

引用格式: 马思琦, 杨为民, 张春山, 等, 2022. 兰州市寺儿沟泥石流物源特征及其危险性分析 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1059–1070. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222829

Citation: MA S Q, YANG W M, ZHANG C S, et al., 2022. Provenance characteristics and risk analysis of debris flows in Siergou, Lanzhou City [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1059–1070. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222829

兰州市寺儿沟泥石流物源特征及其危险性分析

马思琦^{1,2,3}, 杨为民^{1,2,3}, 张春山^{1,2,3}, 渠敬凯^{1,4}, 万飞鹏^{1,2,4}, 唐海兵^{1,2,4}
MA Siqi^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,2,3}, ZHANG Chunshan^{1,2,3}, QU Jingkai^{1,4}, WAN Feipeng^{1,2,4}, TANG Haibing^{1,2,4}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
4. 中国地质大学 (北京), 北京 100083

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
4. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

Provenance characteristics and risk analysis of debris flows in Siergou, Lanzhou City

Abstract: Located in the Xigu District of Lanzhou City, Gansu Province, the Siergou watershed has historically experienced large-scale debris flows that have caused significant casualties and property damage. Based on the field survey and remote sensing interpretation, we studied the characteristics of the material source and influencing factors of the debris flows in Siergou through existing literature and indoor tests. We used the FLO-2D software to simulate and analyze the risk of debris flows. The results show that Siergou is dominated by viscous debris flows, which exhibit low-frequency activity and are currently in recession. There are abundant material sources in the Siergou watershed, which can be classified into four types: slope-type, landslide-type, ditch-type, and manmade-type, among which the landslide-type and ditch-type source control the outbreak scale of debris flow. The volume of a one-time flush-out mainly depends on the development degree of a landslide when the landslide occurs. The more developed the landslide is, the larger the one-time flush-out volume is and the larger the scale of the debris flow is. Under critical rainfall conditions, debris flows will break out in Siergou and deposit on the circulation area, forming medium-high risk areas, which seriously threaten the safe operation of the infrastructure in the gully, such as the Lanzhou-Xining high-speed railway and the beltways of the Lanzhou City. When extreme heavy rainfall is encountered, larger-scale debris flows will break out in Siergou. Therefore, further study of the risk of debris flows under extreme weather conditions is necessary to provide a geological basis for debris flow prevention and mitigation in this region.

Keywords: geohazard; debris flow; provenance; landslide; risk; Siergou

摘 要: 寺儿沟流域位于甘肃省兰州市西固区, 历史上曾发生过大规模泥石流, 造成重大人员伤亡和财产损失。文章基于野外调查和遥感解译, 结合已有文献成果和室内测试, 研究寺儿沟泥石流物源特征及影响因素, 采用 FLO-2D 软件模拟分析泥石流的危险性。研究结果表明: 寺儿沟以黏性泥石流为主, 表现为低频活动, 目前处于衰退期; 寺儿沟流域内物源丰富, 可分为坡面型物源、崩滑型物源、沟道型物源

基金项目: 科技部基地与人才项目 (2019QZKK0902)
This research is financially supported by the Base and Talent Project of the Ministry of Science and Technology (Grant 2019QZKK0902)

第一作者简介: 马思琦 (1999—), 女, 在读硕士, 主要从事地质灾害方面的研究。E-mail: 1027277606@qq.com

通讯作者: 杨为民 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害、工程地质, 构造地质等方面的科研。E-mail: snon_72@163.com

收稿日期: 2022-09-14; **修回日期:** 2022-10-14; **责任编辑:** 吴芳

和人为型物源共 4 种, 其中崩滑型、沟道型物源控制了泥石流的暴发规模; 而一次性冲出量的大小主要取决于泥石流起动时崩滑体的发育程度, 崩滑体越发育, 一次性冲出量越大, 泥石流规模越大; 在临界降雨条件下, 寺儿沟将会暴发泥石流, 中—高危险区集中于流通区, 严重威胁冲沟内构筑物如兰西高铁、环城高速等安全运营。当遭遇极端强降雨时, 寺儿沟将暴发更大规模泥石流。因此, 有必要进一步研究极端天气条件下泥石流的危险性, 为区内泥石流的防灾减灾提供地质依据。

关键词: 地质灾害; 泥石流; 物源; 滑坡; 危险性; 寺儿沟

中图分类号: P694; P642.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 06-1059-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222829

0 引言

寺儿沟流域位于甘肃省兰州市西固区南部山区, 历史上曾多次暴发泥石流, 尤以 1964 年泥石流规模最大, 体积达 $17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 造成人民生命财产的巨大损失。西固区位于兰州市西侧, 区内地质构造较为复杂, 新构造运动强烈, 地质灾害特别是泥石流灾害发育 (王伟, 2007), 严重威胁西固城区安全。物源是泥石流形成的充分条件 (张杰坤, 1994; 费祥俊和舒安平, 2004), 其决定了泥石流冲出规模和灾害威胁范围 (余斌和唐川, 2016)。目前对于泥石流物源的研究主要集中在对其动、静储量的分类描述和计算, 如可移动固体物质 (杨顺, 2014)、动储量 (蒋忠信, 1994)、有效固体物质 (李朝安, 2004) 等一系列定义。现有泥石流物源计算多采用预测模型, 如灰色模型 (李秀珍等, 2007)、多元回归模型 (栗海军等, 2021)、图解法 (乔建平等, 2012) 和因子分析法 (邓玖林, 2018) 等方法。国内著名的蒋家沟泥石流等均有相关的物源计算公式 (王喜安等, 2020), 泥石流灾害防治工程勘察规范 (DZ/T0220-2006) 中也明确规定了雨洪法等泥石流物源计算方法。故泥石流物源计算方法存在多样性, 尚未固定统一 (潘华利等, 2020), 因而, 基于物源的泥石流危险性和影响范围评价不一。

不同地区泥石流具有不同的物源特征和补给方式, 黄土地区以小型沟谷型黏性泥流为主 (金凌燕, 2004), 在水-力耦合作用下常形成黄土湿陷变形-地裂缝-崩塌滑坡-泥石流灾害链 (彭建兵等, 2014)。崩塌、滑坡为泥石流提供了主要物源 (Guo et al., 2020), 而地震是黄土地区崩塌、滑坡主要诱发因素之一 (李为乐等, 2013; 张铎等, 2013; Domènech et al., 2019), 当 M_L (震级) $\geq$

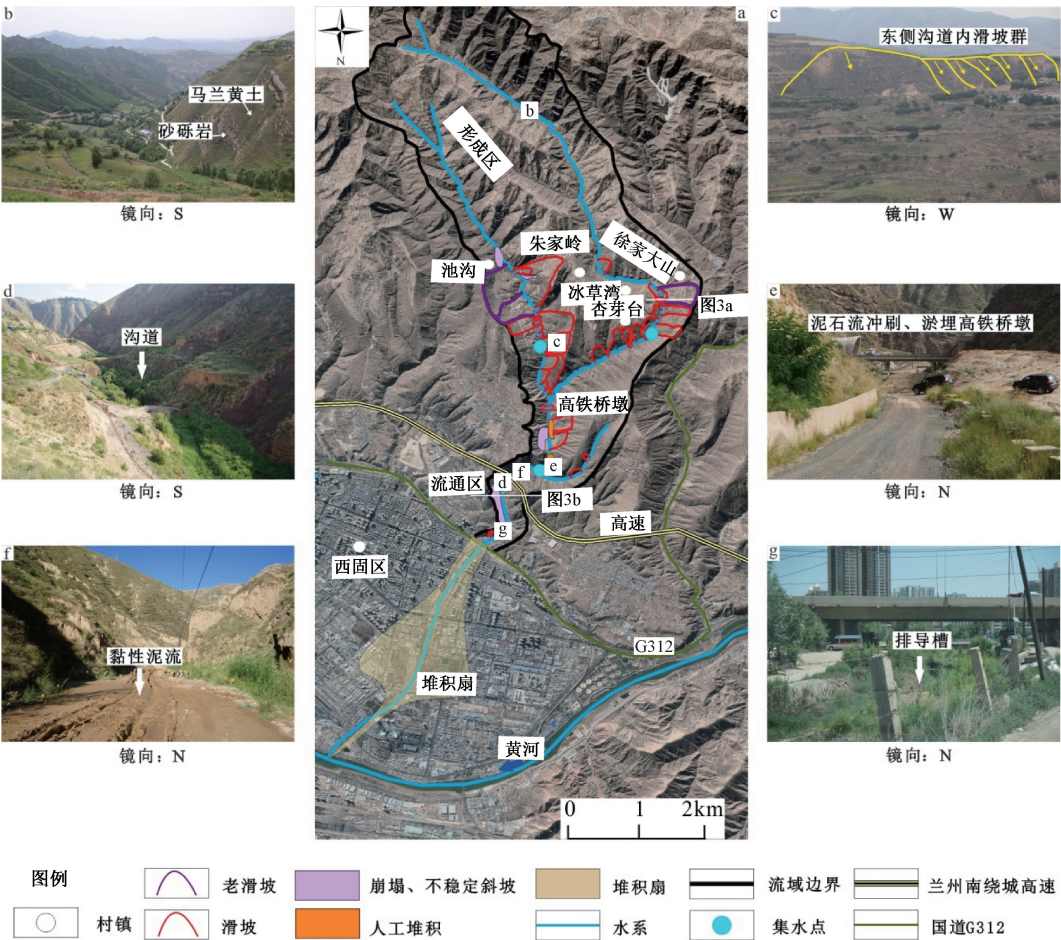
4.0 时, 便可触发地震滑坡 (Keefer, 1984)。兰州地区位于陇西黄土高原, 区内崩滑流发育, 物源丰富, 泥石流灾害频发, 且均为暴雨型泥石流 (Liu et al., 2001), 以往的研究工作多集中于泥石流区域性的危险评价 (刘兴荣, 2016; 牛全福等, 2019); 而针对泥石流物源特征及单沟危险性的研究较少 (鲁得方和魏玉涛, 2015; 窦晓东, 2020)。文章基于遥感解译和野外调查, 研究兰州市西固区寺儿沟的物源特征及影响因素, 采用 GIS 空间分析计算寺儿沟流域物源静储量, 通过 FLO-2D 数值模拟分析临界降雨条件下寺儿沟泥石流危险性并估算一次性最大冲出量, 以期对寺儿沟泥石流的防灾减灾提供技术支撑。

1 地质环境背景

寺儿沟流域地处青藏高原东北缘向陇西黄土高原过渡地带, 大地构造上处于祁连山构造带与秦岭造山带交汇区, 南邻秦岭褶皱带, 北接祁连褶皱带, 由多个隆起和断陷盆地组成。区内褶皱、断裂构造发育, 兰州-马衔山断裂带西端的咸水沟断裂斜穿寺儿沟流域。区内地层自元古界震旦系 (Z) 至第四系 (Q) 均有不同程度分布。寺儿沟流域出露地层岩性为白垩系下统河口群 (K_1hk) 砂砾岩、新近系咸水河组 (N_1x) 砂质泥岩、上更新统马兰组 (Q_3^{col}) 黄土、中更新统 (Q_2)、下更新统 (Q_1) (图 1)。

寺儿沟流域位于青藏高原东北部地震区的天水-兰州-河西走廊地震带, 地震烈度为Ⅷ度, 历史地震活动频繁。自 1108 年至 2020 年, 共发生过 5 次 7.0 级以上强震, 12 次 6.0 级以上地震, 这些地震均诱发极震区发生了大量滑坡、崩塌、坡面流 (秦宇龙等, 2021)。其中, 对兰州及周边地区影响最大的是 1125 年兰州 7.0 级地震, 导致兰州

999 m, 沟谷纵坡降 99‰, 流向 320°~350°。寺儿沟流域狭长, 形成区由两条近平行冲沟组成。寺儿沟沟口至主河段堆积扇较完整, 扇长 1170 m, 扇径 1540 m, 扩散角 45°, 面积 0.94 km²。泥石流冲出沟口后, 堆积于黄河右岸, 挤压黄河主河道 (图 2a)。



a—寺儿沟泥石流遥感解译图; b—形成区沟谷形态及岸坡岩性; c—东支沟滑坡群; d—流通区沟道堆积及植被; e—兰西高铁横跨寺儿沟; f—流通区新发黏性泥石流堆积; g—沟口排导槽内植被生长茂盛

图 2 寺儿沟流域泥石流特征

Fig. 2 Characteristics of the debris flows in the Siergou watershed

(a) Remote sensing interpretation of the debris flows; (b) Gully morphology and bank slope lithology in the formation area; (c) Landslide group along the east sub-branch; (d) Trench accumulation and vegetation in the circulation area; (e) The Lanzhou-Xining high-speed railway spans the Siergou watershed; (f) New accumulation of viscous debris flows in the circulation area; (g) Vegetation flourish in the trench drain channel

从沟道堆积物来看, 流域范围内局部出露有白垩系砂砾岩、新近系泥岩, 沟道堆积以次生黄土为主, 滑坡为其主要来源 (图 2b、2c), 亦可见少量大块砂砾岩 (图 2d)。在流通区宽阔处采取新发泥石流堆积物样品, 进行颗粒分析试验, 结果显示寺儿沟泥石流以黏性泥流为主, 密度为 2.02 g/cm³, 危害方式为冲刷、淤埋高铁桥墩 (图 2e、2f)。

据地质灾害区划报告及已有资料显示 (Liu et al., 2001), 寺儿沟曾多次暴发泥石流, 相邻泥石流事件时间间隔 13~32 年。但自 1964 年以来, 寺

儿沟未再发生大规模泥石流, 这从流通区沟道内植被生长茂盛和排导槽多年未遭侵蚀冲刷可证实 (图 2g)。其原因一方面与研究区内干旱少雨有关, 另一方面与区内多年来未遭遇极端事件 (极端天气或强震等) 有关。以上表明寺儿沟泥石流为低频泥石流, 目前活动性不强, 处于衰退期。

3 寺儿沟泥石流物源特征

3.1 物源类型

泥石流物源包括参与泥石流活动的沟道内物

源、坡面侵蚀及崩滑体等 (马超等, 2013)。根据野外调查, 寺儿沟流域内物源可分为坡面型物源、崩滑型物源、沟道型物源、人为型物源共 4 种。

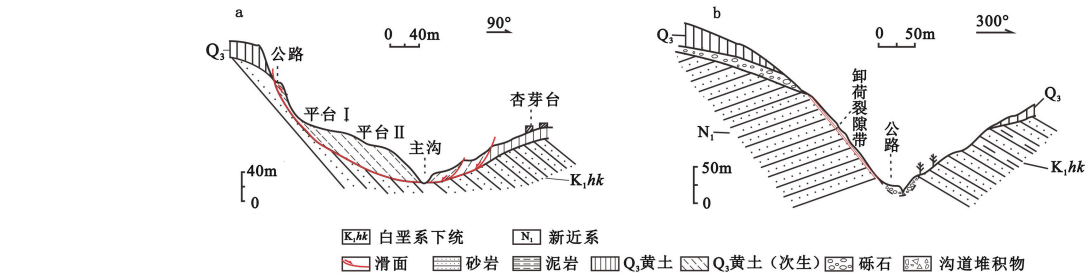
(1) 坡面型物源

坡面型物源是指由坡面侵蚀或冲沟侵蚀所形成, 呈面状分布的泥石流物源。该类物源表现为沟岸堆积和斜坡侵蚀。寺儿沟流域内出露第四系黄土、白垩系砂砾岩及新近系泥岩, 在地震或降雨作用下砂泥岩斜坡体结构变得松散, 产生崩塌、滑坡、坡面流, 坡面堆积物受流水侵蚀形成坡面型物源。降雨也会使斜坡岩土体软化, 易发生坡面侵蚀。

(2) 崩滑型物源

寺儿沟流域崩滑型物源主要来自形成区下游岸坡大量发育的崩塌、滑坡 (图 2a、2c, 图 3)。

流域内崩塌主要发生在 K_1 厚层状砂砾岩和新近系砂泥岩 (图 2a、3b) 中, 因节理裂隙发育, 易形成高陡危岩体所致 (图 4a、4b)。而滑坡则由降雨或地震诱发。受历史强震作用, 寺儿沟流域形成区下游和流通区上游沟谷岸坡发育数个大型地震滑坡, 并且在东支沟左岸及主沟形成区下游左岸发育滑坡群 (图 4c)。这些滑坡下滑后堆积于沟道和岸坡中下部, 构成崩滑型物源。其后, 在遭受强降雨或连阴雨时, 堆积在岸坡中下部的滑坡体易复活, 重新失稳下滑, 形成降雨型滑坡。相比于地震滑坡, 降雨滑坡受沟道流水侵蚀坡脚, 一般发生于地震滑坡体前缘或下部, 相比于地震滑坡, 降雨滑坡规模小但数量多, 成为泥石流发生时物源的主要补给方式。

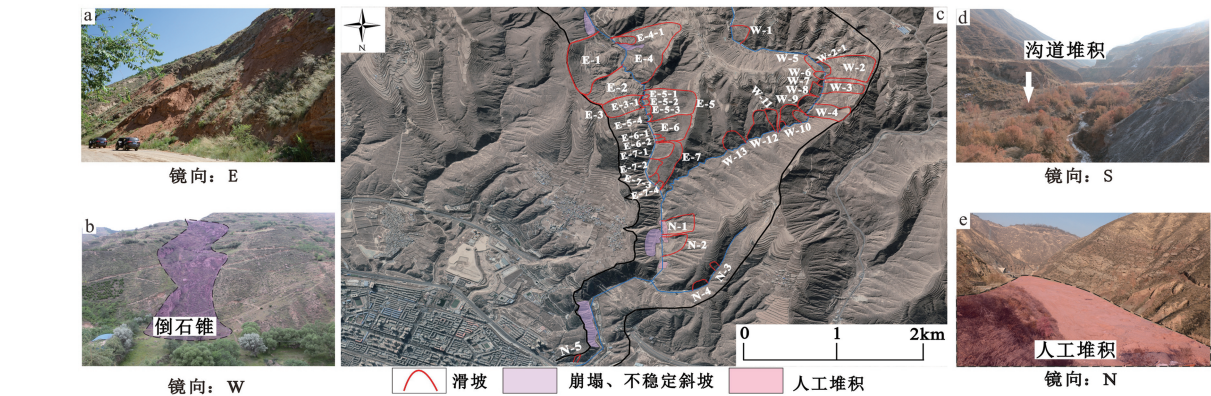


a—徐家大山至杏芽台主沟滑坡剖面; b—流通区下游右岸不稳定斜坡

图 3 寺儿沟流域形成区下游及流通区沟谷不同位置地质剖面图

Fig. 3 Geological profiles of different locations in the downstream formation area and the circulation area

(a) Slope profile from Xujiadashan to Xingyatai; (b) Unstable slope on the right bank of the downstream circulation area



a—西固二号隧道危岩体; b—崩塌形成倒石锥; c—滑坡编号; d—流通区沟谷及沟道堆积; e—人为型物源

图 4 寺儿沟流域物源类型及崩滑体分布

Fig. 4 Source types and distribution of slumped masses in the Siergou watershed

(a) Unstable rock mass over the Xigu No. 2 tunnel; (b) Rockfall cone formed by a collapse; (c) Landslide number; (d) Gullies and accumulations in the circulation area; (e) Anthropogenic sources

(3) 沟道型物源

坡面侵蚀的固体物质和崩滑流灾害体搬运至沟道堆积, 成为沟道型物源 (图 4d)。寺儿沟形成

区及流通区上游沟谷断面呈 V 型, 泥石流启动时沟底侵蚀作用和侧蚀作用较强, 沟道堆积物受到冲刷揭底, 坡脚堆积物受侧蚀作用汇入泥石流。

结合野外勘测，在 GIS 平台上测得寺儿沟流域形成区面积约 32800 m²，沟道堆积物平均厚度取 3 m；流通区面积约 5670 m²，沟道堆积物平均厚度取 2 m，计算得出沟道型物源静储量（表 2）。

(4) 人为型物源

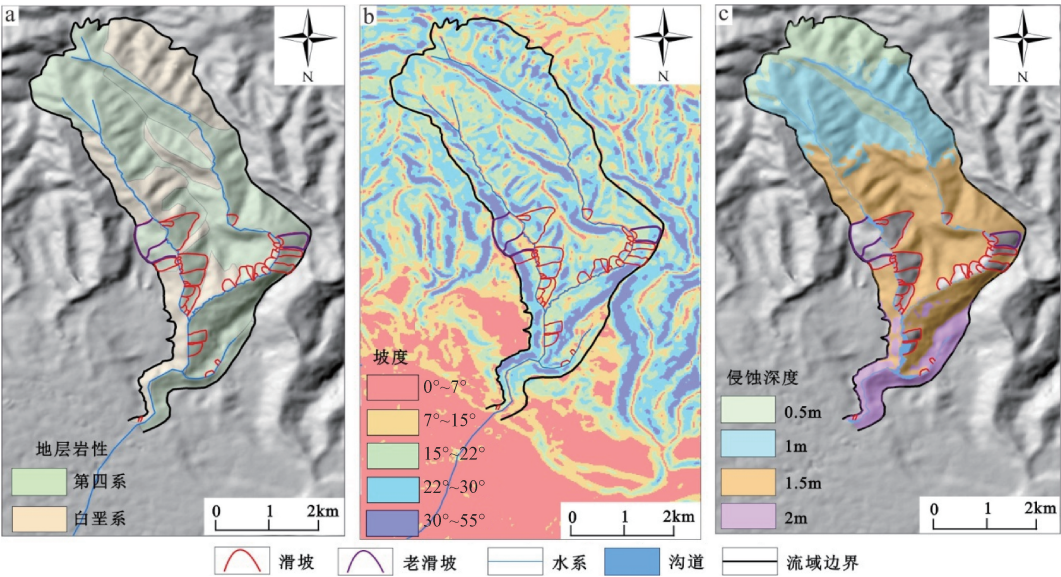
此类物源主要是人类工程活动产生的废弃物和垃圾等。寺儿沟流域人为型物源主要是流域内村民随意丢弃的生活垃圾、工程施工过程产生的弃渣。其中生活垃圾量很小，可忽略不计。而弃渣位于铁路桥上游寺儿沟孔家营—东坪隧道口南侧左岸，为兰西铁路建设时开挖隧道的废弃物，规模大小为 200 m×40 m×20 m。当发生大规模泥石流时，这些弃渣遭泥石流侵蚀，可启动成为泥石流物源补给（图 4e）。

3.2 流域范围内物源丰富，静储量大

物源类型不同，其储量计算方法不一。各类物源静储量一般是通过遥感解译，结合野外验证实测后，在 GIS 平台上计算得出。

3.2.1 坡面型物源静储量

坡面型物源静储量大小取决于地层岩性和坡度。岩性越软弱，沟谷坡度越大，坡面侵蚀程度越高，则坡面物源供给量越大。寺儿沟流域内地层岩性为白垩系砂砾岩和第四系黄土，斜坡坡度变化在 7°~55°范围，在遭受雨水侵蚀时，二者对坡面侵蚀深度的影响大致相同。采用 GIS 空间分析，将地层岩性与斜坡坡度加权叠加，得出寺儿沟流域坡面侵蚀深度图（图 5），由表 2 坡面侵蚀型物源计算可得，物源储量约为 2908.31×10⁴ m³。



a—地层岩性分布图；b—坡度图；c—坡面侵蚀深度分布图

图 5 寺儿沟流域坡面侵蚀深度分布图

Fig. 5 Maps showing the slope erosion-depth in the Siergou watershed

(a) Lithology map of the strata; (b) Slope steepness map; (c) Slope erosion-depth map

3.2.2 崩滑型物源静储量

崩滑型物源是寺儿沟泥石流的主要物源之一，它决定了泥石流发生时一次性最大冲出量的多少，因而决定了泥石流的规模。寺儿沟崩滑型物源由以下 3 部分组成。

(1) 地震滑坡：在寺儿沟形成区中下游，主沟左岸和东支沟滑坡群规模大，均为高位滑坡，系历史地震滑坡，滑坡残留体体积见表 1，袁道阳等（2002）的研究结果也证实了这些滑坡系 1125 年兰州南 7.0 级地震诱发形成（图 6）。地震滑坡

下滑后，滑坡体一部分冲入沟谷堆积于沟道，成为泥石流物源；而部分滑坡体仍停留在滑床之上，成为未来泥石流发生的潜在物源。

(2) 降雨滑坡：此类物源均位于沟谷岸坡中下部或坡脚处，系沟谷水流冲刷坡脚坡体失稳形成，或部分老滑坡体受降雨诱发重新复活（表 1）。

将地震滑坡和降雨滑坡一起绘于图 7 中，可见地震滑坡体积远大于降雨滑坡体积；而降雨滑坡虽然体积小，但数量多，因受降雨诱发易失稳下滑，滑坡体堆积在沟道内成为泥石流物源。

(3) 崩塌危岩体: 这类物源在冲沟内分布较少, 主要是白垩系砂砾岩危岩体崩塌形成。白垩系地层呈缓倾斜, 砂砾岩层一般发育两组剪节理, 岩层产状 $90^{\circ} \angle 38^{\circ}$, 节理产状 $15^{\circ} \angle 88^{\circ}$, 卸荷裂隙产状 $285^{\circ} \angle 64^{\circ}$, 在冲沟岸坡形成危岩体。受层面及节理面控制, 易发生崩塌或落石, 零星分布于白垩系基岩裸露区 (图 4a、4b)。白垩系砂砾岩层厚大, 坚硬耐风化, 崩塌后成大块石堆积于沟道, 成为增加寺儿沟泥石流破坏力的主要固体物质。

在遥感解译的基础上, 对流域内所有的崩滑体进行了实测 (表 1)。由表 1 可知, 崩塌危岩体体积约为 $114 \times 10^4 \text{ m}^3$, 滑坡体体积约为 $3351.84 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。表明流域范围内现存崩滑型物源静储量仍处于较高水平。根据各类物源静储量统计结果 (表 2) 可知, 寺儿沟流域内现存物源静储量以崩滑型物源和坡面型物源为主, 总的静储量达 $6401.12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表 1 寺儿沟流域崩滑体物源静储量表 (表中滑坡编号见图 4c)

Table 1 Static reserves of slumped masses in the Siergou watershed (corresponding landslide numbers are shown in Fig. 4c)							
编号	灾害体规模 长×宽×高/m	静储量/ ×10 ⁴ m ³	灾害体类型	编号	灾害体规模 长×宽×高/m	静储量/ ×10 ⁴ m ³	灾害体类型
E-1	450×650×50	487.50	地震滑坡	W-2-1	65×230×20	9.97	降雨滑坡
E-2	360×370×45	199.80	地震滑坡	W-3	422×196×55	151.64	地震滑坡
E-3	400×250×45	150.00	地震滑坡	W-4	352×223×50	130.83	地震滑坡
E-3-1	72×200×30	14.40	降雨滑坡	W-5	65×200×15	6.50	降雨滑坡
E-4	750×640×45	720.00	地震滑坡	W-6	90×90×15	4.05	降雨滑坡
E-4-1	240×140×30	33.60	降雨滑坡	W-7	30×90×15	1.35	降雨滑坡
E-5	550×450×45	371.25	地震滑坡	W-8	120×110×20	8.80	降雨滑坡
E-5-1	59×70×30	4.13	降雨滑坡	W-9	150×170×25	21.25	降雨滑坡
E-5-2	50×96×30	4.80	降雨滑坡	W-10	250×230×25	47.92	降雨滑坡
E-5-3	69×140×30	9.66	降雨滑坡	W-11	200×150×25	25.00	降雨滑坡
E-5-4	40×97×30	3.88	降雨滑坡	W-12	300×230×40	92.00	降雨滑坡
E-6	300×360×30	108.00	地震滑坡	W-13	250×180×40	60.00	降雨滑坡
E-6-1	67×55×20	2.46	降雨滑坡	N-1	300×260×35	91.00	降雨滑坡
E-6-2	104×59×20	4.09	降雨滑坡	N-2	100×270×35	31.50	降雨滑坡
E-7	300×700×40	280.00	地震滑坡	N-3	67×80×30	5.36	降雨滑坡
E-7-1	200×270×25	45.00	降雨滑坡	N-4	60×190×30	11.40	降雨滑坡
E-7-2	120×270×25	27.00	降雨滑坡	N-5	150×70×15	5.25	降雨滑坡
E-7-3	117×114×25	11.12	降雨滑坡	西固二号隧道	100×830×10	83.00	危岩体
E-7-4	80×80×25	5.33	降雨滑坡	西固二号隧道	100×100×60	20.00	崩塌体
W-1	120×300×25	30.00	降雨滑坡	池沟	5×200×100	1.00	危岩体
W-2	400×170×60	136.00	地震滑坡	池沟	50×120×5	10.00	崩塌体
滑坡体总计		3351.84		崩塌危岩体总计		114.00	

3.3 泥石流物源补给方式

泥石流起动后, 流体沿途侵蚀、铲刮沟道, 侧蚀沟道, 从而不断增加泥石流的规模, 各类物源对泥石流的补给方式不一。由土壤侵蚀强度分级标准及文献 (杨俊, 2015; 胡春宏和张晓明,

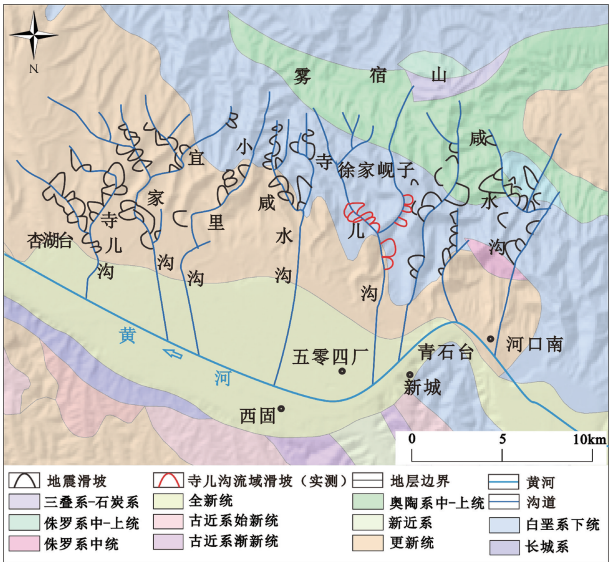


图 6 兰州南部山区地震滑坡分布图 (据袁道阳等, 2002 修改)

Fig. 6 Seismic landslide distribution map in the southern mountainous area of Lanzhou (modified from Yuan et al., 2002)

2020) 可知, 黄土地区坡面侵蚀量一般取 0.0037~0.0059 m, 由此可以得出, 坡面侵蚀型物源静储量虽然大 (表 2), 但坡面侵蚀产生的物源补给量小。沟道型物源结构松散, 在泥石流运动过程中由于底蚀可全部参与补给。人工堆积物源量小不易起

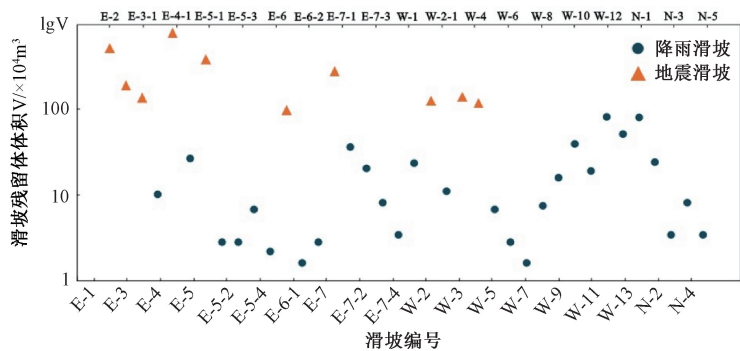


图 7 寺儿沟流域不同类型滑坡残留体物源体积

Fig. 7 Volume of landslide residues of different types in the Siergou watershed

表 2 寺儿沟流域物源静储量统计

Table 2 Static reserves of material sources in the Siergou watershed

物源类型		各部分静储量				静储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$
坡面侵蚀型	地层岩性	Q ₃ 黄土	Q ₃ 黄土	Q ₃ 黄土	K ₁ 砂砾岩	2908.31
	可侵蚀深度/m	2	1.5	1	0.5	
	面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$	234.09	1049.04	676.20	380.76	
	累计最大侵蚀量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	468.17	1573.56	676.20	190.38	
崩滑型	崩塌体静储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	114.00				3465.84
	滑坡体静储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	3351.84				
沟道型		沟道面积/ m^2	堆积厚度/m	静储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$		10.97
	形成区	32800	3	9.84		
	流通区	5670	2	1.13		
人为型		$16 \times 10^4 \text{ m}^3$				16.00

动。故寺儿沟泥石流以崩滑型物源补给为主。

寺儿沟泥石流在起动下泄过程中，坡面型、沟道型、人为型物源变化量不大，而崩滑型物源变化的可能性最大。因为，当流域遭受强震或强降雨时，泥石流起动前或正在起动时，崩塌、滑坡均可大规模发生或群发，引起崩滑型物源的大幅度增加，从而导致泥石流补给物源量的骤增，即一次性最大冲出量的大幅增加。相应地，泥石流规模增大，危险性增高。

3.4 流域物源主要影响因素

地震、断裂构造、地形地貌、地层岩性、土层结构和水文地质条件都会通过影响黄土滑坡的发育来对泥石流产生一定控制作用（彭建兵等，2020；孙显辰等，2020；颜灵勇等，2021；胡胜等，2021）。野外调查表明，降雨、坡度、地层岩性等是寺儿沟流域物源供给的主要影响因素。

一般，雨强越大，则雨水侵蚀搬运的能力越强。流域坡度越大，降雨时水动力越强，坡面易侵蚀，斜坡岩土体稳定性越低，易发生崩塌、滑坡和坡面流，从而增加泥石流物源量。降雨与坡度的耦合作用对寺儿沟泥石流物源的影响体现在：一方面对坡面型物源的影响上，降雨量、坡度越

大，坡面侵蚀程度越高，水流搬运至沟道的固体物质量越大；另一方面导致寺儿沟流域内已有的地震滑坡及不稳定坡体失稳，形成崩滑型和沟道型物源。

寺儿沟流域出露白垩系、新近系和第四系地层。白垩系、新近系砂泥岩区抗侵蚀能力强，在强震或强降雨条件下，沟谷岸坡陡峭区易发生崩塌，产生崩滑型物源；而第四系黄土和松散坡积层因结构松散易于被侵蚀，故主要提供坡面型物源。

4 寺儿沟泥石流危险性分析及一次性最大冲出量

4.1 模拟工况与计算参数设定

单沟泥石流危险区一般可通过历史泥石流的回访和调查来确定，也可由经验公式或数据模拟方法预测泥石流危险区范围，从而估算设定工况下的一次性冲出量。FLO-2D 可用来模拟沟谷型小流域泥石流的运动和堆积过程（Lin et al., 2005；Bertolo and Wieczorek, 2005；Wu et al., 2013），模拟泥石流流动与堆积影响因素（梁鸿熙等，

2016)，进行单沟泥石流危险性分析（吴季寰等，2022；张浩韦等，2022），科学预报泥石流危害范围。文中采用 FLO-2D 软件模拟分析不同工况下寺儿沟泥石流的危险性。

根据兰州市西固区地质灾害区划报告以及兰州市 1952 年至 2019 年降雨资料，确定区内泥石流暴发临界小时雨强约为 30 mm。选取小时降雨量 30 mm 作为临界降雨条件，模拟计算临界降雨条件下寺儿沟泥石流危险性。

计算所需参数设置如下。
①重度：根据现场实测结果，寺儿沟泥石流重度 γ 为 19.8 kN/m³。

②层流阻滞系数：参考已有研究成果，用工程地质类比法，取层流阻滞系数 $K=1000$ 。

③屈服应力及粘滞系数：根据泥砂比-体积浓度-流变参数关系式（1）得出 $[\alpha_1、\alpha_2、\beta_1、\beta_2]$ 为 $[0.000247, 0.03, 15.48, 14.42]$ ，由公式（2）（3）确定屈服应力 τ_y 及粘滞系数 η 。其中，体积浓度 c_v （=0.45）和经验系数 $\alpha_1、\alpha_2、\beta_1、\beta_2$ 一般可通过实验或查 FLO-2D 使用手册获得。

泥砂比-体积浓度-流变参数关系式：

$$\begin{cases} \eta = \alpha_1 e^{c_v \beta_1} \\ \tau_y = \alpha_2 e^{c_v \beta_2} \\ R_{ns} = 2.25 \times 10^{-6} \tau_y^{-3.36} e^{(9.37 c_v \beta \times 10^{-6} \tau_y^{3.87})} \\ R_{ns} = 4.56 \times 10^{-9} \eta^{-2.2} e^{(8.9 c_v \beta \times 10^{-11} \eta^{7.99})} \end{cases} \quad (1)$$

屈服应力 τ_y 与体积浓度 c_v 的关系：

$$\tau_y = \alpha_2 e^{c_v \beta_2} \quad (2)$$

粘滞系数 η 与体积浓度的关系：

$$\eta = \alpha_1 e^{c_v \beta_1} \quad (3)$$

④曼宁粗糙系数：参考统一阻力糙率系数计算方式（王裕宜等，2003）及 FLO-2D 使用手册建议值，结合实际调查，设定沟道及坡面曼宁系数 n 分别为 0.20、0.25。

⑤集水点及泥石流流量过程曲线：集水点取支沟和主沟滑坡群处及沟口位置（图 2），根据降雨条件得到泥石流流量过程曲线如图 8。

⑥泥石流流体土石比重：采用经验系数法，当泥石流流体固体物质主要为黏土，土石比重取 2.75。

4.2 模拟结果分析

(1) 危险性分析

由危险性模拟结果（图 9）可知，寺儿沟虽为

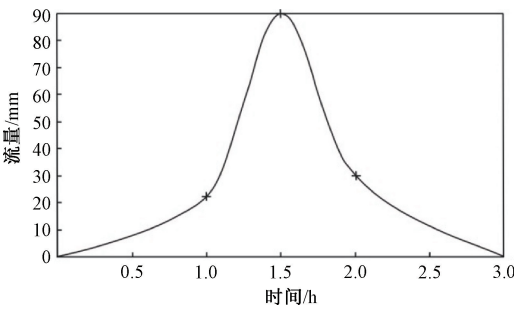
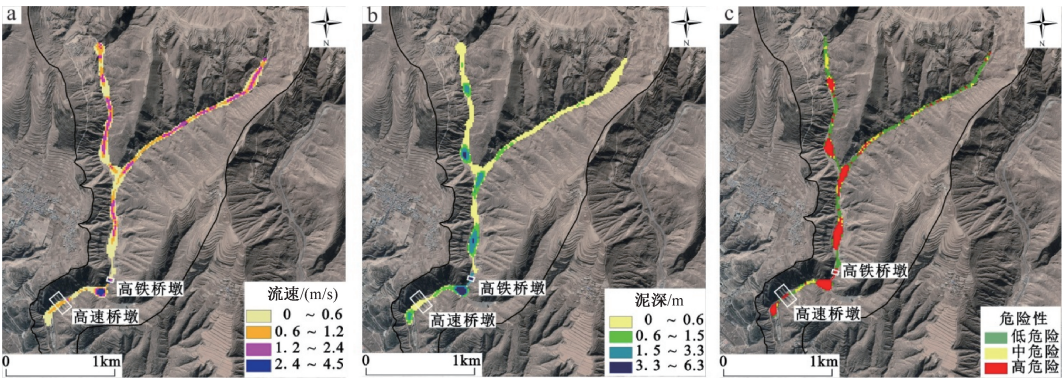


图 8 寺儿沟泥石流流量过程曲线
Fig. 8 Hydrograph of debris flows in Siergou

衰退期泥石流，但在临界降雨条件下，仍会暴发泥石流，对兰西高铁、环城高速桥墩及沟道内建筑物造成极大威胁。参考唐川等（1994）提出的泥石流危险性分区划分标准，确定寺儿沟泥石流高危险区面积约 12024 m²，中危险区面积约 3996 m²，低危险区面积约 10188 m²。表明临界降雨条件下，寺儿沟泥石流仍具较高危险性，其中高危险区位于形成区下游沟道转弯处和流通区上游沟道，高铁、高速桥墩路基均处于高危险区，该区域泥石流流速最高可达 4.5 m/s，泥石流可冲刷侵蚀桥墩，造成桥墩损伤（图 9a）。由于寺儿沟沟道长，流通区沟道形态呈宽 V 形或 U 形谷，故泥石流多堆积在流通区沟道宽缓区段，对沟口西固城区及主河黄河的影响小。

(2) 临界降雨条件下一次性最大冲出量
由临界降雨条件下泥石流的泥深分布可估算泥石流发生时的一次性最大冲出量（图 9b）。结合图 9a，确定寺儿沟形成区下游至流通区上游段，即崩滑高发区沟道泥石流流速较高，可达 2.4 m/s。计算得临界降雨条件下寺儿沟泥石流一次最大冲出量约为 110×10⁴ m³。通过临界降雨条件下一次最大冲出量可推断出各部分物源参与泥石流运动的量，沟道堆积物结构松散，在冲刷作用下可全部启动，一次性最大冲出量为 10.97×10⁴ m³。人工堆积物可忽略。临界降雨条件下，寺儿沟流域坡面侵蚀深度取 0.0045 m，一次性最大冲出量为 173.12 m³。由此可以看出，崩滑体为寺儿沟泥石流提供了大部分物源，临界降雨条件下一次性最大冲出量可达近 110×10⁴ m³。寺儿沟现存静储量达 6401.12×10⁴ m³，可知在临界降雨条件下，该冲沟仍有大量物源未启动下泄。若遭遇极端降雨，则可暴发更大规模泥石流。



a—流速分布图；b—泥深分布图；c—危险性分布图

图 9 临界降雨条件下寺儿沟泥石流危险性计算结果

Fig. 9 Risk assessment for the debris flows in Siergou under critical rainfall condition

(a) Velocity profile; (b) Mud-depth profile; (c) Risk profile

5 结论

(1) 寺儿沟历史上曾多次暴发泥石流，相邻泥石流暴发的时间间隔大于 10 年。该泥石流以黏性泥流为主，表现为低频活动，目前活动性弱，处于衰退期。

(2) 寺儿沟流域内物源丰富，可分为坡面型物源、崩滑型物源、沟道型物源和人为型物源共 4 类。其中坡面型和沟道型物源储量大，但崩滑型物源、沟道型物源控制了泥石流的暴发规模。而一次性冲出量的大小主要取决于泥石流启动时或启动前崩滑体的发育程度，崩滑体愈发育，物源补给愈充分，一次性冲出量越大，泥石流规模越大。寺儿沟泥石流启动时，以崩滑型物源、沟道型物源补给为主。

(3) 在临界降雨条件下，寺儿沟将会暴发泥石流。由于流域范围崩塌、滑坡集中分布以及沟道纵坡降的控制，泥石流中一高危险区集中于流通区，严重威胁兰西高铁、环城高速等安全运营。

(4) 寺儿沟泥石流在临界降雨条件下一次最大冲出量约为 $110\times10^4\text{ m}^3$ ，大大低于流域内崩滑型物源等动储量，远低于流域内物源总的静储量。表明寺儿沟仍存在大规模泥石流暴发的风险。

当遭遇极端强降雨时，寺儿沟将暴发更大规模泥石流。因而，进一步研究不同降雨概率条件下寺儿沟泥石流的危险性，对寺儿沟乃至兰州市南部山区泥石流的防灾减灾很有必要。

References

BERTOLO P, WIECZOREK G F, 2005. Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5 (6): 993-1001.

DENG J L, 2018. Debris flow prediction model based on factor analysis method [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 54 (7): 26-30, 42. (in Chinese)

DOMÈNECH G, FAN X M, SCARINGI G, et al., 2019. Modelling the role of material depletion, grain coarsening and revegetation in debris flow occurrences after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 250: 34-44.

DOU X D, 2020. Hazard evaluation and control scheme of Daqinggou debris flow disasters in Anning District of Lanzhou [J]. Resource Information and Engineering, 35 (1): 110-112. (in Chinese with English abstract)

FEI X J, SHU A P, 2004. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)

GUO X J, LI Y, CUI P, et al., 2020. Intermittent viscous debris flow formation in Jiangjia Gully from the perspectives of hydrological processes and material supply [J]. Journal of Hydrology, 589: 125184.

HU C H, ZHANG X M, 2020. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)

HU S, QIU H J, WANG N L, et al., 2021. The influence of terrain on loess landslides in Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 76 (11): 2697-2709. (in Chinese with English abstract)

JIANG Z X, 1994. Aquantitative forecast to reserves change of solid loose materials in debris flow ravine [J]. Mountain Research, 12 (3): 155-162. (in Chinese with English abstract)

JIN L Y, 2004. Development characteristics and disaster assessment methods of debris flow in Loess region: a case study of debris flow

disaster assessment in urban planning area of Dingxi City [J]. Gansu Science and Technology, 20 (9): 20-24. (in Chinese)

KEEFER D K, 1984. Landslides caused by earthquakes [J]. GSA Bulletin, 95 (4): 406-421.

LI C A, 2004. The primary research of the forecast model of the source area's soil starting for the soil-mechanical debris flows [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences. (in Chinese with English abstract)

LI H J, LIU Z, HE F, 2021. Landslide prediction based on grey theory and regression analysis [J]. Building Technology Development, 48 (1): 149-151. (in Chinese with English abstract)

LI W L, XU Q, HUANG R Q, 2013. A preliminary study on the back wave surface effect of Wenchuan earthquake landslide [J]. Acta Geologica Sinica, 87 (S1): 294-295. (in Chinese)

LI X Z, KONG J M, WANG C H, 2007. Comparison and application of grey GM (1, 1) modified residual error models in landslide predicting [J]. Journal of Mountain Science, 25 (6): 741-746. (in Chinese with English abstract)

LIANG H X, SHANG M, XU X, 2016. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 24 (2): 228-234. (in Chinese with English abstract)

LIN M L, WANG K L, HUANG J J, 2005. Debris flow run off simulation and verification-case study of Chen-You-Lan watershed, Taiwan [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5 (3): 439-445.

LIU X R, 2016. Hazard assessment of debris flows in Lanzhou City [J]. Northwestern Geology, 49 (1): 257-262. (in Chinese with English abstract)

LIU Y L, GUAN H P, LI J L, 2001. Time-and-space distribution and prevention of debris flow in Lanzhou district [J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 20 (1): 30-35.

LU D F, WEI Y T, 2015. A brief analysis of the risk of mudslides in Guanshangou, Anning District, Lanzhou City [J]. Ground Water, 37 (6): 195-197. (in Chinese)

MA C, HU K H, TIAN M, 2013. Post-earthquake relationships of maximum runout amount and loose matter mass in debris flow gully [J]. Journal of Natural Disasters, 22 (6): 76-84. (in Chinese with English abstract)

NIU Q F, LU M, LI Y F, et al., 2019. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30 (5): 48-56. (in Chinese with English abstract)

PAN H L, AN X, DENG Q J, et al., 2020. Progress and prospects of research on debris flow solid source [J]. Science Technology and Engineering, 20 (24): 9733-9741. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, LIN H C, WANG Q Y, et al., 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 22 (4): 684-691. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, WANG Q Y, ZHUANG J Q, et al., 2020. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 26 (5): 714-730. (in Chinese with English abstract)

QIAO J P, HUANG D, YANG Z J, et al., 2012. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismic area of Wenchuan earthquake region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 23 (2): 1-6. (in Chinese with English abstract)

QIN Y L, WU J L, ZHAN H Y, et al., 2021. Discussion on the correlation between active fault and geological disaster distribution in the Ganzi area, western Sichuan province, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (3): 463-474. (in Chinese with English abstract)

SUN X C, WANG B Y, LIU K X, et al., 2020. Analysis on influencing factors of debris flow disasters in Yunnan Province [J]. Yangtze River, 51 (11): 121-127. (in Chinese with English abstract)

TANG C, ZHOU J Q, ZHU J, et al., 1994. A study on the risk zoning of debris flow on alluvial fans by applying technology of numerical simulation [J]. Journal of Catastrophology, 9 (4): 7-13. (in Chinese with English abstract)

WANG W, 2007. Distribution and disaster characteristics of landslides and landslides in Lanzhou [J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 35 (6): 56, 180. (in Chinese)

WANG X A, CHEN J G, CHEN H Y, et al., 2020. Calculation of debris flow velocity in consideration of viscosity of slurry [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37 (4): 56-61. (in Chinese with English abstract)

WANG Y Y, ZHAN Q D, HAN W L, et al., 2003. Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of velocity parameter [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 14 (1): 9-13. (in Chinese with English abstract)

WU J H, ZHANG C S, YANG W M, et al., 2022. Risk assessment of debris flow in Zhujiagully watershed based on entropy weight coefficient of variation fusion algorithm and FLO-2D [J]. Journal of Natural Disasters, 31 (1): 81-91. (in Chinese with English abstract)

WU Y H, LIU K F, CHEN Y C, 2013. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study [J]. Journal of Mountain Science, 10 (2): 293-304.

YAN L Y, LI X B, OUYANG G L, 2021. Research progress in formation mechanism of loess coseismic landslides [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 23 (2): 46-53. (in Chinese with English abstract)

YANG J, 2015. Discussion on soil and water loss control model in Loess Plateau of Gansu Province [J]. Soil and Water Conservation in China (4): 33-35. (in Chinese)

YANG S, 2014. Study on the movable critical model of solid materials under hydro-dynamical condition in debris flow area [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)

YU B, TANG C, 2016. Dynamic characteristics and activity law of debris flow [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

YUAN D Y, LEI Z S, LIU B C, et al., 2002. Textual research on the 1125 Lanzhou M7.0 earthquake and the causative structure [J]. Earthquake Research in China, 18 (1): 67-75. (in Chinese with English abstract)

ZHANG D, WU Z H, LI J C, et al., 2013. An overview on earthquake-induced landslide research [J]. Journal of Geomechanics, 19 (3): 225-241. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H W, LIU F Z, WANG J C, et al., 2022. Hazard assessment of debris flows in Kongpo Gyamda, Tibet based on FLO-2D numerical simulation [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 306-318. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J K, 1994. Summary on debris flow research [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 5 (4): 1-8. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

邓玖林, 2018. 基于因子分析法的泥石流预测模型 [J]. 甘肃水利水电技术, 54 (7): 26-30, 42.

窦晓东, 2020. 兰州市安宁区大青沟泥石流灾害危害性评价及治理方案 [J]. 资源信息与工程, 35 (1): 110-112.

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

胡春宏, 张晓明, 2020. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化 [J]. 水利水电技术, 51 (1): 1-11.

胡胜, 邱海军, 王宁练, 等, 2021. 地形对黄土高原滑坡的影响 [J]. 地理学报, 76 (11): 2697-2709.

蒋忠信, 1994. 泥石流固体物质储量变化的定量预测 [J]. 山地研究, 12 (3): 155-162.

金凌燕, 2004. 黄土地区泥石流发育特点及灾害评估方法: 以定西市城市规划区泥石流灾害评估为例 [J]. 甘肃科技, 20 (9): 20-24.

李朝安, 2004. 土力类泥石流源地土体起动预报模型初步研究 [D]. 北京: 铁道部科学研究院.

梁海军, 刘泽, 何矾, 2021. 基于灰色理论和非线性回归分析的滑坡时间组合预测研究 [J]. 建筑技术开发, 48 (1): 149-151.

李为乐, 许强, 黄润秋, 2013. 汶川地震滑坡背波面效应初探 [J]. 地质学报, 87 (S1): 294-295.

李秀珍, 孔纪名, 王成华, 2007. 灰色 GM (1, 1) 残差修正模型在滑坡预测中的对比应用 [J]. 山地学报, 25 (6): 741-746.

梁鸿熙, 尚敏, 徐鑫, 2016. 基于 FLO-2D 数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究 [J]. 工程地质学报, 24 (2): 228-234.

刘兴荣, 2016. 兰州市城区泥石流危险性评价 [J]. 西北地质, 49 (1): 257-262.

鲁得方, 魏玉涛, 2015. 浅析兰州市安宁区关山沟泥石流风险性 [J]. 地下水, 37 (6): 195-197.

马超, 胡凯衡, 田密, 2013. 震后泥石流沟松散物质量与最大冲出总量的关系 [J]. 自然灾害学报, 22 (6): 76-84.

牛全福, 陆铭, 李月锋, 等, 2019. 基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 30 (5): 48-56.

潘华利, 安笑, 邓其娟, 等, 2020. 泥石流松散固体物源研究进展与展望 [J]. 科学技术与工程, 20 (24): 9733-9741.

彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等, 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J]. 工程地质学报, 22 (4): 684-691.

彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等, 2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报, 26 (5): 714-730.

乔建平, 黄栋, 杨宗估, 等, 2012. 汶川地震极震区泥石流物源储量统计方法讨论 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 23 (2): 1-6.

秦宇龙, 吴建亮, 詹涵钰, 等, 2021. 川西甘孜地区活动断裂与地质灾害分布相关性探讨 [J]. 地质力学学报, 27 (3): 463-474.

孙显辰, 王保云, 刘坤香, 等, 2020. 云南省泥石流灾害影响因子分析 [J]. 人民长江, 51 (11): 121-127.

唐川, 周钜乾, 朱静, 等, 1994. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究 [J]. 灾害学, 9 (4): 7-13.

王伟, 2007. 兰州地区滑坡泥石流分布及灾害特征 [J]. 甘肃科技纵横, 35 (6): 56, 180.

王喜安, 陈剑刚, 陈华勇, 等, 2020. 考虑浆体黏度的泥石流流速计算方法 [J]. 长江科学院院报, 37 (4): 56-61.

王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等, 2003. 粘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, 14 (1): 9-13.

吴季寰, 张春山, 杨为民, 等, 2022. 基于熵权变异系数融合算法和 FLO-2D 的朱家沟流域泥石流危险性评价 [J]. 自然灾害学报, 31 (1): 81-91.

颜灵勇, 李孝波, 欧阳刚垒, 2021. 黄土地震滑坡形成机理研究的若干进展 [J]. 防灾科技学院学报, 23 (2): 46-53.

杨俊, 2015. 甘肃省黄土高原地区水土流失治理模式探讨 [J]. 中国水土保持 (4): 33-35.

杨顺, 2014. 水动力作用下泥石流源区固体物质可移动判别模型研究 [D]. 成都: 中国科学院大学.

余斌, 唐川, 2016. 泥石流动力特性与活动规律研究 [M]. 北京: 科学出版社.

袁道阳, 雷中生, 刘百箴, 等, 2002. 兰州 1125 年 7 级地震考证与发震构造分析 [J]. 中国地震, 18 (1): 67-75.

张铎, 吴中海, 李家存, 等, 2013. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. 地质力学学报, 19 (3): 225-241.

张浩伟, 刘福臻, 王军朝, 等, 2022. 基于 FLO-2D 数值模拟的工布江达县城泥石流灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 306-318.

张杰坤, 1994. 泥石流研究综述 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 5 (4): 1-8.