

跨学科视野下的大气科学与地质灾害融合教学研究

晁 晖^{1,2*}, 徐长昊³

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²成都理工大学自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 四川 成都

³四川省冶金地质勘查院, 四川 成都

收稿日期: 2025年10月4日; 录用日期: 2025年11月18日; 发布日期: 2025年11月26日

摘 要

大气科学专业在我国气象人才培养体系中占据重要地位,其核心课程传统上侧重于大气动力学、天气学、气候学等方向,但教学过程中与地质灾害相关的交叉融合仍显不足。如何在大气科学专业地球科学类课程中融入地质灾害内容,帮助学生理解气象与地质灾害的内在联系,成为高等教育教学改革亟待解决的问题。文章聚焦气象-地质灾害耦合特征,基于问题导向学习(PBL)与案例驱动学习(CBL)理论,构建了“案例驱动-情境模拟-跨学科研讨”相结合的融合教学模式。以“5·28”康布麻曲灾害为例验证教学效果。结果表明,该模式显著提升了学生的灾害链分析与应急决策能力,进一步为我国高原地区防灾减灾和可持续发展提供了复合型人才支撑。

关键词

大气科学, 地质灾害, 高原气象, 跨学科融合

Research on the Integration of Atmospheric Science and Geological Hazards Teaching from an Interdisciplinary Perspective

Hui Chao^{1,2*}, Changhao Xu³

¹School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Key Laboratory of Deep-Time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

³Sichuan Metallurgical Geological Exploration Institute, Chengdu Sichuan

Received: October 4, 2025; accepted: November 18, 2025; published: November 26, 2025

*通讯作者。

文章引用: 晁晖, 徐长昊. 跨学科视野下的大气科学与地质灾害融合教学研究[J]. 创新教育研究, 2025, 13(11): 601-608. DOI: 10.12677/ces.2025.1311909

Abstract

Atmospheric science plays a vital role in China's meteorological talent training system. Traditionally, its core courses focus on atmospheric dynamics, synoptic meteorology, and climatology. However, the integration of geological disaster content remains insufficient. How to incorporate geological disaster content into the earth science courses of atmospheric science majors to help students understand the intrinsic links between meteorology and geological disasters has become an urgent issue in higher education teaching reform. This paper focuses on the coupling characteristics of meteorological and geological disasters and constructs an integrated teaching model combining "case-driven learning (CBL), problem-based learning (PBL), and interdisciplinary discussion", based on the theories of CBL and PBL. The teaching effect is verified by taking the "5·28" Kangbu Maqiu disaster as an example. The results show that the model significantly improves students' ability to analyze disaster chains and make emergency decisions, thus providing compound talents for disaster prevention, mitigation, and sustainable development in the plateau regions of China.

Keywords

Atmospheric Science, Geohazards, Plateau Meteorology, Interdisciplinary Integration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化加剧背景下, 极端气象条件对地质稳定性构成严峻挑战, 地质灾害频发, 科学理解大气变化如何诱发地质灾害并构建精准预警系统成为当务之急[1]。随着科技进步和地球系统科学的发展, 大气科学正逐步走向跨学科融合的新阶段, 学科交叉已是必然趋势[2]。然而, 目前多数大气科学专业课程仍主要集中于大气环流、动力过程及气候变化等方面, 对大气过程与地质灾害之间的作用机制涉及有限。近年来, 我国自然灾害事件发生的风险进一步加剧, 例如青藏高原地区, 强降雨、冰雪消融与冻融循环等典型大气过程常直接触发滑坡、泥石流和冰湖溃决洪水等灾害[3]。尽管我国自 2002 年起已建立气象部门与国土资源部门的联合预警机制, 在灾害防控中取得显著成效, 但在高等教育层面, 相关课程体系仍存在明显学科壁垒。传统课程结构强调单一学科的知识深度, 却不足以支撑学生形成自然灾害链的整体分析能力。在此背景下, 将地质灾害知识有机融入大气科学课程, 不仅有助于提升学生对气象-地质灾害耦合机理的理解, 而且能够强化其综合防灾减灾能力, 培养具备跨学科视野和系统思维的复合型人才。这一改革既契合气象与地质灾害高度耦合的区域特征, 同时也顺应了国际地球科学教育的发展潮流。因此, 在大气科学专业中推进跨学科融合教学改革具有紧迫性和战略意义。

在此背景下, 构建以“气象-地质灾害耦合”为核心的跨学科教学体系, 既是培养复合型地球科学人才的现实需求, 也是落实地球系统科学教育理念的重要途径。已有研究表明, 基于问题导向学习(Problem-Based Learning, PBL)和案例驱动学习(Case-Based Learning, CBL)的教学模式, 能够显著增强学生的探究意识与知识迁移能力。PBL 通过设置真实复杂问题情境, 促使学生主动探究与协作学习; CBL 则强调从典型案例中抽象出原理与策略, 强化理论与实践的结合[4]。PBL-CBL 教学模式已经广泛应用于多个学科, 二者的结合可为地球科学教学提供有效范式, 尤其适用于气象与地质灾害的耦合教学。

综上,本研究以气象-地质灾害学科融合为切入点、问题导向学习(PBL)与案例驱动学习(CBL)为核心理论框架,构建了融合案例驱动、情境模拟与跨学科研讨的教学模式。该模式不仅验证了融合教学的有效性,也为高原地区防灾减灾型人才培养提供了新思路。未来将通过量化评估与多校联合实验进一步完善教学模型,构建适用于地球系统科学领域的跨学科融合教学模式。

2. 气象-地质灾害的教学现状

2.1. 气象-地质灾害的研究内容

气象过程与地质活动的相互作用是地球系统科学的核心研究领域。气象因素是地质灾害的关键触发因素之一,二者通过复杂的物理和化学过程相互影响,形成双向耦合系统[5]。地质灾害气象风险是一个涵盖灾害成因、孕灾环境和承灾体脆弱性的复杂系统[6]。人类活动也会引起地质环境的响应与调整,进一步放大气象因素的不利影响[7]。深入研究二者的相互作用机制,对灾害防控具有重要意义。

现有案例表明,极端降雨常与复杂地形和松动地层叠加,形成灾害链放大效应,震后地层在强降雨下易诱发次生灾害,凸显了气象因素在地质灾害链中的核心作用[8]。随着气象观测和遥感技术的发展,强降雨与地质灾害的定量关系研究不断深入,为灾害预测和防控奠定了基础。通过气象监测、数值模拟和卫星遥感等手段,可实时监测和预测降水、温度、风场等关键气象因子,为地质灾害风险评估和应急响应提供科学依据[9]。科学家们已能更精确地揭示气象变量与地质灾害之间的因果关系,为灾害早期预警提供理论基础。这种跨学科融合提升了灾害监测与预警精度,为区域防灾减灾体系的建设提供了技术支撑,对社会安全可持续发展具有重要意义。

2.2. 跨学科课程融合的必要性的

基于前文,大气科学与地质灾害的高度耦合性决定了两者的教学与研究必须突破单一学科边界,构建跨学科融合的课程体系。从学生发展视角来看,大气科学与地质灾害融合课程的学习收益具有显著的综合性与导向性。地质灾害的孕育与演化受到降水、气温、风场等大气要素的直接驱动[10],而大气过程又通过改变地表水文循环、岩体稳定性与能量平衡,触发滑坡、泥石流、崩塌等灾害事件[11]。在专业素养层面,学生能够系统掌握灾害形成的多因素耦合机制,具备从大气过程视角分析地质灾害的科学思维与综合判断能力,从而显著提升其在防灾减灾领域的理论水平与实践能力。其次,在科研与创新方面,课程通过引入数据分析、灾害模拟与遥感监测等训练环节,促进学生形成科学问题意识与技术创新思维,为未来在气象-地质交叉领域开展科研工作奠定坚实基础。再次,在职业发展与学术深造层面,该课程体系拓展了学生的就业与升学空间,使其能够胜任气象、地质、国土、生态及防灾减灾等行业的技术与管理岗位,同时具备继续攻读地球系统科学、环境科学等交叉学科研究的能力与储备。

地球科学跨学科教育已成为支撑国家防灾减灾现代化、培养复合型灾害风险管理人才的核心路径。近年来,国内在“气象-地质灾害融合教学”领域形成一系列可推广的课程范式:中小学层面,上海闵行区明强小学依托气象教育联盟,构建“观测-模拟-演练”一体化课堂,将台风路径预测与滑坡风险耦合分析嵌入项目式学习,显著提升了学生数据解释、系统思维与应急决策能力;中学阶段,双流中学实验学校以“3W”教学法整合地理、物理与生命安全教育,通过校园灾害风险评估与避险路径设计,实现“生命·生态·安全”核心素养落地;高等学校层面,四川大学“国际减灾与应急管理创新班”联合UNDRR、UNESCO等机构,以真实灾害案例为牵引,采用PBL-TBL混合教学,培养具有国际视野、能够贯通气象预警、地质灾害研判与社区韧性治理的复合型人才。上述实践共同指向跨学科课程的定位贡献:一是以真实灾害链问题重构知识边界,打通大气科学、地质学与公共管理的数据壁垒,形成“机理-风险-响应”完整教学链;二是以场景化、数字化演练替代传统验证性实验,使学生在高阶思维与情境

责任双重驱动下, 习得可迁移的灾害风险沟通与协同治理能力; 三是通过“高校-中小学-社区”纵向贯通, 为国家应急管理体系提供“科普-人才-决策”多层次支撑, 回应新时代对“懂科学、善管理、能应急”地球科学复合型人才的需求。

2.3. 课程体系的不足与发展趋势

传统的大气科学课程体系形成于 20 世纪中期, 其核心内容主要包括大气动力学、天气学、气候学等领域, 强调数学与物理的理论基础与定量分析能力[12]。然而, 在面对气象与地质灾害耦合机制研究和综合防灾减灾实践需求时, 传统体系的局限性日益凸显。现有课程体系缺乏系统阐释大气过程与地质灾害交互关系的内容, 未能充分揭示气象驱动在滑坡、泥石流、崩塌等灾害形成过程中的关键作用。其次, 案例教学与实践环节不足, 学生缺乏将理论应用于真实复杂灾害情境的机会, 难以形成对灾害链机制的整体理解。再次, 跨学科训练环节薄弱, 与地质学、水文学、环境科学等学科的融合度有限, 导致学生在应对气象-地质复合灾害问题时知识割裂、综合分析能力不足。

随着全球气候变化加剧和极端天气事件的频繁发生, 气象与地质灾害的叠加效应日益突出, 其发生频率和破坏强度均呈上升趋势[13]。在此背景下, 大气科学课程体系亟需由以天气过程和气候系统为主的单一知识结构, 转向以综合防灾减灾为导向的跨学科培养模式。例如, 中国地质大学(武汉)已在大气科学专业中探索极端天气气候过程与地质灾害学、水文地质学的交叉研究, 取得了积极成效[14]。然而, 目前多数高校的大气科学与地质灾害课程仍相对独立, 系统融合不足。部分院校虽已尝试引入灾害案例, 但多停留在内容补充层面, 缺乏完善的教学设计与持续机制。教学方式仍以传统讲授为主, 案例分析、情境模拟与跨学科实践等创新方法应用有限, 难以有效激发学生的探究兴趣与综合分析能力。因此, 未来课程改革应立足灾害链耦合特征与地球系统科学理念, 通过引入典型灾害案例、构建情境化教学环境、强化跨学科协作与野外实践, 推动教学内容由理论向应用拓展、教学模式由灌输向探究转变。构建以“气象-地质灾害耦合”为核心的融合课程体系, 不仅有助于优化大气科学教育结构, 也为培养具备系统思维与综合防灾能力的复合型人才提供了新路径。

3. 教学内容框架

为实现培养目标, 课程内容设计遵循由理论到实践、由单一学科向跨学科拓展的渐进式结构。首先, 课程以气象-地质灾害耦合机理为核心, 重点讲授强降雨对土体稳定性的削弱效应、冰雪过程对坡体结构的破坏作用, 以及气候异常背景下灾害链的放大机制。通过典型案例剖析, 学生能够直观理解气象因子与地质灾害的相互作用及其链式演化特征。其次, 课程引入灾害监测与预警技术, 包括气象观测、卫星遥感和天气雷达在强降雨识别中的应用, 并重点介绍近年来发展迅速的星载 InSAR 技术, 该技术具备全天候、高精度和高效率的优势, 已在地质灾害早期识别中得到广泛应用[15]。最后, 课程结合防灾减灾政策与社会实践, 帮助学生形成从科学认知到风险治理的系统视角。

在教学方法上, 课程强调以案例驱动、情境模拟和跨学科研讨为核心的探究式教学。通过引入典型灾害案例, 学生分组分析灾害链的气象触发条件与地质响应机制, 并提出科学的防灾对策。在课堂实践中, 设计灾害应急模拟情境, 学生分别扮演气象预报员、地质专家、政府决策者与媒体记者, 体验多部门协同的应急处置过程, 培养沟通协调与跨学科决策能力。此外, 课程通过邀请地质学、水文学及应急管理领域专家开展专题讲座, 拓展学生的学科视野, 并在研讨课中构建“问题-探究-反馈”的学习闭环。为强化实践环节, 课程设置任务驱动式小组项目, 如区域灾害风险评估, 要求学生综合气象数据与地质背景开展灾害链分析, 并以报告与汇报形式展示成果。多元化的教学设计促进了学生从理论理解向应用实践的转化, 显著提升其系统思维与综合防灾能力。

4. 典型案例教学设计——“5·28”西藏康布麻曲地质灾害天地协同分析

4.1. 案例背景

2021年5月28日,西藏自治区亚东县康布麻曲流域突发暴雨山洪灾害。该流域位于喜马拉雅山南坡,地处流域下游的沿河战备公路多处崩塌,河岸也出现坍塌情况,部分路段损毁严重,导致电力、通信、交通运输中断,下游居民生命安全受到严重威胁,居民生活和军备物资的正常供应也受到极大影响[16]。该事件是典型的“气象触发-地质响应”型灾害实例,能够直观反映强降雨在高原复杂地形条件下对地质灾害的驱动机制,为大气科学与地质灾害耦合教学提供了理想的案例素材。

4.2. 教学目标

本案例的教学设计旨在通过真实灾害实例的情境化教学,帮助学生理解高原地区强降雨与泥石流之间的内在联系,并训练其在多学科框架下的综合分析能力。教学目标包括:掌握墨脱地区暴雨的气象成因与泥石流触发机制;学会从气象、水文、地质多角度构建灾害链分析框架;并提升学生应急预案制定与跨学科协作能力。课程共设45分钟教学时长,采用“案例导入-机理讲解-小组研讨-情境模拟-课堂总结”的五步教学流程,注重从认知启发到能力培养的层层递进。

4.3. 教学流程

1) 案例导入(3分钟)

播放“5·28”地质灾害现场视频,展示灾害发生的时间过程与破坏程度,引导学生思考“为何高原地区的强降雨更易诱发泥石流”这一核心问题。该环节不仅起到直观引导作用,也为后续机理分析奠定了思考基础。

2) 机理讲解(10分钟)

教师结合气象学和地质学原理,系统解析本次地质灾害的成因与灾害链机制。从地质条件看,山洪、边坡崩塌(包括落石)、河岸坍塌等灾害的发生,主要由持续降雨与短时强降雨的叠加效应引发;从大气条件看,南亚季风输送的充沛水汽在高原地形强迫抬升作用下形成极端降雨。教师通过板书与图示展示灾害链的完整过程:“持续降雨-坡体含水量上升-岩体失稳-泥石流暴发-道路中断”,使学生能够在动态系统的框架中理解灾害演化逻辑。

3) 小组研讨(15分钟)

在小组研讨环节,学生分组分析康布麻曲地区的降雨过程曲线、坡度分布图和地质剖面资料,讨论泥石流触发的概率条件及可行的预警指标。通过定量分析降雨阈值与坡体稳定性之间的关系,学生能够更直观地认识到气象数据在地质灾害预测中的关键作用。

4) 情境模拟(12分钟)

教师将学生分为气象预报员、地质灾害监测员和应急指挥员等角色,模拟灾害发生前的联合会商会议。学生需依据气象预测数据与地质风险信息,共同制定应急预案并提出风险应对策略。该环节强化了学生的情境代入感与团队协作意识,同时促进了跨学科沟通能力的提升。

5) 课堂总结(5分钟)

教师对学生的分析与讨论结果进行评述,系统归纳“5·28”事件中气象与地质要素的耦合机制,强调在复杂地形区域中,大气过程对地质灾害演化具有显著的驱动作用。教师还进一步引导学生思考:如何利用数值预报、遥感监测和地面观测数据,实现气象-地质灾害的联合预警,从而在更大程度上提升防灾减灾能力。

4.4. 教学效果

为了验证该教学模式的有效性,本研究在 2024 级大气科学专业学生中开展教学实验,设置实验组(采用融合教学, $n = 35$)与对照组(采用传统讲授, $n = 34$)。设计包含 20 道综合分析题的知识与能力测试卷,对学生进行前测与后测。测试内容涵盖气象-地质灾害耦合机理、灾害链分析与应急决策能力。采用 SPSS 26.0 软件对实验组与对照组成绩进行独立样本 t 检验与配对样本 t 检验。

测试卷如下:

- 1) 某高原流域连续降雨三天,降雨量依次为 40 mm、70 mm 和 110 mm。根据历史研究,该地区泥石流触发的临界累积降雨量为 150 mm,单日阈值为 100 mm。请判断哪一天最可能发生泥石流,并说明触发机制。
- 2) 解释“冻融循环”如何导致岩体风化与坡面失稳。请结合青藏高原地区的气候特征给出两个典型影响实例。
- 3) 请用一个实际案例(如暴雨→滑坡→堰塞湖→溃坝洪水)解释“灾害链”的概念,并绘制简要的链式演化流程。
- 4) 某地区夏季极端降雨事件增多,请简述极端降雨与地质灾害频发之间的主要联系。
- 5) 举例说明一个气象要素变化(如气温或风向)可能引发的地质灾害类型。
- 6) 说明为什么跨学科教学有助于提升学生的防灾减灾能力。
- 7) 说明在灾害情境模拟教学中,教师应重点培养学生的哪两种能力,并简要阐述理由。季风偏强,降水集中于短时强降雨。请分析这种季风异常对地质灾害频发的作用机制。
- 8) 根据遥感影像中滑坡前后地表变化的典型特征,说明遥感影像可识别的三个关键指标,并指出其在滑坡识别中的意义。
- 9) 某地区坡度分布为: $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 占 40%, $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 占 40%, $>25^{\circ}$ 占 20%。请简述滑坡风险随坡度变化的趋势,并提出一个适用于课堂教学的定量验证方案。
- 10) 某地区暴雨发生时间为 $t = 0$ h,坡面位移开始于 $t = +12$ h,泥石流爆发于 $t = +24$ h。请分析其中的时序关系。
- 11) 某地降雨历时曲线呈“前强后弱”型,总降雨量 150 mm,集中在前 2 小时。与均匀降雨 150 mm 相比,对滑坡触发风险有何差异?
- 12) 模拟你作为“应急指挥员”,在收到 24 小时降雨预报 180 mm 后,写出三条主要应急决策措施并说明依据。
- 13) 请撰写一段约 100 字的公众预警信息,将“未来 12 小时内降雨达 120 mm,滑坡风险高”的技术内容转化为通俗、可执行的语言。
- 14) 灾害发生后,可采取的措施包括:道路抢修、生命救援、灾情信息发布和次生灾害排查。请给出合理的优先顺序并说明理由。
- 15) 简述气象数值模拟在地质灾害预测中的作用,并分析其主要局限性。
- 16) 说明 InSAR 技术监测滑坡变形的原理,并指出其在教学中的应用价值。
- 17) 请简述“大气圈-岩石圈-水圈相互作用”在灾害形成中的三个典型路径。
- 18) 设计一个基于 GIS 的滑坡风险评价课堂实验方案,说明所需数据类型、分析步骤和预期成果。
- 19) 简述气象数值模拟在地质灾害预测中的作用,并说明其局限性。
- 20) 简要说明气象预报误差对地质灾害应急决策可能产生的影响。

教学效果评估结果显示,实验组后测成绩显著高于前测($p < 0.01$),且高于对照组($p < 0.05$),表明融

合教学在提升学生灾害系统思维与实践能力方面具有显著效果。通过课前与课后测试对比, 学生对灾害机理知识的掌握程度平均提升 40%以上, 教学效果显著。同时, 多数学生在小组讨论和角色扮演环节中表现出较强的主动性, 提出的应急预案具有较高的可行性, 部分方案在专家点评中获得认可。学生普遍反映, 案例教学有效提升了他们综合分析、数据解读与应急决策的能力, 并增强了对防灾减灾社会意义的理解。

此外, 我国地域辽阔, 地形地貌类型多样, 气候差异显著, 如西北干旱区暴雨山洪与风蚀沙尘并存, 华北平原地区则以城市内涝为主。这种因地质基础与气象过程耦合差异所形成的区域性灾害格局, 决定了我国气象-地质灾害融合教学研究需因地制宜、分区开展, 构建具有地域特色的灾害认知与防控体系。在教学推广过程中也可能面临师资结构单一、跨学科课程评价体系缺乏、教学资源建设不足等问题, 针对这些挑战, 可通过建立气象与地质学联合教学团队、开发开放共享的案例资源库、推动高校设立“灾害系统科学”模块课程等方式逐步解决。

5. 总结

综上所述, 在高校大气科学专业课程中融入地质灾害内容是非常必要的, 不仅能够强化学生对自然系统耦合过程的理解, 还能显著提升其跨学科综合素养与灾害链分析能力。以真实气象-地质灾害案例驱动的教学模式有效促进了学生将气象理论与地质灾害机理相结合, 增强了知识应用与解决问题的能力, 充分验证了融合教学的可行性与教学价值。

下一步, 大气科学课程的教学改革需继续加深融合路径: 一是加强实地考察与区域调研, 组织学生赴西南高原等灾害多发区开展野外实践, 提升对气象-地质灾害耦合过程的直观认知; 二是强化信息化教学手段, 充分利用遥感监测、大数据分析数值模拟等现代技术, 提高教学的科学性与互动性; 三是构建跨学科教学与科研平台, 推动气象学、地质学、灾害学等多领域的协同育人机制, 形成持续优化的综合人才培养体系。

基金项目

自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室开放基金资助项目(DGERA20221101); 成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ202201)。

参考文献

- [1] 徐祥德, 齐冬梅, 李跃清, 等. 多尺度地形背景下东亚夏季风推进过程与我国洪涝和滑坡泥石流灾害时空特征[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(4): 1-10.
- [2] 郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 地球系统科学研究态势[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(10): 3065-3090.
- [3] Deng, M., Chen, N. and Liu, M. (2017) Meteorological Factors Driving Glacial till Variation and the Associated Periglacial Debris Flows in Tianmo Valley, South-Eastern Tibetan Plateau. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **17**, 345-356. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-345-2017>
- [4] Yan, J., Wen, Y., Liu, X., Deng, M., Ye, B., Li, T., et al. (2024) The Effectiveness of Problem-Based Learning and Case-Based Learning Teaching Methods in Clinical Practical Teaching in TACE Treatment for Hepatocellular Carcinoma in China: A Bayesian Network Meta-Analysis. *BMC Medical Education*, **24**, Article No. 665. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05615-8>
- [5] Pfeiffer, A.M., Collins, B.D., Anderson, S.W., Montgomery, D.R. and Istanbuluoglu, E. (2019) River Bed Elevation Variability Reflects Sediment Supply, Rather than Peak Flows, in the Uplands of Washington State. *Water Resources Research*, **55**, 6795-6810. <https://doi.org/10.1029/2019wr025394>
- [6] Allen, S.K., Rastner, P., Arora, M., Huggel, C. and Stoffel, M. (2015) Lake Outburst and Debris Flow Disaster at Kedarnath, June 2013: Hydrometeorological Triggering and Topographic Predisposition. *Landslides*, **13**, 1479-1491. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3>

- [7] Yanites, B.J., Clark, M.K., Roering, J.J., West, A.J., Zekkos, D., Baldwin, J.W., *et al.* (2025) Cascading Land Surface Hazards as a Nexus in the Earth System. *Science*, **388**, eadp9559. <https://doi.org/10.1126/science.adp9559>
- [8] 朱贺, 张永双, 任三绍, 等. 拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 186-196.
- [9] 幸新涪. 基于 InSAR 技术的隐患边坡识别及降雨滑坡模型修正方法[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [10] 崔鹏, 王岩, 张国涛, 等. 气候变化灾害风险防范: 现状、挑战与科学问题[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(4): 449-460.
- [11] Huang, X., Swain, D.L. and Hall, A.D. (2020) Future Precipitation Increase from Very High Resolution Ensemble Downscaling of Extreme Atmospheric River Storms in California. *Science Advances*, **6**, eaba1323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1323>
- [12] 张仲石, 李双林, 王会军, 等. 浅谈大气科学与地质学的学科交叉[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3569-3579.
- [13] Musselman, K.N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M.P., Prein, A.F., Liu, C., *et al.* (2018) Projected Increases and Shifts in Rain-on-Snow Flood Risk over Western North America. *Nature Climate Change*, **8**, 808-812. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0236-4>
- [14] 覃军, 方虹. 中国地质大学(武汉)加强大气专业建设的必要性及思路[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2013(S1): 83-86.
- [15] Roering, J.J., Stimely, L.L., Mackey, B.H. and Schmidt, D.A. (2009) Using DInSAR, Airborne LiDAR, and Archival Air Photos to Quantify Landsliding and Sediment Transport. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19402. <https://doi.org/10.1029/2009gl040374>
- [16] 平措朗加, 刘双. 其米多吉等康布麻曲“5·28”山地灾害致灾雨情的天-地协同调查[J]. 西藏科技, 2024, 46(1): 40-46.