

甘肃南部山区城镇地质灾害风险双控模式初探

王高峰^{1,2,3}, 李刚^{2,3}, 孙向东^{2,3}, 李浩^{2,3}, 田运涛^{2,3}, 董翰川^{2,3},
高幼龙^{2,3}, 徐友宁⁴, 王洪德^{2,3}, 李瑞冬⁵

(1.中国地质科学院, 北京, 100084; 2.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定, 071051;
3.自然资源部三峡库区地质灾害监测预警野外科学观测研究站, 重庆, 404100; 4.中国地质调查局西安地质调查中心,
陕西 西安, 710061; 5.甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州, 730050)

摘要:【研究目的】甘肃省是我国地质灾害高发地区之一, 科学构建地质灾害风险“点面双控”模式是防灾减灾的关键。【研究方法】以陇南礼县龙林镇为例, 在现场精细化勘查测绘、多期遥感数据建模、室内试验测试及数值模拟分析的基础上, 阐述了以地质灾害风险识别、成灾模式研究、危险性分析、易损性评价、风险评价和风险防控对策建议等 6 大步骤的典型城镇地质灾害风险管控技术流程, 介绍了城镇风险斜坡半定量风险评价过程, 形成了基于动力过程的单体地质灾害定量风险评价方法和地质灾害风险双控模式。【研究结果】(1)研究区地质灾害类型主要为滑坡、泥石流 2 种, 共发育地质灾害隐患点 71 处, 其中有 15 处直接威胁人民生命财产安全, 总结了 3 类滑坡成灾模式并建立了地质早期识别标志; (2)基于不同降水频率 (5%、2%、1%) 地质灾害风险区划表明, 在不同降水频率下 75.23% 的区域始终保持低风险, 24.38% 的区域风险等级随降水频率的降低而增大, 0.39% 的区域始终保持极高风险; (3)基于风险评价结果, 提出了可用于城镇和具体灾害点减灾的风险综合双控建议。【结论】相关研究可为复杂山区城镇防灾减灾、国土空间规划管控与用途管制提供技术支撑。

关键词: 地质灾害; 风险评价; 点面双控; 山区城镇; 地质调查工程; 甘肃省

创新点: (1)通过分析城镇斜坡关键孕灾地质环境条件, 提出了一种快速评价斜坡破坏概率方法; (2)形成了基于灾害动力过程的不同降水条件下地质灾害风险评价技术方法, 初步探讨了地质灾害风险双控模式。

Preliminary study on the “point-surface dual control” model of geological hazard risk in typical mountainous towns in Gansu Province

WANG Gaofeng^{1,2,3}, LI Gang^{2,3}, SUN Xiangdong^{2,3}, LI Hao^{2,3}, TIAN Yuntao^{2,3}, DONG Hanchuan^{2,3},
GAO Youlong^{2,3}, XU Youning⁴, WANG Hongde^{2,3}, LI Ruidong⁵

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100084, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology of CGS, Baoding 071051, China; 3. Observation and Research Station of Geological Disaster Monitoring and Early Warning in the Three Gorges Reservoir Area, MNR, China, Chongqing 404100, China; 4. Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710061, China; 5. Geo-Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering. [Objective] Gansu Province is one of the areas with high incidence of geological disasters in China. The scientific construction of a "point-surface dual control" model of geological disaster risks is the key to disaster prevention and mitigation. [Method] Taking Longlin Town as an example, on the basis of on-site refined survey and mapping, multi-phase remote sensing data modelling, indoor test and numerical simulation analysis, the paper expounds the typical urban geological disaster risk management and control technical process with six steps, including geological disaster risk identification, disaster mode research, risk analysis, vulnerability assessment, risk assessment and risk prevention and control countermeasures, and introduces the semi-quantitative risk assessment process of urban risk slope, the quantitative risk assessment method of single geological hazard based on dynamic process and the "point-surface dual control" mode of geological hazard risk have been formed. [Results] (1) The main types of geological hazards in the study area are landslide and debris flow, with a total of 71 hidden danger points of geological hazards developed, 15 of which directly threaten the safety of people's lives and property. The three types of landslide hazard models are summarized and the geological early identification signs are established; (2) Based on the geological hazard risk zoning of different precipitation frequencies (5%, 2%, 1%), 75.23% of the regions always maintain low risk under different precipitation frequencies, 24.38% of the regional risk level increases with the reduction of precipitation frequency, and 0.39% of the regions always maintain high risk; (3) Based on the results of risk assessment, a comprehensive risk dual control proposal for disaster reduction in

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3003403); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221747)。

作者简介: 王高峰, 男, 1984 年生, 高级工程师, 在读博士, 主要从事地质安全风险评价与 GIS 研究; E-mail: wgf_cgcs303@163.com。

通讯作者: 田运涛, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查、监测预警等; E-mail: 394124773@qq.com。

towns and specific disaster sites is proposed. **[Conclusions]** Relevant research can provide technical support for disaster prevention and mitigation, land space planning and control and use control of complex mountain towns.

Key words: Geological hazards; Risk assessment; Point-surface dual control; Mountainous towns; Geological survey engineering; Gansu Province

Highlights: (1) By analyzing the key disaster-forming geological environment conditions of slopes, a method for quickly evaluating slope damage probability is proposed; (2) A technical method for evaluating geological hazards under different rainfall conditions based on disaster dynamic processes is formed, and a preliminary discussion of geological hazards risk Dual control mode.

About the first author: WANG Gaofeng, male, born in 1984, senior engineer, doctor candidate, mainly engaged in geological disaster investigation and evaluation. E-mail: wgf_cgcs303@163.com.

About the corresponding author: TIAN Yuntao, male, born in 1983, engineer, mainly engaged in the research of engineering geology and geothermal geology. E-mail: 394124773@qq.com.

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program (No.2022YFC3003403) and the Project of China Geological Survey (No. DD20221747).

1 引言

受独特孕灾地质和气象条件影响,甘肃省是我国地质灾害灾情最严重的地区之一。甘肃省陇南地区由于特殊的自然条件,很多城镇和基础设施不得不选在峡谷阶地、泥石流沟口堆积扇上、生态环境脆弱的斜坡体上或滑坡台地上及附近,山区城镇建设过程中不可避免地受到地质灾害的破坏或威胁。随着极端气候、地震、工程经济活动等地质灾害外界影响因素增多、增强,加之本身具有隐蔽性和动态变化的特点且破坏巨大,导致其无论从致灾频率、人员伤亡还是经济损失数量等都在发生改变,已逐渐成为地质灾害高风险区域(孟兴民等,2013;郭富赟等,2014)。因此,山区城市规划和开发中迫切需要可靠的地质灾害风险区划和管控措施,以致致力于减轻地质灾害造成的人员伤亡和经济损失,亟需大比例尺地质灾害调查和多灾种定量风险评价,为国土空间规划、防灾减灾和实施防治工程提供技术依据。

地质灾害风险管控是目前地质灾害防灾减灾的有效途径,并已成为世界各国(UNDP,2004;AGS,2007;Pradhan B,2010;UN/ISDR,2015)防灾减灾战略体系的重要组成部分,目前国内外对于地质灾害风险管理已基本形成符合本国或本地区实际情况的技术方法与理论体系,地质灾害风险管理逐渐从半定量向量化方向转变(Fell R等,2008;石菊松等,2005;吴树仁等,2009;张春山等,2009;许强等,2010;唐亚明等,2011;崔鹏等,2016)。针对地质灾害风险评价方法与风险管理系统,我国学者也开展了相应的研究工作,特别在我国西部山区开展了城镇地质灾害风险评估,形成了一套山区城镇地质灾害调查与风险评价的思路和技术方法,并提出了系列风险减缓措施方案(郭富赟等,2014;陈晓利等,2019;张茂省等,2019、2021;周超等2020;王高峰等,2019、2020;黄波林等,2021)。考虑到单体地质灾害可能对人口聚集区和城镇的危害,许多学者进行基于动力过程的单体地质灾害风险评价。如结合物理统计模型方法在三峡库区构建了水库滑坡涌浪定量风险评估技术方法(黄波林等,2018);探讨了黄土地区单体滑坡风险评价的一般方法、程序及定量评价相关参数的确定方式(张成航等,2015);实现了灌溉诱发型滑坡的风险控制(孙萍萍等,2013);通过对萨尔瓦多 El Picacho 滑坡考虑滑坡-碎屑流运动过程中滑体下表面的侵蚀作用及摩擦阻力的变化,建立基于有限体积法的计算模型,开展了危险性 & 风险预测(杜鹃等,2015);通过物理模拟试验构建了三眼峪泥石流堆积面积、厚度及形态特征,并对危险度进行了划分(舒和平等,2016);在实现承灾体预期损失定量表达的基础上,形成了汶川震区泥石流定量风险评价体系(黄勋等,2016)。

上述地质灾害风险评价大都基于统计方法的因素分析,对具体灾害点的详细信息反映不足,评价结果难以应用到每个具体灾害点的风险管控,现有的地质灾害调查与风险评价技术已无法满足走新型城镇化道路、全面提升城镇化质量的新要求。对服务于城镇和具体灾害点风险管控,需要进一步依据具体灾害的物理力学性质,考虑灾害的动力过程,开展地质灾害风险源识别、危险性分析与易损性分析,在此基础上计算每个地质灾害及隐患点的风险值并进行风险等级划分。另外静态风险评价已有大量的深入研究,主要应用于风险治理规划方面,成果大多集中于区域或单体的研究,而城镇尺度的地质灾害动态风险评价方面尚缺乏。目前,我国对地质灾害隐患点“人防+技防”的“点控”模式已基本形成,但对城镇地质灾害风险“点面双控”的管控成效有机结合程度不足,因此,亟需形成科学有效的技术方法构建城镇地质灾害风险双控体系。

本文借鉴国内外地质灾害风险评价技术方法和理念,以具有典型性和区域特色的甘肃省礼县龙林镇为典型研究案例。首先构建典型山区城镇地质灾害风险评价流程与方法,分析了龙林镇城镇周边的典型地质灾害点潜在危险性,研究城镇及周边承灾体脆弱性,划分不同降雨频率下地质灾害风险区域;最后探讨城镇地质

灾害风险管控措施，为我国类似山区城镇防灾减灾及国土空间规划提供技术支持。

2 城镇地质灾害风险管控流程与方法

2.1 城镇风险管控流程

我国地质灾害危险或风险评价大多是针对某个区域或典型地质灾害体。而城镇尺度则是围绕城镇规划区开展调查评价工作，要求威胁城镇的地质灾害隐患及其链式灾害都需要调查分析。本文采用以下步骤和方法来开展城镇地质灾害风险评价与管控研究（图 1）。

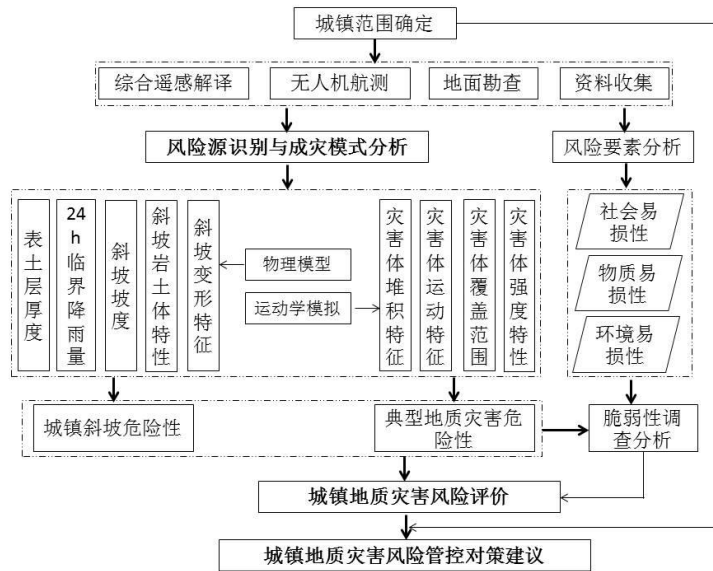


图 1 典型山区城镇地质灾害风险评价与管控流程图

Fig.1 Flow chart of geological hazard risk assessment and control in concentration area of typical mountain town

(1) 地质灾害风险识别。地质灾害风险识别即危险源识别，利用综合遥感技术（朱建军等，2017；许强等，2019；葛大庆等，2019），重点是围绕城镇规划区内可能产生地质灾害的地段，识别研究区内河谷两岸一级斜坡带和各支沟流通区以下范围分析可能失稳产生崩塌、滑坡的地段，沟谷则分析是泥石流沟还是坡面型沟或是山洪沟，同时还应考虑极端条件下链式地质灾害发生后的次生影响范围。

(2) 地质灾害成灾模式研究。针对调查获取的地质灾害隐患进行孕灾条件和成灾过程研究，通过分析地质灾害基本形成条件、发育特征、发展演化过程与特征及早期识别标志，建立不同类型和发展阶段相对应的地质灾害地质识别标志和指标。

(3) 地质灾害危险性分析。采用坡地水文模型与无限边坡稳定模型，结合斜坡的坡度、厚度、岩土体结构特征、变形特征及临界降雨强度等，获取城镇斜坡危险分区。而在城镇周边一级斜坡带针对可能产生灾害的滑坡/泥石流，应逐一预测分析不同降雨条件下潜在危害程度，并在地质灾害成灾模式基础上，采用合理的岩土体运动、流固耦合运动的数学模型，分析各条件下地质灾害运动及堆积特征，预测其威胁范围。最后按照斜坡失稳、滑坡破坏、泥石流发生三层次叠加，合理划定研究区内由栅格单元组成的危险性区块或条带状斜坡单元，形成城镇地质灾害危险性分区图。

(4) 潜在承灾体易损性评价。地质灾害易损性分析是对承灾体抗灾能力的综合分析，其大小取决于承灾体对地质灾害作用的敏感程度，通常用承灾体的价值（或数）及其脆弱性指数来表示。依据地质灾害危险性分区图结合研究区风险要素分析，主要调查地质灾害危险性中等及以上级别的遭受地质灾害危害的潜在承灾体。承灾体的综合价值可采用承灾体的平均单价和受灾的实际数量计算获得，然后再根据地质灾害空间运动破坏形式和承灾体自身的结构强度开展定性或定量脆弱性指数分析，获得研究区地质灾害潜在承灾体易损性评价分区图。

(5) 城镇地质灾害风险评价。利用陇南山地历史地质灾害案例及相应触发雨量记录数据，获取不同等级风险区地质灾害发生概率，结合研究区地质灾害危险程度和承灾体易损度，采用定量和定性方式进行城镇地质灾害风险评价，并形成研究区地质灾害风险区划图。

(6) 风险管控建议对策。综合考虑研究区承灾体风险分布情况，针对性提出风险源头消除、风险区减轻和综合风险管控等具体措施。

2.2 评价方法与模型

为科学反映斜坡在不同降雨频率下的岩土体力学性质，真实模拟复杂地形条件下连续强碎屑流性质的滑坡、泥石流等地质灾害运动速度、堆积特征及影响范围等。以陇南山地的典型搬迁安置区龙林镇为应用示范案例，在城镇规划区内河谷两岸一级斜坡带，危及城镇的潜在重大地质灾害可能为多个，针对此范围内单多个重大地质灾害与单体的计算分析流程类同，本文仅选取典型滑坡和泥石流灾害各1处，分别采用FLO-2D模型和River-Flow2D模型进行模拟分析评价（表1）。城镇区其它区域采用5m×5m分辨率的栅格单元作为地质灾害基本评价单元，选用斜坡稳定性评价模型进行地质灾害危险性评价，进而开展风险性分析。

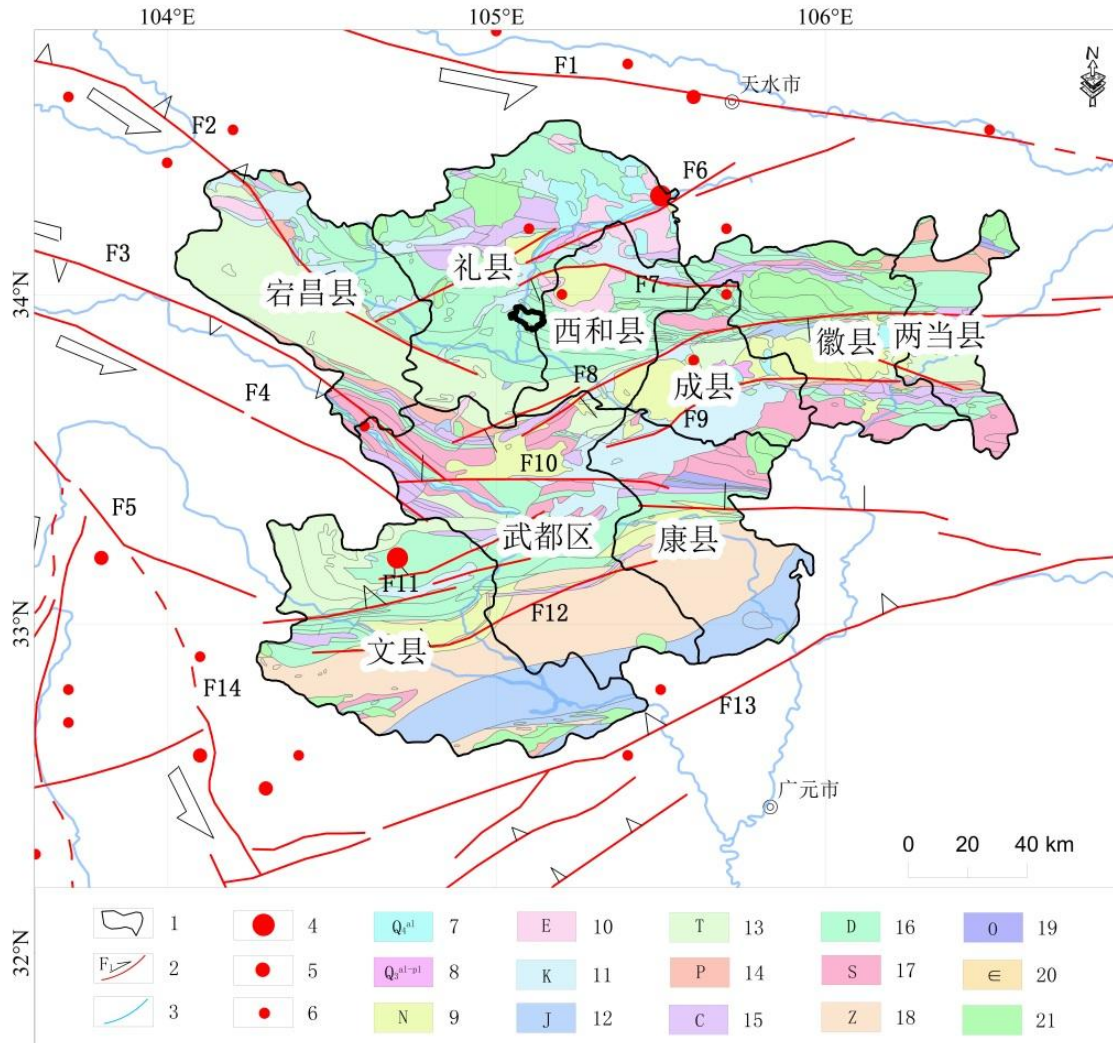


图2 研究区地质背景图

1—研究区；2—区域断裂；3—水系；4— $M_s \geq 8.0$ ；5— $7.0 < M_s < 8.0$ ；6— $6.0 < M_s < 7.0$ ；7—全系统；8—上更系统；9—新近系；10—古近系；11—白垩系；12—侏罗系；13—三叠系；14—二叠系；15—石炭系；16—泥盆系；17—志留系；18—震旦系；19—奥陶系；20—寒武系；21—侵入岩

Fig. 2 Geological background map of landslide area

1—Study area; 2—Regional fault; 3—River system; 4— $M_s \geq 8.0$; 5— $7.0 < M_s < 8.0$; 6— $6.0 < M_s < 7.0$; 7—Holocene; 8—Upper Pleistocene; 9—Neogene; 10—Paleogene; 11—Cretaceous; 12—Jurassic; 13—Triassic; 14—Permian; 15—Carboniferous; 16—Devonian; 17—Silurian; 18—Intrusive rock; 19—Ordovician; 20—Cambrian; 21—Intrusive rock

表 1 城镇地质灾害风险评价方法和模型

Tab.1 Risk assessment methods and models of geo-hazard in town

评价方法	评价模型	物理意义	可行性分析
斜坡稳定性评价模型 (Skempton 等, 1984; Montgomery 等, 1994)	$F_s = \frac{c' + [\rho_s g D - \rho_w g h] \cos \theta \tan \phi'}{\rho_s g D \sin \theta} \quad (\text{式 1})$ $h = \frac{IA}{Tb \sin \theta} \quad (\text{式 2})$ $I_{\text{eq}} = T \left(\frac{b}{A} \right) \sin \theta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \cdot \left[\left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi'} \right) + \frac{c'}{\rho_w g D \cos \theta \tan \phi'} \right] \quad (\text{式 3})$	式中: F_s 为斜坡稳定性系数; c' 为斜坡有效内聚力(kPa); ϕ' 为斜坡有效内摩擦角($^\circ$); ρ_s 为岩土体天然重度(kg/m^3); t 为潜在滑体厚度(m); θ 为斜坡坡面倾角($^\circ$); h 为斜坡地下水高度(m); ρ_w 为水的重度(kg/m^3); I 为等效降雨强度(m/d); A 为流域面积(m^2); T 为饱和土体的导水率(m^2/d); b 为考虑的水流横切面宽度(即栅格精度)(m)。	研究区斜坡失稳主要受降雨影响,而滑坡深度远小于斜坡的宽度与长度。因此采用该模型主要考虑雨水侵蚀坡表、浸润坡体和岩土体力学性质对斜坡在不同降雨频率下的响应,可实现斜坡定量稳定性评价。将其与斜坡水文模型相结合,可获得浅层滑坡或斜坡启动的临界降雨量。
FLO-2D 流体模型(O'Brien 等, 1993; 王高峰等, 2020)	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = I \quad (\text{式 4})$ $(S_{ax} - S_{fx})g = \frac{\partial h}{\partial x}g + u \frac{\partial(uh)}{\partial x} + v \frac{\partial(uh)}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{式 5})$ $(S_{oy} - S_{fy})g = \frac{\partial h}{\partial y}g + u \frac{\partial(vh)}{\partial x} + v \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{式 6})$ $S_f = S_y + S_v + S_{id} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta u}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (\text{式 7})$	式中, t 为泥石流演进时间(s), h 是泥石流流深(m), I 是降雨强度(mm/h), u 是泥石流 x 方向流速(m/s), v 是泥石流 y 方向流速(m/s), S_{ax} 和 S_{oy} 分别为 x 方向和 y 方向的河床坡降(%), S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 方向和 y 方向的摩擦坡降(%); S_f 是摩擦坡降(%), S_y 是屈服坡降(%), S_v 是粘性坡降(%), S_{id} 是紊流一分散坡降(%), τ_y 是屈服应力(MPa), γ_m 是流体比重(t/m^3), K 是层流阻力系数, η 是流体黏滞系数, n 是曼宁系数, v 是流速(m/s)。其中, τ_y 和 η 参数由式 $\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ 式 $\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ 计算所得, α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 由流变试验所得或查表设置。	FLO-2D 模型于上世纪 90 年代初基于非牛顿流体模型和有限差分法来求解运动控制的程序提出可用于二维洪水灾害管理和泥石流运动的模型。研究区泥石流灾害多呈现降雨控制型特点,且少部分泥石流沟进行了工程防治措施,通过模拟可定量获取泥石流运动特征值,然后以每个栅格单元内泥石流泥位深度、流速等强度值的空间分布作为泥石流危险性表现形式。
River-Flow2D 流变模型 (ASIER L 等, 2019)	$v = \frac{h}{6\eta} (2\tau - 3\tau' + \frac{\tau'^3}{\tau^2}) \quad (\text{式 8})$ $\tau = \gamma h \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) \tan \phi + \gamma \frac{v^2}{\xi} \quad (\text{式 9})$ $\tau = \gamma h \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) (1 - r_u) \tan \phi \quad (\text{式 10})$ $f_1(\tau_0, \tau_1) = 2\tau_0^3 - 3(\tau_y + 2\tau_\mu)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0 \quad (\text{式 11})$	式中: η 为宾汉黏性系数; v 为滑速(m/s); 根据库伦黏性理论 τ' 可由滑面正应力表示; γ 为滑体容重(kg/m^3); α 为滑面倾角($^\circ$); ϕ 为内摩擦角($^\circ$); $a_c = v^2/R$ 为曲线滑面的离心加速度; r_u 为空隙水压力系数,即空隙水压力与计算单元底部的法向应力的比值; ξ 为湍流系数(m^2/s); τ_b 为滑体应力(MPa),即 $\tau_b = gph \cos \theta \tan \theta_b$; τ_y 为屈服应力(MPa),即 $\tau_y = 0.181 \cdot \exp(25.7C_v)/10$; τ_μ 为黏性应力(MPa),即 $\tau_\mu = 0.036 \cdot \exp(22.1C_v)/10$ 。其中 $\rho = \rho_w(1 + 1.65C_v)$; θ 为滑坡坡度($^\circ$); θ_b 为滑坡的内摩擦角($^\circ$); ρ 为滑坡碎屑流体密度(kg/m^3); ρ_w 为水的重度(kg/m^3); C_v 为体积浓度。	研究区滑坡多发育于由软弱浅变质区千枚岩、板岩等组成的松散堆积体斜坡,破坏过程通常呈不连续的碎屑流动,表现为高浓度非牛顿流体特性。River-Flow2D 数值模型是采用有限体积法融合水力学、水文学弹性网格的多维仿真计算软件。在模拟滑坡-碎屑流运动过程中主要考虑滑体下表面摩擦阻力的变化情况,同时给出不同的滑动摩擦力计算模型,可合理模拟滑坡-碎屑流运动过程,能准确确定应力边界条件。最终可实现滑坡-碎屑流运动堆积特征(滑速、滑距及堆积体厚度)的二维或三维模拟与展示。

3 研究区地质环境概况及数据来源

3.1 研究区地质环境概况

根据甘肃省陇南山地地质灾害发育特征及现有地质灾害数据,选取受地质灾害影响严重、地貌类型属典型中高山峡谷的西汉水流域礼县南部龙林镇为研究对象。研究范围以集镇规划区为主,外围延伸至西汉水河谷两岸斜坡一级分水岭、泥石泥沟脑分水岭及灾害次生影响区域(图2)。地理范围在 $105^{\circ} 02' 29.5'' E \sim 105^{\circ} 08' 47.4'' E$, $33^{\circ} 53' 29.7'' N \sim 33^{\circ} 57' 50.1'' N$ 之间,面积 38.4km^2 。是礼县扶贫攻坚移民搬迁重点安置区,城镇总人口约11550人,包含9个行政村及3处搬迁安置区。

该区处于温带大陆性季风气候区,气候温和湿润,境内多年平均降雨量为 499.4mm ,降雨集中在6月-9月,常以暴雨、连阴雨形式出现。地层主要为泥盆系中统西汉水群第五、六岩性段($D_2^2xh_5$ 、 $D_2^2xh_6$)板岩、千枚岩夹灰岩、粉砂岩,岩相及产状变化大,山脊、缓坡及河谷地带多种成因的第四系物质覆盖面积较大,受周边活动断裂等影响,岩体破碎,风化程度高,属易崩易滑岩组。近年来,区内人类工程活动日益强烈,主要包括道路修建、城镇化建设等。

3.2 研究数据来源

本研究所需数据主要包括(表2):①地质灾害现场调查获取的基本特征资料;②1:1万地形图数据、DEM和1:20万地质图;③1:1万土地利用类型数据;④1:1万精度的物源特征数据;⑤2016年5月3日获取精度为 0.5m 的Pléiades卫星遥感数据和2020年10月15日获取精度为 0.1m 的无人机测绘数据;⑥研究区历史地质灾害降雨数据和陇南山地406处气象观测数据点资料;⑦重大地质灾害体勘查及岩土体试验测试数据。

表2 数据类型及数据来源
Tab.2 Type and source of data

基础数据	数据来源与制作	数据格式
地质灾害数据	“陇南西汉水流域灾害地质调查”(2019-2021年)项目数据库	1:10000精度矢量数据
DEM	地理空间数据,用于提取坡度、沟壑密度及泥石流沟床比降等	国家地理信息中心:5m×5m栅格数据
DOM/DLG	土地利用类型数据	国家地理信息中心:5m×5m栅格和矢量数据
遥感数据	用于风险源识别、承灾体类型等解译及典型单体地质灾害模拟底图	P星和无人机数据,栅格数据
降雨资料	兰州中心气象台,陇南市地质灾害专业监测网络	矢量数据
地质数据	岩性分区、断裂构造	1:200000区域地质图,矢量数据
勘查及测试数据	岩土体密度/容重、含水率/渗透系数及内摩擦角、内聚力、泥石流颗粒级配等 物理学指标,用于模型计算分析	文本数据格式

4 地质灾害风险识别和成灾模式

综合运用卫星遥感、无人机航拍等技术,详细圈定研究区斜坡变形区段或区块,并重点选取综合遥感解译视觉盲区及对人民生命财产安全构成威胁的变形特征明显的地质灾害隐患点或典型地质灾害点进行调查。经过“普查、详查、核查”风险识别结果表明,研究区共发育地质灾害71处,包括崩塌4处、滑坡53处、沟谷型泥石流7处、坡面型泥石流7处(图3)。其中崩滑地质灾害总面积约 3.23km^2 ,占研究区总面积的8.4%,灾害发育密度达 $1.85\text{处}/\text{km}^2$ 。崩塌、滑坡、泥石流发育的物源区总面积 1.67km^2 ,其相应物源区面积占比分别为7.2%、57.5%、35.3%。

滑坡是研究区较为广泛的一种灾害类型,占研究区灾害点总数的74.6%。密集分布于西汉水及韩家河两侧及各支沟沟道两岸斜坡处,多在第四系松散堆积体,泥盆系碳质板岩、千枚岩及灰岩软硬相间易滑工程地

质岩组中发育。结合无人机影像、现场勘察及文献资料，推测研究区大规模的滑坡一般是在地震或构造活动运动下形成的老滑坡或古滑坡，共发育13处。另外一些中小型滑坡大多是在降雨、人类工程活动或河流掏蚀影响下形成的，多发育于较老滑坡堆积体上，具有多期次滑动的特点。其成灾模式为 I 型即老滑坡后壁卸荷作用小型崩滑坍塌冲覆破坏、II 型即滑坡中前缘开挖及侵蚀作用推覆破坏、III 型即滑坡侧缘切沟侵蚀次生滑坡滑动破坏等3类。进一步分析研究3类滑坡的基本形成条件、发育特征、发展演化过程与特征及早期识别标志，构建了不同成灾模式滑坡地质早期识别标志图谱（表3）。

泥石流占研究区灾害总数的19.7%。沟谷泥石流表现为整体较狭长，物源区、流通区和堆积区较为完整，物源区多发育中小型崩滑等物源，局部堵塞沟道迹象明显，流通区流水侵蚀冲刷痕迹清晰，堆积区扇形地明显，以沟道揭底-冲淤型破坏成灾模式为主。坡面泥石流多发育于斜坡三角面地带，沟道深切，物源多发育于流域中下游且为小型崩滑，沟床坡降大，堆积区扇形地不明显，其成灾模式为坡面径流侵蚀溜滑型-漫流型破坏。

崩塌数量较少，占灾害总数的5.7%。多发生于河流沟道及公路两侧较为陡峻的斜坡地带，斜坡结构主要为基岩和黄土-软岩斜坡。一般临空面较好，结构面发育，纹理不清晰。

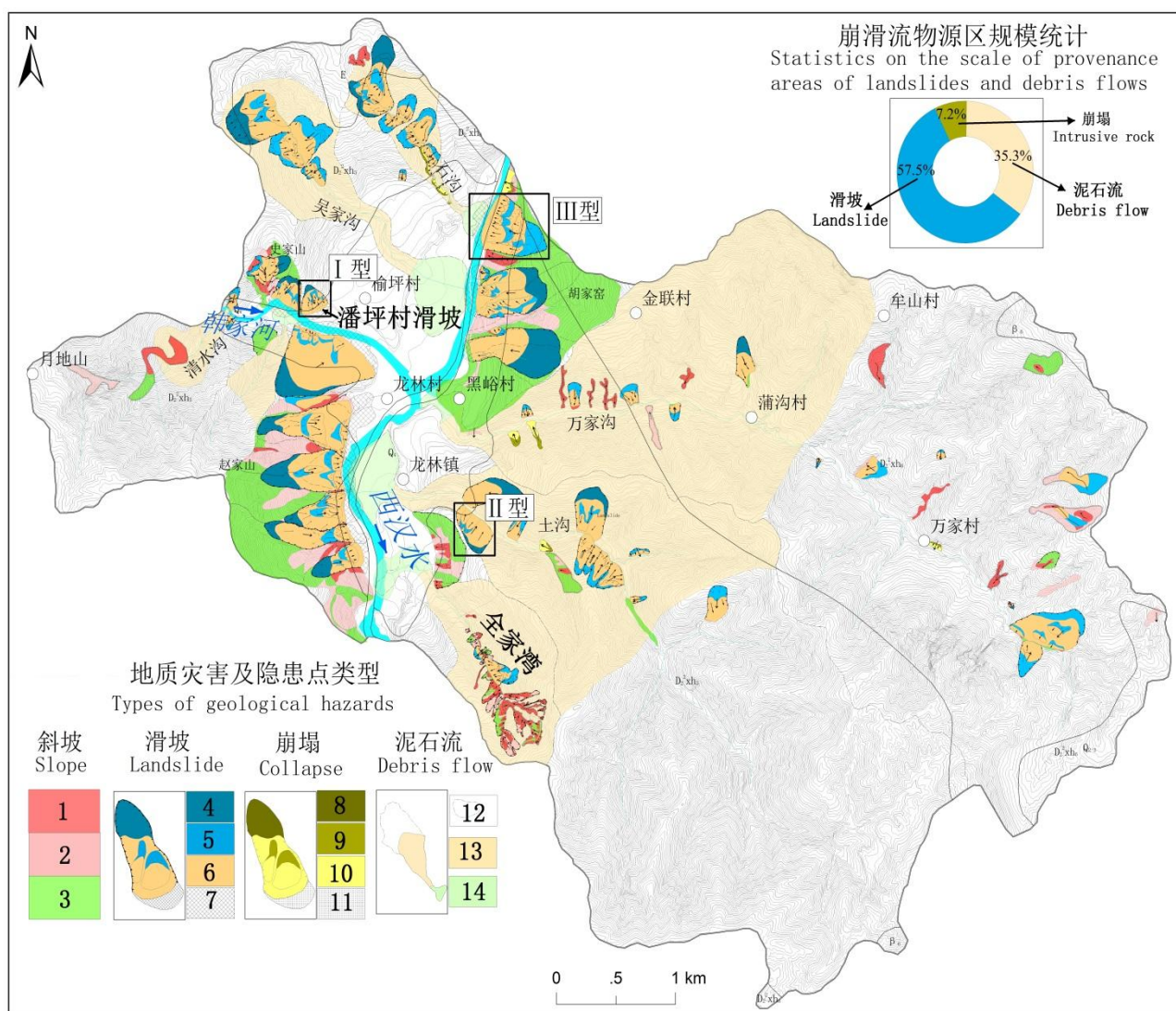


图3 龙林镇地质灾害及隐患分布图

1—稳定较差；2—稳定较差；3—稳定好；4—滑坡潜在物源区；5—滑坡物源区；6—滑坡堆积区；7—滑坡威胁区；8—崩塌潜在物源区；9—崩塌物源区；10—崩塌堆积区；11—崩塌威胁区；12—泥石流形成区；13—泥石流物源区；14—泥石流堆积区

Fig.3 Distribution map of geological hazards of the urban area in Longlintown

1—poor stability; 2—low stability; 3—high stability; 4—potential provenance area of landslide; 5—provenance area of landslide; 6—accumulation area of landslide; 7—threat area of landslide; 8—potential provenance area of collapse; 9—provenance area of collapse; 10—accumulation area of collapse; 11—Threat area of collapse; 12—formation area of debris flow; 13—provenance area of debris flow; 14—accumulation area of debris flow

表 3 滑坡及隐患点成灾模式识别标志统计

Tab.3 Statistics table for identification mark of modes of landslide formation

类型	初始状态（地质条件识别）	时效变形阶段（早期识别）	累进变形破坏阶段（临灾判别）	破坏后状态（成灾判别）
I 型				
II 型				
III 型				

5 城镇地质灾害风险评价

5.1 城镇地质灾害危险性评价

地质灾害危险性评价是在分析地质灾害孕灾地质条件和诱发因素的基础上,对地质灾害发生的时间概率、运动堆积特征进行分析,其核心内容是确定地质灾害体不同条件下的失稳概率和覆盖范围(吴树仁等,2009)。研究区地质灾害类型以滑坡、泥石流灾害及其隐患点为主,地质灾害呈现降雨控制型特点,故主要针对城镇周边斜坡和重大地质灾害体进行不同降雨条件危险性综合评价,最后将危险性等级划分为极高、高、中、低四个级别。

5.1.1 城镇斜坡危险性分析

城镇斜坡结构多为松散堆积层斜坡和上覆黄土或残坡积碎石层,下伏强风化软弱基岩层状斜坡结构特征,同时研究区范围较小,所需岩土体物理力学指标易于获取,这些可满足无限边坡模型的假设和模型计算需求。

首先,对研究区斜坡调查及勘察资料显示,滑坡破坏方式大部分为多期次浅层滑动,同时对斜坡(斜坡单元内分稳定差、稳定性较差、稳定性好三部分)上覆碎石土层的厚度进行调查统计。本次调查斜坡厚度点共计463处,最大覆盖层厚度为26.1m,最小上覆碎石土层厚度为0.1m。在此基础上采用Arcgis空间分析功能做斜坡厚度插值分析,获取斜坡潜在滑动厚度分布。

其次,根据斜坡精细化调查的地层结构类型、物质成份及破碎程度等系列空间图层,将研究区分为松散堆积层斜坡、黄土-软岩斜坡、黄土斜坡、软岩斜坡、软岩-硬岩斜坡及硬岩斜坡等6类斜坡结构类型。根据野外勘测与调查,分析各类斜坡岩土体样品,确定斜坡岩土体有效内聚力、有效内摩擦角、岩土体天然重度及饱和土体导水率等基本物理力学参数。将研究区斜坡按5m×5m的网格进行栅格化处理,然后根据表(1)中式(3)获取研究区每一栅格的临界降雨量(王萌等,2015)。据野外调查及收集的历史数据,陇南山地地质灾害爆发通常在24h降雨量达到20~50mm之间,当持续累积降雨大于100mm时,往往诱发规模不等群发性地质灾害。而研究区20年、50年、100年等条件下日最大降雨量分别为16~30mm、41~49mm、116.3mm。因此,结合国家气象局颁布的降水强度划分标准,考虑不同降雨条件即20年、50年、100年条件下,设定的3个24h降雨量分别为:25mm、50mm、100mm。与临界降雨量分布图在Arcgis平台下进行叠加分析,可得到不同降

雨条件下斜坡稳定性空间分布图。若实际降雨量大于临界降雨量时，斜坡失稳破坏，反之斜坡稳定（图4）。

然而，斜坡稳定性计算只代表内部存在一种可能状态，只是对不同阶段的稳定状态定量评价，而不能代表斜坡未来发展趋势。斜坡变形破坏特征即斜坡发育率是根据地表变形规律，对斜坡未来发展趋势作出的判断（乔建平等，2013）。故单个斜坡破坏分析应将稳定性计算结果与发育率判断相结合，综合评判斜坡未来发展趋势的可能性，即斜坡破坏概率。斜坡破坏概率计算方法既包括了斜坡稳定性计算结果，又考虑了斜坡地表宏观变形发育状态，将微观分析与宏观判断相结合，能真实反映滑坡破坏情况。其特点是以斜坡地表变形的真实性为基础，有针对性的判定斜坡破坏发展趋势。最后根据斜坡破坏概率评价参考表4，将不同降雨条件下斜坡稳定性分为4级，与滑坡发育率分级结果图叠加，得到不同降雨条件下斜坡危险性分区图（图5）。

表 4 斜坡破坏概率评价参考

Tab.4 Reference table of failure probability assessment of slope

分级	滑坡稳定性计算与地表宏观变形参考			滑坡发育率评价参考		
	地表宏观变形特征	稳定状态	稳定性系数参考值	发育状态	滑坡发育特点	发育率参考值
极高	地表能够明显观测到滑坡整体滑动迹象，滑体即可脱离滑床	滑坡启动	<0.9	发育完全成熟	滑坡已经启动，整体滑动可能性极大	0.9~1
高	地表局部出现破坏，滑坡即可启动，出现整体滑动前兆	不稳定	0.9~1.00	发育基本成熟	滑坡即可启动，整体滑动可能性很大	0.7~0.9
中	地表变形迹象开始加剧，滑坡向启动阶段迅速发展；或地表出现局部明显变形，但变形的速度较慢	临界状态或欠稳定	1.00~1.10	发育还未成熟或开始发育	滑坡加速变形，有整体滑动的可能性；或斜坡局部变形，有形成滑坡的可能性	0.3~0.7
低	地表仅有局部微小变形迹象，暂时没有发展趋势；或地表暂无观测到变形迹象	基本稳定或稳定	1.10~1.20	尚未发育或没有发育	斜坡变形范围很小，形成滑坡的可能性很小；或不存在滑坡	<0.3



图 4 不同降水条件下斜坡稳定性评价图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

Fig.4 Slope stability evaluation map under different precipitation conditions (Left-hand graph P=5%; Middle graph P=2%; right-graph P=1%)



图 5 不同降水条件下斜坡危险性评价图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

Fig.5 Slope risk assessment map under different precipitation conditions

(Left-hand graph P=5%; Middle graph P=2%; right-graph P=1%)

5.1.2典型地质灾害危险性分析

(1) 泥石流危险性评价。全家湾泥石流位于龙林镇全杜村南侧，西汉水左岸，流域面积 1.26km^2 ，沟域相对高差 693m ，主沟道长 2.53km ，沟床平均纵比降为 273.9% ，陡峻的地形条件为泥石流输移提供了势能保障。流域松散固体物源总量达 $242.38 \times 10^4\text{m}^3$ ，大量松散物质堆积于沟道，为泥石流发生提供了丰富的物源条件，同时也增强了泥石流沟床冲刷能力，在流通区上游伴有沟道堵塞体和卡口的存在，增加了沟道堵塞体瞬时溃决发生的可能性。现场调查表明，该泥石流动力过程为：软硬相间岩性组合的中浅层滑坡启动→堵塞体瞬时溃决流量放大→沿程沟道侵蚀→更加强烈弯道冲淤→停淤堆积或堵塞河道，属典型的溃决-沟道侵蚀混合型泥石流。泥石流运动过程中经历松散堆积物源或粗大颗粒物源的堵溃后流量瞬间放大近3倍，形成超大规模的泥石流。

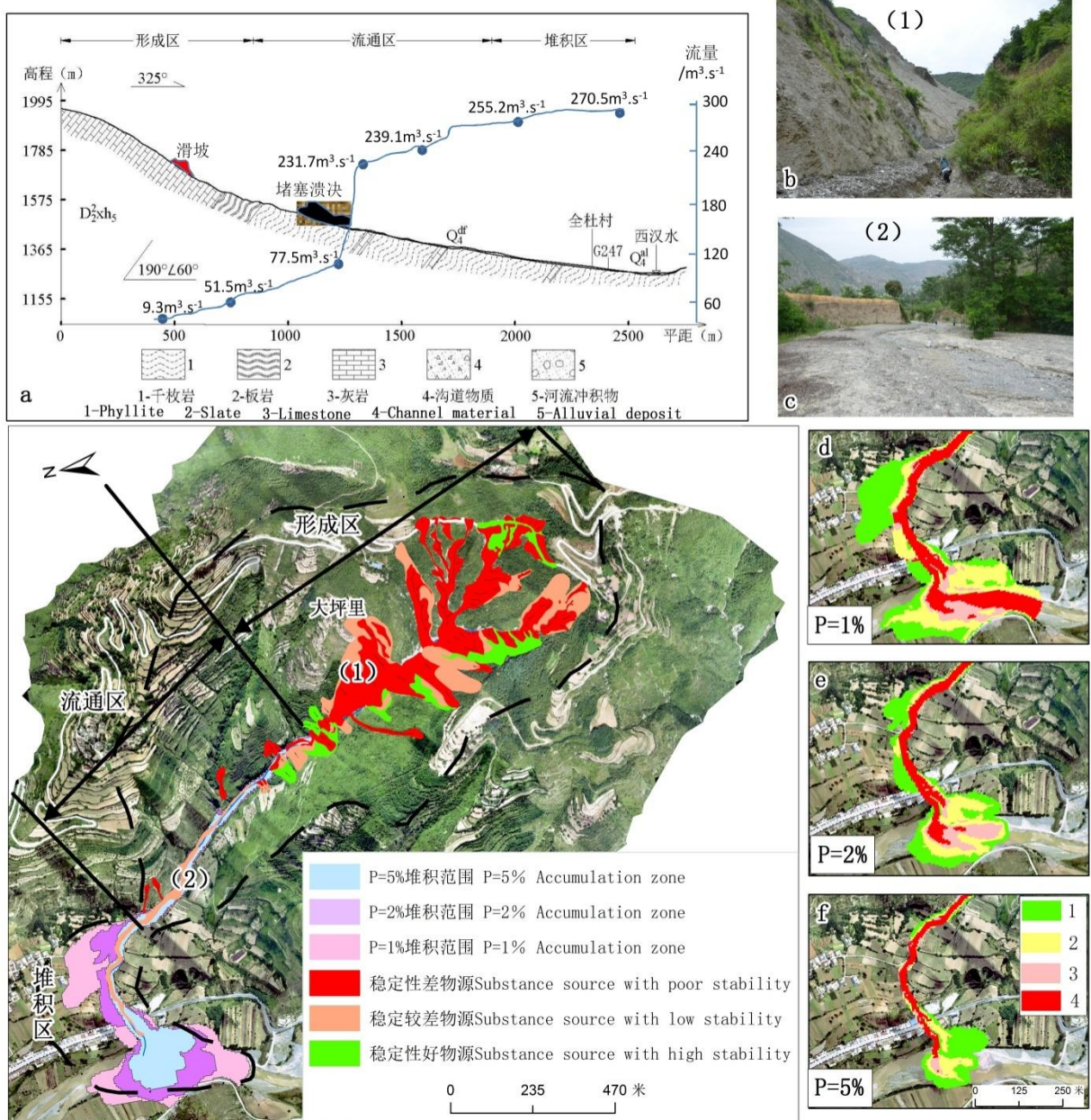


图 6 不同降水条件下全家湾泥石流危险性模拟结果图 (a、主沟道纵剖面；b、形成区下游主沟道堵塞情况；c、流通区下游主沟道情况；d、100 一遇降雨条件下泥石流危险性分区；e、50 一遇降雨条件下泥石流危险性分区；f、20 一遇降雨条件下泥石流危险性分区)

1—低危险区；2—中危险区；3—高危险区；4—极高危险区

Fig.6 Debris flow simulation results of Quanjiawan in different rainfall conditions (a. Longitudinal profile of main channel; b. Blockage condition of the main channel indownstream of the debris flow formation area c. The situation of main channel in downstream flowing

area of debris flow; d. Zoning of debris flow risk in the condition of once in 100 years rainfall; e. Zoning of debris flow risk in the condition of once in 50 years rainfall; f. Zoning of debris flow risk in the condition of once in 20 years rainfall)

1—Low susceptibility; 2—Moderate susceptibility; 3—High susceptibility; 4—Very high susceptibility

全家湾泥石流为降雨型泥石流沟，未进行工程防治措施，因此本文主要考虑降雨条件下基于 FLO-2D 模型对全家湾泥石流在 100 年一遇（1% 频率）、50 年一遇（2% 频率）和 20 年一遇（5% 频率）降水条件下泥石流运动特征进行模拟。定量获取其运动特征值，以每个栅格单元内泥石流泥位深度、流速等强度值的空间分布作为泥石流危险性表现形式（王高峰等，2020）。在实际调查中全家湾泥石流中上游沟道严重堵塞，中浅层滑坡堰塞体溃决后形成泥石流会产生一定的放大效应，故输入 FLO-2D 模型的泥石流流量为计算得出的泥石流流量乘以体积膨胀系数。最后将泥石流参数和泥石流流量和输入 FLO-2D 模型（表 5），在整个过程未有人为干预，计算结果较为可靠真实。模拟结果（图 6）表明，全家湾泥石流 100 年一遇（1% 频率）、50 年一遇（2% 频率）、20 年一遇（5% 频率）降水条件下模拟最大泥位深度分别为 6.97m、5.85m、4.86m；最大流速分别为 8.53m/s、7.52 m/s、4.35 m/s；精度系数分别为 86.74%、75.53%、81.38%。表 6 表明在 100 年一遇降水条件泥石流危险区堆积总面积为 $13.42 \times 10^4 \text{m}^2$ ，是 50 年一遇的 1.52 倍，是 20 年一遇的 2.57 倍，尤其高危险区面积为 20 年一遇的 3.24 倍。

表 5 全家湾泥石流基本特征及 FLO-2D 模拟参数

Tab.5 Basic characteristics and FLO-2D simulation parameters of Quanjiawan debris flow

项目	暴雨频率			模拟参数	数值
	P=5%	P=2%	P=1%		
流域面积/(km^2)		1.26		计算网格/(m)	5×5
物源总量/(10^4m^3)		242.38			0.15/居民区
泥石流容重/(t/m^3)	1.77	1.89	1.97		0.05/公路
泥石流洪峰流量/(m^3/s)	6.49	10.38	12.97	曼宁粗糙系数	0.22/耕地
泥沙修正系数	0.89	1.17	1.44		0.2/裸地
泥石流堵塞系数		3.5			0.8/林地
泥石流流量/(m^3/s)	42.94	78.8	110.82	层流阻力系数 K	2280
体积浓度	0.47	0.54	0.59	α_1	0.811
泥石流放大系数	1.89	2.17	2.44	α_2	0.00462
泥石流模拟流量/(m^3/s)	81.21	170.93	270.45	β_1	13.72
模拟时间(h)	0.3	0.8	1.5	β_2	11.24
模拟精度/(%)	81.38	75.53	86.74	泥沙比重/(t/m^3)	2.65

表 6 典型地质灾害点危险性分区统计表

Tab.6 Basic characteristics and FLO-2D simulation parameters of Quanjiawan debris flow

项目	降雨条件	危险性分区 ($\times 10^4 \text{m}^2$)			
		低危险区	中危险区	高危险区	极高危险区
全家湾泥石流	20 年一遇 (5%)	2.04	0.98	0.42	1.79
	50 年一遇 (2%)	2.95	1.96	1.10	2.80
	100 年一遇 (1%)	4.35	3.26	1.36	4.45
潘坪村滑坡	20 年一遇 (5%)	1.83	1.07	1.11	0.54
	50 年一遇 (2%)	1.42	1.17	1.24	1.36
	100 年一遇 (1%)	1.02	1.79	1.62	1.94

(2) 滑坡危险性评价。潘坪村滑坡位于龙林乡场镇西北约 2km 处，西汉右岸支沟韩家河左岸，地理坐标东经 E: $105^\circ 04' 04.58''$ ，北纬 N: $33^\circ 56' 40.52''$ 。该滑坡平面上总体呈舌形，后缘圈椅状地形明显，有 2 个次级滑体构成，长约 250m，宽约 180m，滑坡发生在海拔 1320~1481m 处，相对高差约 161m，平均厚度约

25m，体积约 $112.5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，主滑方向 154° ，整体坡度为 27° 。滑坡区出露岩性主要为泥盆系中统西汉水群（ $D_2^2xh_5$ ）板岩、千枚岩岩组，产状 $266^\circ \angle 43^\circ$ ，上覆第四系滑坡堆积体，以粉质粘土、碎石土为主。现场调查表明，该滑坡的成灾模式为老滑坡后壁卸荷作用小型崩滑坍塌冲覆破坏。

本次采用 River-Flow2D 模型，结合表 7 中的参数进行模拟计算，获取潘坪村滑坡在不同降水条件下滑速、滑距及滑体厚度等。在滑坡-碎屑流运动阶段，对于建筑物而言，其所在位置处的滑体运动过程中的最大厚度是影响其变形破坏状况的直接因素之一，故选取滑坡厚度作为滑坡危险性评价的重要指标(石莉莉等, 2017)。模拟结果(图 7)和(表 6)表明，潘坪村滑坡在 100 年一遇降水条件滑坡危险区堆积总面积为 $6.37 \times 10^4 \text{m}^2$ ，分别是 50 年一遇和 20 年一遇降水条件下的 1.22、1.4 倍，其中极高危险区堆积面积为 50 年一遇的 1.42 倍，20 年一遇的 3.6 倍。

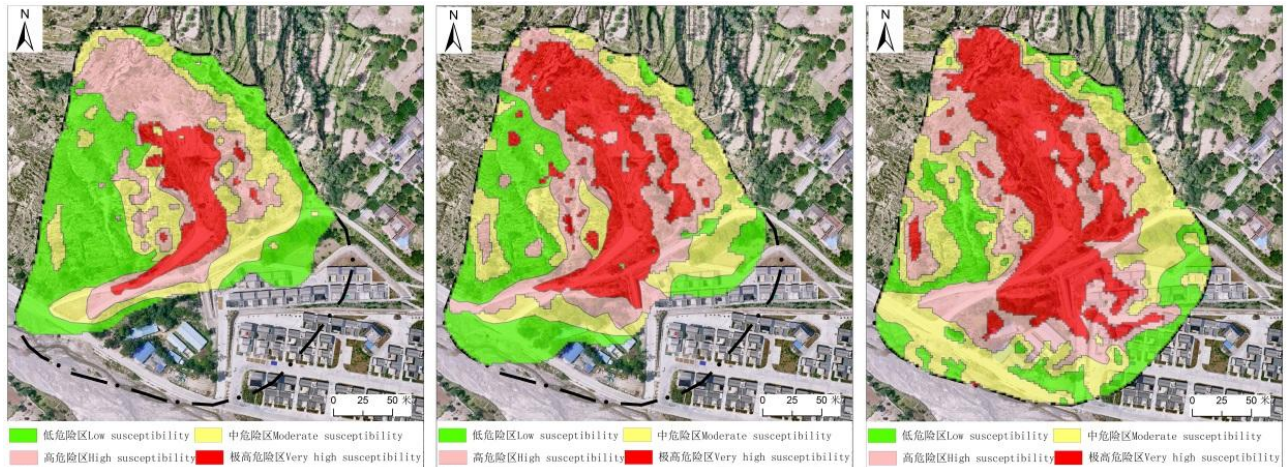


图 7 不同降水条件下潘坪村滑坡危险性模拟结果图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

Fig.7 Landslide hazard simulation results of Panping village in different rainfall conditions (Left-hand graph P=5%; Middle graph P=2%; right-graph P=1%)

表 7 不同降水条件下模型计算参数

Tab.7 Statistical table of typical geological hazard zones

项目	P=5%	P=2%	P=1%
内摩擦角 $\theta_b/ (^\circ)$	14.4	12.96	11.6
滑体密度 $\rho/ (\text{kg/m}^3)$	20.2	23.23	25.05
体积浓度 C_V	0.618	0.802	0.912
滑体屈服应力 $\tau_y/ (\text{MPa})$	0.886	1.422	1.886
滑体黏性应力 $\tau_\mu/ (\text{MPa})$	0.141	0.212	0.270

根据上述城镇地质灾害危险性评价流程，针对河谷两岸一级斜坡带内的滑坡、泥石流等地质灾害及其隐患逐一分析不同降水条件下地质灾害运动及堆积特征，预测其威胁范围。最后按照斜坡失稳、滑坡破坏、泥石流发生三层次叠加，合理划定研究区内由栅格单元组成的危险性区块或条带状斜坡单元，形成城镇地质灾害危险性分区图(图 8)。

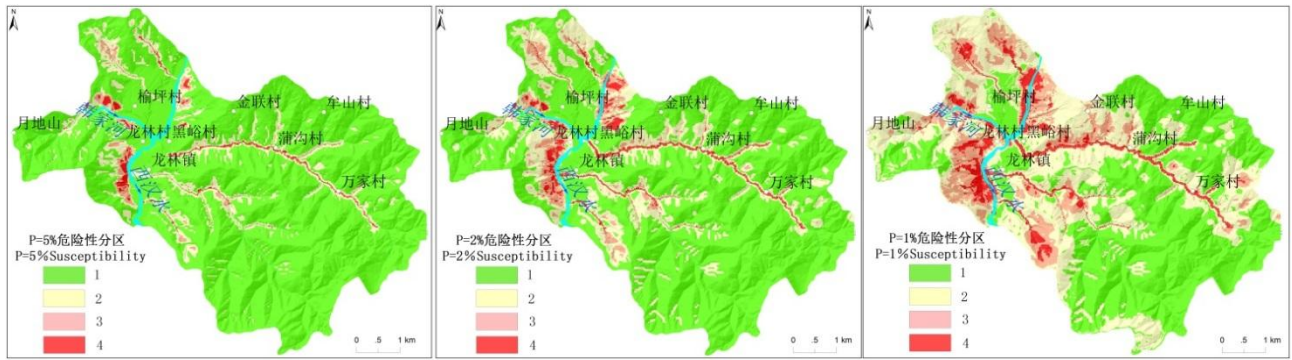


图 8 不同降水条件下龙林镇地质灾害危险性分区图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

1—低危险区；2—中危险区；3—高危险区；4—极高危险区

Fig.8 Zoning map of geological hazards in Jizhen district of Longlin Town under different precipitation conditions (Left-hand graph P=5%; Middle figure P=2%; Figure P=1%)

1—Low susceptibility; 2—Moderate susceptibility; 3—High susceptibility; 4—Very high susceptibility

模拟结果表明，龙林镇地质灾害 100 年一遇（1% 频率）降水条件下极高危险区、高危险区、中危险区及低危险区面积分别为 2.36km²、4.64 km²、13.97 km²、17.43 km²；50 年一遇（2% 频率）降水条件下极高危险区、高危险区、中危险区及低危险区面积分别为 1.19km²、1.78km²、7.28 km²、28.14km²；20 年一遇（5% 频率）降水条件下极高危险区、高危险区、中危险区及低危险区面积分别为 0.53 km²、0.75 km²、4.13 km²、32.99 km²。

5.2 城镇地质灾害易损性评价

地质灾害易损性是对承灾体抗灾能力的综合分析，通常用承灾体的价值（或数）及其脆弱性指数来表示。其中综合价值可以通过承灾体的平均单价和受灾的实际数量计算获得，脆弱性可用介于 0 和 1 之间的数表示。然而，承灾体脆弱性是描述承灾体受到灾害侵袭时损毁的难易程度，定量描述比较复杂，主要受承灾体自身的结构强度与地质灾害破坏形式的影响。如承灾体相对滑坡、泥石流灾害位置不同，受损的方式不同，在其主流线上的建筑物和构筑物主要受到冲击危害，而位于滑坡、泥石流边缘或扇形地前缘者，则主要受到淤埋危害。对于被淤埋的承灾体，多数难以再利用，即使结构完好，由于地形改变也很难再发挥原来设计的功效。以房屋或构筑物为例说明承灾体的脆弱性计算方法，对于受淤埋危害的承灾体，脆弱性指数为滑坡、泥石流等灾害淤埋厚度与承灾体自身有效高度的比值；而对于受到冲击力的承灾体，其脆弱性指数为通过承灾体最大动能与承灾体结构强度的比值（崔鹏等，2016）。

因山区城镇承灾体结构和功能的多元性特点，基于高分二号卫星和无人机航空摄影的高分辨率影像，采用高光谱曲线特征和图像识别技术自动提取载体类型，再根据现场调查、访问、城镇规划建设资料等，优化确定承灾体信息，构建城镇承灾体空间属性实时状态数据库，最终归纳为 4 项 22 类。其中人口包括人口密度、人口年龄等 2 类；建筑物包括房屋建筑区、政府行政区、学校、医院、厂房、商用房屋、超市、旅游景点、寺庙等 9 类；道路包括国道、乡级公路、一般公路及桥梁等 4 类；生态环境包括林地、草地、耕地、园地、绿化用地、裸地及水域等 7 类。结合滑坡、泥石流等地质灾害形成机理和运动过程模拟计算结果，考虑灾害作用强度的空间差异性，对承灾体易损性进行计算，最后按照“就高原则”叠加，形成不同降水条件下龙林镇地质灾害承灾体易损性评价分区图（图 9）。

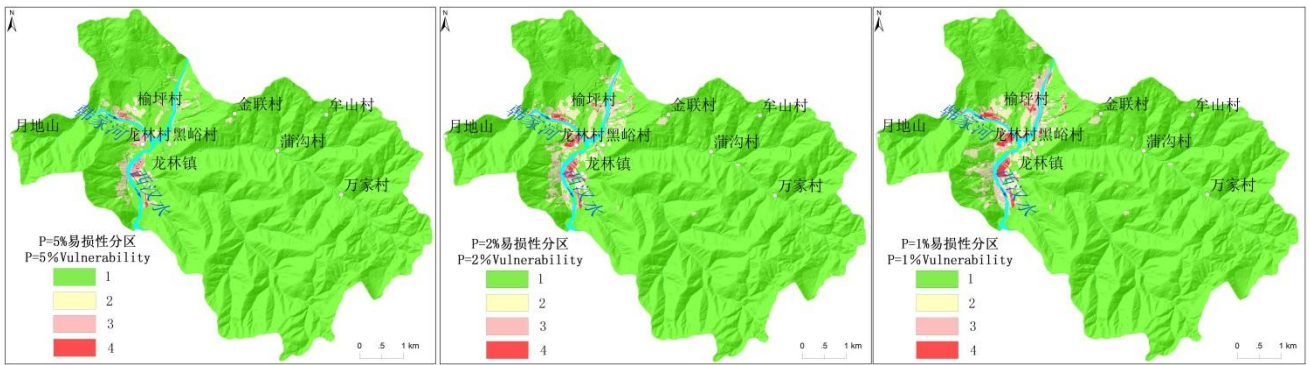


图9 不同降水条件下龙林镇承灾体易损性分区图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

1—低易损区；2—中易损区；3—高易损区；4—极高易损区

Fig.9 Vulnerability zoning map of disaster bearing body in longlin Town under different precipitation conditions
(Left-hand graph P=5%; Middle figure P=2%; Figure P=1%)

1—Low vulnerability; 2—Moderate vulnerability; 3—High vulnerability; 4—Very high vulnerability

5.3 城镇地质灾害风险性评价

在龙林镇地质灾害危险性和易损性分析结果的基础上，根据灾害风险的定义计算每个评价单元在不同降水条件下的风险值。

$$R = H \times V \times P_i \quad (12)$$

式中： R 为评价单元的风险性指标值； H 为评价单元的危险性指数值； V 为评价单元的易损性指标值； P_i 为不同降水条件下的风险发生概率。在计算以前，式（12）中各类指数均需经过归一化处理，其归一化处理方法为：

$$H' = (H - H_{min}) / (H_{max} - H_{min})$$

$$V' = (V - V_{min}) / (V_{max} - V_{min})$$

式中： H' 为危险度的归一化值； H 为危险度指标值； H_{max} 、 H_{min} 分别为最大危险度值和最小危险度值； V' 为易损度的归一化值； V 为易损度指标值； V_{max} 、 V_{min} 分别为最大易损度值和最小易损度值。

其中 P_i 计算方法采用以往陇南山地地质灾害统计样本为例，在完成区域地质灾害风险性区划的基础上，采用 Logistic 回归统计模型确定龙林镇地质灾害风险时空概率 P_i （100a 一遇降雨条件下取值为 0.72、50a 一遇降雨条件下取值为 0.23、20a 一遇降雨条件下取值为 0.08）。

在风险分级时，根据地质灾害风险特征，选取自然断点法和特征点对评价结果进行等级划分，结合风险管控的目标，一般将风险度划分为极高风险（0.697~1）、高风险（0.538~0.697）、中风险（0.356~0.538）和低风险（0~0.356）四个等级。依据风险等级划分标准，并用不同图斑表示各风险等级的区块，合并相同风险级别的栅格单位，绘制不同降水条件下龙林镇地质灾害风险分区图（图 10）。结果表明：地质灾害 100 年一遇（1%频率）降水条件下极高风险区、高风险区面积分别为 1.91km²、4.54 km²；50 年一遇（2%频率）降水条件下极高风险区、高风险区面积分别为 0.64km²、1.41 km²；20 年一遇（5%频率）降水条件下极高风险区、高风险区面积分别为 0.15km²、0.64 km²、3.32 km²、34.29 km²。在不同的降雨频率下，75.23%的区域始终保持低风险，主要为人迹罕至的荒地或森林，地质灾害分布极少、规模很小，其危险度与易损度均较低，受灾害导致损毁的风险很低。24.38%的区域风险等级随降水频率的降低而增大，以榆坪村为例，从 20 年一遇降雨到 100 年一遇降雨，由中低风险逐渐升至高-极高风险，需开展定期巡查，部署专业监测预警设施，以保障人民生产、生活安全。0.39%的区域由于地质灾害分布广泛，规模大，破坏力强，人口财产集中分布，危险性与易损度均较高，始终保持极高风险，如龙林村、全杜村全家湾沟口两侧居民区等，应立即实施综合减灾工程，加强风险管控。

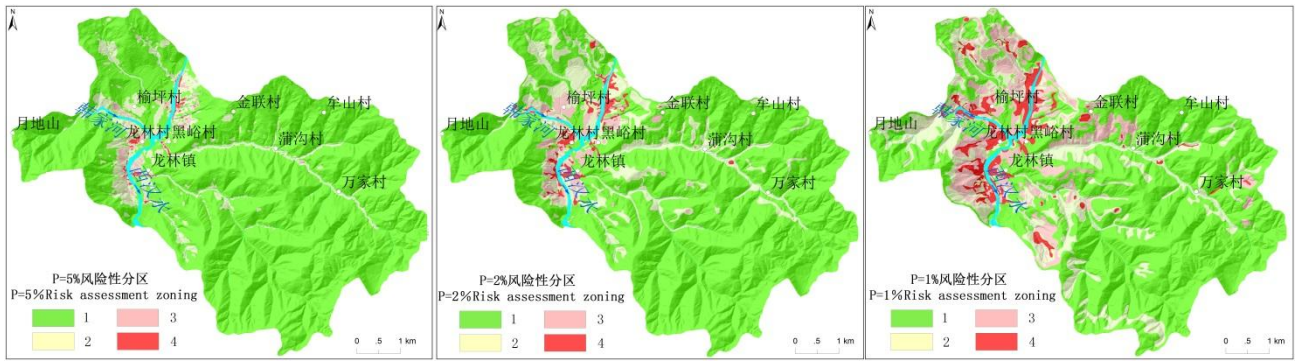


图 10 不同降水条件下龙林镇地质灾害风险分区图（左图 P=5%；中图 P=2%；右图 P=1%）

1—低风险区；2—中风险区；3—高风险区；4—极高风险区

Fig.10 Regional map of geological hazard risk in Ji Town of Longlin Town under different precipitation conditions (Left-hand graph P=5%; Middle figure P=2%; Figure P=1%)

1—Lowrisk; 2—Moderate risk; 3—High risk; 4—Very high risk

6 地质灾害风险管控探讨

地质灾害风险双控是指对地质灾害隐患点(点)和地质灾害风险区(面)进行风险管控(铁永波等, 2022), 通过将地质灾害风险“点控”和“面控”有机结合, 从而最大限度地减少地质灾害风险和可能损失。1984年7月24日, 龙林镇暴雨引发万家沟、全家湾沟发生泥石流灾害, 同时区内发生多处滑坡崩塌灾害, 造成1人死亡, 直接经济损失达7000万元; 2012年8月13日, 礼县特大暴雨, 吴家沟发生小型泥石流灾害, 造成经济损失约5万元; 2020年陇南暴雨诱发龙林镇多处滑坡、坡面泥石流灾害, 其中全家湾泥石流、胡家窑坡面泥石流及赵家山小型群发性滑坡最为严重, 堵断G247国道, 造成经济损失约3500万元, 由于预警及时, 未造成人员伤亡。针对龙林镇地质灾害成灾模式和风险区划结果, 初步提出了减缓该区地质灾害风险双控总体思路 and 具体措施, 为防灾减灾、国土空间规划用途管制提供技术支撑。

(1) 开展精细化调查, 提高高风险区和风险源早期识别水平, 合理规划国土空间, 从源头控制地质灾害风险。为了更好地研究城镇地质灾害分布特征及对其进行风险性评价, 加强地质灾害风险源头管控, 需对龙林镇全家湾沟泥石流、潘坪村滑坡等19处中大型地质灾害开展精细化调查评价。通过构建“三查”体系, 形成地质灾害隐患识别图谱, 实现对龙林镇71处地质灾害及隐患点孕灾环境、诱发因子、承灾体等以及典型隐患点的形态、形变、形势特征的表达, 以提升地质灾害隐患识别与监测预警能力。地质灾害管控要从源头上抓起, 需融合自然资源部门国土空间规划、土地利用、生态修复和地质灾害防治等技术力量, 将地质灾害综合风险管控纳入国土空间风险管控规划。要充分利用地质灾害调查评价风险评估资料, 将地质灾害危险区纳入风险管控范围, 划定禁建区和缓冲区, 城镇规划建设要视情况可将其规划为绿化、景观用地等。同时加强对低风险区内地质灾害堆积体生态修复与土地开发利用, 发挥其资源优势。

(2) 综合分析危险区段工程地质条件、工程技术难度和工程造价等因素, 分层次、有针对性地对重点地区采用综合防控技术, 降低地质灾害危险性。根据地质灾害发育规律、运动特征及成灾模式, 在准确判断隐患点和威胁范围的基础上, 通过综合分析研究、区分轻重缓急, 分步实施工程治理和避险搬迁等工作。对引发极高风险的全家湾泥石流、土沟泥石流、潘坪村滑坡等6处地质灾害可以进行相关专项治理; 对于中高风险及存在小概率堵江地质灾害点采取监测预警、局部搬迁避让、立警示牌等措施, 如万家沟泥石流、胡家窑1号滑坡、龙林村南滑坡等9处地质灾害点及风险区; 而在中低风险区斜坡地带的地质灾害可进行生态自然恢复和人工干预恢复等。最后综合考虑投资-收益与实施条件, 从可以采取的减灾途径与技术中选择适宜的综合措施, 有效控制灾害风险。以研究区50年一遇降雨条件为例, 经过综合风险管控措施后, 高-极高风险区面积降低39.41%, 其中极高风险区面积降低率可达87.81%, 综合风险管控投资效益比为80.78%, 综合风险管控风险降低比为9.78%, 属风险区降低效果良好, 综合风险管控风险折减率达92.11%, 折减风险效果明显(乔建平等, 2013)(图11、表8)。

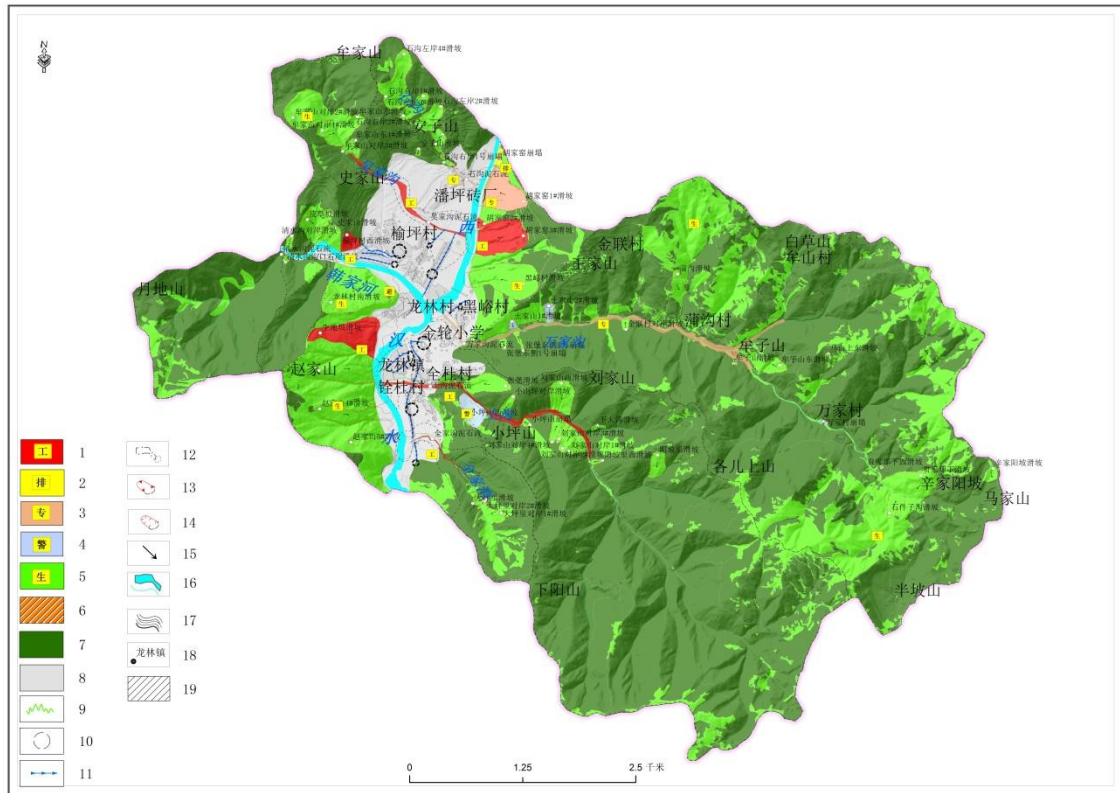


图 11 龙林镇地质灾害风险综合管控建议图（50a 一遇降水条件）

1—工程治理区；2—排危险区；3—监测预警区；4—立警示牌区；5—生态工程区；6—避险搬迁区；7—自然修复区；8—科普宣传区；9—经济林防护带；10—临灾避险区；11—临灾避险路线；12—泥石流边界及影响范围；13—滑坡边界及影响范围；14—崩塌边界及影响范围；15—滑动方向；16—水系；17—公路；18—地名；19—居民区

Fig.11 Map for recommended on comprehensive control of geohazard risk in Longlin town (50A Condition of One Precipitation)

1—Engineering governance area; 2—Risk elimination area; 3—Monitoring and warning area; 4—Warning sign area; 5—Ecological engineering area; 6—Risk avoidance relocation area; 7—Natural restoration area; 8—Science popularization promotion area; 9—Economic forest protection belt; 10—Disaster avoidance area; 11—Disaster and risk avoidance route; 12—Debris flow boundary and impact scope; 13—Landslide boundary and impact range; 14—Collapse boundary and impact range; 15—Sliding direction; 16—river system; 17—trafficway; 18—toponymy; 19—residential area

表 8 不同降水条件下地质灾害风险具体综合防控工程措施建议一览表

Tab.8 List of suggestions for specific comprehensive prevention and control engineering measures of geological disaster risk under different precipitation conditions

防控措施	防控原则	20 年一遇降雨条件下	50 年一遇降雨条件下	100 年一遇降雨条件下
工程治理	危险性值为极高或高，其影响范围内风险值为极高或高，且严重威胁人民生命财产安全，或影响重大工程建设的地质灾害。	涉及区域面积 0.123km ² ，主要包括胡家窑 2 号滑坡、全家湾泥石流等 2 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.408km ² ，主要包括胡家窑 2 号滑坡、胡家窑 3 号滑坡、榆坪村西滑坡、吴家沟泥石流、土沟泥石流、全家湾泥石流及生地坡滑坡等 7 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.785km ² ，主要包括 2 号及 3 号滑坡、清水沟对岸滑坡、榆坪村西滑坡、生地坡滑坡、吴家沟泥石流、土沟泥石流、全家湾泥石流及万家沟泥石流等 9 处地质灾害及隐患点。
监测预警	主要为工程治理困难，无法搬迁避让，且崩滑地质灾害危险性极高或高，其影响范围内风险值为极高或高，而泥石流灾害危险性值为中高，其影响范围内风险值为高，对人民生命财产安全威胁程度轻微，但对重大工程建设或主河道有一定影响的地质灾害。	涉及区域面积 0.182km ² ，主要包括胡家窑 1 3 号滑坡等 1 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.152km ² ，主要包括胡家窑 1 号滑坡、万家沟泥石流及石沟泥石流等 3 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.867km ² ，主要包括赵家山 2 号、3 号、4 号、5 号滑坡群、胡家窑 1 号滑坡、史家山滑坡、黑峪村滑坡、石沟泥石流等 8 处地质灾害及隐患点。
排危除险	危险性值高，其影响范围内风险值为中等，且对行人有潜在危险的，并影响主要交通要道或河道的崩滑地质灾害隐患点。	无	涉及区域面积 0.012km ² ，共 1 处地质灾害及隐患点。主要为胡家窑崩塌。	涉及区域面积 0.085km ² ，共 3 处地质灾害及隐患点。主要为胡家窑崩塌、小坪山西滑坡及清水沟沟口右岸滑坡。
立警示牌	危险性值为中高，其影响范围内风险值为中低，且对行人有潜在危险的，并影响乡村交通要道的地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.032km ² ，主要包括榆坪村西滑坡等 1 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.097km ² ，主要包括万家村滑坡、土家山 1 号滑坡、土家山 2 号滑坡及小坪山西滑坡等 4 处地质灾害及隐患点。	涉及区域面积 0.367km ² ，主要包括龙林村南滑坡、皮草坡崩塌、牟子山滑坡、万家村滑坡、土家山 1 号滑坡、土家山 2 号滑坡等 6 处地质灾害及隐患点。
建议避险搬迁	即未进行工程治理或工程治理无法实现，其影响范围内风险值为极高的区段（带）。	无	涉及集镇区人口聚居区的龙林村西侧等少数居民，区域面积 0.001km ² 。	涉及集镇区人口聚居区的龙林村西侧大部分居民区和铨杜村南侧等少数居民，区域面积 0.041km ² 。
生态工程	主要位于中低风险区内，其土地利用类型为草地、荒草地及裸地的区域，或位于高危险以下区域，其影响范围内风险值为高及以下，或位于极高危险以下区域，其影响范围内风险值为中等及以下，且无威胁人民生命财产安全，或对重大工程建设影响轻微的地质灾害区内。	涉及区域面积 5.358km ² ，共 67 处地质灾害及隐患点。主要分布在胡家窑斜坡南北两侧、史家山斜坡、赵家山斜坡一带及泥石流流域下游地质灾害发育和植被覆盖度较低的区域。	涉及区域面积 9.764km ² ，共 55 处地质灾害及隐患点。主要分布在胡家窑斜坡、史家山斜坡西部大部分区域、赵家山斜坡中上部一带及泥石流流域中下游地质灾害发育和植被覆盖度较低的区域。	涉及区域面积 16.723km ² ，共 43 处地质灾害及隐患点。主要分布在龙林村南滑坡、皮草坡滑坡及史家山 2 号滑坡一带及泥石流流域地质灾害发育和植被覆盖度较低的区域。
自然修复区		除上述综合防控措施建议区外，主要位于中低风险区内，土地利用类型主要为农田、成林等区域内。		
风险区		沿西汉水和韩家河两岸面积约 3.55km ² ，采取科普宣贯、应急预案、应急避险等措施，建立多层次多部门的县、镇、社区（居民点）协调联动机制，提升建筑结构及工程灾害综合设防等级，加强人类工程活动管控和关键时段管控等，		

(3)加强群专结合监测预警,持续开展科普宣传与技术培训,提高群众的认知水平,规范生产生活活动,降低承灾体与灾害事件的遭遇概率,减小地质灾害损失值(陈晓清等,2013)。加强地质灾害监测预警研究,建立基于地质灾害形成机理和演化过程的多指标判识预警技术,结合搬迁避让和工程治理等,逐步将群测群防网络体系转变为“人防+技防”群专结合模式,构建适用不同经济水平地区的地质灾害“点控”模式。针对重点地区和重大地质灾害隐患应建立以专业监测预警为主的网络体系,为防灾减灾提供非常重要的支撑,也可作为承灾体和人员紧急撤离提供技术依据。对风险区内沿西汉水和韩家河两岸面积约 3.55km^2 ,主要是针对场镇人口聚居区社会公众通过政策、教育和社会管理等手段,提高受灾区域居民的减灾知识与防灾意识。首先,基于风险区划结果进行规划管控,尽量避免在危险区内新建工程和规划居民点,当确实无法避让危险区域时,应采用综合防控系统,提升工程灾害综合设防等级,加强人类工程活动管控和关键时段管控等,将未来可能发生的灾害损失降低最低,形成高效服务的减灾“面控”模式。再者,强化汛期和重点地区的宣传培训、专业指导、巡查排查、应急演练等工作告知当地居民何时预警何时撤离,并制定防灾预案、规划逃生路线、储备抗灾救灾物资等,提升群测群防监测和应急避险能力。此外,应不断的总结防灾减灾的经验和教训,逐步对防灾减灾的行为、习惯和准则进行修订,从而提高防灾减灾的水平。

7 结论

(1)本文构建了山区城镇地质灾害风险双控技术流程,包括地质灾害风险源识别、成灾模式研究、危险性分析、易损性评价、风险评价与风险管控建议等6个分析步骤。

(2)以陇南山地中高山峡谷区礼县龙林镇为例,通过综合遥感识别和地面精细调查,研究区共发育地质灾害71处,其中滑坡53处、泥石流14处、崩塌4处。通过斜坡结构、岩土体结构特征、性质和变形分析,该区滑坡的主要成灾模式为老滑坡后壁卸荷作用下小型崩滑坍塌冲覆破坏、滑坡中前缘开挖及侵蚀作用下的推覆破坏、滑坡侧缘切沟侵蚀下的次生滑坡滑动破坏等3类,泥石流主要成灾模式为沟道揭底-冲淤型破坏、坡面径流侵蚀溜滑型-漫流型破坏2类,并构建了直观形象的滑坡早期识别图谱。

(3)采用无限斜坡模型结合数值模拟方法,完成了不同降水条件下城镇地质灾害风险评价。结果表明,100年一遇降雨条件下高危险区及以上面积为 6.45km^2 ,分别是50年和20年一遇降雨条件下的3.14、8.16倍,100年一遇降雨条件下高风险区及以上面积为 7.0km^2 ,分别是50年和20年一遇降雨条件下的2.36、5.47倍。在不同降水频率下75.23%的区域始终保持低风险,24.38%的区域风险等级随降水频率的降低而增大,0.39%的区域始终保持极高风险,应立即实施综合减灾工程,加强风险管控。

(4)初步探讨了从源头管控、降低危险度、减轻易损度等城镇地质灾害“隐患点+风险区”双控模式。通过“点控”和“面控”有机结合,龙林镇地质灾害在50年一遇降水条件下,高-极高风险区面积降低39.41%,其中极高风险区面积降低率可达87.81%,管控投资效益比为80.78%,管控风险降低比为9.78%,属风险区防控效益良好,成果可有效服务于城镇防灾减灾与乡村振兴,是一种值得推广的模式。然而,城镇地质灾害风险双控近年来才得到重视,需要进一步深化和完善基于形成机理与灾害动力过程的风险分析,健全风险管控制度、责任体系和技术方法等,形成具有中国特色的地质灾害风险双控减灾体系,更好地服务于防灾减灾、国土空间规划管控和用途管制。

References

- AGS. 2007. Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management[R]. Australian: Australian Geomechanics Society Landslide Task force Landslide Zoning Working Group, 42(1):37-62.
- ASIER L, REINALDO G. 2019. Riverflow2D two-dimensional flood and river dynamics model[R]. Pembroke Pines, FL, USA.
- Chen Xiaoqing, Cui Peng, You Yong, Yang Zongjie, Kong Yingde. 2013. Secondary mountain disasters induced by the 4.20 Lushan earthquake and disaster mitigation [J]. Earth Science Frontiers, 20(3): 29-34 (in Chinese with English abstract).

- Cui Peng,Zou Qiang. 2016.Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. *Progress in Geography*,35(2): 137-147(inChinese with English abstract).
- Du Juan,Yin Kunlong,Wang Jiajia. 2015. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,34(3): 480-488(inChinese with English abstract).
- Fell R,Corominas J,Bonnard C.et al. 2008. Guidelines for landslide susceptibility,hazard and risk-zoning for land use planning[J]. *Engineering Geology*, 102(3-4): 85-98.
- Ge Daqing, Dai Keren, Guo Zhaocheng, Li Zhenhong. 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies:Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7):949-956 (inChinese with English abstract).
- Guo Fuyun,Meng Xingmin,Zhang Yongjun,Li Song,Xie Zhengtuan,Xiong Muqi,Guo Peng.2014. Geological disaster risk assessment methods for mountainous cities and towns in Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 50(5): 604–610(inChinese with English abstract).
- Huang Bolin,Yin Yueping,Li Bin,Feng Wanli,Qin Zhen,Zhang Peng.2021. Study of risk assessment and mitigation for landslide-induced impulse wave near towns in reservoir areas [J]. *Acta Geologica Sinica*,95(6): 1949-1961(inChinese with English abstract).
- Huang Bolin,Yin Yueping.2018. Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,37(3): 621-629(inChinese with English abstract).
- Huang Xun,Tang Chuan.2016. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation[J]. *Advances in Earth Science*,31(10): 1047-1055(inChinese with English abstract).
- Meng Xingmin, Chen Guan, Guo Peng, Xiong Muqi, Janusz Wasowski.2013. Research of landslides and debris flows in Bailong river basin:Progress and Prospect[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(4):1-15(inChinese with English abstract).
- Montgomery D R,Dietrich W E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. *Water Resources Research*,30:1153-1171.
- O' Brien J S,Julien P Y,Fullerton W T. 1994. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,119(2):244-261.
- Pradhan B. 2010.Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia[J]. *Advances in Space Research*,45(10):1244-1256.
- Qiao Jianping Yang Zongjie.2013. The K-P method based failure probability calculation on landslides [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,24(4):1-5(inChinese with English abstract).
- Qiao Jianping, Huang Dong,Wang Meng,Wu Caiyan.2017.The optimal value model for the benefit from mitigation measures reducing landslide and debris flow[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,28(3): 80-86(inChinese with English abstract).
- Shi Jusong,Zhang Yongshuang,Dong Chen,Wu Shuren.2005. GIS-based landslides hazard zonation of the New Badong County site[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(3): 275-282(inChinese with English abstract).
- Shi Lili, Huang Dong, Qiao Jianping,Zhang Jing,He Yuqiong,Li Hu. 2017. Risk assessment comparison between Tazhiping landslide before and after treatment[J]. *Journal of Catastrophology*,32(2):124-128 (inChinese with English abstract).
- Shu Heping,Sun Shuang,Ma Jinzhu,Liu Dongfei,Zhang Peng.2016. Risk assessment of single debris flow gully in south Gansu province,China [J]. *Mountain Research*,34(3): 337-345(inChinese with English abstract).
- Skempton A W,Delory F A.1984. Stability of natural slopes in London clay[M] *Selected Papers on Soil Mechanics*.London:Thomas Telford Publishing,70-73.
- Sun Pingping, Zhang Maosheng,Dong Ying,Zhu Lifeng,Bi Junbo. 2013. Measures of risk mitigation for landslides induced by irrigation[J]. *Geological Bulletin of China*,32(6):899-903(inChinese with English abstract).
- Tang Yaming, Zhang Maosheng, Li Lin,Xue Qiang. 2011. Discrimination to the landslide susceptibility,hazard and risk assessment[J]. *Hydrogeology&Engineering Geology*, 38(2): 125-129(inChinese with English abstract).
- Tie Yongbo, Xu Wei, Xiang Binglin, Lu Jiayan, Gong Lingfeng, Gao Yanchao, Tian Kai.2022. The thoughts on constructions of “double-control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(3):106-113(inChinese with English abstract).
- UN/ISDR(The United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2015. Sendai framework for action 2015-2030:building the resilience of nations and

- communities to disasters[R]. Sendai,Japan:Third UN World Conference on Disaster Risk Reduction.
- UNDP(United Nations Development Program). 2004. A global report reducing disaster risk:a challenge for development[R]. New York:UNDP,1-14.
- Wang Gaofeng, Tian Yuntao,Gao Youlong,Le Qilang,Yang Qiang,Li Ruidong,Ye Zhennan,Deng Bing,Guo Ning,Sun Xiujuan.2020. Relationship between characteristics of non-homogeneous debris flow and peak flow [J]. Journal of Engineering Geology,28 (5): 1028-1038(inChinese with English abstract).
- Wang Gaofeng,Ye Zhennan,Li Gang,Tian Yuntao,Deng Bing,Guo Ning,Chen Zongliang.2019. Geological hazard risk assessment of Zhouqu county in Bailong river basin [J]. Journal ofCatastrophology,34(3): 128-133(inChinese with English abstract).
- Wang Meng,Jiang Yuanjun,Huang Dong,Li Qianqian.2015. Hazard assessment on rainfall-triggered landslide and debris flow in the seismic disturbance area at Watershed level[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,45(6): 1781-1788(inChinese with English abstract).
- Wu Shuren,Shi Jusong,Zhang Chunshan,Wang Tao.2009. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[t]. Geological Bulletin of China,28(8): 995-1005(inChinese with English abstract).
- Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weili. 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies:Thoughts and Recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(7):957-966 (inChinese with English abstract).
- Xu Qiang, Zhang Yifan,Chen Wei. 2010. Vulnerability assessment of geohazards in south-west mountainous area Danba County,Sichuan,China as an example[J]. Geological Bulletin of China,29(5): 729-738(inChinese with English abstract).
- Zhang Chenghang, Wang Jiayun,Gao Bo,Feng Wei. 2015. Risk quantitative evaluation for Xujia village loess landslide,Xian,Shanxi Province[J]. Geological Bulletin of China,34(11):2138-2142(inChinese with English abstract).
- Zhang Chunshan,He Shujun,Xin Peng,Sun Weifeng,Tan Chengxuan,Wu Shuren,Wang Tao,Liu Xin.2009. Risk evaluation of geological hazard in Weibin District,Bao Ji City,Shanxi Province,China[J]. Geological Bulletin of China, 28(8): 1054-1063(inChinese with English abstract).
- Zhang Maosheng,Xue Qiang,Jia Jun,Xu Jiwei,Gao Bo,Wang Jiayun.2019. Methods and practices for the investigation and riskassess mengt of Geo-hazards in mountainous towns[J]. Northwestern Geology,52(2):125-135(inChinese with English abstract).
- Zhang Maosheng. 2021.Theory, method and practice of geological hazard risk management [M]. Beijing: Science Press(inChinese with English abstract).
- Zhou Chao,Chang Ming,Xu Lu,Che Hongxiao.2020. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,45(11): 1782-1791(inChinese with English abstract).
- Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 46(10):1717-1733 (inChinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈晓清,崔鹏,游勇,杨宗洁,孔应德.2013. 4.20 芦山地震次生山地灾害与减灾对策[J].地质前缘,20(3):29-34.
- 崔鹏, 邹强. 2016.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,35(2): 137-147.
- 杜鹃,殷坤龙,王佳.2015.基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J].岩石力学与工程学报,34(3):480-488.
- 葛大庆,戴可人,郭兆成,李振洪.2019. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J].武汉大学学报.信息科学版, 44(7):949-956.
- 郭富赟, 孟兴民, 张永军, 李松, 谢正团, 熊木齐, 郭鹏. 2014.甘肃山区城镇地质灾害风险区划技术方法探讨[J].兰州大学学报(自然科学版),50(5): 604-610.
- 黄波林,殷跃平,李滨,冯万里,秦臻,张鹏.2021.库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究[J].地质学报,95(6): 1949-1961.
- 黄波林,殷跃平.2018. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究[J].岩石力学与工程学报,37(3): 621-629.
- 黄勋,唐川.2016. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评价[J]. 地球科学进展,31(10): 1047-1055.
- 孟兴民,陈冠,郭鹏,熊木齐,Janusz Wasowski.2013. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J].海洋地质与第四纪地质, 33(4):1-15.
- 乔建平, 杨宗洁. 2013. 基于 KP 模型的滑坡破坏概率[J].中国地质灾害与防治学报,24(4): 1-5.
- 乔建平,黄栋,王萌,吴彩燕.2017.滑坡泥石流风险防御工程效益评估的最优值距模型[J].中国地质灾害与防治学报,28(3): 80-86.
- 石菊松,张永双,董诚,吴树仁.2005. 基于 GIS 计算的巴东新城区滑坡灾害危险性区划[J].地球学报, 26(3): 275-282.
- 石莉莉,黄栋,乔建平,张晶,何宇琼,李虎.2017. 塔之坪滑坡治理前后危险性对比[J].灾害学,32(2):124-128.
- 舒和平,孙爽,马金珠,刘东飞,张鹏.2016. 甘肃省南部单沟泥石流灾害风险评估[J].山地学报,34(3): 337-345.
- 孙萍萍,张茂省,董英,朱立峰,毕俊壁.2013. 灌溉诱发型滑坡风险控制关键技术[J].地质通报, 32(6):899-903.
- 唐亚明,张茂省,李林,薛强.2011. 滑坡易发性危险性风险性评价例析[J].水文地质工程地质,38(2):125-129.

- 铁永波,徐伟,向炳霖,卢佳燕,龚凌枫,高延超,田凯.2022. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考[J].中国地质灾害与防治学报, 33(3):106-113.
- 王高峰,田运涛,高幼龙,乐琪浪,杨强,李瑞冬,叶振南,邓兵,郭宁,孙秀娟. 2020.非匀质泥石流运动特征与峰值流量关系研究[J].工程地质学报,28 (5): 1028-1038.
- 王高峰,叶振南,李刚,田运涛,邓兵,郭宁,陈宗良.2019.白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价[J].灾害学,34(3): 128-133.
- 王萌,姜元俊,黄栋,李倩倩.2015.基于小流域的地震扰动区降雨型滑坡泥石流危险性评价方法[J].吉林大学学报: 地球科学版,45(6): 1781-1788.
- 吴树仁,石菊松,张春山,王涛.2009. 地质灾害风险评估技术指南初论[J].地质通报,28(8): 995-1005.
- 许强,张一凡,陈伟.2010. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法-以四川省丹巴县城为例[J].地质通报,29(5): 729-738.
- 许强,董秀军,李为乐.2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报.信息科学版, 44(7):957-966.
- 张成航,王佳运,高波,冯卫.2015. 陕西胥家村黄土滑坡风险定量分析[J].地质通报, 34(11): 2138-2142.
- 张春山,何淑军,辛鹏,孙炜锋,谭成轩,吴树仁,王涛,刘鑫.2009. 陕西省宝鸡市渭滨区地质灾害风险评价[J].地质通报,28(8): 1054-1063.
- 张茂省,薛强,贾俊,徐继维,高波,王佳运.2019. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J].西北地质,52(2): 125-135.
- 张茂省. 2021.地质灾害风险管理理论方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社.
- 周超,常鸣,徐璐,车宏晓. 2020. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J].武汉大学学报.信息科学版, 45(11): 1782-1791.
- 朱建军,李志伟,胡俊.2017. InSAR 变形监测方法与研究进展[J].测绘学报,46(10):1717-1733.