

青藏高原东南缘 第四纪工程地质概论

张永双 曲永新 赵希涛 等著



地质出版社

■ 基本科研业务费项目 (DZLXJK200708)

国工资源大调查项目 (1212010541404 与 1212010914025) 联合资助

铁道部科技研究开发计划项目 (2008G027-B-1)

青藏高原东南缘第四纪工程地质概论

张永双 曲永新 赵希涛 郭长宝 王献礼
冯玉勇 姚 鑫 雷伟志 熊探宇 李宗亮

著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是一部系统介绍青藏高原东南缘第四纪工程地质问题和相关研究方法的专著。作者根据当前青藏高原东南缘重大工程建设需求和工程地质学发展趋势,提出加强第四纪地质与工程地质的高层次交叉研究是现代工程地质学的重要发展方向。结合野外地质经验和亲身体会,简明扼要地阐述了青藏高原东南缘区域地质背景、与工程地质研究密切相关的第四纪地质学基本概念,以及实用的第四纪地质调查和研究方法。从第四纪地质作用和地质演化研究入手,系统总结了青藏高原东南缘第四纪地质作用的基本特征和典型第四纪沉积物的分布规律。采用常规和非常规实验测试、数值模拟等技术手段,深入研究了青藏高原东南缘具有地域特色的第四纪冰川堆积物、红色风化壳(红粘土)、河床深厚覆盖层、湖相粘土等的发育特征和工程地质特性,以及相关工程地质环境地质问题或地质灾害的形成机理。结合青藏高原东南缘地壳运动异常活跃的特点,深入剖析了高山峡谷区地震地质灾害特征和内外动力耦合作用的主要表现形式,指出了今后值得加强研究的方向。基于实际调查资料和工程实例,初步提出了青藏高原东南缘第四纪工程地质学的理论框架,为重大工程地质问题研究、减灾防灾和地质环境保护提供了有力的理论和技术支撑。

本书可供国土资源、水利水电、交通、城建、地震等部门从事工程地质、第四纪地质、灾害地质、岩土工程等方面的科研和工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原东南缘第四纪工程地质概论 / 张永双等著.

—北京:地质出版社,2010.4

ISBN 978-7-116-06649-6

I. ①青… II. ①张… III. ①青藏高原—第四纪地质—工程地质

—研究 IV. ① P535.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 070789 号

QINGZANGGAOYUAN DONGNANYUAN DISIJI GONGCHENGDI ZHI GAILUN

组稿编辑: 王大军 白 铁

责任编辑: 白 铁

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路31号, 100083

咨询电话: (010) 82324575 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310749

印 刷: 北京天成印务有限责任公司

开 本: 889 mm×1194 mm $\frac{1}{16}$

印 张: 14.75

字 数: 400千字

版 次: 2010年4月北京第1版·第1次印刷

定 价: 50.00元

书 号: ISBN 978-7-116-06649-6

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

序

进入 21 世纪后,我国工程建设的规模和空间布局达到了空前水平,并且逐步向自然环境脆弱和地质条件复杂的高山峡谷区挺进。青藏高原东南缘是当前我国重大工程规划和建设的重点地区之一,许多能源、交通、工业、矿山、水利水电以及基础设施等大型-特大型工程正在这里规划和建设。由于地处印度板块与欧亚板块碰撞带附近,青藏高原东南缘的内外动力地质作用极其强烈,高山峡谷纵横、高陡斜坡发育,山间湖泊、河流形态各异,特殊岩土体类型多样,许多第四纪地质作用及其产物都是中国中东部地区所没有的。复杂的地质环境导致青藏高原东南缘大型工程规划和建设中的工程地质问题复杂多样,特别是遇到了大量与第四纪地质作用及其产物相关的疑难或重大工程地质问题,例如,冰川堆积物的工程地质问题、大江大河的河床深厚覆盖层问题、高原内陆型湖相软粘土问题、新构造活动与地质灾害问题等,这既向中国工程地质和岩土工程界提出了严峻的挑战,同时又为第四纪工程地质问题研究带来了机遇。

第四纪地质环境是一个开放、复杂的体系,体系中的各种因素是相互作用的。20 世纪 90 年代初以来,工程地质和岩土工程界便认识到第四纪地质作用对工程建设的重要性,一批工程地质学家开始对第四纪工程地质理论进行探讨,并在工程实践中加以应用。但是,在人类活动和工程建设比较稀少的高海拔山地及其周围,基础地质研究取得了许多创新性成果、积累了丰富的资料,相比之下,工程地质研究相对滞后,存在着极为广泛和极其困难的研究领域,许多基础理论和研究方法值得进一步探索。例如,内外动力耦合作用在地质灾害和重大工程地质问题形成演化过程中占有重要地位,加强青藏高原东南缘内外动力地质灾害联合调查与研究,对于有效控制地质灾害链扩散、降低灾害链的影响和损失具有重要的意义。又如,全球气候变暖是当今世界各国共同面对的全球性生态环境问题,亦是当今地球科学领域急需研究的学科前沿领域,相信第四纪工程地质学理论在这方面将大有作为。

近年来,张永双博士等专家学者在青藏高原东南缘开展了大量第四纪地质、工程地质和地质灾害方面的地质调查工作,积累了不少第一手资料和研究经验。他们根据多年的野外地质调查与室内研究体会,提炼出了工程地质研究中常用的第四纪地质学基本概念、问题与调查研究方法;通过实例剖析,深入浅出地论述了运用上述概念和方法解决所遇到的各种第四纪地质和工程地质问题的思路和途径;并在青藏高原东南缘地质背景和第四纪地质作用特点研究的基础上,着重剖析了该区具有代表性的第四纪冰川堆积物、红色风化壳(红粘土)、河床深厚覆盖层、高原湖相粘

土的工程地质问题，探讨了新构造活动与地质灾害的关系及其发育规律。在研究过程中，将工程地质学与第四纪地质学进行了有机结合，总结了第四纪工程地质研究的内涵、研究思路和研究方法，系统提出了青藏高原东南缘第四纪工程地质学的理论研究框架，为相关重大工程地质问题的分析研究提供了很有价值的思路。

尽管国内外至今尚未正式形成“第四纪工程地质学”这一学科体系，但本书作者们根据亲身研究体会初步提出和建立的第四纪工程地质学理论研究框架是非常重要和有价值的。正如作者所言，“第四纪工程地质学作为一门学科的建立，还需要很多年、更多人的努力，这也是中国工程地质、第四纪地质和岩土工程界共同努力的目标”。

本书是我国第一部较系统地总结青藏高原东南缘第四纪工程地质研究成果的专著，不仅为我国西南山区重大工程规划、勘测和设计提供了重要的技术支撑，而且必将推动第四纪工程地质学的学科发展。特向广大工程地质、第四纪地质和岩土工程界同仁推荐此书。

王思敬

2010年3月

目 录

绪 论	1
第一章 青藏高原东南缘第四纪地质概述	10
第一节 自然地理与区域地质背景	10
第二节 第四纪地质调查研究方法	18
第三节 区域典型第四纪沉积物与地层	40
第四节 青藏高原地质环境变化对全球气候变暖的响应	67
第二章 冰川堆积物的工程地质研究	70
第一节 概 述	70
第二节 第四纪冰川堆积物的发育特征	71
第三节 冰川堆积物的物质组成及结构特征	82
第四节 冰川堆积物的工程地质特性	89
第五节 冰川堆积物边坡的主要破坏形式	101
第六节 磨西台地边坡地质灾害危险性评价	105
小 结	117
第三章 红色风化壳的环境工程地质问题研究	119
第一节 概 述	119
第二节 滇西北高原红色风化壳的发育分布特征	120
第三节 红色风化壳化学成分和红土化程度的区域对比	123
第四节 碳酸盐岩红色风化壳的矿物组成和红土化作用	130
第五节 红粘土的工程地质特性和灾害效应	136
小 结	138
第四章 河床深厚覆盖层的工程地质研究	140
第一节 国内外水电工程河床覆盖层概况	140

第二节	青藏高原东南缘河床深厚覆盖层的成因类型·····	142
第三节	河床深厚覆盖层的工程分类和工程地质特征·····	147
第四节	金沙江虎跳峡河段深厚覆盖层的工程地质研究·····	154
小 结	·····	164
第五章	高原湖相粘土的工程地质研究·····	166
第一节	概 述·····	166
第二节	洱海湖相软粘土的工程地质研究·····	167
第三节	中甸—小中甸第四纪湖相粘土工程地质研究·····	177
小 结	·····	186
第六章	新构造活动与地质灾害研究·····	188
第一节	地震诱发地质灾害·····	188
第二节	古地震滑坡堰塞湖·····	200
第三节	今后研究方向的思考·····	206
第七章	第四纪工程地质学导论·····	209
第一节	第四纪工程地质学的内涵·····	209
第二节	第四纪沉积物的工程地质·····	210
第三节	第四纪地质作用的工程地质·····	212
第四节	第四纪地质环境及其变化的工程地质·····	214
后 记	·····	216
参考文献	·····	218

Contents

General introduction	1
Chapter 1 A sketch of Quaternary geology of Southeastern Qinghai-Tibet plateau ...	10
1.1 <i>Geographical and geological setting</i>	10
1.2 <i>Practical methods for Quaternary geological investigation and research</i>	18
1.3 <i>Typical Quaternary sediments and strata</i>	40
1.4 <i>Changes of Qinghai-Tibet plateau geo-environments corresponding to global warming process</i>	67
Chapter 2 Research on engineering geological properties of Quaternary glacial deposits	70
2.1 <i>Introduction</i>	70
2.2 <i>Development characteristics of Quaternary glacial deposits</i>	71
2.3 <i>Composition and structure of Quaternary glacial deposits</i>	82
2.4 <i>Engineering geological properties of Quaternary glacial deposits</i>	89
2.5 <i>Main failure types of glacial deposit slope</i>	101
2.6 <i>Geological hazard risk assessment of Mo-Xi platform slope</i>	105
<i>Brief Summary</i>	117
Chapter 3 Environmental engineering geological problems of red weathering crusts ...	119
3.1 <i>Introduction</i>	119
3.2 <i>Distribution of Red weathering crusts in northwestern Yunnan plateau</i>	120
3.3 <i>Regional comparisons of chemical composition and laterization degree of red weathering crusts</i>	123
3.4 <i>Mineral composition and laterization of red weathering crusts of carbonate rocks</i>	130
3.5 <i>Engineering geological properties of red clay and its geo-hazard effects</i>	136

Brief Summary	138
Chapter 4 Engineering geological research on riverbed deep overburden layer ...	140
4.1 Overview of riverbed deep overburden layer in hydropower projects from China and abroad	140
4.2 Main genesis types of riverbed deep overburden layer in Southwestern Qinghai-Tibet plateau	142
4.3 Engineering geological classification and properties of river deep layer	147
4.4 Engineering geological research on deep layers in upper and middle reaches of Jinsha River	154
Brief Summary	164
Chapter 5 Engineering geological research on typical plateau lacustrine clays ...	166
5.1 Introduction	166
5.2 Engineering geological research on Er-hai soft clay	167
5.3 Engineering geological research on Zhongdian-Xiaozhongdian lacustrine clay	177
Brief Summary	186
Chapter 6 Research on neotectonics and geological hazards	188
6.1 Earthquake-induced geological hazards	188
6.2 Ancient dammed lake induced by earthquake landslide	200
6.3 Orientation of further research	206
Chapter 7 Outline of Quaternary Engineering Geology	209
7.1 Connotation of Quaternary Engineering Geology	209
7.2 Engineering Geology of Quaternary sediments	210
7.3 Engineering Geology of Quaternary geo-process	212
7.4 Engineering Geology of Quaternary geo-environment and its changes	214
Postscript	216
References	218

绪 论

一、问题的提出

第四纪工程地质学，顾名思义，就是与第四纪地质作用、第四纪沉积物及第四纪地质环境变化相关的工程地质学，它是第四纪地质学与工程地质学的交叉科学，是随着工程地质学的发展和实际需要而产生的工程地质学分支。对工程建设而言，第四纪无疑是地球演化史上最重要、最新的地质历史时期，除了前第四纪基岩外，所有的浅表层地质体均在第四纪时期形成或被第四纪地质作用所改造(Fookes, 1991)。这些第四纪所发生的强烈内外力地质作用和所形成的各类松散、松软沉积物，制约着人类生活、生存和各类工程建设地质环境的安全。随着科技水平的提高，人类工程活动的空间已经开始向地下、高山、海底和太空扩展，人类工程活动的规模之大、强度之高、空间之广，达到了空前的水平，对第四纪地质环境的依赖和影响程度也超过了人类历史上任何时期。工程地质学和第四纪地质学的高层次交叉和结合，是现代工程地质学的发展趋势之一。

青藏高原东南缘地处印度板块与欧亚板块碰撞带附近，内外动力地质作用极其强烈，这里高山峡谷纵横、高陡斜坡发育，山间湖泊、河流形态各异，特殊岩土体类型多样，典型第四纪地质现象和地质景观层出不穷。许多第四纪地质作用及其产物（如冰川作用和冰缘地质作用所形成的冰川堆积物、寒冻风化重力堆积、冰川泥石流等）都是中国中东部地区所没有的。而从另一侧面，青藏高原东南缘作为我国矿产资源、水力资源开发和交通、电力等基础设施重点建设地区，随着许多大型-超大型工程兴建、矿产资源和水力资源开发力度不断加大，复杂的地质环境导致重大工程地质问题复杂多样，特别是与第四纪地质作用及其产物密切相关的工程地质及环境问题日趋严峻；作为地壳运动异常活跃区，与新构造运动有关的地质灾害问题也十分突出。由于很多问题在以往工程建设中较为少见，很多问题属于前沿性工程地质问题，可供参考的文献资料较少，传统的研究方法和研究思路不能满足实际需要。因此，迫切需要对青藏高原东南缘与典型第四纪地质作用相关的工程地质问题进行系统总结，开展青藏高原东南缘相关的工程地质理论、工程经验、工程实例等方面的基础研究，为创新发展工程地质学理论提供支撑。

本书根据作者多年来在青藏高原东南缘开展相关工程选址、解决疑难工程地质问题、相关地质灾害调查等实践和研究积累，试图从工程地质学和第四纪地质学相结合的思路，探讨青藏高原东南缘某些第四纪工程地质问题及其形成机理，目的是促进对高山峡谷区第四纪工程地质问题的认识，深化工程地质研究，对发展传统工程地质学理论具有重要意义。

二、国内外相关研究的简要回顾

尽管国内外至今尚未正式形成“第四纪工程地质学”这一学科体系，但是，自20世纪80年代末~90年代初以来，岩土工程界和工程地质界便认识到第四纪地质作用对工程建设的重要性，一批工程地质学家开始对第四纪工程地质理论进行探讨，并在工程实践中加以应用。如第四纪活动断裂和地壳稳定性的研究、各种第四系特殊性岩土工程地质性质的研究、地基土体稳定性的研究、土质边坡稳定性的研究等均涉及第四纪工程地质问题，这代表着第四纪工程地质学作为一个学科或研究方向刚刚

萌芽 (王思敬, 1992)。

1. 国际研究动态

在国际上,不少学者较早地从地质成因角度论述工程地质问题与第四纪地质作用之间的联系,为建立第四纪工程地质理论奠定了基础。Wahrhaftig et al (1958) 研究了阿拉斯加山脉中部的第四纪冰川作用、河流沉积和地貌发育史,评价了滑坡、碎屑流、冰冻、冻胀和融沉等地质灾害对阿拉斯加铁路路基运营的影响。Catt (1988) 在其专著 *Quaternary Geology for Scientists and Engineers* 中,系统阐述了各种第四纪地质作用与工程建设的关系。

在 1989 年召开的国际地质协会年会上,工程地质组专门讨论了第四纪工程地质学的若干问题,并出版了 *Quaternary Engineering Geology* 论文集 (A. Forster et al, 1991)。Fookes (1991) 从第四纪全球气候变化、地理气候特征、板块构造运动对全球不同气候带第四纪地层工程地质性质影响的角度,总结了第四纪地质作用与工程地质问题的关系,并使用了第四纪工程地质学 (Quaternary Engineering Geology) 的概念。其主要观点是,板块构造运动控制了海平面的升降和区域地理气候变化;第四纪多次冰期/间冰期的旋迴对地球表层物质的工程特性造成了深远的影响;几次主要的气候漂移 (Climate shift) 造成了和现今地质作用性质不一致的表层建造 (Surface forms),这些地层建造暴露于地表或埋藏于地下,易于引发边坡失稳或地基破坏;持续的板块构造事件解释了地震空间分布规律、海岸线和山区的增生及火山地区的岩土性质。Culshaw et al (1991) 系统讨论了冰川、冰缘、干旱和热带气候带等不同气候环境下第四纪土的形成分布原因和岩土工程性质,认为第四纪沉积是年轻的沉积物,其地质性质和工程性质主要受成因控制,因此气候对它们的物质组成和工程性质具有重大的影响。例如,寒冷气候条件下的冻融作用对土体性状具有显著影响,而热带气候条件下的快速风化和淋滤作用是影响土体工程性质的主要因素。

在 1991 年 8 月北京召开的第 13 届第四纪国际地质大会和 1992 年 1 月日本京都召开的第 29 届国际地质大会之后,国际杂志 *Engineering Geology* 分别从第 29 届国际地质大会挑选了 4 篇文章、从第 13 届第四纪国际地质大会挑选了 3 篇文章,出版了“Engineering geology of Quaternary deposits”专辑,内容涉及了滑坡易损性、环境影响评价、土地复垦、海岸带工程、水资源开发、建筑基础、第四纪软土的补强措施等,充分说明国际工程地质界已经重视将第四纪工程地质作为重要发展方向 (Hawkins, 1994)。该专辑的主编 de Mulder (1994) 指出,之所以将第四纪沉积物单独研究,是因为:①第四纪沉积物比较年轻,其性质不同于前第四纪的基岩;②第四纪沉积物分布在地表,人类工程直接建筑于其上或之中;③第四纪沉积物需要专门的调查和探测技术,如未固结的砂或粘土取样与硬岩完全不同;④第四纪沉积物与环境工程问题研究关系密切,防护工程 and 环境影响评价都很重要,没有扎实的第四纪沉积物及其成因方面的知识,在环境影响评价研究中就缺一条腿。这些论点至今仍然具有现实意义。

大致在同一个时期,1994 年 6 月在荷兰皇家地质与采矿协会工程地质专委会召开的第 20 届年会上,荷兰的工程地质学家在回顾 20 年 (1974 ~ 1994) 工程地质发展的基础上,进一步研讨了第四纪沉积物的工程地质问题,编辑出版了“*Engineering Geology of Quaternary Sediments*”一书 (Niek R, 1994),着重反映了当时荷兰在年轻软粘土工程地质方面的实践经验,时任该专委会主任的 Niek Rengers 强调,荷兰工程地质界已经认识到多学科交叉的重要性。

“国际减轻自然灾害十年”活动 (1990 ~ 1999) 以来,世界各国加强了气候与环境变化的地质灾害研究工作,特别注重了山区的地质灾害。尤其是 2002 年第十三个国际减灾日的主题定为:“山区的减灾与可持续发展”,大大促进了各国对第四纪工程地质问题的研究。随着全球气候变暖、地壳活动进入一个相对活跃期和重大工程的开工建设等因素的影响,世界各国正在遭受前所未有的地质灾害威胁,崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害日益增加,地震、火山爆发等地球动力学引起的灾害也在威胁

人类生命和财产安全,海啸、飓风等灾害引起了人们的广泛关注。Marta et al (2007)报道了近 25 年来欧洲阿尔卑斯山发育的 16 处大型冰川碎屑流的特征及其成因,并将该区冰川碎屑流划分为 3 种类型:①长时间强降雨型,②短时暴雨型,③干旱季节冰川湖溃决型或下伏冰融化型等。地质灾害已经成为当前世界各国经济发展和社会进步面临的主要问题之一,相关的研究热潮一直持续至今。

在 2008 年挪威召开的第 33 届国际地质大会上,来自不同国家的地质学家报道了各自国家面临的地质灾害情况以及各自的研究成果。由地震引起的崩塌、滑坡和泥石流等次生地质灾害在本次地质大会中得到较多的讨论。近年来,地震引起的崩塌、滑坡和泥石流增加趋势明显,并且造成大量人员伤亡。2007 年 8 月 15 日发生在 Peru 的 Mw7.9 级地震,对 Peru 南部地区破坏严重,诱发的滑坡对安第斯山脉地区海岸边的悬崖、城市道路造成重大破坏,导致一些村庄数个星期与外界失去联系。随着城市化进程的不断发 展,会有一些超大城市出现,这些超大城市中有许多将会坐落在地震高发区,基础设施、人力资本和人类财富会越来越集中在城市中。在东京、洛杉矶或者伊斯坦布尔等大城市发生地震将会是一个国家的灾难,并且会对全球的经济产生不利影响。自然灾害的全球性经济后果是一个正在研究的问题,最早说明这个问题的是 1995 年的日本神户地震和 2005 年的飓风卡特里娜。2008 年的汶川 Ms8.0 级地震诱发的大量崩塌、滑坡、泥石流及其巨大的人员伤亡和经济损失也给世界留下深刻的印记。

越来越多的实例说明,在解决工程地质问题和防御地质灾害过程中,加强国际合作,加强工程地质与第四纪地质的结合将具有充分的生命力。

2. 国内研究动态

在国内,工程地质工作者早就对第四纪工程地质问题开始了研究,但在 20 世纪 80 年代以前,只是借用第四纪地质学的工作方法和研究成果,并没有从第四纪工程地质学的学科层次对第四纪工程地质理论进行系统总结。同样地,第四纪地质工作者早期主要侧重于基础理论研究。20 世纪 60 年代以来,以刘东生先生为代表的老一辈中国第四纪地质学家便倡导第四纪研究为工程服务的思想,并先后开展了黄河中游黄土高原水土保持、治淮水利工程建设、引洮上山水利工程、三门峡水利工程、南水北调中线工程、攀西地区三线工程等的第四纪地质研究工作,对黄土高原黄土地层成因时代、关中盆地三门系时代、安宁河雅砻江河谷昔格达层、淮河中下游平原下草湾组、新蔡组地层时代等都进行过专门研究,并开展了全国各地区第四纪地层的划分对比等,为中国工程地质工作和研究奠定了坚实的地质基础。

尽管中国第四纪工程地质学学科方向的明确提出比西方发达国家晚了 10 年左右的时间,但实际上中国第四纪工程地质学方面的学科成就早就大量出现,现仅列举几个实例:①刘东生等(1964)根据对中国黄土地层时代的研究,将中国黄土划分为全新世黄土(Q_4)、马兰黄土(Q_3)、离石黄土(Q_2)和午城黄土(Q_1);在此基础上,中国工程地质和岩土工程研究者通过大量现场和室内测试发现,仅全新世(新近堆积)黄土和马兰黄土具有湿陷性,属于湿陷性地层,而巨厚的离石黄土、午城黄土在常压下不具湿陷性,这一结论为区域黄土湿陷性工程评价和预测提供了科学依据。②20 世纪 50 年代末~60 年代初,刘东生、苏联义、朱海之等通过对黄土高原黄土颗粒组成(平均粒径)的区域变化规律研究,发现黄土具有从西北向东南逐渐变细的规律,并将黄土高原的黄土自西北向东南划分为 3 个带,即砂黄土带、典型黄土带、粘黄土带,预示着黄土工程性质尤其是渗透性、粘聚力的区域变化。20 世纪 80 年代以来,陕北、晋西北广大黄土丘陵沟壑区的黄土窑洞或窑洞后方的黄土边坡出现大量垮塌事件并造成数十起、累计死亡数百人的事件,西北大学雷祥义等(1998)对此进行了专门调查研究;2009 年 11 月 16 日山西吕梁中阳县、2010 年 3 月 10 日陕北子洲县又分别发生同类数十人伤亡的事件。曲永新、张永双等(2001)对西气东输管道工程沿线陕北定边至山西临汾段的黄土边坡地质灾

害调查研究发现,该区黄土边坡自稳性差、易垮塌等现象具有地域分布特点,是砂黄土特有的工程地质现象。由于砂黄土粘粒含量低($<12\%$)、渗透性强、粘聚力低,导致陡立的黄土边坡在开挖或降雨作用下容易产生滑塌破坏,如果这一认识能够在该区农村窑洞安全排查中得到普及应用,则对该类地质灾害的防治具有重要意义。③青藏铁路在青海柴达木盆地的察尔汉盐湖一带从盐壳上通过(盐壳下为湖水),如果湖水淡化、盐壳溶解,则可能导致路基下沉破坏、铁路中断运营,因此路基盐壳的长期稳定是工程设计者和管理者一直担心的工程问题。通过对柴达木盆地第四纪以来特别是全新世以来气候变化趋势研究,得到了气候将逐渐干旱的结论,为盐壳路基的长期稳定提供了科学依据。④青藏铁路的多年冻土是全球独一无二的高海拔多年冻土,冻土路基的变形问题是制约铁路安全运营的最重要的第四纪工程地质问题。中国科学院兰州冰川冻土研究所、铁道部第一勘测设计院等单位经过半个多世纪,对青藏高原第四纪以来多年冻土形成演化规律、多年冻土分布和变化探测及热稳定性等方面的研究成果,为青藏铁路的设计施工和安全运营提供了最重要的科学依据(郑度等,2003)。⑤黄土高原和三峡库区是第四纪以来滑坡的密集分布区,通过不同类型滑坡形成时代及相应时代古环境古气候的恢复,发现许多老滑坡和古滑坡形成于间冰期或冰后期,这就为古滑坡、老滑坡稳定性评价和预测提供了依据,也为西南三江高山峡谷区两岸谷坡上分布的大中型滑坡及崩坡积体的稳定性评价和预测提供了重要理论依据。由于在高山峡谷环境下,对这类地质体进行物探、钻探、岩土力学测试都是极为困难的,因而显得更为重要。⑥中国第四纪研究者在淮河中下游下草湾组湖相粘土、黄土高原地区三趾马红土、汾渭盆地三门系、西昌—攀枝花地区昔格达组地层等成因年代学方面的研究成果,对中国沉积型硬(粘)土/软(泥)岩的分布规律和工程地质性质研究提供了科学依据。以上几个实例仅仅是中国第四纪工程地质学成就一小部分,但也充分说明第四纪地质学与工程地质学的长期合作和交叉渗透研究是中国第四纪工程地质学形成发展的必由之路。

在1991年北京召开的国际第四纪研究联合会第十三届大会上,专门设立了应用第四纪地质专题,这一时期国际第四纪地质界强调应用第四纪地质研究,中国的专家学者在国际上非常活跃,并带动了国际上第四纪地质研究水平的提高。刘东生先生在阐述中国第四纪科学研究进展时指出,第四纪地质与工程建设的结合,使中国第四纪地质研究水平赶上了世界,与国际水平相当(刘东生,1992)。王思敬(1992)根据中国工程地质研究的需要,以“第四纪研究与中国主要工程地质问题”为题,阐述了工程地质与第四纪地质之间的密切联系,并倡导加强第四纪工程地质工作。

中国第四纪研究委员会1996年组织召开了中国第一届应用第四纪学术会议,在该次会议上,多位学者探讨了第四纪工程地质问题,说明中国工程地质和第四纪地质学界已经开始认识到第四纪工程地质研究已经到了刻不容缓的地步,工程建设中遇到的大量难题需要专门从第四纪工程地质角度进行研究,而不是像过去那样只把第四纪调查作为工程地质条件调查的一个方面。易明初等(1996)系统介绍了第四纪研究与区域地壳稳定性评价的关系,指出一个地区的稳定性与第四纪时期地震、断裂、地质灾害和深部构造等的活动强度和密度有关,并随着第四纪地层岩性、厚度和压实程度的不同而有所差异。张虎男(1996)认为,对第四系的研究在工程地震中往往起着决定性的作用,这类研究主要包括两方面内容:一是第四系的组分和结构构造;二是涉及第四系的活动断层和活动褶皱,即对第四系形成和形变的研究。景才瑞(1993,1996)通过对四川攀枝花弄弄坪第四纪冰川堆积的研究,提出底积泥砾层的渗透性小,对蓄水、储水起到良好作用,而且其强度高、沉降量不大,可以作重型设备基础。陈云等(1996)提出了第四纪地质工程的概念,认为第四纪地质工程是指在区域开发或城市、交通建设中,把第四纪环境作为某项具体工程的建筑环境,并提出了第四纪地质工程的调查与勘察、室内试验测试、地质体改造等方面的技术方法。蒋忠信(1996)以滇池地区泥炭土、南宁和百色盆地红土为例,介绍了第四纪沉积年代学在铁路工程地质研究中的应用。王运生(1996)在第四纪地层特征、

不同地貌单元第四纪地基土工程地质特征分析的基础上,开展了成都市第四系工程地质评价。潘传孝(1996)针对攀枝花城市布局与工程选址中遇到的活动断裂、工程地质性质不良的第四纪地层、复杂的地貌组合和频度较高的地质灾害等第四纪地质问题,讨论了山区城市规划中第四纪工程地质研究的意义和研究方向。吕儒仁(1996)指出,泥石流与第四纪地质有着密切的关系,所有的泥石流固体物质都来源于不同成因的第四纪沉积物,这又影响着泥石流的性质;现代地质作用过程制约着泥石流防治工程类型的选择;新构造运动和地震活动还在一定程度上制约着泥石流的分布。

“国际减轻自然灾害十年”活动(1990~1999)以来,我国在地质灾害成灾机理、预测评价、监测预警等方面开展了大量卓有成效的工作,其中很多都涉及第四纪工程地质问题,研究对象不仅包括与第四纪特殊土体(红粘土、黄土、盐渍土、膨胀土、冻土等)有关的地质灾害,还涉及了较多的与第四纪地质作用有关的地质灾害和工程地质问题,如西南地区高山峡谷区活动断裂与地壳稳定性问题、深切河谷边坡卸荷和变形机理问题、坝基稳定问题等。在城市工程地质研究中,开展了第四纪沉积物的成因及其工程地质特性方面的研究(莫群欢等,1999;姜洪涛等,2003;袁仁茂等,2005;蔡向民等,2007),并意识到在岩土工程剖面图中增加第四纪地质含量的重要性(王旭东等,2006)。此外,第四纪海岸带开发的软土地基变形和隐伏活动断裂问题,都需要第四纪地质知识作为支撑(梁之劲等,2000;王洪涛等,2003;夏真等,2007;蔡春麟等,2007;李学杰等,2008)。第四纪地质与工程地质的结合也逐渐成为第四纪研究的重要发展方向之一(刘东生,2003)。

随着我国西部大开发战略的不断实施,中国西南地区一系列国家级重大工程规划和建设方兴未艾,针对遇到的一系列新的工程地质问题,不少单位和学者开展了大量研究工作,其中都涉及了与第四纪有关的工程地质问题,比较有代表性的有:以张倬元、黄润秋为代表的成都理工大学科研群体,在数十年研究积累的基础上,对深切河谷卸荷带及边坡稳定性、河谷浅生时效变形、河床深厚覆盖层、冰川堆积物工程地质特性等一系列问题开展了深入研究,取得了大量科研成果(黄润秋,2001;王兰生等,2004;王运生等,2007;许强等,2008;涂国祥等,2009)。冯玉勇和曲永新等(1999,2000)结合西南水电开发中遇到的河床深厚覆盖层工程地质问题研究,初步提出了“第四纪工程地质学”理论框架;认为第四纪工程地质学是研究第四纪地质环境中与工程建设有关的第四纪地质作用和第四纪地质问题的应用地质科学,第四纪工程地质问题的形成主要受第四纪构造运动和第四纪气候环境演变

的控制。

中国地质科学院地质力学研究所在实施国土资源大调查项目“国家重大工程区域地壳稳定性调查与评价”期间(2000~2008),在研究高山峡谷区工程地质问题时,注重应用第四纪地质方法,研究了青藏高原及周边的地壳稳定性和重大工程地质问题(吴珍汉等,2005;彭华等,2009;张永双等,2009),从成因分析到预测评价,深切体会到工程地质与第四纪地质相结合的巨大生命力。面对青藏高原遇到的特殊工程地质问题,王思敬等(2002)从内外动力耦合作用的角度,较系统地阐述了相应的研究思路和发展方向,促进了相关领域研究的发展(李晓等,2008)。2008年,由中国工程建设标准化协会组织编制的《工程地质测绘标准》中,把地貌测绘、第四系测绘和特殊岩土测绘作为工程地质测绘的3个独立章节,这在以往是没有的。在这一标准中,又把2001年国家岩土工程勘察规范中的全新活动断裂分级由3级改为4级。所有这些都促使我国第四纪工程地质调查和研究水平有一个新的进展。

3. 青藏高原东南缘重大工程规划建设中的第四纪工程地质问题研究回顾

近60年来,我国在青藏高原东南缘(滇西北、滇西南、川西南、藏东南等)进行了大规模工程规划和建设,遇到了大量具有地域特色的第四纪工程地质和地质灾害问题。为了保证工程的安全施工和运营,工程地质、第四纪地质领域的科技人员和工程技术人员,在极为艰苦的工作条件下,付出了巨

大的努力，并在第四纪工程地质方面取得了大量研究成果。

(1) 川藏公路

川藏公路是 20 世纪 50 年代数万解放军战士用生命和鲜血在极端恶劣的自然环境下建成的交通要道，它是连接内地与西藏的生命线工程，复杂的工程地质条件导致道路建设和运营中遇到了极为严重的崩塌、滑坡、泥石流、雪崩、寒冻风化、碎屑流和溜砂坡等各类地质灾害。自 20 世纪 80 年代中后期以来，伴随青藏高原气候变暖、现代冰川的消融及藏东南降雨量的增高，西藏八宿至林芝间的川藏公路（即 318 国道）每年有 1/2 ~ 1/4 时间因地质灾害不能通车，对西藏社会经济和国防安全造成了严重的影响。针对该段的地质灾害和工程地质问题，中国科学院山地灾害与环境研究所、兰州冰川冻土研究所、西藏自治区交通厅交通科学研究所合作，开展了大量系统调查和工程对策研究（1995 ~ 1999 年）。殷跃平（2000）、鲁修元等（2000）、刘伟等（2002）、哈承佑（2007）对 2000 年 4 月发生在西藏易贡藏布河谷区的巨型高速远程滑坡、泥石流灾害进行了现场调查和研究。近年来，中国科学院地质与地球物理研究所杨志法等（2006）对该段公路地质灾害又进行了新的研究，在滚石灾害成灾条件、风险评估理论方法等方面有了新的进展。

(2) 成昆铁路

成昆铁路是 20 世纪 60 年代中后期建设的西南大动脉，长 1100km，曾是我国铁路建设史上工程地质条件最复杂、工程地质问题最为严重的一条铁路（何振宁，2004），与第四纪堆积物和第四纪红色风化壳密切相关的滑坡、泥石流灾害频繁发生，对成昆铁路的安全运营造成严重的影响。据统计，1970 ~ 1979 年间全线发生泥石流 56 次，1981 ~ 1985 年发生泥石流 86 次（郭希哲，1991）。1981 年 7 月 9 日利子达沟爆发的泥石流剪断桥墩、冲毁铁桥，造成 422 次客车颠覆，死伤数百人，直接损失数千万元；1980 年 7 月 3 日，越西县铁西（站）滑坡体积达 $220 \times 10^4 \text{m}^3$ ，掩埋铁路 1600m，堵塞隧道进口，中断行车 40 天，仅后期整治费用高达 3686 万元（何振宁，2004）。铁道第二勘察设计院工程地质人员在成昆铁路沿线滑坡和泥石流灾害的调查研究及治理等方面做出了重大贡献。成昆铁路沿线的特殊岩土滑坡除了膨胀土滑坡和红层滑坡外，最具地域特色的是安宁河谷至雅砻江间 110km 路段的昔格达层（ Q_1-N ）硬土 / 软岩滑坡和云南北部龙街盆地龙街组（ Q_3 ）泥质粉砂层滑坡，它们是西南地区的易滑地层，铁道第二勘察设计院第二、第三纵队（1975）曾进行了大量系统的物理力学性质测试，对其工程性质的认识至今仍是宝贵的。

(3) 山地城市建设

20 世纪 60 年代中期开始的西南三线建设，在攀西地区矿产资源开发和渡口市（今攀枝花市）城市建设中遇到了严重的昔格达层滑坡和各类膨胀土工程问题，对此，渡口市建筑勘察设计院和冶金部十九冶建筑研究所开展了大量工程地质勘察研究；中国科学院地质研究所王思敬等（1990）领导开展了攀西地区环境工程地质研究，其中包括昔格达层、膨胀土方面的研究；肖荣久（1986）和彭恩（1986）对昔格达层泥岩工程地质特性、曲永新等（1990，1992）对渡口市 3 类膨胀土物质成分物化性质与膨胀性关系、昔格达层易滑性机理等进行了研究。与此同时，中国地质科学院地质力学研究所钱方（1984）、中国科学院地质研究所赵希涛等（1990）对昔格达层地质学和年代学进行了专门研究。

(4) 金沙江、大渡河等大江大河大坝建设

20 世纪 50 年代以来，我国许多水利水电勘察设计部门在西南大江大河上开展了大量与第四纪工程地质有关的工程地质勘测研究，如成都水电勘测设计院在大渡河水电站梯级开发中对河床深厚覆盖层的研究，并在多个大渡河坝址中发现有冰水堆积层的分布（石金良，1986，1991）；长沙水电勘测设计院、长江水利委员会对金沙江中上游虎跳峡至其宗河段多个水电站坝址进行了河床深厚覆盖层的工程地质勘察（王启国，2009）。中国科学院地质所王思敬、曲永新领导的项目组开展了金沙江虎跳峡

河段河床深厚覆盖层的成因研究和地球物理探测,发现了河床深厚覆盖层中湖积和冰川堆积的加积成因及老河湖相沉积物的成岩作用(冯玉勇,2002;曲永新等,2000;赵希涛等,2007)。成都理工大学许强等(2008)也对河床覆盖层加积成因进行了研究,涂国祥等(2009)探讨了澜沧江某冰水堆积体的演化过程及工程地质问题。

在本区水电工程建设中,除了河床深厚覆盖层问题外,还遇到了多种其他第四纪工程地质问题,如:①雅砻江锦屏水电站开发建设中遇到的高地应力区深切河谷坡体深部卸荷带问题,深部水平裂隙深达150~200m,对此中国科学院地质与地球物理研究所祁生文、伍法权等(2004),成都理工大学王士天、王兰生等对其形成机理进行了专门研究。②大渡河上游梭坡河段两岸坡体发育有巨厚冰川堆积物,而坡体上分布着川西著名的古碉群(准世界文化遗产),水库蓄水后,在库水作用下可能引起的冰川堆积物滑动及其对古碉群安全的影响,成为大渡河上游河段猴子岩水电站开发的一个极敏感的第四纪工程地质问题,国家电力公司成都勘测设计院和中国科学院地质与地球物理研究所伍法权领导的项目组对此进行了专门的工程地质勘察和综合研究,包括冰川堆积物成因、成分、性质研究。③西部大开发以来,怒江大峡谷巨大的水电资源吸引了大规模的水电站梯级开发,因峡谷险峻、水量丰富和高异常降雨,峡谷中重力地质灾害比较突出,峡谷两侧山体坡面分布着大大小小的新老崩塌体、崩坡积体、危岩体、滚石等,在地震、暴雨等内外动力作用下,不仅可能危及道路和沿路村镇的安全,也危及大坝和水电站的安全(如马吉水电站)。由于地形险峻,不仅工程地质勘察极为困难,稳定性评价和工程处理也都存在难度。④在金沙江中游乌东德峡谷中分布着体积达 $7 \times 10^8 \text{m}^3$ 的巨型堆积体,堆积体的稳定性影响着设计坝址的选择。长江规划勘测设计研究院对该堆积体进行了专门的工程地质勘察;南京师范大学徐永祥、杨达源等(2007)运用地貌学、沉积学和年代学方法,论证了该巨型堆积体为中更新晚期形成的残留稳定堆积体,为坝址选择提供了依据;付博等(2008)对该堆积体的堵江事件也进行了研究。

(5) 滇西南大通道

滇西南大通道是指通过滇西南与东南亚各国联系的集能源、交通、水力开发合作等于一体的重要经济廊带。目前,以大理—瑞丽铁路为代表的西南泛亚铁路正在规划实施,为向西南入缅甸、向西经密支那入印度奠定了基础;从云南经老挝至泰国北部清莱省清孔县的铁路建设正在酝酿;西南地区保山—瑞丽高速公路工程建设也正在加紧实施;油气管道也在这个地区规划;以澜沧江小湾电站为代表的水电工程逐步进入实施阶段。云南省交通设计院、铁道第二勘察设计院、中石油勘察设计部门等在这一通道沿线进行了详细的工程地质勘察;中国地质科学院地质力学研究所和云南省相关单位对这一通道沿线的地质灾害进行了专门调查研究;云南省地震局等对龙陵地震的地震地质灾害进行过专门调查和研究。

由于本区地处南亚热带和边缘热带气候区,第四纪红土化作用强,红土风化壳厚度大,西南大通道建设中的路基、边坡、管道等大多开挖在红土风化壳中,由于残积土和全强风化岩厚度大、工程性质软弱,在降雨作用下常发生滑坡灾害,破坏后的边坡不得不采用强力的工程加固措施。我们近年对沿线红土化作用的微观研究发现,红土化程度不仅有明显的纬度效应,且受母岩成分、结构影响十分明显,花岗岩表层的红土比石灰岩、泥灰岩表层的红土化程度强得多,相应地导致花岗岩、砂岩的风化壳厚度比碳酸盐岩、页岩要大得多。这一发现有助于认识边坡、地基岩土工程性质的空间变化规律,指导工程评价、工程处理方案的选择。

滇西南地区强烈的新构造活动形成了不少新近纪断陷盆地,如保山盆地、潞西盆地、镇安盆地、腾冲盆地、龙川江盆地等,虽然现在湖泊已消亡,但不少盆地中仍然有软粘土的分布。在盆地边缘数十米的台地分布有 N_1-Q_1 河湖相地层,强烈的红土化作用使原本弱成岩的硬土/软岩变成工程性质

很差的残积土或强风化岩，其中的粘土层可能具有显著的膨胀性。最近，我们在腾冲盆地芒棒组（N₁）中发现了强烈蒙脱石化的硅藻土类强膨胀性地层，这是以往我国膨胀岩土研究中从未遇到的生物地层。

本区还是察隅—腾冲锡、钨、铜、铅、锌、金等热液硫化矿喜马拉雅成矿带分布区之一，亦有不同地质时代的含煤地层分布。在上述硫化矿分布区的坡体表部尤其是坡脚处的硫化矿氧化带，在干燥季节经常形成强酸性、强溶解性、强腐蚀性的硫酸盐沉淀物，现已发现有大量泻盐、铁铝矾、叶绿矾等化学析出物，雨季溶解后可能对环境水造成污染，并对混凝土构（建）筑物产生腐蚀，这是一种特殊的第四纪工程地质环境问题。

（6）滇藏铁路

滇藏铁路是我国继青藏铁路之后的又一世纪性地质工程，其工程地质条件之复杂、工程地质问题类型之多、难度之大远远超出了青藏铁路。20 世纪 80 年代以来，铁道第二勘测设计院开展了大量工程地质勘察工作，保证了滇藏铁路大理—丽江段的正常运营和丽江—香格里拉段的规划设计。在中国地质调查局国土资源大调查项目支持下，中国地质科学院地质力学研究所开展了滇藏铁路沿线地壳稳定性和重大工程地质问题的系统研究工作，取得了大量成果（张永双等，2009），在区域第四纪地质、新构造、第四纪活动断裂、工程地质问题等方面有了重要进展，并在铁路沿线第四纪工程地质研究方面取得了深层次的基础性研究成果，初步形成了本区第四纪工程地质学研究框架。

综上所述，国内外第四纪地质、工程地质和岩土工程界对第四纪工程地质问题都给予了高度的重视，并且在运用第四纪地质研究成果认识工程地质问题的形成机理、规律和探寻解决途径、处理措施等方面发挥了重要的指导作用。但是相对而言，由于工作条件限制，前期工作积累较少，青藏高原东南缘第四纪工程地质工作相对薄弱，需要在今后结合工程实践不断地提升和深化。

三、研究思路 and 主要研究内容

青藏高原作为全球最年轻的高原，由于特殊的形成和演化过程、世界屋脊的自然景观及其对全球环境变化的影响，成为全世界地球科学家的热点研究地区和地球科学的前沿领域。包括西南三江地区在内的青藏高原东南缘又是研究青藏高原的重中之重，仅就第四纪工程地质学而言，这里存在着极为广泛和极有特色的研究领域。本书试图根据已有的工作基础，对一些有地域特色的方面特别是一些特殊第四纪沉积物的工程地质方面进行总结。

本书的研究思路可以概括为：基于实际调查资料和工程实例，从青藏高原东南缘第四纪地质作用类型、构造地貌、地质演化研究入手，着重阐述第四纪沉积物（堆积物）的主要类型和一般分布规律，简要总结青藏高原东南缘开展第四纪地质研究的方法和途径，为工程地质研究、工程地质勘察和综合分析提供纲要性背景知识。在此基础上，以青藏高原东南缘典型第四纪地质作用及其产物（包括冰川堆积物、红粘土、河床深厚覆盖层、湖相沉积物等）为例，结合常规和非常规测试、数值模拟等技术手段，研究和总结上述具有地域特色的第四纪沉积物的发育特征、工程地质特性及相关的工程地质环境地质问题或地质灾害形成机理，为重大工程安全、减灾防灾和地质环境保护提供技术支撑。

本书主要研究内容和撰写分工如下：

绪论部分由张永双执笔。结合当前青藏高原东南缘重大工程建设需求和工程地质学的发展趋势，提出了加强第四纪地质学和工程地质学交叉研究的重要性。在本领域国内外研究动态评述的基础上，简要介绍了本书的研究思路 and 主要内容。

第一章——青藏高原东南缘第四纪地质概述，由赵希涛、曲永新、张永双执笔。主要论述了青藏高原东南缘的区域地质背景、与工程地质学有关的第四纪地质学概念和第四纪地质研究方法，对青藏高原东南缘第四纪地质基本特征和典型第四纪沉积物的一般分布规律进行了研究和总结，为第四纪工