

降雨诱发型泥石流灾害的预警模型优化与实证研究

刘永富 张奋明

云南省有色地质局三〇八队 云南昆明 650000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19767

[摘要] 我国山区面积广阔,降雨诱发型泥石流频发,对人民生命财产与生态环境构成严重威胁。传统预警模型多依赖单一降雨阈值,在地形复杂、数据稀疏区域易出现空报、漏报,难以适配精细化防灾需求。本文以降雨诱发型泥石流为研究对象,梳理降雨阈值模型、统计模型与动力过程模型的研究进展,指出传统模型在因子耦合、动态适配、不确定性管控等方面的不足。研究以多源数据融合为基础,从特征因子优选、动态阈值修正、模型集成融合、可解释性增强四个维度开展模型优化,构建兼顾物理机理与数据驱动的混合预警模型。选取西南典型泥石流流域开展实证检验,对比优化模型与传统模型的预警准确率、提前时效与稳健性。结果表明,优化模型显著降低误警率,延长有效预警时长,提升小流域与数据匮乏区的适用性。研究成果可为山区泥石流灾害精准预警、风险防控与应急处置提供理论支撑与技术参考。

[关键词] 降雨诱发型泥石流; 预警模型; 动态阈值; 多源数据; 实证研究

一、引言

1.1 研究背景与意义

气候变化让极端降雨的发生频次有所上升,强度也在增大,降雨诱发型泥石流普遍有频发、突发、成灾速度快的特征我国西南、西北山区,地质构造比较复杂,松散物源丰富,属于泥石流高发区域泥石流灾害发生后,常造成道路中断、房屋损毁、人员伤亡,是山区防灾减灾的突出薄弱环节

泥石流非工程减灾的核心手段是预警,实施关键是搭建科学、稳定、精准的预警模型。传统模型多以临界雨量为核心,该类模型未将地形、地质、土壤、物源等静态背景因子充分耦合,对前期降雨、短时雨强、降雨空间分布的协同影响描述不足,使得预警精度有限,区域适配性不足,本文开展预警模型优化与实证研究,提升预警的时效性、准确性、鲁棒性,在降低灾害损失、保障山区安全发展方面有对应理论与实践价值。

1.2 国内外研究现状

这一领域的国外研究开展时间更早,目前已建立三类核心技术体系,分别是降雨强度-历时(I-D)阈值、水文-地质耦合模型、概率统计模型,Caine是首个搭建全球泥石流降雨阈值研究框架的学者。Godt带领团队借助TRIGRS模型,完成边坡稳定性与降雨入渗全过程的动态模拟,郭晓军等人则把人工智能方法引入降雨阈值不确定性分析环节,优化参数优选效果与模型可解释性。

国内研究以区域化、实用化为主线,崔鹏、范宣梅、余斌、张国平、陈悦丽等学者在泥石流形成机理、降雨阈值分区、监测预警体系构建等方面取得系列成果。国家层面建立地质灾害气象预警业务系统,在重点流域推广应用。但现有模型仍存在三方面短板:一是机理与数据脱节,物理模型参数复杂难以推广,统计模型缺乏机理约束易过拟合;二是动态性不足,阈值固定,未考虑季节、物源状态、土壤湿度的时变特征;三是可解释性弱,人工智能模型黑箱问题突出,

难以支撑业务决策与责任追溯。

1.3 研究内容与技术路线

本文以降雨诱发型泥石流预警模型优化为目标,主要内容包括:①梳理传统预警模型类型与局限;②构建多因子耦合、动态阈值、集成学习的优化模型;③选取典型流域开展实证验证;④提出模型业务化应用建议。技术路线遵循机理分析—模型构建—数据融合—实证检验—优化完善,全程不依赖复杂公式,以定性描述与逻辑推演为主。

二、降雨诱发型泥石流成灾机制与预警要素

2.1 成灾机制

水文、地质、地貌三类过程的共同作用,是降雨能诱发泥石流的核心原因,先期渗入土体的雨水会抬高土体的含水率,降低土体的抗剪强度,短历时强降雨会形成地表径流,冲刷沟道内的松散物源,掀动沟道底部的堆积层。在坡度较陡、汇水条件好的沟谷区域,固体碎屑和水流混合后形成高速泥石流,这类灾害的形成要符合三个核心条件,分别是充足的松散物源、适宜的地形地貌,以及触发型降雨条件。

松散物源的供给主体,是沟道内部的堆积物、坡面的表层风化层,还有人类生产活动遗留的弃渣,这类物源的存储量、空间分布范围,会直接作用于泥石流的发生规模,也会影响其爆发频率。对泥石流形成有利的地形地貌条件,多呈现沟谷纵坡陡峭、流域形态狭长的特点,整体汇水条件也比较好,这类地形属性,可给泥石流的启动、加速过程,提供必要的前提基础。能够触发泥石流的降雨条件,包含临界雨量、降雨强度、降雨持续时间三类核心指标,这类指标的时空分布情况,会直接决定泥石流发生的可能性,也会影响其对应的时序特征。上述三类成灾条件相互耦合,一同组成了泥石流成灾的核心作用机制。

2.2 核心预警要素

开展预警用到的要素可划分成静态因子与动态因子。静态因子涉及的参数有:流域面积、沟床比降、坡度、岩性、

断层密度、植被覆盖、物源储量。动态因子涵盖的参数有: 前期有效降雨、10分钟/1小时/24小时降雨、雨强、土壤湿度、地下水位、地形汇流强度。降雨组合因子是触发核心, 地形与物源决定易发程度, 二者耦合确定预警等级。

静态因子主要对应区域地质环境与地形特征, 这类因素的状态在长周期内不会出现大幅变动。动态因子的数值会根据降雨情况实时变动, 可直接对应泥石流发生的潜在概率。持续跟踪动态因子的变化走向, 就能及时识别到泥石流发生的前期征兆。两类因子可形成互补关系, 一同组成完备的预警指标体系, 是后续模型构建的基础参考。

三、传统预警模型类型与局限性

3.1 主要模型类型

1. 临界雨量阈值模型: 核心参数为 I-D 曲线、临界雨量与有效降雨量, 计算简单, 业务场景好用, 不过未耦合下垫面, 区域通用性存在不足。

2. 统计回归模型: 这类模型用到逻辑回归、判别分析等方法, 整合多类因子建立统计关联, 可解释性比较好, 不过非线性拟合能力存在局限。

3. 机器学习模型: 随机森林、支持向量机、神经网络是典型代表, 拟合精度比较高, 不过依赖样本质量, 存在黑箱与过拟合问题。

4. 物理过程模型: 机理清晰, 依托水土耦合、边坡稳定性模拟, 不过参数多、计算量大, 难以在小流域内实时运行。

3.2 主要局限性

因子耦合不足: 重降雨、轻下垫面, 重静态、轻动态, 难以反映时空异质性。

阈值固化: 未随物源含水率、季节、前期降水动态调整, 极端降雨下易失效。

数据适应性弱: 在雨量站稀疏、历史样本不足地区, 精度显著下降。

可解释性欠缺: 智能模型输出难以量化因子贡献, 不利于业务推广与复盘。

时空精度不匹配: 区域模型分辨率粗, 单沟模型扩展性差。

四、预警模型优化策略与构建

4.1 优化总体思路

以物理机理约束、多源数据驱动、动态阈值适配、集成学习增效、可解释性增强为原则, 构建混合预警模型。将降雨触发机制与地形地质背景深度耦合, 用动态阈值替代固定阈值, 用集成模型提升稳健性, 用可解释分析提升可信度。通过融合物理过程模型的机理优势与机器学习模型的数据驱动特性, 实现预警精度与业务适用性的平衡。优化过程中注重因子筛选的科学性, 结合区域特征提取关键变量, 降低冗余信息干扰。同时, 引入时空自适应算法, 提升模型在不同尺度下的泛化能力, 确保从单沟到区域的无缝衔接。

4.2 特征因子优选与标准化

采用最大相关最小冗余、SHAP 贡献度分析筛选核心因

子, 保留高贡献、低冗余指标。最终确定输入因子: 前期 7 天有效降雨、1 小时最大雨强、10 分钟峰值雨强、坡度、沟床比降、物源类型、土壤湿度、地形汇流能力。对因子进行归一化处理, 消除量纲差异, 提升模型收敛性与稳定性。通过建立因子权重动态调整机制, 根据时空特征和降雨情景自动优化输入组合。同时, 针对不同区域特点设置差异化标准化方案, 确保模型在各类环境下的适应性。采用分段线性变换方法处理非正态分布因子, 改善数据偏态影响, 进一步提升模型预测精度。

4.3 动态阈值修正机制

突破固定阈值局限, 建立时变+空间+状态三维动态阈值:

1. 时变修正: 按雨季/旱季、前期干湿状态调整, 湿润期阈值下调, 干旱期阈值上调。

2. 空间修正: 按地形坡度、物源储量分区赋值, 高风险区阈值降低。

3. 状态修正: 结合土壤湿度、地下水位实时调整, 含水率越高阈值越低。

通过历史事件与野外监测确定修正系数, 实现阈值自适应调整。

4.4 混合集成模型构建

本文选用 Stacking 集成框架, 整合逻辑回归、随机森林、支持向量机等基础模型, 将逻辑回归设为元学习器输出最终概率。底层各模型发挥拟合长处, 上层融合减少偏差与方差, 平衡模型精度与泛化能力。模型输出泥石流发生概率, 按数值将预警分为四级: 低、中、高、极高, 分别对应不同应急响应等级。

4.5 可解释性增强设计

本文引入 SHAP 可解释分析方法, 计算各因子对预警结果的贡献程度, 厘清降雨、地形、物源的主导作用与交互效应, 输出因子重要性排序和局部解释内容, 让预警结果可追溯、可复盘、可宣导, 破解模型黑箱问题, 契合业务管理需求。研究借助可视化工具呈现 SHAP 分析结果, 生成直观的特征贡献图与依赖图, 方便决策者快速掌握模型的内在逻辑, 选取实际案例开展解释性验证, 保证分析结果与领域知识相契合。搭建因子贡献动态追踪机制, 实时更新各类因素的影响权重, 为预警方案调整提供科学支撑, 设计简约的报告模板, 把复杂技术分析内容转化为易传播的业务表述, 提升模型在实际应用场景中的接受度与可信度。

五、实证研究

5.1 研究区概况

选取西南山区某典型小流域, 该流域地形陡峭、沟谷发育、松散物源丰富, 属泥石流高易发区。流域内降雨集中, 多短时强降雨, 历史灾害记录完整, 监测设施较为完善, 适合开展实证检验。该流域面积约为 30 平方公里, 主沟道长度超过 8 公里, 平均坡度达到 25 度以上, 具有典型的泥石流形成地形特征。区域内植被覆盖度较低, 人类活动以农业耕作

和少量聚居为主, 土地利用类型多样。气候上属于亚热带季风气候, 年均降雨量在 1200 毫米左右, 其中 70%集中在 6 月至 9 月的雨季。此外, 流域内分布有多个自动雨量站和泥位监测点, 能够实时采集关键数据, 为模型验证提供了可靠的数据基础。

5.2 数据来源与预处理

数据包括: 历史泥石流灾害清单、降雨观测数据、地形 DEM 数据、地质图、植被覆盖数据、土壤数据、野外调查物源数据。对数据进行清洗、匹配、插值, 构建样本集, 以灾害发生时刻为正样本, 以无灾害降雨事件为负样本, 保证样本均衡。

5.3 模型验证指标

衡量模型性能时, 选取准确率、召回率、精确率、F1 值、误警率、预警提前时间作为评价指标。

5.4 结果对比与分析

将优化模型与传统临界雨量模型、单一机器学习模型对比, 结果显示:

1. 精度提升: 优化模型准确率、召回率、F1 值显著高于传统模型, 误警率大幅下降。

2. 时效延长: 有效预警提前时间增加, 为人员转移与应急处置留出更充足窗口。

3. 稳健性增强: 在数据稀疏、极端降雨、地形复杂条件下, 优化模型仍保持稳定输出。

4. 可解释性良好: SHAP 分析清晰揭示短时强降雨与前期降雨为核心触发因子, 地形因子贡献稳定, 符合泥石流成灾机理。

5.5 区域适用性讨论

小流域、数据中等匮乏区应用优化模型效果较好, 完成参数迁移与阈值本地化后, 可推广至同类山区。若区域内监测站点极少, 可结合卫星降水与地形数据简化运行, 兼顾精度与易用性。

六、模型应用与保障建议

6.1 业务化应用流程

本文搭建数据采集、因子计算、模型运算、预警发布、反馈修正闭环流程, 依靠监测站网与气象预报, 实时采集动态因子, 模型自动运算后输出分级预警, 通过平台、短信、广播等多渠道, 推送至责任主体与公众。

6.2 数据保障

围绕雨量、土壤湿度、位移、泥位等指标建设多要素监测站网, 推进气象、自然资源、水利跨部门数据共享, 优化数据时空精度与连续性。构建管控数据质量、补全缺失值的机制, 保障模型输入可靠。

6.3 运维与迭代

针对所用模型建立定期复盘机制, 新增灾害事件及时纳入样本, 动态优化因子权重与阈值, 开展基层专项培训, 提升预警信息接收、研判、处置能力, 推动技术模型与群防群

控有效衔接。

七、结论与展望

7.1 结论

1. 降雨引发的泥石流, 形成规律受降雨、地形、物源、水文多类要素耦合作用控制, 过往常用的单一阈值模型, 无法准确描述其中的复杂关联, 可优化的空间比较大。

2. 融合因子优选、动态阈值、集成学习、可解释分析搭建的混合模型, 能够适配山区复杂环境, 提升预警精度, 延长提前时间, 降低误警率。

3. 实证表明, 优化模型在典型流域表现稳健, 可解释性强, 易于业务化落地。

4. 提升模型区域适应性与极端降雨应对能力的关键方法, 是动态阈值与多因子耦合。

7.2 展望

后续可整合卫星遥感、无人机与物联网监测数据, 提升无资料区域的预警能力; 优化降雨预报与预警模型耦合技术, 延长预见期; 推进模型轻量化及移动端部署, 支撑基层开展实时预警; 结合灾害链演化过程, 开展泥石流-山洪-滑坡联动预警, 搭建全域风险防控体系。

[参考文献]

[1] 崔鹏, 杨宗佳, 欧阳朝军. 气候变化下山洪泥石流灾害风险演化特征与前沿科技问题[J]. 中国科学基金, 2025, 39 (2): 210-218.

[2] 范宣梅, 郭晓军, 张思玲. 震后泥石流预测阈值评估: 气象、水文气象与临界流量法比较[J]. 工程地质学报, 2024, 32 (6): 120-129.

[3] 余斌, 朱平一, 王治华. 沟床启动型泥石流预报模型研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33 (1): 51-6.

[4] 张国平, 许凤雯, 赵琳娜. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010, 36 (2): 81-86.

[5] 陈悦丽, 赵琳娜, 王英. 降雨型地质灾害预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30 (2): 142-143.

[6] 郭晓军, 张思玲, 崔鹏. 人工智能辅助小流域泥石流降雨阈值研究[J]. Journal of Hydrology, 2025, 63-67.

[7] 王治华, 刘希林. 单沟泥石流危险度计算模型及其应用[J]. 地理科学, 2012, 32 (5): 60-61.

[8] 赵琳娜, 张国平, 许凤雯. 中国地质灾害气象预警技术体系与业务应用[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33 (7): 1-6.

[9] 唐亚明, 李政国, 薛强. 黄土地区降雨型滑坡泥石流预警模型构建与应用[J]. 地质通报, 2024, 43 (4): 56-58.

[10] 吴礼舟, 胡瑞林, 熊探宇. 降雨入渗与泥石流启动耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (S2): 37-38.

作者简介: 1. 刘永富 (1987.06-), 男, 汉族, 云南陇川人, 中级工程师, 研究方向: 地质灾害治理, 矿山生态修复;

2. 张奋明 (1989.03-), 男, 汉族, 甘肃酒泉人, 中级工程师, 研究方向: 地质灾害治理, 矿山生态修复。