

南水北调西线工程岩石力学 与工程地质探索

王学潮 伍法权 主编



科学出版社

www.sciencep.com

南水北调西线工程岩石力学 与工程地质探索

王学潮 伍法权 主编

国家自然科学基金“中国西部环境与生态科学”计划项目(90302011)

国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412701)

联合资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

南水北调西线工程是从青藏高原的大渡河、雅砻江、通天河向黄河流域中上游地区调水,工程区交通极其困难,地表覆盖严重,地层褶皱强烈,工作范围大,目前尚无深埋长隧洞工程勘察的成功实例可供借鉴。本书系统论述了南水北调西线工程建设中遇到的有关技术难题,对工程的实施有较大的指导意义和经济意义,对于推动地下工程建设有一定的作用,全书分为工程地质与水文地质、岩石力学与工程、山地灾害与岸坡变形、勘察技术与数据库建设四个部分。

本书可供从事地质、水利工作的工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调西线工程岩石力学与工程地质探索/王学潮,伍法权主编. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018544-0

I. 南… II. ①王…②伍… III. ①南水北调—水利工程—岩石力学—研究②南水北调—水利工程—工程地质—研究 IV. TV68 P642.42

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第018854号

责任编辑:张颖兵/责任校对:张琪

责任印制:高嵘

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉大学出版社印刷总厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2007年2月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—1 000 字数:491 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

南水北调西线工程是我国特大型跨流域调水工程，也是世界上关注的特大型水利工程。由于工程位于地质条件相对复杂的青藏高原，具有特殊的地理条件，工程区高寒缺氧，交通不便，独特的高原气候给引水隧洞施工带来了艰巨性和技术复杂性，几乎各种不良地质问题都可能遇到，工程实施还存在一系列的困难，因此，工程技术界非常关注南水北调西线工程的建设 and 论证情况。

南水北调西线工程从 1952 年就开始了规划论证工作，范围涉及通天河、金沙江、雅砻江、大渡河等广大地区，经历了超前期、规划期两个大的阶段，共研究了抽水和自流等共 200 多个方案，取得了大量地形、地质、地震、水文、气象、社会经济、生态环境等基础资料。尤其是从 2001 年进入项目建议书阶段以来，对工程建设的可行性开展了系统的论证工作，国内外的一些科研单位和高等院校、相关单位参加了西线工程的科研工作，取得了大量的有价值的科研成果，为该工程的科学论证决策提供了可靠的依据。

2005 年 9 月 12~14 日，中国岩石力学与工程学会联合有关单位组织了“南水北调西线工程深埋、长大隧道关键技术及掘进机应用研讨会”，针对西线工程深埋隧道的勘测、设计、施工等关键技术问题进行了热烈讨论。与会专家认为，南水北调西线工程是一个异常复杂的系统工程，其中有不少重大技术问题，特别是在高原缺氧地区建设数百公里的深埋长大输水隧洞，具有极大的挑战性。但就当前的技术水平而言，通过加强勘测，深入研究，精心设计，合理选择施工方案，科学管理，西线深埋长大输水隧洞工程是完全能够实现的。

这本文集是近年来南水北调西线工程有关岩石力学和工程地质科研工作的最新成果，内容包括工程地质、水文地质、岩石力学、山地灾害评估、勘查技术等方面。应该说，南水北调西线工程给岩石力学学科的发展提供了一个平台，而有关科研成果也将为该工程的实施提供技术支撑。相信本书的出版将为国内外的同行提供一个互相交流学习的机会，也是国内外同仁了解西线工程的有效途径。希望参加西线工程相关研究的学者和广大技术人员，克服困难，勇敢探索，把这一惠及民族的工作做好，为我国岩石力学事业的发展贡献一份力量。

国际岩石力学学会副主席
中国岩石力学与工程学会理事长
中国工程院院士



2007 年 1 月 12 日

前 言

南水北调西线工程是从青藏高原的大渡河、雅砻江、通天河向黄河流域上中游地区调水的大型水利工程。工程区交通极其困难，地表覆盖严重，地层褶皱强烈，工作范围大。长期以来，由于我国生产力布局的不平衡和经济社会发展对这一地区没有提出迫切的开发要求，有些方面的地质工作几乎还是空白。南水北调西线工程的地质和研究任务相当繁重。

与南水北调工程的东线和中线相比，西线调水区域地理位置较高，海拔 3000~4500m，高寒缺氧，交通不便，人烟稀少，因而工作条件非常艰苦，地质条件也非常复杂。从 1952 年起，水利部黄河水利委员会就对西线调水进行了大量的工作，1952 年组织查勘了通天河引水入黄河的线路，20 世纪 50 年代末到 60 年代初进行了大规模的调水查勘，1978~1985 年，又组织了四次西线调水查勘。1996 年上半年水利部黄委会勘测规划设计研究院完成了《南水北调西线工程规划研究综合报告》，回答了调水的可能性和合理性问题，并于 1996 年下半年开始了规划阶段的工作。1996~2000 年，水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院在调水工程区开展了大量的勘察工作，提出《南水北调西线工程规划意见》。2001 年 5 月份，水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院在以往工作的基础上提出了《南水北调西线工程规划纲要及第一期工程规划》，并正式通过了水利部的审查，肯定了从通天河、雅砻江、大渡河调水的工程布局，明确了调水范围、供水目标和开发次序。

在南水北调西线工程的研究中，自始至终采取可开放的研究方式，国内外众多科研单位和大学参与了西线工程的论证和研究工作。本书就是关于南水北调西线工程有关地质和岩石力学等方面研究成果的集成，对南水北调西线工程的工程地质和岩石力学问题进行了综合研究，涉及西线工程深埋隧洞的围岩分类、岩爆问题、围岩变形分析计算、应力场模拟与反演、构造活动性及其评价、岸坡稳定性、山地灾害、水文地质特征、TBM 施工的适应性等，全面深入探讨了西线工程的工程地质特征和岩石力学问题，是我国目前关于西线工程最新的研究成果，论证了工程区具备修建大型水利工程的客观条件。本书系统论述了南水北调西线工程建设中遇到的有关技术难题，对工程的实施有较大的指导意义和经济意义，对于推动地下工程的建设有一定的作用。

随着南水北调西线工程研究的深入，会有越来越多的问题和难题需要解决，也会有越来越多的成果涌现，本书的出版只是一个尝试，也是对过去研究成果的总结；今后，会有更多关于西线的研究成果出版。本书的出版得到了黄河勘测规划设计有限公司的大力支持，得到了景来红教授级高级工程师的技术指导。本书由王学潮统一审查定稿，齐菊梅参加了全书的编辑工作。

由于水平所限，书中还存在一些缺点和不足，希望读者批评指正。

目 录

序 前言

工程地质与水文地质

南水北调西线一期工程的地质条件和隧洞地质问题	王学潮	3
南水北调西线一期工程区地层岩性特征	谢启兴 何跃福 陈明 何文劲	10
南水北调西线一期工程区地质构造初步研究	文锦明 苏画 陈明 秦宇龙	19
南水北调西线一期工程区断裂构造的遥感地质解译	魏永明 王学潮 蔺启忠	33
南水北调西线一期工程区断层特征及其活动性	伍法权 黄志全 金维浚 柴建峰 陶波	41
南水北调西线一期工程区主要断裂特征及其工程地质问题	张辉 刘振红 张绍民	55
南水北调西线工程区的活动构造与输水隧洞的地震安全性	冉勇康 王学潮 李建彪 闵伟 韩竹军 陈立春	63
南水北调西线一期工程区断层的工程效应分析	伍法权 黄志全 金维浚 柴建峰 陶波	73
南水北调西线一期工程深埋长隧洞岩爆预测综合研究	石守亮 王学潮 刘振红 张辉	82
基于 TBM 施工的南水北调西线工程围岩分类探讨	王学潮 刘振红 温庆博	89
南水北调西线工程岩石碎屑粒度与石英含量规律研究	吴中伟 王宝成 刘孔凡	99
高原非岩溶山区地下水径流模数的确定方法	王媛 李冬田	110
南水北调西线一期工程区水文地球化学特征研究	王建平 宗国庆 谢洪毅	117
示踪测渗技术在南水北调西线工程中的应用	陈亮 陈建生 樊哲超	121

岩石力学与工程

南水北调西线工程砂岩的可钻性评价	王思敬 温庆博	129
南水北调西线第一期工程引水隧洞设计	杨维九 李治明 郑春洲	137
南水北调西线深埋长隧洞开挖方案研究	汪雪英 尹德文 陈友平	142
南水北调西线工程区隧洞 TBM 施工可行性研究	王泉伟 王学潮 郭卫新 孙万里	153
南水北调西线工程岩体基本力学特性研究	王宝成 袁兆华 杜建中	159
TBM 工法的有关岩石力学问题	许博 周宏伟 谢和平	162
南水北调西线一期工程地应力现场实验及反演分析	李海波 刘汉东 罗超文 刘亚群 王四巍	169
南水北调西线一期工程玛柯河—克曲间隧洞衬砌外水压力研究	赵大洲 邢建营	177
板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究	杨春和 冒海军 王学潮 黄小兰	182
岩石点荷载试验和 TBM 破岩机理的对比研究	岳永峰	195
南水北调西线深埋大隧洞围岩变形分析预测	汪雪英 尹贻 蓝祖秀	199
南水北调西线工程深埋长隧洞岩体预测模型(Q _{TBM})应用探索	刘振红 王学潮 张绍民	204

山地灾害与岸坡变形

南水北调西线一期工程主要山地灾害问题基础研究		
------------------------	--	--

..... 欧国强 游 勇 王全才 刘希林 宋孟强 吕 娟 柳金峰	211
南水北调西线一期工程区主要山地灾害发生机制及时空分布规律	符新阁 217
南水北调西线工程区达曲各目弄巴沟泥石流及其防治对策	柳金峰 欧国强 游 勇 223
南水北调西线一期工程区泥石流流域地貌特征及自组织性	刘希林 吕学军 倪化勇 苏鹏程 229
泥石流发生规模预测及其对调水工程影响评估方法研究	欧国强 游 勇 吕 娟 柳金峰 234
南水北调西线一期工程区边坡变形破坏特征分析及防治措施	秦建甫 屈 龙 李国权 238
岩质边坡长期稳定问题的一些探讨	王全才 王兰生 何思明 丁 瑜 曾 宇 243

勘察技术与数据库建设

南水北调西线工程深埋长隧洞勘察方法研究	李今朝 陈书涛 王泉伟 249
南水北调西线工程地球物理勘探技术应用探讨	齐菊梅 李广超 刘振红 毋光荣 253
甚低频电磁法在南水北调西线工程洞线勘探中的应用	王光杰 王 若 底青云 257
南水北调西线阿柯河以东 20km 地球物理勘探电、磁法综合研究 .....	..... 王 若 底青云 王光杰 王妙月 石昆法 李英贤 安志国 安 勇 262
深埋长隧洞勘探孔施工技术	李保平 李勇泉 王 栋 王申旺 李世全 270
碳质板岩地层钻探取样工具的研制与应用	张玉宝 贾正海 杨裕恩 郭孟起 274
Excel、AutoCAD 配合全站仪在南水北调西线工程地质勘察中的应用	杨 伟 符新阁 278
3S 技术在南水北调西线工程区构造调查中的应用	李家存 282
南水北调西线工程综合基础数据库建设与开发	陶富岭 霍建伟 刘 尧 牛卫华 286
南水北调西线工程基础地理数据库建设与开发	韩明锋 高庆方 294
南水北调西线工程地质信息系统设计	侯清波 梁 红 刘 灏 299
隧洞围岩分类数据库系统建设	刘 灏 刘振红 304

岩 石 力 学

401 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 401
404 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 404
407 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 407
410 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 410
413 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 413
416 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 416
419 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 419
422 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 422
425 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 425
428 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 428
431 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 431
434 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 434
437 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 437
440 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 440
443 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 443
446 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 446
449 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 449
452 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 452
455 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 455
458 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 458
461 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 461
464 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 464
467 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 467
470 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 470
473 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 473
476 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 476
479 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 479
482 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 482
485 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 485
488 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 488
491 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 491
494 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 494
497 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 497
500 魏其前 冯国荣 平惠珍 .....	..... 魏其前 冯国荣 平惠珍 500

沉 变 岩 岩 石 力 学

501 魏其前 冯国荣 平惠珍 魏其前 冯国荣 平惠珍 501
-----------------------	-----------------------

工程地质与水文地质

南水北调西线一期工程地质条件和隧洞地质问题

王学潮

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南郑州 450003)

摘要: 南水北调西线一期工程的地质条件相对复杂, 深埋长隧洞存在着诸多复杂的工程地质问题。枢纽的建坝地质条件较好。隧洞区的主要岩石类型为三叠纪的砂岩和板岩。地球物理资料显示, 工程区具有稳定型地壳; 构造稳定性分析认为, 工程区不发育突发活动地段, 属于构造基本稳定型地区。

关键词: 南水北调西线工程 地质条件 深埋长隧洞

1 引言

南水北调西线工程第一期工程地处青藏高原东南部边缘地带, 位于四川省的甘孜县、色达县、壤塘县、阿坝县, 青海省班玛县和甘肃省玛曲县境内。第一期工程从雅砻江支流达曲、泥曲及大渡河支流色曲、杜柯河、玛柯河、克曲等支流建坝蓄水, 通过长距离输水隧洞将水直接引入黄河上游干流(图 1)。输水线路全长 255.93 km, 其中隧洞总长 252.6 km。受沿线河流和冲沟切割, 隧洞分为 7 个自然段, 自然分段最长为 72.3 km。输水隧洞施工拟采用以 TBM 为主、辅以钻爆法开挖的方案, 预制混凝土管片将作为输水隧洞主要的衬砌形式。

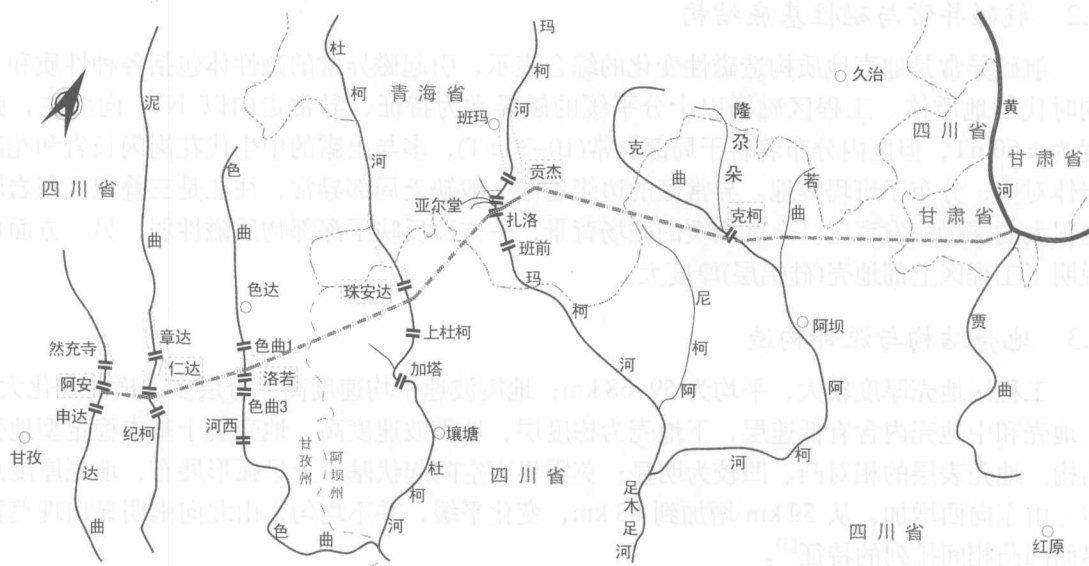


图 1 西线第一期工程平面布置图

南水北调西线工程区, 自然条件相对恶劣, 具有复杂的地形地貌、岩性和区域构造背景,

地质条件较为复杂^[1]。工程区主要出露的是沉积岩、火山岩及浅变质岩系,以中生代三叠纪浅变质碎屑岩为主,另有少量白垩纪火山岩、红色碎屑岩,局部偶出露有灰岩和岩浆岩。工程区岩石类型绝大部分是浅变质砂、板岩及其韵律层组合。西线工程区主体位于巴颜喀拉褶皱带,主要构造线方向呈 NW—NWW,部分地段向东出现弧形偏转。工程区内地震分布零星,强震相对较少,震级大多以中等地震为主,地震强度和频度相对较低,地震活动性相对较弱^[2]。

工程区地下水类型为松散岩类孔隙水与基岩裂隙水,松散岩类孔隙水主要分布在山间盆地、高原区和大型沟谷中的第四系松散堆积层中。基岩裂隙水可分为风化裂隙水和构造裂隙水;构造裂隙水区包括克曲以东的大部分地段(色达一带除外),含水岩组的岩性以浅变质砂岩、板岩为主,偶夹灰岩;风化带网状裂隙水分布限于高原丘陵区。

2 工程区地球物理场特征

2.1 布格重力异常

布格重力异常是地下不同密度界面的综合反映。西线工程区内布格重力异常值变化于 $(-310\sim 495) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,由西向东异常值基本上呈逐步增大的趋势。根据重力异常的幅值、梯度、异常形态和走向等方面的差异,工程区异常大致以东经 101° 经线为界,可以划分成东西两部分。东部地区,变化异常剧烈,幅值为 $(-310\sim -450) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,呈近南北向梯度带分布特征,最大梯度值可达每公里变化 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;由于受到近东西向构造的影响,重力等值线大致沿北纬 33° 方向发生定向弯曲。西部地区,异常变化平缓,局部异常发育,异常幅值为 $(-425\sim -495) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

2.2 航磁异常与磁性基底结构

航磁异常是地壳地质构造磁性变化的综合表示,引起磁异常的磁性体包括各种性质和不同时代的地质体。工程区磁场以十分平缓的磁异常为特征,异常走向以 NW 向为主,强度为 $\pm 50 \text{ nT}$,但区内分布着若干局部异常($10\sim 30 \text{ nT}$),多与出露的中生代花岗闪长岩和花岗岩体对应,分布于班玛等地。异常区的边缘地区一般缺乏局部异常,往往是三叠纪沉积岩厚度很大的深拗陷发育区。全区低缓的磁场背景,一方面反映了深部物质磁性弱,另一方面也说明了工程区上部地壳(硅铝层)厚度大。

2.3 地壳结构与深部构造

工程区地壳厚度较大,平均为 $59\sim 68 \text{ km}$;地震波速平均速度高、分层多、横向变化大,上地壳和中地壳内含有低速层,下地壳为梯度层,地震波速度高,地壳属于基本稳定型地壳结构。地壳表层的相对凸、凹较为明显;莫霍界面空间起伏基本上呈弧形展布,地壳厚度总体上由东向西增加,从 59 km 增加到 68 km ,变化平缓,并不均匀,由北向南明显出现莫霍界面凹凸相间排列的特征^[3]。

3 断裂活动性评价

西线工程区新构造运动相对较弱,主要表现为西高东低的掀斜式隆起,垂直差异运动不

甚明显,断裂活动幅度较小,活动断裂不发育。发育的断裂带有阿坝断裂带、亚尔堂断裂带、上杜柯断裂带、色达断裂带、达曲断裂带等。

3.1 阿坝断裂带

阿坝断裂带主要由阿坝北支断裂和阿坝南支断裂组成,其中,北支断裂又由阿坝盆地北缘断裂、盆中断裂、顺河断裂和盆地南缘断裂组成。

研究表明,阿坝南支断裂和北支的盆地南缘断裂都是晚更新世以来不活动的断裂;北支断裂的盆地北缘断裂、盆中断裂、顺河断裂,在晚更新世有过活动,都是以黏滑为主的活动断裂,三条活动断裂在未来 200 a 内发生地表位错事件的可能程度不同^[4]。

3.2 亚尔堂断裂带

该断裂带主要由宁它一灯塔和亚尔堂两条断裂组成,卫星影像及实地观察表明,断裂对地形地貌没有控制作用,断裂两侧地形没有高差,横切断裂的冲沟也没有水平位移。

宁它一灯塔断裂发育于三叠纪砂板岩中,沿断裂没有发现错断第四纪地层的剖面,多个断层剖面上覆盖在断层之上的第四系年代最年轻为晚更新世,因此,断裂至少从晚更新世以来已不活动。

亚尔堂断裂无论在大地貌还是微地貌上都没有显示,断层剖面上断层岩带固结坚硬,在断层上部覆盖的第四系没有发现被断错的迹象,断层岩样品测年结果也较老,说明该断裂第四纪中晚期已不活动,至少自晚更新世以来不再活动。

3.3 上杜柯断裂带

上杜柯断裂是桑日麻断裂东段的一部分。而桑日麻断裂中部的江基贡玛断裂在 1947 年发生过达日地震,震级为 7.75 级,属于全新世活动断裂。

上杜柯断裂带发育在上三叠统新都桥组薄层状的灰色、灰黑色绢云板岩,以及石英细砂岩中,未见与第四系松散沉积物的断层接触关系。尽管在断裂剖面上普遍发育十几米至几十米的构造带,但以断裂破碎带、构造透镜体带或片理化带为主,局部可见糜棱岩化现象,未见新鲜的错动面,断层物质基本上都是固结、岩化,最晚一次活动在中更新世中期以前。野外考察表明,沿断裂带分布的河流阶地堆积物平稳地覆盖在断裂带上,未见任何构造变动迹象,断裂对第四系地层分布没有控制作用。通过对断裂物质、断错地层、地质地貌和第四系沉积地层分布特征的综合分析,可以认为,上杜柯断裂带晚第四纪时期不活动。

3.4 色达断裂带

沿断裂带分布有晚白垩世-古近纪红盆,并且红盆沉积物均已变形。断裂带具有明显的左行走滑特征,控制了现代地貌的形成,沿断裂带形成许多后成谷地及断陷槽沟,并有线状泉水分布,断裂带两侧水系呈平行直线状,并在通过断裂时,具有明显的偏转。在航空影像上,该断裂带具有全新世活动特征。断层物质的热释光测年数据表明,该断裂在晚更新世中期曾经活动过;断层滑动方式的显微试验分析也表明断层的最新一次活动方式为黏滑,断层面平直,表明断层具有潜在的地震危险性。

3.5 达曲断裂带

达曲断裂带主要由一组 NNW 向断层组成,在地貌上形成了线性延伸的断层谷。根据其

基性岩脉沿断裂侵入、并被角砾岩化或片理化,后期又发育透镜体带的特点,可以看出这是一条具有多期活动的断裂构造带。所有通过断层的水系出现偏转,显示断层具有明显的活动性。断层物质的电子自旋共振年代表明断层最晚一次活动是在中更新世中期。根据综合地质构造、地貌、地层、断层活动方式和断层物质等方面的研究结果,可以认为达曲断裂不是一条晚第四纪时期活动断裂。

4 枢纽工程地质条件

引水坝段河谷多呈“V”形或浅“U”形,两岸天然岸坡基本稳定,建坝地形条件一般较好。坝区基岩均为砂岩、板岩,属中等坚硬~坚硬岩类,强度指标可满足建坝的一般技术要求。坝段岩层一般褶皱强烈,断层不甚发育。坝段均处于稳定区或基本稳定区,地震基本烈度为VI~VII度。

一期工程区各调水河流块石料丰富,储量、质量均满足规范要求;人工集料岩石力学指标满足规范要求,有少数集料可能存在碱活性问题。达曲的土料运距较远,天然砂砾石料部分指标不合格。泥曲缺乏土料,砂砾石料中,砂砾石含泥量高,质量较差,质量指标一般不满足规范要求。杜柯河建材种类齐全,质量、储量基本满足要求。玛柯河砂砾石料储量丰富,主要位于河谷上游的宽谷段,运距较远;土料除天然含水率偏高外,其余各项指标均满足规范要求,但运距较远,开采运输十分不便;块石料储量、质量满足要求,距坝址较近。克曲的砂砾石料和土料均位于坝址下游,运距较远,但质量、储量满足要求;坝址附近块石料丰富,质量、储量满足要求^[5]。

库区一般封闭条件较好,不存在向邻谷或洼地的永久渗漏问题。库区主要为牧区,人口稀少,无重要的城镇和工农业生产基地,有少量寺庙和宗教建筑物,矿产资源分布很少,水库淹没损失很小,不存在浸没问题。

工程引水枢纽均在多年冻土下限(4250 m)之下,属季节冻土区,冻土冻害和河谷岸坡变形破坏不致对工程造成重大危害。

5 隧洞沿线地质条件

隧洞方向大多与区域构造线方向呈大角度相交或近于垂直,隧洞围岩总体具有较好的应力状态,并且能以较短的距离穿越主要构造破碎带,有利于地下洞室的围岩稳定^[6]。另外,深埋隧洞的抗震性能较好,受冻土、滑坡、泥石流等不良外动力地质现象的影响较小。

5.1 达曲—泥曲

该段褶皱、断裂较发育,主要穿过两条较大断层,位于线路的中西部。主要工程地质问题有高烈度区的洞室抗震问题、断层及其影响带的围岩稳定问题、涌水问题等。可能存在问题的工程部位:①隧洞进口—夺多弄巴间,有两条规模较大的断层带,断层带间为如年各组地层,为构造混杂岩带,岩石裂隙密集发育,围岩稳定性差,特别是在断裂通过处,有可能形成较大的渗漏通道,地表水或浅层地下水有可能沿这些裂隙汇入洞室内,造成施工过程中的涌水问题;②穿越栖勒柯处为浅埋段(约100 m),受风化和地下水作用,岩体透水性较强,在施工时可能会产生涌水问题。

5.2 泥曲—杜柯河

沿线主要穿越塔子断层带、上杜柯断层带等规模较大的断层带,其中塔子断层带由4条NNW向断层及其分支组成,断层总体倾向北东,倾角 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,单条断层破碎带宽50~200m。断层带主要由强劈理化板岩、脉石英透镜体、砂岩透镜体等组成,局部可见炭化断层泥及擦痕、阶步,受断层影响,岩石十分破碎。断层两盘岩性以两河口组砂板岩为主,受断层作用,岩石节理、裂隙发育,常见石英脉充填。

主要工程地质问题是断层带围岩稳定问题、深埋洞段的高地应力与岩爆问题、浅埋段的涌水问题。可能存在问题的工程部位:①塔子断层带,主要发育有四条规模较大的断层,断层带宽在几十米到上百米,岩体破碎,围岩稳定性差且该段地表水、泉水(上升泉)、地下水丰富,在施工开挖后,可能会存在沿断层带及其影响带破碎岩体、节理裂隙密集带涌水问题;②线路穿越纪侧柯、色曲、乌基沟等洞段,埋深分别为70m、120m、150m,且有顺向(沟)断层通过,受风化和地下水作用,岩体透水性较强,在施工时可能会产生涌水问题;③色达和上杜柯附近向斜轴部,对于层状岩体、向斜轴部属于构造汇水部位,在节理裂隙、层间存在一定规模的地下水,在施工开挖后会沿向斜轴部产生涌水,对此应引起重视。

5.3 杜柯河—玛柯河

隧洞进口段穿越上杜柯断层带,该断层带是区内规模较大的断层之一,由多条NWW向断层组成,断层带宽3~4km,带内有大量燕山早期的中酸性脉岩侵入,大部分岩脉由于构造作用而以透镜体形式产出。断裂带总体由线性强应变带和相对弱应变域组成的一个复杂的网结状构造,次级断层密集发育,相互交切,断层带两侧发育有强劈理化带、构造透镜体带、板岩碳化带、节理破碎带、牵引褶皱带等,破碎带主要由构造微晶片岩、碎裂岩、角砾岩组成。

主要工程地质问题是:穿越断层破碎带存在围岩稳定、涌水、有害气体问题;软岩变形问题;进出口边坡稳定问题等。可能存在问题的工程部位:①隧洞进口段处于上杜柯断层带中,边坡稳定性差,岩体破碎,且该段地表水、泉水、地下水丰富,施工中可能出现进洞困难、围岩稳定性差及涌水问题;②上杜柯断层带内发育有大量的脉岩侵入体,在成岩过程中,可能封存大量的地下水或有害气体,对此应予以重视;③隧洞穿越尼柯、阿诗玛沟附近,有顺河断层通过,由于埋深较浅,受风化和地下水作用,岩体透水性较强,可能会产生围岩稳定和涌水问题;④隧洞出口段靠近亚尔堂断层带,岩体较破碎,存在边坡稳定和围岩稳定问题。

5.4 玛柯河—阿柯河

褶皱构造十分发育,轴线与区域构造线一致,呈北西—近东西—北西向弧形弯转展布,在中部偏转为近东西走向,褶皱形态以同斜倒转褶皱、斜歪褶皱、紧闭褶皱以及相似褶皱为主,以复式背斜和复式向斜的形式相间排列。

主要工程地质问题是:深埋洞段的高地应力问题;构造破碎带的围岩稳定问题;穿越向斜构造核部的涌水问题。

5.5 阿柯河—黄河

构造特征表现为构造线呈由北西—北东向偏转的弧形构造,为区域上红原弧形构造带西翼的一部分。线路穿越的阿坝断层带,由多条北西向断层及其分支断层复合组成,断层总体倾向北、北东,倾角 $40^{\circ}\sim 65^{\circ}$,单条断层破碎带宽 $20\sim 40\text{ m}$,最宽达 200 m ,断层结构分带主要表现为:强劈理化带、脉石英透镜体带,砂岩透镜体,局部炭化断层泥,但第四纪以来的活动标志不明显。区内褶皱构造十分发育,轴向呈北西—北东的弧形展布。

主要工程地质问题是:断层带及影响带围岩稳定问题;阿坝断层的活动性及处理问题;穿越向斜构造核部的涌水问题。

6 隧洞的主要工程地质问题

6.1 断层活动性对深埋隧洞的影响

西线工程区断裂近期活动的主要方式是左旋走滑兼有逆冲,这种活动方式对与之较大角度斜交的隧洞,可能产生与断层活动强度相当的错动变形,破坏隧洞的支护。

全新世以来的主要活动断层有阿坝断层带,位于阿柯河—黄河段的起始地段,包括阿坝盆地南北断层带,总计宽约 10 km ,与引水线路呈直角相交。其涌水、活动性值得关注。

全新世以来可能活动的主要断层主要是色达断层带,该断层带规模巨大,断层破碎带宽 $2\sim 3\text{ km}$;断层破碎带现今多表现为松散的炭化断层泥、碎裂角砾岩,挤压构造透镜体、斜冲及水平擦痕等。钻孔试验证明,地下 53 m 段仍为炭化明显的强风化断层泥,说明该带工程地质条件十分脆弱,易于垮塌,地表水易沿断层、裂隙对隧道充水,造成严重事故。

第四纪以来活动的主要断层有旦都—丘洛断裂带和上杜柯断裂带。前者主要由一组NNW向断层组成,断层带组合宽度为 $200\sim 1\,000\text{ m}$,发育有松散的构造角砾岩堆积物,胶结极差,所有通过断层的水系均出现偏转,显示断层具有明显的活动性。上杜柯断裂带由近10条NWW向、规模不一的断层所组成,断裂带宽 $3\sim 4\text{ km}$,区域延伸长超过 500 km ;该断层具有多期活动的特点,断裂带宽度较大,岩体变形较为强烈,结构破碎,可能引起围岩变形并形成地质灾害。

6.2 高地应力和岩爆

工程区线路所经过区域地质构造较复杂,地层岩性变化较大,初始地应力场分布也比较复杂,影响因素很多。围岩类别和岩爆有着直接关系,一般来讲,围岩类别越低(如II, III类围岩),岩体越完整致密,岩体结构多呈块、层状,岩爆越易发生;相反,高类别围岩往往是应力释放地段,发生岩爆的可能性较小,所以引水线路II~III类围岩洞段应考虑岩爆问题。线路洞室埋深大部分洞段大于 200 m ,且围岩以III类围岩为主,都有发生岩爆的可能,深度超过 $1\,000\text{ m}$ 时更应高度重视。由于围岩多为层状的砂岩和板岩,裂隙发育,裂隙水普遍存在,预测岩爆的强度为中等强度。

6.3 地下涌水

线路区赋存的松散岩类孔隙水、风化带网状基岩裂隙水等因洞室埋藏深,对围岩稳定影

响甚微,影响较大者主要为构造裂隙水。一期工程引水洞高于主要河流的河底,因此,尽管存在顺河断裂,但断裂主要沿支沟发育,地表补给源较小,易于工程处理。值得注意的是,隧洞出口附近部分洞段埋深不大,地表为河流源区的沼泽地貌,地表水丰富,可能存在涌水问题。

沿断裂带(包括断层影响带)的涌水和突水,是隧洞涌水的主要来源,特别是这些断裂带通过的沟谷浅埋段,是有突水危险的主要地段。除了大断裂带外,小断裂和紧密褶皱虚脱的转折端,特别是这些构造的交会处,也是不可忽视的地下水通道^[7]。

6.4 围岩的岩石力学特性

西线工程区的砂岩具有低孔隙率、致密等特点,在高侧压、地温及高渗透压力作用下,其强度及变形具有复杂的特点。在不同的温度条件下,砂岩的强度均与侧压成线性关系,侧压越高,其强度越高。低侧压时,强度随温度升高而增加,较高侧压时,强度随温度升高有降低的趋势^[8]。据预测,隧洞埋深处围岩的温度不会超过 60℃,因此,温度引起的岩石强度降低的可能性较小。试验结果表明,砂岩在持续高地应力和高温作用下,弹性模量变化不明显,但强度会有增大或减少的现象,在施工期需要注意这一现象。

板岩的强度具有明显的各向异性,但在长期应力作用下,其蠕变变形的比例很小。在地下水的长期作用下,板岩的强度明显降低,但弹性模量随吸水率的增加出现增大的趋势。因此,在隧洞的衬砌支护中,要考虑到板岩遇水强度降低的现象,但发生大变形的可能性较小。

7 结论

(1) 南水北调西线工程区的地质条件是适宜的,具有基本稳定的地壳类型,地球物理资料反映出地壳的物质组成比较均一,近场区活动断裂不发育,NW 向的褶皱和线性构造发育。

(2) 岩石类型主要为砂、板岩,隧洞围岩以 III 类围岩为主,次为 II 类围岩,局部为 IV 类围岩。除部分构造破碎带外,一般洞段岩体完整性较好。

参 考 文 献

- 1 王学潮,张辉,刘振红等.南水北调西线工程地质灾害初步研究[J].地球科学,2001,26(3):297~303
- 2 王学潮,陈书涛,张辉等.南水北调西线工程地质条件研究[M].郑州:黄河水利出版社,2005
- 3 张辉,王学潮,向宏发.南水北调西线一期工程区构造稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3656~3663
- 4 冉永康,李建彪,闵伟等.南水北调西线工程区及邻域的活动构造[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3664~3672
- 5 王学潮,杨维九,刘丰收.南水北调西线一期工程的工程地质和岩石力学问题[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3603~3613
- 6 王学潮,马国彦.南水北调西线工程及其主要工程地质问题[J].工程地质学报,2002,10(1):38~45
- 7 王媛,王学潮,王建平等.南水北调西线一期工程区水文地质条件评价[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3614~3619
- 8 周青春,李海波,杨春和等.南水北调西线一期工程砂岩温度、围压和水压耦合试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3639~3645

南水北调西线一期工程区地层岩性特征

谢启兴 何跃福 陈明 何文劲

(四川省地质矿产勘查开发局川西北地质队, 四川绵阳 621000)

摘要: 本文提出了南水北调西线一期工程区的地层区划方案, 认为属华南地层大区巴颜喀拉地层区玛多-马尔康地层分区的雅江小区和金川小区, 划分为 12 个组级正式地层单位。全区以广泛分布三叠纪西康群(巴颜喀拉山群)海相复理石沉积为特征, 其次有少量白垩纪、古近纪山间盆地陆相火山岩、红色磨拉石沉积及第四纪松散堆积物。对对应的组(段)地层岩性(古生物)特征进行了研究。

关键词: 南水北调西线一期工程区 地层区划分 地层岩石(古生物)组合

南水北调西线一期工程区主体位于四川省, 其地层单位系统采用四川省地层系统进行划分。工程区均属华南地层大区巴颜喀拉地层区玛多-马尔康地层分区范畴。以亚龙-罗柯断层为界, 可进一步划分为雅江小区和金川小区^[1](图 1)。全区共划分有 12 个组级正式地层单位, 见表 1; 全区以广泛分布三叠纪西康群(巴颜喀拉山群)海相复理石沉积为特征, 其次有少量白垩纪、古近纪山间盆地陆相火山岩^[2]、红色磨拉石沉积及第四纪松散堆积物。

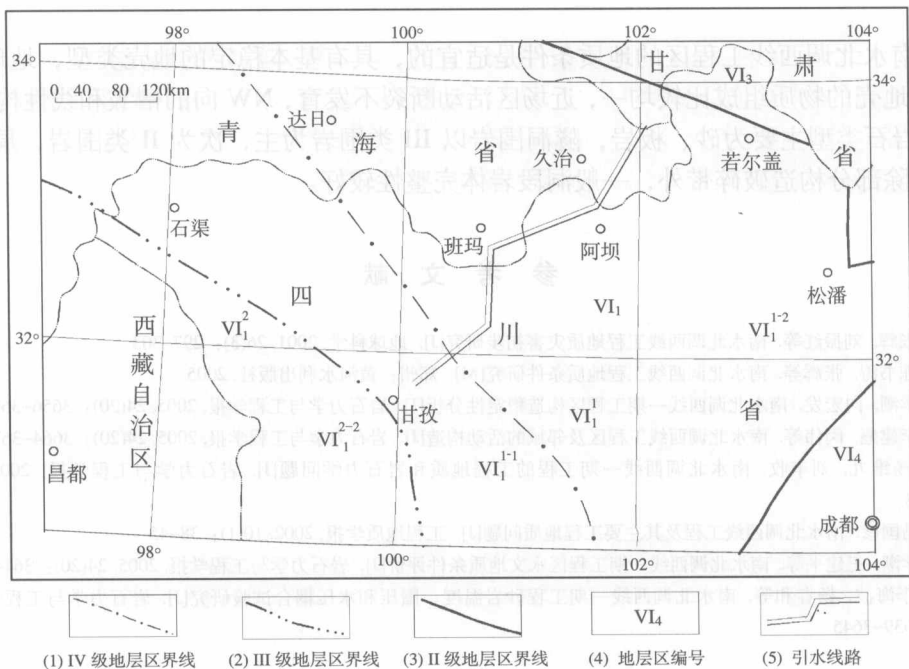


图 1 南水北调西线一期工程区地层分区图(据四川省岩石地层, 1997)

VI₁. 巴颜喀拉地层区; VI₃. 南秦岭-大别山地区; VI₄. 扬子地区;
VI₁¹. 玛多-马尔康地层分区; VI₁¹⁻¹. 雅江小区; VI₁¹⁻². 金川小区; VI₁². 玉树-中甸地层分区; VI₁²⁻². 稻城小区