

引用格式: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

# 吕梁山区大宁县城地质灾害破坏模式及风险管控

薛强,唐亚明,白轩

(中国地质调查局西安地质调查中心 自然资源部黄土高原地质灾害野外科学观测研究站,西安 710054)

**摘要:**大宁县城地处晋西黄土高原,地形破碎,黄土滑坡崩塌等地质灾害多发,严重制约着城区工程建设与高质量发展。本文通过 1:10 000 比例尺地质灾害野外调查和统计分析,总结了大宁县城地质灾害破坏演化模式,定量评估了地质灾害财产风险和人员风险。结果表明:(1)大宁县城周边斜坡地段共发育地质灾害 29 处,主要类型为滑坡和崩塌,滑坡均为黄土滑坡,其破坏模式大体可分为“拉裂—推移式浅表层破坏模式”和“滑移—压致拉裂式中深层破坏模式”2 类;崩塌包括土质崩塌和岩质崩塌,其破坏模式可分为“滑移式破坏模式”和“倾倒式破坏模式”2 类。(2)29 处地质灾害财产年损失为 0.00016 ~ 5.859 万元/a,单人年死亡概率为  $2.205 \times 10^{-6}$  ~  $2.736 \times 10^{-2}$ 。(3)根据斜坡变形破坏模式和风险评估结果,对大宁县城地质灾害制定了搬迁避让、专业监测预警体系建设、工程防治等相应的风险管控措施建议。研究成果为开展山区城镇地质灾害风险调查评估与管控工作提供了技术示范。

**关键词:**黄土灾害;破坏模式;风险分析;吕梁山区

**中图分类号:** P694

**文献标志码:** C

吕梁山区是我国集中连片特困地区之一,也是我国地质灾害高易发区之一,地质灾害发育数量多、分布广,严重制约着该地区生态保护与高质量发展<sup>[1]</sup>。近年来,随着经济的快速发展和城镇化进程,农村人口大量进入县城,城镇规模不断扩大。受地势制约,县城可用于建房的平地较少,“向沟发展”成为县城扩张的主要途径,大量人口在县城周边支沟内开挖坡脚建窑建房,严重干扰和破坏了本身就脆弱的地质环境条件,加剧了滑坡崩塌等地质灾害的发生<sup>[2-3]</sup>。这些城镇建设活动大多没有进行建设用地地质灾害危险性评估,存在选址与建设的不合理性,随意的开挖坡脚改变了坡体原有的应力平衡状态,常常引发滑坡崩塌等地质灾害发生,威胁县城居住区人民的生命财产安全<sup>[4]</sup>。

中国山区面积大,山区城镇数量众多,人地关系复杂。城镇化过程中造成重大人员伤亡的地质灾害时有发生,山区城镇地灾防治已成为我国地质灾害治理的关键<sup>[5]</sup>。地质灾害风险评估和管控是防灾减灾的有效途径,欧美等发达国家于 20 世纪基本完成了 1:10 000 或 1:5 000 地质灾害调查与风险评估,并建立了地质灾害风险管理体系<sup>[6]</sup>。我国 1999 年开始有计划地开展了覆盖全国山地丘陵区各县(市)地质灾害调查与区划(1:100 000)工作,2005 年开始部署实施了地质灾害高易发区地质灾害详细调查(1:50 000)工作,2013 年开始在典型县城部署实施了部分山区城镇地质灾害调查与风险评估(1:10 000)工作<sup>[7]</sup>。通过以上有计划递进式的地质灾害调查与风险评估,有效减少了地质灾害造成的人

收稿日期(Received date):2020-05-28;改回日期(Accepted date):2021-01-08

基金项目(Foundation item):国家重点研发计划项目(2018YFC1504700);中国地质调查局项目(DD20189270,DD20160276)。[National Key Research and Development Program of China (2018YFC1504700); Project of China Geological Survey (DD20189270, DD20160276)]

作者简介(Biography):薛强(1979-),男,宁夏固原人,正高级工程师,主要研究方向:地质灾害调查与风险评估。[XUE Qiang (1979-), male, born in Guyuan, Ningxia province, senior engineer, research on geo-hazards investigation and risk assessment] E-mail: xqiang@mail.cgs.gov.cn

员伤亡和财产损失,取得重要的防灾减灾效益。近 10 余年来,我国学者在地质灾害风险评估方面探索了许多有益的工作<sup>[8-11]</sup>,然而,针对山区城镇的地质灾害风险管控目前仍处于起步阶段。

本文在吕梁山区大宁县城 1:10 000 比例尺地质灾害调查的基础上,采用统计研究的方法,分析了县城地质灾害变形破坏演化模式,定量评估了城区地质灾害财产风险和人员风险,并根据风险评估结果,制定了大宁县城地质灾害风险管控措施建议,为城镇地质灾害防治与管理提供技术支撑。

1 研究区概况

大宁县地处晋西黄土高原吕梁山区,县城位于昕水河与义亭河交汇处,河谷较宽,最宽处达 450 m,昕水河自东向西从大宁县城区流过,义亭河自南向北汇入昕水河。研究区域为大宁县城城区,地理位置为 110°43′53″E~110°45′03″E,36°27′37″N~36°28′15″N。城区总体地势为南高北低、东高西低。城区地貌可划分为黄土梁峁区和河谷阶地区 2 种类型,沟壑纵横,地形切割强烈。大宁县多年平均降水量 536.9 mm,降雨多集中在每年的 7—9 月份,约占全年降水量的 60%,且多以暴雨形式出现。

县城北坡位于昕水河北岸,为大宁县城主城区所在地,同时也是地质灾害发育数量较多和人类活动最为强烈的地区,北坡前缘为大宁县城繁华地带,坡脚开挖严重,窑洞、平房、楼房等建筑密集。县城北坡斜坡结构类型主要为黄土+古土壤斜坡,斜坡主体由上、中更新统黄土组成,其中  $Q_p^3$  黄土厚约

5~10 m, $Q_p^2$  黄土厚约 30~70 m,土体中夹有数条倾斜和近水平状古土壤层。县城北坡斜坡段地形破碎、冲沟发育、土质疏松、卸荷剥落现象严重,地质灾害类型主要为黄土滑坡和崩塌。

县城南坡斜坡结构类型主要为岩质斜坡,地层岩性为三叠系中统二马营组砂泥岩。县城南坡人员居住稀少,地质灾害类型主要由砂泥岩差异风化而形成的公路边坡崩塌隐患,威胁对象主要为公路沿线的行人和车辆。

2 地质灾害破坏模式

形成滑坡崩塌的地质环境条件和诱发因素不同,因此表现出不同的变形特征和破坏模式。对滑坡崩塌变形破坏模式进行分类有利于更加深入地认识其形成机理,从而更有针对性的进行风险管控。

2.1 破坏模式分类

通过 1:10 000 地质灾害野外调查,大宁县城周边斜坡段共发育地质灾害及隐患点 29 处。按斜坡变形破坏模式分类,其中拉裂—推移式浅表层滑坡 7 处,滑移—压致拉裂式中深层滑坡 3 处,滑移式崩塌 17 处,倾倒式崩塌 2 处(表 1、图 1)。县城北坡 26 处地质灾害均为黄土斜坡,坡体上人类工程活动强度大,斜坡陡峻,土体松散,卸荷剥落现象严重,在降雨等诱发因素作用下发生滑坡或崩塌灾害的可能性较大;县城南坡 3 处地质灾害为岩质斜坡或岩土混合斜坡,主要为人工开挖边坡修路造成,坡体节理裂隙发育,由于砂泥岩的差异性风化致使边坡部分悬空,在降雨的作用下极易发生崩塌灾害。

表 1 大宁县城地质灾害变形破坏模式分类

Tab. 1 Classification of deformation and failure modes of geohazards in the county town of Daning

编号	灾害类型	破坏模式分类	编号	灾害类型	破坏模式分类	编号	灾害类型	破坏模式分类
1 号	滑坡隐患	拉裂—推移式浅表层破坏	11 号	崩塌隐患	滑移式破坏	21 号	崩塌隐患	滑移式破坏
2 号	崩塌	滑移式破坏	12 号	崩塌	滑移式破坏	22 号	崩塌隐患	滑移式破坏
3 号	崩塌	滑移式破坏	13 号	崩塌隐患	滑移式破坏	23 号	崩塌隐患	滑移式破坏
4 号	崩塌隐患	滑移式破坏	14 号	滑坡隐患	滑移—压致拉裂式中深层破坏	24 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏
5 号	崩塌隐患	滑移式破坏	15 号	滑坡	滑移—压致拉裂式中深层破坏	25 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏
6 号	崩塌隐患	滑移式破坏	16 号	崩塌	滑移式破坏	26 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏
7 号	崩塌隐患	滑移式破坏	17 号	崩塌隐患	滑移式破坏	27 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏
8 号	崩塌隐患	倾倒式破坏	18 号	崩塌隐患	滑移式破坏	28 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏
9 号	崩塌隐患	倾倒式破坏	19 号	滑坡	滑移—压致拉裂式中深层破坏	29 号	崩塌隐患	滑移式破坏
10 号	滑坡	拉裂—推移式浅表层破坏	20 号	崩塌隐患	滑移式破坏			

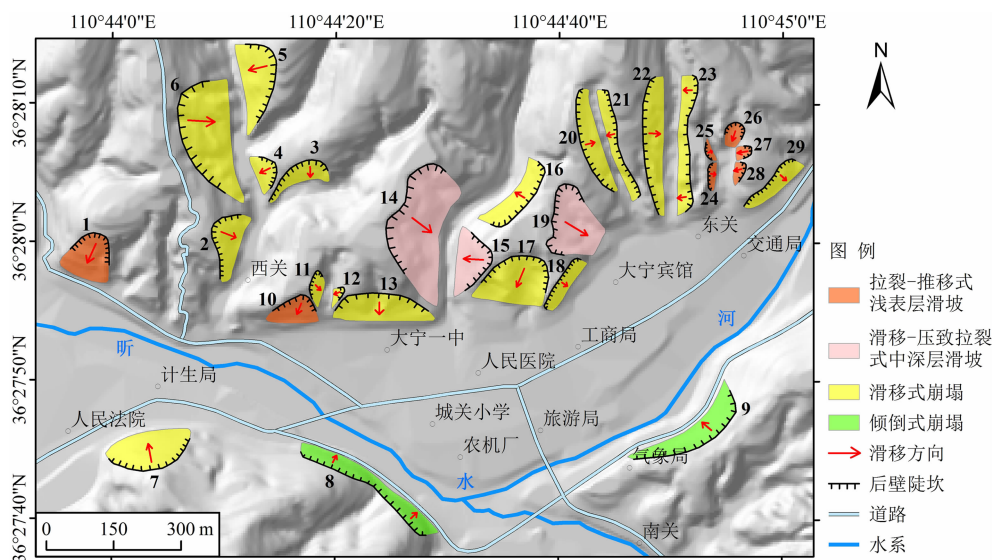


图1 大宁县城地质灾害隐患分布图

Fig. 1 Distribution map of potential geohazards in the county town of Daning in the Lüliang Mountains, China

## 2.2 滑坡破坏模式

前人对滑坡变形破坏模式进行了大量研究,并对其变形破坏机制及模式进行了分类。滑坡变形破坏简单分为牵引式(后退式)和推移式(前进式)2种基本形式,根据斜坡演化中内部应力状态的调整轨迹、途径和现象又可细分为蠕滑—拉裂、滑移—压致拉裂、滑移—拉裂、滑移—弯曲、弯曲(倾倒)—拉裂、塑流—拉裂等多种地质力学模式<sup>[12-13]</sup>。

吕梁山区大宁县城周边发育的滑坡均为黄土滑坡,且多以中小型浅层滑坡为主。参照前人破坏模式分类方法,大宁县城周边滑坡破坏模式大体可分为“拉裂—推移式浅表层破坏模式”和“滑移—压致拉裂式中深层破坏模式”2类。

### (1) 拉裂—推移式浅表层破坏模式

该类滑坡破坏模式在黄土高原地区最为发育,发育地层以上更新统马兰黄土和坡积层为主,其发生过程与降雨关系密切。一般情况下,降雨在黄土斜坡中的均匀入渗深度不超过5 m<sup>[14]</sup>。该类滑坡发生的主要原因是降雨过后斜坡浅表层黄土含水率快速升高,强度锐减,从而引发斜坡浅表层滑动破坏<sup>[15]</sup>。浅表层滑坡前期变形迹象小、发生速度快,多发生在黄土高原高陡斜坡地带。黄土高原山区城镇周边斜坡由于开挖坡脚建窑建房等人类工程活动的扰动,打破了斜坡原有的应力平衡状态,并使斜坡变得高陡,在强降雨作用下极易发生浅表层变形破坏,严重威胁着城镇周边居民安全<sup>[16]</sup>。

拉裂—推移式浅表层滑坡主要发育在大于40°的陡峻黄土斜坡地段,坡型以直线型为主,坡高一般小于50 m,滑体厚度小于10 m,滑面较为平直,滑床可见明显擦痕。这种浅表层滑坡在植被较发育的黄土斜坡上较之裸露的斜坡上更容易发生,因为植被一方面防护了坡面,另一方面又增加了坡体自重,并会产生植物根劈作用。在强降雨条件下,降水沿黄土节理裂隙及植物根系快速入渗和扩散,斜坡浅表层含水率快速升高,强度锐减,裂缝进一步扩张推移,在重力作用下浅表层土体短时间内完成“拉裂—推移—贯通—滑脱”过程,形成拉裂—推移式浅表层滑坡(图2)。

拉裂—推移式浅表层滑坡实例为大宁县城区东关幸福沟浅层滑坡群(编号:24号、25号、26号、27号;24号坐标:110°44′58.98″E, 36°28′5.87″N),滑坡分布于幸福沟两侧斜坡地带,坡体由薄层 $Q_3^p$ 黄土和厚层 $Q_2^p$ 黄土组成,斜坡坡高30 m,平均坡度约50°,滑体厚2~5 m,在降雨的诱发下可再次发生滑动或局部破坏(图3和图4)。

### (2) 滑移—压致拉裂式中深层破坏模式

滑移—压致拉裂式破坏也是大宁县城区周边黄土斜坡变形失稳的主要模式,发育地层以厚层黄土为主。黄土是一种结构疏松、具有大孔隙的特殊土,其内部垂直节理发育,为降雨的入渗提供了快速通道<sup>[17-18]</sup>。降水沿着黄土节理、裂隙和落水洞等优势通道快速入渗,从而导致黄土滑带土体含水率升高,

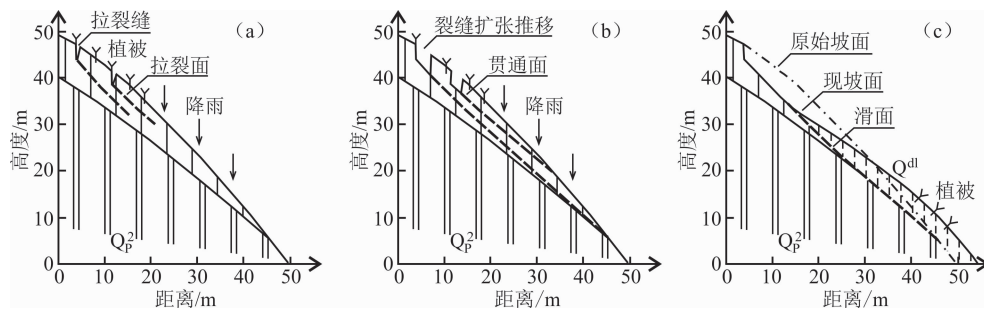


图 2 拉裂—推移式浅表层滑坡破坏演化模式：

(a) 拉裂阶段；(b) 推移贯通阶段；(c) 整体滑脱阶段

Fig. 2 Tensile cracking-pushing shallow landslide failure evolution mode:

(a) tensile cracking stage; (b) pushing breakthrough stage; (c) general detachment stage



图 3 大宁县城城区幸福沟西坡浅层滑坡

Fig. 3 Shallow landslide on the western slope of Xingfu gully in the county town of Daning

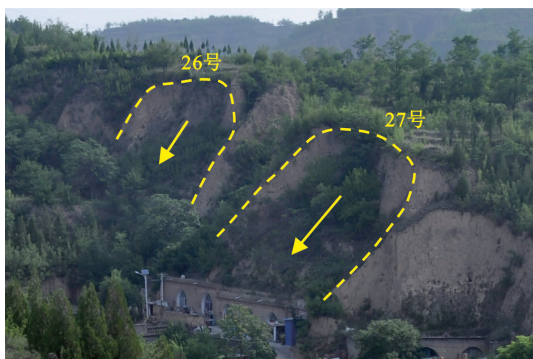


图 4 大宁县城城区幸福沟东坡浅层滑坡

Fig. 4 Shallow landslide on the eastern slope of Xingfu gully in the county town of Daning

土体强度降低,产生黄土滑坡。该类滑坡多发生在高陡黄土斜坡地带,黄土高原山区城镇多建在河谷区,其周边斜坡多高陡,且大多发育节理裂隙和落水洞等降水优势通道,在降雨入渗作用下易发生中深层滑坡灾害,严重威胁着城镇周边居民安全。

滑移—压致拉裂式滑坡主要诱发因素为降雨,

降雨之后雨水在斜坡表面汇集,沿斜坡体发育的节理裂隙或落水洞等优势通道快速入渗,并在斜坡底部扩散,降低了黄土强度,在基岩—黄土接触面形成软弱带。斜坡体在重力作用下,沿软弱带产生压致和蠕滑变形,形成滑移面。随着降水的不断入渗,滑移面逐渐向斜坡中上部发展,形成贯通滑面,且在斜坡后缘沿垂直节理产生拉裂,最终产生滑动破坏形成黄土滑坡<sup>[19]</sup>。在该类滑坡变形演化过程中,降雨经历了“降水汇集—优势入渗—底部扩散”的过程,斜坡体随着降雨过程,经历了“滑移—压致—拉裂—下滑”过程(图 5)。

滑移—压致拉裂式中深层滑坡实例为大宁县城城区桥沟东坡滑坡(编号:15 号;坐标:110°44′35.81″E, 36°27′58.87″N),该滑坡为黄土—基岩接触面滑坡,破坏模式为滑移—压致拉裂式中层破坏,滑体由  $Q_p^3$  和  $Q_p^2$  黄土组成,下伏基岩为三叠系二马营组( $T_2e$ )砂泥岩互层。滑坡坡高 90 m,宽 60 m,平均坡度约 50°,滑体平均厚约 15 m,左壁陡坎高 10 m,在降雨作用下有发生局部边坡崩塌的可能(图 6)。

### 2.3 崩塌破坏模式

大宁县城崩塌破坏模式主要包括“滑移式破坏模式”和“倾倒式破坏模式”2 类。

#### (1) 滑移式破坏模式

滑移式破坏模式主要发生于土质边坡,其主要诱发因素为人工开挖。在黄土高原地区,随着山区城镇化进程的加快,“向山发展、向沟发展”成为城镇发展的必然趋势,不合理的边坡开挖势必诱发大量的崩塌灾害。

调查发现,许多开挖型黄土边坡,剥落侵蚀现象强烈。降雨沿着高陡黄土边坡坡面进行自上而下的



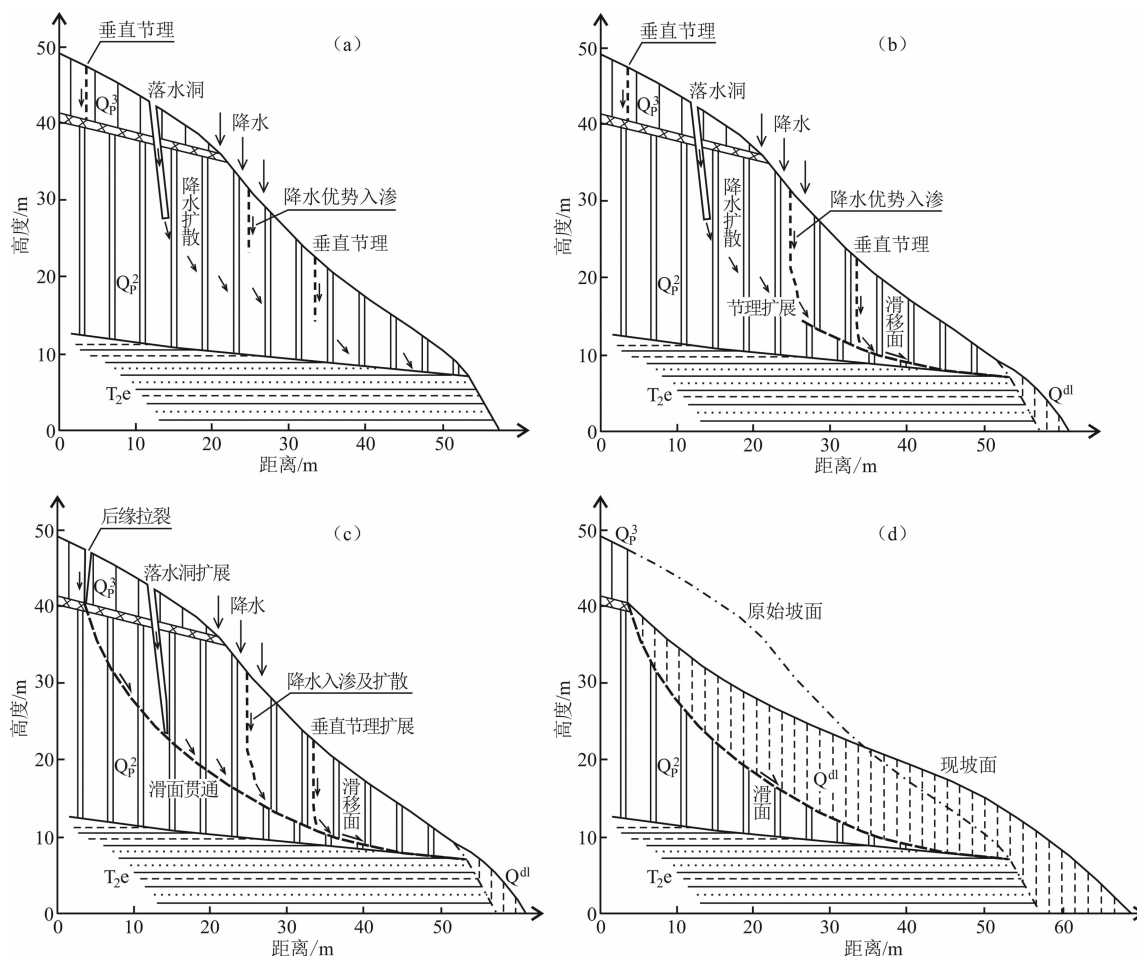


图5 滑移—压致拉裂式中深层滑坡破坏演化模式：

(a)降水优势入渗及扩散阶段；(b)滑移压致阶段；(c)拉裂贯通阶段；(d)滑动破坏阶段

Fig.5 Slipping-compression cracking intermediate-to-deep-layer landslide failure evolution mode: (a) precipitation-dominant infiltration and diffusion stage; (b) slipping compression stage; (c) tensile cracking breakthrough stage; (d) sliding failure stage

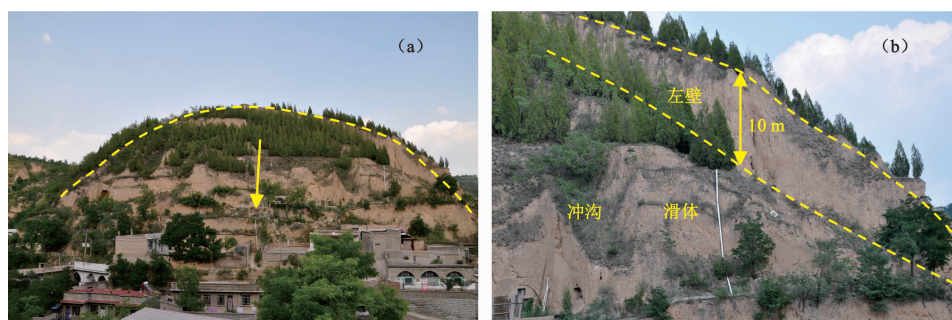


图6 大宁县城城区桥沟东坡中层滑坡:(a)滑坡全貌;(b)滑坡左壁陡坎

Fig.6 Intermediate landslide on the eastern slope of Qiao gully in the county town of Daning;

(a) panorama of the landslide; (b) left scarp of the landslide

汇集和冲刷,使得坡脚土体含水量增大,强度降低,坡脚的剥落侵蚀现象较坡体中上部更加严重,并产生坡脚局部滑塌。随着坡脚滑塌范围的逐渐扩大,坡体出现内凹,形成反坡,失去对上部土体的支撑。同时,坡体中上部的节理裂隙开始张裂,并形成落水洞或拉

张裂缝,为雨水在坡体内部的扩散提供了便利条件。在降雨的进一步冲刷作用下,坡体内部形成贯通拉裂面,边坡最终沿着拉裂面产生滑动破坏。在该类破坏模式中,黄土边坡主要经历了“剥落侵蚀—坡体内凹—坡体张裂—滑移破坏”过程(图7)<sup>[15]</sup>。

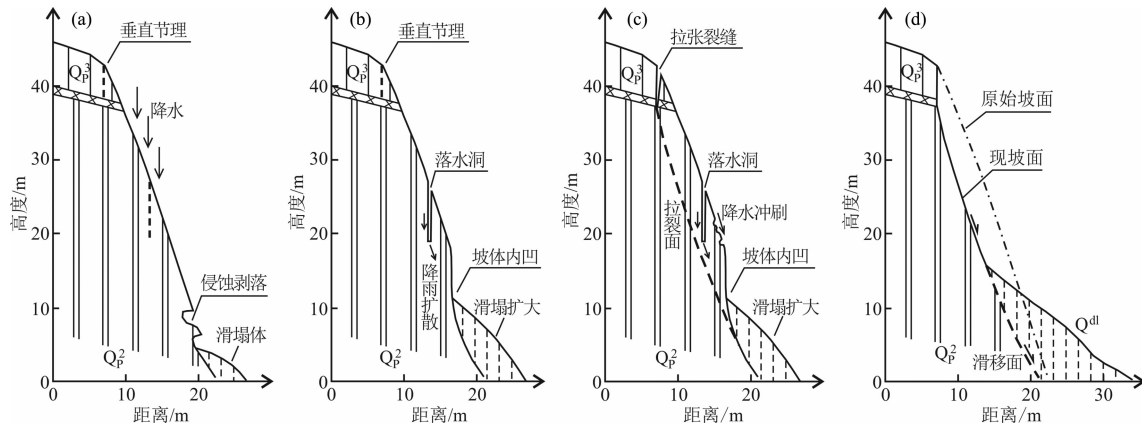


图 7 滑移式崩塌破坏演化模式：

(a) 坡脚剥落侵蚀阶段；(b) 坡体内凹阶段；(c) 坡体张裂阶段；(d) 滑移破坏阶段

Fig. 7 Slipping collapse failure evolution mode: (a) slope toe exfoliation erosion stage;

(b) slope body concaving stage; (c) slope body rifting stage; (d) slipping failure stage

滑移式崩塌实例为大宁县城桥沟东坡崩塌(编号:16号,坐标:110°44′38.73″E, 36°28′2.46″N),该崩塌为黄土崩塌,破坏模式为滑移式破坏,该边坡段高35 m,宽150 m,坡度约70°,主要由人工开挖建窑建房所形成,边坡段发育部分崩滑新鲜面,最新发生于2017年(图8)。2018年8月31日,大宁县城物资公司家属院后山支沟内发生1起黄土崩塌(编号:12号),受伤1人(图9)。

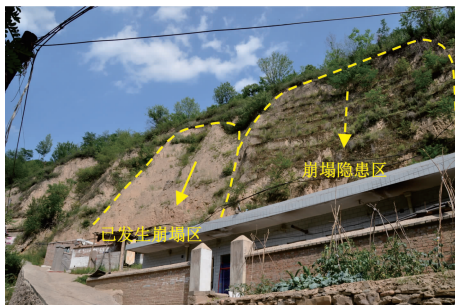


图 8 大宁县城桥沟东坡滑移式崩塌

Fig. 8 Slipping collapse on the eastern slope of Qiao gully in the county town of Daning

## (2) 倾倒式破坏模式

倾倒式破坏模式既发生于土质边坡,也发生于岩质边坡,其主要诱发因素为人工开挖、自然风化及降雨等。

土质边坡倾倒式破坏:高陡黄土斜坡节理裂隙较为发育,局部土体常常在斜坡边缘沿节理裂隙开裂。在自然风化及降雨作用下,节理裂隙进一步加深和扩张,开裂的土体逐渐偏离斜坡母体,当开裂土

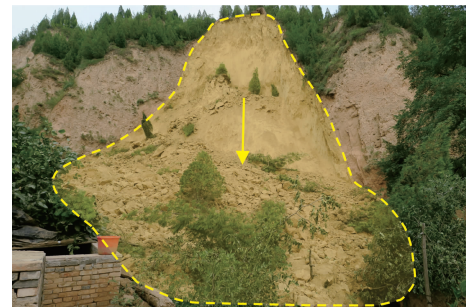


图 9 物资公司家属院后山滑移式崩塌

Fig. 9 Slipping collapse on the back slope of the residential compound for employees of a material supply company

体重心偏离斜坡母体时,发生倾倒式变形破坏,形成崩塌灾害。

岩质边坡倾倒式破坏:研究区岩质边坡主要由砂岩和泥岩互层构成,由于砂岩与泥岩强度不同,其抗风化能力也存在较大差异,砂岩抗风化能力较泥岩强,即砂泥岩互层岩质边坡存在差异风化现象。在砂泥岩差异风化作用下,泥岩往往先于砂岩被风化剥落,导致泥岩之上的砂岩失去支撑而悬空,同时由于边坡上部节理裂隙的逐渐加深和张裂,悬空岩体在重力作用下沿着节理裂隙面发生倾倒式变形破坏,形成崩塌灾害。倾倒式岩质崩塌大致经历了“差异风化—悬空—张裂—倾倒破坏”过程(图10)。

大宁县城倾倒式崩塌主要发生在公路沿线岩质边坡地带,边坡呈直立状,由人工开挖修路形成,出露地层岩性为三叠系二马营组( $T_2e$ )砂泥岩互层。泥岩呈薄层夹层状,风化严重,向内凹进;砂岩呈厚

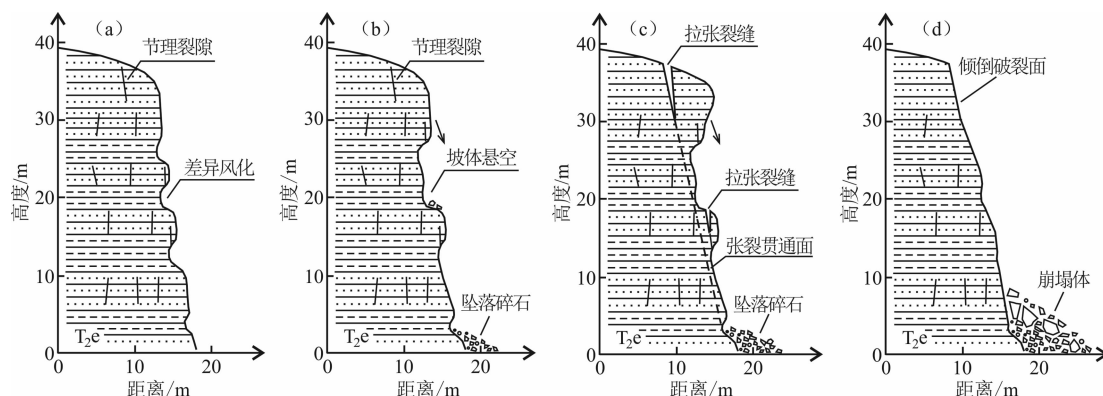


图 10 倾倒式岩质崩塌破坏演化模式：

(a) 差异风化阶段；(b) 坡体悬空阶段；(c) 坡体张裂贯通阶段；(d) 倾倒破坏阶段

Fig. 10 Toppling rock collapse failure evolution mode: (a) differential weathering stage;

(b) slope body overhanging stage; (c) slope body rifting breakthrough stage; (d) toppling failure stage



图 11 公路沿线岩质边坡悬空拉裂(8号)

Fig. 11 Tensile cracking of the overhung rock slope along the highway (No. 8)

层块状,破碎,节理裂隙发育,向外凸出,在差异风化和降雨作用下常发生倾倒式变形破坏(图 11)。

### 3 地质灾害风险分析

#### 3.1 风险分析方法

县城地质灾害风险采用定量分析的方法,包括财产风险和人员风险<sup>[20]</sup>:

财产风险计算公式如下:

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

式中,  $R_{(\text{prop})}$  为财产年损失;  $P_{(L)}$  为地质灾害发生年概率;  $P_{(T;L)}$  为地质灾害到达承灾体概率;  $P_{(S;T)}$  为承灾体时空概率;  $V_{(\text{prop};S)}$  为财产易损性;  $E$  为承灾体价值。

人员风险计算公式如下:

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

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

#### 3.2 风险指标调查分析

地质灾害发生年概率  $P_{(L)}$ : 地质灾害发生年概率按照灾害发生可能性级别,根据野外实地调查定性分析<sup>[21]</sup>。将 29 处地质灾害点定义为 29 处风险源,1 号、5 号、19 号风险源失稳可能性为“可能性小”,相当于年概率  $10^{-5}$ ;6 号、7 号、14 号、15 号、17 号、18 号风险源失稳可能性为“不一定”,相当于年概率  $10^{-4}$ ;2 号、4 号、8 号、9 号、20 号、21 号、22 号、23 号、26 号、29 号风险源失稳可能性为“可能”,相当于年概率  $10^{-3}$ ;3 号、10 号、13 号、24 号、28 号风险源失稳可能性为“很可能”,相当于年概率  $10^{-2}$ ;11 号、12 号、16 号、25 号、27 号风险源失稳可能性为“几乎确定”,相当于年概率  $10^{-1}$ 。

地质灾害到达承灾体概率  $P_{(T;L)}$ : 地质灾害到达承灾体概率主要由承灾体距离灾害体的远近及相对位置所决定<sup>[22]</sup>。大宁县城受 29 处灾害体威胁的承灾体均位于坡脚或斜坡体上,斜坡失稳到达承灾体的概率为 1.0。

承灾体时空概率  $P_{(S;T)}$ : 承灾体时空概率分为固定承灾体和流动承灾体。对于固定的建筑物、道路等承灾体,时空概率为 1.0;对于居住在建筑物内受地质灾害威胁的人员,考虑当地工作生活模式,人员平均每年在建筑物内居住的时间为 300 d,每天居住时间为 10 h,则建筑物内流动人员的时空概率  $P_{(S;T)} = (300/365) \times (10/24) = 0.342$ ;对于经过公路的交通工具和流动行人,根据受地质灾害威胁路段内的交通容量和通过时间估计时空概率,例如 8 号和 9 号崩塌隐患威胁公路段内每天有交通工具和

行人通过的时间为 5 h,则  $P_{(S;T)} = 5/24 = 0.208$ 。

财产易损性  $V_{(prop;S)}$ :财产易损性通常以专业人员对灾害的认知能力和从业经验进行估计,财产易损性的值为 0~1,0 表示财产完好无损坏,1 表示彻底毁坏。一般情况下,滑坡等灾害强度越大,建筑物等固定承灾体抵御风险的能力越弱,则财产易损性的值越高。

人员易损性  $V_{(D;T)}$ :人员易损性通常以专业人员对灾害的认知能力和从业经验进行估计,人员易损性的值为 0~1,0 表示人员没有受到伤害,1 表示灾害造成人员死亡。一般情况下,滑坡等灾害强度越大,人员距离风险源越近,抵御风险的能力越弱,

则人员易损性的值越高。

承灾体价值  $E$ :固定承灾体经济价值通过野外实地调研获得,大宁县城受地质灾害威胁区域内固定承灾体主要有居民楼房、平房、窑洞和公路。根据当地经济发展水平,楼房按 0.3 万元/ $m^2$  估算,平房和窑洞按 1.0 万元/间估算,县城公路按 0.15 万元/ $m$  估算,汽车按 15 万元/辆估算。

3.3 地质灾害风险评估

根据风险指标调查分析及计算结果,按式(1)进行大宁县城地质灾害财产风险评估,按式(2)进行大宁县城地质灾害人员风险评估。风险评估结果见表 2,人员风险区划结果见图 12。

表 2 大宁县城地质灾害及其隐患风险评估结果

Tab. 2 Risk assessment results of geohazards and their potential dangers in the county town of Daning

风险源 编号	发生概率 $P_{(L)}$	到达概率 $P_{(T;L)}$	固定承灾体时 空概率 $P_{(S;T)}$	流动承灾体时 空概率 $P_{(S;T)}$	财产易损性 $V_{(prop;S)}$	人员易损性 $V_{(D;T)}$	承灾体价值 $E/\text{万元}$	财产年损失 $R_{(prop)}/$ (万元 $\cdot a^{-1}$ )	单人年死亡 概率 $P_{(LOL)}$
1 号	$10^{-5}$	1.000	1.000	0.342	0.900	0.900	395	0.004	$3.078 \times 10^{-6}$
2 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.600	0.700	73	0.044	$2.394 \times 10^{-4}$
3 号	$10^{-2}$	1.000	1.000	0.342	0.600	0.700	26	0.156	$2.394 \times 10^{-3}$
4 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.500	0.600	51	0.026	$2.205 \times 10^{-4}$
5 号	$10^{-5}$	1.000	1.000	0.342	0.500	0.600	32	0.000	$2.205 \times 10^{-6}$
6 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.500	0.600	55	0.003	$2.205 \times 10^{-5}$
7 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.300	0.700	250	0.008	$2.394 \times 10^{-5}$
8 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.208	0.100	0.300	63	0.007	$6.240 \times 10^{-5}$
9 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.208	0.200	0.400	48	0.010	$8.320 \times 10^{-5}$
10 号	$10^{-2}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.500	82	0.656	$1.710 \times 10^{-3}$
11 号	$10^{-1}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.800	13	0.910	$2.736 \times 10^{-2}$
12 号	$10^{-1}$	1.000	1.000	0.342	1.000	0.900	12	1.200	$3.078 \times 10^{-2}$
13 号	$10^{-2}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.800	837	5.859	$2.736 \times 10^{-3}$
14 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	225	0.018	$2.736 \times 10^{-5}$
15 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.900	0.600	134	0.012	$2.052 \times 10^{-5}$
16 号	$10^{-1}$	1.000	1.000	0.342	0.600	0.900	83	4.980	$3.078 \times 10^{-2}$
17 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.500	0.500	499	0.025	$1.710 \times 10^{-5}$
18 号	$10^{-4}$	1.000	1.000	0.342	0.600	0.500	150	0.009	$1.710 \times 10^{-5}$
19 号	$10^{-5}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.700	358	0.003	$2.394 \times 10^{-6}$
20 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.700	64	0.045	$2.394 \times 10^{-4}$
21 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.700	46	0.032	$2.394 \times 10^{-4}$
22 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.700	121	0.085	$2.394 \times 10^{-4}$
23 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.700	0.700	137	0.096	$2.394 \times 10^{-4}$
24 号	$10^{-2}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	42	0.336	$2.736 \times 10^{-3}$
25 号	$10^{-1}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	43	3.440	$2.736 \times 10^{-2}$
26 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	24	0.019	$2.736 \times 10^{-4}$
27 号	$10^{-1}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	32	2.560	$2.736 \times 10^{-2}$
28 号	$10^{-2}$	1.000	1.000	0.342	0.800	0.800	45	0.360	$2.736 \times 10^{-3}$
29 号	$10^{-3}$	1.000	1.000	0.342	0.400	0.700	325	0.130	$2.394 \times 10^{-4}$



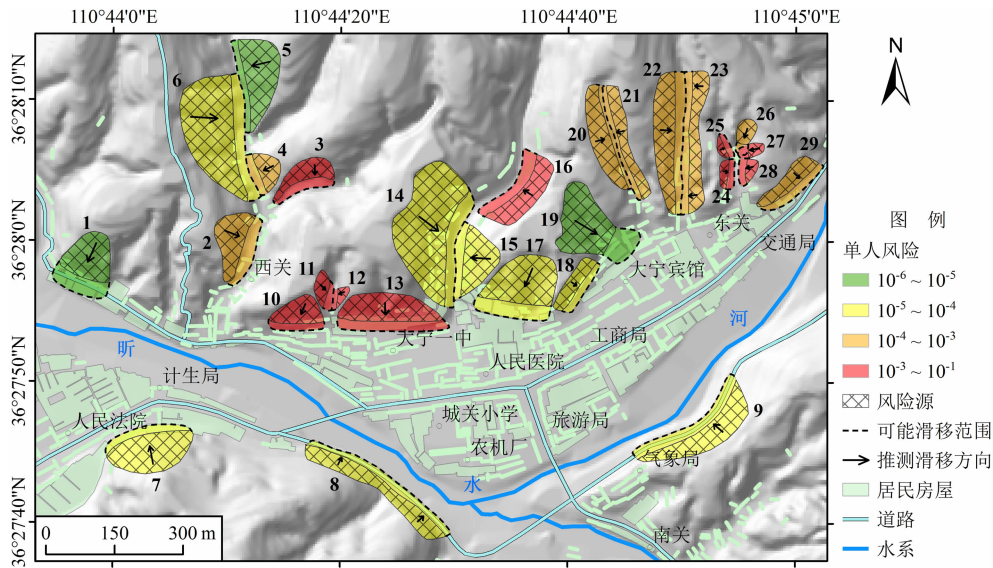


图 12 大宁县城地质灾害单人风险区划图

Fig. 12 Zoning map of geohazard - induced risks per capita in the county town of Daning

4 地质灾害风险管控

大宁县城周边共发育地质灾害及其隐患 29 处, 根据风险评估结果, 对单人年死亡概率  $P_{(LOL)} < 10^{-4}$  且财产年损失  $R_{(prop)} < 0.1$  万元 (需同时满足 2 项) 的采取群测群防措施; 对单人年死亡概率  $P_{(LOL)} \geq 10^{-4}$  或财产年损失  $R_{(prop)} \geq 0.1$  万元 (只需满足 1 项即可) 的采取搬迁避让、绿化改造、削坡处理、坡面防护、排水等相应的风险管控措施。根据斜坡变形破坏模式, 对风险较高的拉裂—推移式浅表层滑坡采取坡面防护、排水、专业监测系统建设等防治措施, 对风险较低的浅表层滑坡采取群测群防措施; 滑移—压致拉裂式中深层滑坡发育数量较少且风险较低, 采取群测群防措施; 对风险较高的滑移式崩塌采取搬迁避让、绿化改造等防治措施, 对风险中等的滑移式崩塌采取削坡处理、排水等防治措施, 对风险较低的滑移式崩塌采取群测群防措施; 倾倒式崩塌发育数量较少且风险较低, 采取群测群防措施 (表 3、图 13)。

(1) 搬迁避让和绿化改造: 建议对县城北坡麻角沟 (3 号)、物资公司家属院后山支沟 (11 号和 12 号)、桥沟 (16 号) 等地带崩塌及崩塌隐患威胁范围内的居民分期次进行搬迁避让, 同时在坡体后缘修筑排水沟, 进行相应的坡面防护和绿化改造。

表 3 大宁县城地质灾害及其隐患风险管控措施建议

Tab. 3 Risk management and control measures of geohazards and their hidden dangers in the county town of Daning

风险源编号	风险管控措施建议	风险源编号	风险管控措施建议
1 号	群测群防	16 号	搬迁避让、绿化改造
2 号	削坡处理、排水	17 号	群测群防
3 号	搬迁避让、绿化改造	18 号	群测群防
4 号	削坡处理、排水	19 号	群测群防
5 号	群测群防	20 号	削坡处理、排水
6 号	群测群防	21 号	削坡处理、排水
7 号	群测群防	22 号	削坡处理、排水
8 号	群测群防	23 号	削坡处理、排水
9 号	群测群防	24 号	坡面防护、排水
10 号	专业监测系统建设	25 号	坡面防护、排水
11 号	搬迁避让、绿化改造	26 号	坡面防护、排水
12 号	搬迁避让、绿化改造	27 号	坡面防护、排水
13 号	削坡处理、排水	28 号	坡面防护、排水
14 号	群测群防	29 号	削坡处理、排水
15 号	群测群防		

(2) 建立专业地质灾害监测预警体系: 建议在凤凰城小区后山滑坡体 (10 号) 建立一体化自动专业监测站。

(3) 工程防治措施: 针对大宁县城北坡麻角沟崩塌隐患 (2 号、4 号)、大宁县一中后山崩塌隐患

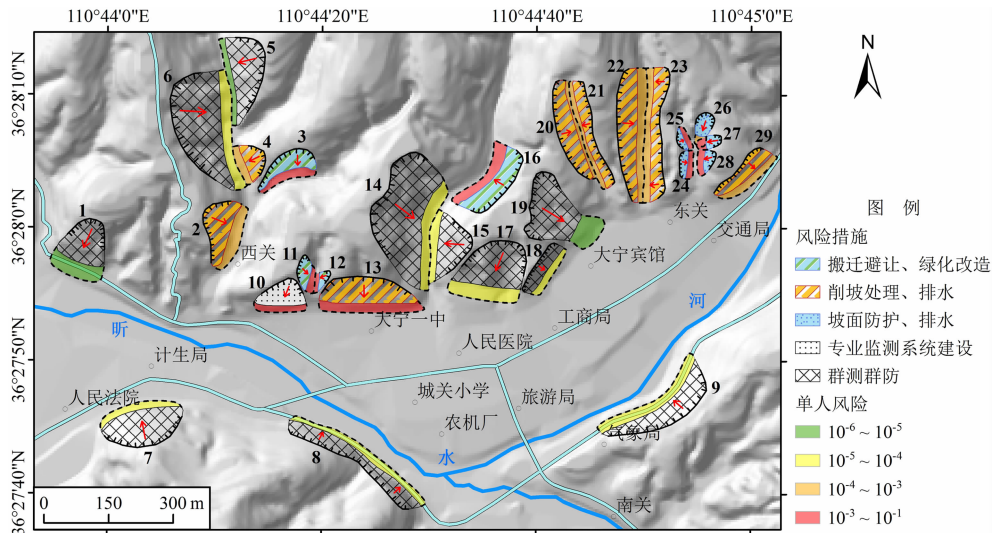


图 13 大宁县城地质灾害风险管控措施建议图

Fig. 13 Schematic of proposed risk management and control measures for geohazards in the county town of Daning

(13 号)、朝阳沟崩塌隐患(20 号和 21 号)、永和圪洞崩塌隐患(22 号和 23 号)、东关崩塌隐患(29 号),建议采取坡体后缘削坡、修建排水渠,并进行裂缝填埋夯实等工程防治措施;针对幸福沟滑坡群(24 号~28 号),建议采取坡面防护、修建排水渠等工程防治措施。

(4)群测群防:针对西关村滑坡隐患(1 号)、麻角沟崩塌隐患(5 号和 6 号)、人民银行家属院后山崩塌隐患(7 号)、县城南坡公路边坡(8 号和 9 号)、桥沟西坡滑坡(14 号)、桥沟东坡滑坡(15 号)、窑圪老崩塌隐患(17 号和 18 号)、北寨坡滑坡(19 号),建议采取群测群防措施,群测群防员定期目视检查,雨季加强巡查。

## 5 结论

(1)大宁县城地处晋西黄土高原吕梁山区,县城周边斜坡地形破碎,滑坡崩塌等地质灾害多发。通过 1:10 000 比例尺地质灾害风险调查,共识别县城周边地质灾害及其隐患 29 处,其中滑坡 8 处、崩塌 4 处、滑坡隐患 2 处、崩塌隐患 15 处。

(2)大宁县城周边发育的滑坡均为黄土滑坡,以中小型浅层滑坡为主,其破坏模式可分为“拉裂—推移式浅表层破坏模式”和“滑移—压致拉裂式中深层破坏模式”2 类;大宁县城周边发育的崩塌包括土质崩塌和岩质崩塌,其破坏模式可分为“滑

移式破坏模式”和“倾倒式破坏模式”2 类。

(3)针对每处地质灾害风险源,根据风险指标调查分析结果,开展了定量财产风险评估和人员风险评估。同时,根据斜坡变形破坏模式和风险评估结果,对单人年死亡概率  $P_{(LOL)} \geq 10^{-4}$  或财产年损失  $R_{(prop)} \geq 0.1$  万元的地质灾害及其隐患,制定了搬迁避让、专业监测预警体系建设、工程防治等相应的风险管控措施建议。

**致谢:**衷心感谢项目组成员王佳运、徐永、赵振明、冯卫、冯凡等在野外调查工作中的辛勤付出。

## 参考文献 (References)

- [1] 黄强兵,康孝森,王启耀,等. 山西吕梁黄土崩塌类型及发育规律[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 Lüliang area of Shanxi Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 64 - 72] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.01.008
- [2] 张茂省,李同录,程秀娟,等. 山区城市地下空间资源评价与开发利用模式—以延安市为例[J]. 山地学报, 2019, 37(3): 303 - 315. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu, CHENG Xiujuan, et al. Evaluation of underground space resources in mountain cities and their development models—taking Yan'an city as an example [J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 303 - 315] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000424
- [3] 邓伟,唐伟. 试论中国山区城镇化方向选择及对策[J]. 山地学报, 2013, 31(2): 168 - 173. [DENG Wei, TANG Wei. General

- directions and countermeasures for urbanization development in mountain areas of China [J]. *Mountain Research*, 2013, **31**(2): 168 – 173] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.02.005
- [4] 薛强, 张茂省, 高波, 等. 陕西省绥德县城区地质灾害风险评估[J]. *工程地质学报*, 2018, **26**(3): 711 – 719. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, GAO Bo, et al. Risk assessment of geological hazards in Suide City, Shaanxi Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(3): 711 – 719] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-205
- [5] 谢洪, 钟敦伦, 韦方强, 等. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因[J]. *山地学报*, 2006, **24**(1): 79 – 87. [XIE Hong, ZHONG Dunlun, WEI Fangqiang, et al. Debris flow hazards and their formation causes in mountain urban area of China [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(1): 79 – 87]
- [6] 徐继维, 张茂省, 范文. 地质灾害风险评估综述[J]. *灾害学*, 2015, **30**(4): 130 – 134. [XU Jiwei, ZHANG Maosheng, FAN Wen. An overview of geological disaster risk assessment [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, **30**(4): 130 – 134] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.04.025
- [7] 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 hazards on the loess plateau in China [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(5): 737 – 746] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000464
- [8] 石菊松, 石玲, 吴树仁, 等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. *地质通报*, 2009, **28**(8): 1020 – 1030. [SHI Jusong, SHI Ling, WU Shuren, et al. Difficulties and countermeasures in the practice of landslide risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(8): 1020 – 1030]
- [9] 许强, 张一凡, 陈伟. 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*, 2010, **29**(5): 729 – 738. [XU Qiang, ZHANG Yifan, CHEN Wei. Vulnerability assessment of geo-hazards in southwest mountainous area—Danba County, Sichuan, China as an example [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, **29**(5): 729 – 738]
- [10] 乔建平, 王萌, 石莉莉. 区域滑坡风险评估中的风险区划与概率分析[J]. *自然灾害学报*, 2012, **21**(2): 51 – 56. [QIAO Jianping, WANG Meng, SHI Lili. Risk zoning and probability analysis of regional landslide risk assessment [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, **21**(2): 51 – 56] DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0207
- [11] 殷坤龙, 陈丽霞, 张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价[J]. *地学前缘*, 2007, **14**(6): 85 – 97. [YIN Kunlong, CHEN Lixia, ZHANG Guirong. Regional landslide hazard warning and risk assessment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, **14**(6): 85 – 97]
- [12] 刘广润, 晏鄂川, 练操. 论滑坡分类[J]. *工程地质学报*, 2002, **10**(4): 339 – 342. [LIU Guangrun, YAN Echuan, LIAN Cao. Discussion on classification of landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(4): 339 – 342]
- [13] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 282 – 296. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Analytical theory of engineering geology [M]. Beijing: Geological Press, 2009: 282 – 296]
- [14] 薛强, 唐亚明, 孙萍萍, 等. 降雨入渗对黄土斜坡土体含水率时空分布特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(2): 53 – 56. [XUE Qiang, TANG Yaming, SUN Pingping, et al. Temporal-spatial distribution of soil water content in loess slope subjected to rainfall infiltration [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(2): 53 – 56] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.012
- [15] 薛强, 张茂省, 毕俊攀, 等. 开挖型黄土边坡剥落侵蚀作用及变形破坏研究[J]. *西北地质*, 2019, **52**(2): 158 – 166. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, BI Junbo, et al. Exfoliation erosion and deformation failure of excavated loess slope [J]. *Northwestern Geology*, 2019, **52**(2): 158 – 166] DOI: 10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.016
- [16] ZHANG M, LIU Jie. Controlling factors of loess landslides in western China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59**(8): 1671 – 1680. DOI: 10.1007/s12665-009-0149-7
- [17] 王永焱, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 133 – 139. [WANG Yongyan, LIN Zaiguan. The structure characteristics and physical and mechanical properties of loess in China [M]. Beijing: Science Press, 1990: 133 – 139]
- [18] 王刚, 孙萍, 吴礼舟, 等. 降雨诱发浅表层黄土滑坡机理实验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, **25**(5): 1252 – 1263. [WANG Gang, SUN Ping, WU Lizhou, et al. Experimental study on mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(5): 1252 – 1263] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.05.010
- [19] 张茂省. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 66 – 67. [ZHANG Maosheng. Geological hazards of landslide and collapse in Baota District, Yan'an [M]. Beijing: Geological Press, 2008: 66 – 67]
- [20] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. *地质通报*, 2009, **28**(8): 995 – 1005. [WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(8): 995 – 1005]
- [21] 张茂省, 唐亚明. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. *地质通报*, 2008, **27**(8): 1205 – 1216. [ZHANG Maosheng, TANG Yaming. Risk investigation method and practice of geohazards [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(8): 1205 – 1216]
- [22] 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 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, 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 ] DOI: 10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.013

## Failure Modes and Risk Control of Geohazards in the County Town of Daning in the Lüliang Mountains, China

XUE Qiang, TANG Yaming, BAI Xuan

(*Observation and Research Station of Geohazards in Loess Plateau, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China*)

**Abstract:** The county town of Daning, situated in western Shanxi which is part of the Loess Plateau in China, has fragmented landform where geohazards including loess landslides and collapses occur frequently, severely restricting urban construction and high-quality development. Based on a 1:10 000 scale field survey map and statistical analysis of geohazards in the county town of Daning, failure evolution modes of the geohazards were summarized, and the geohazard-induced property risks and personal risks were quantitatively assessed. There were 29 geohazard sites developing in the slope sections of the county town of Daning, these geohazards were mainly loess landslides, soil collapses, and rock collapses. The loess landslides occurred largely in two failure modes, “tensile cracking-pushing shallow-layer failure mode” and “slipping-compression cracking intermediate-to-deep-layer failure mode”. The collapses occurred in two failure modes, “slipping failure mode” and “toppling failure mode”. The geohazards in these 29 sites resulted in annual property losses ranging from RMB 1.6 to RMB 58 590 and annual death rates per capita varying between  $2.205 \times 10^{-6}$  and  $2.736 \times 10^{-2}$ . Based on the slope deformation failure modes and the risk assessment results, corresponding risk management and control measures were formulated for the geohazards in the county town of Daning, including relocation and avoidance, building a professional monitoring and early warning system, and geohazard prevention and control engineering. The research results provide a technical demonstration for the investigation, assessment and control of geohazards risk in mountainous towns.

**Key words:** loess geohazard; failure mode; risk analysis; Lüliang Mountains