂; F₁₂. 东昆仑断裂; F₁₃. 甘孜-达日横向构造; F₁₄. 鲜水河断裂

Fig. 2 Distribution of the active faults in the construction areas
F₁= Lancangjiang structural belt; F₂= Garze-Yushu fault; F₃= Qumarleb fault; F₄= Ju'nyung fault; F₅= Choxukongma Datangba fault; F₇= Main Peak fault; F₈= Sangrumba fault; F₉= Ngoring fault; F₁₀= Gade fault; F₁₁= Jigzhi fault; F₁₂= East Kunlun fault; F₁₃= Garze-Darlag horizontal structures; F₁₄= Xianhuihe fault

分区活动特征与区内现代地震活动的情况相吻合,其中以甘孜-玉树断层、桑日麻断裂和甘德南断裂对工程的影响最大。活动断层与破坏性地震的发生有直接的成因联系,活动断裂对工程的影响主要表现在由震动引起的破坏(抗震问题)和由错动造成的破坏(抗断问题),如蠕滑对其接触的工程产生缓慢的破坏,而粘滑对工程的影响则表现为突然的破坏。工程区断层围岩类别高,地质条件差,相对有利于发生粘滑,工程各个引水方案都不同程度地邻近或穿越一条或多条活动断裂。

在强震地区由地震形成的错动量对于深埋长隧洞的支护及抗断设计、水利枢纽场址安全评价极其重要。值得重视的是,在雅砻江调水区还发育近南北向的甘孜-达日横向构造,它是一种典型的叠加性构造,具有明显的弥散性,可能是青藏高原北部北北西向活动构造的一部分,与北西向构造的交汇部位往往成为诱发地震活动的重要地段,1947年3月17日达日7.75级地震就发生在横向构造与北西向构造的交汇部位。这种弥散性的构造使得山体破碎,降低了硐室围岩的稳定性,给隧洞的防渗处理带来困难,增加了施工的难度和工程成本。弥散性构造带的发育在一定程度上改变了工程区地下水的循环动力条件,可以降低高地温。

3.2 地震

工程区位于可可西里-金沙江地震带内,是中国地震最为强烈的地区之一。区内震级与断裂构造关系密切,震中常沿活动断裂分布。地震烈度等烈度线分布的总体方向为北西向,工程区南北两侧为8和9度区,中部和东部为7度及其以下的低烈度分布区。

地震重演的规律为:(1)强震发生的数十年至100年前后,有多次地震发生,且在7.5级以上地震发生的前后,多有中强地震和6~7级地震的重复(极震区重复)活动;(2)5~6.5级地震发生区,会在数十年期间重复同样级别的地震;(3)7.5级以上地震的重复时间较长,一般多在1000年至数千年左右,但在活动断裂的活跃期内,其重演时间也仅在数十年至100年左右。

工程区北部东昆仑断裂带的花石峡—玛沁段是区内断裂活动、地震活动较强的地区,沿断裂带有7~8级地震发生;南部的甘孜-玉树断裂和鲜水河断裂也是地震活动较为强烈的地区。据研究,甘孜-玉树断裂带在未来50年内具有强震复发的高危险性,而且,发生里氏7级地震的危险性在增大。西线引

水隧洞在抗震方面,即使在9度区,深埋隧洞是较稳定的,这是由于震动破坏往往随工程埋深的增加而衰减。但在抗断方面则存在不利因素,强震可能给隧洞安全带来严重影响。深埋隧洞的围岩为坚硬或中硬岩类,断裂活动发生错动的可能性较大。

3.3 冻土

引水工程建筑物多布置在多年冻土区和多年冻土与季节冻土的混交地带内。工程区内多年冻土广泛分布,季节冻土仅分布于海拔4200m以下的沟谷内,冻土在冻结时有较大的冻胀力,表现为冻胀性,溶化时表现为融陷性。由冻到融,冻土的密度、可压缩性、强度指标均有成倍的变化,冻土的这种物理特性变化对水工建筑物的稳定性有较大的影响。多年冻土主要表现为融沉危害,季节冻土主要表现为冻胀危害。冻土及冻害对调水线路,尤其是对通天河、雅砻江调水线路的影响较为严重。

季节冻土的冻胀危害对工程有较大的影响,冻胀引起的法向冻胀力和切向冻胀力常造成建筑物基础的上拔和上抬,同时因水平冻胀推力的存在能引起挡土建筑物的水平位移,使建筑物产生裂缝、歪斜以致倒塌。根据工程区建筑物布置状况,位于季节冻土区的引水建筑物有引水枢纽、引水隧洞进出口及抽水线路上的明渠、抽水站、输水管道及配套工程等。在季节冻土区修建引水渠道,当渠床的土质、水分和温度条件不同时,各部位的冻胀也会出现差异,如渠床物质成分为粗粒土时,冻胀量很小,反之为细粒土(尤其是粉质土)时,则冻胀量明显增大;渠顶的含水量比渠底要小,渠顶比渠底冻胀量要小;阴坡温度比阳坡低,阴坡比阳坡冻胀量要大,所有这些决定了渠道各部位的衬砌将受到不均匀冻胀力的作用,引起衬砌的破坏,降低了衬砌的防冲、防渗能力,进而使渠道报废。位于季节冻土区的隧洞进出口翼墙,往往受其背后土体冻结时所产生水平推力的影响而前移,其间隙随后被横向扩张的土所填塞。融化时,翼墙在复位过程中必然受到墙后填土的阻抗不能恢复原位,这样年复一年的冻融,墙体变位残余逐年积累,从而引起翼墙的前倾变位。在季节冻土区铺设输水管道时,因规模大,管线长,沿线土质、地温和冻结条件不可能一致。年复一年的冻融作用就会产生管节脱位,或全管线的扭曲,轻者影响水流的畅通,重者造成管线的毁坏。

多年冻土的融沉对引水隧洞和抽水线路的抽水站、输水管道、渡槽和壅水坝等引水工程有严重危害。与季节冻土的冻胀性相反,多年冻土在融化后,

由冰融化为水时体积缩小,使土体产生不均匀热融沉陷,造成建筑物的开裂和破坏。对于引水隧洞,因其埋深大,最浅的也在几十米以下,而区内多年冻土下限最大深度花石峡地区为55m,平均为40多米,隧洞埋深远远大于多年冻土的下限,所以多年冻土对引水隧洞洞身不会产生任何危害,但在隧洞口附近地段,其融化深度加大,可造成大面积的向源滑塌和溯源侵蚀,引起斜坡失稳。由于多年冻土的厚度较大,对建筑物基础产生的冻胀力也大,对于基础不可能置于冻层之下的渡槽、抽水站和输水管道等工程来说,因法向冻胀力的作用使基础上拔和上抬,当多年冻土融化时,由于土质和含水量的不同,将出现不均匀沉降,在这种升降的往复过程中,渡槽便出现弯曲和舞龙等现象;位于斜坡上的桩墩常因水平冻胀力和切向冻胀力的联合作用,使其断裂、倒塌;抽水站则因土层的不均匀冻融作用使基础发生沉陷,导致抽水机械发生倾斜,影响正常运转;多年冻土对输水管道的危害机制与季节冻土的危害接近。

3.4 深埋长隧洞

工程的引水隧洞属于特长隧洞;在一般浅埋隧洞中存在的工程地质问题在深埋长隧洞中都可能存在,但高地温、高地应力、高压涌水和岩爆是深埋长隧洞典型的工程地质灾害。此外,长隧洞中因活断层发育而诱发的氡异常也是影响南水北调西线工程隧洞施工应力的次生灾害。

1. 高地温灾害

隧洞施工过程中出现高地温现象不但恶化作业环境、影响施工材料的运用并危及隧洞的稳定,还可能影响到调水方案的可行性。计算数据表明,工程区内地温梯度介于 $18 \sim 26^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间,平均值为 $22^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。地温梯度的高值区主要分布于清水河、达日—久治、玉树以及甘孜附近的马尼干戈—温拖四地区,其平均地温梯度达到 $24 \sim 26^{\circ}\text{C}/\text{km}$,是工程区内中高温地下热水的主要排泄区。据有关资料推算,深埋隧洞高程处的地温可达 $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$,局部地温异常区的硐室围岩温度可达 $53 \sim 68^{\circ}\text{C}$ 。这仅是按正常的地热增温考虑,如果存在深部岩浆补给,则可能形成高温气流。通天河引水方案中的引水隧洞将穿越清水河地温梯度的高值异常区,雅砻江引水方案中的隧洞则要穿越达日—久治高地温梯度区。清水河地区温泉分布较为集中,总体呈北西向展布在长约120km、宽约30km范围内,见有12个温泉(群),西端温泉最高水温 51°C ,最大流量 $7.3\text{L}/\text{s}$,一般在 $1 \sim 3\text{L}/\text{s}$ 左右。达日地区的尼吉姜温泉水温为 49°C ,流

量 $12\text{L}/\text{s}$ 。温泉的存在,说明上述隧洞经过地区有可能存在由高水热活动引起的高温地层问题。这些地下热水的存在,将增加工程的施工难度,影响到围岩的稳定性,同时,水质分析表明,高温的地下热水对金属铁可能具有潜在性腐蚀作用。

2. 高压涌水灾害

西线引水洞线区赋存的松散岩类孔隙水、冻结层上水、风化带网状基岩裂隙水等因硐室埋藏深,对围岩稳定影响甚微,影响较大者主要为构造裂隙水。引水洞线区围岩主要为砂岩、板岩及其组合的韵律互层,砂岩中裂隙发育,富水性中等,为透水含水层;板岩裂隙不发育,水量贫乏,为相对隔水层。由于三叠系构造异常发育,在背向斜轴部地带岩层破碎,裂隙发育,有利于地下水的富集、运移,常赋存有较丰富的地下水。此外,在由砂、板岩互层组成的向斜核部地段,由于板岩隔水亦有形成较好储水构造的条件。引水线路地区第四纪活动性断裂多,断裂带内水量丰富,易于集中渗流,尤其是某些顺河发育断层与地表水有密切的水力联系,地下水源补给充沛,硐室的开挖必将形成地下水富集廊道。在静、动水压作用下,可能出现涌水甚至爆发突水,从而使断层破碎带内充填物和褶皱核部的破碎岩石涌出造成事故,严重的突涌水可能迫使工程改线甚至使工程无法实施。

3. 岩爆灾害

岩爆与岩性、围岩应力有着密切的关系,而围岩中发育高地压力主要与硐室开挖前的原始应力状态有关,一般地,当岩石的荷载—变形全过程曲线具有II或II型的形态,且满足弹性应变能指数大于5的条件,围岩就具有产生岩爆的可能。西线工程的调水自流线路洞体深埋于山体基岩之内,上覆岩体厚度一般为 $500 \sim 800\text{m}$,最大厚度达 1100m 。抽水线路除部分洞段上覆岩体太薄不易成洞外,大部分洞段上覆岩体厚度在 $100 \sim 300\text{m}$ 之间,远大于常规的2~3倍洞跨要求。隧洞的围岩主要为三叠系的浅变质砂板岩,局部洞段为脆性的中生代花岗岩、花岗闪长岩,这些坚硬脆性岩体具备了储存高能量的条件,同时部分洞段将穿越高地应力区。因此,西线工程的深埋隧洞具备了发生岩爆的工程地质条件,据工程区(即巴颜喀拉山地区)中强地震的震源机制解析、卫星影像水系信息宏观资料分析及地应力Kaiser效应测量结果,该区现代构造应力场的最大主压应力轴方向由西向东,由 $\text{NE}19^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 逐渐东偏至 $\text{NE}50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 左右,总体呈北东向,与隧洞轴线的交角较小,有

利于隧洞的稳定。水压致裂和地面 Kaiser 测量结果显示,构造应力的量值: σ_1 为6.0~11.7MPa,平均值为8MPa左右; σ_2 变化在1.0~6.0MPa之间,平均为3MPa左右; σ_3 变化于0.3~4.3MPa之间,平均在2MPa左右。海拔3000m高程位置的 σ_1 量值介于9~16MPa左右,4000m高程位置的 σ_1 量值介于6~13MPa左右。应力形变场的线弹性有限元计算结果显示,开挖时可能会遇到50MPa左右的高水平挤压应力,在这类地区开洞,可能遇到强岩爆。对雅砻江方案的长一恰深埋隧洞进行的岩爆预测表明,隧洞经过的黑云母花岗闪长岩洞段肯定会发生岩爆。

4 结 语

“南水北调”西线工程区域工程地质条件复杂,断层发育且有活动断层存在,构造运动尤其是新构造运动强烈,地震活动频繁,地质灾害及其次生灾害

对工程的影响很大,应引起人们的高度重视,应加强调工程与各类地质灾害相互作用研究,以减少或消除地质灾害对工程的危害,促进工程和环境的协调发展。

参考文献:

- [1] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 307—334.
- [2] 高治定, 王玉峰. 南水北调西线工程调水地区水文气象特征[J]. 人民黄河, 2001, 23(10): 8—10.
- [3] 马东涛, 崔鹏, 陈书涛, 等. 南水北调西线工程调水区地质灾害问题[J]. 山地学报, 2003, 21(5): 582—588.
- [4] 潘桂棠, 丁俊, 姚东生, 等. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1500000)[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004.
- [5] 路新景. 南水北调西线工程主要工程地质问题综述[A]. 南水北调工程地质分析研究论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 181—191.

Risk analysis of the geological hazards along the Western Route Project for Transferring Water from Southern to Northern China

ZHENG Wan-mo, DUAN Li-ping

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: The construction areas along the Western Route Project for Transferring Water from Southern to Northern China are conspicuous by complicated engineering geological conditions, numerous active faults, highly neotectonism and frequent earthquakes. Numerous geological hazards may have important effects on the construction of the project. The emphasis in this study will be on the analysis of the geological hazards such as active faults, earthquakes, frozen earth and deeply-buried long tunnels. Great attention should be paid in the planning of the project so as to lower the risk of the project caused by geological hazards.

Key words: Transferring Water from Southern to Northern China; Western Route Project; geological hazard; harm