

# 山区强降雨条件下泥石流爆发触发因素的定量分析

鲍忠伍<sup>1</sup> 刘红战<sup>2</sup>

1. 云南省地质工程勘察有限公司 云南昆明 650000; 2. 云南地矿工程勘察集团有限公司 云南昆明 650200

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18528

**[摘要]** 山区泥石流灾害在强降雨诱发下表现出突发特性显著、破坏强度高的特征, 其形成与降雨强度大小、地形地貌条件及松散物源空间分布存在紧密关联。本文依托典型山区集水区的水文监测数据、地形特征参数及物源勘察资料, 构建泥石流触发条件的定量分析框架, 借助实测降雨动态过程与地表环境响应数据, 筛选关键触发因子并建立阈值识别模型、研究聚焦降雨强度梯度、累积降雨总量、坡面产流效率及松散堆积体含水率等核心参数, 系统分析各因素对泥石流起动过程的影响权重、研究结果可为山区泥石流早期预警系统构建、工程防治方案优化及排险减灾工程设计提供技术支撑。

**[关键词]** 泥石流; 强降雨; 触发因素; 定量分析; 阈值模型

## 引言:

我国西南与西北多地的山地区域中, 泥石流是危害最为严重的地质灾害类型之一, 强降雨则是诱发该类灾害最直接且普遍的驱动因素。现有研究已提出“临界雨强”“累积雨量”等相关理论指标, 但实际工程区域内, 地形条件、物源特征、植被覆盖状况等因素的综合作用使得灾害阈值存在明显差异, 进而导致预警结果精度不足、基于此, 亟需立足实测数据与可量化分析参数, 构建更贴合工程实际应用的定量触发模型、本文以技术实操为核心导向, 通过监测强降雨事件中的地表水动力演化规律、物源体动态变化特征及坡面产流发育特点, 深入剖析泥石流爆发的关键触发环节, 为山区地质灾害风险防控工作提供切实可行的技术依据。

## 1. 降雨动力条件的定量表征

### 1.1 降雨强度与诱发阈值分析

强降雨作为驱动因素时, 不同时间尺度下的最大雨强构成泥石流快速起动的直接动力。研究中常选取 5 min、10 min、30 min 及 1 h 最大雨强作为特征参数, 借助雨量计高频监测数据提取瞬时雨强峰值、短历时高强度降雨能在短时间内催生强烈坡面产流与地表侵蚀, 推动松散体加速失稳, 对泥石流触发具备显著敏感性、工程区域内, 可收集近十年乃至更长时期内发生的多起泥石流事件资料, 统计对应降雨过程中的瞬时雨强数据, 据此划定临界雨强范围、部分物源充裕

的陡峻沟谷, 10 分钟雨强达到 20-30 mm/h 便可能引发小型泥石流。

### 1.2 累积雨量与前期降雨影响

累积雨量能够反映地表及浅层土体的储水状态, 是控制泥石流起动的关键因素之一。前期降雨条件不同, 土壤含水量会产生显著差异, 进而导致累积雨量阈值发生明显变化、土壤处于干燥状态时, 初期入渗能力较强, 需要较大累积雨量才能达到饱和; 而前期降雨充足的情况下, 土体含水率已处于较高水平, 少量补充降雨即可快速转化为地表径流, 使泥石流触发门槛显著降低、为量化前期降水的影响效应, 可引入有效雨量系数  $K_e$  对连续降雨过程进行修正, 让不同时段的降水按相应比例叠加计算, 得到更贴合实际产流情况的有效累积雨量、从降雨模式来看, “短历时高强度”降雨通常产生极强的瞬时冲刷能力, 易引发暴发型泥石流; “长历时中强度”降雨则更易造成土体持续饱和、滑动面软化, 进而诱发稠密型泥石流。

### 1.3 产流特征与坡面响应时间

泥石流的形成过程不仅依赖降雨输入, 还受到坡面产流速率与汇水效率的制约、通过在研究区布设坡面径流监测装置, 可获取产流起始时刻、径流峰现时刻及峰值流量等关键参数, 实现对坡面水文响应特征的定量分析、产流时间越短, 表明坡面入渗能力越低, 降雨越容易快速形成径流并汇入沟

道, 强化水动力对松散物源的动员效果、在松散体丰富的陡坡区域, 产流峰值出现时间与泥石流启动时间往往较为接近, 间隔可能仅为数分钟, 体现出坡面对强降雨的高度敏感性。

## 2. 松散物源条件的参数化评价

### 坡面松散体体积与分布

沟域内拥有足量松散固体物源是泥石流形成的关键前提, 这类物源的总体积、空间分布格局及组合特征, 对泥石流最终爆发规模起到决定性作用。借助无人机航测获取的点云数据与 1 m 分辨率数字高程模型 (DEM), 可构建高精度坡面三维地形模型, 采用体积差分法 (DoD) 完成坡面松散体储量的精准提取, 某典型沟谷的实测结果表明, 其物源总体积介于  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$  至  $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3$  之间, 其中坡度超  $35^\circ$  的区域是松散堆积物的主要集中区, 该区域物源量占总储量的比例约为 62%。参数化评价过程中, 可对不同坡向、坡度区间及沟道不同段落的松散体厚度开展量化统计: 阴坡松散体平均厚度为 0.35 m, 阳坡平均厚度则为 0.22 m; 沟道上游段松散体堆积厚度可达 0.8–1.2 m, 中游段堆积厚度仅为 0.3–0.5 m。

### 松散体含水率与抗剪强度衰减

坡面松散体的力学强度受含水率变化影响显著, 这一特性大幅提升了泥石流的易发性。室内直剪试验结果显示, 当松散体含水率从 8% 升高至 25% 时, 其黏聚力从 18 kPa 降至 7 kPa, 内摩擦角由  $34^\circ$  减小至约  $26^\circ$ , 抗剪强度整体衰减幅度超过 45%。水分向松散体内部渗入后, 会增强颗粒间的润滑效应, 同时破坏土体原有结构并削弱颗粒间黏聚力, 使得松散体更易发生滑移运动, 且更易被地表径流动员。基于大量室内试验数据, 可拟合得到“含水率-强度衰减”经验函数, 例如:

$$\tau = \tau_0 \times \exp(-0.045 \cdot w) \quad (\tau \text{ 为抗剪强度、} \tau_0 \text{ 为干态强度、} w \text{ 为含水率}),$$

其可用于快速预测不同含水率下松散体的稳定性, 并判断是否达到泥石流启动的动力条件。在实际沟谷监测中, 可结合土壤湿度传感器, 实时获取含水率曲线, 通过函数计算

松散体强度变化, 为预警提供量化依据。

### 坡面扰动与补给机制

自然状态下的物源供应过程常受到外力扰动的显著影响, 其中人工建设活动与地质作用是加速物源补给的两大核心因素。山区道路修建、输电线路铺设过程中形成的路堤及弃方堆积体, 具有结构松散、孔隙率大的特点, 极易遭受强降雨侵蚀。某道路施工区域的监测数据显示, 单场暴雨过后, 坡面新增松散物源量可达  $200\text{--}600 \text{ m}^3$ , 其补给速率明显高于自然状态下的坡面。

为实现对物源补给能力的定量评估, 可采用物源补给速率  $Q_m$  (单位:  $\text{m}^3/\text{h}$ ) 这一指标, 综合考量坡面侵蚀、滑塌及沟道再动员等多重过程的影响。例如, 某沟谷在暴雨期间监测到的  $Q_m$  均值为  $180 \text{ m}^3/\text{h}$ , 峰值则达到  $420 \text{ m}^3/\text{h}$ , 这一数据表明该沟道在短时间内具备极强的能量积蓄与物源动员能力。

## 3. 沟道水动力与启动条件判别模型

### 3.1 流量与临界冲刷能力

沟道水动力的强弱程度, 直接决定着松散物源能否被成功动员并实现输移, 是影响泥石流启动的核心要素之一。在工程研究区域, 可运用曼宁公式计算不同雨强情境下沟道的洪峰流量, 该公式表达式为:

$$Q = (1/n) \cdot A \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)}$$

式中,  $n$  代表粗糙度系数 (山地沟谷场景下通常取值范围为 0.040–0.060),  $A$  为沟道断面面积,  $R$  是水力半径,  $S$  为沟道坡度。以某一具体沟段为例, 该沟段宽度 4 m、平均水深 0.8 m、坡度 12%, 当取  $n = 0.045$  时, 经计算暴雨期间其洪峰流量约处于  $18\text{--}22 \text{ m}^3/\text{s}$  区间。

在获取流量数据的基础上, 通过对比床料中值粒径  $D_{50}$ , 能够确定沟道的临界切应力  $\tau_c$ 。实际计算中常采用 Shields 梅德公式, 其形式为:

$$\tau_c = \rho \cdot g \cdot D \cdot \theta_c \quad (\theta_c \approx 0.03\text{--}0.06)。$$

某沟段床料  $D_{50} = 25 \text{ mm}$ , 经计算该沟段临界切应力  $\tau_c$  约为  $35\text{--}55 \text{ Pa}$ , 而暴雨期间实测得到的切应力  $\tau$  达到

70-95 Pa, 超出临界值范围, 能够对沟道内大量颗粒产生有效冲刷与动员作用, 进而为泥石流形成创造条件。

### 3.2 液固比与泥石流形成条件

沟道内的液固比(L/S)是划分泥石流类型的关键水动力参数、借助在线浊度仪监测数据与现场取样分析结果, 可获取瞬时水沙浓度, 在此基础上进一步计算液固比 L/S、不同液固比对应的水流与泥石流状态通常如下:

L/S > 10: 以稀性洪水为主, 冲刷能力强但固体含量低;

L/S = 3-10: 处于过渡状态, 可转化为洪水型泥石流;

L/S < 3: 固体浓度高, 易形成稠密型泥石流, 具有强烈冲击破坏力。

以某一典型泥石流事件为例: 2022年8月, 某山区遭遇强度为 52 mm/h 的暴雨, 在沟道上游监测到水沙浓度处于 10-18 kg/m<sup>3</sup> 区间, 计算得出液固比约为 6-8, 此时沟道内水流速度提升至 3.2-4.0 m/s, 在降雨峰值出现后的 8 分钟内, 沟道下游发生小规模泥石流。

### 3.3 综合触发判别模型

泥石流的启动过程受到降雨动力、物源储量与沟道水动力三方面因素的共同制约, 因此构建综合判别模型有助于提高泥石流预测精度。该模型可采用如下结构:

触发指数  $FT = f(R, M, H)$

式中, R 代表降雨动力相关参数(包含雨强、累积雨量、有效雨量  $K_e$  等), M 代表松散物源条件参数(包含物源储量、含水率、补给速率  $Q_m$  等), H 代表沟道水动力参数(包含流量 Q、临界切应力  $\tau_c$ 、液固比 L/S 等)。

通过对多起典型泥石流事件的参数反演分析, 可建立触发等级划分体系: 绿色(安全)等级对应  $FT < 0.3$ , 此时沟道无连续产流现象, 物源保持稳定状态; 黄色(注意)等级对应  $0.3 \leq FT < 0.6$ , 此时沟道局部出现产流, 物源含水率逐步上升; 橙色(预警)等级对应  $0.6 \leq FT < 0.8$ , 此时沟道流量接近冲刷阈值, 液固比进入 5-8 区间; 红色(危险)等级对应  $FT \geq 0.8$ , 此时满足  $\tau > \tau_c$  条件, 液固比 < 3, 具备泥石流立即启动的条件。

以 2021 年某山谷发生的泥石流事件为例, 暴雨期间降雨动力参数  $R = 0.75$  (雨强与有效雨量  $K_e$  均处于较高水平), 松散物源条件参数  $M = 0.65$  (前期滑坡体含水率超过 20%), 沟道水动力参数  $H = 0.82$  (流量超出阈值且液固比降至 2.8), 综合计算得到触发指数  $FT = 0.78$ , 处于橙色与红色等级的边界。

综合触发判别模型能够有效整合多源监测数据, 形成可量化、可操作的预警指标体系, 为山区泥石流短时临近预警工作提供技术支持。

### 结语:

本文围绕山区强降雨环境下泥石流的触发过程, 从降雨动力、松散物源与沟道水动力三个维度构建了完整的定量分析体系、研究结果显示, 短时高强度降雨、持续累积雨量以及快速产流, 是启动泥石流的核心降雨动力因素; 松散物源的体积规模、含水率水平及补给速率, 直接对泥石流的爆发规模产生控制作用; 而沟道流量、临界切应力及液固比的变化情况, 决定了泥石流的形成类型与爆发强度、通过构建综合触发指数模型, 实现了对泥石流启动条件的量化判别, 且该模型在典型案例应用中展现出良好的适用性。

### [参考文献]

- [1]曹嘉盛. 群发性泥石流动力过程数值模拟及风险评估研究[D]. 吉林大学, 2025. DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2025.002559.
- [2]杨帅. 坡面泥石流触发条件及细粒差异影响下成灾机理研究[D]. 绍兴文理学院, 2024. DOI: 10.27860/d.cnki.gsxl.2024.000161.
- [3]罗亮. 基于气候和物源变化的拱坝河流域泥石流危险性分析[D]. 重庆交通大学, 2023. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.001760.
- [4]熊杰. 基于光纤光栅的接触式泥石流监测方法与系统[D]. 四川大学, 2022. DOI: 10.27342/d.cnki.gscdu.2022.004545.

作者简介: 鲍忠伍, 男, 1981年9月, 云南宣威人, 本科学历, 高级工程师; 研究方向: 水工环。