

# 陕南地区堆积层滑坡发育规律研究

刘伟<sup>1</sup>, 袁湘秦<sup>2</sup>, 连海波<sup>1</sup> (1. 陕西省土地工程建设集团, 陕西西安 710075; 2. 陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西西安 710054)

**摘要** 以陕南地区 28 个市(县、区)的地质灾害详细调查成果为基础, 统计了区内 3 213 处堆积层滑坡, 并选取典型堆积层滑坡进行了野外调查, 研究区内堆积层滑坡发育规律。结果表明: 堆积层滑坡空间分布受地层岩性、地貌、地质构造、降雨及人类工程活动控制。发生时间与区内降雨时间一致, 主要集中分布于每年 6—10 月; 区内堆积层滑坡主要为小型、浅层堆积层滑坡。滑动面位置主要为土-岩接触面, 倾角为 20°~40°, 滑体物质主要为碎石土, 滑带物质主要为残坡积土, 细粒含量高, 遇水饱和后强度极低。该研究结果为区内堆积层滑坡的防灾减灾工作提供一定的理论支持。

**关键词** 陕南地区; 堆积层滑坡; 发育规律; 降雨

**中图分类号** P 642.22 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)10-0194-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.10.050



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Study on the Development Laws of Accumulation Landslide in Southern Shaanxi

LIU Wei<sup>1</sup>, YUAN Xiang-qin<sup>2</sup>, LIAN Hai-bo<sup>1</sup> (1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075; 2. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054)

**Abstract** Based on the detailed investigation results of geological hazards in 28 cities (counties or districts) in southern Shaanxi, 3 213 landslides in the region were statistically analyzed and typical landslides in the region were selected for field investigation. The development characteristics of accumulation landslides in the region were studied. The results showed that the spatial distribution of landslide was controlled by strata, morphology, geological structure, rainfall and human engineering activities. The occurrence time was consistent with the rainfall time in the region, which was mainly distributed from June to October every year. The landslide of accumulation layer in the region was mainly small and shallow. The sliding surface was mainly the soil-rock contact surface with a dip angle of 20°-40°. The material of the sliding body was mainly gravel soil and the material of the sliding belt was mainly residual slope soil. The fine grain content was high and the strength was very low when saturated with water. The research results provided some theoretical supports for the disaster prevention and reduction of accumulation landslide in the region.

**Key words** Southern Shaanxi; Accumulation landslide; Development laws; Rainfall

陕南地区地处秦巴山地, 是陕西省受地质灾害危害最严重的地区, 同时也是我国陇南秦巴山地泥石流滑坡重点防治区<sup>[1]</sup>。近年来, 陕西省内的灾难性地质灾害大都发生于该区域<sup>[2-7]</sup>。2011 年 9 月, 受极端暴雨天气的影响, 陕南全境共发生地质灾害 537 起, 造成 47 人死亡失踪, 直接经济损失约 1.08 亿元。地质灾害极大地威胁着当地居民的生命和财产安全, 在一定程度上制约了当地经济的发展, 成为陕南地区最具代表性的地质环境问题之一。

据陕南地区 28 个市(县、区)的地质灾害详细调查成果, 陕南地区现有发育地质灾害共 4 177 处, 其中滑坡 3 610 处、崩塌 314 处、泥石流 219 处、地面塌陷 34 处。滑坡占地质灾害总数的 87%, 其中堆积层滑坡发育有 3 213 处, 占滑坡总数的 89%。由此可见, 堆积层滑坡是陕南地区发育数量最多、分布范围最广、发生频率最高的地质灾害, 已成为秦巴山区最具代表性的地质灾害问题之一。笔者以陕南地区 28 个市(县、区)地质灾害详细调查成果为基础, 结合大量野外调查, 对陕南地区堆积层滑坡的发育规律进行研究, 以期对陕南地区堆积层滑坡的防灾减灾工作提供一定的理论支持。

### 1 堆积层滑坡时空分布规律

对陕南地区 3 213 处堆积层滑坡进行多因素统计分析, 结果表明陕南地区堆积层滑坡在空间和时间分布上具有一定的规律性。

**1.1 堆积层滑坡空间分布特征** 堆积层滑坡遍布陕南地区 28 个市(县), 数量分布上具有不均匀性。陕南地区北部的宁陕县北部、洋县北部、勉县北部、略阳北部部分地区和位于西乡盆地的西乡县, 汉台区和城固县堆积层滑坡发育数量相对较少, 陕南地区东部的商南县、山阳县、镇安县以及陕南地区西部的宁强县、略阳县中西部等地区堆积层滑坡发育数量多且分布密集, 具有群发性特点(图 1)。

由图 2 可知, 堆积层滑坡主要分布在泥盆系、志留系、震旦系和火成岩出露地区。上述地层中的地层岩性以泥质灰岩、砂岩、千枚岩和页岩为主, 与上覆松散堆积体构成二元结构, 在土-岩接触带容易形成软弱带, 发生滑动。

由图 3 可知, 堆积层滑坡发育受地形地貌的影响, 在低山区和中山区堆积层滑坡发生数量最多, 在河谷盆地、丘陵地区和高山及高山区堆积层滑坡发生较少。其中, 低山区分布堆积层滑坡 1 851 个, 占统计样本总数的 57.6%; 中山区分布堆积层滑坡 1 046 个, 占统计样本总数的 32.6%; 河谷盆地及丘陵地区总计分布堆积层滑坡 166 个, 占统计样本总数的 5.1%; 高山及高山区分布堆积层滑坡 150 个, 占统计样本总数的 4.7%。产生这种情况的主要原因是低山区和中山区山坡坡度多为 20°~40°, 该坡度变化范围既适宜松散堆积体的形成, 又能提供滑坡所需的下滑力, 在降雨条件下容易形成堆积层滑坡。此外, 低山区和中山区又是人类集中生活的区域, 人类工程活动强烈, 易引发堆积层滑坡的发生<sup>[8]</sup>。

由图 4 可知, 堆积层滑坡沿构造断裂带的两侧呈“条带状”分布, 且堆积层滑坡发育数量与距离断裂带的远近有关,

**作者简介** 刘伟(1983—), 男, 内蒙古商都人, 工程师, 从事地质灾害治理和污损土壤修复工作。

**收稿日期** 2020-10-14



图1 陕南地区堆积层滑坡分布

Fig.1 Distribution of accumulation layer landslides in southern Shaanxi

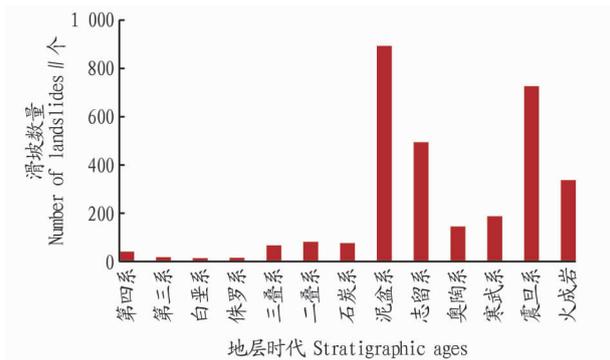


图2 不同地层时代堆积层滑坡数量的比较

Fig.2 The comparison of the number of landslides in accumulation layers in different stratigraphic ages

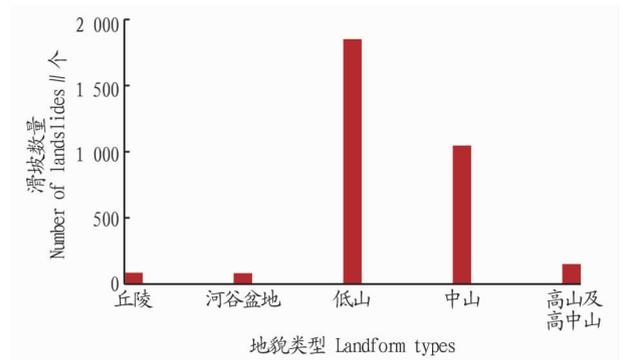


图3 不同地貌类型堆积层滑坡数量的比较

Fig.3 The comparison of the number of landslides in accumulation layers among different landform types

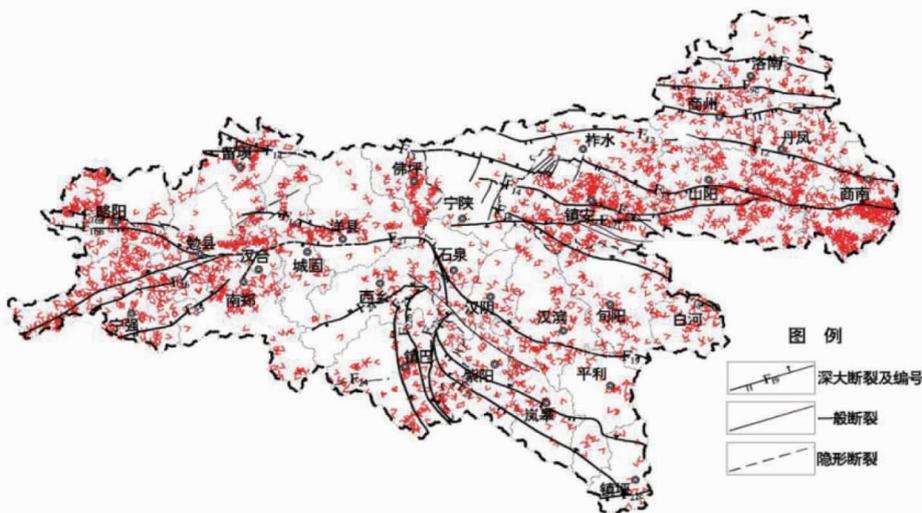


图4 构造断裂与堆积层滑坡分布关系图

Fig.4 The distribution relationship between structural faults and landslides in accumulation layers

离断裂带越近的区域,堆积层滑坡发育数量越多,分布越密集。这说明地质构造活动对堆积层滑坡的分布起到控制性作用,一方面,地质构造作用破坏岩体完整性,加速了岩层的

风化,破碎岩体在重力作用、搬运作用下为堆积层滑坡的形成提供了滑体物质;另一方面,构造裂隙和断裂带为降雨入渗提供了优势通道,加速了降雨入渗,加强了雨水对深层斜

坡土体的作用,降低了斜坡体的稳定性,易产生堆积层滑坡。

由图5可知,堆积层滑坡分布与年平均降雨量大小呈现出非正相关性,滑坡主要集中在年平均降雨量<800 mm和800~1 000 mm区域内,而随着年平均降雨量的增大,相关地域内的堆积层滑坡发育数量呈减小趋势。这说明降雨条

件下能否诱发堆积层滑坡,取决于降雨条件与堆积层所处斜坡地质条件的耦合作用。年平均降雨量<800 mm和800~1 000 mm地域内,地貌类型以中、低山为主,人类工程活动强烈,孕育堆积层滑坡发育的地质条件好,在降雨条件和地质条件耦合作用下该区域易发生堆积层滑坡。

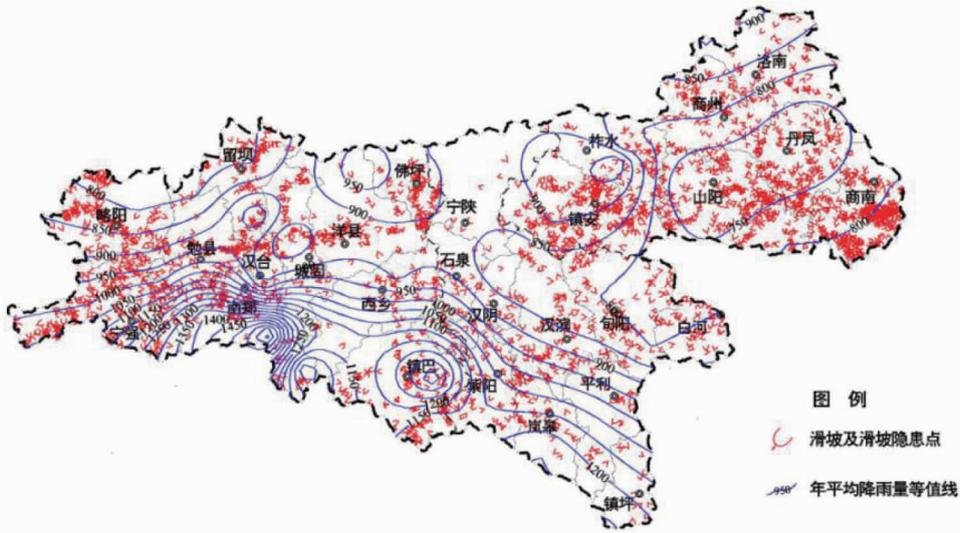


图5 年平均降雨量与堆积层滑坡分布关系图

Fig.5 Relationship between annual average rainfall and landslide distribution in accumulation layers

由表1可知,堆积层滑坡沿铁路线、公路线两侧呈“条带状”分布。这是因为在交通建设过程中,受地形条件的限制,铁路线及公路线布设在坡脚或半坡上,在建设过程中需要对斜坡进行大规模开挖,从而诱发了大量的堆积层滑坡发生。

表1 交通线路1 km范围内发育堆积层滑坡数量

Table 1 The number of landslides in accumulated layers within 1 km of the traffic line

类型 Type	主要交通干道 Main arterial roads	堆积层滑坡数量 Number of slides in accumulation layer//处
铁路 Railway	宝成线	24
	阳安线	34
	襄渝线	22
	西康线	24
	宁西线	35
高速公路 Highway	十天高速 G7011	52
	京昆高速 G5	43
	包茂高速 G65	49
	福银高速 G70	31
	沪陕高速 G40	115
	国道 National highway	G316 国道
G108 国道		50
G210 国道		32
G312 国道		38
省道 Provincial road	S309 省道	19
	S210 省道	1
	S211 省道	10
	S102 省道	20
	S307 省道	40
	S310 省道	17
	S207 省道	4
	S308 省道	3
	S202 省道	2
	S203 省道	13

1.2 堆积层滑坡时间分布特征 由图6可知,堆积层滑坡发生数量月度分布极不均匀,主要集中在汛期(6—10月),占堆积层滑坡发生数量的97.6%。通过对比分析气象资料发现,堆积层滑坡发生与降雨具有良好的同步性,特别与暴雨关系密切。

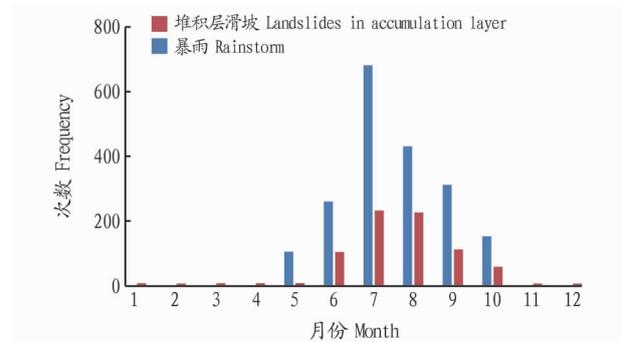


图6 暴雨与堆积层滑坡分布关系<sup>[9]</sup>

Fig.6 Relationship between rainstorm and landslides in accumulation layer

堆积层滑坡年度分布表现出一定的周期性,据气象资料,与极端气候条件的周期性变化一致性好(图7),这是因为在一次大规模滑坡暴发后松散堆积体大量减少,下一阶段的风化堆积需要足够的时间。

## 2 堆积层滑坡发育特征

2.1 滑坡规模特征 陕南地区堆积层滑坡规模以中、小型为主,小型堆积层滑坡发育数量2 239处,占统计样本总数的69.70%;中型堆积层滑坡发育数量825处,占统计样本总数的25.68%;大型和特大型堆积层滑坡发育数量极少,仅占统计样本总数的不到5%(表2)。

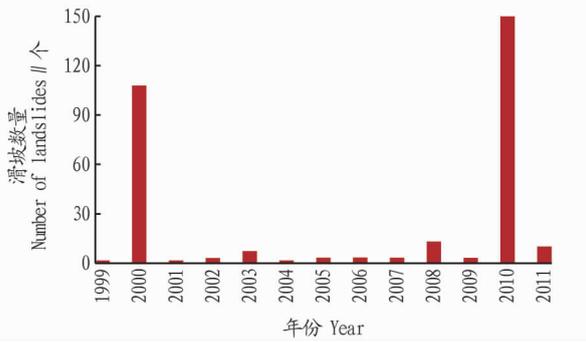


图7 堆积层滑坡年度分布关系<sup>[10]</sup>

Fig.7 Annual distribution of landslides in accumulation layer

表2 不同规模滑坡数量统计

Table 2 Statistics of different scale of landslides' number

类型 Type	滑坡规模 Landslide scale // m <sup>3</sup>	数量 Number // 处	占比 Proportion // %
小型滑坡 Small-sized landslides	<10×10 <sup>4</sup>	2 239	69.70
中型滑坡 Medium-sized landslides	10×10 <sup>4</sup> ~ 100×10 <sup>4</sup>	825	25.68
大型滑坡 Large-sized landslides	100×10 <sup>4</sup> ~ 1 000×10 <sup>4</sup>	148	4.58
特大型滑坡 Extra-large sized landslides	>1 000×10 <sup>4</sup>	1	0.04

表3 不同厚度滑坡数量统计

Table 3 Statistics of different thickness of landslides' number

类型 Type	滑坡厚度 Thickness of landslide // m	数量 Number 处	占比 Proportion %
浅层滑坡 Shallow landslide	≤10	2 950	91.8
中型滑坡 Medium-sized landslides	(10, 25]	225	7.0
大型滑坡 Large-sized landslides	(25, 50]	23	0.7
特大型滑坡 Extra-large sized landslides	>50	15	0.5

表4 不同坡度滑动面数量统计

Table 4 Statistics of the number of sliding plane with different slope

坡度 Slope // °	数量 Number // 处	占比 Proportion // %
<20	120	5.3
20° ~ 40°	1 698	75.0
>40° ~ 60°	373	16.5
>60	72	3.2

2.4 滑坡面形态特征 对堆积层滑坡面形态进行了统计,平面形态主要划分为扇形、舌形和不规则形3类,发育数量分别为1 584、1 301和328处,占比分别为49.3%、40.5%、10.2%(表5)。

表5 不同形态滑动面数量统计

Table 5 Statistics of the number of sliding plane with different shapes

平面形态 Plane shapes	数量 Number // 处	占比 Proportion // %
扇形 Fan-shaped	1 584	49.3
舌形 Tongue-shaped	1 301	40.5
不规则形 Irregular shaped	328	10.2

按滑坡面长宽比将堆积层滑坡划分为纵长式滑坡(长宽比≥1.5)、等长式滑坡(0.5≤长宽比<1.5)和横长式滑坡(长宽比<0.5)3种。其中,等长式滑坡发育数量1 567处,占滑

2.2 滑坡厚度特征 陕南地区堆积层滑坡以浅层滑坡为主,发育数量2 950处,占统计样本总数的91.8%;中层滑坡发育数量225处,占统计样本总数的7.0%;深层滑坡发育数量23处,占统计样本总数的0.7%;超深层滑坡发育数量15处,占统计样本总数的0.5%(表3)。

2.3 滑坡滑动面特征 对有滑动面坡度的2 263处堆积层滑坡进行了滑动面坡度统计,结果显示滑动面坡度为20°~40°的滑坡数量最多,发育滑坡1 698处,占比75.0%;滑动面坡度<20°、>60°的滑坡数量少,占比分别为5.3%和3.2%(表4),说明陕南地区斜坡坡度为20°~40°时最易发生堆积层滑坡。

坡总数的48.7%;纵长式滑坡发育数量1 258处,占滑坡总数的39.2%;横长式滑坡数量最少,发育数量388处,占滑坡总数的12.1%(表6)。

表6 不同长宽比滑动面数量统计

Table 6 Number statistics of sliding plane with different length-width ratio

滑坡类型 Sort of sliding plane	数量 Number // 处	占比 Proportion // %
纵长式 Longitudinal(长宽比≥1.5)	1 258	39.2
等长式 Isometric(0.5≤长宽比<1.5)	1 567	48.7
横长式 Transverse(长宽比<0.5)	388	12.1

2.5 滑坡滑体物质特征 堆积层滑坡的滑坡体主要为第四系及近代的松散堆积体,滑体物质主要为土石混合物,具有大孔隙、易透水的特点。据统计,研究区堆积层滑坡滑体物质主要为含黏粒碎石土,碎石含量为10%~70%,占比86.5%;碎石含量<10%的含碎石黏性土占比为11.3%,而碎石含量>70%的碎石土在研究区中发育较少(表7)。

表7 不同滑体物质滑坡数量统计

Table 7 Quantity statistics of landslides with different sliding body materials

分类 Sort	碎石含量 Rock fragment content // %	数量 Number 处	占比 Proportion %
含黏粒碎石土 Clay-containing gravel soil	10~70	2 779	86.5
含碎石黏性土 Gravel-containing clay soil	<10	363	11.3
碎石土 Gravel soil	>70	71	2.2

### 3 防治建议

(1) 陕南地区堆积层滑坡为典型的降雨型滑坡,在汛期 (下转第224页)

- [8] 时广军.国内教育治理研究的脉络及展望:基于 Citespace 的分析[J].西南大学学报(社会科学版),2018,44(4):112-119.
- [9] 李军,张恒星,蓝芙宁.基于文献计量学的中国地下水微生物研究现状分析[J].人民长江,2019,50(9):54-59,123.
- [10] 李梦雅,冯美琦,张茂君,等.梨主要品种(系)抗黑星病能力调查初报[J].吉林农业科学,1992,17(3):48-49.
- [11] 郭宇.基于颜色特征的南果梨品质检测技术的研究[D].天津:天津大学,2007.
- [12] 韩增林,李彬,张坤岭,等.基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J].地理科学,2016,36(5):643-652.
- [13] 代富强,张霞.基于 CNKI 和 CiteSpace 的我国贸易与环境关系研究文献计量分析[J].重庆工商大学学报(社会科学版),2021,38(2):47-56.
- [14] 王阳,佟伟,贾晓辉,等.1-MCP 对不同后熟程度‘南果梨’贮藏品质和果皮褐变的影响[J].中国果树,2020(3):52-57.
- [15] 周鑫.冷藏及 1-MCP 处理对南果梨酯类香气影响的分子机制及香气“唤醒”研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2015.
- [16] 程顺昌,魏宝东,朱益鹏,等.1-MCP 和 CO<sub>2</sub> 对‘南果梨’冷藏后货架期能量代谢特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(6):1177-1182.
- [17] 赵喜亭,周颖媛,邵焕娟.化学保鲜剂在果蔬贮藏保鲜中的应用[J].北方园艺,2012(14):191-194.
- [18] LI X W, JIN P, WANG J, et al. 1-methylcyclopropene delays postharvest ripening and reduces decay in Hami melon[J]. Journal of food quality, 2011, 34(2):119-125.
- [19] 李江阔,纪淑娟,魏宝东,等.1-MCP 对南果梨室温保鲜效果的影响[J].中国果树,2004(6):10-13.
- [20] 纪淑娟,卜庆状,李江阔,等.1-MCP 处理对‘南果梨’冷藏后货架期果实香气的影响[J].果树学报,2012,29(4):656-660.
- [21] 纪淑娟,董玲,周鑫,等.水杨酸对 1-MCP 处理南果梨冷藏后酯类香气的影响及作用机理[J].中国食品学报,2016,16(6):167-173.
- [22] 纪淑娟,沈映潇,赵丽萍,等.1-甲基环丙烯处理(1-MCP)对南果梨酯类物质、氨基酸及相关代谢酶的影响[J].食品科学,2012,33(18):286-289.
- [23] 赵丽萍,纪淑娟.冷藏后不同处理对 1-MCP 处理南果梨酯类物质及乙烯合成关键酶的影响[J].食品科学,2013,34(24):285-288.
- [24] 杨卫东,李江阔,张平,等.1-MCP 处理对贮藏前预熟南果梨货架期间果实衰老的影响[J].华北农学报,2010,25(2):164-167.
- [25] 于冠年,纪淑娟,魏宝东,等.1-MCP 处理对冷藏后南果梨常温货架影响[J].北方园艺,2007(1):180-182.
- [26] 张梦媛,白琳,吕静祯,等.1-甲基环丙烯对采后南果梨果实软化的影响[J].食品科学,2018,39(17):206-211.
- [27] ZHANG L, ZHOU X, WANG J W, et al. Proteomic analysis of the potential mechanism of fading of aroma-related esters in ‘Nanguo’ pears after long-term refrigeration[J/OL]. Journal of food biochemistry, 2019, 43(4) [2020-04-25]. https://doi.org/10.1111/jfbc.12771.
- [28] ZHANG L, WANG J W, CHEN J Y, et al. Preharvest spraying calcium ameliorated aroma weakening and kept higher aroma-related genes expression level in postharvest ‘Nanguo’ pears after long-term refrigerated storage[J]. Scientia horticulturae, 2019, 247:287-295.
- [29] 李志英.梨品种资源的抗寒力观察和南果梨杂交一代抗寒力及优良性状的传递[J].北方果树,1993(4):11-13.
- [30] 焦言英,赵桂敏,姜学仕,等.抗寒梨新品种——红南果的变异性状[J].北方园艺,1996(2):19-20.
- [31] 任宝君,陈国生,魏晓东,等.南果梨的优良芽变——大南果梨引种试验[J].北方园艺,1994(5):50-51.
- [32] 何彩梅.柑橘果酒酿造工艺研究进展[J].中国酿造,2016,35(3):10-12.
- [33] 陈坚生,杨幼慧,蹇华丽,等.荔枝酒贮藏过程中非酶褐变的因子解析[J].食品与发酵工业,2010,36(6):20-25.
- [34] 李莉峰,叶春苗,韩艳秋.南果梨酒发酵工艺优化及其主要香气成分变化分析[J].保鲜与加工,2018,18(1):64-70.
- [35] 李莉峰,叶春苗,韩艳秋.不同澄清剂对南果梨酒澄清效果的影响[J].食品工业,2017,38(5):129-132.
- [36] 李大鹏.苹果醇酰基转移酶基因 MdaAT2 参与酯类香气合成调控机理的研究[D].泰安:山东农业大学,2005.
- [37] 金宏,CA. 1-MCP 对粉红女士苹果贮藏期间香气及其相关酶活性影响的研究[D].西安:陕西师范大学,2009.
- [38] SHAHEEN N J. Raising the bar in studies of endoscopic anti-reflux procedures[J]. Gastroenterology, 2005, 128(3):779-782.
- [39] SRIVASTAVA M K, DWIVEDI U N. Delayed ripening of banana fruit by salicylic acid[J]. Plant science, 2000, 158(1/2):87-96.
- [40] 袁晖,韦云,李馨玥,等.‘南果梨’及其芽变‘南红梨’果实中糖分积累与相关基因表达差异分析[J].果树学报,2017,34(5):534-540.
- [41] 李馨玥,李通,袁晖,等.‘南果梨’果实发育过程中糖分积累与相关基因表达分析[J].果树学报,2016,33(S1):59-64.
- [42] 王龙,周鑫,盛蕾,等.冷藏对南果梨酯类香气合成关键酶活性及蛋白表达的影响[J].食品科学,2017,38(9):207-212.
- [43] 周鑫,董玲,纪淑娟.间歇升温诱导南果梨冷藏转常温酯类香气的变化和相关基因表达[J].食品科学,2015,36(14):206-211.

(上接第 197 页)

应加强滑坡监测和预警工作,安排好汛期值守工作,制定堆积层滑坡应急预案。

(2) 进一步研究降雨诱发堆积层滑坡的形成机制,并在研究该机制的基础上开展气象预警研究,研发一套基于降雨诱发堆积层滑坡形成机制的气象预警系统,进行区域性堆积层滑坡预警预报。

#### 4 结论

(1) 陕南地区堆积层滑坡空间分布上受地层岩性、地貌、地质构造、降雨及人类工程活动的影响,集中分布在千枚岩、泥岩、页岩和砂岩地层,中山区和低山区的地貌类型,沿活动断裂带和交通干线呈条带状分布,并在人口密集区域集中分布。

(2) 堆积层滑坡在发生时间上呈现一定的规律性:滑坡主要集中发生在每年的汛期(6—10月),并与年度暴雨发生次数保持良好的一致性。堆积层滑坡年度分布表现出一定的周期性,与极端气候条件周期性变化一致性好。

(3) 陕南地区堆积层滑坡发育特征主要为小型、浅层堆积层滑坡;滑动面主要为土-岩接触面;滑动面倾角主要为 20°~40°;滑体物质主要为含黏粒碎石土(碎石含量 10%~70%);滑带物质主要为全风化层或强风化层形成的残坡积

土,细粒含量高,遇水饱和后强度极低。

(4) 根据陕南地区堆积层滑坡的发育规律,提出了因地制宜的防治对策,提出了基于降雨诱发堆积层滑坡形成机制的气象预警研究思路,为陕南地区针对堆积层滑坡的防灾减灾工作提供了一定的参考。

#### 参考文献

- [1] 国土资源部.全国地质灾害防治“十三五”规划:国土资发[2016]155号[A].2016.
- [2] 杜继稳.降雨型地质灾害预报预警:以黄土高原和秦巴山区为例[M].北京:科学出版社,2010.
- [3] 陕西省山洪灾害防治规划编写组.陕西省山洪灾害防治规划报告[R].西安:陕西省水利厅,2004.
- [4] 陕西省减灾协会.秦巴山区山地自然灾害[M].西安:世界图书出版西安公司,1999.
- [5] 王雁林.陕南地区滑坡灾害气象预报预警及其防范对策探析[J].地质灾害与环境,2005,16(4):345-349.
- [6] 周静静,赵法锁,李辉,等.陕西省地质灾害与影响因素相关性研究[J].灾害学,2019,34(2):228-234.
- [7] 张子端,王建力,何潇,等.陕西地质灾害形成条件与对策探讨[J].安徽农业科学,2006,34(22):5951-5953.
- [8] 吴伟.山阳县降雨诱发堆积层滑坡形成演化机理研究[D].西安:长安大学,2019.
- [9] 李玉文.秦巴山区暴雨与地质灾害关系的气候学特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2007.
- [10] 熊炜.秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究[D].西安:长安大学,2012.