

卫 宏 王兰生 编著

川西山区公路边坡地质 灾害研究



煤炭工业出版社

谨以此书献给中国西部开发的伟大事业

川西山区公路边坡地质灾害研究

卫 宏 王兰生 编著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

川西山区公路边坡地质灾害研究/卫宏, 王兰生编著.
—北京: 煤炭工业出版社, 2001
ISBN 7-5020-1999-5

I. 川… II. ①卫…②王… III. 山区-公路路基-
边坡-地质灾害-研究-川西地区 IV. U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 11899 号

川西山区公路边坡地质灾害研究

卫 宏 王兰生 编著
责任编辑: 孙金铎 田克运

*
煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $9^{5/8}$
字数 219 千字 印数 1—760
2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月第 1 次印刷
社内编号 4770 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

前 言

随着改革开放和经济发展的进一步深入和加快,我国经济发展重点逐渐西移,西部大开发已经正式启动。受地理、地质条件与经济的制约,西部地区公路建设相对落后,已成为制约西部大开发的重要因素。因此,各地、各级政府已经把建设高等级乃至高速公路列为西部大开发中首当其冲的基础设施建设项目,仅四川省年计划公路建设投入即达140亿元人民币。我国的高等级公路建设始于80年代,落后于国外公路建设步伐,但发展迅猛,90年代始即在全国掀起一股修建高速公路的热潮。目前,我国的高速公路营运里程已近万公里。从普通公路到高等级、高速公路,公路造价从每公里数万元猛增到每公里数十万元直至每公里数百万到数千万元;汽车运行速度也从60km/h突增到100~200km/h。高速公路已经或正在成为我国交通事业的主干,成为我国经济发展、文化交流与军事运输的生命线。我们已经进入了高速公路时代。

与一般的工程场地相比,道路工程在大范围内呈线状延伸,通过山区时,其位置的可选范围不大,完全避开地质灾害的可能性很小,所遇地质灾害种类繁多、数量巨大,严重地影响着道路工程选线、设计、施工及运营等每一个环节。据统计,全国铁路沿线分布有泥石流沟1386条,大中型滑坡1000多处,崩塌近万处,20多条铁路干线、112万多公里铁路、60多个车站受着地质灾害的严重威胁。截至1990年底,由地质灾害造成的重大铁路事故达250多起,颠覆列车5起,淤埋列车41起,累计中断行车5万多小时^[1]。公路具有顺坡攀缘的特点,因此公路边坡地质灾害的危害更大,尤其在西部山区,公路经常遭受泥石流、滑坡、崩塌等边坡地质灾害的威胁。1985年川藏公路培龙沟特大泥石流共冲毁汽车80余辆,断道阻车长达半年以上;成松公路叠溪—较场段,在长仅3.0km左右的路段上,发育滑坡、崩塌数十处,经常发生崩塌、掉块等现象,阻断公路交通,逼迫多次改变公路线路;川藏公路二郎山段地质条件极为复杂,公路边坡地质灾害频仍,长期阻碍公路运营,成为川藏公路的咽喉,最后不得不以4600m长的特大型公路隧道通过该区,但隧道出口引道公路仍处在边坡地质灾害非常发育的部位;108国道凉山高速公路西昌—泸沽段由于边坡地质灾害不清,导致不合理的选线与开挖,形成若干欠稳定的高边坡,不得不花费数千万元人民币进行治理。由上可见,在高等级乃至高速公路建设中,公路边坡地质灾害研究显得尤为重要。任何公路边坡地质灾害研究的失误,都可能造成重大的经济损失,哪怕是边坡掉块等普通公路时代认为是微不足道的边坡问题,都可能导致惨重的交通安全事故。

地质灾害的发生并不是一个孤立的事件。地质灾害的发生受降雨、地震、月球引力乃至宇宙突发事件以及人类工程活动等诸多因素的影响。到目前为止,人类尚难以确定宇宙事件对地质灾害群发时间的影响程度,更无法了解具体地质灾害与宇宙事件的关系,通过对具体地质灾害体的监测与模拟来预测其爆发时间的工作尚处于探索之中。地质灾害的地理位置是地质构造、地形地貌、水文地质、岩性特征以及人类活动等多因子的综合函数。一般而言,地质条件越复杂的地区,地质灾害发生的可能性就越大。板块构造边界与深大断

裂带部位是地质灾害最为肆虐的地区。川西地区受华南板块西缘的安宁河断裂带、龙门山断裂带与鲜水河断裂带三条深大活动断裂带的影响，是我国地质灾害发育的地区。108国道、川藏公路、成松公路分别位于这三大断裂带的不同部位。

108国道是我国中西部地区纵贯南北的主干线，是西部经济发展的大动脉。川藏公路是联接西藏与内地的陆上交通枢纽，是西藏经济发展的致富线，西藏边陲军事运输的生命线，也是党的民族政策的体现，具有非常重大的政治、军事与经济意义。二郎山隧道及其引道是川藏公路的咽喉，是川藏公路畅通无阻的关键，以致于在隧道贯通庆典大会上，甘孜州领导把隧道贯通上升到“西藏人民的第二次解放”的高度。成松公路是世界风景胜地九寨沟、黄龙的旅游公路，叠溪地震滑坡、崩塌区是其必经之公路边坡地质灾害多发区。

由上述可见，川西山区公路边坡地质灾害研究具有重大的政治、经济意义，研究区域具有典型的代表性，其研究成果不仅有益于上述三条公路的建设与运营安全，而且对西部大开发中其它公路建设也具有一定的参考价值。

地质灾害泛指与地质有关的各种自然与人为灾害，种类繁多，如滑坡、崩塌、泥石流、地震、火山、地裂缝、地压、瓦斯、煤自燃、热害、塌陷与冻融等等。前三种是研究区常见的地质灾害，也是本书研究的重点，同时涉及其它地质灾害。

可以认为，自地质学诞生以来，滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害就纳入了地质学家的研究视野，只不过由于工业、经济落后，地质灾害尚未引起人们的重视。直到上世纪中期，瓦依昂滑坡（1963）等大型灾难性地质灾害发生以后，地质灾害才引起人们的特别关注。联合国已把地质灾害列入“十大最具危害性灾情之中”、一些重大的工程建设也纷纷把滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害研究列入必须的工作计划，甚至不成文的规定地质灾害研究占工程总经费的比例。发达国家，如日本、美国等已对本国范围内的地质灾害进行了普查，我国也将开展全国范围内的地质灾害普查工作。目前，世界滑坡编目工作正在进行之中。

国内对高陡河谷岸坡地质灾害的研究大致可分为三个阶段。70年代以前为定性分析阶段，主要停留在滑坡、崩塌等岸坡地质灾害的识别与定性描述方面；70年代到80年代初为第二阶段，人们的认识已经由感性上升到了理性阶段，以滑坡、崩塌形成机制分类研究为主要特点，广泛开展物理模拟与数值模拟，再现重大斜坡地质灾害的变形破坏过程与机制，此一研究工作至今仍是斜坡灾害研究的重点；80年代以来，随着计算机技术的发展，斜坡（边坡）数值模拟得以实现，已经成为滑坡、崩塌研究不可或缺的手段。此阶段中，对滑坡运动学、动力学的研究也取得了突出的成绩，提出了高速滑坡运动速度公式和滑坡滑动的空隙液压作用、气垫作用等一系列理论。斜坡（边坡）地质灾害研究与具体工程实践相结合已经成为本阶段的一个突出特点。

斜坡（边坡）稳定性分析是工程地质学研究重点之一，历经上述三个阶段的锤炼，已经形成了一套以工程地质原形研究为基础，通过对岩体力学模型研究、变形破坏机制研究及演化过程的全程模拟，进行稳定性评价及预测的系统工程地质分析方法。到目前为止，斜坡（边坡）稳定性计算方法可归纳为三类，即极限平衡法、数值分析法与概率法。上述三类方法的耦合是稳定性计算的发展方向。近年来，为了解决斜坡（边坡）稳定性计算中的不确定性因素，模糊数学方法、人工神经网络方法、块体力学分形方法等也被尝试性地用来进行斜坡（边坡）稳定性分析。

地震堵江滑坡是一种特殊类型的滑坡。早在80年代，美国人 Schuster R. L. 和 Costa

J. E. 就编制了《世界滑坡堵江目录》，书中共录入各国滑坡堵江事件 184 起。印度、巴基斯坦、意大利、西班牙、加拿大和南美的一些国家也对本国的滑坡堵江事件展开了一些调查工作。Schuster 认为天然堆石坝的稳定性与堰塞湖入流量、坝体地质特征及其几何特征有关。国内在这一方面的研究起步稍晚。1988 年，卢鑫栖发表了“滑坡堵江的基本类型、特征和对策”一文^[3]。随后，王得贤、李娜等先后对不同地区、不同成因的滑坡堵江事件进行了研究^[4]。1995 年，柴贺军等发表了《中国滑坡堵江事件目录》^[5]。目前，有关堵江滑坡与对岸的碰撞作用及其可能造成的公路边坡灾害的研究甚少。

泥石流研究方面，已经取得了从物源、流通到堆积的系统研究方法，并提出了针对不同类型泥石流的运动学、动力学及其冲撞破坏能力分析公式和相应的治理措施。关联度分析法与模糊综合评判法等亦被引入泥石流区域危害与泥石流流沟危险度评价。针对泥石流这种特殊密度流的特点，倪晋仁等提出了泥石流结构两相流模型^[6]。泥石流对人类及工程建筑的危害表现在两个方面：一为泥石流运动过程中的冲撞、掩埋破坏作用及其对环境的影响，可称之为原生危害；二为在泥石流堆积体中进行工程活动时，泥石流堆积体的变形破坏对工程的破坏与影响，可称之为后生危害。目前的研究主要集中在泥石流原生危害及其工程治理措施方面，专门针对泥石流堆积体后生危害的研究进行的较少。

公路地质灾害研究与公路发展密切相关。德国于 20 世纪 30 年代就开始修建高速公路。同时期，美国开始进行跨越美国大陆的三纵三横高速公路的可行性研究，并于 40 年代开始高速公路建设，至 70 年代形成了国家公路网络。1993 年，美国洲际高速公路总长度已达 70642km。英国、法国、意大利、日本等发达国家也先后于上世纪 50 年代进入高速公路建设的大发展时期。这些最早发展高速公路的国家，从修建高速公路开始，就非常重视公路边坡地质灾害研究与防治。1958 年，美国公路研究部门滑坡调查委员会编写了《滑坡与工程实践》，1978 年，又出版了《滑坡的分析与防治》。在公路建设中，发达国家并非单一强调公路边坡地质灾害研究与防治，而是把公路环境保护、环境美化与边坡地质灾害防治有机地融合在一起。据报道，美国的公路建设中，环境保护费用已达公路建设费用的五分之一。

与发达国家不同，我国的公路边坡地质灾害研究有我国的国情。上世纪 80 年代以前，我国以低等级公路建设为主，一般是“先通后畅”，以建设能够通行的连通城乡的公路网络为目的，不太重视公路边坡地质灾害研究。80 年代以后，特别是进入 90 年代以来，随着高等级与高速公路的建设与运营，公路边坡地质灾害问题接踵而来，这些由地质灾害引起的公路病害问题已经严重的影响了公路设计、施工、运营管理以及建设成本与工期，比如 108 国道西昌马鞍山段、漫水湾段等，就因选线过程中对边坡岩体地质灾害研究不清，导致开挖后不得不重新设计边坡整治工程，即浪费了财力，又影响工程进度；成松公路叠溪段先把公路建于地震滑坡、崩塌堆积前缘，后因边坡多发地质灾害而不得不改线。据有关资料^[2]，1983~1993 年的 10 年间，我国公路因地质灾害造成的直接经济损失总计达 115 亿元人民币，四川省 1978~1990 年，公路因地质灾害造成的直接经济损失达 2.74 亿元人民币；同时，由于公路边坡地质灾害造成的重大车毁人亡事件时有发生。

随着高等级与高速公路的飞速发展，公路边坡地质灾害研究日益迫切。20 世纪 80 年代初，交通部开始在陕西商洛地区进行公路地质灾害防治的示范性研究，陈焕章、何修养等对公路水毁的严重危害性，以及治理方案进行了探讨，取得了一定的成果。1989~1992 年，

白子培、陈洪德等进行了“四川省主要自然灾害对公路、水运干线的影响防御对策的研究”，从区域上讨论了四川省公路地质灾害与地质环境的关系以及水毁灾害的发育机制等。目前，我国对公路边坡地质灾害的研究才刚刚起步。

由于川西地区所处的特殊的地理位置，对其地质研究工作比较深入，出版和发表了大量的有关大地构造、地貌演化、矿产地质等方面的专著与论文，地质灾害研究也取得了丰硕的成果。1987年，成都地质学院工程地质室与地矿部909地质队，提交了《川滇小三江（大渡河、雅砻江、金沙江）下游地区斜坡的变形与破坏》研究报告，对区内滑坡、崩塌、泥石流的分布进行了调查、总结，并提出了斜坡变形破坏若干类型与机制；在进行成昆铁路建设中，对安宁河谷铁路沿线边坡地质灾害进行了详细的调查研究，发表了若干很有见地的论文。1998年，四川省林业勘察设计院对108国道凉山高速公路进行了线路工程地质勘察。1933年叠溪地震发生不久，常庆茂就对地震灾害进行了调查，发表了“四川叠溪地震调查记”；1960年，孔德芳教授重点研究了大海子天然坝坝体和坝区的稳定性，撰写了“岷江上游大海子天然坝坝体和坝区稳定性的工程地质研究”，把研究区边坡分为较稳定的、较不稳定的、不稳定的和极不稳定的四类；1985年，四川省地震局编著了《一九三三年叠溪地震》一书，对1933年发震机制、地震破坏及其地震滑坡、崩塌的空间分布进行了研究；1999年8月，四川省水电勘测设计研究院提交了《四川省阿坝州天龙湖水电站可行性研究报告》；近年来，成都理工学院的研究生柴贺军、韩坤立、蒋良文等在完成各自的毕业论文过程中，都对叠溪地震滑坡、崩塌堵江事件进行过研究，并发表了若干论文。早在川藏公路建成通车不久，就开始了二郎山隧道的调查论证工作，大量的集中研究工作始于1990年二郎山隧道正式立项以后；自那时以来，国家地震局地壳应力研究所、煤科总院西安分院等对隧道现代地应力场进行了钻孔水压致裂法测试研究，四川省地震局进行了二郎山工程区地震复核与地震危险性分析研究，四川省地矿局成都水文地质工程队完成了隧道定测阶段工程地质勘察工作，成都理工学院王兰生教授领导的课题组对隧道高地应力与围岩稳定性问题进行了研究，并取得了卓越的成果。

通过上述工作，前人在各自感兴趣的问题上取得了深入的认识，但很少站在整个川西地区的角度，或者站在华南板块边界复杂地质条件的角度研究地质灾害，更少站在公路建设的角度研究公路边坡地质灾害。就公路边坡地质灾害而言，研究区主要存在如下问题：川西山丘山坡卸荷风化带内，公路边坡地质灾害类型及分布规律与公路建设问题；公路穿越古老滑坡、崩塌地区时的公路边坡地质灾害与公路建设问题；公路穿越泥石流堆积区时的公路边坡地质灾害与公路建设问题。本书分别论述了上述问题。

本书是在若干工程项目研究的基础上完成的。成都理工学院的杨立铮教授、董孝壁教授、李天斌教授、傅荣华教授、赵其华副教授、沈军辉博士、徐林生博士、靳晓光博士、王青海博士、王卫硕士等都给予很大帮助，在此一并致谢。

全书由卫宏执笔，王兰生教授审阅、修改了提纲与全文。由于作者水平所限，书中难免存在谬误，请读者谅解并提出宝贵意见，以利于进一步的研究工作。

作者

2001年3月

目 录

前 言

第一篇 川西山区公路建设背景与典型公路边坡地质灾害研究区

1 川西山区公路边坡地质灾害发生的自然地理及地质环境背景	2
1.1 大地构造背景	2
1.2 区域构造应力场背景	4
1.3 新构造运动与地震活动特征	6
1.3.1 地壳隆升	6
1.3.2 断裂与断块运动	6
1.3.3 地震活动	8
1.4 地貌特征	12
1.5 气候特征	13
2 川西地区地质灾害发育特征及典型研究区	13
2.1 川西地区地质灾害发育特征	13
2.2 川西山区公路边坡地质灾害典型地区及其代表性特征	17

第二篇 川西公路边坡地质灾害典型实例分析

3 安宁河中山宽谷区高速公路建设中的边坡地质灾害	19
3.1 研究区地理地质环境特点	19
3.1.1 自然地理特征	19
3.1.2 地层岩性特征	20
3.1.3 地质构造特征	20
3.1.4 地貌及第四纪地质	20
3.2 108国道凉山高速公路建设中的边坡地质灾害	21
3.2.1 马鞍山缓倾坡内层状岩层高边坡的变形破坏特征	21
3.2.2 泸沽段花岗岩高边坡的变形破坏特征	22
3.2.3 漫水湾段泥石流堆积高边坡特征	34
4 二郎山西坡高山斜坡区公路建设中的边坡地质灾害	35
4.1 研究区地理地质环境特点	35
4.1.1 气象、水文条件	36
4.1.2 植被条件	36
4.1.3 地貌条件	36
4.1.4 地层岩性条件	37

4.1.5	地质构造条件	37
4.1.6	地震条件	40
4.1.7	构造应力场特征及控制性构造的形成演化历史分析	40
4.2	西引道地质地貌与公路边坡地质灾害分区	43
4.2.1	榛子林陡倾坡外石灰岩岩质滑坡边坡区	43
4.2.2	别托切层边坡砂及泥岩崩塌、泥石流堆积边坡区	44
4.2.3	大湾沟古冰斗泥石流堆积边坡区	45
4.2.4	旱桥全强风化花岗岩岩质边坡区	47
4.3	榛子林陡倾坡外岩质边坡区公路边坡主要变形破坏	47
4.3.1	陡倾坡外石灰岩中的滑移弯曲变形破坏	47
4.3.2	榛子林滑坡及其复活变形破坏	48
4.4	别托、大湾沟泥石流堆积区公路边坡的主要变形破坏	57
4.4.1	方家沟桥的变形破坏分析	57
4.4.2	大湾沟挡墙的变形破坏分析	58
4.5	旱桥强风化花岗岩区公路边坡变形破坏分析	59
4.5.1	旱桥强风化花岗岩区公路边坡变形破坏的工程地质环境	59
4.5.2	旱桥强风化花岗岩区公路边坡变形破坏迹象	59
4.5.3	旱桥强风化花岗岩区公路边坡变形破坏成因分析	59
5	岷江上游深切峡谷区公路建设中的边坡地质灾害	60
5.1	研究区地理地质环境特点	60
5.1.1	气象、水文条件	61
5.1.2	植被条件	61
5.1.3	地层岩性条件	61
5.1.4	地貌条件	62
5.1.5	地质构造	63
5.1.6	构造应力场与构造演化	67
5.1.7	地震	68
5.2	岷江上游滑坡堵江事件	68
5.2.1	1933 年叠溪地震滑坡、崩塌堵江事件及其地质灾害	69
5.2.2	马脑顶—小关子滑坡堵江事件	70
5.3	叠溪—较场地震滑坡、崩塌堆积区公路边坡工程地质分区	73
5.3.1	主要问题的现场调查结论	73
5.3.2	叠溪—较场堵江滑坡、崩塌堆积区公路边坡工程地质分区	75
5.4	滑坡堵江事件的岸坡地质环境效应与公路建设中的边坡地质灾害	80
5.4.1	滑坡堵江事件的岸坡地质环境效应	80
5.4.2	213 国道叠溪地震滑坡崩塌区公路边坡的主要地质灾害	82
5.5	叠溪—较场滑坡、崩塌堆积区公路边坡（路基）稳定性分析	83
5.5.1	地震堰塞坝体的整体稳定性分析	83
5.5.2	213 国道叠溪—较场滑坡、崩塌堆积区公路边坡（路基）的稳定性分析	84

5.6 成松公路汶川—较场段公路边坡地质灾害	84
------------------------------	----

第三篇 川西山区公路建设中的边坡地质灾害及公路建设

6 山坡卸荷风化带公路边坡地质灾害及公路建设	92
6.1 山坡岩体卸荷的一般规律	92
6.1.1 河谷下切前的垂向夷平卸荷及其复杂席状裂隙	93
6.1.2 河谷下切引起的侧向卸荷及其松动岩体	93
6.1.3 公路边坡开挖引起的卸荷松动危岩体	97
6.1.4 边坡岩体卸荷与气异常特征	98
6.2 山坡风化卸荷带中斜坡变形破裂及其对公路边坡建设的影响	99
6.2.1 顺向坡中的变形破裂及公路边坡问题	99
6.2.2 缓倾坡内层状体边坡变形破裂及公路边坡问题	104
6.2.3 切层层状体斜坡变形破裂及公路边坡问题	107
6.3 强、全风化带公路边坡变形破坏与公路边坡问题	108
6.3.1 边坡控坡要素分析	108
6.3.2 边坡变形破坏机制	108
6.3.3 公路选线与开挖中应注意的问题及防治对策	110
7 泥石流堆积区公路边坡地质灾害及公路建设	111
7.1 泥石流堆积物特征	111
7.1.1 泥石流堆积物的空间特征	111
7.1.2 泥石流堆积物的结构特征	112
7.1.3 泥石流堆积类型	117
7.2 泥石流堆积边坡的控坡要素分析	124
7.3 泥石流堆积边坡的变形破坏机制	126
7.3.1 大湾沟后退上叠式泥石流堆积滑坡的形成演化机制	126
7.3.2 和平沟谷侧积式泥石流堆积滑坡的形成演化机制	126
7.4 公路选线与开挖中应注意的问题及防治对策	128
8 滑坡地区公路边坡地质灾害及公路建设	128
8.1 叠溪地震滑坡区公路边坡地质灾害及公路建设	128
8.1.1 叠溪地震滑坡、崩塌分布的控制因素分析	128
8.1.2 较场坝地震裂隙区地裂缝的成因类型及其对公路边坡稳定的影响	130
8.1.3 堵江滑坡的特殊变形破坏及其对公路边坡稳定性的影响	131
8.1.4 滑坡碰撞构造的演化与岸坡稳定	134
8.1.5 叠溪地震滑坡的形成演化机制	134
8.1.6 公路选线与开挖中应注意的问题	135
8.2 榛子林滑坡区公路边坡地质灾害及公路建设	136
8.2.1 陡倾坡外层状岩体边坡变形破坏的典型事例	136
8.2.2 公路选线与施工中应注意的问题及防治对策	140
参考文献	142

第一篇 川西山区公路建设背景与典型公路 边坡地质灾害研究区

随着沿海改革开放的深入、经济发展的加快，中国西部地区开发的条件已经基本具备，时机已经成熟。2000 年 1 月，国务院成立了西部地区开发领导小组，并召开了西部地区开发会议，朱镕基总理在会议上强调“各部门、各地区要站在我国现代化建设全局和战略的高度，把思想和行动统一到党中央的重大决策上来，不失时机地推进西部地区大开发。”^[1] 10 年内，计划投入 1200 亿元人民币，投资力度空前。加快基础设施建设、切实加强生态环境保护和建设、积极调整产业结构、发展科技和教育、加大改革开放力度是关系西部地区大开发全局的重点，其中加快基础设施建设被列为五大重点之首，公路建设首当其冲。

川西公路建设是西南地区大开发的关键，主要表现在三个方面：首先，四川省是大西南的商业、文化中心，是西南地区大开发的支撑点。西南各省，特别是西藏自治区的经济发展与之息息相关。公路交通是西南各省，特别是西藏自治区与内地及沿海地区联系的动脉，是经济发展的关键；其次，综观四川自然资源的分布，除成都平原的农业资源以外，大

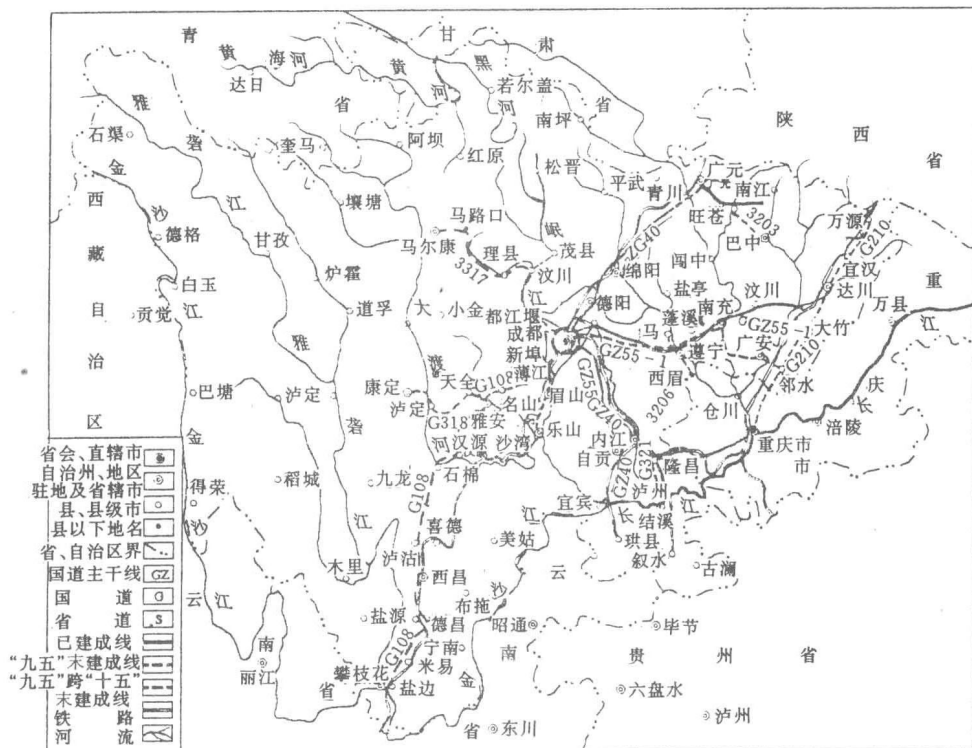


图 1-1 四川高速公路网略图

部分自然资源分布于川西山区,是四川经济开发的重点;最后,四川是一个旅游大省,旅游资源丰富,且大部分分布于川西山区。上述三方面的开发与发展都与川西公路建设密切相关。

“九五”末,四川省二级公路建设已具规模,形成了县与县间及重要乡镇间相互连通的公路网络,面对西部大开发,昔日的低等级公路已不能满足经济发展的要求,正在逐步被改建为高等级乃至高速公路。到目前为止,成渝高速公路已运营4年,108国道、318国道与40国道主干线等高速公路正在建设中,55—1国道主干线、317省道及九寨、黄龙机场高速公路正在筹建中(图1—1)。据报道,2000年四川交通建设投入达140亿元人民币;未来10年内,四川交通投资总额将达1400亿元人民币。到2005年,四川高速公路将达到1700km,一、二级公路将达到12000km。目前,四川高速公路建设主要集中在川西地区。川西山区公路建设已成为四川乃至西南地区大开发的龙头。值此川西山区公路建设刚刚起步之时,开展对川西山区公路边坡地质灾害的研究,不仅是川西公路建设的必然要求,而且对中国西南地区大开发具有重大意义。

1 川西山区公路边坡地质灾害发生的自然地理及地质环境背景

研究区位于四川西部山区,地理坐标为东经 $102^{\circ}10'$ ~ $103^{\circ}42'$ 、北纬 $28^{\circ}14'$ ~ 32° 左右(图1—2)。这一地区恰好为中国东西地形突变部位,也是大地构造分区界限,其两侧地形地貌、构造格局显著不同。区内复杂的地质地理背景造就了类型多样、分布广泛的地质灾害,成为中国地质灾害重灾区。

1.1 大地构造背景

大地构造上,研究区位于华南板块内二级构造单元的分界线上,以东为相对稳定的扬子陆块,以西为相对活动的松潘—甘孜活动带。著名的南北向安宁河断裂带、北东向龙门山断裂带与北西向鲜水河断裂带形成了中国西部令人瞩目的“丫”字形构造格局(图1—2)。

大地构造单元的边界常为深大断裂,是边界部位的控制性构造。在边界部位,断裂作用为主要地质作用,其它地质作用均与之有关。在研究区内,断裂作用是地质灾害频繁发生的主要背景。为了研究区域性地质灾害的分布规律,有必要了解区域性深大断裂的主要特征。现把与研究区有关的深大断裂带介绍如下。

(1) 安宁河断裂带:北起金汤,向南经石棉、冕宁、德昌、会理,过金沙江进入云南,与易门断裂相连,呈南北向延伸,倾角 60° ~ 80° ,由若干条岩石圈断裂与基底断裂组成,断裂带宽4~9km,四川境内长达400km,构成了川滇南北向构造带的核心。

晋宁运动时,该断裂就已形成,表现为区域性的大规模中酸性岩浆侵入,断裂两侧前震旦系沉积建造出现差异,西侧沉积了延边群,东侧沉积了会理群。晋宁运动末,安宁河断裂带为一南北向隆起。加里东运动时,表现为继承性隆起,普遍缺失早古生界地层。海西运动时,断裂带表现为张性活动,形成地堑式断陷区,伴随大规模的峨眉山玄武岩喷出。由此可见,该断裂深切达上地幔,为岩石圈断裂。印支运动时,断裂性质发生转化,由张性转化为压性,岩浆侵入强度大大降低。燕山运动时,表现为继承性挤压,伴有重熔型花

岗岩侵入。喜山运动以后，再次强烈活动，形成规模宏大的地垒地堑系，控制着新生代地层的分布，构成了川滇南北向构造带的核心。早更新世，表现为张性断裂，断陷谷地中沉积了巨厚的昔格达湖相地层。中更新世以来，以左旋走滑运动为主，东西两侧发生不均匀抬升，两岸阶地的不对称性为其佐证。东岸一般可见三级阶地，Ⅲ级阶地位于河面以上50~70m；而西岸只发育两级阶地，仅高出河水面5~20m^[9]。

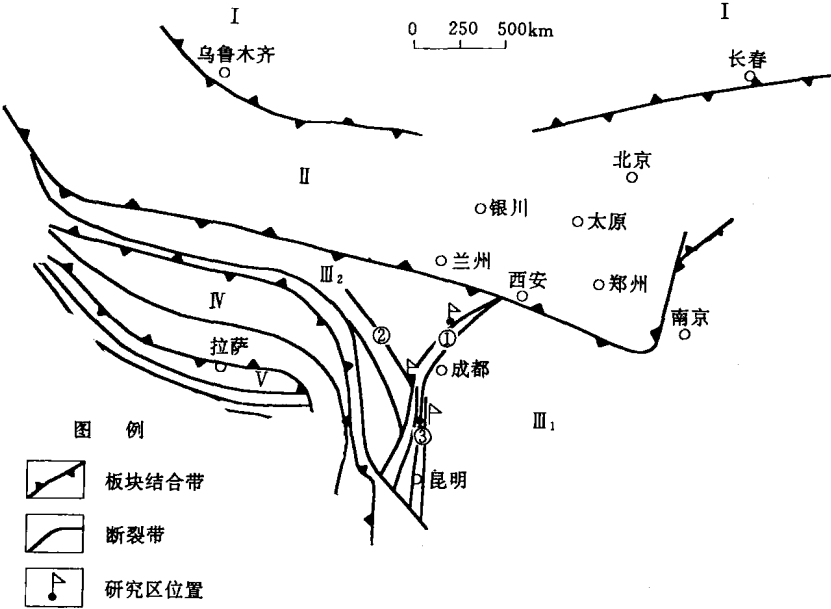


图 1-2 大地构造位置略图

(据《中国区域地质概论》改编)

I—西伯利亚板块；II—塔里木华北板块；III₁—扬子陆块与南华活动带；III₂—松潘甘孜活动带；
 IV—藏滇板块；V—印度板块；①—龙门山断裂带；②—鲜水河断裂带；③—安宁河断裂带

大渡河断裂是安宁河断裂带的北延断裂，距二郎山隧道西引道研究区 6~8km。该断裂带沿大渡河呈南北向延伸，东、西两支相背逆向对冲，倾角 60°~75°，为一活动断裂带。

108 国道凉山高速公路泸沽、马鞍山研究区位于安宁河断裂中段。

(2) 鲜水河断裂带：位于巴颜喀拉冒地槽褶皱带中，沿康定、道孚、甘孜一线延伸，走向北西，整体呈向北凸出的弧形，为一高角度走滑逆冲断裂带。主要由炉霍—乾宁断裂与乾宁—康定断裂组成。长约 360km。

海西运动时，该断裂即具雏形，沿断裂形成零星分布的基性、超基性岩，整体为一地背斜带。印支运动时，随着巴颜喀拉冒地槽褶皱回返，断裂带整体形成，并伴有碱性花岗岩侵入。燕山运动以来，该断裂活动更加强烈，并伴有动力变质作用，具有强烈的左旋走滑运动，成为“川滇菱形块体”和“川青块体”之间的分界线。

磨西断裂是鲜水河断裂带的东南延伸断裂，距二郎山隧道西引道研究区 20~25km，为一晚更新世—全新世强烈活动断裂。

(3) 龙门山断裂带：位于泸定、茂县、广元一线，走向北东，倾向北西，倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。主要由陡倾北西的龙门山后山断裂带、龙门山主中央断裂带与龙门山前山断裂带等构成。全长 500km 左右。是扬子陆块与松潘—甘孜活动带的分界。

龙门山断裂带生成于晋宁期，为泛扬子地台解体中心之一。随着泛扬子地台的解体，龙门山地区呈现出复杂的地质地貌景观。龙门山后山断裂带的青川断裂成为摩天岭地块与后龙门山冒地槽褶皱带的分界；龙门山后山断裂带的茂汶—汶川断裂和龙门山主中央断裂带的北东段成为扬子地台与松潘—甘孜地槽褶皱系的分界；龙门山前山断裂带成为龙门山—大巴山台缘褶皱带与四川台坳的分界。加里东时期，该带内部发生分化。早期，龙门山为古岛弧，寒武、奥陶系地层分布杂乱，时有缺失。晚期，后龙门山演化为海槽，沉积了巨厚的复理石建造，其余地方仍为古岛弧。海西运动时，龙门山中、前山发生分异。前山演化为一浅坳陷，沉积了类复理石和碳酸盐岩建造；中山呈现为岛弧或半岛状隆起。印支运动使龙门山整体隆起褶皱，形成规模巨大的推覆体，同时伴有动力变质作用。燕山运动以来，龙门山地区以断裂运动为主。

龙门山断裂带的西南延伸部分二郎山断裂带横穿二郎山隧道西引道区，是西引道区各种地质灾害发育的主要原因之一。区内该断裂带穿过团牛坪、二郎山垭口、西引道区，南转铜厂坡延至冷碛。总体走向 $N25^{\circ}\text{—}35^{\circ}E$ ，倾向 NW，倾角 $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。主干断裂分两支平行延伸，破碎带宽达千余米。为一压扭性活动逆冲断裂。

213 国道叠溪研究区即位于龙门山断裂带派生的较场弧形构造部位。

1.2 区域构造应力场背景

受川西地应力环境与场地地质条件的制约，在川西山区的工程建设与地震研究中，现代地应力场研究是不可或缺的。研究区震源机制解与地应力实测结果列于表 1—1。

表 1—1 区域地应力实测资料

测量时间 (年、月、日)	参考地点	测量方法	σ_1 产状	σ_3 产状	σ_1 量值 (MPa)	资料来源
1970. 3. 22	茂 县	震源机制解	96°			蒋良文博士论文
1976. 8. 16	松潘平武	震源机制解	$63^{\circ}\angle 10^{\circ}$	$319^{\circ}\angle 54^{\circ}$		
1976. 8. 23	松潘平武	震源机制解	102°			
1960. 11. 19	漳 腊	震源机制解	84°			
1973. 8. 11	松潘南坪	震源机制解	297°			
1989. 9. 22	小金两河	震源机制解	99°			
1941. 10. 8	黑 水	震源机制解	305°			
1974. 1. 16	松潘南坪	震源机制解	104°			
1933. 8. 25	茂县叠溪	震源机制解	$93.5^{\circ}\angle 7.5^{\circ}$	$185^{\circ}\angle 14^{\circ}$		
1933. 8. 25	茂县叠溪	震源机制解	$52^{\circ}\angle 29^{\circ}$	$149^{\circ}\angle 13^{\circ}$		

续表

测量时间 (年、月、日)	参考地点	测量方法	σ_1 产状	σ_3 产状	σ_1 量值 (MPa)	资料来源
1999	茂县叠溪	水压致裂法	290°		7~8.5	地壳应力所
1981.7	四川丹巴	应力解除法	336°±9°		5.35±0.44	符文喜硕士论文
1981.10	雅 江	应力解除法	304°±9.1°		6.48±0.31	
1982.7	宝兴锅巴岩	应力解除法	299.3°±4.2°		8.75±0.13	
1982.8	康定呷巴	应力解除法	274.3°±10°		6.55±0.43	
1982.9	康定长河坝	应力解除法	278°±4.7°		6.15±0.46	
1982.10	天 全	应力解除法	291.4°±6.9°		4.69±0.20	
1982.11	雅 安	应力解除法	315°±6.5°		4.13±0.27	
1983.5	乾 宁	应力解除法	306.6°±12.7°		3.65±0.33	
1983.5	理 塘	应力解除法	325.5°±8.8°		8.75±0.86	
1977	冕 宁		301°			成都理工学院, 川藏公路二郎山 隧道高地应力与 围岩稳定性研究 中间报告
1977	四川普格		306°			
1998	二郎山隧道	应力解除法	292.6°∠38.8°	5.9°∠19.5°	17.5	
1998	二郎山隧道	应力解除法	275°∠35.6°	15.9°∠15°	35.3	
1991~1994	二郎山隧道	水压致裂法	290° (平均)		53.47	李兴唐, 活动断 裂研究与工程评 价
不详	二滩电站	实 测	0°~22°		3.9	
1955	鱼 蚌	震源机制解	NNW			

根据表 1-1 及已发表的有关图件, 研究区主压应力方位如图 1-3 所示。由图 1-3 可知, 研究区区域应力场具有如下特征:

(1) 区域构造应力场的最大主压应力方向总体上位于二、四象限, 自北而南, 具有明显的变化趋势。根据优势最大主压应力方向, 自北而南可分为三段。小金以北地区, 最大主压应力方向以近东西向为主。小金到冕宁之间, 最大主压应力方向变化于北西西—北西之间。冕宁以南, 最大主压应力方向转化为北北西—南北向。

(2) 最大主压应力的量值一般为 3~8MPa。但二郎山地区例外。二郎山隧洞不同方法的应力测量结果表明, 该区为高地应力区。其中, 国家地壳应力所通过钻孔水压致裂法应力测量, 发现该区最大主压应力量值高达 53.47 MPa。

区域应力场的上述变化不是偶然的, 它是现代板块运动的必然产物。如图 1-4 所示, 印度板块的向北运动受到欧亚板块的阻挡, 两板块发生强烈的会聚碰撞作用。在两大板块的强烈俯冲碰撞挤压作用下, 藏滇板块一方面向上隆起, 形成青藏高原; 另一方面, 板块内部壳幔物质向东西两侧展流, 决定着中国西南地区构造应力场的总体分布状况。同时, 藏滇板块上的一系列弧形断裂带发生侧向错动, 其错动方向因断裂带的弯转而变化。小金以北地区, 主要受断块的东向运动的影响, 构造应力场表现为近东西向挤压。小金—冕宁之间, 恰恰处在澜沧江断裂、怒江断裂等几条大型弧形断裂带的弯转部位东侧, 受断块错动方向转化的控制, 该区最大主压应力方向表现为北西西—北西向。冕宁以南, 澜沧江断裂、

怒江断裂等几条大型弧形断裂带已转为近南北向,受其影响,该区的构造应力场也转为近南北向挤压。

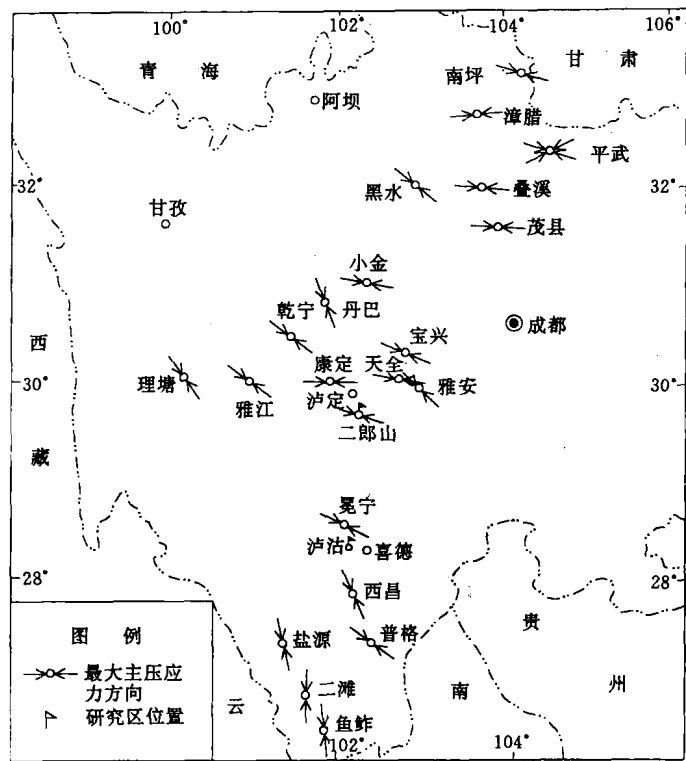


图 1-3 区域主压应力方位示意图

按照叠加断层理论^[8],区域应力场的上述分布特点控制着研究区的现代断裂活动,因而必将影响研究区地质灾害的发育规律。有关问题将在后续章节中讨论。

1.3 新构造运动与地震活动特征

如前所述,研究区位于华南板块的二级构造单元分界线上,西部藏滇板块与松潘甘孜活动带的向东运动在此受到扬子陆块的阻挡,或者形成新生代盆地边缘的逆冲推覆构造带,如龙门山向成都盆地的推覆;或者块体运动方向沿南北向断层发生偏转,如安宁河断裂带等。这两种形式的运动都表现为地壳隆升、断裂或断块活动、温泉形成与地震活动等。

1.3.1 地壳隆升

黄汲清(1980)、李吉均(1979)等认为,上新世晚期青藏高原面的高度为1000~2500m,现在川西高原夷平面的高度为4000~5000m^[9]。也就是说,自上新世以来川西高原抬升了3000m以上。研究表明,松潘地区地壳抬升速度快,河流下切剧烈,达10~20mm/a。茂县以北地区近年来有轻微隆起,抬升速率为3.7mm/a。如此大的、不均匀的地壳抬升速度,形成了川西地区陡崖峭壁的地貌景观和纵比降大的湍急河流。

1.3.2 断裂与断块运动

青藏高原地壳运动 GPS 实测结果 (表 1—2)^[10]表明,中国西部整体呈南北向缩短和东西向伸长,且东西向伸长大于南北向缩短。青藏高原东部表现为向东、北方向运移,运移速率向北、向东逐渐衰减。位于川滇菱形块体上的虾拉沓与下关测站的测量结果表明,它们相对于藏滇板块和松潘—甘孜活动带存在明显的向南滑动。北部的虾拉沓受到藏滇板块的向东推挤,存在明显的向东运动,导致川滇菱形块体的右旋运动。

活动断裂包括新生断裂与重新活动的老断裂。两者都有明显的地貌表现,常引起地震、滑坡、泥石流等地质灾害。老断裂会否重新活动或者形成新断裂并诱发地质灾害,固然与许多因素有关,但老断裂与构造应力方向的夹角是一个至关重要的因素。当断裂面走向与最大主应力夹角为 25°~50°之间时,断裂最易

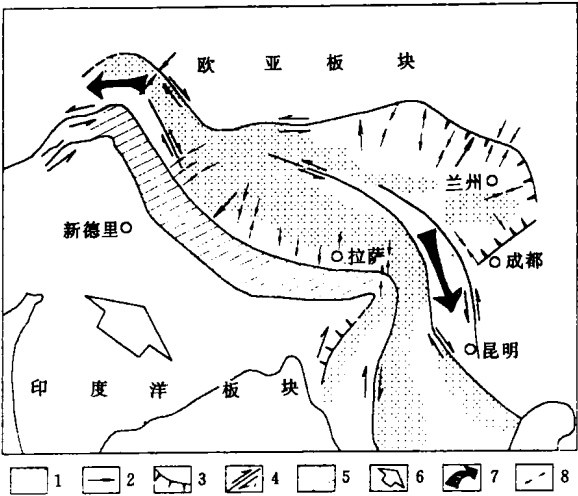


图 1—4 青藏高原壳慢物质展流运动示意图 (据晏鄂川, 1998)

- 1—压缩变形区; 2—压力作用方向; 3—逆冲断层带;
4—走滑断层; 5—碰撞挤压带; 6—板块运动方向;
7—物质优势运动方向; 8—震源主压应力轴方向

表 1—2 青藏高原东部地壳运动 GPS 实测结果

测 站	拉 萨	温 泉	格 尔 木	西 宁	酒 泉	虾拉沓	下 关
v_n (cm/a)	2.210	1.709	1.419	1.028	1.096	0.003	-0.191
v_e (cm/a)	2.532	2.381	1.194	1.132	1.077	2.464	0.902

注: v_n 为块体向北运移速率, v_e 为块体向东运移速率。

产生走向滑动,称为最危险滑动角^[8]。川西地区发育北西与北西西向、北东与北东东向、南北向及东西向 4 组断裂,哪一组断裂的活动性最强,这主要取决于断裂所在部位的构造应力场。研究区几条主干断裂的活动性列于表 1—3。

由表 1—3 可知,研究区主干断裂都是活动断裂。安宁河断裂带的错动速率自北而南增大,由 1.4mm/a 增加到 5.3mm/a,这恰好与安宁河断裂带所处构造应力场的变化相一致(最大主应力方位见图 1—3)。鲜水河断裂带的最大历史平均滑速达 17mm/a,是一条活动性极强的断裂。龙门山断裂带的错动速率最小,仅相当于安宁河断裂带的 1/4~1/6,相当于鲜水河断裂的 1/20。这与鲜水河断裂带为块体滑移的侧向边界,而龙门山断裂带却是西部块体继续东移的阻抗断裂相一致。

三大断裂带在新生代都有过活动。龙门山断裂带的西南延伸部分二郎山断裂的新构造活动主要为中更新世中、晚期,绝对活动年龄测定分别为距今 18.22±1.35 万年和 15.49±1.13 万年。鲜水河断裂带的南东延伸部分磨西断裂在晚更新世与全新世强烈活动。安宁河