DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.02.008

宁夏贺兰山贺兰沟“8·21”泥石流运动分析与易发性评价

杨有贞[1]， 马逸舒[1*]， 邓检良[2]， 张 驰[1]， 李学军[3]，
左 娜[3]， 马韵琪[3]， 刘 葳[4]

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021;2.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240;3.贺兰山岩画管理处,宁夏 银川 750200;4.宁夏大学 数理统计学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:2016年8月21日,宁夏贺兰山贺兰沟发生了泥石流灾害。为此,基于DEM高程和高精度影像,建立Arc-GIS计算模型,获取贺兰沟泥石流的容重、流速、流量和一次过程总量等参数;利用Massflow软件模拟贺兰沟泥石流运动特征,分析泥深、流速变化规律;结合地形、物源和水源条件,评价泥石流的易发特性。结果表明,贺兰沟“8·21”泥石流属于短时强降雨激发的稀性泥石流,流速主要在6 m/s以下,贺兰沟植被较少、阻碍作用小,导致泥石流流速较大;平均泥深为1~6 m,最大泥深可达10 m以上,沟内中部泥深厚度大,沿沟道两侧逐渐递减;一次泥石流过程总量为4.81×10^5 m^3,属于中等易发性泥石流。

关键词:贺兰沟;泥石流;Massflow;成灾特征;易发性
中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A

泥石流属于典型地质灾害,岩土石松动、短时强降雨、山洪冲刷等诱因相互叠加,裹挟大量松散泥沙和石块等混合物质快速运动,其运动速度可达每秒十几米,具有突发性、流速快、冲击力强和破坏力大等典型灾害特征[1-3]。泥石流运动特征是国内外学者重点研究领域,现阶段研究方法主要依托历史数据分析和数值模拟[4],随着信息技术的发展,数值模拟逐渐成为探究泥石流运动特性的主要手段,该方法可还原泥石流完整的运动过程,为灾害防治提供参考依据[5]。李鹏浩等[6]基于LS-DYNA模拟计算平台,建立能够反映实际工况的泥石流冲击桥墩模型,重点分析泥石流冲击作用对桥梁行车安全阈值的影响。赵峥等[7]综合运用Fluent、ArcGIS等软件开展模拟,探明泥石流最大流速的分布规律,其显现于流通区下游弯道、窄沟与地形陡峭地带。Guo等[8]通过数字表面模型(DSM)构建模型并开展不同周期的泥石流数值模拟,为白龙江流域划分泥石流风险区域。Massflow模型由中国科学院研发,以深度积分连续介质力学理论为基础,采用有限差分法进行数值计算,可用于模拟泥石流、滑坡、山洪、尾矿库溃坝以及弃渣场失稳等灾害的动力演化过程,并实现危险性定量化风险评价。Ouyang等[9]采用Massflow模拟软件,基于最大流深与动量耦合的双因素模型对泥湾沟进行危险区域划分,同时对泥石流泥深和流速演化过程开展定量模拟评估。该软件采用命令流一键式输入方式,支持多核共享内存及集群并行运算,可支撑亿级网格运算,相较传统流体力学分析方法显著提升了计算效率与精度[10-11]。

2016年8月21日晚间至次日清晨,宁夏贺兰沟遭遇强降雨,引发泥石流地质灾害。当地发布山洪灾害气象风险1级预警(红色预警)与暴雨红色预警,转移安置群众5 000余人;贺兰山水文站实测洪水流量达到50 a一遇标准[12]。现有研究虽已针对贺兰沟基础特征参数开展初步探索,但对该区域泥石流成灾规律和运动特征的分析仍较为匮乏。本文选取贺兰沟作为研究对象,运用Massflow软件模拟

收稿日期:2024-12-12
作者简介:杨有贞(1979—2026),女,副教授,博士研究生,主要从事泥石流灾害的研究(hemai@163.com)。
* **通信作者:**马逸舒(1998—),女,硕士研究生,主要从事泥石流灾害的研究(13007921309@163.com)。
引用格式:杨有贞,马逸舒,邓检良,等.宁夏贺兰山贺兰沟“8·21”泥石流运动分析与易发性评价[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(2):159-167.

重现“8·21”贺兰沟泥石流运动过程,分析区域泥石流易发性,进一步厘清该区域泥石流发育特点,为贺兰山区域泥石流防灾减灾提供理论支撑。

1 研究区概况

1.1 地形地貌条件

研究区位于宁夏银川与内蒙古阿拉善盟交界处(图 1),地理坐标为东经 105°49′—106°41′、北纬 38°19′—39°22′。贺兰沟泥石流流域地处贺兰山中段,地貌以中山及洪积扇为主。贺兰山海拔较高,易促使水汽在东麓汇集,为局部强降雨的形成提供了有利地形条件。贺兰沟整体自北西向南东展布,山体岩体风化严重,表层呈网格状形态,主沟长约 13.2 km,流域面积为 48.9 km,流域内最高海拔 3 556 m,最低海拔 1 300 m,地形相对高差达 2 256 m。区域地震烈度为Ⅷ度,地震动峰值加速度 0.2g。沟谷断面整体呈“V”形,沟内有常年地表径流,沟岸两侧山体陡峭险峻。泥石流形成区多为漏斗状地形;流通区中上游主沟与支沟沟谷纵坡陡峭,为松散物源运移提供了条件;堆积区则地形开阔平缓。

1.2 物源水源条件

贺兰沟位于西北内陆干旱区和东亚季风区过渡带,昼夜温差大,气候干旱少雨,降雨集中在 7—9 月,且多为短时强降雨,宁夏地区年降水量约 400 mm[13]。在极端强降雨作用下,该区域极易暴发暴雨型泥石流(图 2a)。此类暴雨由副热带高压异常进退及冷空气入侵造成,导致暖湿气流积聚和能量快速释放[14]。贺兰沟 50 a 一遇洪水流量为 336 m^3/s[15]。贺兰山为岩石山地,整体植被覆盖率低,土壤含量较少,沟口处主要分布粗骨土和山地灰钙土[16-17]。贺兰沟石质资源较丰富,沟道内堆积大量第四系松散堆积物(图 2b)。主要基岩为石灰岩和砂岩,岩石风化严重,露出的土体为砾质土[18-19];研究区不稳定斜坡和崩塌发育,为泥石流形成提供了松散物源(图 2c)。在强降雨和较大高差地形共同作用下,沟道岩土体失稳松动,水流裹挟松散物源向下运移(图 2d),最终诱发泥石流灾害。

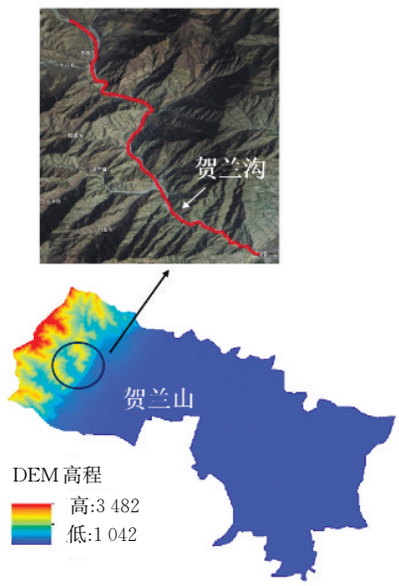


图 1 研究区域

Fig. 1 Research area



a 泥石流爆发现场 b 物源堆积区 c 松散物源 d 水流冲刷

图 2 贺兰沟泥石流暴发及产生的堆积

Fig. 2 Outbreak Debris and accumulation caused by the debris flow in Helan Valley

2 泥石流运动特征分析

2.1 控制方程

Massflow 模拟软件[20]基于深度积分连续介质力学模型,采用 MacCormack-TVD 有限差分法,结合 Fortran 和 C#编程语言及 MPICH、OpenMP 并行运算技术,具有二阶精度和自适应求解功能[21-22],可将三维问题转化为二维计算,高效模拟贺兰沟泥石流的运动过程,进而进行易发性评价。假设流体密度不随时间演化,简化后的模型控制方程如下。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial(h)}{\partial(t)}+\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial(x)}+\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial(y)}=0, \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t}+\frac{\partial(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial y}=$$
$$g_xh-k_{ap}g_zh\frac{\partial(h+z_b)}{\partial x}-\frac{(\tau_{zx})_b}{\rho}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t}+\frac{\partial(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial x}+\frac{\partial(\beta_{v_yv_y}h\bar{v}_y^2)}{\partial y}=$$
$$g_yh-k_{ap}g_zh\frac{\partial(h+z_b)}{\partial y}-\frac{(\tau_{zx})_b}{\rho}。\tag{3}$$

式中:h 为泥深,m;$\bar{v}_x$、$\bar{v}_y$ 分别表示为速度矢量在 x 和 y 方向的分量;t 为泥石流发生时间,s;$\beta_{v_xv_y}$ 为动量修正系数;z_b 为河床标高,m;k_{ap} 为土压力系数;$(\tau_{zx})_b$ 为底部剪应力,Pa;ρ 为流体密度,kg/m^3;g_x、g_y、g_z 分别表示重力加速度 g 在 x、y、z 坐标轴上的分量,其可以表示为

$$\begin{pmatrix}g_x\\g_y\\g_z\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y\\0 & 1 & 0\\\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y\end{bmatrix}\times$$
$$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x\\0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x\end{bmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\-g\end{pmatrix}。\tag{4}$$

式中:θ_x、θ_y 分别为坐标系绕 x、y 轴的旋转角。

2.2　模型建立

本文以贺兰沟为研究对象,从 Alaska Satellite Facility(ASF)官网获取 ALOS 12.5 m 分辨率数字高程模型(DEM),并结合 Google Earth Pro 提取的研究区 12.5 m 分辨率高精度卫星影像。借助 ArcGIS 地理空间数据处理平台,经数据管理、掩膜处理、矢量转换等操作,将影像与高程数据转换为 Massflow 模型可识别的 ASCII 格式地形文件;基于 Microsoft Visual Studio 平台对 Massflow 程序进行二次编译与开发。启动点设置是泥石流数值模拟的重要环节。针对研究区强降雨致灾的背景,以现场物源条件为依据,将松散堆积物储量大、启动风险最高的区域确定为模拟启动位置。考虑到流域内支沟密布,选取五处丰富物源、汇水条件良好的主沟与支沟交汇地带作为启动点。

模拟总时长为 3 600 s,时间步长采用变步长,初始时间步长 0.05 s,库朗数为 0.25,网格大小为 12.5 m×12.5 m。计算基于单层单相流模型,采用二维(准三维)计算模式,流体初始高度依据实地勘测数据设定。参数设置完成后进行运算并解析输出结果,整体计算模型如图 3 所示。

通常选用 Voellmy 模型和 Manning 模型作为泥石流摩擦模型,通过调参分别将其应用于模拟过程。Voellmy 模型是在库伦摩擦模型的基础上引入了湍流效应,该模型主要由摩擦和湍流共同控制,适用于泥浆流、泥石流等流体的运动模拟,其表达式[5,23]为

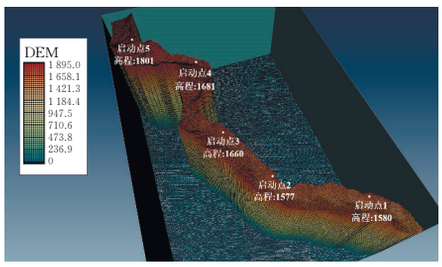


图 3　贺兰沟高程计算结果

Fig. 3　Elevation calculation results for Helan Valley

$$\xi_b=\mu\rho hg\cos\varphi+\frac{\rho gv^2}{\delta}。\tag{5}$$

式中:ξ_b 为摩擦阻力,N;μ 为摩擦系数;φ 为倾斜角度,(°);δ 为湍流系数。

采用 Voellmy 模型模拟贺兰沟泥石流运动特征时,在一次泥石流总量约束条件下,其运动特征不明显,如图 4 所示。

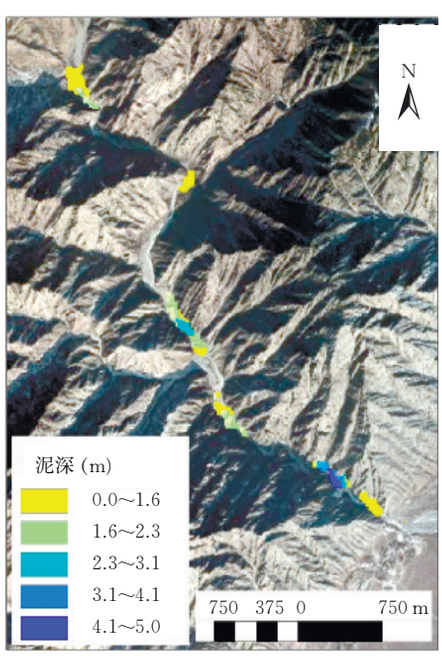


图 4　Voellmy 摩擦模型泥深运动特征

Fig. 4　Voellmy friction model sediment depth movement characteristics

Manning 模型以糙率系数表征沟道摩擦阻力,该系数是决定模拟结果的关键参数,适用于水石流、洪水及泥石流等灾害的数值模拟,其表达式[22,24]为

$$\xi_b=\frac{\rho gw^2v^2}{h^{1/3}}。\tag{6}$$

式中:w 为曼宁系数。

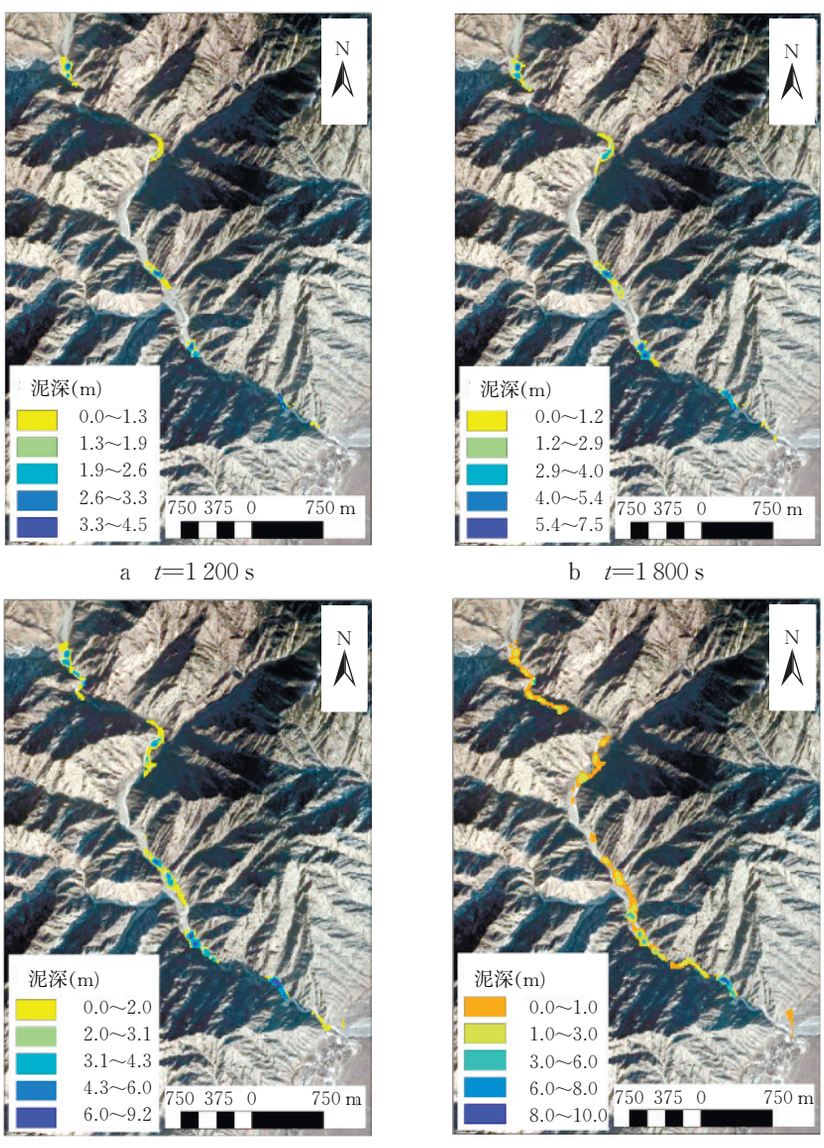
采用 Manning 模型时,Massflow 虽未直接考虑颗粒碰撞力,但是通过调整曼宁系数可有效反映运动特性[20]。研究区泥石流属于稀性泥石流,且偏向于水石流特征,依据地表条件,曼宁系数的取值大于 0.2[24];模拟过程中该模型与实际情况匹配较好,如

图 5 所示。对比两种模型的模拟结果,最终选取 Manning 摩擦模型用于贺兰沟泥石流模拟。

2.3 运动特征分析

图 5 和图 6 给出了不同时刻研究区泥深与流速的空间分布特征。由图 5 可知:贺兰沟主沟平均泥深约 1 m,沟道中部泥深较大,堆积区中心为 6~10 m;自沟道中心向两侧延伸,泥深逐渐减小,平均堆积泥深为 1~3 m。沟口处较为宽阔,随着时间的推移泥深逐渐减小,平均泥深在 1 m 以下,最大可达 10 m。结果表明,大量固体物源在主沟内淤积,易引发沟道堵塞。实际情况下,沟道淤积引发的堵塞问题易诱发次生灾害,威胁沟口周边居民安全。为此,当地管理部门每年定期清理沟口堆积物并布设防护网,以降低灾害风险,相关防护设施见图 7。综合分析可知,研究区泥石流堆积特征表现为:沟道中心泥深显著高于两侧,主沟整体泥深大于沟口堆积厚度,泥深由边缘向中部逐步增大,整体表现出典型的泥石流堆积形态。

图 6 为研究区泥石流流速分布图。由图 6 可知,沟谷内泥石流流速多低于 6 m/s,沟道局部边界处最高可达 13 m/s,流速峰值出现在流通区。强降雨条件下,研究区植被覆盖较少,地表对泥石流的阻滞作用较弱,使其在扩散过程中仍保持较高流速。在流通区内,流速沿沟道逐渐向外递减。综合分析可知,研究区泥石流整体平均流速约为 6 m/s,流速呈现沟道中心高、两侧低的分布规律,由沟道两侧及流通区向边缘逐渐降低。



a t=1 200 s　b t=1 800 s

c t=2 400 s　d t=3 600 s

图5 不同时刻泥深分布

Fig. 5 Sediment depth distribution at different times

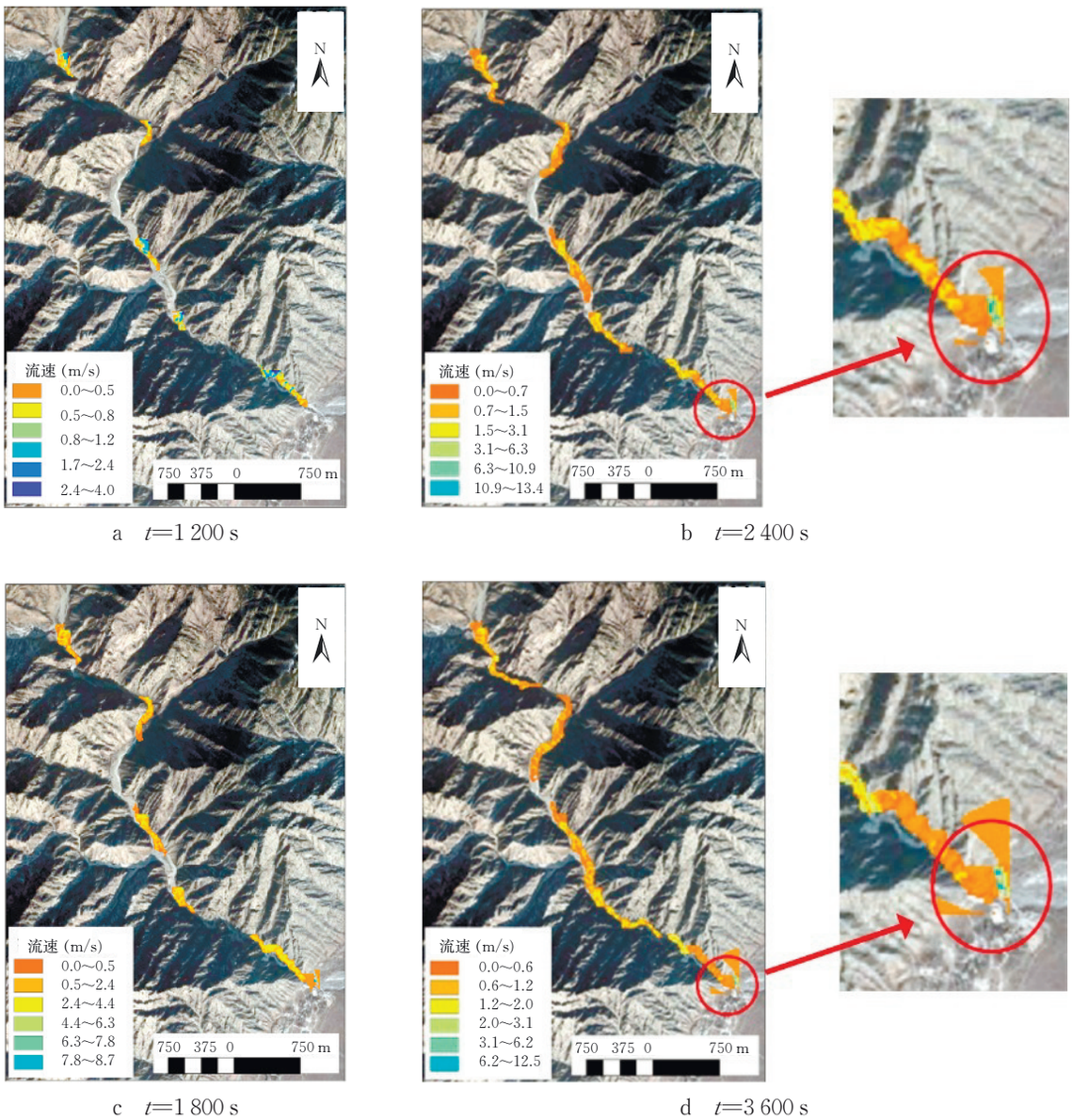


图6　不同时刻流速分布

Fig. 6　Flow velocity distribution at different times

2.4　模拟参数取值依据和模拟结果验证

峰值流量是模型计算的关键参数之一,泥石流流速和一次泥石流过程总量为核心输出结果。本节讨论峰值流量的取值依据,并验证流速与一次泥石流过程总量模拟结果的有效性。

(1)采用经验公式法计算流速,并与现场实测数据对比以验证流速模拟结果。根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》[25],获取贺兰沟泥石流容重为 1.703 t/m^3,查表判定其为稀性泥石流。采用原铁道部第一勘察设计院提出的西北地区经验公式[25],即

$$v_c=\frac{15.3}{a}h_c^{\frac{2}{3}}I_c^{\frac{3}{8}}。\tag{7}$$

式中:v_c为泥石流平均流速,m/s;h_c为平均泥深,m;I_c为泥石流水力坡度,%,采用沟床纵坡代替,贺兰沟主沟纵降比为 8.2%;a 为无量纲。其中 a 的计算公式为

$$a=(\gamma_h k_s+1)^{\frac{1}{2}}。\tag{8}$$

式中:γ_h为固体容重;k_s为泥沙修正系数,查表可得。

贺兰沟泥石流计算流速如表 1 所示,由以上经验公式计算得到 v_c=5.58 m/s。数值模拟平均流速为 6.0 m/s,模拟精度达到 93%。

同时,采用实测结果验证流速模拟结果。根据无人机航拍影像,沟口附近典型断面面积为 64.8 m^2,泥深约 3.2 m,实测洪峰流量为 428 m^3/s[26]。基于



图7 贺兰沟泥石流防护网

Fig. 7 Debris flow protection net at Helan Valley

过流断面面积与峰值流量反演得到实际平均流速[25]为

$$v_c = Q_c / W_c。 \tag{9}$$

式中:Q_c为泥石流断面峰值流量,m^3/s;W_c为泥石流过流断面面积,m^2。得到实测平均流速为 6.6 m/s,模拟精度达到 91%。

经验公式计算值、实测值与数值模拟结果较为接近,表明泥石流流速模拟精度较高,验证了模拟结果的有效性。

(2)基于经验公式计算结果和实测数据,验证峰值流量模拟结果的有效性。采用雨洪法计算贺兰沟峰值流量。泥石流暴雨洪水设计流量计算公式[27]为

$$Q_P = 0.278\psi \frac{S}{t_h^{\,n}} F。 \tag{10}$$

式中:Q_P为暴雨洪水设计流量,m^3/s;ψ为洪峰径流系数,本文取 0.28[28];S为暴雨雨力,mm/h;n为暴雨指数,本文取 0.66;t_h为流域汇流时间,h;F为汇水面积,km^2。其中,暴雨雨力 S 的计算公式为

$$S = H_{24P}/24^{1-n}。 \tag{11}$$

式中:H_{24P}为不同设计频率(P)的 24 h 暴雨量。计算暴雨洪水设计流量如表 2 所示。

表1 贺兰沟泥石流断面平均流速计算结果

Tab. 1 Average flow velocity calculation results for Helan Valley debris flow

降雨频率P/%	主沟纵降比I_c/‰	固体容重γ_h/(t·m^{-3})	平均泥深h_c/m	平均流速v_c/(m·s^{-1})
2	82	2.65	2.0	5.58

表2 贺兰沟暴雨洪水设计流量计算表

Tab. 2 Rainstorm flood design flow rate calculation table for Helan Valley

沟道长L/km	汇水面积F/km^2	暴雨指数n	流域汇流时间t_h/h	暴雨洪水设计流量Q_P/(m^3·s^{-1})
13.2	48.9	0.66	1	145

泥石流峰值流量计算公式[25]为

$$Q_c = (1 + k_s) Q_P D_c。 \tag{12}$$

式中:Q_c为按设计频率 P 计算得到的泥石流峰值流量,m^3/s;D_c为泥石流堵塞系数,贺兰沟沟道内物源分布较分散,部分沟岸有崩塌和滑坡,沟道基本稳定,结合查表综合考虑其为一般堵塞,取值为 1.7,符合规范[25]中关于一般堵塞系数范围(1.5~1.9);k_s为泥沙修正系数,取值为 0.765。

根据以上经验公式,计算得到贺兰沟泥石流峰值流量为 435 m^3/s,与实测值 428 m^3/s[26]较为接近,故在模拟计算中峰值流量取值为 435 m^3/s。贺兰沟峰值流量过程线,如图 8 所示。

(3)对比经验公式计算值与数值模拟结果,进一步验证一次泥石流过程总量模拟结果的有效性。根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》[25],其计算公式为

$$Q = 0.264 t_z Q_c。 \tag{13}$$

式中:Q为一次泥石流过程总量,m^3;t_z为泥石流历时,s。

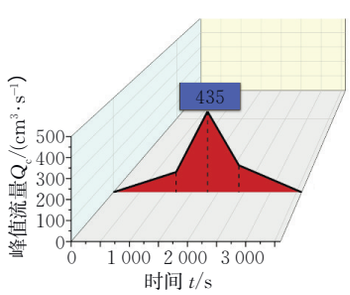


图8 贺兰沟峰值流量过程线

Fig. 8 Peak flow process curve in Helan Valley

经验公式计算结果为 4.07×10^5 m^3,强降雨极端工况下模拟所得流体体积为 4.81×10^5 m^3,模拟精度达 82%,表明模拟结果具有可靠性。同时,研究区支沟较多,物源堆积存在差异,模拟结果会产生

一定误差。例如,赵峥等[7]运用 Fluent 模拟研究了泥石流运动状态,所得最大流速为 12.30 m/s,本研究局部最大流速可达 13 m/s。

2.5　形成机制分析

该泥石流属于暴雨型,其形成受强降雨、陡峭地形和松散物源控制。“8·21”泥石流事件中,贺兰沟主沟和各支沟在强降雨的作用下,水流与物源快速向沟谷汇集,峰值流量达到 435 m^3/s。沟谷形态决定了泥石流运动特征。降雨过程中,沟谷水流持续侵蚀坡面,裹挟坡面松散堆积物、滑坡与崩塌物源及沟道固有物源,固液混合物沿沟道向下游运移,平均流速低于 6 m/s,局部泥深最高可达 10 m,整体冲击力强。综上,短时强降雨与有利地形为泥石流的形成提供了充足水源与动力条件,贺兰沟泥石流整体演化过程为:物源累积—暴雨触发—灾害形成。

2.6　贺兰沟易发性评价

根据贺兰山泥石流沟的流域环境特征,贺兰沟内崩塌与滑坡零星分布。沟口约 1 km 范围内物源补给不足,但泥砂沿程的补给长度比超过了 60%。此外,主沟道偶有堵塞现象,泥石流发生后当地管理部门通常会对沟口进行清理,整体上主沟道形态变化不大。依据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》[25]中的相关评分标准,选取河沟堵塞程度、流域植被覆盖率、泥沙沿程补给长度比、沟口泥石流堆积活动程度等 15 项影响因素(详见该规范附录 I “泥石流数量化综合评判及易发性程度分级标准”),具体如表 3 所示。通过综合分析,对贺兰沟泥石流易发程度进行了量化评分,得分为 102 分,依据评判等级标准,判定其为中等易发类型;在强降雨等极端气象条件下,易引发泥石流灾害。研究结果为贺兰山区域泥石流防灾减灾提供理论支撑。

表 3　泥石流沟易发程度数量化评分表

Tab. 3　Quantitative scoring table for debris flow susceptibility

影响因素	量级划分	影响因素	量级划分
崩塌、滑坡及水土流失严重程度	C	沿沟松散物储量	C
泥砂沿程补给长度比	A	沟岸山坡坡度	C
沟口泥石流堆积活动程度	B	产砂区沟槽横断面	A
河沟纵坡	A	产砂区松散物平均厚度	C
区域构造影响程度	A	流域面积	C
流域植被覆盖率	A	流域相对高差	A
河沟近期一次变幅	C	河沟堵塞程度	B
岩性影响	C		

注:“A”为极易发、“B”为中等易发、“C”为轻度易发、“D”为不易发生。

3　结论与讨论

3.1　结论

本文选取贺兰山贺兰沟作为研究对象,分析“8·21”泥石流成灾特征,初步揭示了本次泥石流的运动规律与易发性特征,主要结论如下。

(1)贺兰沟呈“V”形沟谷,沟岸两侧山高坡陡,利于短时强降雨汇流;地形相对高差达 2 256 m,主沟长约 13.2 km,流域面积为 48.9 km^2。该区域地震烈度为Ⅷ度,岩石冻融风化强烈,植被覆盖率低,强降雨易裹挟沟道松散物源,引发暴雨型泥石流。

(2)基于 Massflow 数值仿真模型,结合高精度遥感影像和 DEM 数据,模拟了贺兰沟暴雨泥石流的运动过程。结果显示:最大堆积泥深可达 10 m,流速多低于 6 m/s;泥石流泥深由沟道中心向两侧递减,流速呈现沟道中心高、两侧低的分布规律,由沟道两侧及流通区向边缘逐渐降低。

(3)综合考虑各影响因素,贺兰沟属于泥石流中等易发区域。极端降雨条件下,泥石流灾害发生的风险较高,需要加强防灾减灾工作,以降低灾害对人民生命财产安全的威胁。

3.2　讨论

研究结果表明,贺兰沟泥石流属中等易发类型,当强降雨达到一定量级时,未来可能暴发大规模泥石流。根据泥石流易发性评价结果,建议在贺兰沟泥石流区域加强监测预警系统建设,在易发区实施植被种植工程,并沿泥石流流向布设拦挡坝等工程设施。使用 Massflow 软件模拟时,模型基于一系列假设构建,模拟过程中存在一定误差,影响结果的准确度。未来可通过优化参数选取和建模流程,进一

步提升数值模拟精度。

参考文献:

[1] An H C, Ouyang C J, Wang F L, et al. Comprehensive analysis and numerical simulation of a large debris flow in the Meilong catchment, China[J]. Engineering Geology, 2022, 298: 106546.

[2] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[3] 宋银, 陈亮, 王研, 等. 云南德钦县一中河泥石流成灾特征及危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 103-109.

[4] 陈长坤, 戴琦乐, 余荣付, 等. 基于灾害演化网络的泥石流风险评估方法研究[J]. 灾害学, 2024, 39(2): 62-66.

[5] 段学良, 马凤山, 郭捷, 等. 基于Massflow模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 25-33.

[6] 李鹏浩, 和振兴, 李斌强, 等. 泥石流冲击下山区铁路车-轨-桥系统动力学行为特性研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(22): 37-44.

[7] 赵峥, 刘铁骥, 陈亮, 等. 基于Fluent强震区王家沟泥石流运动特征研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 208-212.

[8] Guo Y T, Feng Z, Wang L C, et al. Hazard assessment of debris flow: A case study of the huiyazi debris flow[J]. Water, 2024, 16(10): 1349.

[9] Ouyang C J, Wang Z W, An H C, et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows: A case study of Niwan Gully, Wudu, China[J]. Engineering Geology, 2019, 263: 105351.

[10] 李金秋, 张永双, 任三绍, 等. 金沙江上游扎马古滑坡复活特征及堵河危险性分析[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 481-492.

[11] Li Y J, Wang M Y, Ma F K, et al. Constructing rainfall threshold for debris flows of a defined hazardous magnitude[J]. Remote Sensing, 2024, 16(7): 1265.

[12] 新京报即时新闻. 宁夏贺兰山中北段突发山洪 已营救被困人员248名[EB/OL]. (2016-08-22)[2024-12-12]. https://www. 163. com/news/article/BV3S7QRR00014SEH.html.

[13] Yang Y Z, Lin Q Q, Ma H L, et al. A semi-empirical damage model of helankou rocks based on acoustic emission[J]. Materials, 2023, 16(11): 4001.

[14] 杨侃, 纪晓玲, 毛璐, 等. 异常环流背景下贺兰山地形对8·21特大致洪暴雨的影响分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 132-142.

[15] 李军, 张万宝. 宁夏贺兰山地区暴雨洪水及其特性分析[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(4): 60-62.

[16] 仲佳鑫, 倪万魁, 黄玮. 宁夏贺兰山区郑官沟水石流发育特征与形成机理研究[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 223-231.

[17] 卫玺玺, 晁鑫艳, 郑景明, 等. 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子[J]. 生态环境学报, 2024, 33(4): 520-530.

[18] 刘葳, 杨有贞, 刘美汐, 等. 冻融条件下贺兰口岩石损伤声发射特征研究[J]. 西北工程技术学报, 2024, 23(3): 243-251.

[19] 梅廷义. 利用贺兰山砂岩修筑高速公路防滑面层的性能研究[C]//中国公路学会. 第四届全国公路科技创新高层论坛论文集[上卷]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 305-308.

[20] Ouyang C J, He S M, Xu Q, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 1-10.

[21] 史继帅, 姜亮, 翟胜强. 四川甘洛县黑西洛沟"8·31"泥石流动力过程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 52-60.

[22] Xiang W, Ouyang C J, An H C, et al. Mechanism analysis and dynamic simulation of landslide-generated debris flow influenced by forest fire prevention road[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(3): 72.

[23] Palau R M, Hürlimann M, Pinyol J, et al. Recent debris flows in the Portainé catchment (Eastern Pyrenees, Spain): Analysis of monitoring and field data focussing on the 2015 event[J]. Landslides, 2017, 14(3): 1161-1170.

[24] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 黏性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 12-16.

[25] 中国地质灾害防治工程行业协会. 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行): T/CAGHP 006—2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.

[26] 岳发鹞. "8·21"贺兰山东麓特大暴雨洪水应对措施和思考[J]. 中国水利, 2017(15): 49-51.

[27] 吴勇拓, 李致家, 戚振亚, 等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8.

Analysis of the 8·21 Debris Flow and Susceptibility Assessment of Helan Valley in Helan Mountains, Ningxia

YANG Youzhen[1], *MA Yishu*[1*], *DENG Jianliang*[2], *ZHANG Chi*[1], *LI Xuejun*[3], *ZUO Na*[3], *MA Yunqi*[3], *LIU Wei*[4]

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Helan Mountain Rock Paintings Management Office, Yinchuan 750200, China; 4. School of Mathematics and Statistics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: On August 21, 2016, a debris flow disaster occurred in Helan Valley, Helan Mountain, Ningxia. Therefore, based on DEM elevation and high-precision images, an ArcGis computational model was established to obtain parameters such as bulk density, flow velocity, flow rate, and total volume of the debris flow process in Helan Valley. The Massflow software was used to simulate the movement characteristics of the debris flow in Helan Valley and analyze the variations in sediment depth and flow velocity. By combining the topography, material sources, and water sources, the susceptibility characteristics of the debris flow were evaluated. The results showed that the 8·21 debris flow in Helan Valley was a rare debris flow triggered by short-duration heavy rainfall, with flow velocities primarily below 6 m/s. The sparse vegetation in Helan Valley resulted in minimal resistance, leading to higher flow velocities; the average sediment depth ranged from 1 to 6 m, with a maximum sediment depth exceeding 10 m. The sediment depth was greatest in the middle of the valley and gradually decreased along the sides of the valley; the total volume of a single debris flow event was 4.81×10^5 m^3, indicating a moderate susceptibility to debris flows.

Keywords: Helan Valley; debris flow; Massflow; disaster characteristics; susceptibility

(责任编辑　王德平)

(上接第158页)

Driving Mechanism of Effective Utilization Coefficient of Irrigation Water Under Human Factors —A Case Study of the Ningxia Artesian Irrigation Area

HEI Zhengjun[1,2], *ZHANG Hongling*[3], *DU Bin*[3], *TANG Lian*[1,4*]

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Wuzhong Water Conservancy Bureau Yellow River Management Institute, Wuzhong 751100, China; 3. Ningxia Hui Autonomous Region Water Conservancy Research Institute, Yinchuan 750021, China; 4. Engineering Research Center Funded by Ministry of Education for Effective Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Areas, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Many factors influence the effective utilization coefficient of irrigation water in farmland, among which human-induced factors have a significant impact. Data from the Ningxia artesian irrigation area from 2015 to 2019 were collected, and an STIRPAT model was constructed to dynamically evaluate the effects of different human factors on each artesian irrigation district. The results show that the proportion of water-saving irrigation area, channel lining rate, proportion of impermeable canal systems, and investment in water-saving irrigation have positive effects, while the actual irrigated area and the proportion of rice have a restraining effect. Principal component analysis results indicate that the state of water-saving irrigation constitutes the first principal component, while local management and operational conditions and planting structure constitute the second principal component. Regression analysis shows that the proportion of water-saving irrigation area, channel lining rate, and investment in water-saving irrigation are the most influential human factors across irrigation districts. The grey prediction model results indicate that by 2026, the effective utilization coefficient of irrigation water in farmland is expected to fail to reach the planned target value of 0.6, necessitating regulation. According to the regression equation, it is necessary to increase the the average proportion of water-saving irrigation area in the Ningxia artesian irrigation area by 5.01%, increase water-saving irrigation investment by 1.6719 billion yuan, and reduce the average proportion of rice by 14.43%.

Keywords: human factors; effective utilization coefficient of irrigation water in farmland; STIRPAT model; regulation strategy;Ningxia artesian irrigation area

(责任编辑　王德平)