

文章编号: 1008-2786-(2019)5-737-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000464

黄土高原地质灾害发生规律

孙萍萍^{1,2}, 张茂省^{2*}, 程秀娟², 黄玉华², 薛 强², 刘 洁²

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 西安 710054)

摘 要: 我国每年约有 30% 地质灾害发生在约占国土面积 6% 黄土高原地区, 灾害数量多、危害严重、机理复杂, 然而由于对黄土灾害的发生规律仍然不明晰, 长期以来制约了区内大型工程建设、移民搬迁选址等工作。依托 1:5 万黄土高原区地质灾害调查数据, 通过专题要素图件编制和数理统计等手段, 重点分析 11 680 处地质灾害, 总结了灾害时空分布规律。结果表明, 1) 在区域地质构造抬升的背景下, 黄土高原地形破碎, 地貌沟壑纵横, 具有滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发的特点。2) 地质灾害具有明显的时空发生规律, 在整个黄土高原区域尺度上, 地貌演化与斜坡结构控制地质灾害空间分布和斜坡破坏模式; 在流域尺度上, 老年期、壮年期、幼年期等沟谷发育期控制着地质灾害变形破坏模式及危害程度; 在具体斜坡点上, 坡型、坡度、坡高等坡体几何形态控制地质灾害的类型和失稳概率; 在时间上, 降雨及冻融作用控制年内地质灾害的分布。

关键词: 黄土高原; 地质灾害; 滑坡; 发生规律; 斜坡结构

中图分类号: P694

文献标志码: A

作为中华民族的发祥地, 黄土高原曾经是古丝绸之路的黄金地段, 改革开放时期是西部大开发的主战场^[1-2], 现今是黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的核心区, 已发展成为我国重要的农牧业和能源化工基地。黄土高原连续分布面积达 44 万 km², 黄土堆积厚度大, 地层完整, 最厚达 505 m, 被誉为世界上第四纪和环境研究的三大支柱之一^[3]。我国学者利用地域优势, 在黄土第四纪和环境研究领域取得了重要进展和突破^[4]。然而, 黄土高原也是我国生态环境最为脆弱和地质灾害最为严重的地区之一, 频发的地质灾害严重地威胁着人民

群众的生命和财产安全, 给重大工程建设带来若干新问题^[5]。

20 世纪 80 年代开始, 地质灾害特别是滑坡灾害得到广泛关注, 相关研究蓬勃发展^[6]。与此同时, 我国政府先后部署了一系列递进式的基础性地质灾害调查工作, 包括 20 世纪 80 年代实施的大江大河和重要交通干线沿线地质灾害专项调查、90 年代实施的以地质灾害为主的环境地质调查(1:50 万)、21 世纪初实施的覆盖全国山地丘陵区的县(市)地质灾害调查(1:10 万), 这些基础性工作积累了黄土高原不同发展时期地质灾害本底信息。

收稿日期 (Received date): 2019-07-13; **改回日期** (Accepted date): 2019-09-27

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目(2018YFC1504700); 国家自然科学基金项目(41530640); 中国地质调查项目(DD20189270)。[National Key Research Planning Program (2018YFC1504700); National Natural Science Foundation of China (41530640); Project of China Geological Survey (DD20189270)]

作者简介 (Biography): 孙萍萍(1983-), 女, 辽宁阜新人, 博士生, 高级工程师, 从事黄土地质灾害调查与研究。[SUN Pingping(1983-), female, born in Fuxin City of Liaoning Province, Ph. D. candidate, senior engineer, specialized in investigation and research on loess landslides] E-mail: sunpingping203@gmail.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 张茂省(1962-), 男, 陕西乾县人, 博士, 研究员, 从事水工环地质调查与研究。[ZHANG Maosheng(1962-), male, born in Qian County of Shaanxi Province, Ph. D., professor, specialized in hydrogeology, engineering geology and environmental geology] E-mail: zazms@126.com

黄土具有强水敏性、结构疏松、大孔隙和垂直节理发育的特点^[7]。在降水集中、人类工程活动日益增强的背景下,近年来,在黄土区内滑坡、崩塌、泥石流等灾害呈现加剧的趋势,黄土高原被列为我国地质灾害的重点防治区之一^[8-9]。2000 年以来,有关黄土灾害的调查、研究力度持续加大。在黄土高原区系统部署实施了地质灾害调查(1:5 万)、监测预警和风险评估等研究示范工作。

本文依托 2005—2015 年间,黄土高原区实施的 1:5 万地质灾害调查数据开展研究。调查数据涉及黄土高原范围内的陕、甘、宁、青、新、晋、豫 7 省(区)的地质灾害高易发区,包括地质灾害隐患点 14 161 处,其中滑坡 6004 处、崩塌 2037 处、泥石流 2072 处、不稳定斜坡 3907 处、其他类型 141 处。本次筛选其中信息记录完整的 11 680 处地质灾害点,对黄土高原地质灾害发育特征和规律进行了分析,研究成果可为防灾减灾提供基础数据和科技支撑。

1 区域上受地貌演化与斜坡结构控制

1.1 地貌演化控制了地质灾害空间分布

黄土高原是一个以黄土地貌为主体的区域地貌单元,总体地势西北高,东南低,自西北向东南呈波状下降。在黄土地貌的形成与演化过程中,既有新构造活动为主的内动力地质作用的影响,也有以流水为主的外动力作用的痕迹,黄土的堆积与侵蚀相伴而生,在内外动力的综合作用下,形成了当今沟壑纵横的黄土高原地貌。黄土地貌演化为地质灾害的形成提供了空间条件,控制了灾害在区域空间上的分布。

黄土高原分布着基岩山地、黄土梁、黄土峁、黄土塬(台塬)、河谷阶地、山前冲洪积扇、盆地等多样的地貌类型(图 1)。黄土梁是区内分布最广的地貌类型,约占全区面积的 50%。在各种地貌组合类型

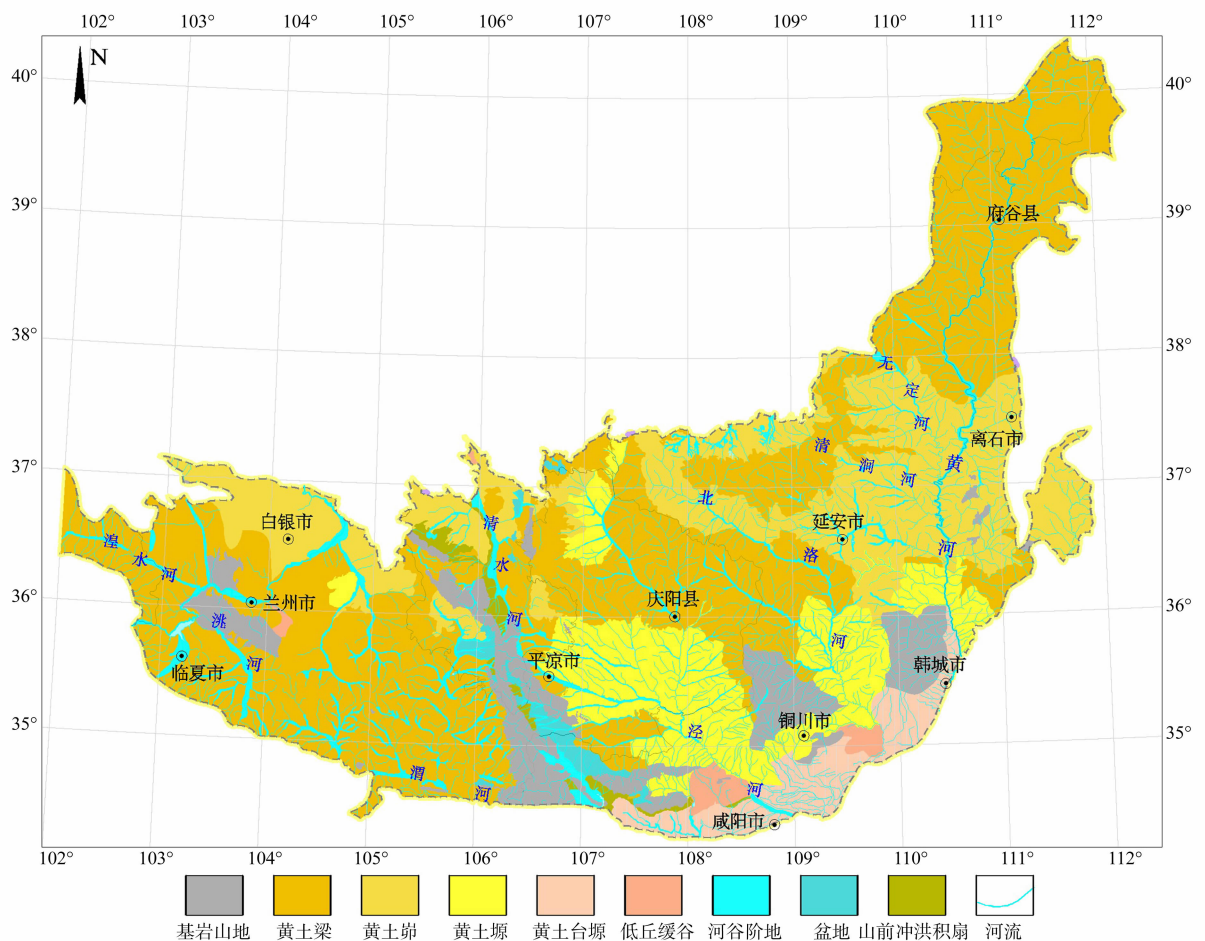


图 1 黄土高原地貌图

Fig. 1 Geomorphology map of the Loess Plateau

中,地质灾害发育的规模和密集程度有较大差异。调查发现^[10],地质灾害发育数量按照黄土梁—黄土塬—黄土峁—河谷阶地—基岩山地—山前冲洪积扇—黄土台塬—低丘缓谷地貌单元的次序逐渐减少,其中黄土梁、塬、峁、河谷阶地地貌单元的地质灾害数量约占到地质灾害总数的 95%,地质灾害以滑坡为主,并多发育为黄土层内滑坡(表 1)。

各地貌单元单位面积内发生的地质灾害数量以河谷阶地内地质灾害最为发育,其发育密度高于其他地貌类型,达到 15 个/100 km²,黄土塬区次之,为 11 个/100 km²,黄土梁、黄土峁和山前冲洪积扇地貌的地质灾害发育频度虽然有差别,但均少于 4 个/100 km²(图 2)。阶地地貌内斜坡发育程度高、临空面大、人类活动密集,大量的边坡开挖、卸载等加剧滑坡和崩塌等地质灾害的发生,因此分布的灾点密度最大。说明在一定高差条件下,地形愈破碎,人类活动愈强烈,地质灾害活动愈频繁。

1.2 斜坡结构类型控制斜坡变形破坏模式

在区域构造和地貌的控制下,黄土高原斜坡结构类型分布具有区域特征,在斜坡结构类型控制下的不同地质灾害呈现出区域分布特征。

区内斜坡大面积覆盖黄土层,部分出露有新近纪红粘土和中生代砂泥岩地层。根据斜坡物质组成,将区内斜坡结构分为岩质斜坡、土质斜坡及岩土复合斜坡三类一级斜坡类型^[11],再进一步根据斜坡地层组成、地层走向等将其划分为若干二级斜坡结

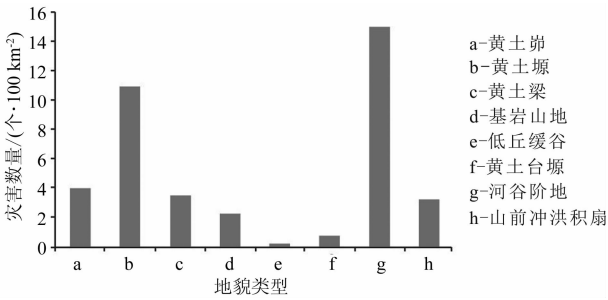


图 2 地质灾害在各类地貌单元的发育频度

Fig. 2 Rates of geohazard occurrences according to different types of geomorphic units

构类型。

土质斜坡主要由第四纪黄土和新近纪红粘土组成,按照两种土层的组成和地层走向可将土质斜坡进一步划分为近水平层状黄土斜坡、倾斜层状黄土斜坡和黄土—红黏土复合土质斜坡三个亚类(图 3)。土质斜坡是黄土高原分布最为广泛的一种斜坡结构类型,在陕北黄土梁峁区、陇东、渭北以及汾渭盆地黄土台塬等黄土堆积较厚的地区均可见。在这种斜坡结构类型控制下,多发育有大量黄土滑坡,且水是该类型斜坡产生变形破坏的重要因素。降水以均匀或优势入渗的形式下渗,影响斜坡土体含水量分布或引起地下水位变动,当在相对连续的古土壤层或红黏土层形成饱水软化带时,黄土力学强度显著减低,甚至呈现流塑状态,易形成滑坡。

岩质斜坡主要由不同类型的岩体组成,根据岩体结构可将岩质斜坡进一步划分为若干亚类,其中

表 1 黄土高原地貌类型与地质灾害分布表

Tab. 1 Geohazards distribution at different geomorphic types at the Loess Plateau

黄土高原 地貌类型	滑坡/个			崩塌/个		泥石流 /个	不稳定斜坡/个			地面塌陷、 地裂缝 /个	总计 /个
	黄土层 内滑坡	黄土泥 岩滑坡	黄土基 岩滑坡	黄土 崩塌	基岩 崩塌		潜在黄土 层内滑坡	潜在黄土 泥岩滑坡	潜在黄土 基岩滑坡		
黄土峁	598	386	594	246	28	26	25	16	16	8	1939
黄土塬	998	343	209	392	25	102	135	8	8	18	2318
黄土梁	1077	880	698	336	51	607	125	184	184	57	4107
基岩山地	0	54	145	0	45	135	0	8	8	5	412
低丘缓谷	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3
黄土台塬	0	5	5	2	4	1	6	3	3	0	26
河谷阶地	522	230	249	152	32	220	121	25	25	51	1625
山前冲洪积扇	14	4	7	17	9	4	0	0	0	0	55

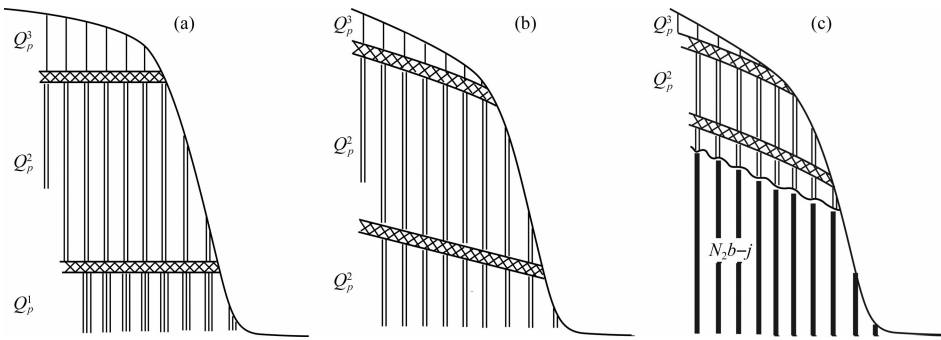


图3 土质斜坡结构类型: (a) 近水平层状黄土斜坡; (b) 顺倾层状黄土斜坡; (c) 黄土-红黏土斜坡

Fig. 3 Structure types for soil slopes: (a) horizontal-layered loess slopes; (b) inclined-layered loess slopes; (c) loess-clay slopes

层状软硬相间岩质斜坡和厚层坚硬岩质斜坡在区内较为常见(图4),主要分布于局部隆起的基岩山地。在内外地质动力作用下,此类岩质斜坡通常较陡,破坏形式以崩塌为主,降雨和风化剥蚀是造成此类斜坡失稳破坏的主要因素。厚层坚硬岩质斜坡,由于岩体坚硬,形成灾害的比例较小。层状软硬相间岩质斜坡,由于两种岩体的抗风化能力不同,在降雨或风化剥蚀作用下,软岩易风化剥落,上部硬岩临空形成崩塌。

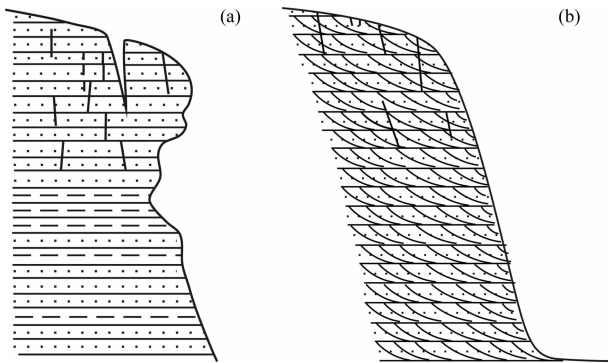


图4 岩质斜坡结构类型

(a) 软硬相间水平层状基岩斜坡; (b) 厚层坚硬水平层状基岩斜坡

Fig. 4 Structure types for rock slopes

(a) horizontal-layered slopes with inter-bedding of soft and hard rocks; (b) horizontal-layered slopes with thick and hard rocks

岩土复合斜坡可根据组成斜坡的岩土体类型进一步细分为厚层黄土-基岩复合斜坡、薄层披覆黄土-基岩斜坡、黄土(次生黄土)-冲积物-基岩阶地型复合斜坡、坡残积物-基岩复合斜坡等亚类(图5)。其中,厚层黄土-基岩斜坡,在黄土与基岩接触带易造成水分富集而形成软化带,基岩面常成为滑坡的剪出口;薄层披覆黄土-基岩斜坡,由于黄

土层较薄,且斜坡内的水分可通过基岩节理、裂隙排出,坡体整体稳定性较好;黄土-冲积物-基岩阶地型斜坡,因其宽阔的阶地,通常成为城市(镇)的建设区,人类工程活动常诱发切割黄土层的大型滑坡;坡残积物-基岩斜坡,斜坡坡度通常较陡,黄土很难在其上堆积,残坡积物的厚度亦不大,可形成小型的残坡积物滑动。

2 流域上受沟谷发育期控制

强烈的新构造运动及其伴生的古气候环境的变化是黄土高原水系形成的主要动力,河流顺应地势由西北向东南注入黄河,干流深切,支流密布^[12]。流域范围内,地质灾害的分布与水系的发育与分布关系密切,地质灾害多发育在黄河流域的一、二、三级支流沟谷两岸和河流交汇处(图6),如区内的沮水河、葫芦河、洛河交汇区域,南川河、西川河、长尾河与延河交汇区域,马莲河、四郎河、黑河与泾河交汇区域等(表2)。

河流沟谷演化的过程也是黄土地层不断被侵蚀、切割的过程,沟谷发育的不同时期控制了地质灾害的类型及规模(图7)。

按照河流沟谷的形成时代、地形特征及其相互汇入关系,可将黄土高原的沟谷发育期划分为老年期沟谷、壮年期沟谷、幼年期沟谷和婴年期沟谷四种类型。老年期沟谷发育一级及一级以上阶地,沟谷宽阔,河流对沟谷两侧侵蚀强度相对较弱,地质灾害较少由自然因素诱发,多为工程活动引起,灾害数量多且造成的损失严重;壮年期沟谷,以侧向侵蚀为主,垂直下切较缓,谷坡两侧斜坡坡度 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$,斜坡易失稳变形,地质灾害密度较大,类型以滑坡为

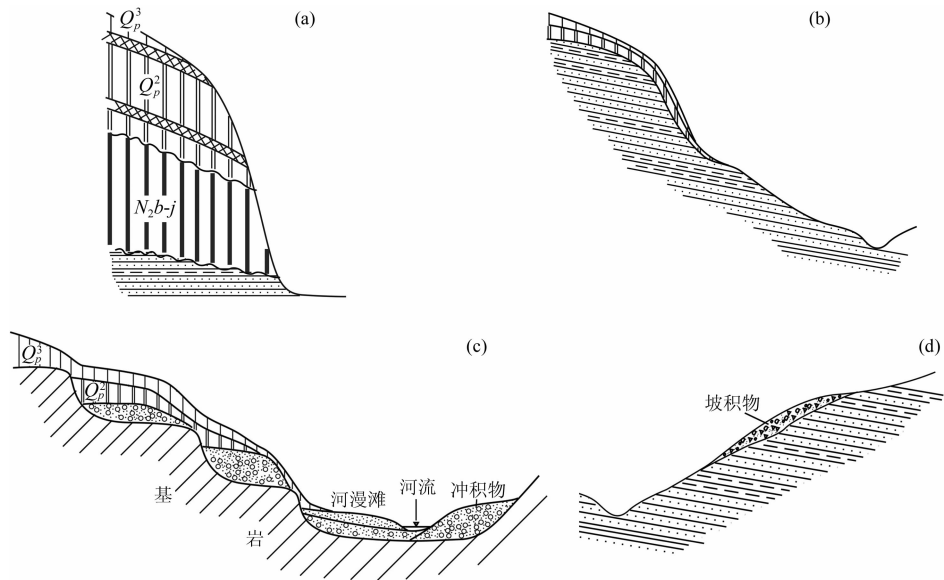


图 5 岩土复合斜坡结构类型

(a) 厚层黄土 - 基岩斜坡; (b) 薄层披覆黄土 - 基岩斜坡; (c) 黄土 - 冲积物 - 基岩阶地型斜坡; (d) 坡残积物 - 基岩斜坡

Fig. 5 Structure types for slopes with multiple sediments

(a) thick-layered slopes of loess and rocks; (b) rock slopes with thin-covered loess;

(c) loess-alluvium-rock stepped slopes; (d) colluvium and rock slopes

表 2 河网交汇位置地质灾害分布

Tab. 2 Geohazards distribution at the cross section of different rivers

所属河流	河网交汇区	交汇区河流	灾害发育情况
湟水河	乐都区、民和县、永靖县	大通河、引胜沟	较发育
洮河	岷县、碌曲县、临洮县	周科河、东峪沟及其他支流	一般发育
延河	延安市宝塔区、延长县、安塞区	南川河、西川河、长尾河、杏子河	发育
渭河	宝鸡市、天水市	渭河各级小支流	发育
北洛河	黄陵县、洛川县、富县、甘泉县	沮水、石堡川、葫芦河、水河、仙姑河	发育
泾河	泾源县、泾川县、镇原县、西峰区、庆阳市、合水县	马连河、四郎河、黑河、达溪河、马栏河	发育

主;幼年期沟谷是河谷发育的初期,一般不属于长流水型河流,多是壮年期河流的支沟,沟谷深度不一,谷底狭窄,垂直下切强烈,风化、卸荷裂隙发育,破坏以崩塌为主,威胁对象不多;婴年期沟谷多为雨水冲刷黄土坡面形成,一般高悬在黄土梁崩边坡、黄土塬边以及切入黄土塬内的幼年期沟谷或壮年期沟谷的谷坡上,密集分布,往往顺坡平行展布,沟谷很不稳定,相邻沟谷彼此合并现象多见,这类沟谷以下蚀作

用和溯源侵蚀为主,是黄土区水土流失的主要初始通道。

3 斜坡点上受坡体几何形态控制

坡面形态直接影响斜坡的稳定性。黄土高原分布的斜坡形态类型总体可划分为正向型和负向型坡两大类,正向型坡包括凸型和直线型二类,负向型坡包括阶梯型和凹型二类。区内的滑坡和崩塌均多发生在直线型和凸型的正向坡,约分别占滑坡和崩塌发生总数的 69% 和 86% (表 3)。可见,与负向类凹型和阶梯型坡相比,正向类的凸型和直线型斜坡更易失稳,产生滑坡和崩塌灾害。

坡度控制了斜坡内部应力的分布和状态。坡面应力随坡度的增大而增大,坡脚应力随之集中愈为明显^[13]。以 10° 为区间,对黄土高原不同坡度的斜坡进行划分,统计各区间内地质灾害的发生数量 (表 4)。结果表明,滑坡多发生在坡度区间为 20° ~ 50° 的斜坡,约占统计数据中滑坡总数的 82%; 60° 以上的斜坡,构造节理、卸荷张裂隙扩展明显,崩塌多集中发育于此,约占崩塌灾害总数的 78%。

坡高虽不会改变坡体内部应力的分布,但会影响坡体不同位置处应力的大小,应力值会随坡高的

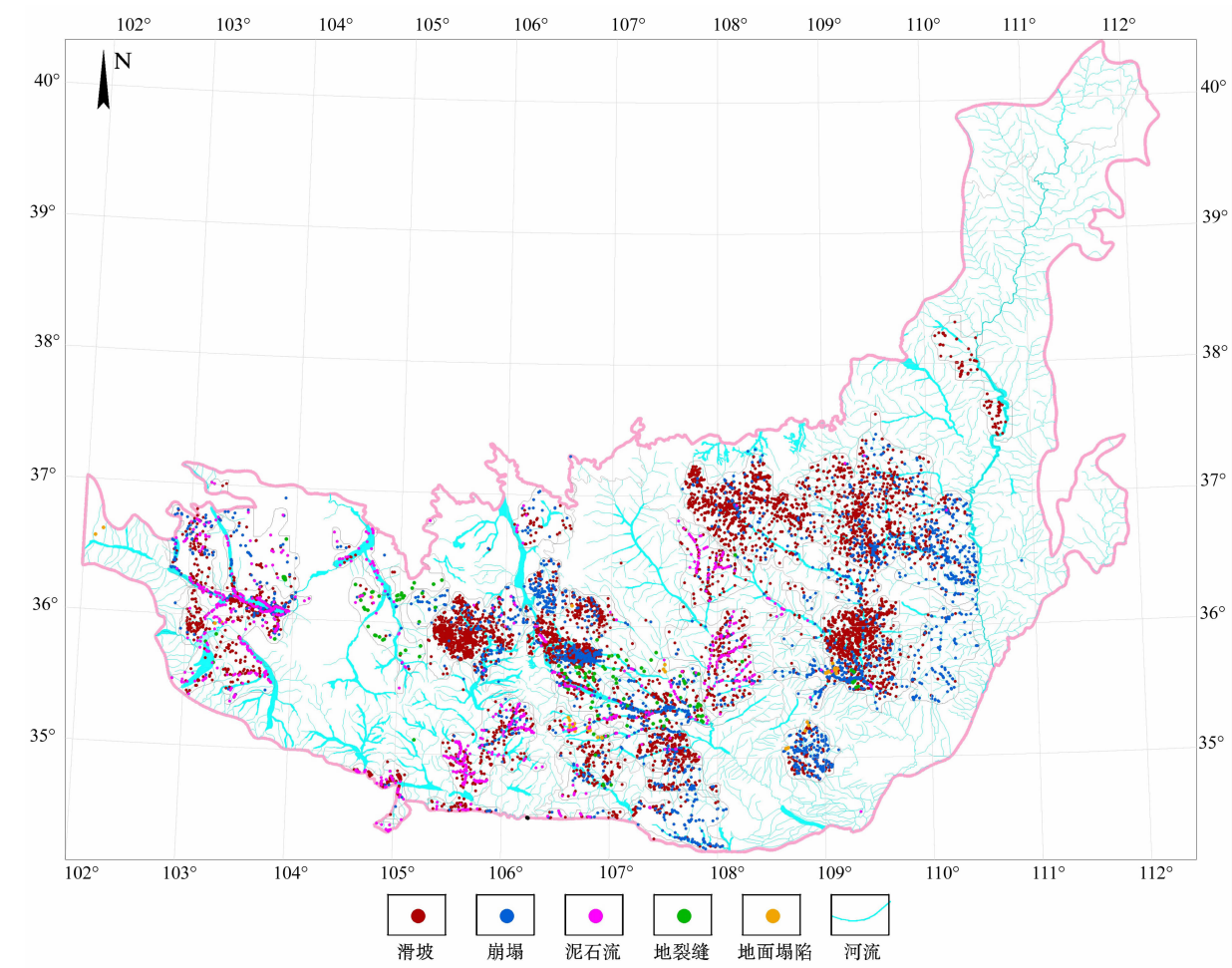


图 6 黄土高原水系与地质灾害分布相关图

Fig. 6 Relationship of geohazards and river distribution at the Loess Plateau

表 3 不同地质灾害类型对应的坡型统计表

Tab. 3 Geohazards occurrence at slopes with different morphology

坡型划分		滑坡统计		崩塌统计	
		数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%
正向坡型	凸型	2831	28.30	1016	60.57
	直线型	4156	41.56	437	26.02
负向坡型	凹型	1624	16.23	161	9.61
	阶梯型	1391	13.91	64	3.80
合计		10002	100.00	1678	100.00

增大呈线性增长,滑坡的个数也相应增多^[14]。分别以 15 m 和 20 m 为区间,统计分析失稳斜坡,发现在坡高 20 ~ 120 m 的斜坡上滑坡发育较多,共有 7846 处,约占滑坡总数的 78%,高度小于 20 m 和大于 120 m 的斜坡上滑坡发育则较少,仅占 22%;以 15 m 和 20 m 为坡高区间进行统计,结果并未对滑坡分布

表 4 各类地质灾害坡度区间统计表

Tab. 4 Geohazards distribution at slopes with different slope gradient intervals

坡度区间 /度	滑坡统计		崩塌统计	
	数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%
0 ~ 10	61	0.63	4	0.33
11 ~ 20	639	6.40	5	0.40
21 ~ 30	2910	29.05	31	2.00
31 ~ 40	3460	34.53	42	2.66
41 ~ 50	1892	18.89	111	6.72
51 ~ 60	624	6.25	160	9.58
61 ~ 70	273	2.76	355	21.02
71 ~ 80	97	0.99	372	22.02
81 ~ 90	46	0.48	598	35.26
合计	10002	100.00	1678	100.00

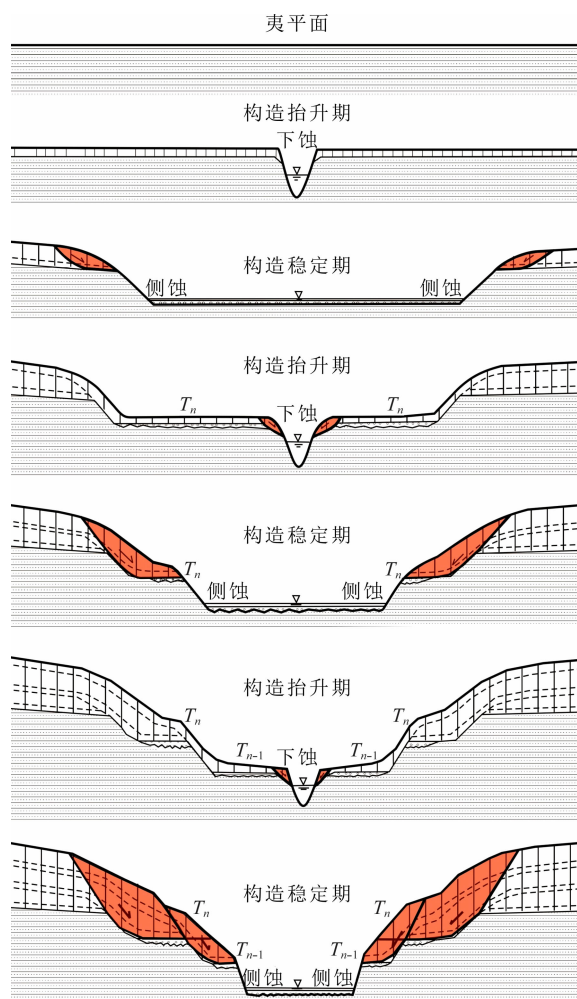


图7 沟谷演化与地质灾害孕育过程图

Fig. 7 Relationship of geohazards and evolution phases of river valleys

规律产生影响(图8)。

自然临界状态的斜坡,其坡度和坡高具有相关性,坡高会随坡度的增大而降低。滑坡在不同坡度或坡高区间的发生数量并不能代表坡度或坡高对斜坡稳定性的绝对控制作用,需要进一步统计该区间

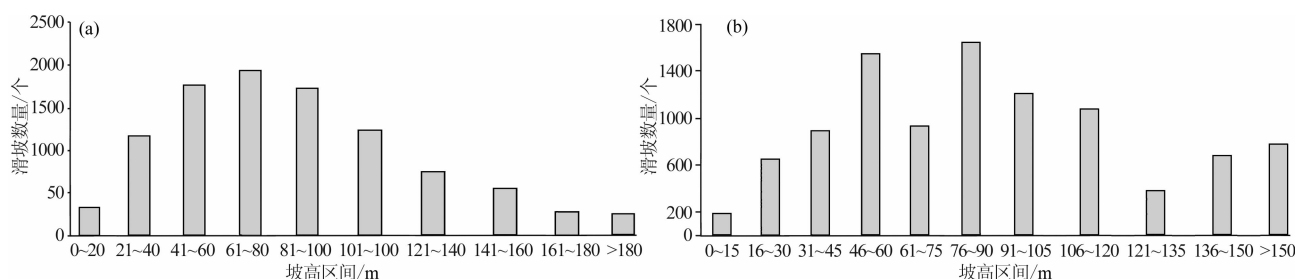


图8 坡高与斜坡稳定性关系:(a)坡高区间 15 m;(b)坡高区间 20 m

Fig. 8 Relationship of slope height with stability

(a) slope height with intervals of 15 m; (b) slope height with intervals of 20 m

在调查区斜坡中出现的比率。以陕西省延安市宝塔区为例,60 m 以上的斜坡在区内的分布数量较少,但滑坡多发生于此,即 60 m 以上的斜坡发生滑坡的频率最高,是滑坡发生的优势区间^[13]。对黄土高原其他各地统计,总体上也显示这一规律。

4 时间上受降雨与冻融控制

黄土高原接近欧亚大陆腹地,地理纬度和海拔高度较高,属温带大陆性气候。年内降雨量虽小,但时间上却集中,具明显的季节性变化规律。全年降水有 50%~70% 集中在 7 月—9 月的盛夏季节,其中 7、8 月份多暴雨,9 月份多连阴雨;秋季降水约占全年降水量 20% 左右;春季一般占全年降水量 20% 以下;冬季降水最少,约为全年降水量 5%。冬季寒冷,春季气温回升迅速,冻融交替作用显著。

据统计数据可知,地质灾害在全年均有发生,其中 7 月—9 月降雨集中,滑坡、崩塌等地质灾害的发生频率随降雨而出现峰值,10 月虽不是降雨集中期,但地质灾害的发生频率仍较高,说明地质灾害的发生相对降雨具有一定的滞后性(图 9)。降雨对黄土斜坡的作用主要分为两类:一类是降雨沿黄土斜坡浅表层节理裂隙入渗,诱发浅层黄土滑坡;另一类是降雨汇集雨水通过落水洞、长大贯通裂缝等优势通道直接灌入斜坡深部位置,导致斜坡产生深层滑动。均质黄土渗透性较差,饱和渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ ^[15-16],大量降雨模拟实验与现场观测表明降雨沿黄土斜坡表层节理裂隙入渗深度有限,雨水的入渗导致浅层黄土含水量增加直至饱和,随着降雨影响深度的逐步增加,黄土斜坡浅表层孔隙水压力上升,强度逐步衰减,在重力作用下浅表层土体产生滑动破坏,形成浅表层黄土滑坡。2013 年

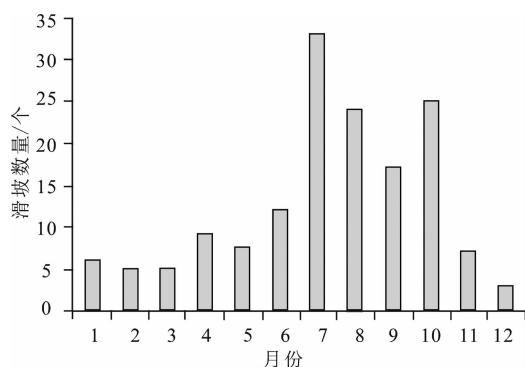


图9 有时间记录的各月地质灾害频率

Fig. 9 Rate of geohazard occurrences at each month based on recorded data

7月陕北强降雨导致延安市一次性引发黄土崩滑灾害8000余起,造成45人死亡,1万余孔窑洞受损^[17]。同年7月,甘肃天水遭受强降雨,暴雨引发大量浅层黄土滑坡与黄土坡面泥流,造成了严重危害。具有落水洞、长大贯通裂缝等优势通道的黄土斜坡,在降雨条件下,降水汇集并沿优势通道快速灌入黄土斜坡体内,导致坡体内局部区域地下水抬升,形成上层滞水,进一步诱发深层黄土滑坡产生,这类滑坡滑动深度通常受优势通道深度的控制^[18-19]。延安市子长县阎家沟滑坡、吴起县大台滑坡均为降雨条件下优势通道控制形成的黄土深层滑坡。

黄土高原地区受季风环流控制,寒暑分明,冬季寒冷干燥,春季气温快升多变,季节性冻融作用强烈^[20]。区内最大季节性冻土深度为1.0~2.5 m,每年10月—11月开始冻结,翌年2月—4月解冻,虽然冻结层厚度不大,但由此引发的地质灾害多且危害严重^[21]。冻融作用对黄土滑坡的诱发作用主要表现在两个方面:一是黄土冻结层堵塞地下水排泄通道,导致斜坡局部范围内地下水位升高,动、静水压力增大;二是周期性冻融作用导致黄土结构破坏,进一步降低冻融影响区内黄土强度。二者作用以前者为主导,地下水位上升导致斜坡体内土体大范围饱水、强度降低,这种作用影响范围与深度均较大,对黄土滑坡大规模产生具有显著的触发作用。冻融作用诱发的滑坡多发生在黄土台塬的斜坡地带,进入冬季,随着气温降低,斜坡开始冻结,在冻结过程中,斜坡冻结层渗透系数减少,阻挡了地下水排泄,泉流量不断减小,乃至泉水停歇,斜坡体内水分聚集,地下水向上寻找新的排泄出口,排泄口再次被

冻结,如此反复,造成水位不断壅高,孔隙水压力持续增大^[22];冬末春初,气温回升且多变,冻融过程反复循环,引起土体抗剪强度锐减。大量调查表明,冻融作用已成为除降雨和人类工程活动外,诱发黄土高原地质灾害的不可忽视的重要因素,在年内具有明显的时间分布特征,冻融型黄土滑坡主要发生时间集中在每年2月—4月。甘肃永靖黑方台地区受冻融作用的影响较为强烈,据统计每年1月—3月产生的冻融型黄土滑坡灾害占该区黄土滑坡灾害总数的1/3,2012年2月焦家崖滑坡造成了4人死亡;2019年3月15日,山西乡宁发生的冻融型黄土滑坡,造成20人遇难。

5 结论

(1)黄土高原地形地貌的形成与演化为区内地质灾害的形成提供了空间条件,广为分布的黄土地层为地质灾害的发生提供了物质基础,灾害类型主要以滑坡和崩塌为主,黄土层内和黄土-基岩(泥岩)面滑坡是滑坡的主要类型。

(2)黄土结构疏松、水敏性强的特性是黄土地质灾害多发的内因。黄土与其下伏的不同地层形成多种斜坡结构类型,易滑地层和控滑结构面的存在加剧了黄土地质灾害的发生。

(3)河网交汇密度与地质灾害发育程度呈正相关关系;不同发育期的沟谷形态特征控制了其两侧斜坡的稳定程度与破坏方式;斜坡几何形态对地质灾害有明显的控制作用。

(4)地质灾害的分布与降雨、冻融的年内分布呈正相关关系,灾害的发生较降雨的发生及变化有一定的滞后性。

参考文献 (References)

- [1] 孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 香港:香港考古学会,2005:1.
[SUN Jianzhong. Loessology (Vol. 1) [M]. Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society, 2005:1]
- [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 a example [J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 303-315]
- [3] BETTIS E A, MUHS D R, ROBERTS H M, et al. Last glacial

- loess in the conterminous USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**(18/19): 1907–1946.
- [4] SUN Youbin, CLEMENS S C, MORRILL C, et al. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon [J]. *Nature Geoscience*, 2012, **5**(1): 46–49.
- [5] 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 research of loess geological hazards [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(4): 684–691]
- [6] 李媛, 孟辉, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, **15**(2): 29–34. [LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China—Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, **15**(2): 29–34]
- [7] 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. *地球环境学报*, 2016, **7**(4): 323–334. [ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, **7**(4): 323–334]
- [8] 徐张建, 林再贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(7): 1297–1312. [XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(7): 1297–1312]
- [9] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 30–31. [LEI Xiangyi. Geological disasters and human activities on the loess plateau of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 30–31]
- [10] 张茂省, 孙萍萍, 程秀娟, 等. 西北黄土高原地质灾害综合研究报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2015. 12. [ZHANG Maosheng, SUN Pingping, CHENG Xiujuan, et al. Report on the comprehensive research of geohazards at the Loess Plateau, northwest China [R]. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, 2015. 12]
- [11] 刘文红. 黄土高原滑坡发育背景与成灾模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2016: 52. [LIU Wenhong. Study on the background and disaster modes of landslide on Loess Plateau [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016: 52]
- [12] 雷祥义. 黄土高原河谷阶地黄土地层结构模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **2**(2): 113–122. [LEI Xiangyi. Models of loess stratigraphical structure on the terraces in the loess plateau of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(2): 113–122]
- [13] 张茂省, 校培喜, 魏兴丽, 等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 109–111. [ZHANG Maosheng, XIAO Peixi, WEI Xingli, et al. Landslide and collapse disasters in Baota area of Yan'an [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 109–111]
- [14] ZHANG M, LIU Jie. Controlling factors of loess landslides in western China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59**(8): 1671–1680.
- [15] 李萍. 黄土中水分迁移规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2013: 1–6. [LI Ping. Study on the regularities of water migration in unsaturated loess [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 1–6]
- [16] TU X B, KWONG A K L, DAI F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides [J]. *Engineering Geology*, 2009, **105**(1/2): 134–150.
- [17] WANG Genlong, LI Tonglu, XING Xianli, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(12): 7933–7944.
- [18] 李同录, 习羽, 侯晓坤. 水致黄土深层滑坡灾变机理[J]. *工程地质学报*, 2018, **26**(5): 1113–1120. [LI Tonglu, XI Yu, HOU Xiaokun. Mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(5): 1113–1120]
- [19] 张珊珊, 张茂省, 孙萍萍, 等. 面向黄土地质灾害的优势流研究[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2019, **55**(2): 274–280. [ZHANG Shanshan, ZHANG Maosheng, SUN Pingping, et al. Advances in and outlooks of preferential flow study in unsaturated soils [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2019, **55**(2): 274–280]
- [20] 曾磊. 季节性冻融过程黄土斜坡水文效应及其稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018: 1. [ZENG Lei. Study on the hydrological effect and stability of loess slope on seasonal freezing-thawing process [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018: 1]
- [21] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(4): 530–540. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(4): 530–540]
- [22] 张茂省, 程秀娟, 董英, 等. 冻结滞水效应及其促滑机理——以甘肃黑方台地区为例[J]. *地质通报*, 2013, **32**(6): 852–860. [ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, DONG Ying. The effect of frozen stagnant water and its impact on slope stability: A case study of Heifangtai, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, **32**(6): 852–860]

On the Regularity of Geological Hazards on the Loess Plateau in China

SUN Pingping^{1,2}, ZHANG Maosheng^{2*}, CHENG Xiujuan²,
HUANG Yuhua², XUE Qiang², LIU Jie²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, of Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: There are about 30% of the total geological hazards occurring on the Loess plateau of China each year, but they occupy only about 6% of Chinese land area. Although loess geohazard are characterized by diverse types and large occurrences, complicated mechanisms and serious aftermaths, their occurrence regularity are still unclear, which has restricted the construction of large-scale projects, relocation and site selection of immigrants in the region for a long time. In this study, it inspected the catalog data from a report of geohazard survey with the scale of 1:50 000 in the Loess Plateau area, campaigned by China Geological Survey since 2005. 11680 geological disaster records were scrutinized with reexamination of detailed information. The temporal and spatial distribution of loess geohazards was delineated by statistics analysis and compilations of thematic maps of geohazard survey. The results show that: 1) under the influence of regional tectonic uplift, vertical and horizontal gullies richly developed in broken loess terrain contributed to frequent occurrences of loess geohazard such as landslide, collapse and debris flow. 2) Loess geohazards are characterized by obvious spatio-temporal formation. As viewed from a regional scale of the Loess Plateau, geomorphological evolution and slope structure of loess massif dominated the spatial distribution of loess geohazards and slope failure modes; On the basin scale, the deformation and failure modes of loess slopes, as well as the resulting aftermaths were associated with the evolution phases of loess gullies, such as old-stage, adult-stage and young-stage of a gully; At a given slope site, the morphology of a slope such as geometry, inclination, height, etc. determined the type of loess geohazards and their failure probability; As viewed from time scale, loess geohazards mostly occurred during monsoon, freezing-thawing seasons in a year. This research would provide a scientific insight into loess geohazard regularity in different circumstances.

Key words: loess plateau; geohazards; landslides; distribution pattern; slope structure