

南水北调西线工程调水区地质灾害问题

马东涛¹, 崔鹏¹, 陈书涛², 尚宇鸣², 涂建军¹, 陈杰¹

(1. 中国科学院- 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都, 610041; 2. 水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 郑州, 450003)

摘 要: 南水北调西线工程地处青藏高原东南部, 规划三期工程从长江上游的通天河及其支流雅砻江、大渡河年总调水 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$, 经输水隧洞穿越江河分水岭巴颜喀拉山入黄河上游, 解决黄河上、中游地区严重的水资源短缺问题。本文在对调水区气象气候、水文、地貌、岩性构造等环境背景条件分析研究的基础上, 初步论述了西线工程建设中将面临的主要地质灾害问题, 如水库诱发地震、库岸再造和岸坡变形、多年冻土和季节冻土、泥石流和严重水土流失、深埋长隧洞的高地温、高地应力岩爆、涌水及碎屑流等。针对这些灾害问题和西线工程目前现状, 提出了五点指导性防灾建议。

关键词: 南水北调; 西线工程; 地质灾害; 发育背景; 成因; 防灾建议

中图分类号: P642

文献标识码: A

1 前言

从 20 世纪 50 年代开始, 我国广大水利工作者对南水北调工程进行研究论证, 逐渐形成了东、中、西三条引水线路, 使长江、淮河与黄河、海河四大流域相互连接, 构成了我国水资源开发、配置、利用“四横三纵”的总体战略格局。南水北调工程总投资达 $5\,000 \times 10^8$ 元人民币, 其东线已于 2002- 12- 27 动工, 中线将于 2003 年年底开工, 全部工程规划于 2050 年完成, 届时将成为世界上规模最大的水利工程^[1]。

南水北调西线工程(以下简称西线工程), 系指从长江流域的大渡河、雅砻江、通天河上游开凿输水隧洞, 穿越长江与黄河的分水岭巴颜喀拉山, 向黄河中、上游地区调水, 其供水目标主要是解决青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西等六省(区) 黄河中、上游地区和渭河关中平原的缺水问题。结合兴建黄河干流上的大柳树水利枢纽工程, 还可向邻近黄河流域的甘肃河西走廊地区供水, 必要时可相机向黄河

中游供水。与国内外其他跨流域调水工程相比, 西线工程具有调水量最大、调水线路最长、受水区域最广、配套工程最繁重等特点^[2]。

规划中的南水北调西线工程总调水量约 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$, 本着从低到高、由小到大、由近及远、先易后难的规划思路分期建设, 整个工程规划为三期: 第一期工程(达曲- 贾曲联合自流引水方案), 可调水 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 计划从雅砻江支流达曲、泥曲和大渡河支流杜柯河、麻尔曲和阿克河筑坝引水, 在黄河支流贾曲入黄。整个工程主要由阿安、仁达、上杜克、亚尔唐和克柯等 5 座引水枢纽及一条串联 5 条调水河流的输水线路组成。规划截水坝坝高 63~ 123 m, 输水线路全长 260. 3 km, 其中隧洞长 244. 1 km, 最长隧洞达 73 km, 明渠长 16. 1 km; 第二期工程(阿达- 贾曲引水方案), 可调水 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$, 计划从雅砻江的阿达调水到黄河的贾曲, 输水线路总长 304 km, 其中隧洞 8 座, 总长 288 km, 最长隧洞 73 km, 最高大坝达 193 m; 第三期工程(侧坊- 雅砻江- 贾曲引水方案), 从通天河的侧坊调水到雅砻江再到黄河的贾曲自流线路, 计划调水 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中侧坊

收稿日期(Received date): 2003- 04- 28; 改回日期(Accepted): 2003- 07- 04。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目西部重大研究计划(90202007) 资助。[Supported by the West Key Research Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 90202007).]

作者简介(Biography): 马东涛(1965-), 男, 陕西杨陵人, 副研, 在读博士, 主要从事山地灾害减灾理论研究和工程防治。[MA Dong-tao (1965-), male, Born in Yangling of Shanxi, associate professor, major in mountain hazards mitigation theories and engineering control]

- 雅砻江线路长 204 km, 隧洞长 202 km, 最长洞段 62.5 km。雅砻江- 贾曲段线路长 304 km, 隧洞长 288 km, 最长隧洞 73 km^[3] (图 1)。

调水区位于青藏高原东南部, 面积约 22×10^4 km², 海拔高, 气候寒冷, 自然条件恶劣, 地形起伏大, 地质构造复杂, 新构造运动和地震活动较强烈, 地质灾害问题众多。工程建设不仅要适应复杂的环境地质条件, 而且会打破调水区内固有的环境平衡状态, 诱发一系列地质灾害问题, 给调水工程带来不同程度的危害。而这些地质灾害的发生、发展必将直接或间接地影响到调水工程的正常运用及周边居民的生活和工农业生产, 制约着调水工程的实施, 对正在实施中的“西部大开发”战略也将产生巨大的影响。

2 调水区环境背景

2.1 气象气候

以巴颜喀拉山(以下简称巴山)为界, 西线工程大致可分为两个气候区, 巴山以北受中亚西风干冷气流控制, 具高原亚寒半干旱气候特征; 巴山以南受西南气流的影响, 具亚寒- 寒温带半湿润气候特征^[4]。其主要气候特征如下: 太阳辐射强, 年辐射 $7\,000 \times 10^6 \sim 5\,500 \times 10^6$ J/m²; 日照时间长, 年均超过 2 000 h; 气温低, 年平均气温 - 4.2~ 5.6 °C, 极

端最低气温达 - 45 °C, 冬季严寒且持续时间长, 夏季凉爽, 大部分地区有 4 个月气温在 0 °C 以下; 干、雨季分明, 雨日多, 降雪日数多, 降雪量大。年降水量由西北部五道梁的 265.6 mm 逐渐增大到东部壤塘、阿坝的 700 mm 以上。全年降水量的 80 % 集中在 5~ 10 月, 年降水日数 150 d。海拔 3 500 m 以上地区, 年降水量的 20 % ~ 30 % 为降雪^[5]。

2.2 水文条件

各引水坝坝址以上通天河、雅砻江和大渡河等河流的年径流总量 387.2×10^8 m³。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。一般 11 月至次年 3 月为枯水期, 径流由地下水补给; 4~ 5 月为枯、丰水过渡期, 径流为融雪和春雨补给; 6~ 10 月为丰水期, 以降雨补给为主, 是径流的主要形成期, 其径流量占年径流量的比例高达 74 % ~ 82 %。本区暴雨稀少, 洪水主要由日雨量大于 5 mm 的持续性、区域性“强降雨”过程形成, 部分为融雪洪水。引水区产沙量小, 平均含沙量 < 1 kg/m³, 多年平均侵蚀模数为 100 t/km², 多年平均输沙量不足 $1\,000 \times 10^4$ t, 其中汛期输沙量占年输沙量的 95 %^[5]。

2.3 地貌条件

西线工程沿线地貌以巴山为界大致可分为两个区: 巴山~ 北都曲至黄河间为浅切割高山区, 海拔 3 900~ 4 300 m, 地形起伏平缓, 地表切割轻微, 相

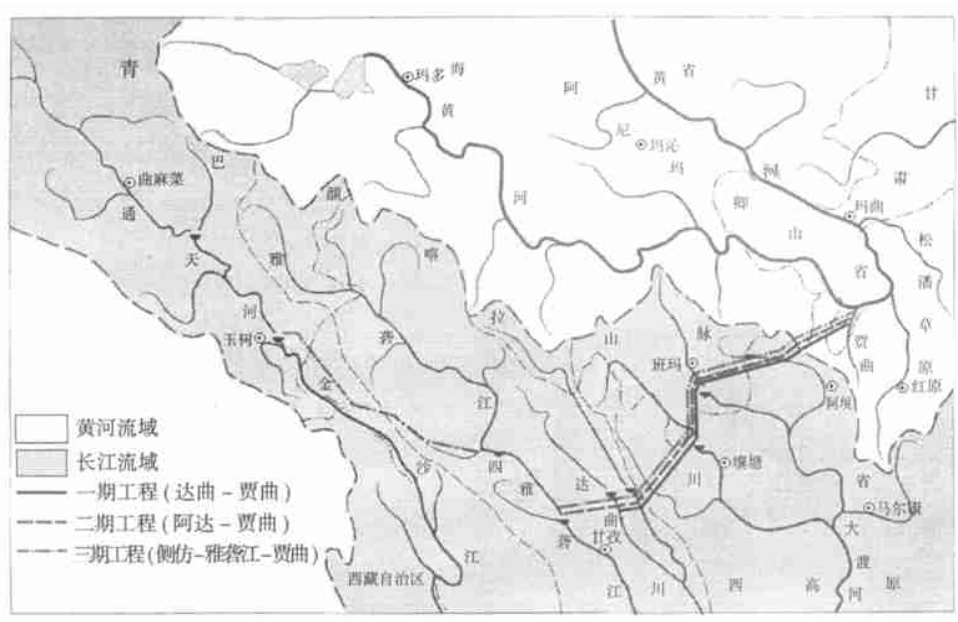


图 1 南水北调西线工程总体布置图

Fig. 1 Planning map of the project of water division from the south to the north via the Western course

对高差 < 400 m。水系多呈梳状发育,以浅谷~宽谷型河道为主,比降平缓,湖泊洼地星罗棋布,岛状多年冻土和季节冻土发育;巴山以南至雅砻江为中等切割的高山区,海拔 3 900~4 700 m,地形切割较为强烈,呈波状起伏,相对高差较大,一般为 600~800 m,以峡谷型河道为主,河床比降较大,水流湍急。

2.4 地质条件

调水区的大地构造单元为巴颜喀拉山印支地槽褶皱系,范围包括花石峡~玛沁~玛曲断裂以南和玉树断裂以北地区。该区强烈水平挤压形成的复式背、向斜构造极为发育,与众多断层交织一起,构成了复杂的地质构造格局。区域主要发育 NW 向断层,以 NE 盘上升的逆断层为主,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^[6]。该区位于可可西里~金沙江地震带内,强震相对较少,震级多以中等水平为主,其中有两次震级 > 7.0 的地震:一次是 1886 年石渠邓柯地震,史载曾引起巨型滑坡堵断金沙江;另一次是 1947 年达日地震。根据地震烈度区划资料,工程区地震基本烈度为 VII~VIII 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^[7]。

2.5 经济及人文条件

调水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。该区域人口 92% 是藏族,其余为汉、回、羌、土、蒙等民族,人口平均密度 4 人/km²,地广人稀。地方经济以农、牧、林业为主,区内没有大型工矿业,经济发展相对滞后,人民生活贫困,交通运输落后。

3 调水区主要地质灾害问题及其成因

调水区地质灾害依其成因大致可分两大类:原生灾害,即在工程实施之前就存在的灾害,如滑坡、崩塌、泥石流、洪水、冻土等;次生灾害,即引流工程实施后由于建坝、蓄水、开挖引水明渠、管道及深埋隧道等引起的灾害,如水库诱发地震、岸坡变形和破坏、隧道涌水及岩爆等。

3.1 水库诱发地震

水库蓄水以后产生的诱发地震,对水库大坝、发

电厂房及其他设施将带来严重危害。世界上第一例水库诱发地震 1931 年发生于希腊的 Marathon 水库,著名的还有 1962-3-18 我国新丰江水库地震(震级 6.1)和 1967-12-10 印度柯依纳水库地震(震级 6.5)等^[8]。国际大坝会议资料统计分析表明:坝愈高,水库的蓄水量越大,诱发地震的可能性愈大。坝高超过 200 m 的水库,发震概率达 1/4 强。已发生震级 6.0 以上诱发地震的水库坝高均超过 100 m,库容均 > $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而水库地震多发生在断裂、构造节理、裂隙发育的区域。

西线工程区内的 10 余座引水大坝坝高在 63~193 m 间,库容在 $46 \times 10^8 \sim 303 \times 10^8 \text{ m}^3$ 间,水库回水长度 64~213 km,属于高坝大库。区内有 15 条区域性活动断裂,其中玉树断裂、鄂陵湖南断裂、鲜水河断裂、甘德南断裂、桑日麻断裂等的活动性较强,后两者分别在阿坝县南,于 1969 年发生过震级 5.0 的地震和 1947 年发生过震级 7.75 的地震^[7]。区内岩性主要为浅变质砂岩和板岩,软硬岩层相互交错,岩体中裂隙发育,其中砂岩为主要的裂隙透水岩层,而板岩则为相对隔水层,有利于库水渗透和诱发地震。水库地震是库区岩体的地应力、库水的附加荷载及水的渗透力等因素综合作用,导致不连续面破裂活动造成的。一般地应力较高的地区,诱发地震的强度也较高。该区位于新构造运动强烈的青藏高原东北部,由于活动断裂常常伴随地应力的局部集中,在 139~235 m 深度域的最大水平主应力约为 9.6~11 MPa,诱发地震的可能性较大。库区地震基本烈度为 VII~VIII 度,地震活动性较强。因此,西线工程从水库规模、构造条件、渗透条件、地应力和地震活动性等因素分析,均有利于诱发水库地震。

3.2 库区岸坡变形与岸坡再造

水库岸坡的稳定主要受岸坡结构、地形、地震、降雨和库水等因素的综合控制^[8]。西线工程的水库岸坡依其变形破坏的形式主要有崩塌和滑坡两大类。据对大渡河、雅砻江和通天河三条河流两岸岸坡的调查和统计,岩体结构面与临空面的关系是影响岸坡稳定的主要因素。在 350~600 m 高度范围内,由于砂岩与板岩不等厚互层,岸坡坡度普遍较陡,多在 40° 以上,崩塌和滑坡较为发育。地震是岸坡失稳的重要诱发因素,一般在坡度 > 25° 时,地震烈度在 VII 度以上时,岸坡失稳破坏现象比较普遍。此外,降雨也是岸坡失稳的主要诱发因素之一。

在三条河流中,大渡河斜尔尔库区降雨量最大,

暴雨较多,降雨集中,库岸滑坡和崩塌较为严重。主要滑坡有:麻尔曲左岸赛嘎尔沟口滑坡,体积约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$;阿柯河右岸阿华滑坡,滑体约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,距坝址 50 km,由于距坝址较远,对坝体影响不大。雅砻江天然岸坡稳定条件较好,但在长须至仁青里岸坡多为斜交坡,极不稳定,其中俄木其可鸠贡马滑坡,体积近 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,距引水渠进口仅 1~2 km,对进口的稳定影响较大。通天河大部分河段岸坡较稳,不稳定岸坡主要有:高钦陇巴沟口滑坡,岩性为三叠纪砂、板岩,体积约 $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,距同家坝址 23 km,对坝体影响较大;它莫扎特滑坡为砂砾岩滑坡,体积约 $5\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,距坝址较远,但会造成水库淤积,减小库容。

由于高坝蓄水,受库水长期淹没浸润,部分岸坡岩土体抗剪强度降低,含水量及孔隙水压力增加,会破坏斜坡的稳定条件,引起滑坡和坍塌^[9]。1963-10-9 意大利 Vaiont 水库特大滑坡,引起 260 m 高的涌浪,翻过坝顶直扑下游 Longarone 小镇,致使 2600 人丧生,损失高达 6 亿美元。随着库水位的消落,因库水位下降引起的超孔隙水压力也常造成岸坡失稳滑动。此外,在部分岛状多年冻土和季节冻土区,冻融作用也将引起引水明渠岸坡失稳滑塌,堵塞渠道。隧道进出口的高边坡的稳定性也严重影响工程的顺利建设和运行。

3.3 高压涌水、高地温及岩爆

在西线调水工程中,大渡河、雅砻江及通天河的不同方案均采用长隧洞穿越江河分水岭,隧洞长在 47.5~288 km 之间,其中最长的隧洞达 73 km,均属特长隧洞。这些隧洞埋深大,将穿越不同的地质单元,无法避开活断裂的影响,深埋长隧洞施工中将遇到高地温、高压涌水、高地应力和岩爆等灾害^[10]。其中,断层带涌水、碎屑流及软岩问题较为突出,高地温及岩爆问题也不容忽视。

地下水是影响围岩和洞室安全的重要因素。引水洞线区基岩主要为砂岩、板岩及其组合的韵律互层,砂岩中裂隙较发育,富水性中等,为透水(含水)层;板岩裂隙不发育,为相对隔水层。洞线区赋存的松散岩类孔隙水、冻结层上水和风化带网状基岩裂隙水,因洞室埋藏深,对围岩影响轻微,但构造裂隙水影响较严重。由于引水区断裂构造发育,第四纪活动断裂多,在背、向斜轴部地带岩体破碎、裂隙发育,有利于地下水的富集、运移。同时引水线路经过地区要穿越大量水系,仅大渡河引水线路就要超过

18 个支流河道,而河流多沿断裂发育,地下水和地表水联系紧密,补给充分。因此,地下洞室的开挖必将成为一些地下水富集廊道,在较高动、静水压力作用下,将出现高压涌水及碎屑流灾害,使断层破碎带内充填物和褶皱核部的破碎岩石涌出,酿成事故^[11]。

据调查勘探,西线调水区内的平均地温梯度在 $22^\circ\text{C}/\text{km}$,地温梯度高值区主要分布在清水河、达日久治、玉树及甘孜附近的马尼干戈~温拖等四地,其平均地温梯度达 $24\sim 26^\circ\text{C}/\text{km}$ 。通天河引水方案的隧洞将穿越清水河地热异常区,雅砻江引水方案的隧洞则要穿越达日~高久地区。清水河地区温泉分布较为集中,总体呈 NW 向展布,在解吾曲至札曲长 120 km、宽 30 km 范围内,有 12 个温泉(群),最高水温达 51°C 。达日地区尼吉委温泉水温为 49°C ,流量达 12 L/s ^[7]。温泉的存在说明深埋隧洞处地下有地热,这些高压高温地下热水不仅影响围岩稳定性,而且将严重危害隧洞洞室、施工设备和人员的安全。

西线工程引水隧洞均深埋于山体基岩内,上覆岩体厚度一般为 300~900 m,最大厚度达 1 500 m。隧洞围岩主要为三叠纪浅变质砂岩、板岩,局部为中生代花岗岩、花岗闪长岩,这些坚硬脆性岩体具备储存高能地应力的条件。据巴山地区中强地震的震源机制解译、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,本区现代构造应力场的最大主压应力轴方向总体呈 NE 向,约为 $\text{NE}53^\circ$;在 140~240 m 深度域内,水平主压应力占主导地位;浅表部位三轴应力测试结果 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为 8 MPa、3 MPa 和 2 MPa。巴山的希玛利多、桑日麻、赛尔根为一构造应力集中区,其应变能密度达 $3\,500 \text{ J/m}^2$,当隧洞埋深 1 000 m 时,水平挤压应力将高达 50 MPa,施工中将遇到岩爆灾害^[7]。

3.4 冻土

西线调水区处于青藏高原片状多年冻土向岛状多年冻土、季节冻土的过渡地带,冻土分布十分复杂,其中西部及西北部为片状多年冻土,向南部、东南部及东北部逐渐过渡到山地岛状多年冻土和季节冻土。多年冻土分布面积约 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,占调水区总面积的 60%,其多年冻土下界高程在 4 150~4 300 m,多年冻土上限在 0.9~2.0 m,最深达 7.21 m;季节冻土分布面积 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,占调水区总面积的 40%,主要分布在东南部的山间谷地^[12]。受

高寒气候影响, 每年的 9 月份开始冻结, 至翌年的 4 ~ 7 月份才开始解冻, 冻结期长达 7~ 10 月之久。

不同类型冻土对引水工程的危害方式和程度存在较大的差异, 季节冻土主要表现为冻胀和融陷危害, 而多年冻土主要表现为融沉下陷。冻土及其冻害对引水工程的地面建筑物部分影响较为严重, 而对地下隧洞几无影响。位于多年冻土区的引水工程主要有引水隧洞和抽水线路上的抽水泵站、输水管道、渡槽及壅水坝等。引水隧洞因其埋深较大, 远在多年冻土下限以下, 故冻土对洞身不会产生危害; 其余建筑物由于开挖冻土, 破坏冻土表层草甸, 导致多年冻土消失乃至退化, 从而对建筑物及基础产生融沉破坏^[13]。位于季节冻土区的引水工程主要有引水枢纽、引水隧洞进出口及抽水线路上的明渠扬水站、输水管道及配套工程, 如道路等, 冻胀破坏主要发生在冻结期, 融陷则发生在消融期。

多年来, 伴随调水区畜牧业和林业的发展, 冻土区的森林及植被遭受到不同程度的破坏。工程开工后, 工程建筑物附近的植被也将不复存在, 水库蓄水以后将使当地气候变暖, 从而改变了冻土区的水热条件, 必将导致多年冻土的急剧消融和退化^[14]。工程建成后, 工程区大面积的多年冻土将变成季节冻土, 故未来冻土对工程建筑物的破坏将主要是季节冻土引起的融陷和冻胀。此外, 蓄水后随地下水位的升高和冻土的消融, 库岸及明渠岸坡将产生热融滑塌、冻融泥流等灾害。

3.5 泥石流

西线调水区位于青藏高原东南部, 该区的泥石流虽不及西藏东南部、四川西南部、云南东北部及陕南、陇南等地那样严重, 但在调水区东部的雅砻江和大渡河流域也存在不同程度的泥石流灾害和较严重的水土流失问题, 其对引水区的危害主要表现为: 埋没、堵塞及冲毁大坝、抽水站厂房、隧洞进出口和引流明渠等地面建筑物。当大规模和特大规模泥石流发生时, 还可能引起涌浪、溃坝灾害, 给下游带来毁灭性的灾难。其携带的大量泥沙块石入库后, 也将引起泥沙淤积, 减少库容和调水量^[15]。

调水区东部的壤塘和阿坝年降水量达 700 mm, 每年 > 0.1 mm 的降水日数在 150 d 左右, 降水多集中在 5~ 9 月份, 降雨强度大, 暴雨较多; 该区断裂发育, 岩体中裂隙多, 板岩和千枚岩是最易发生泥石流的两类岩性, 其分布地段岩层松散破碎, 寒冻风化强烈, 滑塌发育, 松散固体物质较为丰富; 河谷两

岸的支沟岸坡陡峻, 多在 30°~ 50° 间, 沟床纵比降在 0.1~ 0.3 间, 流域内地形起伏变化大, 高差多在 1 000 m 以上, 为泥石流形成和发展提供了必要和充分的条件。雅砻江、大渡河流域及其邻近的岷江流域、金沙江流域泥石流灾害较为严重, 康定、泸定、甘孜、黑水、阿坝、茂县、南坪、黄龙等地都曾暴发过严重泥石流灾害, 危害水电、城镇、公路、农田和旅游景区的安全^[16]。同时, 由于修建引水工程建筑物, 将产生大量弃渣弃土, 如堆放不当, 在暴雨和地表径流冲刷下将演变成弃渣泥石流, 酿成人为灾害。此外, 大量开挖边坡, 破坏地表植被和松散土壤层, 除诱发坡面泥石流外, 也将产生严重水土流失。

除上述五大类地质灾害问题外, 工程实施后, 将使引水区及上、下游地区的区域小气候、水文、地下水、植被等发生一些改变, 破坏了原有的较为脆弱的生态平衡和环境, 也将诱发一些其他灾害。如伴随着调水河流下游流量的减少, 可能降低水流对河床堆积物的冲刷能力及对推移质的输送能力, 加速下游泥石流严重河段的淤积和堵塞, 对水生生物也将产生不可忽视的影响^[14]。

4 防灾建议

西线工程建设中遇到的地质灾害类型众多, 成因复杂。但由于西线工程尚处于工程规划阶段, 目前仅限于对整个工程影响较大的关键地质灾害问题的初步勘测和研究, 大规模、全面、系统的勘查、研究尚未开展。仅提出以下几点防灾建议:

1. 尽快开展调水区各类地质灾害的普查工作, 全面查清调水区内地质灾害的类型、分布特征、危害现状和程度及其对三期调水工程和引水方案的影响。在此基础上根据灾害的严重程度及其对工程的影响, 以及西线工程的规划, 制定具体的灾害勘测和研究计划, 并逐步实施。

2. 利用国内外各种先进的勘测技术和手段, 充分借鉴其他跨流域调水和三峡工程中的勘测经验和教训, 采用勘查、测试和模拟实验、数值模型试验相结合的方法, 必要时应建立专门的观测或监测站点, 广泛搜集基础资料, 以揭示各类地质灾害的形成原因和发育机制, 为防灾减灾提供科学的决策依据。

3. 针对西线工程中关键性的重大地质灾害难题, 如区域稳定性与水库诱发地震灾害、深埋长隧洞的高压涌水与碎屑流、高地温和岩爆灾害、多年冻土

和季节冻土的冻融及冻胀灾害,高边坡的稳定性以及大型、特大型滑坡和泥石流灾害等,应聘请国内外专门研究机构进行专题研究和技术攻关,研究具体的防治方案和措施,或制定特殊的施工方法和工程措施。

4. 加强调水工程与各类地质灾害相互作用研究。地质灾害不仅影响着调水方案以及工程建筑物的布置、结构形式、规模类型和施工方法,而且决定着建筑物的安全和正常使用;而工程的兴建又不可避免地产生一些新的环境问题和地质灾害。因此,加强二者相互作用研究,不仅能够有效防治或避免原生地质灾害,减少或消除其对工程的危害,而且能够减少或避免次生灾害的发生和发展,促进工程和环境的协调发展。

5. 加强各类地质灾害相互作用规律研究。各类地质灾害的成因机理虽然不尽相同,但在发育背景、条件许多方面还是相互有关联的,或互为因果,或成因相似,如水库诱发地震是库水的附加荷载、渗透水压力长期作用于某些活动或不活动断裂面形成的,通过对区域断裂活动、区域稳定性的研究,既可避免或减少水库诱发地震的发生,又可避免活动断裂和区域不稳定对坝体和其他建筑物造成危害

5 结论

南水北调西线工程是解决我国西北地区水资源短缺和黄河断流的根本途径,也是我国未来建设的最大水利工程。调水区内海拔高,气候寒冷,自然条件恶劣,地形起伏大,切割强烈,地质构造复杂,断裂褶皱发育,新构造运动和地震活动较强烈,为各类地质灾害的形成和发展提供了充分的条件。调水区内存在的主要地质灾害问题有水库诱发地震,库岸再造和岸坡变形引起的滑坡及崩塌灾害,多年冻土和季节冻土的冻融与冻胀灾害,泥石流灾害和严重水土流失、深埋长隧洞的高地温、高地应力岩爆、涌水及碎屑流灾害等。在地质灾害防治中,对工程影响较大和有难点的灾害应进行专门的研究和攻关,采用先进的勘测技术和手段,加强调水工程与各类地质灾害以及各类灾害相互作用关系的研究,避免或减少地质灾害的发生和发展,促进人类工程活动和环境的协调发展。

参考文献(References):

[1] People's Daily [N]. Dec. 28, 2002. [人民日报[N], 2002-12-28]

第一版.]

- [2] Li Guoying. Evaluation and Cognition on the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course [J]. *People's Yellow River*. 2001, 23(10): 1~ 3. [李国英. 对南水北调西线工程的认识和评价[J]. 人民黄河, 2001, 23(10): 1~ 3.]
- [3] An Introduction on the Project of Water Division from the South to the North Via the Western Course [A]. In: *The Proceedings on Engineering Geology Study of the Project of Water Division from the South to the North*. [C] Beijing: China Conservancy and Power Press. 2002, 179~ 180. [南水北调西线工程简介[A]. 见: 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, 179~ 180.]
- [4] Dai Jiayi. *The Qinghai-Tibetan Plateau Climatology* [M]. Beijing: Meteorology Press, 1990, 307~ 334. [戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990, 307~ 334.]
- [5] Gao Zhiding, Wang Yufeng. Hydrological and Meteorological Features of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course [J]. *People's Yellow River*. 2001, 23(10): 8~ 10. [高治定, 王玉峰. 南水北调西线工程调水区水文气象特征[J]. 人民黄河, 2001, 23(10): 8~ 10.]
- [6] Chengdu Institute of Geology and Minerals, Chinese Academy of Geology. *Geological Map of the Qinghai-Tibetan Plateau and Neighbored Regions (1: 1500000)* [M]. Beijing: Geological Press. 1986. [中国地质科学院成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图 1: 1500000(说明书)[M]. 北京: 地质出版社, 1986.]
- [7] Lu Xinjing. The Main Engineering Geologic Problems on the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course [A]. In: *The Proceedings on Engineering Geology Study of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course* [C]. Beijing: China Conservancy and Power Press. 2002, 181~ 191. [路新景. 南水北调西线工程主要工程地质问题综述[A]. 见: 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.]
- [8] The Yangtze River Committee. *Study on Engineering Geology of Three Gorges* [M]. Wuhan: Hubei Sciences and Technology Press, 1997, 79~ 126. [长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997, 79~ 126.]
- [9] Du Ronghuan, Liu Xinmin, Yuan Jianmo *et al.* A Study on Landslide and Debris Flow in the Reservoir Area of the Three Gorges Project [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990, 25~ 44. [杜榕桓, 刘新民, 袁建模, 等. 长江三峡库区滑坡与泥石流研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990, 25~ 44.]
- [10] Chen Chengzong, Wang Shichun. Tunnels Geologic Disasters and Their Mitigation Countermeasures [J]. *Journal of Tunnel and Underground Engineering*, 1991, 12(3): 1~ 5. [陈成宗, 王石春. 隧道地质灾害与防治对策[J]. 隧道及地下工程, 1991, 12(3): 1~ 5.]
- [11] Shi Shouliang, Zhang Hui, Yang Wei. Engineering Geologic Hazards and Their Mitigation on Xiejia Water Division Scheme of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course [A]. In: *The Proceedings on Engineering Geology Study of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course* [C]. Beijing: China Conservancy and Power Press. 2002, 181~ 191.

- er Press. 2002, 203~ 207. [石守亮, 张辉, 杨伟. 南水北调西线工程斜贾调水方案工程地质灾害及防治措施[A]. 见: 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, 203~ 207.]
- [12] Zhang Changqing, Zhu Linnan. Frozen Ground and Engineering in the Area of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 1993, **15**(1): 90~ 95. [张长庆, 朱林楠. 中国南水北调西线工程地区的冻土与工程[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 90~ 95.]
- [13] Chen Shutao, Shi Shouliang, Qin Jianpu. Environment Geologic Problems in the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course [J]. *People's Yellow River*. 1999, **21**(10): 29~ 30. [陈书涛, 石守亮, 秦建普. 南水北调西线工程环境地质问题分析[J]. 人民黄河, 1999, **21**(10): 29~ 30.]
- [14] Shang Yuming, Ding Zixian, Tong Haihong. An Analyzing of Influences on Eco-environments of the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course[J]. *People's Yellow River*, 2001, **23**(10): 21~ 23. [尚宇鸣, 丁自鲜, 董海鸿. 南水北调西线工程生态环境影响分析[J]. 人民黄河, 2001, **23**(10): 21~ 23.]
- [15] Ma Dongtao, Zhao Shangxue, Li Aidi. An Approach on Debris Flow in Reservoir Areas[A]. In: The Proceedings of the 4th National Symposium on Debris Flow [C]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1994, 125~ 131. [马东涛, 赵尚学, 李爱弟. 试论库区泥石流[A]. 见: 第四届全国泥石流学术讨论会论文集[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1994, 125~ 131.]
- [16] Li Deji. Debris Flow Mitigation Theories and Practices[M]. Beijing: Sciences Press, 1997, 3~ 8. [李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 3~ 8.]

Geological Hazards in the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course, China

MA Dong-tao¹, CUI Peng¹, CHEN Shutao², SHANG Yuming², TU Jianjun¹ and CHEN Jie¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Reconnaissance, Planning, Design and Researching Institute, Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Conservancy, Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: Located in south-east of the Qinghai-Tibetan Plateau, the Project of Water Division from the South to the North via the Western Course is planned to divert 17 billions m³ of water from Tongtianhe River, the upper reach of Yangtze River, and its branches Yalongjiang River and Daduhe River, and deliver the water via the tunnels across the watershed ridge of Bayankala Mountain to the upper Yellow River so as to solve the serious shortage of water source in northwestern region of China. Which is planed in 3 construction stages and will be finished at the year of 2050, it will become the greatest water division project in the world. Based on analyzing the environmental background such as meteorology, hydrology, geomorphology, geology and Neo-tectonics etc., the geologic hazards during construction of the Project in Western Course are discussed in the paper, which are earthquakes triggered by reservoirs, landslides and collapses of bank slope caused by cutting and reservoir water, freezing, thawing and frost-susceptibility of permafrost and seasonal frozen ground, debris flow hazards and serious water and soil erosions, and the high ground temperature, high ground stress and rock explosion, high pressure drained water and fault belt debris flow inner deep-seated long tunnels et al. Five mitigation countermeasures are suggested according to surveying, prospecting and study situation of the Project. Most of all, some professional studies such as the inter-relationship between different geological hazards and divisional engineering should be carried out for reducing and comprehensively controlling hazards, and promoting coordinate development of human engineering activities and environment.

Key words: the Project of Water Division from the South to the North, the Western Course, geologic hazards, formational background, causes; hazards mitigating suggestion