



引文格式: 李彦娥, 赵振明, 冯卫, 等. 沿黄公路边坡地质灾害破坏模式及风险管控: 以陕西绥德-清涧段为例[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 186-196. DOI: 10.12401/j.nwg.2024109

Citation: LI Yan'e, ZHAO Zhenming, FENG Wei, et al. Geological Hazard Failure Mode and Risk Control of Slopes along the Yellow River Highway: Taking the Suide Qingjian Section in Shaanxi Province as an Example[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 186-196. DOI: 10.12401/j.nwg.2024109

沿黄公路边坡地质灾害破坏模式及风险管控: 以陕西绥德-清涧段为例

李彦娥^{1,2}, 赵振明¹, 冯卫^{1,2}, 马红娜^{1,2}, 王化齐^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 沿黄公路位于黄土高原黄河中游区, 区域滑坡崩塌等地质灾害多发, 对沿黄公路的道路安全造成威胁。笔者通过 1:10 000 地质灾害野外调查, 总结了沿黄公路陕西绥德-清涧段边坡地质灾害变形破坏演化模式, 定量评估了边坡地质灾害财产风险和人员风险。结果表明: ①沿黄公路陕西绥德-清涧段共发育地质灾害 51 处, 以小型基岩崩塌为主; 崩塌包括岩质和土质崩塌, 其破坏模式分为倾倒式、滑移式和坠落式 3 种; 滑坡均为黄土滑坡, 为拉裂-剪切滑移式破坏模式。②51 处地质灾害财产年损失为 0.000 5~3.375 万元/a, 单人年死亡概率为 $4.16 \times 10^{-5} \sim 4.40 \times 10^{-2}$, 其中低风险源 12 个, 中风险源 9 个, 高风险源 18 个, 极高风险源 12 个。③根据边坡破坏模式及风险评估结果, 对研究区边坡地质灾害制定了搬迁避让、专业监测、工程防治、群策群防等相应的风险管控措施建议。该研究结果为沿黄公路沿线地质灾害防灾减灾提供了技术支撑。

关键词: 沿黄公路; 地质灾害; 破坏模式; 风险评价; 风险管控

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0186-11

Geological Hazard Failure Mode and Risk Control of Slopes along the Yellow River Highway: Taking the Suide Qingjian Section in Shaanxi Province as an Example

LI Yan'e^{1,2}, ZHAO Zhenming¹, FENG Wei^{1,2}, MA Hongna^{1,2}, WANG Huaqi^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The Yellow River Highway is located in the middle reaches of the Yellow River on the Loess Plateau, where geological hazards such as landslides and collapses occur frequently, posing a threat to the road safety along the Yellow River Highway. This article summarizes the deformation and failure evolution patterns of geological hazards along the Suide Qingjian section of the Yellow River Highway in Shaanxi Province through a 1:10 000 field survey, and quantitatively evaluates the property and personnel risks of slope geological haz-

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2024-11-22; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“晋陕黄土高原河曲-韩城段灾害地质调查(DD20190642)”, “西北地区国土空间用途管制技术支持与应用服务(DD20230500)”, 陕西省重点研发项目“秦岭北麓西安段水、碳循环及其优化调控研究(2024SF-YBXM-562)联合资助。

作者简介: 李彦娥(1976-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查及国土空间规划研究。E-mail: 153017340@qq.com。

ards. The results show that: ① 51 geological hazards have developed along the Yellow River Highway in the Suide Qingjian section of Shaanxi Province, mainly small-scale bedrock collapses; Collapse includes rock collapse and soil collapse, and its failure modes are divided into three categories: toppling, sliding, and falling; The landslides are all loess landslides, with a tensile shear sliding failure mode. ② 51 geological hazards result in annual property losses ranging from 0.000 5 to 3.375 million yuan per year, with an annual mortality probability of 4.16×10^{-5} to 4.40×10^{-2} per person. Among them, there are 12 low-risk sources, 9 medium risk sources, 18 high-risk sources, and 12 extremely high-risk sources. ③ Based on the failure mode and risk assessment results of the slope, corresponding risk control measures and suggestions have been formulated for the geological hazards of the slope in the study area, including relocation avoidance, professional monitoring, engineering prevention and control, and group strategy and prevention. The research results provide technical support for geological hazard prevention and reduction along the Yellow River Highway.

Keywords: the Yellow River Highway; geological Hazards; failure mode; risk evaluation; risk control

沿黄公路位于黄土高原黄河中游区,区域地貌类型属典型的黄土丘陵沟壑区。受特定的地形地貌特征、气候条件、人类活动等影响,该区是中国地质灾害高发且最为严重的地区之一(彭建兵等, 2014)。沿黄公路建设切坡形成大量的切坡群,这些高陡边坡成为沿线地质灾害的主要危险源。自2017年通车以来,公路沿线地质灾害频发,主要表现为风化剥落、掉块落石、倾倒、滑塌等,对沿线游客及过往车辆安全造成极大的威胁。为确保沿黄公路安全运行,排除致灾隐患,开展其地质灾害风险调查和研究迫在眉睫。

中国从90年代开始实施了一系列覆盖全国山地丘陵区 and 重点城镇的地质灾害普查、详查及精细化调查工作,积累了黄土高原不同发展时期的地质灾害本底信息,在此基础上众多学者分析研究了黄土高原地质灾害发育规律(许领等, 2008; 孙萍萍等, 2019)、黄土滑坡发育类型(李同录等, 2007; 唐亚明等, 2015; 黄强兵等, 2016)、崩塌破坏模式(王根龙等, 2011; 彭军等 2015; 薛强等, 2021)等,提出了针对黄土高原不同区域、不同尺度的地质灾害风险评价方法(张茂省等, 2019; 杨柳等, 2020; 冯凡等, 2022),形成了成熟的黄土高原区域地质灾害风险评估体系。而针对黄土高原公路沿线地质灾害破坏模式总结及风险管控相对薄弱,主要集中在基岩山区公路边坡破坏机理(陈晓刚等, 2024)、边坡稳定性评价(岳中琦等, 2024; 伍运霖等, 2024)、风险区划(廖小平等, 2021; 蒋瑜阳等, 2023)等方面。

笔者在1:10 000比例尺地质灾害野外调查基础上,分析总结了黄土高原沿黄公路陕西绥德-清涧段边坡地质灾害变形破坏演化模式,定量评估了研究段

边坡地质灾害财产风险和人员风险,并根据边坡变形破坏模式及风险评估结果制定了相应的地质灾害风险管控措施建议,为沿黄公路沿线地质灾害防灾减灾提供技术支撑。

1 研究区概况

研究区为沿黄公路陕西省绥德县河底乡-清涧县儿狼山乡路段,长度为43 km,地处黄河中游的晋陕大峡谷内。地理位置为E 110°30′~110°45′, N 37°10′~37°20′,总体地势北高南低,属于黄土丘陵沟壑区的河谷阶地,地形切割强烈。年均降水量为450~600 mm,多集中在6~9月份,且多以暴雨形式出现,年平均气温为11.5℃。地质构造属鄂尔多斯盆地I级构造单元陕北台凹,地质构造简单。

沿线边坡类型主要为土质、岩质和土岩混合质3种。土质为第四系黄土。地层岩性为三叠系近水平产状的砂岩-泥岩互层(T_3h),出露的泥岩风化侵蚀严重,地层差异性风化强烈,节理裂隙发育。沿线人员居住较少,仅一处崩塌隐患坡体下分布有4户居民,其余威胁对象均为公路沿线行人和车辆。

2 地质灾害类型

沿黄公路研究区崩塌、滑坡等地质灾害多发,通过1:10 000地质灾害野外调查识别边坡灾害及隐患点51处,其中崩塌7处,崩塌隐患40处,滑坡3处,滑坡隐患1处(表1,图1)。地质灾害以小型基岩崩塌为主,基岩崩塌39处,占比82.98%,黄土崩塌次之。滑

表 1 研究区边坡灾害变形破坏模式分类

Tab. 1 Classification of deformation and failure modes of slope disasters in the study area

编号	灾害类型	破坏模式	地层岩性及灾害体特征	编号	灾害类型	破坏模式	地层岩性及灾害体特征
1	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 18 m, 宽 200 m	27	滑坡	拉裂-滑移	黄土+基岩, 厚 15~20 m, 坡高 120 m, 宽 270 m
2	崩塌	倾倒	黄土, 坡高 13 m, 宽 50 m	28	崩塌	滑移	黄土, 坡高 66 m, 宽 100 m
3	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 60 m, 宽 150 m	29	崩塌	滑移	黄土, 坡高 20 m, 宽 50 m
4	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 50 m, 宽 150 m	30	滑坡隐患	拉裂-滑移	黄土, 坡高 45.5 m, 宽 100 m
5	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 80 m, 宽 650 m	31	滑坡	拉裂-滑移	黄土, 坡高 45.5 m, 宽 100 m, 厚 1~2 m
6	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 100 m, 宽 500 m	32	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 33 m, 宽 100 m
7	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 96 m, 宽 250 m	33	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 18.4 m, 宽 70 m
8	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 65 m, 宽 150 m	34	滑坡	拉裂-滑移	黄土, 坡高 23 m, 宽 100 m, 厚约 4 m
9	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 65 m, 宽 250 m	35	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 21 m, 宽 20 m
10	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 70 m, 宽 300 m	36	崩塌	滑移	黄土, 坡高 23 m, 宽 100 m
11	崩塌隐患	滑移	基岩, 坡高 108 m, 宽 150 m	37	崩塌隐患	倾倒	黄土, 坡高 29 m, 宽 7 m
12	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 114 m, 宽 300 m	38	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 29.5 m, 宽 105 m
13	崩塌隐患	滑移	基岩, 坡高 115 m, 宽 150 m	39	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 18 m, 宽 50 m
14	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 105 m, 宽 100 m	40	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 20 m, 宽 150 m
15	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 106 m, 宽 200 m	41	崩塌隐患	滑移	黄土+基岩, 坡高 30 m, 宽 120 m
16	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 90 m, 宽 500 m	42	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 18 m, 宽 60 m
17	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 26 m, 宽 300 m	43	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 19 m, 宽 100 m
18	崩塌隐患	坠落	基岩, 坡高 30 m, 宽 200 m	44	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 13 m, 宽 70 m
19	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 60 m, 宽 100 m	45	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 11 m, 宽 93 m
20	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 45 m, 宽 100 m	46	崩塌	滑移	黄土, 坡高 17 m, 宽 10 m
21	崩塌隐患	坠落	基岩, 坡高 17 m, 宽 50 m	47	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 18 m, 宽 200 m
22	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 35 m, 宽 30 m	48	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 19 m, 宽 50 m
23	崩塌隐患	坠落	基岩, 坡高 15 m, 宽 100 m	49	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 21 m, 宽 75 m
24	崩塌隐患	坠落	基岩, 坡高 23 m, 宽 70 m	50	崩塌	滑移	黄土, 坡高 17 m, 宽 100 m
25	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 20 m, 宽 60 m	51	崩塌	滑移	黄土, 坡高 22 m, 宽 100 m
26	崩塌隐患	倾倒	基岩, 坡高 25 m, 宽 250 m				

坡较少,其中 3 处为黄土滑坡,1 处为黄土-基岩接触面滑坡。基岩崩塌是研究区主要的灾害类型。

3 地质灾害破坏模式

受地质环境条件和诱发因素影响,不同地质灾害类型表现出不同的变形破坏特征和破坏模式。研究区按边坡变形破坏模式划分,崩塌有倾倒式、滑移式和坠落式 3 种破坏模式,其中,倾倒式 34 处,滑移式 9 处,坠落式 4 处; 4 处滑坡及隐患破坏模式均为拉裂-剪切滑移式。

3.1 崩塌破坏模式

倾倒式破坏模式: 既发生于岩质边坡也发生于土质边坡。人工开挖、自然风化及降雨是形成该地区此类灾害的主要诱因(薛强等, 2021)。

岩质边坡受公路建设切割影响,坡体近直立,坡面破碎,节理裂隙发育。坡体因砂泥岩强度不同而差异风化,导致泥岩剥落、岩体向外凸出。同时受降雨及风化影响,边坡上部节理裂隙不断扩张,导致岩体向临空方向持续蠕动变形,自身重力作用下危岩体重心不断前倾,沿着节理裂隙面发生倾倒式变形破坏(图 2)。

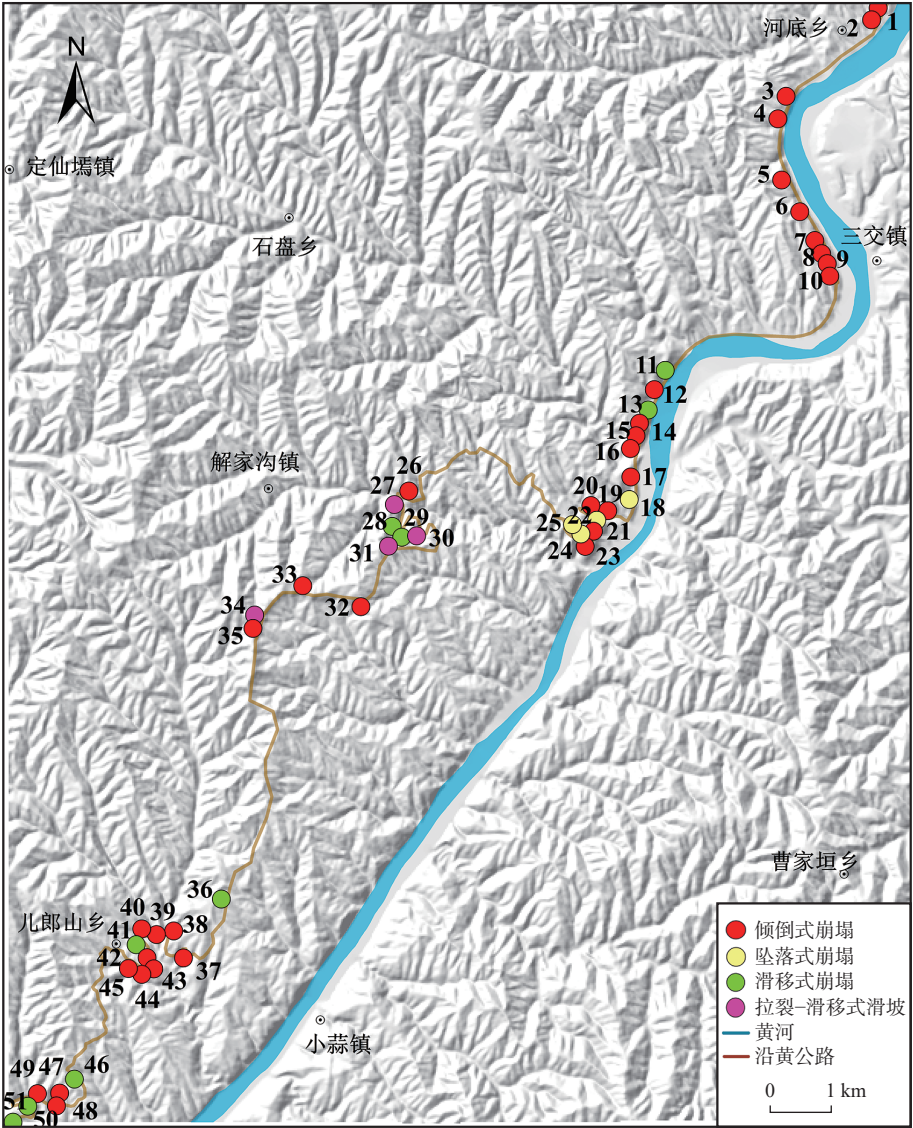


图 1 沿黄公路边坡灾害隐患分布图

Fig. 1 Distribution of hidden hazards along the Yellow Highway slope

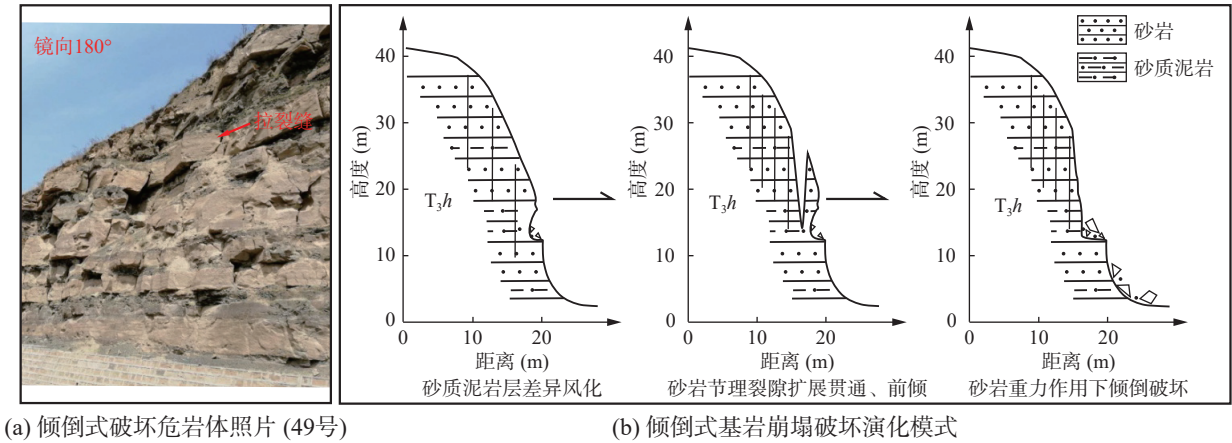


图 2 倾倒地基岩崩塌变形破坏分析

Fig. 2 Analysis of deformation and damage caused by toppling bedrock collapse

黄土斜坡因切坡,坡度较陡。受外部风化剥蚀影响,坡体顶部边缘处形成近垂直的拉张裂隙,在降雨影响下裂隙逐步向深部扩张,开裂的土体逐渐偏离母体。当开裂土体重心偏离母体时,发生倾倒式变形崩塌(图3)。

倾倒式岩质崩塌实例为清涧县解家沟乡49号崩塌隐患体,该边坡段高为21 m,宽为75 m,坡度为70°,因公路建设切坡形成。坡体节理裂隙发育,岩体向外凸出,部分裂隙较大约5 cm,砂岩块体发生错动(图2)。倾倒式土质崩塌实例为绥德县定仙娥乡沟口村崩塌(编号:2号),该崩塌体高为13 m,宽为50 m,坡度近50°,最新发生于2019年,崩塌堆积体多堆积在公路沿线内侧坡体上(图3)。

滑移式破坏模式:主要发生于黄土崩塌,人工开挖和降雨是其主要诱发因素。研究区高陡黄土斜坡剥落、侵蚀现象强烈。降水沿着高陡坡面自上而下冲刷,使得坡体因剥落侵蚀产生的裂隙发展为裂缝或落

水洞,但因坡度大导致侵蚀裂隙深度小。随着降水入渗,坡脚土体含水量增大,强度降低,剥落侵蚀现象较坡体中上部严重,造成坡底局部滑塌,随着时间推移,高陡边坡逐渐出现内凹,形成反坡,失去对上部土体的支撑。同时坡体中上部裂隙扩张,形成贯通拉裂面,边坡最终沿着较浅拉裂面产生滑动、崩塌(图4)。

滑移式崩塌实例为陕西省清涧县吴家山村沿黄公路358 km+100~110 m段黄土崩塌(编号:46号),该坡体由 Q_3 黄土组成,坡高为25 m,宽为10 m,坡度约为60°,滑塌坡面较新鲜,崩塌堆积体于坡脚,垂直节理裂隙发育,贯通性较好,降雨诱发下可再次发生滑移式崩塌(图4)。

坠落式破坏模式:发生于研究区直线型岩质边坡。边坡为砂泥岩互层,砂泥岩差异性风化导致泥岩剥落、上面砂岩层悬空。同时在重力、自然风化、降雨等作用下,岩体后缘节理裂隙逐渐加深和张裂,悬空岩体在重力作用下沿着节理裂隙面发生拉裂-坠落式崩塌

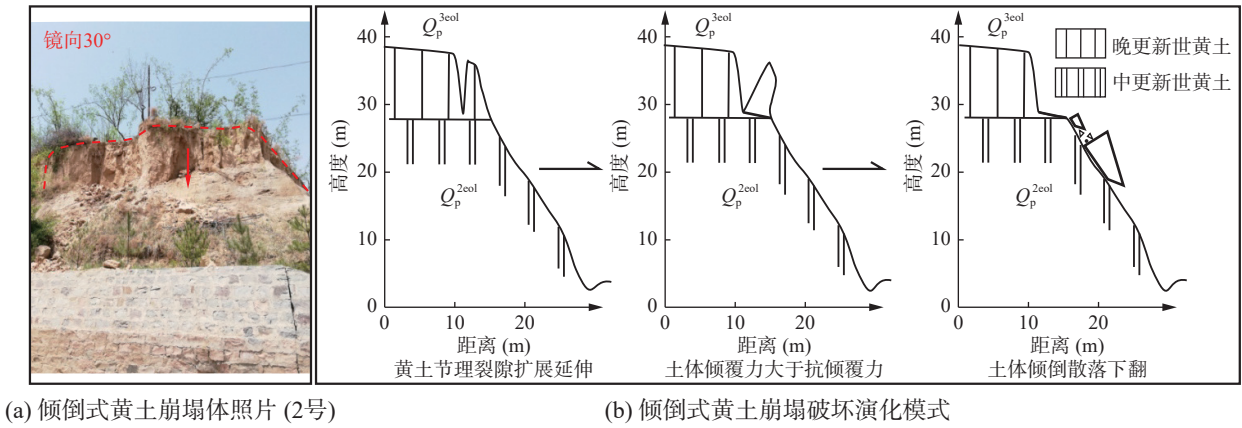


图3 倾倒式黄土崩塌变形破坏分析

Fig. 3 Analysis of collapse, deformation and failure of inverted loess

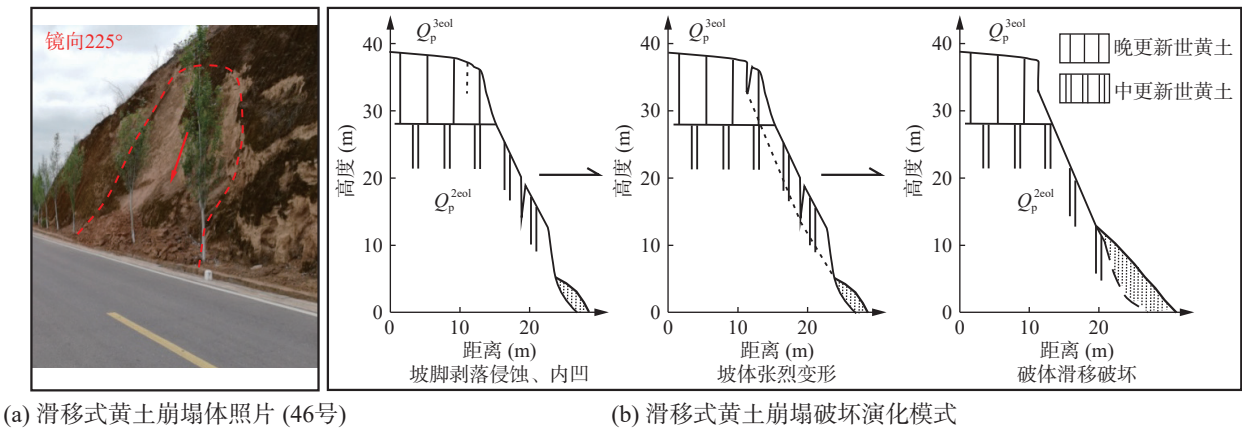


图4 滑移式黄土崩塌变形破坏分析

Fig. 4 Analysis of deformation and failure of sliding loess collapse

(图5)。

坠落式崩塌实例为清涧县石盘乡上坪村北18号基岩崩塌隐患体,该崩塌体高约为30 m,宽为200 m,近直立,砂岩巨厚,拉张裂隙发育,砂岩悬空。遇降雨或其他扰动拉张裂隙不断扩张,在自身重力作用下砂岩会发生坠落(图5)。

3.2 滑坡破坏模式

研究区3处滑坡发生于黄土层内,1处发生在黄土与基岩接触面,均为拉裂-剪切滑移式破坏模式。

黄土层内滑坡:黄土垂直节理发育,在自重卸荷与物理风化作用下,斜坡沿垂直节理向临空方向蠕动变形,导致垂直节理拉张扩展形成拉张裂隙,雨水沿拉张裂隙入渗斜坡体,导致斜坡体不断蠕动变形,拉张裂隙向下延伸在黄土内产生剪切破坏,并向下延伸发育,直至贯通形成剪切面,土体强度进一步降低,最终导致土体沿剪切面下滑形成整体滑移式破坏(图6)。

黄土-基岩接触面滑坡:主要发生在切割较深、可见基岩出露的沟谷中,其典型的斜坡结构形式是黄土+基岩结构。上覆黄土垂直裂隙发育,降水沿垂直或侧向通道入渗至基岩层。基岩隔水性相对较好,水体在基岩面上富集,饱水,造成基岩表部土体饱和而强度降低,进而转变为滑带。同时,斜坡地下水位快速抬升,稳定性不断下降,拉张裂缝不断扩展直至到基岩表部,滑坡后缘贯通,斜坡在自重作用下发生滑坡(图7)。

黄土层内滑坡实例为清涧县解家沟乡庙塬村滑坡(编号:34号),该坡体由 Q_3 和 Q_2 黄土组成,坡高为23 m,宽为100 m,坡度为 60° ,滑体平均厚约为4 m,后缘陡坎高5 m,降雨诱发下可再次发生滑动(图6)。

黄土-基岩接触面滑坡实例为清涧县解家沟乡西山里村滑坡体(编号:27号),黄体由 Q_3 和 Q_2 黄土组成,下伏基岩为 T_3h 砂泥岩互层。滑坡坡高为120 m,宽为270 m,平均坡度为 60° 。滑体厚为10~15 m,上

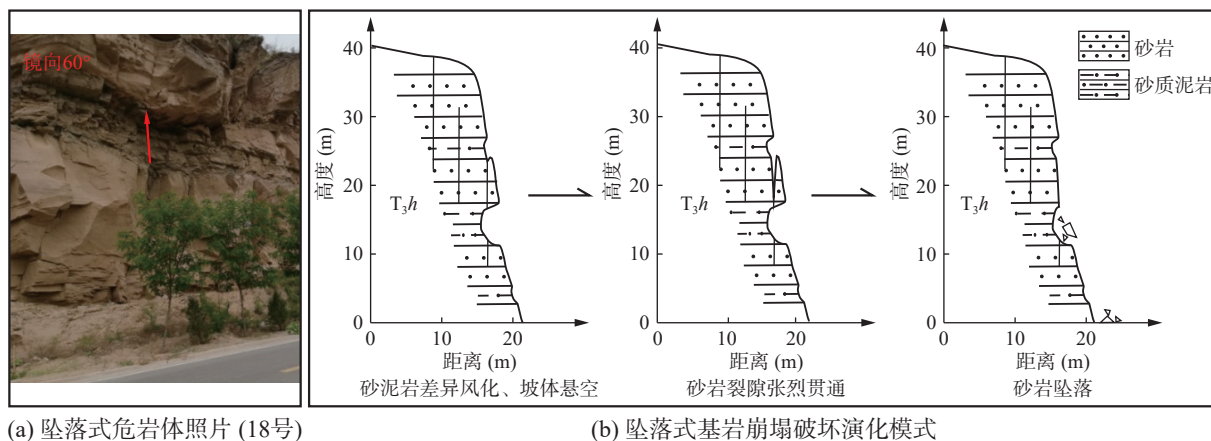


图5 坠落式基岩崩塌变形破坏分析

Fig. 5 Analysis of deformation and damage caused by falling bedrock collapse

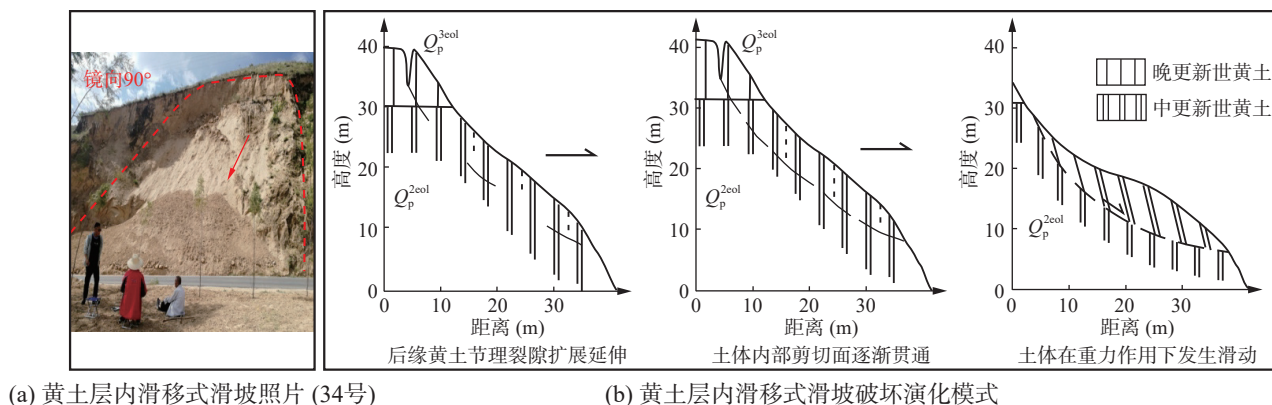


图6 黄土层内滑移式滑坡变形破坏分析

Fig. 6 Deformation and failure analysis of sliding landslides within loess layers

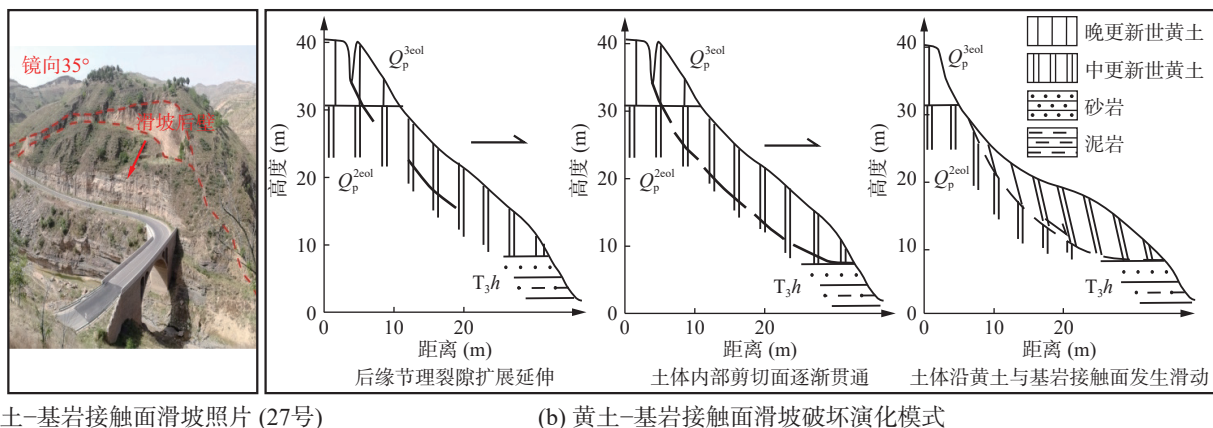


图7 黄土-基岩接触面滑移式滑坡变形破坏分析

Fig. 7 Deformation and failure analysis of sliding landslides at the loess bedrock contact surface

覆黄土发生滑动,挤压下伏砂泥岩顶层破碎,随滑体滑动,堆积于坡体,滑床整体为黄土,夹杂部分破碎砂泥岩。滑坡后壁黄土裸露,主滑面后缘陡坎出露 10 m,坡体北侧羽状裂隙发育,部分贯通,后续降水入渗后缘,发生滑坡可能性较大(图 7)。

4 风险评价

4.1 风险评价方法

地质灾害定量风险评价可通过以下公式计算(张茂省等, 2019)。

财产风险计算公式:

$$P_{(\text{prop})} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(\text{prop}:S)} \times E \quad (1)$$

式中: $P_{(\text{prop})}$ 为财产年损失; $P_{(L)}$ 为灾害发生概率; $P_{(T:L)}$ 为灾害到达承载体的概率; $P_{(S:T)}$ 为承载体时空概率; $V_{(\text{prop}:S)}$ 为承灾体易损性; E 为承灾体价值。

单人生命风险计算公式:

$$P_{(\text{LOL})} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(D:T)} \quad (2)$$

式中: $P_{(\text{LOL})}$ 为单人年死亡概率; $V_{(D:T)}$ 为人员易损性。

4.2 风险要素分析

灾害发生概率根据野外实地调查灾害发生可能性级别确定,对于失稳可能性是“可能”的相当于年发生概率 10^{-3} ,对于失稳可能性是“很可能”的确定为 10^{-2} ,几乎确定的为 10^{-1} (马红娜等, 2023)。灾害到达承载体的概率由承灾体距离风险源的远近及地形因素决定,研究区除 34 号和 51 号外灾害体威胁的承灾体均位于坡脚,灾害体失稳到达承灾体的概率为 1.0。承灾体时空概率包括固定承灾体和流动承灾体,固定承灾体时空概率为 1.0;流动承灾体考虑灾害威

胁建筑物内的人员和沿黄公路上行驶人员和车辆,时空概率分别为 0.342 和 0.208(张茂省等, 2019)。

研究区除 15 号灾害体的承灾体有窑洞外,其他承灾体均为沿黄公路及其过往车辆。财产易损性和人员易损性参照《地质灾害风险调查评价技术要求(试行)》,并结合灾害体强度、承灾体抵抗灾害能力等综合考虑赋值,财产易损性赋值为 0~1, 0 表示财产完好无损,1 表示彻底损坏;人员易损性赋值为 0~1, 0 代表未受到伤害,1 代表死亡。

4.3 风险评估

研究区灾害财产和人员风险评估结果见表 2,人员风险区划见图 8。51 处地质灾害财产年损失在 0.000 5~3.375 万元/a,其中 1.0 万元以上有 7 处,占比 13.73%;年损失在 3.0 万元/a 以上的有 3 处(15 号、17 号和 27 号),15 号和 17 号均为直线型基岩斜坡,节理裂隙极其发育,灾害发生概率极高。15 号危岩体块状大,最大粒径 5.0 m,对承灾体损失大。17 号坡下为沿黄公路和居民点,承灾体易损性高。27 号为黄土-基岩接触面滑坡,规模大,发生概率高,致使承灾体易损性高。

目前国际上无通用的因崩塌滑坡灾害引起的个人生命风险容许标准,本次采用澳大利亚地质力学学会和香港特别行政区政府共同建议的标准($1 \times 10^{-4}/a$)(毕银强等, 2016; 徐继维等, 2016),把单人年死亡概率 $1 \times 10^{-4}/a$ 以下定为低风险源,以上按 10 倍差依次定为中风险源、高风险源和极高风险源。低风险源 12 个,占比 23.53%;中风险源 9 个,占比 17.65%;高风险源 18 个,占比 35.29%;极高风险源 12 个,占比 23.53%。

4.4 风险管控

沿黄公路研究段灾害及其隐患 51 处。根据风险

表2 沿黄公路段边坡灾害风险评估结果

Tab. 2 Results of slope disaster risk assessment along the Yellow Highway section

风险源 编号	发生概 率 $P_{(L)}$	到达概 率 $P_{(T,L)}$	固定载体时 空概率 $P_{(S,T)}$	流动载体时 空概率 $P_{(S,T)}$	财产易损 性 $V_{(propS)}$	人员易损 性 $V_{(D,T)}$	承灾体 价值 E (万元)	财产年损失 $P_{(prop)}$ (万元/a)	单人年死亡 概率 $P_{(LOL)}$
1	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.60	0.60	45.00	0.270	1.25×10^{-3}
2	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.20	0.20	11.25	0.023	4.16×10^{-4}
3	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	11.25	0.034	8.32×10^{-4}
4	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.40	22.50	0.090	8.32×10^{-4}
5	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	146.25	0.585	1.04×10^{-3}
6	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	112.50	0.338	8.32×10^{-4}
7	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	56.25	0.169	8.32×10^{-4}
8	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	33.75	0.135	1.04×10^{-3}
9	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.20	0.30	56.25	0.011	6.24×10^{-5}
10	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	67.50	0.020	8.32×10^{-5}
11	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	33.75	0.010	8.32×10^{-5}
12	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.60	67.50	0.270	1.25×10^{-3}
13	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.60	0.70	33.75	2.025	1.46×10^{-2}
14	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	22.50	0.090	1.04×10^{-3}
15	10^{-1}	1.0	1.0	0.55	0.60	0.80	55.00	3.300	4.40×10^{-2}
16	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	112.50	0.034	8.32×10^{-5}
17	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.50	0.70	67.50	3.375	1.46×10^{-2}
18	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.50	0.60	45.00	2.250	1.25×10^{-2}
19	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.30	22.50	0.009	6.24×10^{-5}
20	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.20	0.30	22.50	0.005	6.24×10^{-5}
21	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.60	11.25	0.045	1.25×10^{-3}
22	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.60	6.75	0.270	1.25×10^{-2}
23	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.60	0.60	22.50	0.135	1.25×10^{-3}
24	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	15.75	0.063	1.04×10^{-3}
25	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.40	13.50	0.540	8.32×10^{-3}
26	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.20	0.30	33.75	0.007	6.24×10^{-5}
27	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.50	0.70	60.75	3.038	1.46×10^{-2}
28	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	22.50	0.007	8.32×10^{-5}
29	10^{-2}	0.3	1.0	0.208	0.20	0.10	11.25	0.007	6.24×10^{-5}
30	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.30	22.50	0.007	6.24×10^{-5}
31	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.20	22.50	0.068	4.16×10^{-4}
32	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.5	0.60	15.75	0.079	1.25×10^{-3}
33	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	15.75	0.630	1.04×10^{-2}
34	10^{-1}	0.5	1.0	0.208	0.30	0.20	9.00	0.135	2.08×10^{-3}
35	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.5	0.70	4.50	0.225	1.46×10^{-2}
36	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.20	1.58	0.000 5	4.16×10^{-5}
37	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	22.50	0.900	1.04×10^{-2}
38	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.5	0.60	23.63	1.181	1.25×10^{-2}
39	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.50	0.60	11.25	0.563	1.25×10^{-2}
40	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.5	0.50	33.75	1.688	1.04×10^{-2}
41	10^{-3}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.20	27.00	0.008	4.16×10^{-5}
42	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.5	0.60	13.50	0.675	1.25×10^{-3}
43	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.50	22.50	0.900	1.04×10^{-3}
44	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.40	15.75	0.630	8.32×10^{-3}
45	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.40	0.40	20.93	0.837	8.32×10^{-3}
46	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.30	2.25	0.068	6.24×10^{-4}
47	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.60	0.70	45.00	0.270	1.46×10^{-3}
48	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.60	0.70	11.25	0.068	1.46×10^{-3}
49	10^{-1}	1.0	1.0	0.208	0.50	0.50	16.88	0.844	1.04×10^{-2}
50	10^{-2}	1.0	1.0	0.208	0.30	0.40	22.50	0.068	8.32×10^{-4}
51	10^{-2}	0.3	1.0	0.208	0.20	0.20	22.50	0.014	1.25×10^{-4}

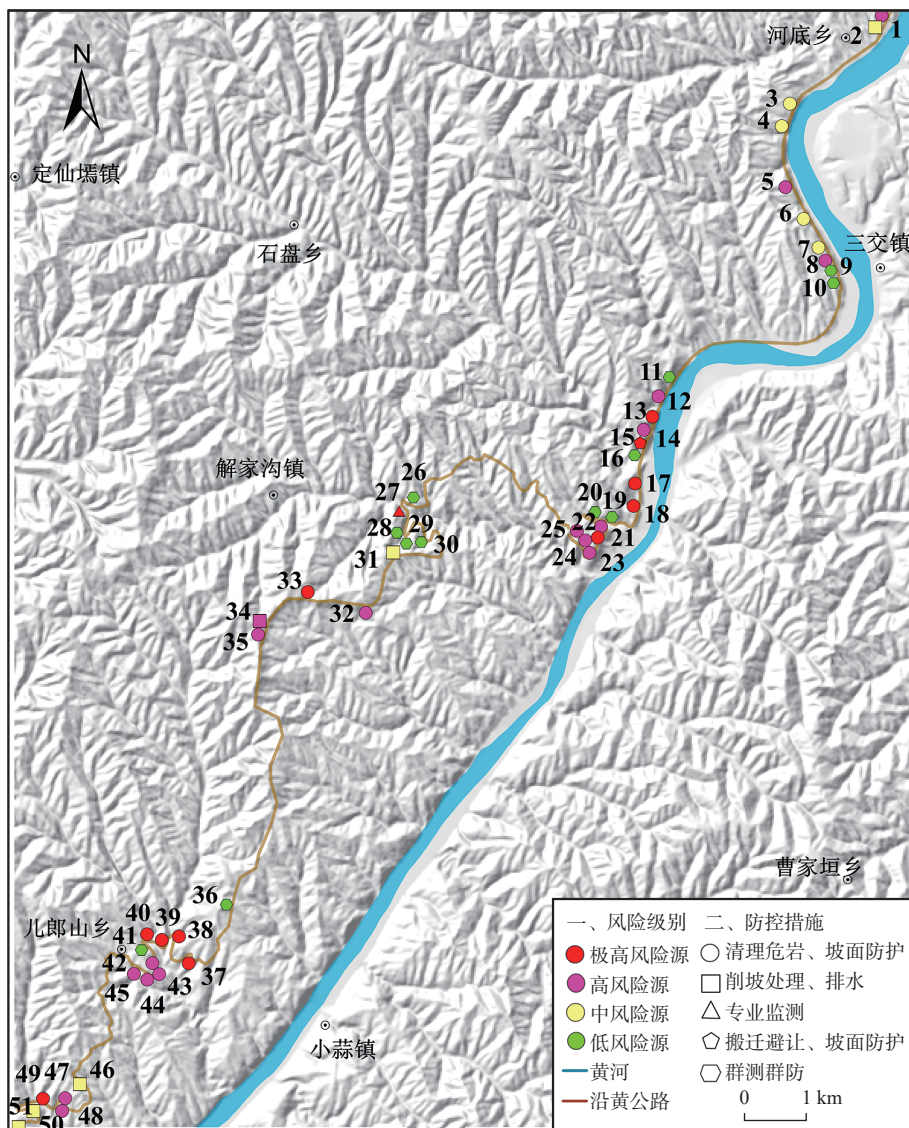


图8 沿黄公路边坡灾害风险区划及防控措施图

Fig. 8 Risk zoning and prevention measures for slope disasters along the Yellow Highway

定量评估结果,对单人年死亡概率 $P_{(LOL)} < 10^{-4}$ 且财产年损失 $P_{(prop)} < 0.1$ 万元的采取群策群防措施;对单人年死亡概率 $P_{(LOL)} > 10^{-4}$ 或财产年损失 $P_{(prop)} > 0.1$ 万元的灾害体采取搬迁避让、坡面防护、削坡处理、专业监测等相应的风险管控措施。

(1)搬迁避让:建议对15号基岩崩塌隐患威胁范围内的4户居民搬迁避让,同时对坡体坡面采取拉防护网等措施防护。

(2)建立专业地质灾害监测体系:建议在清涧县解家沟乡西山里村滑坡体(27号)建立一体化自动监测站。

(3)工程防治措施:针对1号、3~8号、12~14号、17~18号、21~25号、32~33号、35号、37~40号、

42~45号、47~49号等基岩崩塌及隐患体,建议采取清理坡面松动危岩,拉防护网等措施。针对2号、31号、34号、46号、50~51号等土质崩塌及滑坡体,建议采取坡体后缘削坡、修建排水沟等防治措施。

(4)群策群防:针对9~11号、16号、19~20号、26号、28~30号、36号、41号等低风险源,建议采取群策群防措施。群策群防人员定期目视检查,雨季加强巡查。

5 结论

(1)研究区地质灾害多发,共识别地质灾害及其隐患51处,其中崩塌7处,崩塌隐患40处,滑坡3处,

滑坡隐患1处。地质灾害以小型基岩崩塌为主,基岩崩塌是研究区主要的灾害类型。

(2)研究区崩塌包括土质崩塌和岩质崩塌,有倾倒式、滑移式和坠落式3种破坏模式,其中以倾倒式为主,滑移式次之。滑坡较少,均为黄土滑坡,拉裂—剪切滑移式破坏模式。

(3)针对每处边坡地质灾害风险源开展了定量财产风险和人员风险评估。同时根据边坡破坏模式及风险评估结果,对单人年死亡概率 $P_{(LOL)} < 10^{-4}$ 且财产年损失 $P_{(prop)} < 0.1$ 万元的地质灾害采取群策群防措施;对单人年死亡概率 $P_{(LOL)} > 10^{-4}$ 或财产年损失 $P_{(prop)} > 0.1$ 万元的制定了专业监测、搬迁避让、工程防治等相应的风险管控措施建议。

参考文献(References):

- 毕银强,唐亚明,张茂省,等.公路沿线危岩崩塌风险定量评估—以甘肃S306沿线磨石咀崩塌为例[J].*防灾科技学院学报*, 2016, 18(2): 35–40.
- BI Yinqiang, TA Yaming, ZHANG Maosheng, et al. The Quantitative Risk Assessment for Perilous Rockfall of Cut Slope along Road-A Case Study on the Moshiju Rockfall in Gansu along S306[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2016, 18(2): 35–40.
- 陈晓刚,李红卫,张乾翼.重庆某高速公路危岩崩塌变形特征及治理措施[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(3): 43–51.
- CHEN Xiaogang, LI Hongwei, ZHANG Qianyi. Deformation Characteristics and Treatment Measures of Dangerous Rock Collapse in an Expressway in Chongqing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 43–51.
- 冯凡,唐亚明,潘学树,等.不同尺度下地质灾害风险评价方法探讨—以陕西吴堡县为例[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 115–124.
- FENG Fan, TANG Yaming, PAN Xueshu, et al. An Attempt of Risk Assessment of Geological Hazards in Different Scales: A Case Study in Wubao County of Shaanxi Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 115–124.
- 黄强兵,康孝森,王启耀,等.山西吕梁黄土崩滑类型及发育规律[J].*工程地质学报*, 2016, 24(1): 64–72.
- HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, WANG Qiyao, et al. Types and Characteristics of Loess Landslides and Collapses in Luliang Area of Shanxi Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(1): 64–72.
- 蒋瑜阳,向波,王东,等.震后山区公路地质灾害风险评估体系研究—以川九公路震后恢复重建为例[J].*地震工程学报*, 2023, 45(5): 1026–1034.
- JIANG Yuyang, XIANG Bo, WANG Dong, et al. Risk Evaluation System for Geological Disasters of Highways in Mountainous Regions after Earthquakes: A Case Study of the Postearthquake Restoration and Reconstruction of the Chuanzhuzhi-Jiuzhaigou Highway[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(5): 1026–1034.
- 李同录,龙建辉,李新生.黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J].*工程地质学报*, 2007, 15(4): 500–505.
- LI Tonglu, LONG Jianhui, LI Xinsheng. Types of Loess Landslides and Methods for Their Movement Forecast[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 500–505.
- 廖小平,徐风光,蔡旭东,等.香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 121–129.
- LIAO Xiaoping, XU Fengguang, CAI Xudong, et al. Development Characteristics and Susceptibility Zoning of Slope Geological Hazards in Xiangli Expressway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 121–129.
- 马红娜,刘江,冯卫,等.地质灾害风险评估在国土空间规划中的应用—以陕北榆林高西沟为例[J].*西北地质*, 2023, 56(3): 223–231.
- MA Hongna, LIU Jiang, FENG Wei, et al. Application of Geological Hazard Risk Assessment in Territorial Space Planning: A Case Study of Gaoxigou Village in Yulin City of Northern Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 223–231.
- 彭建兵,林鸿州,王启耀,等.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*, 2014, 22(4): 684–691.
- PENG Jianbing, LIN Hongzhou, WANG Qiyao, et al. The Critical Issues and Creative Concepts in Mitigation of Loess Geological Hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 684–691.
- 彭军,李翔宇,闫蕊鑫,等.陕北地区黄土崩塌破坏模式分类及防控对策研究[J].*长江科学院院报*, 2015, 32(10): 11–16.
- PENG Jun, LI Xiangxu, YAN Ruixin, et al. Failure Modes Classification and Countermeasures of Loess Collapse in Northern Shaanxi Area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(10): 11–16.
- 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等.黄土高原地质灾害发生规律[J].*山地学报*, 2019, 37(5): 737–746.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, et al. On the Regularity of Geological Hazard on the Loess Plateau in China[J]. *Mountain Research*, 2019, 37(5): 737–746.
- 唐亚明,冯卫,毕银强,等.基于风险评价的黄土滑坡分类及特征[J].*地质通报*, 2015, 34(11): 2092–2099.
- TANG Yaming, FENG Wei, BI Yinqiang, et al. The Classification and Features of Loess Landslide Based on Risk Assessment[J].

- [Geological Bulletin of China](#), 2015, 34(11): 2092–2099.
- 王根龙, 张茂省, 苏天明, 等. 黄土崩塌破坏模式及离散元数值模拟分析[J]. [工程地质学报](#), 2011, 19(4): 541–549.
- WANG Genlong, ZHANG Maosheng, SU Tianming, et al. Collapse Failure Modes and Dem Numerical Simulation for Loess Slopes [J]. [Journal of Engineering Geology](#), 2011, 19(4): 541–549.
- 伍运霖, 刘天翔, 王丰, 等. 考虑长期蠕变劣化的昔格达黏土岩公路路堑边坡稳定性评价及防护对策建议—以西攀高速公路边坡为例[J]. [中国地质灾害与防治学报](#), 2024, 35(4): 56–66.
- WU Yunlin, LIU Tianxiang, WANG Feng, et al. Stability Assessment of the Road Cut Slopes in the Xigeda Mudstone Considering Long-term Creep Deterioration and Suggestion for Countermeasures: A Case Study of Cut Slopes along the Xichang-Panzhihua Expressway[J]. [The Chinese Journal of Geological Hazard and Contrlo](#), 2024, 35(4): 56–66.
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. [山地学报](#), 2008, 26(3): 364–371.
- XU Ling, DAI Fuchu, KUANG Guolin, et al. Types and Characteristics of Loess Landslides at Heifang Loess Plateau, China[J]. [Mountain Research](#), 2008, 26(3): 364–371.
- 徐继维, 张茂省. 中国地质灾害风险允许标准[J]. [灾害学](#), 2016, 31(3): 127–130.
- XU Jiwei, ZHANG Maosheng. Risk Criteria of Geohazards in China[J]. [Journal of Catastrophology](#), 2016, 31(3): 127–130.
- 薛强, 唐亚明, 白轩. 吕梁山区大宁县城地质灾害破坏模式及风险管控[J]. [山地学报](#), 2021, 39(1): 151–162.
- XUE Qiang, TANG Yaming, BAI Xuan. Failure Modes and Risk Control of Geohazards in the County Town of Daning in the Lüliang Mountains, China[J]. [Mountain Research](#), 2021, 39(1): 151–162.
- 杨柳, 牟鑫亮, 李晨, 等. 延安市宝塔区地质灾害风险评估[J]. [山地学报](#), 2020, 38(5): 679–690.
- YANG Liu, MOU Xinliang, LI Chen, et al. Risk Assessment of Geological Hazards in Baota District, Yan'an City, Shaanxi, China [J]. [Mountain Research](#), 2020, 38(5): 679–690.
- 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探[J]. [中国地质灾害与防治学报](#), 2024, 35(3): 1–12.
- YUE Zhongqi. Study on the Instability Condition and Landslide Mechanism of Subgrade Slope in Mei-Da Expressway[J]. [The Chinese Journal of Geological Hazard and Contrlo](#), 2024, 35(3): 1–12.
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践[J]. [西北地质](#), 2019, 52(2): 125–135.
- ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and Practices for the Investigation and Risk Assessment of Geo-hazards in Mountainous Towns[J]. [Northwestern Geology](#), 2019, 52(2): 125–135.