

© 吴珍汉 胡道功 吴中海 等著

青藏高原中段 活动断层及诱发地质灾害



地质出版社

青藏高原中段活动断层及 诱发地质灾害

吴珍汉 胡道功 吴中海 赵希涛 王 薇 著
刘琦胜 叶培盛 王连捷 彭 华 周春景

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书通过大比例尺地质填图、活动断层勘测、地质灾害调查、探槽工程揭露和不同方法的年代学测试分析,对青藏高原中段活动断层及诱发地质灾害开展了比较系统的研究工作。主要内容包括区域构造背景、第四纪沉积及时代、活动断层鉴别标志与勘测方法、典型伸展断层地质特征与运动速率、重要走滑断层地质特征与运动速率、断层诱发地质灾害及工程危害、移动冰丘及灾害效应、构造活动性评价及工程稳定性区划。本书的出版将为青藏铁路沿线地质灾害防治提供地质依据,对高寒环境灾害动力学与青藏高原大陆动力学的发展将起到积极的推动作用。

本书可供从事区域地质调查、工程地质勘测、地质灾害防治、大陆动力学研究的专业技术人员和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原中段活动断层及诱发地质灾害/吴珍汉等著.
北京:地质出版社,2005.1

ISBN 7-116-04334-9

I. 青... II. 吴... III. ①青藏高原—活动断层—研究②青藏高原—地质灾害—研究 IV. ①P542②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 001335 号

QINGZANGGAOYUANZHONGDUAN HUODONGDUANCENG JI YOUFADIZHIZAIHAI

组稿编辑:王大军

责任编辑:白 铁 李凯明

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324579(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:24.75 图版:8 页

字 数:620 千字

印 数:1—800 册

版 次:2005 年 1 月北京第一版·第一次印刷

定 价:100.00 元

ISBN 7-116-04334-9/P·2547

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

序 言

青藏高原处于印度大陆俯冲产生的强烈挤压环境,是中国大陆现今构造活动性最强的地区,发育不同性质的活动断裂(Tapponnier et al., 1977; Molnar et al., 1978; Armijo et al., 1989; Kidd et al., 1990; Wu et al., 2004),频频发生7级以上强烈地震(吴章明等, 1992; Lin et al., 2002)。青藏高原的地壳变形、断裂运动、地震活动与青藏高原形成演化存在密切关系,成为国际地球科学领域的长期关注的前沿性科学问题(Tapponnier et al., 2001; Wang et al., 2001; Lin et al., 2002; Taylor et al., 2003)。Tapponnier et al. (1975, 1976, 1982)应用遥感等资料,分析青藏高原断裂运动特征,提出地壳东向挤出和滑移线场模式。胡海涛等(1982)、易明初(1982)对青藏公路沿线活动构造体系进行过初步划分,对部分活动断裂进行过比较详细的野外观测和钻探工程揭露。韩同林(1987)出版了《青藏高原活动构造》专著,提出应用树木年龄估算构造活动时代的新方法,分析活动构造对地震、温泉、湖泊、矿产资源的控制作用。Amijio et al. (1986, 1989)研究了青藏高原南部右旋走滑断裂的地质特征,估算了重要断裂的走滑位移、活动时代和运动速度。西藏自治区科学技术委员会于1988年组织专家对1411年羊八井8级地震、1951年崩错8级地震、1952年九子拉7.5级地震及发震断裂进行了调查研究,编制了小比例尺的地震烈度分布图。Kidd et al. (1990)对青藏公路沿线活动断裂的地质特征、形成时代和运动速度进行过观测。国家地震局地质研究所(1992)对念青唐古拉山东麓伸展活动断裂与崩错走滑活动断裂的位移、时代、速度及地震遗迹进行过比较系统的调查和研究,出版了《西藏中部活动断层》专著。吴章明等(1993)、任金卫等(1993)对青藏高原北部的部分活动断裂进行过观测和分析。汪一鹏(2001)对青藏高原活动构造基本类型、部分断裂分段活动特征和地壳形变规律进行过分析和总结。张培震等(2003)依据GPS观测资料分析阿尔金断裂、昆仑山断裂、嘉黎断裂、雅鲁藏布江断裂的现今运动速度,为青藏高原现今地块运动和地壳变形提供了重要的动力学约束。Taylor et al. (2003)研究了班公-怒江缝合带共轭走滑断裂活动与同期地壳东西向伸展、南北向缩短的相互关系,提出了青藏高原中部小块体变形产生地壳东向滑移和东向挤出的新认识。吴珍汉等(2003)通过区域地质调查和探槽工程揭露,研究了青藏高原南部当雄-羊八井盆地活动断裂,揭示了青藏高原北部风火山断裂、可可西里断裂与乌丽断裂第四纪晚期活动的新证据,估算了典型断层晚更新世-全新世运动速度。中国地震局工程地震研究中心组织专家,于2000年12月~2002年8月,对青藏铁路沿线开展了1:100万地震烈度区划,对部分重点地段进行了1:25万地震烈度区划;对区域活动断裂及地震危险性进行了鉴定和分析,为青藏铁路抗震减灾提供了科学依据。

青藏高原还是地球表面最大、最高的大陆高原,平均海拔为4500~5000m,发育特殊的大陆性气候环境,低温、干燥、空气稀薄、昼夜温差大、紫外线强。唐古拉山以南地区年平均气温为7~8℃,冬季平均最低气温约-4℃。唐古拉山以北地区年平均气温为

-4 ~ -5℃, 冬季平均最低气温为 -10 ~ -15℃; 尤其在寒冬季节, 白天气温低达 -20 ~ -35℃, 夜晚气温低达 -30 ~ -40℃。青藏高原北部地壳表层常年处于冰冻环境, 形成厚数米至百余米的冻土层; 冬季广泛发育不同形态、不同规模、不同特点的冰锥或冰丘, 局部发育移动冰丘。因为冻土和冰丘能够产生显著灾害效应, 威胁铁路、公路、输油管道、通讯光缆及房屋、桥梁、涵洞的工程安全, 因此, 颇受国内外地质学家和工程地质学界的关注。但国外地质学家侧重对高纬度地区的冰丘成因和融冻效应进行观测和研究, 对中低纬度地区高寒环境的冰丘和冻胀灾害研究相对较少。国外代表性研究工作, 如 Bostrom (1967) 论述了常年冻土区的地下冻融和地表变形关系; Thom (1978) 通过观测地表裂隙-冻融塌陷-冰丘演化相互关系, 分析了高纬度地区小型冰丘的形成机理; Embleton and King (1968) 和 Mackay (1977, 1986) 认为较大规模的冰丘发育与地下冰层膨胀、地下水压力变化存在成因联系; Barosh (1999) 在高纬度地区观测到寒冬季节因不均匀冻胀产生的冰层爆破 (froquake) 现象; Hamilton and Obi (1982) 对阿拉斯加山岳冰丘进行了观测; Yoshikawa and Nakamura (1996) 对地球极区冰丘的生长发育周期进行了观测和分析。中国地质学家对青藏高原冻土进行了长期观测和系统研究, 在高寒冻土地区冻融灾害的研究方面积累了数十年的观测资料。1975 ~ 1977 年, 国家组织铁道部第一勘察设计院、地质部地质力学研究所与水文地质工程地质研究所、中国科学院兰州冻土研究所、青海省地质局第一水文地质大队等单位, 联合开展青藏公路格尔木—那曲段沿线 1:20 万水文地质与工程地质普查、冻土调查研究及青藏铁路初步选线工作。青海省第一水文地质大队主要承担野外钻探和地球物理勘探任务, 水文地质工程地质研究所承担冻土地区地下水观测和水文地质研究任务, 地质力学研究所主要承担第四纪地质、活动构造与冻土灾害研究任务, 铁道部第一勘察设计院和兰州冻土研究所对青藏铁路和青藏公路沿线的冻土结构、地温变化和工程地质条件进行了观测, 积累了大量宝贵资料。部分成果发表于《青藏高原地质文集》, 成为青藏高原工程地质研究的经典文献; 代表性论文包括: 胡海涛等 (1982) 将青藏高原北部冻胀丘划分为冰锥、冰丘、爆炸性充水鼓丘三种不同类型; 王邵令 (1981) 对清水河两岸冻胀丘分布规律和控制因素进行了观测和分析; 范溶河等 (1982) 观测研究了唐古拉山南侧央尕尔纳茸盆地地下水运动与冻胀丘分布关系; 尚建义等 (1982) 探讨了青藏公路 62 道班冰丘的形成条件和演化过程。胡海涛等 (1982)、易明初 (1982)、郭东信 (1985) 对青藏高原构造体系与冰丘分布的相互关系进行了探讨和分析。在国家作出尽快修建青藏铁路的重大决定后, 2001 年, 铁道部第一勘察设计院组织数千人的钻探队伍, 奔赴青藏高原, 开展青藏铁路格尔木—拉萨段全线钻探、物探、工程地质勘测和冻土温度监测, 进行了青藏高原北部铁路沿线的冻土区划、工程稳定性分析及冻融冻胀灾害调查。

尽管如此, 前人对活动断层产生地质灾害的研究, 主要集中在地震领域, 仅有少量论著涉及活动断层蠕滑导致工程地质问题 (Keller and Pinter, 1996)。国内外尚缺乏青藏高原活动断裂及诱发地质灾害的大比例尺系统勘测工作, 对青藏铁路沿线活动地块内部或次级地块边界、规模相对较小的活动断层重视不够, 对重要断层的活动时代和运动速度仍存在不同认识, 对断层诱发地质灾害的勘测研究程度偏低, 对活动断层与地表环境耦合产生的移动冰丘及灾害效应缺乏研究, 对青藏铁路沿线的地壳稳定性缺乏定量评价和科学分析, 不能适应青藏高原大陆动力学理论发展、青藏铁路沿线地质灾害防治及西部重大工程

建设的需要,亟待加强工作。

2001年6月~2002年8月,在中国地质科学院、中国地质调查局与铁道部联合资助下,地质力学研究所组织所内外专家,紧密围绕青藏铁路建设和地质灾害防治需要,本着严谨、求实的科学态度,发扬团结协作与艰苦奋斗的精神,克服高原缺氧、交通条件差、气候环境恶劣、后勤保障困难、工作生活条件艰苦等各种困难,开创了青藏高原冬季大规模野外施工和地质勘探工作的先例,系统勘测了青藏铁路沿线活动断层及其诱发的地质灾害,取得了丰硕成果。通过大比例尺路线地质调查与地表观测,结合地球物理探测和探槽工程揭露,测编了青藏铁路望昆—拉萨段1:2000活动断层与地质灾害分布图,编制了青藏铁路格尔木—拉萨段沿线ETM彩色遥感影像图(1:10万)、青藏铁路格尔木—唐古拉段活动断层分布图(1:10万)、青藏铁路唐古拉—拉萨段活动断层分布图(1:10万)和青藏铁路沿线活动断裂与地震分布图(1:100万),完成了昆仑山隧道、风火山隧道和羊八井隧道的地应力测量及工程稳定性评价任务。相关图件资料、观测成果和勘测报告经过专家评审验收后,相继提交给铁道第一勘察设计院参考使用,为青藏铁路完善设计方案及地质灾害防治提供了地质依据。

2002年9月~2004年8月,在中国地质调查局资助下,地质力学研究所包括作者在内的项目骨干在圆满完成当雄幅1:25万区域地质调查(2000年1月~2002年12月)、青藏铁路沿线活动断层勘测与隧道地应力测量(2001年6月~2002年8月)等项基础地质工作之后,再接再厉,选择重要活动断层和典型地质灾害,进行深化研究。对重要活动断层,通过野外关键构造部位的探槽工程揭露和第四纪地质填图,重点开展构造地貌观测、断层结构分析、断错位移测量、断层分段活动特征研究及古地震事件鉴别。室内进行不同方法的年代学分析,主要应用ESR测年、热释光测年、光释光测年、U系测年、 ^{14}C 测年、孢粉分析等技术方法,采用国际标准程序,在国内权威实验室完成了各项测试分析任务,测定断层活动期次和断错时代。其中 ^{14}C 测年、热释光测年由地震局地质研究所相关实验室协助完成,光释光测年由首都师范大学光断代实验室完成,U系等值线测年由中国科学院地质与地球物理研究所年代学实验室协助完成,ESR测年由地震局地质研究所年代学实验室和中国地质科学院地质力学研究所ESR实验室协助完成,孢粉分析由中国科学院地质与地球物理孢粉实验室协助完成。根据断层年龄测试结果,结合断层位移观测资料,估算第四纪不同时期活动断层的平均运动速度;应用青藏公路沿线GPS观测资料,结合有限元反演法数值模拟计算,分析青藏铁路沿线重要断层的现今运动速度和活动强度。对活动断层诱发的典型地质灾害,通过不同年份、不同季节的野外对比观测,研究断层诱发地质灾害的类型、特征、形成演化、变迁过程及工程危害,为分析青藏铁路沿线断层诱发地质灾害的孕育、发展、演化和机理积累了宝贵的实测资料。在活动断层观测、地质灾害调查、地壳热动力和地震资料分析、数值模拟的基础上,综合考虑不同地质因素,采用统计分析和神经网络两种方法,计算分析了青藏高原中段现今构造活动性,定量评价了青藏铁路沿线区域地壳稳定性。

本书为地质力学研究所青藏铁路沿线活动断层调查与地应力测量项目的部分成果,目的是对青藏高原中段的活动断层及其诱发地质灾害研究工作进行阶段性总结。全书共分七章,第一章由吴珍汉、叶培盛编写,第二章由赵希涛、吴中海、刘琦胜编写,第三章由吴珍汉、王连捷、彭华编写,第四章由吴中海、赵希涛编写,第五章由吴珍汉、胡道功、吴

中海、刘琦胜编写，第六章由吴珍汉、胡道功编写，第七章由吴珍汉、王薇、周春景编写。前言、结束语和英文摘要由吴珍汉撰写。参加地质力学研究所青藏铁路活动断层勘测与地应力测量项目的研究人员还有：廖椿庭研究员、区明益研究员、张春山博士、吴满路副研究员，他们完成了隧道地应力测量任务；郑达兴研究员、王连庆研究员和徐刚博士承担了遥感资料处理并提供了 ETM 遥感影像图；吴树仁研究员、何锋博士承担了 2001 年 7 月~2002 年 2 月昆仑山活动断裂的野外勘测任务；韩金良博士参加了 2002 年 1~2 月可可西里—风火山段活动断层的野外观测；张永双博士承担了 2002 年 1~2 月唐古拉山活动断裂与地质灾害调查任务；江万博士、柯东昂高级工程师承担了 2002 年 1~2 月青藏铁路羊八井—那曲段活动断层野外勘测任务；李增水高级工程师和夏浩东工程师参加了部分探槽的工程揭露和编录工作；李国歧工程师参加了综合地球物理勘探工作；乔子江高级工程师、王红才研究员参加了数值模拟研究工作；房子玉副处长和伍刚工程师承担了野外工作期间的后勤管理任务。项目全体人员的共同努力和付出的辛勤劳动为本书相关研究奠定了必要的工作基础。

本书的调查、勘测与研究得到了国土资源部、中国地质调查局、铁道部、青藏铁路项目办公室、中国地震局和中国地质科学院各级领导的关心和支持，得到了铁道第一勘测设计院、中国地质科学院和地质力学研究所等单位提供的帮助。国土资源部副部长兼中国地质调查局局长寿嘉华、国土资源部副部长汪民、中国地质科学院院长张彦英对青藏铁路沿线活动断层调查勘测与地应力测量工作给予了高度关注和长期支持。中国地震局宋瑞祥局长和当时任中国地质调查局副局长的汪民博士、国土资源部国际合作与科学技术司崔岩副司长、中国地质科学院张陟副书记、中国地质调查局总工办主任谭永杰博士亲赴青藏铁路沿线指导野外工作。中国地质科学院赵文津院士、李廷栋院士、肖序常院士、崔盛芹教授，中国地震局马宗晋院士、丁国瑜院士、邓起东院士、徐锡伟研究员、张培震研究员、刘光勋研究员、谢富仁研究员、陈群策研究员，中国科学院地质与地球物理研究所刘嘉麒院士、钟大赉院士、曲永新研究员、孙广忠研究员，铁道部王麟书总工程师、何华武总工程师、蔡申夫高级工程师、何振宁研究员，铁道部第一勘察设计院楼文虎高级工程师、张钊高级工程师、冉理总工程师，中国地质环境监测院刘传正研究员及美国新构造与地震工程专家 Patric J. Barosh 教授、康乃尔大学地球物理学家 Larry Brown 教授、德国活动构造专家 Peter Blisniu 博士在不同方面分别给予过咨询和指导。铁道部第一勘察设计院吴云生副总工程师、铁道部鉴定中心丰明海高级工程师和地质力学研究所易明初研究员长期给予了技术指导。中国地质科学院赵逊副院长、董树文副院长，中国地质调查局水工环部殷跃平主任、张作辰处长，中国地质调查局科技外事部彭齐鸣主任、叶建良副主任、刘凤山副处长与基础调查部庄育勋副主任，中国地质科学院科技处李贵书处长、熊嘉育副处长，地质力学研究所赵越副所长对相关调查和研究工作给予了大力支持和精心指导。地质力学研究所杨万来所长、杨玉东副所长、科技处赵志中处长、雷伟志副处长、所长办公室张志国主任、财务部门、医务室及项目组全体人员为青藏铁路沿线活动断层与地质灾害调查研究工作给予了关心和帮助。西藏地勘局职工培训中心为野外工作提供了司机、技术工人、后勤人员和车辆。对各级领导、各位专家、同事同行的关心、支持、指导和帮助，表示崇高的敬意和衷心的感谢！

目 录

序 言

第一章 区域地质构造背景	(1)
第一节 地壳结构与构造型式	(1)
第二节 青藏高原隆升时代	(12)
第三节 地貌类型与山脉隆升过程	(18)
第四节 区域构造动力学环境	(31)
第二章 第四纪地质	(36)
第一节 第四纪冰川沉积	(36)
第二节 第四纪河流沉积	(47)
第三节 第四纪湖泊沉积	(52)
第四节 第四纪地层时代	(59)
第五节 晚第四纪环境演化	(64)
第三章 活动断层鉴别标志与勘测方法	(81)
第一节 活动断层定义与鉴别标志	(82)
第二节 活动断层勘测方法	(92)
第三节 活动断层研究方法	(107)
第四节 青藏铁路沿线活动断层分类	(113)
第四章 典型伸展活动断裂的地质特征	(125)
第一节 温泉盆西边界活动断裂系	(125)
第二节 安多-错那湖活动断裂系	(137)
第三节 谷露-桑雄盆西边界活动断裂系	(145)
第四节 当雄-羊八井活动断裂系	(162)
第五章 典型走滑活动断裂的地质特征	(188)
第一节 昆仑山活动断裂系	(188)
第二节 可可西里活动断裂系	(207)
第三节 风火山活动断裂系	(215)
第四节 乌丽活动断裂系	(223)
第五节 通天河活动断裂系	(231)
第六节 崩错活动断裂带	(238)
第六章 活动断层诱发地质灾害	(251)
第一节 地震活动及灾害效应	(251)
第二节 断层诱发不均匀冻胀及灾害效应	(271)
第三节 移动冰丘及灾害效应	(287)

第四节	构造裂缝及工程危害	(303)
第五节	滑坡与泥石流	(310)
第七章	区域地壳稳定性评价	(318)
第一节	地壳稳定性影响因子及相互关系	(319)
第二节	现今构造应力场的数值模拟	(332)
第三节	现今构造活动性定量评价	(342)
第四节	区域地壳稳定性分析	(350)
结束语		(358)
英文摘要		(362)
参考文献		(374)
图版说明及图版		(384)

Contents

Preface

Chapter 1 Regional Tectonic Setting	(1)
1.1 Crust Structure and Tectonic Style	(1)
1.2 Uplift Period of the Tibetan Plateau	(12)
1.3 Geomorphic Types and Uplift Process of Mountains	(18)
1.4 Geodynamic Constrain for Tectonics	(31)
Chapter 2 Quaternary Geology	(36)
2.1 Quaternary Glacial Deposits	(36)
2.2 Quaternary Fluvial and Alluvial Deposits	(47)
2.3 Quaternary Lacustrine Deposits	(52)
2.4 Time of Quaternary Deposits	(59)
2.5 Environment Evolution in Late Quaternary Period	(64)
Chapter 3 Identification and Prospecting Methods of Active Faults	(81)
3.1 Terms and Identification of Active Faults	(82)
3.2 Techniques for Exploration of Active Faults	(92)
3.3 Methods for Studying Active Faults	(107)
3.4 Classification of Active Faults along the Golmud-Lhasa Railway	(113)
Chapter 4 Geological Features of Active Extensional Faults	(125)
4.1 West Boundary Fault System of Wenquan Graben	(125)
4.2 Active Fault System of Ando-Cuonahu Graben	(137)
4.3 West Boundary Fault System of Gulu-Sangxiong Graben	(145)
4.4 Active Fault System of Damxung-Yangbajain Graben	(162)
Chapter 5 Geological Features of Active Strike-Slip Faults	(188)
5.1 South Kunlun Active Fault System	(188)
5.2 Hohxil Active Fault System	(207)
5.3 Fenghuoshan Active Fault System	(215)
5.4 Wuli Active Fault System	(223)
5.5 Tongtianhe Active Fault System	(231)
5.6 Bengcuo Active Fault System	(238)
Chapter 6 Geological Hazards Posed by Active Faults	(251)
6.1 Earthquakes and Seismic Hazards	(251)
6.2 Deformation and Hazard Effects of Freezing and Thawing	(271)
6.3 Features and Hazards of Migrating Pingo	(287)

6.4	Features and Hazards of Tectonic Fractures	(303)
6.5	Landslides and Mudflow	(310)
Chapter 7	Evaluation of Regional Crust Stability	(318)
7.1	Factors Related to Crust Stability	(319)
7.2	Modelling of Present-day Tectonic Stress Field	(332)
7.3	Assessment on Tectonic Activity of Present-day Crust	(342)
7.4	Analyses of Regional Crust Stability	(350)
Review and Conclusion		(358)
English Summary		(362)
References		(374)
Explanation and Plates		(384)

第一章 区域地质构造背景

青藏高原是世界上最大、最高的大陆高原，素有“地球第三极”之称，平均海拔大于4500m。青藏高原总体呈近东西方向展布，东西长达2000km，南北宽达1000~1400km，面积超过 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，主要由高原内部盆地、山脉、平原、低山丘陵与周缘山系组成。青藏高原发育元古宙、古生代、中生代、新生代不同时期的岩石地层和多期区域性构造热事件，经历了长期、复杂的地质演化历史和构造变形过程，逐步形成颇具特色的地壳结构和构造地貌格局，对新生代晚期全球气候环境变迁产生过重大影响（England and Houseman, 1998）；现今仍发育强烈的构造运动和地震活动，是地球表面现今构造活动性最强的构造单元，成为国际地球科学领域公认的大陆动力学野外实验室和地质学家关注的热点研究地区（Tapponnier and Molnar, 1976；Dewey et al., 1988；尹安, 2001；Tapponnier et al., 2001）。大量观测资料表明，青藏高原复杂的地质构造与不同时期特提斯古大洋的形成演化存在密切关系（任纪舜等, 1981；潘裕生等, 1998；肖序常等, 2000）。

第一节 地壳结构与构造型式

青藏高原发育复杂的地壳结构和多种类型的构造型式。前人对青藏高原地壳结构组成和地质构造开展了长期的探测和研究工作，积累了丰富的地质资料，不断提高对青藏高原的认识水平。尤其是20世纪90年代开展的国际合作INDEPTH深部综合探测（Zhao et al., 1993；Nelson et al., 1996）和近年来开展的青藏高原空白区1:25万区域地质调查，取得了高精度观测资料和多方面的重要进展，引起国内外学者的广泛关注（中国地质调查局, 2004），对大陆动力学发展起了重要的促进和推动作用。兹综合深部地球物理探测成果和区域地质调查、构造观测资料，分析青藏高原不同构造单元的地质发展历史、地壳结构与区域构造样式。

一、构造单元划分与地质发展简史分析

青藏高原自早古生代以来，经历了多期特提斯古大洋板块俯冲和区域构造运动，发生了多期强烈的构造变形、岩浆侵入、火山喷发和区域变质事件。在青藏高原内部形成了5条总体呈近东西向展布、规模巨大的板块缝合带。在缝合带之间发育相对稳定的构造块体。

青藏高原内部主要缝合带包括晚白垩世—始新世雅鲁藏布江缝合带、侏罗纪—早白垩世班公—怒江缝合带、三叠纪可可西里—金沙江缝合带、晚古生代阿尼玛卿—南昆仑缝合带与早古生代昆仑山缝合带（图1-1）。沿区域性板块缝合带，发育不同时期的蛇绿岩套、混杂堆积、构造变形与高压变质带。不同时期蛇绿岩套代表不同时期古洋壳残片，一般呈构造岩片方式赋存于不同时期的缝合带内。早古生代，原特提斯古大洋板块沿昆仑山缝合

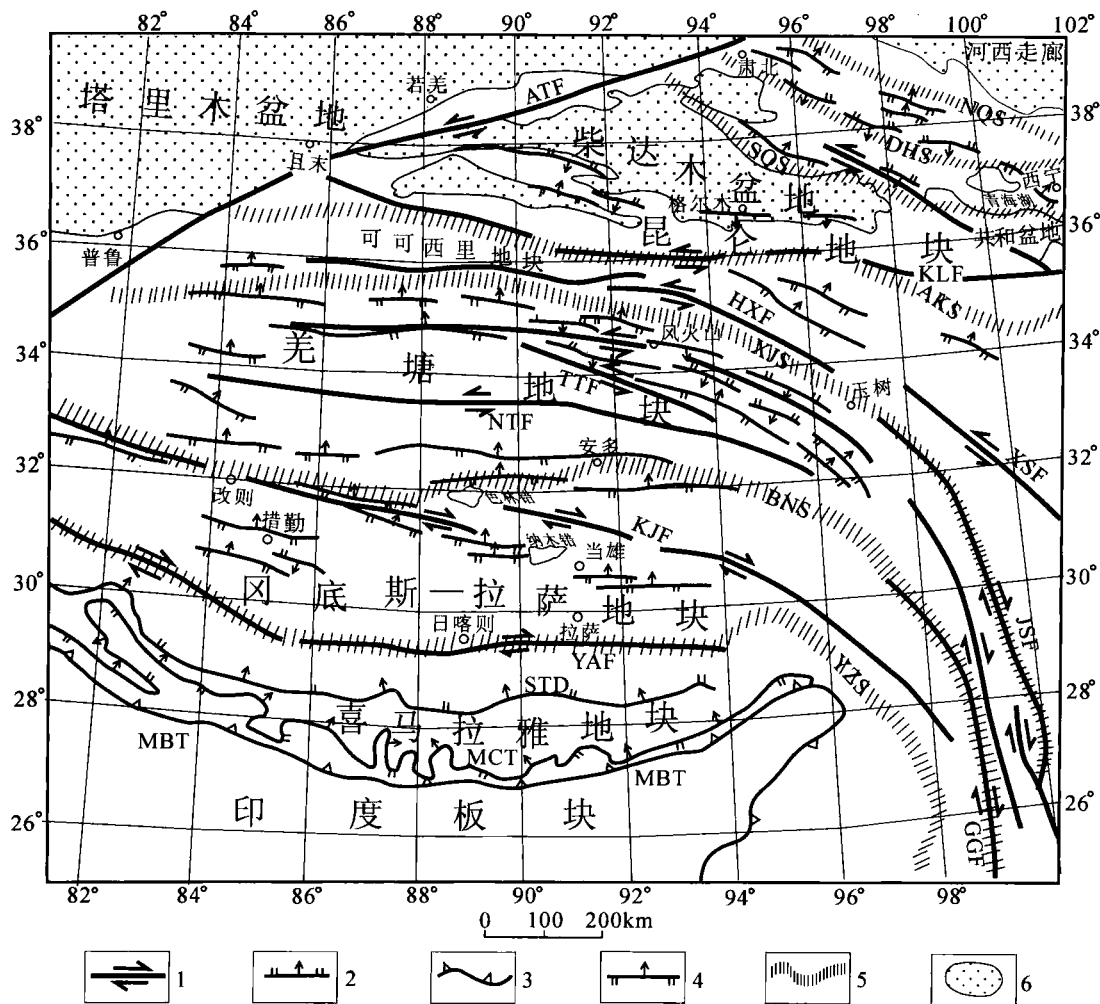


图 1-1 青藏高原构造区划略图

Figure 1-1 Sketch map showing tectonic framework of the Tibetan Plateau

1—活动走滑断裂；2—正断层；3—板块边界；4—逆断层；5—缝合带；6—沉积盆地。ATF—阿尔金走滑断裂；KLF—昆仑走滑断裂；HXF—可可西里走滑断裂；XSF—鲜水河活动断裂；TTF—通天河活动断裂；NTF—唐古拉山活动断裂；KJF—嘉黎-喀喇昆仑断裂；YAF—雅鲁藏布江活动断裂；JSF—金沙江活动断裂；GGF—高黎贡断裂；STD—藏南拆离系；MCT—主中央逆冲断裂；MBT—主边界逆冲断裂。NQS—北祁连缝合带；DHS—党河南山缝合带；SQS—南祁连缝合带；AKS—阿尼玛卿-昆仑缝合带；XJS—可可西里-金沙江缝合带；BNS—班公-怒江缝合带；YZS—雅鲁藏布江缝合带（缝合带名称及位置引自尹安，2001）

带发生俯冲消减事件，在昆仑山地区形成绿片岩相—角闪岩相区域变质作用与广泛的花岗质岩浆侵位活动。晚古生代，古特提斯古大洋板块的俯冲消减导致昆仑山及邻区海西期中酸性岩浆侵位和古生代地层的区域变质作用，形成大型韧性剪切带和近东西向紧闭褶曲、片理化带和劈理化带。晚二叠世—三叠纪，由于古特提斯古大洋板块的俯冲消减，形成可可西里—金沙江缝合带，在双湖—龙木错地区、可可西里地块和昆仑山南部形成海西期—印支期中酸性岩浆侵入、褶皱变形、韧性剪切带和区域浅变质作用。侏罗纪—早白垩世，

新特提斯北大洋板块向北俯冲于古欧亚大陆板块之下,向南俯冲于念青唐古拉古陆块之下,在班公-怒江缝合带形成侏罗纪蛇绿岩套、混杂堆积及大量逆冲推覆构造与褶皱构造,在纳木错-班戈地区形成古岛弧,产生广泛的浅变质作用、岛弧火山活动和中酸性岩浆侵位事件。晚白垩世—始新世,新特提斯南大洋板块沿雅鲁藏布江缝合带发生俯冲消减,形成长达千余公里的雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带及其北侧冈底斯中酸性岩浆带,导致古新世—渐新世林子宗群岛火山岩广泛喷发及上白垩统一古新统的褶皱变形事件。不同时期特提斯古大洋板块的俯冲消减及相关构造热事件主要发生于板块缝合带与古岛弧带,而对远离缝合带和古岛弧的广大地区则影响较小。特提斯古大洋板块的扩张、俯冲、消减对青藏地区古生代、中生代和新生代早期的地质构造演化历史具有重要的控制作用。

自 50 ~ 45Ma 开始发生的印度板块—欧亚板块陆-陆碰撞事件,是地质历史时期最重要的全球性构造事件。其影响范围、深度、广度及大陆动力学意义是任何时期特提斯古大洋板块的俯冲事件都无法比拟的。印度大陆板块沿喜马拉雅构造带俯冲于欧亚大陆板块之下,在喜马拉雅山前形成印度大陆板块俯冲带;在喜马拉雅山地区形成巨型逆冲推覆构造系统(图 1-1),包括主中央逆冲断裂系(MCT)与主边界逆冲断裂系(MBT),在 MCT 北侧形成巨大的藏南拆离滑脱构造体系(STD),构成印度-欧亚大陆板块之间的重要碰撞造山带。

不同时期的板块俯冲消减带将青藏高原分割成不同构造块体。依据区域构造演化与地壳结构特点,以缝合带、俯冲带为界,将青藏高原划分为六个主要块体,自南向北依次为喜马拉雅地块、冈底斯-拉萨地块、羌塘地块、可可西里-巴颜喀拉地块、昆仑-柴达木地块与祁连地块(图 1-1)。在青藏高原南侧分布有印度陆块,在青藏高原北侧分布有塔里木地块。青藏地区不同时期各构造块体的地质发展历史、古构造环境转换与不同时期特提斯古大洋板块的扩展、俯冲、拼合存在动力学成因联系。

根据前人资料,北昆仑地区在早古生代时期地处欧亚大陆南部边缘,中昆仑地区在加里东期和海西期—印支期均处于古岛弧环境;喀喇昆仑-羌塘地块在古生代属冈瓦纳古大陆的一部分(潘裕生,1990,1992,1998)。自古生代开始,欧亚大陆地壳不断向南增生,特提斯洋不断向南退缩,形成不同沉积建造和不同时代的蛇绿混杂岩带。古生代海相沉积分布于包括祁连、昆仑在内的整个青藏地区。晚古生代—三叠纪,沿可可西里-金沙江构造带发生古特提斯洋板块的快速俯冲事件,形成可可西里-金沙江板块俯冲带及其北侧岛弧带,至晚三叠世形成可可西里-金沙江板块缝合带,导致古特提斯大洋逐步退缩到可可西里-金沙江缝合带以南地区;可可西里-金沙江缝合带以北地区逐步隆升成陆。侏罗纪时期,羌塘地块普遍发育浅海相沉积,可可西里-巴颜喀拉地块为陆相沉积环境;大约自中侏罗世开始,特提斯洋板块向南、北两侧发生快速俯冲事件,形成班公-怒江缝合带和班戈-纳木错古岛弧,导致羌塘地块逐步褶皱隆升;至早白垩世羌塘地块整体转变成陆相环境,特提斯洋退缩到班公-怒江以南地区。白垩纪时期,青藏北部地区处于陆相环境,冈底斯-拉萨地块处于海相环境;大约自晚白垩世开始,特提斯洋板块沿雅鲁藏布江发生快速俯冲事件,沿冈底斯构造-岩浆带发生强烈构造-热事件,导致冈底斯-拉萨地块逐步褶皱隆升成陆,形成雅鲁藏布江缝合带。古近纪,特提斯洋退缩到喜马拉雅以南地区;至始新世早中期约 45 ~ 50Ma,特提斯洋在青藏全境消亡;随后发生印度板块-欧亚板块陆-陆碰撞事件。渐新世末期—中新世早期,印度大陆板块开始向北俯冲,形成喜马拉雅山主

中央断裂 (MCT) (Meigs et al. , 1995; Burbank et al. , 1996)。中新世中晚期形成主边界断裂 (MBT) (Zeitler et al. , 1985; Harrison et al. , 1992), 导致喜马拉雅山与青藏高原的地壳发生巨量缩短、增厚与快速隆升, 逐步形成现今构造-地貌格局 (吴珍汉等, 2003c)。

二、地壳结构特征

国际合作 INDEPTH-I、II、III 地震反射良好地揭示出喜马拉雅—青藏高原中段的地壳分层特征与速度结构。据 INDEPTH-II、III 地震反射资料, 位于拉萨地块中部的当雄及邻区上地壳/中地壳分界线位于 25 ~ 27km 深处, 中地壳/下地壳分界线位于 42 ~ 43km 深处; 上地壳 P 波速度 (V_p) 为 5.7 ~ 6.1km/s, 中地壳 P 波速度 (V_p) 为 6.1 ~ 6.5km/s, 下地壳 P 波速度 (V_p) 为 6.5 ~ 7.3km/s, 岩石圈地幔 P 波速度 (V_p) 为 8.0 ~ 8.1km/s, Moho 界面表现为 P 波速度 (V_p) 7.3 ~ 8.0km/s 的不连续界面 (Zhao et al., 2001) (图 1-2)。

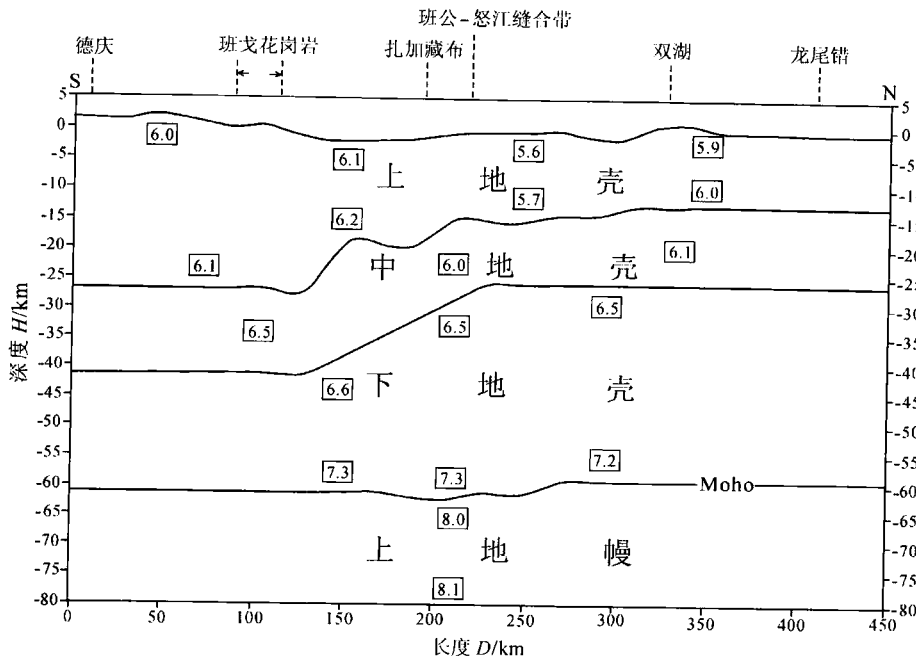


图 1-2 德庆-龙尾错地壳 P 波速度结构图

Figure 1-2 P-wave velocity cross section along Deqing-Longweicuo profile across the Tibetan Plateau

(据 Zhao Wenjin et al. , 2001)

方框内表示 P 波速度, 单位为 km/s

INDEPTH-II 地震深反射资料则揭示出青藏高原南部地壳速度的精细结构 (图 1-3)。在雅鲁藏布江以南的喜马拉雅地块, 中上地壳发育速度 $V_p \leq 5.9\text{km/s}$ 的低速夹层; 在康马及邻区, 壳幔边界发育异常厚度、P 波速度为 $V_p = 7.0 \sim 7.7\text{km/s}$ 的过渡层 (图 1-3)。在雅鲁藏布江以北的拉萨地块, 上地壳局部发育速度 $V_p \leq 5.9\text{km/s}$ 的低速体与高导低阻低速深反射亮点群, 深度范围为 13 ~ 20km; 中地壳局部发育速度 $V_p \geq 6.4\text{km/s}$ 的高速夹

层；下地壳局部发育速度 $V_p = 6.4 \sim 7.0 \text{ km/s}$ 的低速层（图 1-3）。

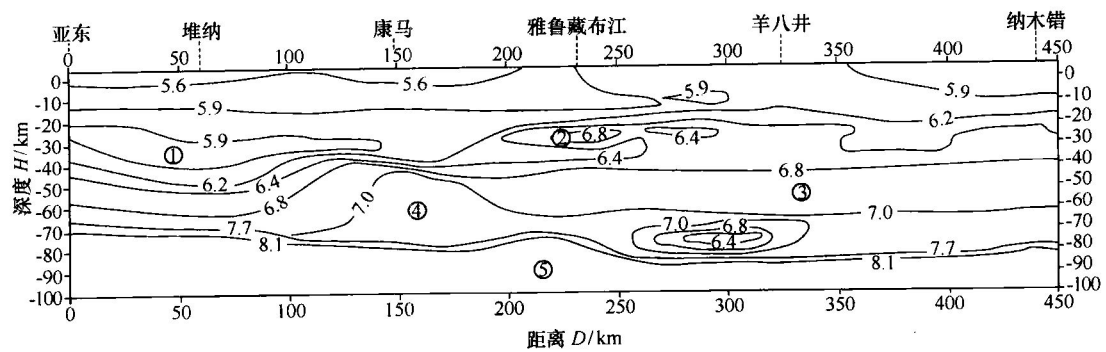


图 1-3 亚东-纳木错地壳二维速度等值线图

Figure 1-3 Two-dimensional velocity structure of Yadong-Namco profile across south Tibet

（据赵文津及 INDEPTH 项目组，2001）

①壳内低速层；②壳内高速夹层；③正常下地壳；④壳幔过渡带；⑤上地幔

Zhao Wenjin et al. (1993)、Larry Brown et al. (1996)、赵文津等 (2001) 应用 INDEPTH-I、INDEPTH-II 地震反射资料，研究亚东-康马-尼木-羊八井-当雄测线地壳结构构造，发现了标志印度大陆板块俯冲的主喜马拉雅逆冲断裂（MHT）、Moho 反射界面、羊卓雍-当雄反射带（YDR）、安岗深反射亮点（ABS）、羊八井深反射亮点（YBS）、宁中深反射亮点（NBS）、当雄深反射亮点（DBS）等重要深部地质构造（图 1-4），揭示出藏南拆离系（STD）和念青唐古拉东部伸展韧性剪切带的深部产状特征（图 1-4、图 1-5）。Douglas Nelson et al. (1996)、Larry Brown et al. (1996) 与赵文津等 (2001) 认为，深反射亮点对应于地壳 13~20km 深度范围的局部熔融体。

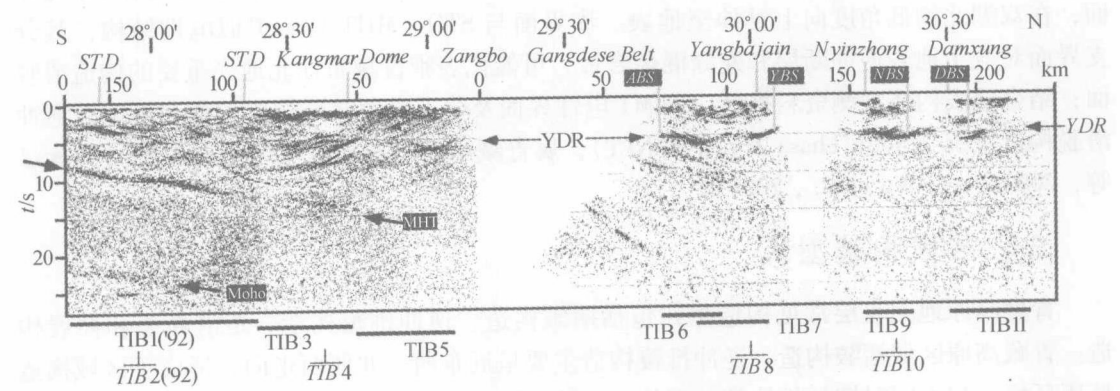


图 1-4 INDEPTH-I、II 地震反射剖面图

Figure 1-4 Seismic reflection profile of INDEPTH Project across south Tibetan Plateau

（据 Brown and Zhao et al. , 1996）

Wei Wenbo et al. (2001) 综合 INDEPTH-II、III 阶段大地电磁测深（MT）资料，分析康马-德庆-班戈-双湖测线地壳电性结构，显示出班戈花岗岩、德庆碳酸盐岩的高阻电

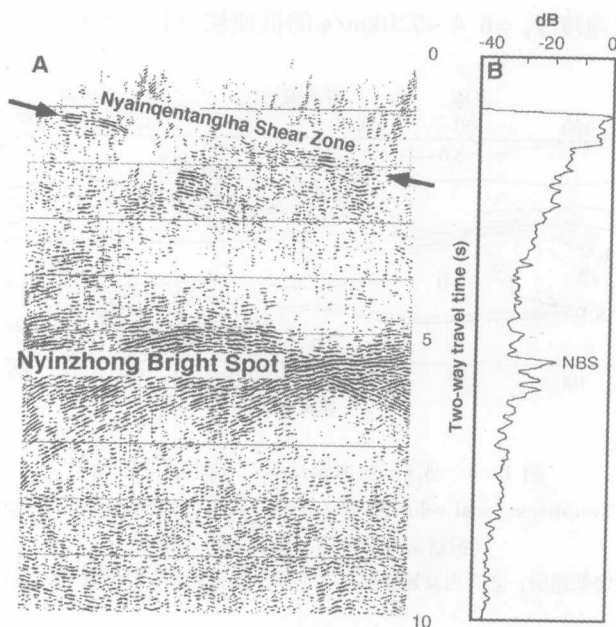


图 1-5 宁中 INDEPTH-II 地震反射 TIB9 剖面图
Figure 1-5 INDEPTH-II seismic reflection profile TIB9 across the
Ningzhong basin in central Lhasa block
(据 Brown and Zhao et al., 1996)

性特征和多巴、伦坡拉、双湖红层盆地的低阻电性特征，与喜马拉雅地块 MHT、STD 和雅鲁藏布江缝合带对应的电性界面特征相类似。据 INDEPTH-III 德庆-双湖 MT 剖面，在 15 ~ 30km 深处存在显著的高导/高阻分界面，界面电阻率 $10 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ 、电导率 $0.01 \sim 0.1 \text{ S/m}$ ；向地表方向在多巴红层盆北、班戈岩体北、德庆北发育多个向北倾斜的分支界面，在双湖北侧低角度向上延伸地表。该界面与 STD、MHT 具有类似电性结构，其分支界面对应于地表逆冲断层和蛇绿混杂岩带，可能代表雅鲁藏布江北地壳重要的构造滑脱面；结合地表构造观测资料推断，该 MT 电性界面及分支界面共同构成拉萨北侧地壳逆冲滑脱构造系统（North Lhasa Thrust 或 NLT），属青藏高原中段地壳重要构造形迹（吴珍汉等，2003a, c；Wu et al., 2004）。

三、区域构造型式

青藏高原地壳表层常见构造型式包括褶皱构造、逆冲推覆构造、走滑断裂和伸展构造。青藏高原区域褶皱构造、逆冲推覆构造主要呈近东西—北西西走向，形成于区域构造挤压环境，与不同时期的板块俯冲事件存在动力学成因联系。青藏高原走滑断裂和伸展构造在新生代晚期非常发育；区域走滑断裂大部分呈近东西、北西西或北东东走向，区域伸展构造大部分呈近南北走向或北北东—北东走向，切割、破坏早期挤压构造形迹，主要形成于新生代晚期区域伸展走滑构造环境。如拉萨地块中部当雄地区，中生代—新生代早期发育大量褶皱构造和逆冲断裂，而新生代晚期发育以念青唐古拉伸展型韧性剪切带和当雄—羊八井地堑为代表的区域伸展构造。