

XIBU SHUIDIAN GONGCHENG
ZHONGDA HUAPU ZAIBIAN YANHUA JI
KONGZHI JISHU

西部水电工程 重大滑坡灾变演化及 控制技术

张世殊 胡新丽 章广成 冉从彦 谢剑明 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

西部水电工程 重大滑坡灾变演化及 控制技术

张世殊 胡新丽 章广成 冉从彦 谢剑明 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是一部依托西部复杂地质背景区水电工程重大滑坡案例，研究水电工程重大滑坡灾变演化及控制关键技术的系统性论著。全书总结了西部地区滑坡发育的类型及其典型特征；分析了西部地区多种不同变形破坏模式滑坡的灾变模式、演化特征，并评价了其稳定性及失稳破坏后的涌浪影响；基于有限元法开展滑坡演化控制研究，建立了滑坡模糊控制模型；提出了基于多传感器技术的应力场、渗流场、位移场、化学场、温度场等多场特征变量勘察与监测方法；构建起了滑坡演化过程多场特征信息监测体系和集数据采集、处理、分析与预报于一体的高精度无人实时监测预警平台。

本书可供从事水电、水利、交通、国防工程、矿山等行业的勘察、设计、施工及科研人员使用，也可供相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

西部水电工程重大滑坡灾变演化及控制技术 / 张世殊等著. -- 北京：中国水利水电出版社，2018. 4
ISBN 978-7-5170-6417-6

I. ①西… II. ①张… III. ①水利水电工程—滑坡—地质灾害—研究—西北地区②水利水电工程—滑坡—地质灾害—研究—西南地区 IV. ①P642. 22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第087055号

书 名	西部水电工程重大滑坡灾变演化及控制技术 XIBU SHUIDIAN GONGCHENG ZHONGDA HUAPAO ZAIBIAN YANHUA JI KONGZHI JISHU
作 者	张世殊 胡新丽 章广成 冉从彦 谢剑明 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E - mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中科印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 21印张 498千字
版 次	2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	130. 00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

滑坡是斜坡破坏类型中分布最广、危害最大的一种地质灾害。在中国西部地区，深山峡谷遍布，工程地质条件复杂，滑坡以规模大、机理复杂、危害大等特点著称于世，在全世界范围内具有典型性和代表性。

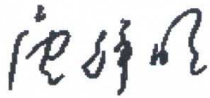
近年来，西部水电工程建设经历了高峰期，雅砻江锦屏一级、锦屏二级、官地，金沙江溪洛渡，大渡河瀑布沟等一系列巨型水电工程相继建成并蓄水发电。西部水电工程区域具有复杂的地形地质条件、复杂的地层岩性、复杂的地质构造背景和高地震烈度、复杂的物理地质现象和风化卸荷特征、复杂的水文地质条件等特点，水电工程的建设 and 库区的蓄水对西部复杂地质环境进行了新一轮的改造。在水电工程建设区域内揭示出众多的滑坡，个别大型滑坡严重威胁水电工程建设和后期的蓄水安全。如金沙江溪洛渡库区近坝库岸发育的干海子滑坡体积达到 4760 万 m^3 ，雅砻江多吉水电站库区发育的唐古栋滑坡体积达到 9260 万 m^3 ，雅砻江锦屏一级水电站库区发育的水文站滑坡体积达到 1600 万 m^3 等。如何处理好西部水电开发与自然生态环境之间的关系是保证我国西部水电事业健康、可持续发展的重要前提。为此，研究西部复杂地质背景条件下水电工程重大滑坡灾变演化过程及控制关键技术具有十分重要的现实意义和价值。

由中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司张世殊等多位长期从事水电工程地质勘察具有丰富实际经验的工程技术人员与中国地质大学（武汉）胡新丽教授等科研人员共同撰写的《西部水电工程重大滑坡灾变演化及控制技术》一书即将出版。该书依托西南山区各大型流域数十项巨型、大型水电工程生产、科研实践，以重大滑坡为研究对象，总结滑坡类型及其典型特征；针对不同发育规律和不同类型的滑坡，开展变形演化机制分析、稳定性分析、

灾变过程工程影响分析；开展了滑坡演化控制规律研究，基于有限元法分析提出了滑坡二阶自动控制模型，建立了滑坡模糊控制模型；提出了基于多传感器技术的应力场、渗流场、位移场、化学场、温度场等多场特征变量勘察与监测方法，实现了对滑坡演化过程多场信息的勘察与监测。

该书内容丰富而全面，针对西部水电工程中遇到的典型滑坡，系统地进行了梳理和总结，全面地研究了复杂地质条件下种类齐全的陡坡度、大体积、难防控、大滑坡的灾变演化规律和防控体系的构建，为广大一线工程地质人员和设计人员提供借鉴参考。

欣然作序，向广大读者推荐。

中国地质大学（武汉）党委副书记 

2018 年 1 月

前言

西部水电工程大多位于高山峡谷内，这些区域的地形地质条件决定了西部水电工程的特点。西部地区工程地质条件特点可概括为“五个复杂”，即具有复杂的地形地质条件、复杂的地层岩性、复杂的地质构造背景和高地震烈度、复杂的物理地质现象和风化卸荷特征、复杂的水文地质条件。由于西部地区水电工程特殊、复杂的工程地质特点，在水电开发中面临的众多大型和特大型的滑坡和滑坡群，不仅危及水电工程自身的安全，还涉及整个西部地区生态环境的稳定。研究西部复杂地质背景条件下水电工程重大滑坡灾变演化过程及控制关键技术具有十分重要的现实意义和价值，研究成果对西部地质环境复杂地区的工程建设具有重要的指导价值和巨大的经济效益。

2017年，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称“成都院”）联合中国地质大学（武汉），开展以“西部复杂地质环境区水电工程重大滑坡灾变演化及控制关键技术”为课题的科技项目研究，已取得了丰硕的研究成果，本书正是在此基础上撰写完成的。

本书共分8章：第1章阐述了西部水电开发概况、西部水电工程特点及滑坡研究现状等内容；第2章总结阐述了西部水电工程区基本地质条件，滑坡形成条件及影响因素，以及滑坡发育分布规律等内容；第3章系统开展了西部水电工程重大滑坡类型划分，详细论述了典型滑坡的基本特性；第4章全面分析了不同类型滑坡的灾变变形演化机制；第5章针对不同类型滑坡，运用刚体极限平衡法和数值模拟分析法开展稳定性评价；第6章主要研究了滑坡灾变过程及工程影响，如滑坡灾变的形式和规模、涌浪的计算等；第7章基于滑坡演化

过程，构建了滑坡灾变控制体系和滑坡灾变动态实时监测系统；第8章对本书的主要研究内容进行了总结。

本书第1章由张世殊、胡新丽撰写；第2章由冉从彦、魏恺泓、吴建川撰写；第3章由胡新丽、张世殊、章广成撰写；第4章由胡新丽、张玉明、徐楚、周昌、吴爽爽撰写；第5章由章广成、张玉明、徐楚、周昌、闫欣宜撰写；第6章由章广成、谢剑明、张佳运撰写；第7章由张世殊、章广成、胡新丽、谭福林、张永权撰写；第8章由张世殊、胡新丽、张玉明撰写。

在本书撰写过程中，成都院的领导以及院地质处、科技质量部、技术管理委员会等相关部门给予了大力的帮助，在此表示诚挚的感谢！本书在撰写过程中还得到了雅砻江楞古、锦屏一级、官地、乐安、共科水电站，岷江十里铺、紫坪铺水电站，金沙江溪洛渡水电站，以及大渡河大岗山水电站等水电工程建设单位的支持和帮助，在此一并致谢！

由于作者水平有限，本书不妥或错误之处，恳请读者批评指正！

编者

2018年2月

目 录

序
前言

第 1 章	概述	1
1.1	西部水电开发概况	2
1.2	西部水电工程特点	3
1.2.1	复杂的地形地貌特征	3
1.2.2	复杂的地层岩性	3
1.2.3	复杂的地质构造背景以及高地应力和高地震烈度	4
1.2.4	复杂的物理地质现象和风化卸荷特征	4
1.2.5	复杂的水文地质条件	5
1.3	滑坡研究现状	5
1.3.1	滑坡时空发育规律研究	5
1.3.2	滑坡影响因素研究	6
1.3.3	滑坡变形破坏机理研究	7
1.3.4	滑坡稳定性评价研究	8
1.3.5	滑坡涌浪研究	9
1.3.6	滑坡防控技术	10
第 2 章	西部水电工程滑坡发育规律	11
2.1	区域地质环境	11
2.1.1	地形地貌	11
2.1.2	工程岩组类型及分布	11
2.1.3	地质构造及地震	13
2.1.4	地质营力	16
2.1.5	水文地质条件	18

2.1.6	人类活动	20
2.2	滑坡的形成条件及影响因素	20
2.2.1	地形因素	20
2.2.2	地质构造	20
2.2.3	滑体物质	21
2.2.4	坡体结构	21
2.2.5	水对滑坡的影响	21
2.3	滑坡发育分布规律	23
2.3.1	滑坡分布特征	23
2.3.2	滑坡发育分布与地形地貌的关系	32
2.3.3	滑坡发育分布与地层岩性的关系	33
2.3.4	滑坡发育分布与地质构造的关系	34
2.3.5	滑坡发育分布与岸坡结构的关系	35
2.3.6	滑坡发育分布与其他关系	35
第3章	西部水电工程重大滑坡类型及基本特性	36
3.1	研究重点及难点	36
3.2	滑坡分类	36
3.2.1	覆盖层滑坡	37
3.2.2	岩质滑坡	39
3.2.3	重大滑坡统计	42
3.3	典型类型滑坡特征	43
3.3.1	野猪塘滑坡	43
3.3.2	金厂坝滑坡	47
3.3.3	乱石岗滑坡	63
3.3.4	林达滑坡	72
3.3.5	唐古栋滑坡	92
3.3.6	大奔流滑坡	109
3.3.7	黄草坪滑坡	112
第4章	滑坡灾变变形演化机制分析	118
4.1	推移式堆积滑坡	118
4.1.1	斜坡变形演化阶段	118
4.1.2	滑坡灾变模式	119
4.2	牵引式堆积滑坡	120
4.2.1	斜滑坡变形演化阶段	120
4.2.2	滑坡灾变模式	123
4.3	顺层岩质滑坡	125
4.3.1	斜坡变形演化阶段	125

4.3.2	滑坡灾变模式	128
4.3.3	滑坡灾变过程数值模拟	129
4.4	反倾岩质滑坡	136
4.4.1	斜坡变形演化阶段	136
4.4.2	滑坡灾变模式	138
4.4.3	滑坡灾变过程数值模拟	140
4.5	复合式滑坡	147
4.5.1	斜坡变形演化阶段	147
4.5.2	滑坡灾变模式	151
4.5.3	滑坡灾变过程数值模拟	161
4.6	溃屈式滑坡	166
4.6.1	斜坡变形演化阶段	166
4.6.2	滑坡灾变模式	168
4.6.3	滑坡灾变过程数值模拟	168
4.6.4	斜坡破坏过程总结	170
4.7	座落式滑坡	170
4.7.1	座落体变形演化阶段	170
4.7.2	座落体灾变模式	172
4.7.3	座落体灾变过程数值模拟	172
第5章	滑坡稳定性分析	176
5.1	稳定性分析方法	176
5.1.1	刚体极限平衡法	176
5.1.2	基于数值仿真的强度折减法	189
5.2	推移式滑坡	190
5.2.1	滑坡稳定性宏观定性分析	190
5.2.2	滑坡稳定性数值模拟分析	191
5.2.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	193
5.2.4	综合评价	193
5.3	牵引式滑坡	194
5.3.1	滑坡稳定性宏观定性分析	194
5.3.2	滑坡稳定性数值模拟分析	195
5.3.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	198
5.3.4	综合评价	203
5.4	顺层岩质滑坡	204
5.4.1	滑坡稳定性宏观定性分析	204
5.4.2	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	204
5.4.3	滑坡稳定性数值模拟分析	225

5.4.4	综合评价	226
5.5	反倾岩质滑坡	227
5.5.1	滑坡稳定性宏观定性分析	227
5.5.2	滑坡稳定性数值模拟分析	228
5.5.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	243
5.5.4	综合评价	248
5.6	复合式滑坡	249
5.6.1	滑坡稳定性宏观定性分析	249
5.6.2	滑坡稳定性数值模拟分析	250
5.6.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	258
5.6.4	综合评价	269
5.7	溃屈式滑坡	270
5.7.1	滑坡稳定性宏观定性分析	270
5.7.2	滑坡稳定性数值模拟分析	271
5.7.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	272
5.7.4	综合评价	274
5.8	座落式滑坡	274
5.8.1	座落体稳定性宏观定性分析	274
5.8.2	滑坡稳定性数值模拟分析	275
5.8.3	滑坡稳定性刚体极限平衡分析	279
第6章	滑坡灾变过程工程影响分析	284
6.1	研究重点及难点	284
6.2	滑坡灾变形式和规模	284
6.3	滑速计算分析	285
6.4	滑坡堵江分析	287
6.4.1	堵江预测	287
6.4.2	堵江高度	288
6.4.3	溃坝分析	289
6.4.4	堆积形态与溃坝数值模拟分析	291
6.5	滑坡涌浪计算分析	304
6.5.1	计算方法	304
6.5.2	计算结果	306
6.6	工程影响评价	307
第7章	滑坡灾变控制技术	308
7.1	滑坡灾变控制体系	308
7.1.1	滑坡控制模型	308
7.1.2	基于演化过程的滑坡控制优化方法	308

7.1.3 基于不同类型滑坡演化过程的控制方法	308
7.2 滑坡灾变动态实时监测系统	312
7.2.1 滑坡多场特征信息勘察与监测体系	313
7.2.2 基于多信息源的滑坡灾害演化阶段划分与评价指标	313
第8章 结论	316
参考文献	318

第 1 章 概 述

我国水力资源丰富，据 2000—2004 年全国水力资源复查，初步统计全国水力资源理论蕴藏量 6.89 亿 kW，年发电量 6.04 万亿 kWh，技术可开发装机容量 5.40 亿 kW，占世界水力资源可开发装机容量 24.23 亿 kW 的 22.29%，技术可开发年发电量 2.48 万亿 kWh；经济可开发装机容量 3.95 亿 kW，经济可开发年发电量 1.74 万亿 kWh。全国水力资源总量，包括理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量均居世界首位。资料显示，我国的西部地区水电资源可开发量就占到全国的 82%，目前已开发量还不足 16%。而这些地区都位于西部青藏高原和川西南高山峡谷区，具有复杂的地形地貌、地层岩性和地质构造背景，岩体卸荷强烈、地应力高、地震烈度高，这些地区地质灾害多发、易发，发生的滑坡规模大、防治难度大、对水电工程的危害大。

众所周知，中国是一个大型滑坡灾害极为发育的国家，其中灾难性滑坡占有突出重要的地位。尤其是在中国的西部地区，这些滑坡更是以其规模大、机理复杂、危害大等特点著称于世，在全世界范围内具有典型性和代表性。如 1920 年的宁夏海原地震滑坡、1933 年的四川岷江叠溪滑坡、1965 年云南禄劝滑坡、1967 年的四川唐古栋滑坡等。尤其是进入 20 世纪 80 年代以来，我国大型滑坡的发生又进入了一个新的活跃期，相继发生了 1982 年 7 月的长江鸡扒子滑坡、1983 年 3 月的甘肃洒勒山滑坡、1989 年 7 月的四川华蓥溪口滑坡、1991 年 9 月的云南昭通头寨沟滑坡、1996 年 6 月的云南元阳老金山滑坡、2000 年 4 月的西藏波密贡嘎滑坡、2004 年 7 月的四川宣汉滑坡、2005 年 2 月的四川丹巴滑坡等 20 余处大型和特大型滑坡，给人民生命和社会财产造成了重大损失。更为惊心的是，2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 8.0 级特大地震，触发了不同规模的崩塌和滑坡数万起，具有危害的 6000 余起，形成近百个堰塞湖，致使家园尽毁，灾害惨重。

随着我国社会经济的稳健发展和对再生清洁能源的大量需求，我国在西部地区水电开发事业呈现出加速发展的趋势。然而，在西部进行大规模的水电开发，势必会进一步地改变西部地区自然生态环境，并引发一些不良的地质灾害后果。例如，西南地区水电工程

高陡岩质边坡的稳定性控制已成为水电工程建设成败的关键技术问题之一，影响并制约着水力资源开发和水电工程建设。所以，如何处理好西部水电开发与自然生态环境之间的关系是保证我国西部水电事业健康、可持续发展的重要前提。所以，研究西部复杂地质背景条件下水电工程重大滑坡灾变演化过程及控制关键技术具有十分重要的现实意义和价值，此研究成果也将对西部地质环境复杂地区的工程建设具有重要的指导价值，具有巨大的经济效益。

1.1 西部水电开发概况

随着国民经济持续快速发展及对清洁能源的需求，我国对水电资源的开发利用进入了前所未有的发展时期。近二十年（特别是进入 21 世纪）以来，我国建成许多大中型水电站。据初步统计我国已建成水库 8.4 万座，其中大型水库 412 座、中型水库 2634 座，总库容 4500 多亿 m^3 ，水库数量跃居世界之首。仅长江流域就已建成水库近 5 万座，单库库容大于 1 亿 m^3 的就有 143 座，加上在建的大中型水库，总库容将超过 2113 亿 m^3 。

国家能源发展战略行动计划（2014—2020 年）提出大力发展可再生能源，积极开发水电。在做好生态环境保护和移民安置的前提下，以西南地区金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江等河流为重点，积极有序推进大型水电基地建设。因地制宜发展中小型电站，开展抽水蓄能电站规划和建设，加强水资源综合利用。到 2020 年，力争常规水电装机达到 3.5 亿 kW 左右。大力发展风电。重点规划建设酒泉、内蒙古西部、内蒙古东部、冀北、吉林、黑龙江、山东、哈密、江苏等 9 个大型现代风电基地以及配套送出工程。以南方和中东部地区为重点，大力发展分散式风电，稳步发展海上风电。

四川水力资源丰富，居全国之首，四川境内共有大小河流 1000 多条，河流年径流量约 3000 亿 m^3 ，居全国之冠。除阿坝州境内的白河、黑河注入黄河外，其余均属长江流域。大部分河流分布在长江北岸。东部四川盆地区主要河流有岷江、沱江、涪江、嘉陵江、渠江；西部高山高原区主要河流有大渡河、雅砻江、金沙江、青衣江。水能蕴藏量约占全国的 1/5，占整个西部的 1/3，其蕴藏量达 1.43 亿 kW，技术可开发量 1.2 亿 kW。水电资源在 1 万 kW 以上的资源河流约有 850 条。特别是金沙江、雅砻江、大渡河，约占全省水力资源的 2/3，全国规划的 13 个大型水电基地就有 3 个在四川，金沙江、雅砻江、大渡河是我国著名的水电基地，有“水电王国”之美誉。

云南省水能资源丰富，可开发装机容量 9795 万 kW，约占全国可开发量的 25%，目前全省水电开发率为 25%。截至 2010 年年底，全省水电装机累计已达 2570 万 kW，占全省电力装机总量的 69.2%。目前，全省在建水电装机达 1860 万 kW，随着景洪、小湾、金安桥等大中型水电站相继投产发电，向家坝、溪洛渡、功果桥、阿海、糯扎渡等一批大中型水电站先后获得国家核准并开工建设，全省水电开发进入了一个加快发展时期。

西藏有河流 356 条，全区水力资源理论蕴藏量占全国的 29%，居全国第一位。西藏水力资源量巨大，雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江干流梯级水电站规模大多在 100 万 kW 以上，个别为 1000 万 kW 级的巨型电站，是全国乃至世界少有的水力资源“富矿”，现今开发程度较低。

近些年来,西南地区相继建成了雅砻江二滩、锦屏一级和锦屏二级、官地,金沙江溪洛渡和向家坝,大渡河瀑布沟等巨型电站,正在建设大渡河大岗山、长河坝、猴子岩、两河口等一批巨型水电工程。代表性的有世纪工程——二滩水电站,世界最高拱坝(305m)和最难建设的电站——锦屏一级水电站,我国第二大水电站——溪洛渡水电站(总装机容量为 1386 万 kW)、西部开发的标志性工程——紫坪铺水利枢纽,水电工程建设进入了大发展阶段,水电工程地质和水文地质实践取得了辉煌成就,尤其是在 300m 级高拱坝坝基和抗滑稳定、渗漏和渗透稳定、数百米级高陡边坡、超大规模和深埋地下洞室(群)、高地应力环境、复杂水文地质环境等工程研究和设计方面积累了丰富的工程经验。

1.2 西部水电工程特点

西部水电工程均位于西部高山峡谷内,区域的地质条件决定了西部的水电工程的特点。通常,西部水电工程区地形地貌复杂,地层层序和岩性复杂,地质构造和地震构造背景复杂,具有高地震烈度、高地应力特征,滑坡和泥石流等物理地质现象发育,深切河谷具有岩体风化和卸荷强烈。具体地质背景特征如下。

1.2.1 复杂的地形地貌特征

西南地区从东向西,依次从四川盆地过渡到川西丘状高原高山峡谷区,到有着“世界屋脊”之称的青藏高原。西部地区具有明显的高海拔、深切河谷、高原地形地貌特征。

川西高山峡谷区,通常为深切河谷地貌,河谷狭窄,水流湍急,河谷形态以 V 形为主, U 形相间,局部为峡谷,两岸谷坡阶地分布零星,可见规模不等的 I ~ V 级等阶地。高山区常见冰斗、刃脊、角峰、U 形谷(悬谷)等冰蚀地貌残迹及高山“海子”(古冰川、冰斗、冰湖的残余)。总体反映出第四纪以来强烈上升隆起,河流急剧下切侵蚀以及冰川作用强烈的特点。

青藏高原地貌的基本结构以高山、深谷与高原盆地相间排列为特色。其中最普遍的地貌类型为极高山-高山山地地貌,它们是喜马拉雅山和冈底斯山、念青唐古拉山的一部分,海拔平均高达 5000.00~6000.00m,个别达 7000.00m。其中 6000.00m 以上的山地往往发育有现代冰川,是青藏高原现代冰川发育的中心之一,在现代冰川发育地的外围发育多期古冰川作用的遗迹。

1.2.2 复杂的地层岩性

西部区域地层岩性复杂,受地质背景的控制和构造运动的影响,区内不同区块的地层发育及其组合具有较为明显的差异。

从东到西,区域地层主要依次为扬子地层区、巴颜喀拉地层区、冈底斯-腾冲地层区、雅鲁藏布江地层区、喜马拉雅地层区。每个地层区内部又可以分成若干个子地层分区。各地层区内层序、岩性复杂多变,区域动力变质作用、区域热变质作用强烈,各种片岩较发育,部分岩石具高温流变特征。

西部地区,第四系各类不同成因的松散堆积层主要沿谷坡及河谷分布,残积、崩坡

积、冰川、冰水堆积主要分布于山顶平台及缓坡地带，冲洪积广泛分布于沟口、河床及两岸阶地，湖积主要分布在局部低洼盆地。河床覆盖一般深厚，层次结构复杂。

1.2.3 复杂的地质构造背景以及高地应力和高地震烈度

川西高山峡谷区及其外围广大地区位于青藏高原块体与华南块体的交汇部位，区域地质构造复杂，褶皱、断裂构造发育。其最主要的构造是由龙门山断裂带、鲜水河—小江断裂带构成近似 Y 字形的构造带，统称川滇南北向构造带。其中龙门山断裂带、鲜水河—小江断裂带的中南段是青藏高原块体与华南块体的分界线。该构造带是一条非常复杂的褶皱和断裂带，例如鲜水河—小江断裂带中间段包括了安宁河断裂带、则木河断裂带及其以东的大凉山断裂带和马边断裂带等，其影响范围十分广泛。川滇南北向构造带以西是著名的川滇菱形块体。区域范围内主要发震构造带有龙门山断裂带、鲜水河—安宁河—则木河断裂带、大凉山断裂构造带、马边断裂构造带、理塘—德巫断裂等。现代地应力测量也给出了区域主压应力的方位。在雅江、雅安、西昌北、天全等地的测量资料显示，现代主压应力方向为北西—南东向。而在康定东、康定西等地的测量结果为主压应力，方向是近东西向（马杏垣，1989）。西部地应力主要属中—高地应力区。

西部板块碰撞结合带由金沙江、盖玉—定曲河与甘孜—理塘三条蛇绿岩带、义敦中生代弧后带以及乡城—三叠世岛弧带组成的古特提斯火山岛弧及俯冲杂岩带，为 NW 转为 NNW 向的弧形逆冲—滑脱体系。金沙江以东主要隶属松潘—甘孜印支褶皱系；金沙江以西、怒江以东地区划属“三江”褶皱系。金沙江构造带内历史上记载的一些强震，特别是大于等于 7 级的强烈地震，主要发生于金沙江断裂带内巴塘断裂带，德钦—中甸断裂带内。

雅鲁藏布江地区地质构造复杂，不同层次、不同级别、不同性质、不同规模的构造形迹均很发育，雅鲁藏布江及邻近地区发育近 EW 向、SN 向、NNE~NE 向及 NW 向 4 个方向的断裂，其中以近 EW 向的雅鲁藏布江（深大）断裂带规模最大、其他方向断裂（带）规模次之。雅鲁藏布江地区活动断层发育。雅鲁藏布江断裂规模巨大，长度达 1000km 以上，大致沿雅鲁藏布江发育，在米林以东全新世以来活动性较强烈，米林以西活动性较弱，最新活动时代为中、晚更新世。雅鲁藏布江地区地震发育，米林以东主要是雅鲁藏布江南、北边界断裂诱发强烈地震，而米林以西主要是南北向或近南北向断裂控制强烈地震。

1.2.4 复杂的物理地质现象和风化卸荷特征

由于西部地区特有的地形地貌、地层岩性、地质构造和地震构造背景，西部地区物理地质现象发育，物理地质作用较强烈，主要表现为滑坡、泥石流、岩体风化卸荷、崩塌等易发和多发，多具有高位、规模大、破坏性强的特点。

在西部地区，由于青藏高原的快速隆升，河谷的快速下切，形成高山峡谷地貌，为滑坡的形成及发育提供了地质条件。这些地区地质条件十分复杂，不良地质发育，特别是发育众多大型和特大型的滑坡和滑坡群，制约水电站的选址、枢纽布置方案，以及威胁水电工程的安全运营。

由于河谷深切，岸坡高陡，岩体卸荷强烈，岩体局部易形成卸荷拉裂岩体，或形成深部拉裂缝，在一些西部水电工程坝肩边坡中出现深部拉裂缝、拉裂变形体或岩质滑坡。

1.2.5 复杂的水文地质条件

西南高山峡谷地区,一般河谷均为区内最低侵蚀和排泄基准面,受其控制,两岸山体地表水、地下水均向河流排泄。地下水一般为基岩裂隙水和第四系松散堆积层孔隙水,主要受大气降水和冰雪融水补给,向河谷及下游排泄,局部支沟岸坡偶见地下水出露。岸坡地下水补、径、排循环条件及岩体透水性主要受断层、裂隙及风化、卸荷的发育程度控制,断层带裂隙及裂隙密集带等透水性取决于其断层性状及裂隙连通结合程度。

1.3 滑坡研究现状

1.3.1 滑坡时空发育规律研究

在滑坡时空发育规律研究方面,随着技术方法的不断更新与进步,逐渐由以前简单的定性分析转向结合GIS、遥感技术、数值模拟等手段来综合分析滑坡的发育规律或形成机制。

滑坡的时空发育规律主要受控于滑坡所处的地质环境与外部诱发因素,影响滑坡时空发育规律的地质环境因素主要包括地形地貌、地层岩性与地质构造等;而控制滑坡时空发育规律的外部诱发因素主要包括降雨,库水位波动、地震及其他人类工程活动等,滑坡的发育通常是滑坡所处的地质环境与外部诱发因素共同作用的结果。

滑坡所处地质环境对滑坡时空发育规律有着至关重要的作用,国内外学者开展了一系列基于地形地貌、地层岩性和地质构造等因素对滑坡发育规律影响的研究。

地形地貌对滑坡的时空发育通常具有控制性作用。

Montgomery等(1994)建立了地表数字地形数据与斜坡稳定性耦合模型,探讨了地形对浅层滑坡发育的控制作用^[1]。Vorpahl等(2012)通过建立统计学模型,指出滑坡的触发与滑坡所在斜坡所处的位置有关^[2],滑坡的形成和发育更容易发生在具有小面积凸起的斜坡而不是平坦的斜坡地带。Zhang等(2012)通过对黄土地区的滑坡进行研究,指出地貌特征是控制降雨诱发浅层滑坡形成和发育的主要因素,滑坡后地貌特征与滑坡的运动类型具有显著相关性^[3]。Mark等(1995)通过对1500个滑坡进行分析,发现浅层滑坡与陡峭地形具有很好的相关性^[4]。戴福初等(2000)以香港大屿山为研究区,利用GIS手段自动提取滑坡发生地的地形条件,统计分析后发现滑坡易滑地形为坡度大于20°、高程在100.00~500.00m的南坡^[5]。Lee(2009)指出海底滑坡发育具有不均匀的时空分布特征,空间上主要受到峡湾、河流三角洲、大陆坡等地形因素控制,时间上受到海底滑坡规模、位置、海底压力和温度等因素影响,其分布具有不均匀性^[6]。Gao(1993)通过航片解译滑坡,并将其与地形数据层进行叠加分析,发现滑坡易发区主要分布在中等高程、坡度陡、北、北东向和西、北西向坡的凹坡^[7]。

地层岩性与构造作用往往也是导致滑坡时空发育规律发生变化的重要因素。

夏金梧(1997)对长江上游1763处滑坡点进行统计分析后,指出滑坡在空间上有沿岩性软弱区或软硬相间岩层区内成片发育、沿断裂带成群成带分布等特征^[8]。Roering等(2005)基于DEM模型获得大型滑坡的分布,并建立自动识别大型滑坡地形特征的算法