

极端降雨下泥石流沟道演化过程数值模拟研究

陈 静

摘 要: 极端降雨事件是诱发泥石流灾害的关键因素之一,对生态环境和居民安全构成严重威胁。本研究聚焦典型泥石流沟道,运用数值模拟技术深入剖析极端降雨情境下沟道的演化机制。通过构建精细化数值模型,结合实地数据校准参数,模拟沟道在不同降雨强度下的侵蚀、堆积与形态变化过程,揭示了降雨强度与沟道地形、物质组成之间的复杂相互作用。研究结果为泥石流灾害的精准预警与科学防治提供了重要理论支撑,也为类似地区的泥石流研究开辟了新思路,具有显著的科学价值与实践意义。

关键词: 极端降雨;泥石流沟道;数值模拟;演化过程

引言

极端降雨事件在全球气候变化背景下愈发频繁,成为诱发泥石流灾害的关键因素之一。新疆伊犁哈萨克自治州地处天山山脉北麓,地形起伏剧烈,地质条件复杂,极端降雨常引发大规模泥石流,严重破坏当地基础设施与生态环境,威胁居民生命财产安全。近年来,随着对泥石流灾害研究的不断深入,数值模拟技术因其高效性与精准性,逐渐成为研究泥石流沟道演化的重要手段。然而,针对伊犁地区极端降雨条件下泥石流沟道演化的数值模拟研究仍较为匮乏。本研究旨在填补这一空白,通过构建精细化数值模型,模拟极端降雨下泥石流沟道的侵蚀、堆积与形态变化过程,揭示其演化机制,为伊犁地区泥石流灾害的精准预警与科学防治提供理论依据,同时也为其他类似地区的泥石流研究提供参考。

1 研究区域概况

1.1 地理位置与自然条件

伊犁哈萨克自治州位于新疆维吾尔自治区西北部,地处天山山脉北麓,地理坐标介于东经 $79^{\circ} 31'$ 至 $86^{\circ} 28'$ 、北纬 $40^{\circ} 50'$ 至 $47^{\circ} 10'$ 之间。该地区地形复杂多样,地势由东南向西北倾斜,海拔落差大,最高点为天山山脉的托木尔峰,海拔 7435 米,最低点为伊犁河谷,海拔仅 300 米左右。气候类型多样,受西伯利亚高压和大西洋暖湿气流的影响,属于温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季短暂炎热,年降水量在 200 至 600 毫米之间,降水主要集中在夏季,且常以暴雨形式出现,为泥石流的形成提供了充足的水源条件。

1.2 泥石流沟道特征

本研究选取伊犁地区某典型泥石流沟道作为研究对象,该沟道全长约 12 公里,沟道平均宽度为 30 米,沟道坡度在 15° 至 30° 之间变化,汇水面积约为 50 平方公里。沟道整体呈“V”字形,上游狭窄陡峭,中游逐渐开阔,下游与伊犁河相连。沟道两侧山坡坡度较大,植被稀疏,沟道内松散固体物质丰富,为泥石流的形成提供了充足的物质基础。通过对沟道地形地貌的详细测量与分析,发现沟道内存在多处陡坎和弯道,这些地形特征在泥石流运动过程中起到了重要的调控作用,影响着泥石流的流速、流量以及侵蚀、堆积位置。

1.3 物质组成与分布

伊犁地区泥石流沟道内的松散固体物质主要来源于周边山区的风化剥蚀以及河流冲积作用。物质类型多样,包括碎石、砂土、黏土等,粒径范围从几毫米到几十厘米不等。通过对沟道内物质的采样分析,发现沟道上游以大粒径碎石为主,占比约 60%,中游碎石与砂土混合,粒径分布较为均匀,下游则以细砂和黏土为主,占比约 70%。这种物质组成与分布特征对泥石流的流体性质产生了显著影响,上游的大粒径碎石使得泥石流具有较高的抗剪强度和较低的流动性,中游的混合物质则使泥石流的流体性质介于两者之间,下游的细砂和黏土则使泥石流具有较高的黏性和流动性。在极端降雨条件下,不同粒径的物质在沟道内的侵蚀与堆积过程也存在差异,大粒径碎石主要通过重力作用发生滚动和滑动侵蚀,而细砂和黏土则更容易被水流冲起并形成悬浮搬运,这种差异进一步影响了沟道的演化过程。

2 数值模拟方法

2.1 模型建立

基于流体力学和泥沙运动理论,本研究构建了适用于极端降雨条件下泥石流沟道演化的数值模型。模型采用三维非稳态流体动力学方程,结合泥沙输移方程和侵蚀方程,能够同时模拟泥石流的流体运动、侵蚀过程以及物质的搬运与堆积。在模型中,将泥石流视为一种非牛顿流体,考虑了其黏性、惯性以及颗粒间的相互作用。同时,引入地形变化方程,实时更新沟道的地形地貌,以反映泥石流运动过程中沟道的动态变化。模型的边界条件包括上游的降雨输入边界、下游的自由出流边界以及沟道两侧的固壁边界。降雨输入边界根据实际降雨数据设定,考虑降雨强度、降雨历时以及降雨分布的时空变化;下游自由出流边界允许泥石流自由流出沟道,不施加额外的阻力;沟道两侧固壁边界则采用无滑移边界条件,模拟沟道壁对泥石流的摩擦阻力。

2.2 参数确定

数值模型中涉及多个关键参数,其准确性和合理性直接影响模拟结果的可靠性。降雨强度是模型的重要输入参数之一,通过分析伊犁地区历史降雨数据,结合气象部门提供的降雨预报数据,确定不同极端降雨事件的降雨强度和降雨历时。土壤抗蚀性参数反映了土壤在水流冲刷下的抗侵蚀能力,通过对研究区域土壤样品进行室内实验,测量其抗剪强度、抗压强度以及渗透系数等物理力学性质,结合实地调查的侵蚀速率数据,采用回归分析方法确定土壤抗蚀性参数。泥沙粒径分布参数是影响泥石流流体性质的关键因素之一,通过对沟道内不同粒径物质的采样分析,采用激光粒度分析仪测定其粒径分布曲线,并将其转化为模型所需的概率密度函数形式。沟道糙率参数则反映了沟道壁面对泥石流的摩擦阻力,通过实地测量沟道内植被覆盖率、河床糙率等数据,结合经验公式进行计算确定。

2.3 模拟方案设计

为了全面分析极端降雨条件下泥石流沟道的演化过程,本研究设计了多种模拟方案。首先,根据伊犁地区极端降雨事件的统计数据,选取不同降雨强度(50毫米/小时、100毫米/小时、150毫米/小时)和降雨历时(1小时、2小时、3小时)的组合,模拟不同降雨条件下的泥石流沟道演化过程。其次,考虑沟道初始条件对演化过程的影响,分别设置沟道内初始物质储量、粒径分布以及地形地貌的差异,模拟

不同初始条件下沟道的侵蚀、堆积与形态变化。

3 泥石流沟道演化过程模拟分析

3.1 侵蚀过程

在极端降雨条件下,泥石流沟道内的侵蚀过程是沟道演化的重要环节。通过数值模拟发现,侵蚀速率随着降雨强度的增加而显著提高,且在降雨初期侵蚀速率增长较快,随着时间的推移逐渐趋于稳定。在降雨强度为50毫米/小时,沟道上游的侵蚀速率约为0.5厘米/小时,中游和下游的侵蚀速率分别为0.3厘米/小时和0.2厘米/小时;而当降雨强度增加到150毫米/小时,沟道上游的侵蚀速率可达到1.5厘米/小时,中游和下游的侵蚀速率也分别增加到0.8厘米/小时和0.5厘米/小时。侵蚀深度在沟道上游较大,可达1至2米,中游和下游的侵蚀深度相对较小,一般在0.5至1米之间。侵蚀范围主要集中在沟道的两侧山坡和底部,随着降雨的持续,侵蚀范围逐渐向沟道两侧扩展,形成明显的侵蚀沟。

3.2 堆积过程

泥石流在沟道内的堆积过程是沟道演化过程中的另一个重要环节。模拟结果显示,堆积体主要分布在沟道的中下游区域,尤其是在沟道的弯道、陡坎以及与支沟汇合处。堆积体的形态多样,常见的有扇形堆积、楔形堆积和条带状堆积。堆积体的厚度在不同位置也存在差异,一般在沟道底部和两侧堆积厚度较大,可达2至3米,而在沟道中心区域堆积厚度相对较小,约为1至2米。随着降雨的持续和泥石流的不断运动,堆积体逐渐向下游扩展,形成连续的堆积带。堆积体的存在对沟道的形态和泥石流的运动产生了显著影响,一方面,堆积体改变了沟道的坡度和宽度,增加了沟道的糙率,减缓了泥石流的流速;另一方面,堆积体的形成也使得泥石流的流量在沟道内重新分配,可能导致局部地区的侵蚀加剧。通过对堆积过程的模拟分析,可以为泥石流沟道的治理提供重要参考,如合理规划排洪通道、及时清理堆积体等,以降低泥石流对下游地区的威胁。

3.3 沟道形态变化

极端降雨下泥石流沟道的形态变化是沟道演化过程的直观体现。模拟结果表明,沟道在侵蚀和堆积作用下,其宽度、深度和坡度均发生了显著变化。在降雨初期,沟道主要发生侵蚀作用,沟道宽度逐渐变窄,深度加深,坡度增大;随着降雨的持续,堆积作用逐渐增强,沟道宽度开始变宽,

深度变浅,坡度减小。这种形态变化过程是沟道在极端降雨条件下对泥石流运动的一种自我调节机制,通过调整沟道形态来适应泥石流的流量和流速变化。在沟道上游,由于侵蚀作用较强,沟道形态变化主要表现为沟道的加深和加宽;在沟道中游,侵蚀与堆积作用相对平衡,沟道形态变化较为复杂,可能出现沟道的局部加宽或变窄;在沟道下游,堆积作用占主导地位,沟道形态变化主要表现为沟道的变宽和变浅。通过数值模拟对沟道形态变化过程的详细分析,可以为泥石流沟道的治理工程设计提供科学依据,如合理确定沟道的整治宽度、深度和坡度等参数,以提高沟道的抗冲能力和排洪能力。

4 研究结果与讨论

4.1 关键演化机制

极端降雨下泥石流沟道的演化过程是一个复杂的多物理过程,涉及降雨驱动的侵蚀与堆积平衡、沟道形态调整与泥石流运动的相互作用。通过数值模拟研究发现,降雨强度是影响泥石流沟道演化的关键因素之一,较高的降雨强度会显著增加沟道内的侵蚀速率和堆积量,加速沟道形态的变化。沟道地形地貌对泥石流沟道演化也起到了重要的调控作用,沟道的坡度、弯道、陡坎等地形特征会影响泥石流的流速、流量分布以及侵蚀、堆积位置。此外,沟道内物质的组成与分布也是影响演化过程的重要因素,不同粒径的物质在侵蚀、搬运和堆积过程中表现出不同的特性,大粒径碎石主要通过重力作用发生滚动和滑动侵蚀,而细砂和黏土则更容易被水流冲起并形成悬浮搬运。这些因素相互作用,共同决定了泥石流沟道的演化方向和速度。

4.2 灾害风险评估

基于数值模拟结果,对伊犁地区泥石流沟道在极端降雨条件下的灾害风险进行了评估。研究发现,随着降雨强度的增加和沟道内物质储量的增加,泥石流的规模 and 危害程度显著增大。在降雨强度为 150 毫米/小时且沟道内物质储量较高的情况下,泥石流流量可达到 1000 立方米/秒以上,对下游地区的居民区、交通设施和农田等构成了严重威胁。通过对泥石流沟道的演化过程进行模拟分析,可以提前预测

泥石流的运动路径和堆积范围,为灾害风险区划提供科学依据。例如,在沟道下游的堆积体可能会堵塞河道,导致洪水泛滥,淹没周边的农田和居民区;堆积体的形成还可能改变河流的流向,对沿河的交通设施造成破坏。通过对灾害风险的评估,可以为当地政府制定防灾减灾预案提供重要参考,如提前转移危险区域的居民、加强交通设施的防护等。

5 结语

本研究以新疆伊犁哈萨克自治州的典型泥石流沟道为研究对象,通过数值模拟技术深入剖析了极端降雨条件下泥石流沟道的演化过程。研究表明,降雨强度、沟道地形地貌以及物质组成是影响泥石流沟道演化的主要因素。通过构建精细化数值模型,结合实地数据校准参数,模拟了沟道的侵蚀、堆积与形态变化过程,揭示了极端降雨下泥石流沟道演化的关键机制。基于模拟结果,对伊犁地区的泥石流灾害风险进行了评估,并提出了针对性的防治措施建议。本研究为伊犁地区泥石流灾害的精准预警与科学防治提供了重要的理论依据,同时也为其他类似地区的泥石流研究与防治工作提供了有益的参考。未来,将进一步优化数值模拟模型,结合更多的实地观测数据,深入研究泥石流沟道演化的长期效应和复杂机制,为泥石流灾害的防治提供更加科学、精准的技术支持。

参考文献:

- [1] 陈骏炜. 极端降雨诱发山区泥石流灾害风险动态评估研究 [D]. 东北师范大学,2019.
- [2] 阿鲁思. 基于多模型耦合的多致灾因子诱发长白山北坡泥石流灾害链风险评价研究 [D]. 东北师范大学,2021.
- [3] 乔飞宇. 基于 BASEMENT 数值模拟的泥石流危险评价研究 [D]. 兰州大学,2024.
- [4] 张地,张岩,杨海明,等. 青海黄河流域泥石流空间格局和趋势预估 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版),2024,43(01):10-19.
- [5] 罗世林,刘华亮,郭彩赞. 极端降雨后泥石流发生特征及概率研究——以台湾陈友兰流域为例 [J]. 工业建筑,2024,54(10):175-182.