

南水北调西线一期工程 地壳稳定性研究

彭 华 马秀敏 李金锁 李国歧 易明初 等著

地 震 出 版 社

南水北调西线一期工程 地壳稳定性研究

彭 华 马秀敏 李金锁 李国歧 易明初 等著

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

南水北调西线一期工程地壳稳定性研究/彭华等著. —北京: 地震出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-5028-3374-9

I. 南… II. 彭… III. 南水北调—水利工程—地壳—稳定性—研究

IV. TV68 P553

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 159729 号

地震版 XT200800162

南水北调西线一期工程地壳稳定性研究

彭华等著

责任编辑: 江 楚

责任校对: 庞娅萍

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 666 千字

印张: 26

印数: 001~800

书号: ISBN 978-7-5028-3374-9/P (4088)

定价: 65.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

序

“南水北调西线一期工程地壳稳定性研究”突出的是区域地壳稳定性问题。而区域地壳稳定性的基本概念及其理论与研究方法是在李四光的“安全岛”学术思想基础上逐步发展起来的。

在 20 世纪 60 年代，作为我国大后方的西南地区，要开展大量的厂矿、铁路、水电站以及民房建筑等建设，但由于这个地区强烈地震太多，安全问题显得尤为突出。一年的地震、活动断裂、新构造、地应力和地壳运动野外实践及大量的调查研究，在听取了地质力学研究所及相关的地震地质工作同志汇报后，李四光于 1965 年 12 月正式提出了“在裂震地区，找到比较稳定的地带或‘安全岛’”。

“安全岛”术语由此诞生。紧接着，李四光提到要找到有可能的“安全岛”必须经过三个步骤：首先，要查明地表活动性构造体系与地震的关系；第二，围绕活动断裂带进行精密大地测量和微量位移测量；第三，在获得上述两点资料的基础上，综合分析现今地应力分布情况和活动方式，明确它们与地震的关系，并确定震源之所在和它们的分布范围。

1965 年之后，经历了邢台地震和河源地震，李四光在总结地震预报工作经验的基础上再次提到了“在一些活动地带中，也是有相对安全的地区（又叫安全岛）”，进一步说明了目前在重点建设地区，关键在于在活动构造带中去找出相对稳定地块，并提供工程建设基地和场地。

李四光上述提到的“相对安全地区”中的“安全”，以及“相对稳定地块”中的“稳定”，均是“安全岛”术语的同义词，而且指示着按三个步骤在活动构造带去寻找。当然，这仅仅是受到了当时大后方建设地区的地质条件所限制的缘故。

随着国家建设的全面扩展，研究地域已经远远走出了局部的活动构造带，“安全岛”或“相对稳定地块”的大小已呈现出极为悬殊的差别，但确定“安全岛”的原则仍然是相同的。

之后的 40 年，李四光的“安全岛”学术思想得到大力的弘扬。谷德振 1961 年在南水北调西线考察中提到“有些地区是比较稳定的，有些地区是比较活动

的”；刘国昌于 1965 年在区域工程地质中提出的“对任何建筑都有影响的就是区域稳定性问题”；胡海涛于 1964~1965 年在关中黄土塬边滑坡研究中，运用地质力学方法，对黄土滑坡的结构、构造模式作了详细分析，并对稳定性进行计算评价。以上几位老前辈对稳定性问题的提出，再经相对稳定地块和区域地壳稳定性等基本概念的建立，相应理论及方法的形成，直至不断创新和发展经历了三个阶段，将“安全岛”理论和方法提高到了一个新的高度，而且与李四光倡导的地质力学理论与方法也更加紧密地结合在一起。比如：引用了李四光的块状“构造形体”的基本概念后，提出了“相对稳定块体”和“区域地壳稳定性”两个新的含义。“相对稳定块体”是指地质体介质相对均一、坚硬、连续、完整，构造、地震、岩浆和水热等活动微弱，以微弱的整体升降运动为主，地形高差微小，现今地应力值及形变值低以及区域不良物理地质不发育的块体。“区域地壳稳定性”是指工程建设地区的一定范围内，在内外动力（以内动力为主）的综合作用下，活动构造体系中的线状或带状构造及其所分割的块状形体（简称块体），在挽近和现今时期的地壳稳定程度，以及这种稳定程度与工程建筑物之间的相互作用和影响。这些理论与方法的创新，已经在四川大岗山、四川锦屏山、海南洋浦港和渭河盆地等重大工程地区得到广泛应用。

地处高海拔地区的南水北调西线工程，是解决我国北方严重缺水、实现我国长治久安、人民幸福安康的一项宏伟的、战略性极强的生命线工程。自毛泽东主席发出“南方水多、北方水少，如有可能，借点水来也是可以的”号召之后，50 多年来，许多相关科学家曾为此而奋斗，开展了大量的野外地质（包括地震地质和工程地质在内）调查，积累了丰富的资料。在区域稳定性方面，谷德振早在 1961 年就指出：“从本区的地质发展历史、大地构造特征、地貌景观、第四纪的断裂变形、强烈的自然地质现象、大断裂带的温泉分布与历史地震事实等资料反映出，引水地区的地壳活动性是非常突出的。但不同地区，活动的性质和强度是有很大的区别的。在空间分布上有些地区是比较稳定的，有些地区是比较活动的。”这是南水北调西线工程中首次提到地壳稳定性问题，而且着重要解决新构造活动、地震活动和地质构造等引起地壳不稳定的三大主因。

后来虽有不少相关部门先后参与该项工作，但多数对西线工程调查不完整、不系统，对区域稳定性的专门调查更是稀少，尽管青海地矿局第二水文工程地质队在 1987 年谈到了一些地壳稳定性评价研究，但也是极其粗浅的，根本没有涉

及到区域稳定性分区评价。

地质力学研究所在 2001 年接受了中国地质调查局下达的“南水北调西线一期工程地壳稳定性调查评价”任务。他们在总结前人工作的基础上，通过多年的野外实地调查和资料收集，特别在断裂活动、地震活动及与内动力有关的地质灾害等诸多方面，采用大量地质地貌、地球物理、古地震、地应力测量等主要手段，不仅丰富和加深了对地壳稳定程度的认识，而且通过地震危险性分析，预测了潜在震源区段、未来百年的地震趋势并探讨了引水枢纽水库诱发地震的可能性等，为引水工程的设计和施工提供了极其宝贵的基础资料。

引水工程地区的地壳稳定性综合评价正是在上述诸多因素基础上，以李四光“安全岛”学术思想为指导，采用数理统计分析和逻辑信息法，在全区划分出了不稳定、次不稳定、基本稳定和稳定等四种类型区，不仅为引水工程设计和施工提供了宝贵的基础资料，而且也成为该区研究历史中最全面、最系统、最深入和具有一定开创性价值的首例成果。

今年正值“安全岛”学术思想发表 40 周年，仅以此献给地质力学创始人——李四光先生。

易明初 教授

2005 年 12 月 18 日

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 研究基础及主要问题	(3)
1.3 研究工作概况	(4)
1.4 研究的主要进展	(5)
1.5 致谢	(13)
第2章 南水北调西线一期工程概况	(14)
2.1 南水北调西线工程概况	(14)
2.2 南水北调西线第一期工程概况	(14)
2.3 工程区位置与自然地理条件	(17)
第3章 工程区区域地质特征	(22)
3.1 地质构造演化	(23)
3.2 区域地球物理场特征和地壳深部结构特征	(34)
3.3 印度板块的碰撞和区域断块运动	(46)
3.4 区域地壳均衡调整状态	(49)
第4章 新构造活动特征	(52)
4.1 第四纪地层	(52)
4.2 新构造地貌	(54)
4.3 区域新构造运动特点	(63)
第5章 调水线路区岩土体工程地质评价	(69)
5.1 调水区域地质条件	(69)
5.2 调水工程区岩土体工程地质类型及特征	(70)
5.3 岩石物理力学性质测试	(73)
5.4 引水线路工程地质评价	(80)
第6章 调水线路区典型断裂活动性分析与研究	(112)
6.1 活动断裂的含义及运动方式	(112)
6.2 调水线路区活动断裂分布特征	(122)
6.3 甘孜-玉树活动断裂	(124)
6.4 鲜水河活动断裂带	(136)
6.5 当江-歇武-觉悟寺-甘孜断裂	(149)

6.6	长沙贡玛-大塘坝-然充寺断裂(达曲断裂)	(150)
6.7	下拉都-上红科活动断裂带(主峰断裂)	(150)
6.8	塔子乡断裂	(154)
6.9	丘洛-格底村断裂	(155)
6.10	昆仑山口-达日断裂带	(161)
6.11	灯塔断裂	(172)
6.12	亚尔堂断裂	(174)
6.13	甘德活动断裂带	(176)
6.14	阿坝盆地断裂	(181)
6.15	龙杂沟断裂	(195)
6.16	久治断裂	(196)
6.17	麦尔玛-查尔玛南北向张性断裂带	(196)
6.18	托索湖-玛沁-玛曲断裂	(197)
6.19	阿万仓断裂	(203)
6.20	工作区断裂活动性分级	(204)
6.21	活动断裂对调水隧道影响的评价	(214)
6.22	结论	(217)
第7章	工程区构造应力场分析	(219)
7.1	工程区构造应力场	(219)
7.2	区域构造应力场基本特征及其成因	(235)
7.3	工程区构造应力场模拟	(238)
第8章	典型深埋特长引水隧道工程区三维地应力场有限元分析	(244)
8.1	概述	(244)
8.2	三维地应力综合回归分析基本原理	(245)
8.3	建立三维有限元模型	(245)
8.4	隧道工程区三维构造应力场分析	(247)
8.5	隧道工程区地应力场分布规律	(250)
8.6	麻尔曲-阿柯河深埋特长隧道工程稳定性分析	(252)
第9章	工程区地震危险性分析	(261)
9.1	区域地震活动特征	(261)
9.2	调水工程区地震资料	(264)
9.3	区域震中分布特征	(268)
9.4	区域地震随深度的分布	(269)
9.5	历史地震对工程场地的影响	(270)
9.6	近区域地震活动性	(281)

9.7	工程区主要发震断裂区(带)特征	(282)
9.8	工程区地震危险性统计分析	(296)
9.9	未来百年地震趋势的评估	(300)
9.10	引水枢纽水库诱发地震讨论	(304)
第 10 章	工程区地质灾害调查	(324)
10.1	工程主要地质灾害	(324)
10.2	工程区地质灾害特征	(330)
10.3	典型地质灾害	(337)
10.4	地质灾害的形成条件	(341)
10.5	泥石流的发生机制	(348)
第 11 章	青藏高原地区大型水电工程区域稳定性分析	(351)
11.1	青藏高原地区大型水利水电工程分布	(352)
11.2	青藏高原典型电站稳定性分析	(358)
11.3	青藏高原地区水电工程主要工程地质问题	(369)
第 12 章	南水北调西线一期工程区地壳稳定性研究	(370)
12.1	区域稳定性研究的基础	(370)
12.2	地壳稳定性评价等级和分区的基本原则	(372)
12.3	影响区域稳定的主要因素	(374)
12.4	区域稳定性评价及稳定性分区	(386)
参考文献		(400)

第一章 引言

区域地壳稳定性评价就是研究地壳运动的现今活动状况与活动程度及其对工程产生的影响。它以地球内动力地质灾害为研究对象,研究内动力地质过程所产生的地质灾害对工程安全和区域稳定性的影响,内容包括活动断裂及其伴生的地震和与它相关的地质灾害。其研究目标是避开地震活动带、断层活动带及地质灾害多发带,减轻诱发地质灾害,寻找相对稳定区作为工程建设场地。

区域地壳稳定性评价是地质力学研究的基本内容之一,地质力学研究所很早就开展区域地壳稳定性研究,李四光教授倡导在活动构造带选择相对稳定地区作为工程建设基地或场址,并于 1965 年提出“安全岛”学术思想、地质力学及有关构造应力场的研究理论,为构造现今活动性、地震活动性和区域地壳稳定性定量化研究提供了理论依据。

地壳稳定性评价是大型工程前期规划要考虑的主要工作之一,大型工程建设应避开地壳活动地区,不能避让时,在区域地壳不稳定地区寻找相对稳定地块(安全岛),或根据活动构造带间歇性活动特点寻找工程使用期内(50~100 年)处于安全期(活动间歇期)的活动构造带中相对稳定地段。

本书内容反映了作者主持的中国地质调查局“南水北调西线一期工程区区域地壳稳定性评价”地调项目部分研究成果。本项目根据中国地质调查局的任务要求,以李四光“安全岛”学术思想为指导,进行了野外地质调查和大量的测年数据统计分析工作。在汇总前人大量资料的基础上,综合考虑多种内动力影响因素,将断层活动性分析、地震活动危险性分析、区域构造应力场分析和现今大地构造变形分析有机地结合在一起,应用数理统计分析和模糊数学方法,进行了南水北调西线沿线区域地壳稳定性定量评价。南水北调西线一期工程区区域地壳稳定性评价是地质力学在大型水利工程上成功应用的范例。

1.1 研究意义

南水北调西线一期工程是史无前例的巨型跨流域水利工程,调水线路穿越巴颜喀拉山脉,将沟通长江水系和黄河水系。工程总长度 321.08km,其中隧道长度将超过 300km,在国内、国际上都是史无前例的巨型跨流域水利工程,将人为改变我国西部水资源的状态,对我国西部乃至东部水文、生态环境地质条件产生较大影响,其工程的安全稳定性极为重要。

工程所在的西部川、青、甘高原区历史上以多发地质灾害而著称,崩塌、滑坡、泥石流等灾害频繁发生,同时也是灾害性地震的多发区。自 1783~1982 年的 200 年间,区内共发生破坏性地震 177 次,其中 8 级以上的地震有 6 次,多数属浅源地震,震源深度多在 15~20km,破坏性极强。引水线路穿越不同地质单元和活动性极强的断裂带、地震带,这些断裂运动速率较快、活动频繁,对工程将是一个严峻的考验。

调水区位于青藏高原东部,大地构造位置属于二级新构造单元巴颜喀拉地块的东部。总

体上,巴颜喀拉地块呈北西西向展布的长条形块体(图 1-1),块体四周被强烈活动的断裂带围限。北界为库塞湖-玛沁(东昆仑)断裂带,南界为玉树-甘孜-鲜水河断裂带,西界为阿尔金断裂带,东界为龙门山断裂带。前三者为左旋走滑断裂带,是青藏断块区内走滑速率最高的断裂带,平均走滑速率大于 10mm/a,也是大地震频繁发生的构造带,2001 年昆仑山 8.1 级和 1973 年炉霍 7.9 级地震都发生在这些断裂带上;后者为强烈活动的以逆冲-推覆为特征的断裂带,也是中国大陆内的强震发生带。巴颜喀拉地块的四周边界新构造活动非常强烈,是块体运动引发应力集中和释放能量的主要场所。巴颜喀拉块体内部,新构造活动相对较弱,主要表现为西南高东北低的一系列掀斜式抬升,垂直差异运动不甚明显,断裂活动幅度较小。地块内构造活动主要集中在几条断裂带上,如桑日麻断裂带在达日发生过 7³/₄ 级地震,鲜水河断裂在英达附近发生过 6 级地震,甘德断裂带于 1935 年 7 月 26 日和 1952 年 11 月 1 日两次在阿坝县西北的果洛山(年保玉则)发生 6 级的地震,壤塘东南一带频繁群发 4.0~5.5 级小震,这些地震的震害都波及调水线路。

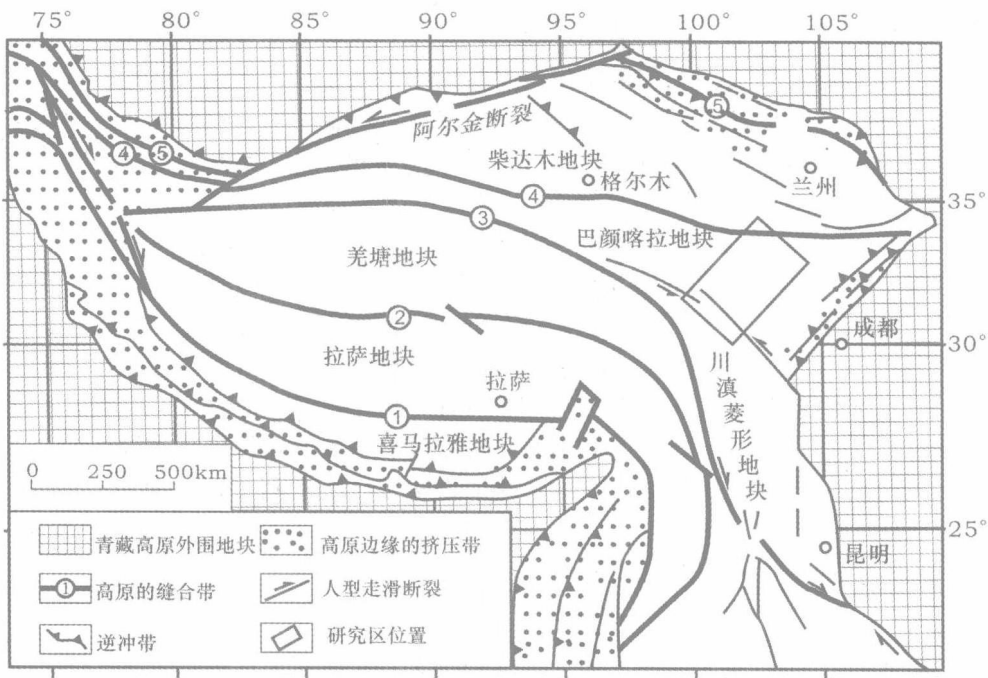


图 1-1 青藏高原构造简图与研究区位置图(据汪一鹏, 1998)

① 雅鲁藏布江缝合带; ② 班公湖-怒江缝合带; ③ 金沙江-红河断裂; ④ 东昆仑缝合带; ⑤ 西昆仑-祁连山缝合带

巴颜喀拉地块由多个地质结构不同、地质演化差异和由区域性断层分割的次级构造单元拼合组成,包括阿尼玛卿南亚带断拗带、北巴颜喀拉复向斜带、中巴颜喀拉断褶带、南巴颜喀拉复向斜带,引水隧道将穿越不同的地质单元和活动性极强的边界断裂,这些断裂运动速率较快,地震活动频繁,地震烈度大都在 VI~VII 度,局部 VIII~IX 度。由于西线调水工程的规模巨大,所处的工程地质环境极其复杂,使工程本身变得非常脆弱,安全性和可靠性大大降低。

影响工程安全与稳定的因素,除了包括气象、水文、水动力、地形地貌、土体介质条件、人类活动等主要因素外,由新构造活动、地震等内动力地质作用所决定的区域构造稳定性也是非常重要的内在控制因素,这一点往往被人们忽视。地壳组成与结构(包括组成它的地层建造、岩浆岩、变质岩及其结构和构造)及其内部的地应力状态(包括大小、方向和作用方式)是地壳稳定性的根本原因,地壳变形(包括形变、断裂)是地壳乃至岩石圈对地应力作用的反应,也是一个能量不断积累的过程,断层活动会释放能量,而地震是一种激烈、快速的能量释放过程。活动断裂的错断运动和地震活动是引起水利枢纽大坝和引水隧道破坏的关键因素,调水工程和相关建筑物的安全与稳定,是调水工程安全运营的基础,对流域下游人民生命财产安全至关重要,不仅直接关系着川西高原人民的生命财产安全,而且严重制约着黄河中上游受水地区经济带的长远发展。为此,需要对调水区的区域地质构造环境和区域稳定性有充分的认识和客观的评价。

1.2 研究基础及主要问题

西线调水工作区位于巴颜喀拉山东段,是四川、青海和甘肃三省交界地区,地质研究程度较低。目前全区已完成 1:20 万区测工作,青海省地矿局完成 1:100 万(玉树幅)地质调查,地质矿产部《三江矿产志》编委完成 1:100 万矿产图。

南水北调西线工程从 20 世纪 50 年代就开始规划。50 年来,水利部黄河水利委员会(简称“黄委会”)做了大量的调查研究工作,取得了丰硕成果,但目前工程仍然处于可行性研究阶段。自 20 世纪 50 年代以来,包括水利部在内的众多部委、省(市、区)和科研教育单位做了大量工作,围绕南水北调这一战略构想,开展了不同范围、不同层次的勘测、规划、研究和论证工作。经过数十年的研究,在 50 多个不同方案的基础上,经过长期研究比选,南水北调工程总体格局定为西、中、东三条线路,分别从长江流域上、中、下游调水。

早在 1952 年 8 月,黄委会进行黄河河源勘查时,就已初步勘查了南水北调西线工程从通天河引水入黄河的线路,编写了《黄河源及通天河引水入黄勘查报告》,这是新中国成立后第一次进行的有关南水北调西线的勘查。

1958~1961 年,黄委会金沙江引水查勘队和第一、四、七共 43 个勘测设计工作队,在南水北调西线调水区进行了大面积查勘,编写了《金沙江引水线路查勘报告》、《中国西部地区南水北调积(积石山)-柴(柴达木)、积(积石山)-洮(洮河)输水线路查勘报告》,并提出 4 条可供进一步比较研究的引水线路:

- ① 由金沙江玉树附近引水至积石山附近的贾曲入黄河,简称玉-积线;
- ② 由金沙江悉巴附近引水至甘肃境内的洮河,简称悉-洮线;
- ③ 由金沙江翁水河口引水到甘肃定西大营梁,简称翁-定线;
- ④ 由金沙江石鼓引水入渭河,简称石-渭线。

1978~1985 年,黄委会对南水北调西线进行了大量的查勘研究工作,综合研究了较为可行的自通天河、雅砻江、大渡河三条河上游引水至黄河上游的引水线路方案。

1987 年 7 月,国家计委正式下达通知,决定将南水北调西线工程列入“七五”超前期工作项目。水利部黄河水利委员会勘测规划设计院于 1989 年完成了《南水北调西线工程初步研

究报告》，1990 年完成了《雅砻江调水区工程地质勘察报告》，1992 年完成了南水北调西线《雅砻江调水工程规划研究报告》，1996 年完成了《南水北调西线工程规划研究综合报告》。2001 年 5 月，《南水北调西线工程规划纲要及第一期工程规划》审查通过。

在此期间，青海地质局、青海地震局、四川地质局和四川地震局也做了大量工作。青海地矿局于 1990 年完成《雅砻江调水区区域稳定性及工程地质评价报告》，1993 年完成《南水北调西线工程规划区地质图及地质构造图说明书》、《南水北调西线工程规划区地球物理解释区域稳定性评价报告》和《南水北调西线工程规划区遥感解译区域稳定性评价报告》。

中科院自然资源综合考察委员会于 20 世纪 50~60 年代也先后派出大批科学综合考察队伍赴南水北调西线地区进行各项综合考察，为南水北调西线工程收集了大批资料。中国地震局地质研究所于 2002 年完成《南水北调西线一期工程区 2001~2002 年度断裂活动性鉴定报告》，中国科学院遥感应用研究所和中国科学院地质与地球物理研究所于 2002 年完成《南水北调西线工程区活动断层遥感解译研究总结报告》。

中国地质科学院地质力学研究所在 20 世纪 70~80 年代就开展了南水北调西线工程的研究工作，尤其是在调水区的区域地壳稳定性研究方面，取得了一定的进展。多年来，地质力学研究所一直在青藏高原和黄河上游地区开展调查研究工作，曾经参加过黄河流域环境地质系列图件编制，李家峡水电站、黄河小浪底水电站等重大工程的地质研究工作，积累了丰富的资料。并于 2005 年完成中国地质调查局项目《南水北调西线第一期工程区地壳稳定性调查评价》报告。

南水北调西线工程前期已经作了大量的工作，工作重点集中在调水线路的选择上，积累了丰富的资料。有关地质灾害方面的工作也主要集中在地震、活动断裂方面。但是，在调水线路新构造活动、工程稳定性评价研究等方面工作不多。

由于地质过程的复杂性和人们认知的局限性，作者在大量参阅前人研究成果的基础上，在研究地壳稳定性时主要依据活动断层、地震、温泉和地应力等因素，包括岩石性质、岩层组构、地壳结构、深部构造和深部地球物理场等其他地质因素，其他地质因素因缺乏资料，在本次构造活动性和地壳稳定性定量评判中加以考虑，但影响构造活动性和地壳稳定性的因素远不止这些，对评价结果会产生一定影响，有待今后进一步改进方法，深入研究，提高地壳稳定性评价的水平和精度。

1.3 研究工作概况

1.3.1 工作思路与设想

项目的主要工作思路与设想：采用以现场地面地质调查为主，物探为辅的工作思路，运用遥感解译、地应力测量、构造应力场模拟、高精度测年等多学科相结合进行综合研究的技术路线。通过遥感技术调查研究新构造活动和地质灾害在区域面上的分布规律与活动特征；通过野外实际调查以及断裂槽探剖面分析，揭示新构造活动和地质灾害的精细特征及其在时间上的演化过程；通过高精度测年技术确定新构造活动的时间序列；利用地应力测量技术获得新构造活动动力学的实测数据，并在地应力测量的基础上进行构造应力场模拟，研究构造活动的动力学特征。在上述研究基础上，进行区域构造稳定性综合评价和地质灾害风险评估。

1.3.2 研究内容和技术方法

(1) 西线调水区遥感解译。

运用 ETM⁺ 卫星影像数据, 调查西线调水区活动断裂的展布、运动方式和方向。

(2) 活动断裂研究和地质灾害调查。

通过地面实际调查, 运用浅层地震勘测、电法勘测、氦气测量等地球物理方法, 调查西线调水区活动断裂的深部状态、软弱岩层的深部延伸; 研究活动断裂分段性、活动方式、活动周期及活动速率; 调查重大崩塌、滑坡、泥石流、冻融等地质灾害的分布、活动规律, 评价其对未来调水工程的危害。

(3) 地震危险性分析。

在近场区地震地质调查的基础上, 进行地震活动性参数确定、地震区带和潜在震源区划分。根据烈度衰减规律计算场地烈度, 采用多因素统计方法进行地震危险性分析。

(4) 现今地应力测量和三维应力场模拟。

在南水北调西线一期工程沿线重点地段进行地应力测量, 模拟典型深埋长隧洞的三维应力场, 分析深埋隧道围岩稳定性。

(5) 区域稳定性评价和地质灾害危险性评估。

综合研究新构造活动和地质灾害影响, 进行调水区区域稳定性评价和地质灾害危险性评估。

1.3.3 人员组成与分工

全书共分十一章, 全文由彭华执笔编写, 最后由马秀敏、彭华负责统编成稿, 插图由马秀敏、李国岐清绘, 附图由马秀敏清绘, 排版由马秀敏负责。

参加研究工作的主要人员组成与分工有: 彭华为项目总负责, 负责项目地质综合研究; 马秀敏参与活动断裂与地质灾害; 李金锁参与新构造与地质灾害; 李国岐参与综合物探; 姜景捷参与数据处理; 彭立国参与地应力测量; 王连捷和易明初作为技术顾问对项目技术指导。

1.4 研究的主要进展

南水北调西线第一期工程区地质背景复杂, 环境条件恶劣, 项目组在大量资料分析、研究的基础上, 通过线路地质调查和工作区内 ETM⁺ 卫星影像活动断裂遥感解译, 开展了调水沿线带状地质填图和地质灾害调查。在研究区, 对区域 16 条大型断裂和 23 条近场区断裂的关键构造部位进行了探槽揭露; 采用浅层地震反射法、直流联合剖面法、电测深法、测氦法等物探技术和年代学测试分析, 进行断裂活动性鉴定; 对重点区内活动断裂的结构组成、空间产状、活动时代、运动速度、地震活动性等影响工程的断裂特征进行了研究与评价; 系统研究了调水沿线断层活动的分布及其活动特征, 划分出 5 条对工程影响较大的 AA 级活动断裂; 综合评价主要活动断裂对调水隧道的影响, 并对断裂在工程有效期内未来 200 年位移量进行预测。在历史地震统计分析的基础上, 对工程区进行了烈度区划; 在发震断裂研究的基础上, 进行了潜在震源区的划分, 并对未来地震发展趋势进行预测。通过现场地应力测量手

段，获得了线路隧洞和坝址等关键构造部位的地表应力状态，依据地应力测试结果对深埋长隧洞进行了岩爆预测。在系统测定工程区典型岩石力学性质及广泛的岩体工程调查的基础上，对水利枢纽水坝、库区进行了工程地质评价。应用先进的三维应力场数值模拟技术，计算重要输水隧道的构造应力场，并进行了隧道工程稳定性分析。应用模糊数学方法，综合考虑不同影响因素，进行了地壳稳定性定量评价和分区。

1.4.1 区域地质构造背景

工程区位于青藏高原东部，大地构造位置属于二级新构造单元昆仑-巴颜喀拉地块的东部。大地构造单元属于松潘-甘孜印支地槽褶皱系，该地槽褶皱系始于奥陶纪，三叠纪碎屑岩沉积厚度巨大，经历多次大幅度升降，结束于三叠纪末，地槽回返，形成了巨厚的层状浅变质砂-板岩。印支构造运动时期区域强烈水平挤压形成北西向的复式背、向斜构造和逆断层，是相对年青的地壳构造区。

工程区内主要构造线呈北西-北西西向，部分地段向东出现弧形偏转。褶皱构造十分发育，主要沿北西西向展布，一般形成复式背斜或向斜。在空间上，褶皱构造与断裂构造相伴产生，靠近断裂带的褶皱完整性多被破坏，形成褶-断式构造组合形式。

工程区地壳结构呈块裂结构，断裂构造分布具有丛集性和分带性特征，破碎程度较高的地块与相对完整的地块呈条块镶嵌状，反映了工程区基底构造的基本格架呈现块裂状、镶嵌状。地壳结构特点是地壳厚度较大，在 60~65km 之间，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，速度高，因此，从地壳结构来看，工程区地壳属于基本稳定型地壳结构。

1.4.2 新构造运动特征

南水北调西线工程区新构造运动十分强烈，新构造运动不仅在空间上具有明显的分区性，时间上也很不平衡。地壳垂直形变测量资料证明，几十年来，川西高原在不断上升。根据中国地震局大地测量资料，从道孚-炉霍-甘孜-马尼干戈测线显示，在 1973~1980 年间，马尼干戈相对于道孚上升了 40mm，总体倾向东。由此说明，几十年间本区地壳运动的总貌以继承性为主，新生性不明显。

巴颜喀拉地块为北西西向展布的长条形块体，块体四周被强烈活动的断裂带围限。北界为库塞湖-玛沁（东昆仑）断裂带，南界为玉树-甘孜-鲜水河断裂带，西界为阿尔金断裂带，东界为龙门山断裂带。前三者为左旋走滑断裂带，是青藏断块内走滑速率最高的断裂带，也是大地震频繁发生的构造带；后者为逆冲-推覆的强烈活动断裂带，也是中国大陆内部的强震发生带。巴颜喀拉地块四周边界的新构造活动非常强烈，是块体运动引发应力集中和释放能量的主要场所。地块内构造活动相对较弱，主要集中在几条断裂带上，如桑日麻断裂带在达日发生过 7³/₄ 级地震；鲜水河断裂在英达附近发生过 6 级地震；甘德断裂带于 1935 年 7 月 26 日和 1952 年 11 月 1 日在阿坝县西北的果洛山（年保玉则）共发生两次 6 级地震，这些地震的震害均波及调水线路。渐新世以来，由于印度板块由南向西向北东，相对欧亚板块不断俯冲碰撞，导致喜马拉雅运动，青藏高原相对于周边强烈隆升，区域普遍受到这场运动的影响和改造。随着青藏高原地壳的增厚和抬升，欧亚板块沿先存断裂发生地壳物质向东蠕散，从而形成有规则的断块运动，川青地块向东运动和川滇地块向东南挤出，地块边界的鲜水河-

甘孜-玉树断裂和昆仑山口-玛沁-玛曲断裂强烈左旋滑动,伴生强烈的地震活动,这种地壳不稳定现象严重威胁着调水工程的施工和运营安全。

工程区新构造运动主要表现为西南高、东北低的掀斜式抬升,垂直差异运动不甚明显,断裂活动幅度较小,新构造运动不仅在空间上具有明显的分区性,时间上也很不均衡。中新世-上新世时期,全区继承了构造运动的某些特点,地壳运动异常强烈,进一步加剧了区域升降运动,巴颜喀拉山和雀儿山断块强烈上升,若尔盖-红原盆地由不均匀沉降转为整体沉降,接受了巨厚的中新统、上新统沉积。早、中更新世,上升区继续上升遭受剥蚀,盆地区继续下降接受沉积,并且升降运动具有振荡式差异运动特点,上升区有短暂的下降,沉降区伴有短暂的上升。中更新世初,全区发生了一次区域性上升运动,致使早更新世与中更新世地层间形成明显的平行不整合接触。晚更新世以来,新构造运动仍然表现为差异性升降,但运动幅度和强度明显减弱。概括起来,新构造运动在时间上可划分 3 个阶段:晚第三纪升降运动异常强烈;早、中更新世升降运动显示出振荡式升降;晚更新世以来主要表现为微弱的差异升降运动。全新世以来的构造运动基本上继承了更新世的运动特点。河流阶地、河道变迁、水系发育等资料证明,以巴颜喀拉山为界,北部若尔盖盆地一直在继续下降,南部高山高原区一直在缓慢上升。

1.4.3 库区、坝址和引水线路工程地质评价

引水线路 7 个枢纽坝段的河谷呈“V”形或浅“U”形,谷坡中不存在大型贯通性结构面,岸坡整体稳定性好,建坝地形条件较好。河床中沉积物厚度小,不存在深厚覆盖层问题。库区两岸主要地质灾害是河谷两侧小型冲沟泥石流和河岸侵蚀崩塌,尤其是达曲和泥曲河谷泥石流发育密度高,但规模小,易于防治。至于坝段和库区的基岩,除热巴为花岗岩外其余均为砂岩夹板岩地层,出露厚度均在 300m 以上。岩石主要为浅变质的砂岩和板岩,砂岩主要为中厚层-厚层状结构,巨厚层状和互层状结构相对较少;板岩主要为薄层状结构,中-弱风化砂岩单轴抗压强度一般在 41~128MPa 之间;弱-微风化板岩单轴抗压强度一般在 21~95MPa 之间,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。砂岩透水性较低,属弱透水岩体,板岩则为相对不透水层。坝段岩层一般褶皱强烈,断层不甚发育,坝址范围内均不存在区域性断裂,节理裂隙总体上不发育。由于河流走向与区域构造线一致,使得岩层走向与河流平行,对坝基防渗不利,渗漏形式主要是沿裂隙及背斜轴部向下游渗漏。

库区一般封闭条件较好,不存在向邻谷或洼地永久渗漏问题。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。

线路区岩石主要为三叠系浅变质的砂岩和板岩,砂板岩互层构成了软硬相间的岩层组合形式。工程区最大主应力与线路方向锐角相交,有利于围岩稳定;隧道受冻土、滑坡、泥石流等不良外动力地质现象的影响较小,外动力地质现象对其不构成危害,但会对线路施工道路造成一定的影响;隧道埋深大,地应力高,岩爆、软岩变形和活动断裂错切是隧道稳定性的主要问题。引水隧道围岩主要为 II、III 类围岩。以 II 类围岩为主的洞段,岩石以砂岩夹板岩为主,岩体完整性较好,岩体强度较高,基本不存在围岩变形问题;以 III 类围岩为主的大埋深洞段,变形量较小,可以推断在 III 类围岩中不存在变形问题;但在局部以板岩为主地段,岩体稳定能力差,易风化,变形量较大,存在围岩变形问题;IV 类围岩和断裂带,岩石破碎,

岩体强度较低,变形量较大,隧道开挖条件非常恶劣。线路穿越 23 条区域性断裂,大部分是晚更新世以来不活动断裂,只有热巴-阿安隧洞穿越鲜水河(西延)活动断裂,仁达-上杜柯隧洞穿越色曲活动断裂。另外,亚尔堂-克柯引水隧道从白石山龙克温泉附近通过,该温泉是沸泉,预计隧道开挖时会遇到过热水爆炸问题。根据临近水电站及公路隧道施工经验教训,要注意软岩大变形及膨胀岩问题,建议采用盾构法施工。

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

达曲阿安坝段和雅砻江阿达坝段处于鲜水河(西延)发震断裂旁,曾经发生过 6 级以上地震,坝段地震烈度处于Ⅷ~Ⅸ度区,属不稳定区;仁达坝址位于Ⅷ度区,上杜柯坝址靠近中壤唐地震区,处于次不稳定区;其余坝址地震基本烈度为Ⅵ~Ⅶ度,为基本稳定区。

1.4.4 活动断裂和地质灾害卫星遥感解译

采用卫星遥感解译对南水北调西线工程区活动断裂、地质灾害遥感解译。使用 ETM⁺陆地卫星(Landsat-7)数据,采用 ENVI3.5 专用软件进行处理,对图像进行增强处理,如反差增强、边沿增强、突出线性构造定向滤波和提高分辨率多波段数据的融合,完成工程区遥感图像解译,发现了鲜水河、甘孜-玉树、达日、甘德、阿万仓、玛沁-玛曲等活动断裂现代明显活动的地貌证据,在卫星图片上能直接看到用以判断活动断裂的活动发育地段,如断坎错动、水系断错、山脊错断、地震形变带(地裂缝、地震鼓包、地震坑及挤压泥)等断裂地貌现象。经统计总结,区内活动断裂水平运动的方向有如下规律:北西向断裂大部分呈左旋扭动。其中双向扭动性质的断裂有茸木达断裂、鲜水河断裂、当江-歇武-觉悟寺-甘孜断裂和玉树-甘孜断裂。

工程区水系分布有一定的优势方向,根据卫星影像制作了区域水系图,计算工程区平均水系优势方向为 135.8° 和 9.8°。其中 135.8° 方向为区域大多数压扭性断裂的发育的优势方向,而 9.8° 方向代表了大多数张性断裂的优势发育方向。根据研究区水系格局计算的新构造主压应力方向为 NE9.8°。

1.4.5 工程区沿线断裂活动性

调水线路所在的甘青川地区位于青藏高原东部、巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带内,区域性展布的基底-地壳断裂十分发育,呈北西向与山体走向相一致。大部分断裂规模巨大,向西延伸数百至上千千米,与青藏高原中部昆仑山口-二道沟一线分布的活动断裂相对应。

东昆仑断裂带和西金乌兰湖-玉树两域性隐伏基底-地壳断裂,与龙门山断裂和阿尔金断裂构成调水区区域一级构造分区边界。区域内的玛多-甘德断裂、西金乌兰湖-歇武断裂带是巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带内南北边界,构成调水区区域二级构造分区边界。区内所有断裂均受限于一级构造分区边界。一级构造分区内展布一系列南北向构造带,如昌麻河-科曲-桑日麻南北向构造带,这些构造形成时间较晚,切割了北西向断裂,构成了北西向断裂活动性分段的边界。

昆仑山口-达日断裂和智秋-清水河断裂是昆仑山口断裂的东延部分,是巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带内三级分区界线,划分巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带为北巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带、中巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带和南巴颜喀拉山印支冒地槽褶皱带。五道梁-曲麻