

# 山西黄土崩塌地质灾害时空分布特征分析

康志军

(山西省矿产资源调查监测中心,山西 太原 030024)

[摘 要]山西位于黄河中游东部,华北平原西部,主要覆盖第四系黄土。为分析该区地质环境、降雨、冻融、人类活动等因素对山西黄土崩塌地质灾害的影响特征,本文在收集统计山西省 194 处崩塌资料的基础上,采用统计分析方法对崩塌的时空分布特征进行了研究。结果表明:黄土崩塌易的典型地质特征为:坡型为  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  的向阳坡,高度在 5~20 m 之间,坡度大于  $60^{\circ}$  的直线型和凸型坡面;从时间规律看,黄土崩塌主要发生在 7—8 月份的集中降雨期和 3—4 月的冻融期,说明降雨和冻融对黄土崩塌灾害发生有较大的促进作用;在人类工程扰动较多的区域黄土崩塌呈现易发、集中的状态。

[关键词]山西黄土;崩塌灾害;发育特征;冻融

[中图分类号]P694 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2023)01-56-05

## 1 引言

山西位于中部黄土高原区的东部亚区,吕梁山与太行山之间,山地和盆地地形对照明显,黄土覆盖率达 72%。黄土在力学性质上则表现为干燥时结构强度大,遇水后结构强度迅速降低,总体表现出压缩比大,抗剪力差的特点,在温差、降水、人类活动等因素的综合作用下,黄土易产生崩塌地质灾害(吕萌,2016;雷祥义,2001)。据调查,自 2005 年至今,山西发生的地质灾害中黄土崩塌灾害占比 73%以上,是造成每年伤亡人数最多的地质灾害。较大的黄土崩塌灾害有 2005 年造成 24 人遇难的吉县水洞沟崩塌,2009 造成 23 人遇难的中阳张家咀崩塌,2015 年造成 7 人遇难的临县兔坂镇崩塌,2020 年造成 2 人遇难的兴县崩塌,2021 年造成 1 人遇难的石楼县崩塌。

2022 年全国地质灾害防治工作要点提出:“着力解决‘隐患在哪里’、‘结构是什么’问题”,“逐步提升‘灾害何时发生’的预警预报能力”(自

然资源部,2022),这进一步说明了研究黄土崩塌地质灾害时空分布特征对防灾减灾的重要意义。从黄土滑坡的分布和发育特征方面针对陕西黄土分布特征的研究表明“地形由崮—梁—塬转化,力学性质相应变好”,基本说明了黄土崩塌发育的地形规律(魏青珂,1995;祝俊华等,2017)。从黄土的结构性方面研究发现黄土崩塌滑坡发生时间上 4—10 月份占比 90.2%,其中以 7、8 月份发生最多,占总数的 50%,说明黄土的崩塌滑坡与该时期降雨量大有关,春融解冻期也是黄土滑坡发生的次高峰期(毛佳睿,2020;王雁林等,2011)。冬季的冻胀作用也是导致黄土崩塌的原因之一,沿土体的张性裂隙可发生冰冻,冰楔在裂隙中有冻胀现象,使裂缝进一步增大,导致坡体破坏(唐亚明,2012;王正宇,2021)。本文在收集山西 194 处黄土崩塌地质灾害资料的基础上,通过分析数据特征,总结导致崩塌的发生的内外因,重点讨论了黄土滑坡发育的典型地形地貌特征和灾害与气候的关联性,以期揭示山西黄土崩塌的时空分布特征,提高地质灾害防灾减灾能力。

[收稿日期]2022-11-01 [修回日期]2023-01-30

[作者简介]康志军(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事地质、测绘相关研究工作。E-mail: kangzhijun1979@163.com。

2 研究区特征

山西黄土区域通常可划分为晋西地区和山西东部地区,晋西地区位于黄河东岸,吕梁山以西,临县以南,河津以北,该区黄土覆盖层较厚,山间盆地发育。山西东部地区西至吕梁山,东至太行山,该区黄土为华北晚更新世黄土—马兰黄土,可细分为汾河流域区和晋东南地区,区内以山地和盆地为主(彭建兵等,2014;曾磊,2010)。山西年降雨量为 400~700 mm,从时间上看分布不均匀,7—8 月份降雨最多,一般占全年降雨量的 60%,且该时段降雨多为大雨或暴雨,从空间上看,从北部的吕梁山区、五台山区到东南的太行山区、中条山区雨量有增大的趋势。山西冬季日平均气温在 0℃ 以下,且极端温度较低,北部 9 月下旬,南部 10 月下旬出现初霜冻天气,全年封冻期约 100~140 天,尤其冬季时期北部相对较寒冷,位于北部地区的五台山,年平均气温仅为-4℃,而南部的临汾、长治等地,年平均气温高达 12℃ 以上(吕萌,2016;张祎玮等,2015)。山西独有的地质、气候环境导致黄土崩塌灾害较易发生,且分布广泛,诱因多样。

3 黄土崩塌的典型地形地貌特征

山西黄土高原建构筑物一般依山构筑,多在河谷的阳面修路、建房,总体居民地位于坡体的中下部,河谷的凹岸,道路通常挨着河沟修建,房屋位于比道路高一些的位置,凸岸一般开发为农田。

3.1 坡型

依据学者对黄土斜坡的分类(王根龙,2011;范晓丽等,2014),本次收集到的崩塌灾害中,51%的崩塌处为直线型坡,24%的崩塌处为凸型坡,13%的崩塌处为阶梯型坡,12%的崩塌处为凹形坡,见图 1。分析可知直线型坡容易发生黄土崩塌,凸型坡次之,凹形坡和阶梯型坡不容易发生崩塌。直线型坡和凸型坡一般坡度较大,应力集中较为明显,凹形坡下部的缓坡削减了应力的集中,阶梯型坡在减小各级阶梯内部应力的同时坡脚的应力集中也得到了很大的削弱,使得斜坡更加稳定。

■ 凹形坡 ■ 凸型坡 ■ 直线型坡 ■ 阶梯型坡

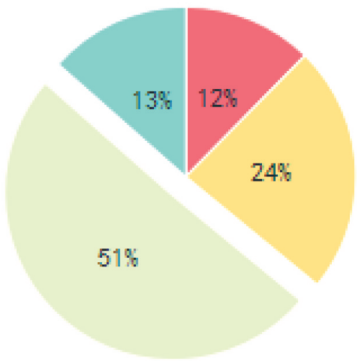


图 1 崩塌数量与坡型统计图  
Fig. 1 Statistics of collapse number and slope type

3.2 坡向

本次收集到的崩塌灾害中,40%的崩塌位于 180°~270° 的阳坡,28% 的位于 90°~180° 的阳坡,0°~90°、270°~360° 的阴坡仅占 22%,见图 2。说明阳坡昼夜温差大,风化作用明显,导致黄土坡面结构破碎,同时人类的建构筑物主要分布在阳坡,一定程度上扰动了坡面结构,导致崩塌更易发生。

■ 0-90 ■ 90-180 ■ 180-270 ■ 270-360

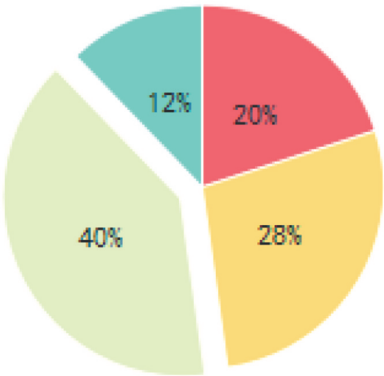


图 2 崩塌数量与坡向统计图  
Fig. 2 Statistics of collapse number and slope aspect

3.3 坡高

本次收集到的崩塌灾害中,59%的崩塌处坡高小于 10 米,27%的崩塌处坡高为 10~20 米,14%的崩塌处坡高为 20 米以上,见图 3。主要原因是在漫长的地质年代中,较高的斜坡经过了充分的风化剥蚀,坡型一般较缓,不利于崩塌发生。另外,人类活动主动避开了坡高较高的斜坡也是崩塌集中在坡高较低区域的原因之一。

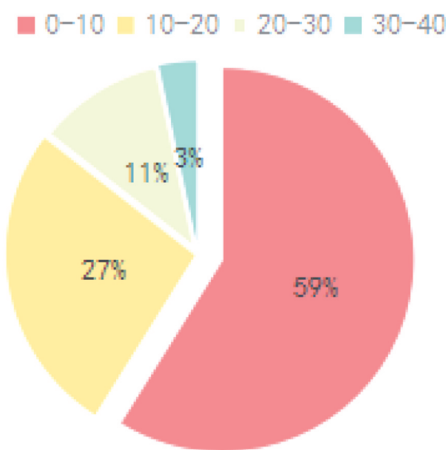


图 3 崩塌数量与坡高统计图

Fig. 3 Statistics of collapse number and slope height

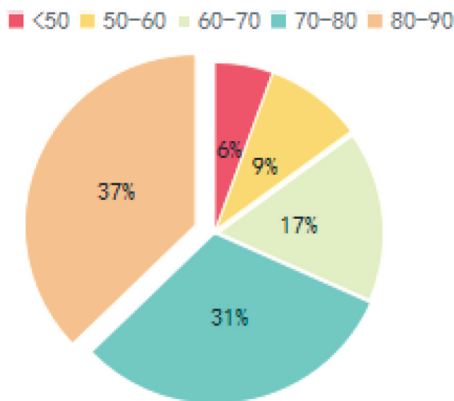


图 4 崩塌数量与坡度统计图

Fig. 4 Statistics of collapse number and slope gradient

### 3.4 坡度

本次收集到的崩塌灾害中,37%的崩塌处坡度在 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间,31%的崩塌处坡度在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,17%崩塌处坡度在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间,60°以下的崩塌占比15%,见图4。表明60°以上的高陡坡为崩塌创造了有利的力学条件,随着坡度的增加导致坡肩处的张力带范围逐步扩大,最终在坡肩被拉裂,崩塌随之发生。

## 4 降雨对黄土崩塌的影响

通过收集山西2006—2013年地质灾害数量、7月份降雨量、全年降雨量数据的基础上研究表明,崩塌数量与降雨量表现出一定的正相关性,特别是与7月份降雨量正相关更大。进一步统计可知降雨诱发的地质灾害占比达到75%以上,灾害主要集中在6~9月份,其中7月份数量最对,但灾害的发生具有一定的偶然性(齐琼,2015),如图5所示。

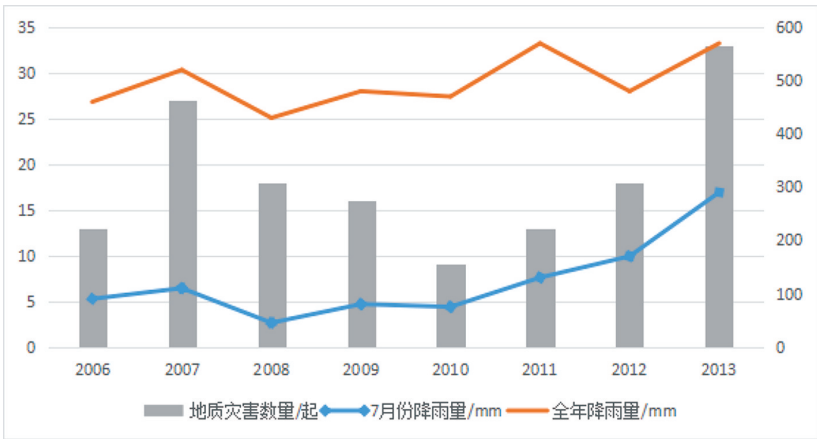


图 5 降雨型地质灾害数量与降雨量对比图

Fig. 5 Correlation of rainfall regime geological hazard number and rainfall capacity

### 4.1 降雨类型、强度与崩塌发生时间的关系

从降雨类型(大、中、小)统计,53.8%的崩塌发生前10天内有过大雨及以上的降雨,其中1~2天内发生过大雨及以上降雨的占比38.5%,表明大雨以上降雨发生两天内为崩塌高发期,3天以后逐步减少。46.2%的崩塌发生前10天内有过小雨或中雨,崩塌在雨后1~10天内均可能发生。

从降雨强度统计,发生 $>50\text{ mm/天}$ 的降雨时,崩塌发生集中在当天;发生 $20\sim 50\text{ mm}$ 的降雨时,崩塌发生主要集中在1~2天内,发生 $<20\text{ mm/天}$ 的降雨时,崩塌在1~10天内均有发生。

### 4.2 10日内累计降雨量与崩塌发生概率的关系

对纳入重点监测范围的黄土崩塌易发灾害点的统计表明,10日内的降雨易导致灾害发生,当10

日内降雨达到 50~100 mm 时,61.4%的概率会发生崩塌灾害,当>300 mm 时,100%会发生崩塌灾

害,结果表明前期累计降雨量对黄土崩塌灾害有明显的正相关性,累计降雨越大灾害越容易发生。

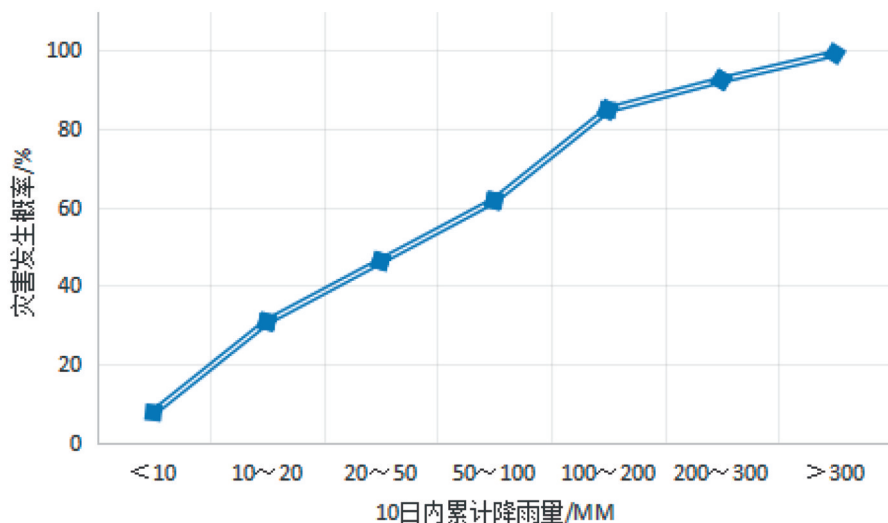


图6 10日内累计降雨量与灾害发生概率统计图

Fig. 6 Statistics of accumulative rainfall in 10 days and disaster occurrence rate

### 4.3 崩塌与小时降雨量的关系

本次统计了2013年7月发生的榆社麻池脑村崩塌、潞城下黄村崩塌、榆社河峪乡崩塌三处灾害发生前的小时降雨量。其中榆社麻池脑村崩塌与潞城下黄村崩塌发生前出现间歇性连续降雨,36h内出现强降雨,最大降雨强度达到10~20 mm/h,在降雨量达到25 mm,间歇数小时不降雨,之后再降雨,累计降雨达到35 mm以上后发生崩塌。榆社河峪乡崩塌发生前有强度小于10 mm/h的持续降雨,累计降雨量达到60 mm后发生崩塌。

持续大量雨水的入渗,导致斜坡抗剪强度降低,当低于稳定强度时崩塌随时发生。雨水渗入的方式主要有三种形式:溅蚀、铲流和渗流。当雨水溅蚀坡面时,土壤间的胶结物逐渐溶解,在坡面形成坑洼,坑洼内的积水会逐渐在坡面形成薄层水流并引起颗粒较小的土粒随水流运动,薄层水流汇集为坡面径流,沿黄土节理入渗,并逐步在黄土内形成渗流通道并掏蚀成空腔,从而导致黄土崩塌的发生。

## 5 冻融对黄土崩塌的影响

每年3~4月份发生的崩塌灾害主要的原因是冻融影响,山西大部分地区在12月至次年2月底土壤冻结深度可达1米左右,2月至3月气温逐步回升,3月底冻土开始解冻,到4月中旬基本全部

解冻,3—4月份也是黄土崩塌的高发期。

冻融主要通过冻胀破坏作用和融水渗入土体两种形式促进崩塌灾害的发生。通过黄土孔隙渗入的冰水发生冻胀现象,降低了土壤的干密度,使土壤变得更加疏松,促进崩塌的发生。融水渗入土体导致密度增大,胶结物溶解,土壤抗剪力降低,进一步激发了崩塌的发生。

3—4月份山西昼夜温差较大,斜坡80 cm深度范围土体温度日变化明显(孙昭莹,2011),受昼夜温差变化引起的热胀冷缩现象影响,土壤结构进一步变松,坡面结构更加接近崩塌发生的条件。

## 6 人类活动对黄土崩塌的影响

人类活动多集中在破向向阳的区域,通常要通过切坡的方式增大土地利用面积,但是切坡导致坡型变陡,坡脚更容易被雨水侵蚀,部分切坡坡面防水排水设计不合理,导致雨水容易侵入坡体中,同时大切坡引起土体的应力分布发生明显改变,重新分布的应力在降雨、冻融等外因的作用下,容易导致边坡发育卸荷拉张裂隙,从而引发崩塌灾害。

## 7 结论

通过以上综合分析可知,山西黄土崩塌灾害具有以下特点:

(1)黄土坡面的地质条件是崩塌发生的主要原因。75%的崩塌发生在直线型和凸型坡面,主要原因是坡度较陡导致应力集中较为明显,稳定性较差。坡度大于 $60^{\circ}$ 的斜坡易发多发崩塌,主要原因是坡度的增加导致坡肩处的张力带范围逐步扩大,最终在坡肩被拉裂,崩塌随之发生。阳坡昼夜温差大,风化作用明显,且人类活动主要分布在阳坡,导致崩塌更易发生。86%的崩塌发生在5~20米的斜坡,原因是较高的斜坡经过了充分的风化剥蚀,坡型一般较缓,不利于崩塌发生。

(2)黄土崩塌灾害与降雨量表现出极强的正相关,山西的黄土崩塌主要集中在7~8月份的集中降雨期和3~4月的冻融期。

(3)黄土地区切坡建房、修路等人类活动行为,改变了坡面地质形态,引起应力的重新分配,加之降雨等因素影响,容易导致坡脚承载力降低,易发崩塌灾害。

#### [参考文献]

- 范晓丽,马玉梅,钱璞,等. 2014. 公路黄土崩塌灾害影响因素分析[J]. 华东公路, (2): 56-58.
- 吕萌. 2016. 山西省黄土崩塌地质灾害的现状与水敏感性分析[D]. 山西: 太原理工大学, 35-36.
- 雷祥义. 2001. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京: 地质出版社, 2001. 97-99.

- 毛佳睿,武雄. 2020. 山西省黄土崩塌影响因素及时空分布特征[J]. 科学技术与工程, 20(10): 3799-3807.
- 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.
- 齐琼. 2015. 山西黄土地质灾害特性及预防研究[D]. 山西: 太原理工大学, 59-60.
- 孙昭萱,张强. 2011. 黄土高原半干旱区陆面温度和能量的气候特征分析[J]. 中国沙漠, 31(5): 1302-1308.
- 唐亚明. 2012. 陕北黄土滑坡风险评价及监测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 41-42.
- 王根龙,张茂省,苏天明,等. 2011. 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, 19(4): 541-549.
- 魏青珂. 1995. 陕西崩塌灾害及其时空分布特征[J]. 灾害学, 10(4): 55-59.
- 王雁林,郝俊卿,赵法锁,等. 2011. 陕西省地质灾害风险区划初步研究[J]. 西安科技大学学报, 31(1): 46-52.
- 王正宇,樊辉. 2021. 降雨诱发浅层滑坡渐进破坏分析研究. 贵州地质, 38(4): 443-448.
- 祝俊华,陈志新,祝艳波. 2017. 延安市滑坡分布规律及发育特征[J]. 地质科技情报, 36(2): 236-243.
- 曾磊,黄玉华. 2010. 黄土高原河谷演变与地质灾害发育规律研究——以陕西省子长县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 21(3): 67-72.
- 张伟玮,李芬,郝智文,等. 2015. 1958—2013年山西降水的季节变化及统计特征空分析[J]. 中国农学通报, 31(16): 250-258.
- 自然资源部. 2022. 《2022年全国地质灾害防治工作要点》印发[J]. 资源导刊, (04): 4.

## Analysis on space-time distribution characteristics of loess collapse geological hazards in Shanxi

KANG Zhi-jun

(Shanxi Provincial Mineral Resources Investigation and Monitoring Center, Taiyuan 030024, Shanxi China)

**[Abstract]** Shanxi is located in the east of the middle reaches of the Yellow River and the west of the North China Plain, mainly covering the Quaternary loess. In order to analyze the impact characteristics of geological environment, rainfall, freezing and thawing, human activities and other factors on the geological disasters of loess collapse in Shanxi province, in this paper, based on the collection and statistics of 194 collapse data in Shanxi province, uses statistical analysis methods to study the space-time distribution characteristics of collapse. The results show that the typical geological characteristics of loess collapse are: the slope type is  $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$  sunny slope, the height is 5~20 meters, and the slope is more than  $60^{\circ}$  straight and convex slope. From the perspective of time rule, loess collapse mainly occurs in the concentrated rainfall period from July to August and the freeze-thaw period from March to April, which shows that rainfall and freeze-thaw have a greater role in promoting the occurrence of loess collapse disasters. The loess collapse is prone to occur and concentrated in the area where human engineering disturbance is more frequent.

**[Key Words]** Shanxi loess; Collapse disaster; Developmental characteristics; Freeze-thaw