

SHUIDIAN GONGCHENG NISHILIU

FANGZHI ANQUAN KONGZHI JISHU

水电工程泥石流 防治安全控制技术

陈卫东 彭仕雄 付 峥
余学明 李青春 宋书志 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电工程泥石流 防治安全控制技术

陈卫东 彭仕雄 付 峥
余学明 李青春 宋书志 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是在大量水电工程泥石流沟勘察与治理实践的基础上,研究、总结和提炼的技术成果。全书系统地研究了泥石流的形成机理、影响因素、分类、流体特征及判别方法等,提出了泥石流勘察和预测的方法,建立了泥石流防治工程设计原则、标准与布置等安全控制技术体系,并提供了泥石流防治工程实例。

本书是水电行业泥石流灾害防治技术专著,可供从事水电行业和其他行业泥石流防治工程专业技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电工程泥石流防治安全控制技术 / 陈卫东等著

· 一 北京:中国水利水电出版社,2018.9

ISBN 978-7-5170-6553-1

I. ①水… II. ①陈… III. ①水利水电工程—泥石流—灾害防治 IV. ①P642.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第137983号

书 名	水电工程泥石流防治安全控制技术 SHUIDIAN GONGCHENG NISHILIU FANGZHI ANQUAN KONGZHI JISHU
作 者	陈卫东 彭仕雄 付 峥 余学明 李青春 宋书志 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 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	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 344千字
版 次	2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	85.00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

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司简介

成都勘测设计研究院有限公司（简称“成都院”），其历史可以追溯至1950年成立的燃料工业部西南水力发电工程处，正式建制于1955年，拥有成都与温江科研、办公场所22.9万多 m^2 ，成都办公区位于风景秀丽的浣花溪畔，毗邻历史人文胜迹青羊宫、杜甫草堂。薪火相传的60多年里，成都院始终秉承“贡献国家、服务业主、回报社会”的价值理念，致力于实现人与自然、社会的和谐发展，服务全球清洁能源与基础设施、环境工程建设。

成都院是中国电建集团直属的国家级大型综合勘测设计科研企业，业务覆盖能源、水利、水务、城建、市政、交通、环保等全基础设施领域，涵盖规划、勘察、设计、咨询、总承包、投融资、建设运营、技术服务等全产业链；持有工程设计综合甲级、工程勘察综合类甲级、工程造价咨询、工程监理、水土保持、水文水资源调查评价、建设项目环境影响评价、污染治理设施运行服务、地质灾害治理设计勘查与施工、环境污染防治工程、对外承包工程等34项资质证书及发电业务许可证；建立了质量、职业健康安全、环境管理体系。

成都院于2014年成功跨入集团特级子企业行列，资产规模突破百亿元大关；2015年新签合同实现百亿元目标，各项经济指标保持稳健增长势头，营业收入、利润和经济增加值均创历史新高。

成都院高精尖人才众多，专家团队实力雄厚，包括中国工程院院士、全国勘察设计大师、新世纪百千万人才工程国家级人选、国家监理大师、国务院政府特殊津贴专家、全国优秀科技工作者、四川省学术和技术带头人、四川省工程勘察设计大师、四川省突出贡献的优秀专家。

60多年来，成都院完成了西南及西藏地区100余条大中型河流的水力资源普查和复查，普查的水能资源理论蕴藏量占全国的54.4%；承担雅鲁藏布江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、嘉陵江等流域和河段的开发规划，水利枢纽和水电站规划约350座，总装机容量约2.1亿kW，约占我国可开发水力资源的39%，居行业首位；勘察设计并建成发电的羊湖、映秀湾、龚嘴、

铜街子、沙牌、瀑布沟及中国 20 世纪投产的最大水电站二滩、装机容量世界第三的溪洛渡、世界第一高拱坝锦屏一级等大中型水电站；正在从事前期勘察设计的水电站约 30 座，装机容量 2000 万 kW，正在建设的水电站 15 座，装机容量 1500 万 kW，涉及长河坝、两河口、双江口等世界级大型水电站。2016 年，溪洛渡水电站荣获“菲迪克工程项目杰出奖”，瀑布沟水电站荣获“中国土木工程詹天佑奖”。

成都院在国家能源规划、高端技术服务方面培育出核心竞争能力，代表着我国乃至世界水电勘察设计的最高水平。国内前 10 座高坝中，成都院勘察设计 6 座；国内 200m 以上特高拱坝和特高土石坝均为 7 座，成都院勘察设计各有 4 座；国内已建和在建单机 50 万 kW 以上的 16 座大型地下厂房，8 座由成都院勘察设计。在高混凝土拱坝勘察设计、高土石坝勘察设计、深厚覆盖层复杂地基处理、巨型复杂地下洞室群勘察设计、高陡边坡稳定控制、高水头大流量窄河谷泄洪消能设计、大坝施工过程仿真与智能监控、数字流域与数字工程等领域形成了企业核心优势技术，引领行业技术进步。

成都院形成了“产、学、研”相结合的科技创新体系，拥有国家能源水能风能研究分中心、高混凝土坝研发分中心、大型地下工程研发分中心，博士后工作站、四川省首批院士工作站，成都院-IBM 智慧流域研究院、法国达索-成都院工程数字化创新中心等智慧平台。2008 年，被认定为国家级高新技术企业；2012 年，被认定为第五批国家级创新型试点企业；2013 年，被认定为四川省创新型示范企业；2015 年，成功获评国家级企业技术中心。

成都院依托重大工程建设，坚持科技创新，取得了大批科技成果并得到推广应用。“高坝坝基岩体稳定性评价及可利用岩体质量研究”“碾压混凝土拱坝筑坝配套技术研究”“中国数字水电”等数十项成果处于国际或国内领先水平。先后编制并发布国家和行业标准 106 项，成为水电行业技术标准编制的主力军。共获得国家级、省部级奖励 540 余项，其中国家科技进步奖 25 项（一等奖 2 项）、国家级“四优”奖 25 项。连续多年稳居“全国勘察设计综合实力百强单位”和工程设计企业 TOP60 强前列。

成都院在保持传统业务优势的同时，从专注水利水电、新能源等领域，全面拓展到交通、建筑、市政及水环境、水务、岩土工程、数字工程、环境工程、移民工程代建、设备成套供应等多元业务领域，构筑可持续发展的全产业链价值，形成了工程勘测设计、工程总承包、投资及资产运营“三大产业”格局。

成都院从 2003 年开始进军总承包业务市场，先后承担水电、水利、交通、

市政、水环境、集控改造、移民代建等各种类型的总承包业务，带来了项目管理水平的大幅提高，逐渐形成“以设计为龙头的总承包”品牌优势。成功建成四川首个风电项目——德昌一期示范风电场，世界最大山地光伏项目群首期工程——万家山光伏电站，开启了川藏能源结构调整的关键一步。2015年，中标两河口库区移民代建工程设计施工总承包项目，为集团库区代建制规模最大的总承包项目。投资业务推动构筑全产业链作用日益显著，截至2015年年底，参股、控股公司30家，拥有发电权益容量245万kW；城市污水处理及工业废水BOT项目9个，污水处理能力近26.1万t/d。

成都院坚持国际优先发展战略，积极对接“一带一路”倡议，努力打造“出海”能力，业务范围遍布亚洲、非洲、欧洲、南北美洲、大洋洲等60多个国家或地区，控股哈萨克斯坦水利设计院，参股欧亚电力有限公司，成功建设格鲁吉亚卡杜里、越南洛富明、哈萨克斯坦玛依纳等项目；承担中亚五国可再生能源规划和塞拉利昂国家水电规划；开展南亚最大污水处理厂EPC项目、越南国家风电示范项目富叻风电EPC项目，承担科特迪瓦最大水电站苏布雷勘测设计和机电设备成套任务。经过十多年经营、探索和实践，积累了丰富的国际工程勘测设计与施工总承包经验。

成都院坚守“诚信、负责、卓越”企业精神与“服务、关爱、回报”企业价值观，勇于承担中央企业的社会责任和义务，在水电工程抢险、堰塞湖整治、次生灾害防治、帮扶救助、精准扶贫等方面作出积极贡献，荣膺“中央企业先进集体”“中央企业先进基层党组织”“全国五一劳动奖状”“全国用户满意企业”“四川省最佳文明单位”等30多项荣誉称号。

引领新常态，迎接新挑战，激发新优势，成都院将强力深化改革，着力推动创新，持续提升管理，向着“具有全球竞争力的质量效益型国际工程公司”目标阔步前行。

前 言

Qian Yan

泥石流 (debris flow) 是山区常见的地质灾害, 是由于降水 (暴雨、冰川、积雪融化水) 而在沟谷或山坡上产生的一种挟带大量泥沙、石块和巨砾等固体物质的特殊洪流。

泥石流汇水、汇集固体物质过程十分复杂, 是各种自然和 (或) 人为因素综合作用的产物, 具有历时短暂、突发、不可复制及危险性高等特点。水电工程大多位于高山峡谷区, 物理地质作用强烈, 局地强降水多发, 泥石流活动相当频繁。泥石流灾害制约着水电枢纽工程、施工临时辅助工程、移民安置工程的场址选择与布置; 威胁着水电工程建构筑物、设施设备及人员的安全, 泥石流灾害及其影响已经成为水电开发中的重大地质灾害问题。

本书采用现场调查、数值计算、实验模拟、现场监测、工程类比等多种手段, 对水电工程区域内百余条典型泥石流沟进行了分析, 研究了泥石流形成条件、影响因素、发育特征等; 提出了泥石流灾害的勘察、评价和预测方法, 危险性大小判定标准, 不同降雨强度标准下泥石流泛滥范围, 堆积厚度预测, 堵江预测, 河水壅高预测等; 研究了泥石流与水电枢纽工程、施工临时辅助工程、移民安置工程等之间的相互影响, 建立了泥石流防治工程设计原则、标准及布置等安全控制技术体系。

本书共 12 章, 介绍了泥石流基础理论、水电工程泥石流勘察与防治设计研究及实例。其中, 泥石流基本理论主要内容包括国内外各行业对泥石流理论的研究现状、泥石流的形成过程、泥石流分类、泥石流基本特征及泥石流运动与动力特征; 水电工程泥石流勘察与防治设计研究主要内容包括水电工程泥石流勘察与评价、防治标准、防治设计原则与布置、防治工程设计研究、防治工程施工组织设计、监测与预警研究等; 水电工程泥石流勘察与防治设计以四川省渔子溪河耿达水电站鹰嘴岩沟泥石流、长河坝水电站野坝沟泥石流以及瀑布沟万工集镇“7·27”大沟滑坡-碎屑流为例, 对水电工程遭受的典型泥石流进行了个案分析、总结, 验证了水电工程中泥石流治理工程勘察设计的方法、标准、原则等体系研究成果。

本书由中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称中国电建成都院）组织编撰，西南交通大学胡卸文教授和中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所苏春江研究员等提供了有益的资料。中国电建成都院由具备较丰富的泥石流灾害勘察与防治经验的教授级高级工程师和高级工程师等组成编撰团队，经过五年的全面总结和深入研究，精心撰写了本书。

在本书撰写过程中，得到了中国电建成都院领导、技术经济委员会、高边坡地质灾害技术中心科技质量部、地质处、施工处、水工处等相关单位和人员的大力支持与帮助，在此表示衷心感谢！

本书是水电行业第一本系统阐述泥石流勘察与防治技术的专著。由于笔者水平有限，时间仓促，书中的不足和错误在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2017年10月

目 录

Mu Lu

前言

第 1 章 概述	1
1.1 其他行业泥石流研究现状	1
1.2 水电行业泥石流研究进展	2
第 2 章 泥石流的基本知识	3
2.1 泥石流基本特点	3
2.2 泥石流发生条件	4
2.3 泥石流形成过程	5
2.4 泥石流形成启动机制分析	7
2.5 泥石流沟判别方法	8
2.6 泥石流分类	10
2.7 小结	14
第 3 章 泥石流基本特性	16
3.1 泥石流流体物理特性	16
3.2 泥石流侵蚀搬运与堆积	17
3.3 小结	28
第 4 章 泥石流流体运动与动力特征	30
4.1 泥石流流体运动特征	30
4.2 泥石流流体动力特征	33
4.3 小结	54
第 5 章 水电工程泥石流统计研究	55
5.1 泥石流沟基本特征统计研究	55
5.2 泥石流沟年降雨量指标统计分析	55
5.3 泥石流沟 H_1 指标统计分析	61
5.4 泥石流沟流域面积指标统计分析	62
5.5 泥石流沟沟长指标统计分析	62
5.6 泥石流沟坡降指标统计分析	64
5.7 单位长度不稳定物源量指标统计分析	65

5.8	泥石流对水电工程的危害	66
5.9	小结	67
第6章	水电工程泥石流勘察与评价	68
6.1	勘察阶段划分	68
6.2	勘察内容与方法	68
6.3	泥石流形成条件勘察	70
6.4	泥石流评价与预测	81
6.5	泥石流防治工程勘察	114
6.6	小结	114
第7章	水电工程泥石流防治原则与标准	115
7.1	泥石流灾害防治的基本程序	115
7.2	泥石流灾害防治原则	116
7.3	泥石流防治标准	117
第8章	水电工程泥石流防治技术与工程布置	126
8.1	泥石流防治技术	126
8.2	泥石流防治工程布置要求	127
8.3	防治工程布置	129
8.4	防治工程布置方案	130
8.5	防治工程布置方案比选	135
第9章	水电工程泥石流防治工程建(构)筑物设计	137
9.1	实体拦挡坝工程	137
9.2	格栅坝工程	145
9.3	排导工程	150
9.4	停淤场工程	158
9.5	沟坡整治工程	162
9.6	生物工程措施	163
第10章	水电工程泥石流防治工程施工组织设计	164
10.1	编制施工方案的原则	164
10.2	施工交通	164
10.3	分期施工	167
第11章	水电工程泥石流监测与预警	168
11.1	泥石流监测内容	168
11.2	泥石流监测布置原则	169
11.3	泥石流监测布置	170
11.4	常见泥石流监测预警手段	176
11.5	泥石流预警	177

第 12 章 水电工程泥石流勘察与防治实例	180
12.1 耿达水电站鹰嘴岩沟泥石流防治工程	180
12.2 长河坝水电站野坝沟泥石流防治工程	194
12.3 瀑布沟水电站万工集镇“7·27”大沟泥石流防治工程	201
参考文献	215

第1章 概述

泥石流是我国山区常见的一种地质灾害,具有历时短暂性、突发性、不可重复性及高危险性等特点。泥石流灾害性往往比较严重,已成为工程建设的重大地质灾害问题。

我国水能资源丰富,主要集中在西部山区,包括岷江、大渡河、雅鲁藏布江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江以及黄河上游等大型的水电基地。特别是西南地区水电站均位于青藏高原的周边地带,伴随青藏高原在第四纪期间的快速隆升,新构造运动活跃,地震频繁,岩体风化卸荷作用强烈,沟谷、斜坡上松散物源丰富,且局地降雨强度大,泥石流活动频繁。近年来水电工程枢纽区、施工区域及移民安置区遭遇了不同程度的泥石流灾害,如2005年“7·18”美姑河某水电站柳洪沟泥石流、2009年“7·23”大渡河某水电站响水沟泥石流、2009年“7·31”西溪河某水电站泥石流、2010年“7·27”汉源某移民安置点大沟泥石流、2010年“8·14”汶川地震灾区红椿沟泥石流、2012年“6·28”金沙江某水电站矮子沟泥石流、2012年“8·30”雅鲁藏布江中游某水电站坡面泥石流、2016年“5·8”福建泰宁某水电站泥石流等。泥石流对水电工程建设构成重大威胁,其对水电工程的危害主要表现在以下几个方面:①影响水电枢纽工程、施工临时辅助工程及移民安置场地工程选址和布置;②直接冲毁或淤塞水电站大坝、厂房、进水口、水渠等永久构筑物 and 设施设备,施工临时辅助建筑物和设施设备,移民安置工程构筑物 and 设施设备,造成人员伤亡和设施设备重大损失;③输送大量泥沙,造成主河河床抬升,加速水库泥沙淤积,使有效库容减少,洪水调节能力降低,发电量减少,损坏水轮机组。

因此,对水电工程泥石流进行勘察评价、分析预测与安全控制研究,建立泥石流灾害防治工程安全控制技术体系具有十分重要的意义。

1.1 其他行业泥石流研究现状

20世纪50年代以来,随着川藏公路、成昆铁路、宝成铁路、陇海铁路、东川铁路支线等重大交通工程的建设,我国开始对泥石流进行较系统的研究。有关单位和学者进行了大量研究工作,初步形成了泥石流勘察、动力学特性和危险性评价体系,提出了泥石流防治的基本思路和方法,同时也积累了一定的工程实践经验。

国土系统在多年泥石流勘察的经验的基础上,提出了国土行业的泥石流勘察标准体系,发布了《泥石流灾害防治工程勘察规范》(DZ/T 0220—2006),对泥石流勘察内容、方法、手段和泥石流危险性评价等进行系统总结,特别是泥石流易发程度评价方法的提出和相关特征值的确定,对泥石流勘察有较强的指导。

鉴于我国山地分布广、泥石流发育普遍、危害对象多的情况,目前,其他行业对泥石

流防治有较多的实践，但尚未形成泥石流防治的国家标准或行业标准。

1.2 水电行业泥石流研究进展

水电行业对泥石流灾害研究及实践起步于 20 世纪 50 年代，但系统研究不足，未形成泥石流灾害防治工程安全控制技术体系。近 30 年来，随着西部水电大开发的推进，水电工程建设遭遇泥石流灾害逐渐增多。近年来，中国电建集团成都勘测设计研究院（以下简称中国电建成都院）依托百余条泥石流沟勘察与治理实践，较为全面系统地研究了水电水利工程泥石流勘察与防治关键技术，研究采用了工程调研、现场调查、数值计算、实验模拟、现场监测、工程类比等多种手段相结合的方法，研究了泥石流形成条件、影响因素、发育特征等；总结了泥石流灾害的勘察研究方法和泥石流灾害预测方法，提出了泥石流危险性判定标准、不同降雨强度标准下泥石流泛滥范围、堆积厚度预测、堵江预测等；对泥石流与水电工程枢纽布置、施工组织设计、移民安置工程等之间的关系进行了分析研究，总结了泥石流对水电工程的危害程度，针对不同类型、不同等级的工程，提出了泥石流灾害防护基本原则和泥石流灾害防治标准，防治设计体系、监测与预警体系；形成了基于地质演化过程的水电工程泥石流研究、预测、治理标准、治理设计标准体系。

水电工程行业对泥石流研究的成果主要体现在以下几方面：

- (1) 结合水电工程特点，提出了适合水电工程的泥石流勘察类别划分方法，明确了各勘察阶段任务。
- (2) 明确了各勘察类别的勘察内容、勘察原则和勘察方法。泥石流勘察以地质调查测绘为主，对地质调查不能完全满足泥石流的评价与防治，应进行必要的泥石流勘探和试验工作。勘察工作重点地段是物源区和堆积扇区以及可能的危险泛滥区范围。
- (3) 提出了适合水电工程的泥石流工程特性分类方法。
- (4) 形成了发生泥石流危险性大小三要素评判标准以及是否发生泥石流的判定方法。
- (5) 总结了危险度分区、危险范围预测模型、模型试验、数值模拟等主要预测评价泥石流危险性方法的适用性。
- (6) 根据泥石流危害对象和危害程度，提出了水电工程泥石流工程防治等级划分和保护标准。
- (7) 结合水电工程特点，提出了防治工程设计原则。水电工程场地和建筑物布置区应遵循避让优先的原则。防治工程设计应遵循治理与预警相结合的原则，防治措施应因地制宜、针对重点、技术可靠、经济合理，“固、拦、排、停”等措施相结合，便于施工和维护。
- (8) 提出了防治工程布置原则。研究了固、拦、排、停防治方案以及各种组合方案的适宜性。
- (9) 总结了泥石流灾害防治工程建构筑物的设计方法。
- (10) 总结了泥石流监测与预警方法。

第2章 泥石流的基本知识

2.1 泥石流基本特点

泥石流具有孕育时间较长，暴发历时短，暴发时空、规模、性质存在不确定性和高致灾性等特点。

泥石流的发生间隔与物源孕育的时间密切相关。在一次泥石流发生后，沟谷两岸部分物源在水流的冲刷、下切作用下已被带走，再次形成参与泥石流的物源需要较长的时间。但泥石流从暴发到结束往往历时较短，一次泥石流过程一般从几分钟至几小时。

局地强降水是泥石流发生的触发条件，而局地强降水具有偶然性、突发性，难以准确预测其降水沟域和强度，因此，泥石流发生的时间、地点具有不确定性，其发生泥石流的规模、性质亦具有不确定性。

泥石流是全流域的灾害，在形成区以坡面失稳、水土流失为主，在流通区以冲刷破坏和边坡失稳、水土流失为主，在堆积区以流体泛滥堆积为主。同时，泥石流中固体物含量高且含有巨砾，若沿山高坡陡的地形坡面运动，其流速每秒可达几米甚至几十米，较高的势能转化为强大的动能，破坏力很大，而在缓坡地带又会迅速堆积。它与一般洪水和水流有着迥然不同的运动机理，近似宾汉体的特征。典型泥石流的形成示意图见图 2.1。

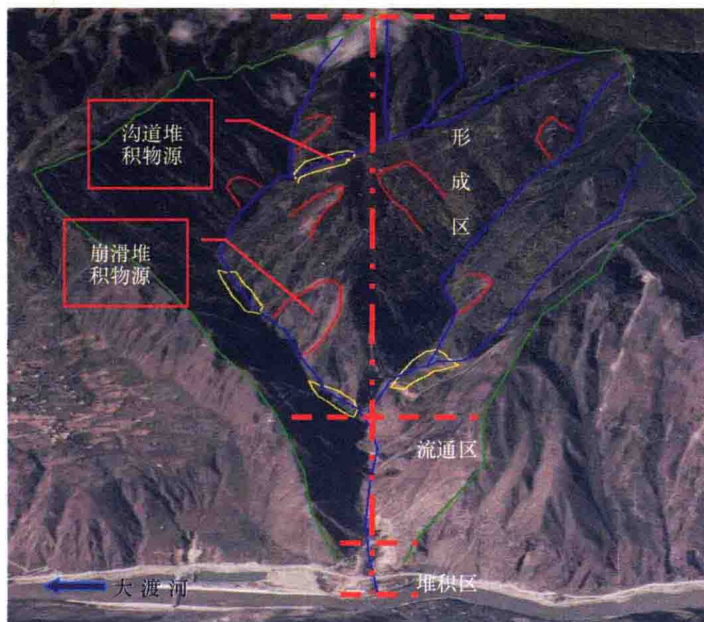


图 2.1 典型泥石流的形成示意图

2.2 泥石流发生条件

泥石流的形成与发育必须具备三个必要条件：①地形地貌条件；②松散物源条件；③水源条件。从这三个条件分析，前两者属地质条件，第三者是水文气象条件。三个条件必须同时具备，才可能发生泥石流，但其中某一个条件的差异将改变泥石流的性质及规模。

地形地貌条件是泥石流运动的能量条件，沟道的沟床纵比降达到一定坡度后，才具备泥石流启动及运动的动能条件，根据中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所的研究成果，泥石流易启动的沟床纵比降一般在 $260\% \sim 580\%$ 范围内。水电行业的统计分析表明，沟床平均纵比降大于 105% 即可发生泥石流。

松散物源条件是泥石流形成的物质基础，参与泥石流的松散物源达到一定程度后，流体的性质及特征才具有泥石流的特征。

水源条件则是泥石流激发的外部因素，只有降雨达到一定强度后，才能有效地激发泥石流的暴发。

地形地貌条件、松散物源条件和水源条件三个要素就单个而言，其值越大越容易发生泥石流。根据对泥石流形成过程的研究，三个要素之间往往存在相互制约的关系，在物源一定的前提下，一般沟道纵比降越大，则激发泥石流需要的雨强则越小。泥石流形成过程三个要素之间的协调关系见图 2.2。



图 2.2 泥石流形成过程三个要素之间的协调关系图

2.2.1 地形地貌条件

研究表明，流域面积、主沟长度、比降、两岸山坡坡度等地形地貌条件对泥石流的发育程度、活动规律等方面有重要影响。

据相关资料，我国西南山区泥石流沟的平均沟床比降与泥石流发生的关系一般为：沟床纵比降小于 50% 的沟道不易发生泥石流；沟床纵比降为 $50\% \sim 105\%$ 的沟道发生泥石流可能性较小；沟床纵比降为 $105\% \sim 300\%$ 的沟道发生泥石流可能性较大；沟床纵比降为 $300\% \sim 500\%$ 的沟道发生坡面泥石流可能性大。根据对水电工程泥石流沟坡降进行的统计，泥石流发生沟床纵比降发生区间为 $79\% \sim 729\%$ ，这与上述规律基本相同。

此外，根据对水电行业近百条典型泥石流沟的统计分析发现，泥石流暴发与沟道流域面积及沟长非线性相关。

2.2.2 松散物源条件

泥石流的松散土体来源主要取决于流域地质特征。在地质构造复杂和强地震地区, 岩层破碎, 以及滑坡、崩塌、风化、卸荷等物理地质现象发育的区域, 沟谷两岸往往提供丰富的松散固体物源。

人类活动引起的松散物源主要由人类工程活动造成。如工业生产中产生的废渣、工程建设中的弃渣处置不当, 山坡遭破坏、森林被乱砍滥伐而加剧水土流失等, 为泥石流的形成提供了大量松散固体物源。

2.2.3 水源条件

泥石流的水源主要有大气降雨和冰雪融水, 也有因堰塞湖溃决而造成泥石流的。

发生泥石流所需的水量与多种因素有关, 主要取决于松散土体的性质和地形, 若土体颗粒细、疏松、含水量高, 且具有较陡的地形, 则较少的水量即能引起泥石流。除沙漠、戈壁区外, 一般山区流域都具备发生泥石流的水源条件。

泥石流的发生与降雨量密切相关。降雨量主要包括年降雨量、季节性降雨量、日降雨量、雨强。一般来说, 年降雨量越大, 泥石流活动越强, 但发生泥石流的不同地质区的年降雨量差别很大, 泥石流活动主要分布在雨季。日降雨量对泥石流的影响主要表现在一天之中的分配和量级对泥石流发生作用方面, 泥石流发生所需要的日降雨量大小取决于流域的自然环境条件。对于雨强, 大多数学者一致认为, 雨强是激发泥石流的一个不可忽略的因素, 大量的泥石流发生与 H_1 (1 小时雨强) 和 $H_{1/6}$ (10 分钟雨强) 密切相关。在泥石流发生前, 持续降雨对物源的软化和饱和对发生泥石流至关重要, 一般首次短暂暴雨发生泥石流的可能性相对较小, 而在持续降雨后的局地暴雨容易发生泥石流。

2.3 泥石流形成过程

泥石流是降水、冰川融水等径流作用在沟谷或山坡上产生的一种挟带大量固体物质(如岩土体、树木、杂草等)的固、液、气三相流体, 它的活动过程基本介于洪水和滑坡之间, 故泥石流的形成过程实质上是在一个流域的山坡上沟谷内固液气相物质互相作用、搅拌, 向高浓度固液相颗粒流转化的全过程, 是地形、物源、水源条件三者相互作用的复杂过程和结果。

根据水体对物源的水动力和物源的重力作用, 可将泥石流形成过程分成搬运型和滑移型, 以及由此两种过程衍生出的复合型, 即搬运-滑移型, 这三种过程可以分别与形成机理中的水力侵蚀、重力侵蚀及它们的复合组成相对应。

同一条沟泥石流可形成单一型或多种类型组合泥石流, 即这一次泥石流以搬运型过程为主, 而另一次泥石流以滑移型过程为主, 而且还经常发生过程的复合叠加。在同一次泥石流过程中, 还会出现形成过程的相互转化, 如同一次泥石流形成过程中, 形成区内泥石流的形成过程主要表现为滑移型特征, 流通区内泥石流的形成过程主要表现为搬运-滑移型特征, 堆积区内泥石流的形成过程主要表现为搬运型特征。对于流域主沟道较短的沟

谷，泥石流的形成过程多以滑移型为主；对于主沟道较长的沟道，可能会出现搬运型、滑移型和搬运-滑移型三种形态的相互转化复合叠加的过程。

2.3.1 搬运型泥石流形成过程

搬运型泥石流形成过程，即水流对沟床和坡面的强烈侵蚀过程。这种搬运型泥石流的特性及规模，一方面取决于水量的多寡和水体运动的性质；另一方面取决于松散物源的结构、组成和成分，前者决定着冲刷和侵蚀的强度，后者则决定着抗冲刷和侵蚀的能力，以及由此可能参与泥石流形成的物源量。形成搬运型泥石流水量来源主要是降雨、冰雪消融和水体（湖泊、水库、水塘等）溃决，而地表土层的结构状况和堆积物颗粒成分则决定于地质构造和人类活动情况，因而各流域是有一定差别的。

对于西南地区水电工程遭遇的泥石流而言，泥石流形成的水量来源主要是降雨。对于搬运型泥石流形成过程说来，主要决定于短历时的高强度暴雨，因为在这种降雨条件下极易形成强劲的地表径流，使沟床中的松散固体物质被揭底而产生搬运型泥石流。与此同时，坡面上的松散物质也易被侵蚀而搬运到沟床中，共同参与这种类型的泥石流形成过程。这种搬运型泥石流形成过程并不需要要有充沛的前期降雨过程和降雨量，它的形成主要取决于降雨强度以及在此强度下的降雨总量。当然，在前期有一定的降雨的情况下，因地表湿润或达到饱和状态，降雨的地表径流系数就会增大，因而所产生的洪水量就大，对形成搬运型泥石流是十分有利的。

2.3.2 滑移型泥石流形成过程

滑移型泥石流形成过程，实质上是重力侵蚀机理发生作用的结果，它主要是山坡上或沟谷内的松散土体饱和液化后出现不稳定状态，在自身重力作用下发生的滑塌和迁移过程。

一般而言，充填的水体可以是雨水、泉水、冰雪融水和湖泊、水库、渠道渗水等，而被充水的堆积物则有流域内的地表堆积物、沟床物质、滑坡崩塌堆积物以及因构造破碎和地质软弱的基岩等。对于西南地区水电工程遭遇的泥石流来说，其水源最主要的是雨水，在个别情况下也有因渠道渗水而成的。由于这类泥石流形成过程需要使土体充水并达到饱和或过饱和状态，故其形成过程需要有能使土体过度充水从而达到破坏其原有物源的平衡状态的、充沛的前期降雨量，而且其降雨过程持续越长越有利。四川境内水电工程遭受这类泥石流的比例较小，目前规模较大的如“7·27”汉源县万工泥石流灾害。

另外在这类泥石流形成过程中，还会因沟床下切或坡脚掏蚀，使部分未被充水的固体物质失稳，巨大的块体跌入沟谷，以原状土体的形式漂浮在沟中泥石流表面上，并被沟中泥石流流体带走，这种状况只有在沟中泥石流黏稠、本身在做滑移运动才会出现，所以说它是发生在典型泥石流流域中的滑移型泥石流形成过程的一种极特殊的形式。

2.3.3 搬运-滑移型泥石流形成过程

在同一个流域中，因洪水揭底沟床物质或冲蚀坡面松散堆积物的搬运过程形成搬运型泥石流，山坡或沟床土体因充水饱和失稳的滑移过程形成滑移型泥石流，两种泥石流同时