

山地灾害 形成与预测预警

陈宁生 等 / 著



科学出版社

际(地区)合作与交流项目(批准号:41661134012)

国家自然科学基金面上项目(批准号:41671112)

国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号:41501012、51409243、41402283)

山地灾害形成与预测预警

陈宁生 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了泥石流、滑坡、山洪、冰湖、堰塞湖溃决等山地灾害的形成与非工程监测预警理论、技术和实践。内容主要包括驱动山地灾害发育的地震和极端气候内外动力主控因素；松散土体转化为滑坡泥石流的土力学机理；基于地震活动、极端气候和人类活动因素的泥石流预测技术；基于流域灾害过程的滑坡泥石流三级监测预警指标；分级多指标的山地灾害监测预警体系；山地灾害监测预警技术在市县、厂矿企业的示范应用。

本书适用于国土、水利、交通和城建等有关部门的防灾减灾工作；可用于科研、教学、工程建设单位部门的非工程减灾工作中；可供科研人员、教学人员和工程技术与管理应用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

山地灾害形成与预测预警 / 陈宁生等著. —北京：科学出版社，
2017.9

ISBN 978-7-03-053210-7

I. ①山… II. ①陈… III. ①山地灾害-预警系统-监测系统-
研究 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 128352 号

责任编辑：张 展 / 责任校对：陈书卿
责任印制：罗 科 / 封面设计：墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张：15

字数：330千字

定价：120.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

本书作者名单

陈宁生 胡桂胜 王 涛 丁海涛 邓明枫 杨成林

中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所

中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室

中国科学院波密地质灾害观测研究站

前 言

山地灾害是指发育于山区的特有灾害，具体包括滑坡(含崩塌)、泥石流、山洪和冰湖堰塞湖溃决等。山地灾害是地表剥蚀的极端表现，由于构造板块的相对运动，在地球表面形成了一系列隆升山脉和沉降盆地，并使得诸如喜马拉雅山脉、横断山脉、落基山脉、安第斯山脉、阿尔卑斯山脉等巨大山脉仍然呈隆升趋势。与山脉隆升相矛盾的过程为山脉的剥蚀，地质历史上由于山脉的剥蚀和运移堆积形成了山脉前缘的巨大盆地和平原，诸如青藏高原南缘的恒河平原，东缘龙门山前的四川盆地，青藏高原北侧的柴达木盆地，落基山脉东侧的密西西比平原，安第斯山脉东侧的亚马孙平原，阿尔卑斯山脉东侧的多瑙河平原，台湾中央山脉西北侧的冲积平原等。随着极端气候作用和地震活动作用以及人类活动的加强，地表的剥蚀呈现准周期的波动，在极端气候与地震活动后地表的剥蚀呈现出井喷式的加强，而后逐渐回归到平均状态。伴随着剥蚀的加强，山地灾害也呈现井喷式的发展，给人类带来了极大的危害。如 2008 年 5·12 汶川地震及其后的次生灾害给灾区造成 8000 多亿元人民币的直接经济损失，我国已经投入 1 万多亿元进行了灾后恢复重建和灾害防治，但截至现在，汶川地震对区域剥蚀和山地灾害的影响还在持续。尽管花费了巨大的人力和物力进行山地灾害的防治，山地灾害依然时有发生。据初步统计，汶川震后，2009~2014 年四川省共发生地质灾害 15548 起，致 690 人死亡或失踪，直接经济损失达 65 亿元。如 2009 年 7 月 25 日都汶高速公路发生滑坡，毁坏了彻底关大桥；2010 年 8 月 13 日，地震灾区发生群发性滑坡泥石流灾害，对绵竹市清平乡、都江堰市龙池镇和虹口乡、汶川县映秀镇造成了严重危害，摧毁和淤埋了大量恢复重建的房屋，给当地恢复重建工作造成重创；2011 年汶川境内多处发生滑坡、泥石流、塌方、堰塞湖、洪水等灾害，交通、通信、电力、供水中断，并造成 8 人失踪；2012 年 6 月 28 日四川宁南县矮子沟发生特大泥石流灾害，导致 41 人死亡和失踪、1276 人受灾；2013 年 7 月 10 日至 12 日，汶川县 7 条沟暴发泥石流，造成约 18 人死亡、失踪，多处灾后重建安置区、工厂、电站、房屋被毁，约 15000 人受灾，都汶高速和 G213 线交通被迫完全中断。

因此，山地灾害的防治将是一个漫长而艰巨的任务。面对灾害的频繁发生，我们对灾害形成的机理和认识还不足；其次，人们采取的工程防治措施由于费用较高，其覆盖的范围十分有限；最后，防灾减灾的预测预警等非工程技术还存在瓶颈。以汶川地震灾区为例，尽管我们在 2008~2010 年投入 100 亿元进行了约 1000 个滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害的工程治理，然而这 1000 个灾害点只占震后 50000 多个灾害点的 2%。此外受技术和经济条件的限制，灾害防治的标准通常也仅达到 20 年一遇，而对于部分应急工程，防治标准还更低，这使得许多治理工程在数年内失效。由于灾害点多面广，国家投入 20 多亿元，推进了非工程的县级山洪灾害监测预警工作；并且每年投入 2 亿多元进行

汶川地震灾区以群测群防为基础的地质灾害非工程措施的危害预防，非工程措施取得了显著的效果。然而研究表明，80%以上的泥石流灾害都是50年一遇以下的低频率灾害，而目前监测预警设施的寿命通常低于10年，并且监测预警工作的首期投入主要源于中央财政，后续的维护费用的短缺使得监测预警工作的可持续受到影响，这使得监测预警工作的效率降低。目前关于监测预警方面的研究和实践存在的主要问题包括：①监测预警的阈值指标由多因素控制，预警指标往往为一个范围值，难以精确确定；②监测预警设备寿命限制，与低频率大规模的灾害存在矛盾；③监测预警系统的可靠性不够高，系统的监测预警等级存在波动等。针对监测预警存在的问题，科技部“十二五”规划期间开展了“地震扰动区重大滑坡泥石流等地质灾害防范与生态修复”项目的研究，并且将“龙门山地震带小流域滑坡泥石流灾害监测预警技术与示范”作为其中重要的内容和课题；国家自然科学基金委员会在“十三五”期间进一步启动了中英合作基金项目“中国地震带自然灾害恢复力研究”，“地震山区可持续经济社会发展系统模型”成为其中重要的内容。本书作者在主持和参加以上2个项目的2个课题的基础上，针对山地灾害形成机理和预测预警研究存在的问题进行攻关，形成研究成果。希望通过灾害发育机理的研究，从机理入手，引入预测方法，结合灾害形成的机理，建立新的预测预警模式，并进行示范应用，以推动山地灾害防灾减灾的进步。

全书包括前言和7个章节，各章节执笔人：前言陈宁生；1.1节陈宁生、杨成林、王涛、胡桂胜，1.2节陈宁生、邓明枫、杨成林、丁海涛；2.1节王涛，2.2节陈宁生、邓明枫，2.3节胡桂胜，2.4节陈宁生、向龙；3.1节、3.2节陈宁生、杨成林、丁海涛，3.3节胡桂胜、丁海涛；4.1节王涛，4.2节陈宁生、杨成林、邓明枫，4.3节胡桂胜，4.4节陈宁生、赵春瑶；5.1节丁海涛，5.2节杨成林，5.3节胡桂胜，5.4节陈宁生、赵春瑶；6.1节陈宁生，6.2节杨成林、丁海涛，6.3节丁海涛、杨成林，6.4节、6.5节丁海涛；7.1节丁海涛，7.2节杨成林，7.3节胡桂胜，7.4节陈宁生、赵春瑶；附录陈宁生、丁海涛。

全书由陈宁生研究员和胡桂胜博士进行汇总，陈宁生研究员完成统稿和定稿的工作。

目 录

第 1 章 山地灾害及其防治	1
1.1 山地灾害类型、分布及其危害	1
1.1.1 山地灾害类型	1
1.1.2 山地灾害分布	3
1.1.3 山地灾害特点	9
1.2 山地灾害防治	11
1.2.1 山地灾害防治工程措施	11
1.2.2 山地灾害防治非工程措施	11
第 2 章 山地灾害形成条件与机理	13
2.1 山洪形成条件与过程	13
2.1.1 山洪形成条件	13
2.1.2 山洪形成过程	16
2.2 泥石流形成条件与机理	19
2.2.1 泥石流形成条件及控制因素	19
2.2.2 泥石流形成过程与机理	28
2.2.3 泥石流运动过程	33
2.2.4 泥石流堆积与成灾过程	37
2.3 冰湖、堰塞湖形成条件与溃决过程	37
2.3.1 冰湖、堰塞湖形成条件	37
2.3.2 冰湖、堰塞湖溃决过程分析	40
2.4 滑坡形成条件与过程	54
2.4.1 滑坡形成条件	54
2.4.2 滑坡形成模式	56
2.4.3 大型滑坡发育的内外动力条件	59
2.4.4 台湾小林村滑坡机理分析	74
第 3 章 山地灾害监测预警体系	78
3.1 山地灾害监测预警的关键问题	78
3.1.1 监测系统寿命与灾害发生频率不匹配	78
3.1.2 灾害预警阈值确定困难	79
3.1.3 监测设备及其传输功能限制	79
3.2 基于过程的分级多指标泥石流监测预警技术体系	80
3.2.1 早期预测与实时监测相结合的监测预警技术体系	80

3.2.2	多监测预警指标体系	81
3.2.3	监测预警指标分级	82
3.3	山地灾害监测预警体系管理	82
3.3.1	群测群防管理	82
3.3.2	专业监测管理	86
第4章	山地灾害评估与预测	88
4.1	山洪灾害判识与评估	88
4.1.1	山洪灾害易发性、危险性评估	89
4.1.2	山洪灾害早期预测	93
4.2	泥石流灾害评估与预测	94
4.2.1	泥石流沟判识	94
4.2.2	泥石流灾害易发性、危险性评估	98
4.2.3	泥石流灾害预测	100
4.3	冰湖、堰塞湖溃决危险性评估	113
4.3.1	冰湖溃决危险性评估	113
4.3.2	堰塞湖溃决危险性评估	115
4.4	滑坡判识与危险性评估	116
4.4.1	滑坡识别	116
4.4.2	滑坡的危险性评估	117
第5章	山地灾害监测指标与特征阈值	124
5.1	山洪灾害监测指标与特征阈值	124
5.2	泥石流灾害监测指标与特征阈值	126
5.2.1	泥石流启动过程指标与特征阈值	126
5.2.2	泥石流运动过程指标与特征阈值	132
5.3	冰湖、堰塞湖灾害监测指标与特征阈值	133
5.3.1	冰湖监测	133
5.3.2	冰湖预警	134
5.3.3	堰塞湖监测	135
5.4	滑坡监测指标与特征阈值	136
5.4.1	滑坡监测指标	136
5.4.2	降雨指标与特征阈值	136
5.4.3	变形指标与预警阈值	137
5.4.4	其他指标与预警阈值	138
第6章	山地灾害实时监测预警系统	140
6.1	山地灾害监测预警系统构架	140
6.2	山地灾害监测预警系统野外数据采集站点	142
6.2.1	监测站点布设原则与标准	142
6.2.2	监测站点构成	144

6.2.3	监测频率	147
6.2.4	数据采集站点技术指标及安装要求	148
6.3	通信与供能保障	149
6.3.1	通信方式选择	149
6.3.2	现场监测站点供能保障	150
6.4	山地灾害监测预警系统数据处理及预警平台	150
6.4.1	数据处理及预警平台硬件系统	150
6.4.2	数据处理及预警平台软件系统	151
6.5	监测预警新方法	162
第7章	山地灾害监测预警实践	168
7.1	山洪灾害监测预警实践	168
7.1.1	四川省都江堰市山洪灾害监测预警系统实施方案	168
7.1.2	山洪灾害监测预警效益分析	175
7.2	泥石流灾害监测预警实践	176
7.2.1	矮子沟泥石流监测预警实践	176
7.2.2	大寨沟泥石流监测预警实践	183
7.2.3	某水电站泥石流监测预警系统实践	188
7.3	冰湖、堰塞湖灾害监测预警实例	191
7.3.1	冰湖监测预警实例	191
7.3.2	堰塞湖监测预警实例	198
7.4	滑坡监测预警实例	203
7.4.1	樟木滑坡概况	203
7.4.2	樟木滑坡稳定性敏感因素分析	204
7.4.3	樟木滑坡深部位移监测	205
7.4.4	樟木滑坡地表位移监测	211
参考文献		214
附录		222
附录1	监测站点现有通信方式	222
附录2	监测站点现有供能方式	224
附录3	监测站点安装要求	225

第 1 章 山地灾害及其防治

1.1 山地灾害类型、分布及其危害

山地灾害为形成于山区的特有灾害，其类型包括山洪、泥石流、滑坡、崩塌、冰湖和堰塞湖溃决灾害等。我国山区面积约占国土面积的 70%，拥有世界屋脊青藏高原，地震频繁，极端气候常有发生，所以我国是世界上山地灾害分布最广的国家之一，特别是西南山区的山地灾害影响更为深远，有时灾害还以链状形式通过跨界河流危害国外，因此需要加强山地灾害研究。

1.1.1 山地灾害类型

1.1.1.1 山洪与山洪灾害

(1)山洪。山洪是山丘区小流域(流域面积原则上小于 200km^2)由降雨引起的突发性、暴涨暴落的地表径流。山丘区小流域因调蓄能力小，坡降较大，洪水持续时间短(历时几小时到十几小时，很少能达到 1 天)，但涨幅大，洪峰高，洪水过程线呈多峰尖瘦峰型。山洪按其成因可以分为暴雨山洪、冰雪山洪和溃决山洪，其中暴雨山洪在我国分布最广，暴发频率最高，危害最为严重。

(2)山洪灾害。山洪灾害是指山洪对其活动区(包括集流区、流通区、堆积区)内的生态环境、城镇、居民点、工业农业、交通、水利设施、通信、旅游、资源等和人民生命财产造成的直接破坏和伤害。同时山洪携带的大量泥沙会堵塞干流，给干流上、下游地区造成巨大危害(国家防汛抗旱总指挥部办公室、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所，1994)。

1.1.1.2 泥石流与泥石流灾害

(1)泥石流。泥石流是沿自然坡面或压力坡流动的松散土体与水、气的混合物，常发生在山区小流域，是一种包含大量泥沙石块和巨粒的固液气三相流体，呈黏性层或稀性紊流等运动状态(陈宁生等，2011)。

(2)泥石流灾害。泥石流灾害是指泥石流在活动过程中，对环境、生态和社会(包括各种基础设施、人民生命财产)造成的直接破坏和影响，包括全流域(形成区、流通区、堆积区)内的生态、环境、城镇、居民点、工矿业、农业、交通、水利水电设施、通信、旅游和人民生命财产等，同时大量泥沙进入江河而造成堵塞，给上、下游地区造成巨大危害。泥石流灾害的夜发率高、突发性强、来势迅猛、危害广泛，是一种山区环境灾害，

又是一种生态灾害，还有部分人为灾害。

泥石流危害方式有淤埋、冲刷、撞击、堵塞、串流改道、溃决、磨蚀、弯道超高和爬高、挤压主河道等。

1.1.1.3 冰湖、堰塞湖及其溃决灾害

1) 冰湖及冰湖溃决灾害

冰湖是由于冰川活动或者退缩产生的融水在冰川前部或者侧部汇集而成的洼地水体，可分为冰川终碛湖(冰碛阻塞湖)、冰川阻塞湖、冰斗湖和冰蚀槽谷湖。其中冰川终碛湖分布数量较多、规模较大，且灾害风险较高(姚治君等，2010)。

冰湖溃决灾害是指由于冰湖溃决引发的系列人员伤亡和财产损失等。冰湖溃决常发生溃决洪水和泥石流。世界各高山地区由于冰湖溃决形成的洪水与泥石流灾害屡屡发生，造成严重的经济损失和人员伤亡，如喜马拉雅山、天山、阿尔卑斯山、高加索山和科迪勒那山等。我国是冰湖溃决灾害分布广泛，且危害极为严重的国家之一(Liu et al., 1988)。喜马拉雅山区近 50 年来至少已发生 20 余次较大的冰湖溃决灾害事件，其中 3/4 发生在我国西藏境内(Xu D M, 1985; 刘伟, 2006)。冰湖溃决所导致的洪水与泥石流灾害具有突发性强、洪峰高、流量大、破坏性强、持续时间短、波及范围大的特点，在其形成、流动和堆积过程中又会激发其他次生灾害，从而造成巨大的经济损失和人员伤亡，其灾害损失比一般的暴雨激发的洪水或泥石流要严重得多(程尊兰等，2003)。如 2009 年 7 月 7 日，山南市错那县的冰湖溃决，冲毁公路 3km、涵洞 3 座、简易桥梁 4 座，导致 5 个自然村 17 户 57 人与外界交通完全中断。

2) 堰塞湖及堰塞湖溃决灾害

堰塞湖是一定量的固体物质堵塞山区河谷或河道所形成的具有一定库容的水体。一般而言，堰塞湖指天然形成的水体，有别于人工坝体形成的水体。堰塞湖根据成因类型，可分为滑坡(崩塌)堰塞湖、泥石流堰塞湖、火山熔岩堰塞湖、冰碛堰塞湖。

堰塞湖溃决灾害是指堰塞湖溃决引发的系列人员伤亡和财产损失等。堰塞湖溃决灾害主要表现在以下三个方面。

(1)易形成罕见的洪水灾害。由于堰塞体颗粒分布的随机性强，坝体疏松，密度较差，其稳定性、均质性、整体性和坝体结构强度都较差，易产生渗透变形、沉降变形和溃决。堰塞湖一旦溃决，库区蓄水将在短时间内下泄，形成罕见的洪灾。例如，2000 年 4 月 9 日西藏易贡堰塞湖溃决就形成了罕见的跨界河流灾害(Shang et al., 2003)。

(2)易链生滑坡等次生灾害，并形成灾害链。堰塞湖溃决的山洪或泥石流常淹没道路、农田、水利设施和城镇，并侵蚀河道两岸，降低坡体稳定性，形成新的滑坡等次生灾害。

(3)对河道演变产生重要作用。首先，堰塞湖形成后，在没有发生完全溃决的状况下，堰塞湖上游河床随着泥沙淤积而持续升高；其次，堰塞湖溃决将产生大流量的溃决洪水，既冲刷下游河道，又输移大量的固体物质使固体物质在下游河道淤积，造成河床

升高；此外，堰塞湖的形成本身就改变了河床的坡降，并形成新的侵蚀基准面，改变了流域的地貌。

1.1.1.4 滑坡与滑坡灾害

(1)滑坡。滑坡是指斜坡上的土体或者岩体，受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响，在重力作用下，沿着一定的软弱面或者软弱带，整体地或者分散地顺坡向下滑动的自然现象，俗称“走山”“垮山”“地滑”“土溜”等。

(2)滑坡灾害。滑坡的危害是指滑坡在形成、发生、运动的过程中对人和人类赖以生存的环境(包括人的生命、财产、各种工程设施和建筑、资源和生态环境)造成的灾害和影响。

1.1.2 山地灾害分布

不同的山地灾害受不同控制因素的影响，具有不同的分布规律。其中山洪灾害主要受地形和降水控制；泥石流灾害除了受地形、水源控制外还受松散物源分布的控制；滑坡、崩塌受地质构造背景、地震等内动力和降水、冰川等外动力联合控制；冰湖、堰塞湖溃决则受地形高差、构造与极端气候等内外动力联合控制，集中分布于西部山区。鉴于不同的山地灾害类型具有不同的分布规律，依据不同的灾种对其分布规律进行论述。

1)山洪灾害分布

山洪灾害的分布特征是山洪灾害防治区划的基本依据(张平仓, 2011)。从总体上看,我国山洪灾害主要呈现如下空间分布规律:①全国范围内,可划分为东部季风区、西北蒙新干旱区和青藏高原区;②山洪灾害强烈或频发地段,大多位于三大地形阶梯过渡地带或新构造运动强烈的构造活动区与暴雨中心重合的地区;③山洪灾害严重的地区,多分布于工农业生产中心的外围和相邻地区,以及人口居住、财产相对分散,灾害调查难度大的相对落后的广大农村山丘区。

东部季风区、蒙新干旱区和青藏高原区具有不同的山洪灾害特征。东部季风区由于社会经济发达、人口稠密成为我国一级、二级山洪灾害防治区面积比例最高的地区,而青藏高原区由于地广人稀、社会经济不发达,一级、二级山洪灾害防治区面积比例最小,故非防治区的面积比例相对较高。蒙新干旱区社会经济较为分散,山洪灾害多与夏季短历时的点暴雨相关(表 1-1、图 1-1)。

2)泥石流灾害分布

我国的泥石流类型众多、暴发频繁、危害严重,根据《全国山洪灾害防治规划》,全国现有灾害记录的泥石流沟约 11100 条,是世界上泥石流分布及危害最集中、规模最大的国家之一。

表 1-1 三个一级区内重点防治区和一般防治区面积统计表(张平仓, 2011)

分区名称	总面积 /(万 km ²)	山洪灾害防治区						非防治区面积 /(万 km ²)	
		一级重点防治区		二级重点防治区		一般防治区			
		面积 /(万 km ²)	占防治区 比例/%	面积 /(万 km ²)	占防治区 比例/%	面积 /(万 km ²)	占防治区 比例/%		
东部季风区(I)	466.29	33.34	10.57	44.8	14.2	237.32	75.23	315.46	150.82
蒙新干旱区(II)	235.18	3.62	7.42	4.83	9.85	40.52	82.74	48.97	186.21
青藏高原区(III)	257.73	3.4	3.45	6.94	7.05	88.12	89.5	98.46	159.27
全国合计(约)	959.20	40.36	8.72	56.57	12.22	365.96	79.06	462.89	496.30

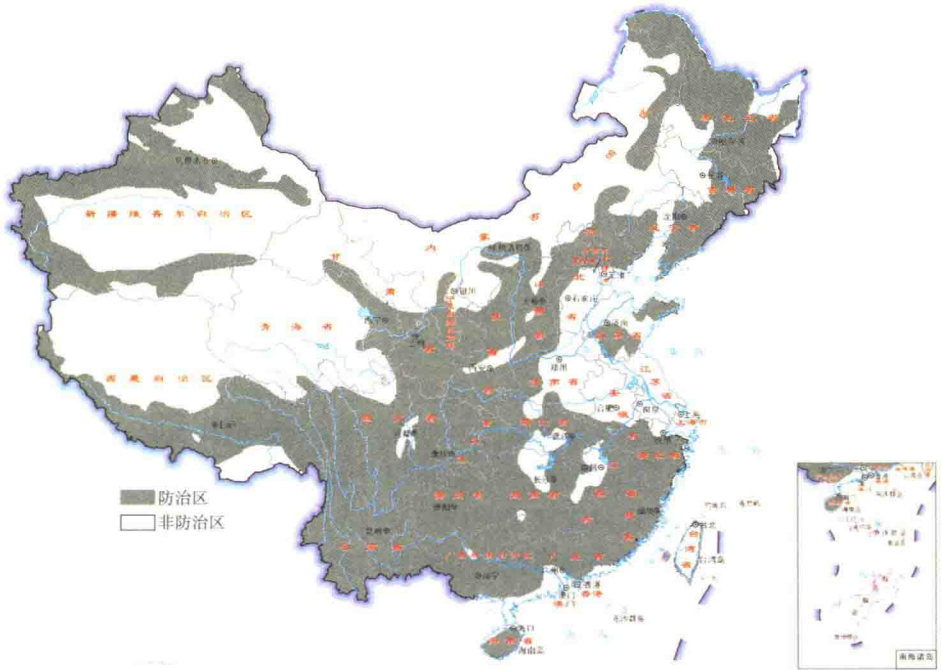


图 1-1 全国山洪防治区

我国泥石流分布,大体上以大兴安岭—燕山山脉—太行山脉—巫山山脉—雪峰山脉一线为界。该线以东为我国地貌最低一级阶梯的低山、丘陵和平原,泥石流分布零星(仅辽东南山地较密集)。该线以西,即我国地貌第一、第二级阶梯,包括广阔的高原、深切切割的极高山、高山和中山区,是泥石流最发育最集中的地区,泥石流沟群常呈带状或片状分布。泥石流成片地集中在青藏高原东南缘山地、四川盆地周边,以及陇东—陕南、晋西、冀北等以黄土高原东缘为主的地区(图 1-2)。

从泥石流成因类型看,冰川泥石流主要分布于中国西部山地,特别集中于西藏东南部地区;暴雨泥石流主要分布于西南山区,西北、华北和东北也有呈带状或零星分布;具有特殊组成的水石流和泥流则是呈地域性分布,水石流分布于华北地区,而泥流则多分布于松散的黄土地区。从我国行政区划看,泥石流分布遍及全国的 23 个省(区)市和自治区(图 1-3)(国家防汛抗旱总指挥部办公室、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,1994)。

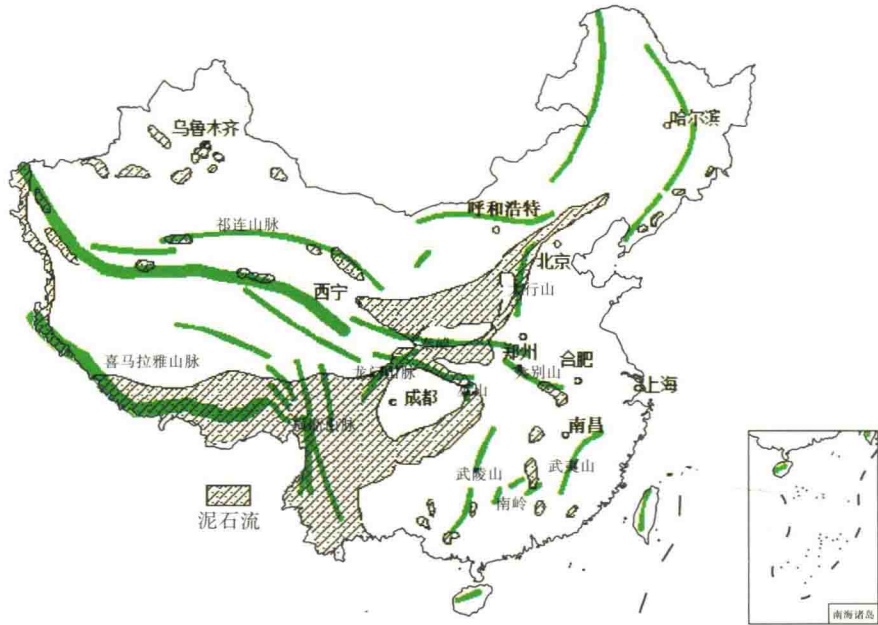


图 1-2 我国主要山脉和泥石流分布

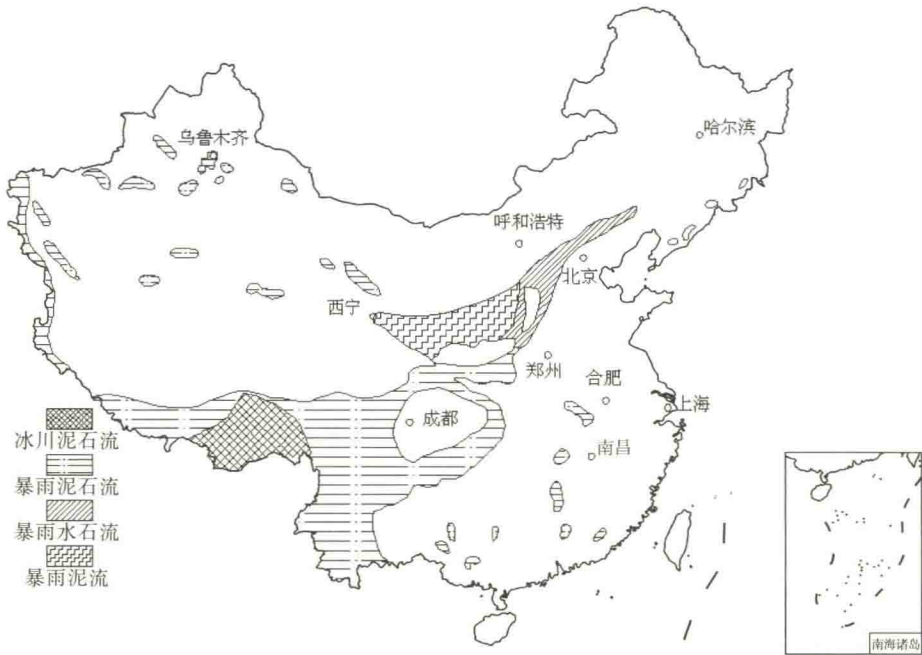


图 1-3 全国泥石流分布

3) 冰湖、堰塞湖灾害分布

(1) 冰湖灾害分布。通过对青藏高原冰湖的调查与遥感解译发现，80%的冰湖集中分布于青藏高原两级夷平面上(图 1-4)，即海拔 4500~5000m 盆地面和海拔 5200~5500m 山顶面，夷平面控制着冰湖的分布，如波曲流域两级夷平面控制的数量占 76%。以帕隆

藏布、波曲和朋曲为例，采用遥感调查和实地考察相结合的方式，研究发现流域内冰碛湖集中分布于海拔 3800m 以上地区，流域较小的波曲内冰湖密度最大，达到每万平方公里 119.9 个(表 1-2、表 1-3)。滑坡泥石流堰塞湖集中分布于藏东南的帕隆藏布流域(占有数量的 80%)。冰碛堰塞湖包括终碛湖(M)、冰斗湖(V)/槽谷湖(S)和侵蚀湖(C)，其中分布最广的是终碛湖，占总数的 57%。

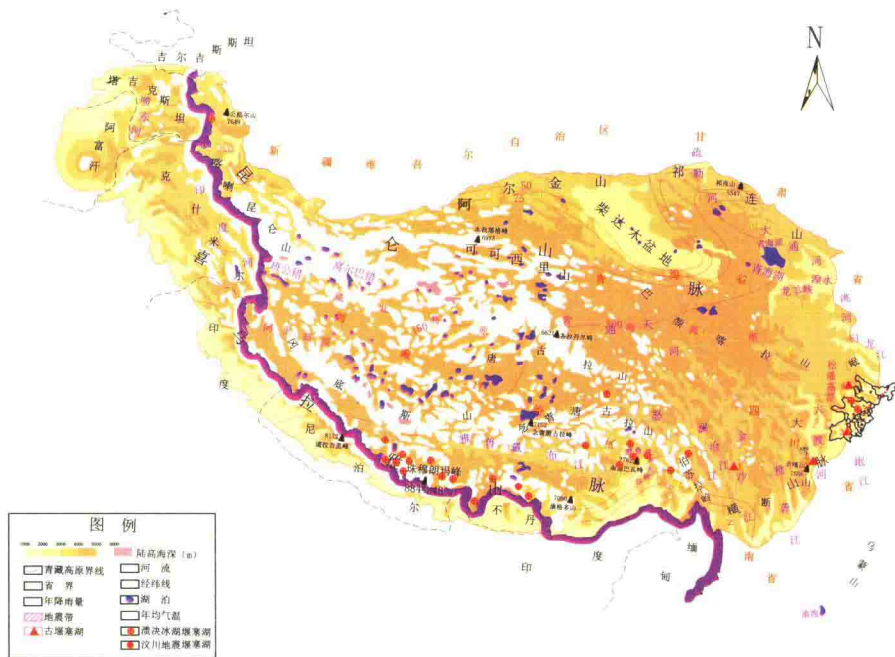


图 1-4 青藏高原冰湖堰塞湖分布图

表 1-2 跨界河流典型流域冰湖数量与密度统计表

序号	流域名称	数量	分布密度/(个/10 ⁴ km ²)	面积/km ²
1	帕隆藏布	253	88.7	72.8
2	波曲	30	119.9	11.1
3	朋曲	191	79.1	36.2

表 1-3 跨界河流典型流域冰湖类型统计表

序号	流域名称	各类型冰湖数量				
		总数	M	V	S	C
1	帕隆藏布	253	131	111	1	10
2	波曲	30	6	23	0	1
3	朋曲	191	133	38	0	20

(2)堰塞湖灾害分布。堰塞湖集中分布于地形高差大、构造活动强烈、岩石坚硬的河谷区，特别是在地震的触发下，往往形成规模大、数量多的堰塞湖。以汶川地震山区为例，崔鹏等(2009)研究发现，汶川地震产生的 256 个堰塞湖中有 85.6%分布于龙门山三大断裂带且距断层 10km 的区域内，在主断裂带两侧 10km 范围内分布有堰塞湖 176 处，

占 68.5%。堰塞湖距离断裂带越近其密度越大，以北川—映秀断裂为例，距离 5km 范围内分布有 109 处堰塞湖，占总数的 42.4%；5~10km 内 67 处，占 26.1%；10~15km 内 29 处，占 11.3%。堰塞湖的分布与地震断裂带距离的关系符合对数衰减规律。堰塞湖沿河流呈串珠状分布，区域内有绵远河、寿溪河、渔子溪等河流，其沿河分布平均密度为 0.6 处/km(图 1-5、图 1-6)。

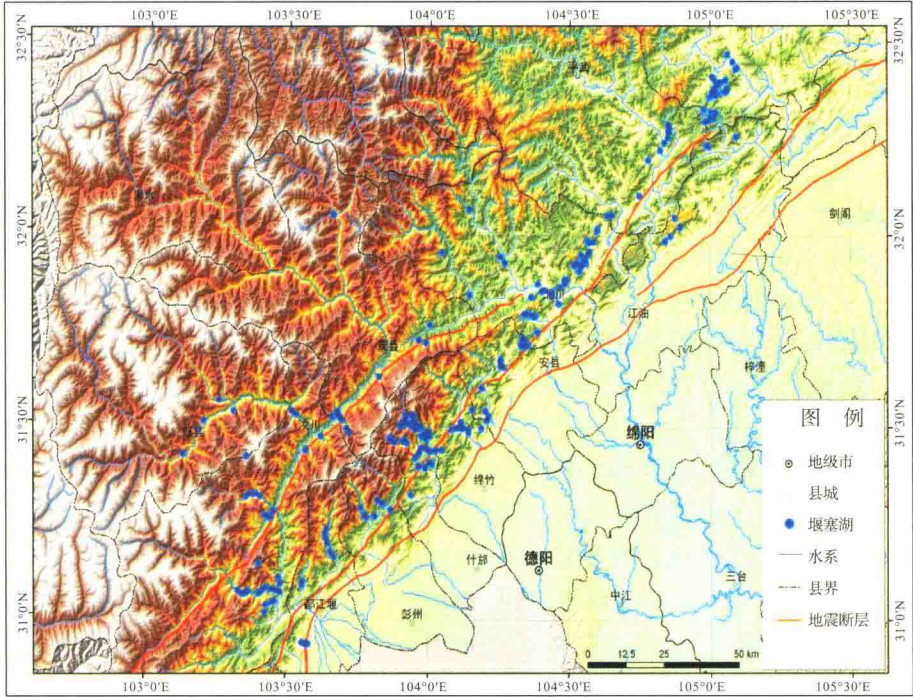


图 1-5 汶川地震堰塞湖分布图(崔鹏等, 2009)

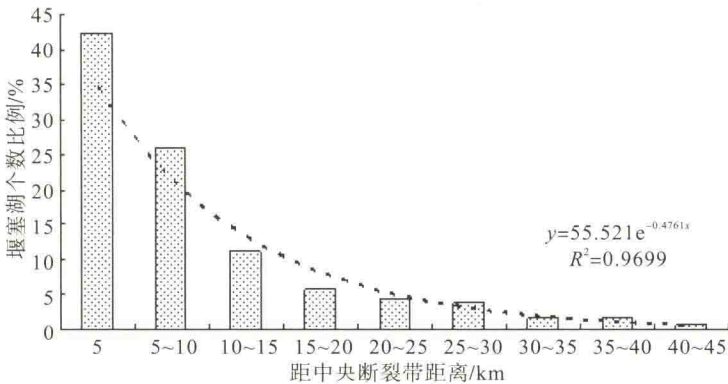


图 1-6 堰塞湖数量与其距断裂带距离的关系(崔鹏等, 2009)

4) 滑坡灾害分布

中国是亚洲乃至世界上滑坡灾害最为严重的国家之一，特别是 20 世纪 80 年代以来，随着经济建设的恢复与高速发展及地震活动与极端气候的影响，滑坡灾害呈逐年加重趋势。

行政区划上，全国范围内除山东省没有发现严重的滑坡灾害外，其余各省区市均有滑坡灾害发生。其中，西部地区(西南、西北)的云南省、贵州省、四川省、重庆市、西藏自治区、湖北省西部、湖南省西部、陕西省、宁夏回族自治区及甘肃省等省区市最为严重。

如图 1-7 所示，我国是一个多山的国家，从台湾岛至青藏高原，从长白山到海南岛都发生过不同程度的滑坡灾害。在南北方向上，以秦岭—淮河一线为界，大致与年降水量 800mm 等值线吻合，北部地区的滑坡分布较稀，南部较密。在东西方向上，以第二阶梯的东缘大兴安岭—太行山—鄂西山地—云贵高原东缘为界，东部地区的滑坡分布较稀，西部较密集；第一阶梯东部以大兴安岭—张家口—兰州—西藏林芝一线为界，西部地区的滑坡分布较稀，东部较密集。我国滑坡灾害的多发区主要集中在第一阶梯的东部和第二阶梯上；其次分布在喜马拉雅山南麓、闽浙丘陵和台湾地区。其他地区的滑坡灾害主要发生在河、湖、库岸边，以及堤坝、道路边坡等部位。

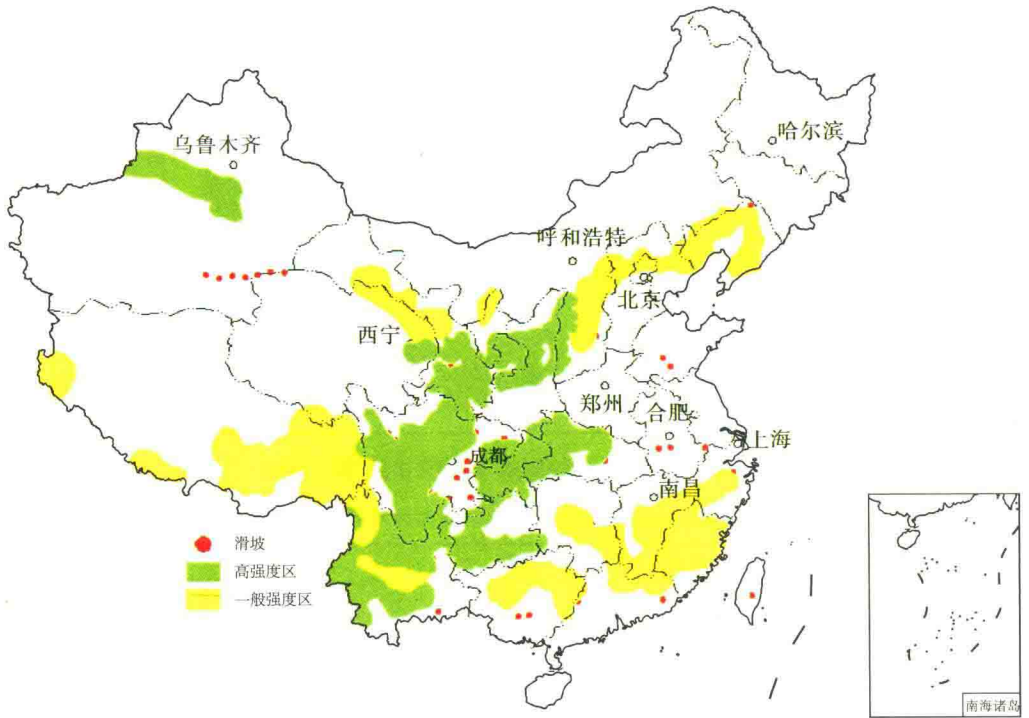


图 1-7 全国滑坡分布图

据统计，自 1949 年以来，我国东起辽宁省、浙江省、福建省，西至西藏自治区、新疆维吾尔自治区，北起内蒙古自治区，南到广东省、海南省，至少有 22 个省(自治区、直辖市)不同程度地遭受过滑坡的侵扰和危害。四川省是我国发生滑坡次数最多的省份，约占全国滑坡总数的 1/4，其次是陕西省、云南省、甘肃省、青海省、贵州省、湖北省等省。总的看来，我国滑坡的分布受气候和地貌控制。如果以秦岭—淮河一线为界，南方多于北方，差异性明显；以大兴安岭—太行山—云贵高原东缘一线为界，西部多于东部，差异性也很明显。上述川、陕、滇、甘、青、黔、鄂诸省则是这两条界线共同划分的重叠区(即主要分布区)。