

极端暴雨下典型小流域重力侵蚀的分布及影响因素

喻涵^{1,2}, 周子渊³, 王 一⁴, 韩剑桥^{1,2}, 张 曼^{1,2}, 党维勤³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3.黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站, 陕西 榆林 719000; 4.山东省莱阳市沐浴水库管理中心, 山东 烟台 264000)

摘要: 为探究极端暴雨下重力侵蚀分布规律及其环境条件, 以 2019 年“利奇马”台风引发的特大暴雨事件为对象, 采用无人机航拍、室内解译等方法, 研究了位于暴雨中心的山东省临朐县曾家沟小流域内不同类型重力侵蚀的数量、空间分布特征及其影响因素。结果表明: (1) 小流域内发生的重力侵蚀共 70 处, 主要类型为滑坡(49 处), 其次为泥石流(14 处) 和崩塌(7 处)。 (2) 重力侵蚀面积、侵蚀量分别与坡度变率、坡度、坡位、高程、坡向和坡向变率呈正相关, 与距梯田距离、距道路距离和土地利用类型呈负相关。 (3) 坡度是影响重力侵蚀的最重要因素, 侵蚀易发生在坡度为 30°~50°的斜坡。 (4) 人类活动对重力侵蚀的影响较大, 特大暴雨下的严重重力侵蚀多发生在梯田田坎、道路边坡等位置, 需将重力侵蚀防治的重心放在加强道路两侧边坡、梯田田坎和坡度>30°的陡坡边坡防护上。研究结果可为应对和预防重力侵蚀灾害提供科学依据。

关键词: 台风“利奇马”; 极端暴雨; 重力侵蚀; 坡度; 防灾减灾

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0069-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.010

Distribution and Influencing Factors of Gravitational Erosion in Typical Small Watershed Under Extreme Rainstorm

YU Han^{1,2}, ZHOU Ziyuan³, WANG Yi⁴, HAN Jianqiao^{1,2}, ZHANG Man^{1,2}, DANG Weiqin³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100; 3. Sui De Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station of the Yellow River Conservancy Commission, Yulin, Shaanxi 719000; 4. Management Center of Muyu Reservoir, Yantai, Shandong 264000)

Abstract: To explore the distribution of gravitational erosion and its environmental conditions under extreme rainstorm. The extremely rainstorm event caused by Typhoon “Lekima” in 2019 was chosen as the target. Using UAV aerial imagery and remote sensing interpretation, the quantities, spatial distribution characteristic and influencing factors of various gravitational erosion in Zengjiagou small watershed of Linqu County, Shandong Province, where the center of extremely rainstorm was located. The results showed that: (1) There were a total of 70 gravitational erosions in Zengjiagou. Among which, the predominant type was Landslide (49 sites), followed by debris flow (14 sites) and collapse (7 sites). (2) Gravitational erosion area and erosion amount were positively correlated with slope variation, slope, slope position, elevation, slope direction and slope direction variation, respectively, and negatively correlated with distance to terrace, distance to road and land use type. (3) Slope was the most important factor affecting gravitational erosion, which was prone to occur on slopes ranging from 30° to 50°. (4) Gravitational erosion had been profoundly influenced by human activities. Under heavy rainstorm, severe gravity erosion mostly occurred in terraced field and road slopes. The gravitational erosion prevention and control should be focused on strengthening the protection on both sides of the slope road, terraced field, and steep slopes with slope >30°. The results can provide scientific basis for coping with and preventing gravitational erosion disasters.

收稿日期: 2022-11-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177327); 黄河水科学研究联合基金重点项目(U2243212)

第一作者: 喻涵(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: yuhan06@163.com

通信作者: 韩剑桥(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事流域洪水泥沙灾害研究。E-mail: hjq13@163.com

张曼(1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农田碳氮循环研究。E-mail: manman0203@126.com

Keywords: typhoon “Lekima”; extreme rainstorm; gravitational erosion; slope; disaster prevention and reduction

重力侵蚀是山区普遍的土壤侵蚀类型之一^[1],其形式包括崩塌、滑坡、泥石流等,危害巨大^[2]。降雨是重力侵蚀的主要触发因素^[3],大多数重力侵蚀往往发生在极端暴雨期间或之后^[1,4]。在全球气候变化的背景下,气候变暖导致水文循环发生变化,极端暴雨事件增加^[5],造成重力侵蚀灾害频发。因此,探寻极端暴雨下重力侵蚀的发生特点和影响因素,对重力侵蚀防灾减灾具有重要的理论和实践意义。

除降雨外,地形地貌和植被也是重力侵蚀形成、演变、分布的重要影响因素^[6-7]。陡峭地形增加了发生重力侵蚀的可能性,而重力侵蚀对地表的长期作用导致破碎地貌的形成,同时削弱了沟坡的稳定性,即两者相互影响、互为因果^[8]。坡度对重力侵蚀总量、滑坡侵蚀量和崩塌侵蚀量的影响较大^[6]。坡向和坡位的不同导致坡面土壤含水量等因素之间存在差异,间接影响植被生长状况,进而造成重力侵蚀的不同^[9]。而植被对沟坡重力侵蚀的影响则具有两面性,植被根系固结土壤,使重力侵蚀量减少^[3],但植被促进地表径流入渗,又加剧重力侵蚀的发生^[10]。由于重力侵蚀成因复杂,且区域地形、土地利用等环境因子均有差异,极端暴雨下重力侵蚀问题应因地制宜分析。

受 2019 年第 9 号台风“利奇马”影响,山东局部地区发生特大暴雨。其中,位于暴雨中心的临朐县次降雨量超过 570 mm,占临朐县多年平均降雨量的 82%,达到百年一遇标准,引发了严重的土壤侵蚀灾害^[11],为研究极端暴雨下的重力侵蚀灾害提供了典型案例。因此,本文选择山东临朐县曾家沟小流域为研究对象,基于无人机航拍和室内解译,结合不同类型重力侵蚀的数量和分布特征,采用冗余分析研究坡向、坡度、高程等 9 个因素对重力侵蚀的影响程度及差异,以期应对和预防重力侵蚀灾害提供科学依据。

1 研究区概况

曾家沟小流域位于 36°12′57″—35°13′35″N, 118°34′08″—118°35′27″E, 总面积为 1.61 km², 隶属山东省潍坊市临朐县九山镇(图 1)。海拔 368~664 m, 地貌以低山丘陵为主。气候属亚湿润大陆性季风气候, 雨热同期, 年平均气温 12.8℃, 年最大降水量为 1 200 mm。流域内多为棕壤土, 植被以刺槐、黑松、蜀桧、荆条等为主。曾家沟小流域为北方土石山区, 属于国家级水土流失重点治理区。在台风“利奇马”影响下, 小流域受灾严重, 台风路径和影响范围见图 1。

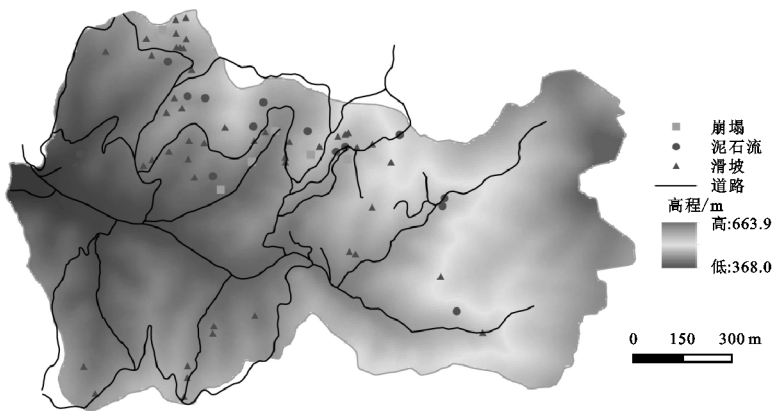
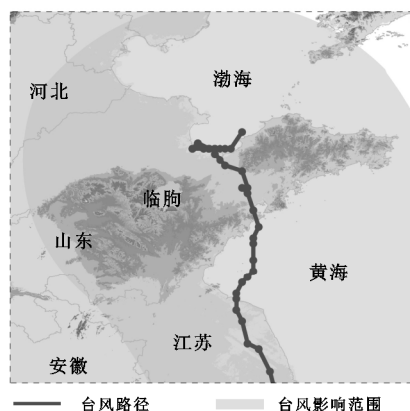


图 1 研究区概况

2 研究方法

2.1 数据来源

在特大暴雨发生 5 天后(2019 年 8 月 15—22 日),对曾家沟小流域进行了现场调查和测量,运用 DJI Phantom4 RTK 无人机对曾家沟流域进行正射影像测量。采用 Pix4Dmapper 建模,完成相机参数的解算与图像拼接,生成 0.07 m 分辨率的曾家沟小流域无人机航拍正射影像(DOM)与 0.09 m 分辨率的数字地表模型(DSM)。

2.2 重力侵蚀解译

基于曾家沟小流域正射影像,结合现场调查情况

进行目视解析,解译标志见表 1。

2.3 重力侵蚀量计算

重力侵蚀量计算公式为:

$$M = V \times \gamma \quad (1)$$

式中: M 为重力侵蚀量(t); V 为重力侵蚀土方量(m³); γ 为土方容重(t/m³)。

通过 ArcGIS 10.7 软件中填挖方工具得到各侵蚀图斑的重力侵蚀土方数^[12]。根据已有研究^[13],研究区土壤容重设为 1.36 t/m³。

2.4 环境因子的提取

重力侵蚀是各种因素综合作用的结果,参考已有研

究^[14],本研究从地形地貌和人类活动等方面选取 9 个环境因子进行分析,分别是坡向、坡度、高程、坡位、坡向变率、坡度变率、土地利用,以及侵蚀点距梯田和道路的距离。其中,坡向和坡度基于 DSM 数据由栅格表面工具提取。变率由表面分析模块提取,坡度变率指地面坡度在微分空间的变化率^[15],坡向变率指坡向在水平方向上的变率,可以反映出地表所有的山脊线、山谷线,影响地

表径流收敛和发散^[16]。坡位在坡向数据的基础上经栅格计算得到,按距坡顶水平距离三等分,由上至下为上坡、中坡和下坡。道路距离、梯田距离由距离分析模块提取。土地利用数据通过正射影像经目视解译获得,结合研究区水土保持措施,将小流域土地利用方式划分为 5 类:梯田、坡耕地、林地、草地和其他用地。以上所有数据的提取均使用 ArcGIS 10.7 软件完成。

表 1 重力侵蚀类型解译标志

重力侵蚀类型	影像特征	现场判别方法
崩塌	影像色调:浅白色或深灰色	岩土体在较陡坡上崩落和滚动,堆积在下部,崩塌体各部分相对位置完全打乱,大小混杂,形成大块滚动较远小块较近的堆积体
	纹理:有凹凸感,粗糙感或呈花斑状,既有大块石,也有小的砾石	
	形状:边缘清晰,下部堆积物散乱,呈锥状	
滑坡	影像色调:既有白灰色,也有滑塌物的绿色	岩土体沿一定滑坡面顺坡向下滑动到下部。滑坡体多数在滑坡面上有残留,也有相应的植物生长。表面有一定纵横裂缝
	纹理:不清晰,明显凹凸不平	
	形状:不规则,下部存在堆积物	
泥石流	影像色调:较为一致,灰白色	泥石流发生后有明显的形成区、流动的路径和下部有大量散乱的堆积物
	纹理:有凹凸感,不规则	
	形状:山坡陡峻,岩石破碎强烈,有沟槽形状,下部有堆积物存在,无植被生长	

2.5 数据分析

本文基于冗余分析(redundancy analysis,RDA)确定环境因子对重力侵蚀的贡献^[17]。分别采用去趋势对应分析法(detrended correspondence analysis,DCA)和蒙特卡洛(monte carlo)置换检验法检验冗余分析的可行性和显著性^[18]。蒙特卡洛置换检验 $p<0.05$ 时在统计学上通常被认为是可靠的^[19]。

将重力侵蚀量和侵蚀面积作为响应变量,坡向、坡度等 9 个环境因子作为解释变量。本研究的 DCA 结果前 4 轴的长度均小于 3,因此重力侵蚀与坡度等 9 个环境因子之间的关系可以通过冗余分析反映。同时,冗余分析结果也通过了蒙特卡洛检验($F=4.343,p=0.002<0.05$),说明该结果在 5%的置信水平下可信。本文统计分析和制图均使用 R 4.1.1 软件。

3 结果与分析

3.1 重力侵蚀数量特征

曾家沟小流域内重力侵蚀共 70 处,总侵蚀面积 22 315.8 m²,总侵蚀量 22 782.8 t,侵蚀模数为 14 150.8 t/km²,主要类型为滑坡,其次是泥石流和崩塌(表 2)。滑坡共 49 处,侵蚀量为 14 749.9 t,占总侵蚀量的 64.7%,单位面积侵蚀量为 1.5 t/m²,远高于泥石流与崩塌,造成的危害最大。泥石流发生 14 处,侵蚀量为 5 652.5 t,侵蚀面积为 9 457.9 m²,单位面积侵蚀量为 0.6 t/m²。虽然泥石流的侵蚀量相对较小,但其发生后的影响范围大。崩塌共 7 处,侵蚀量为 2 380.4 t,占总侵蚀量的 10.5%;侵蚀面积为 2 962.7 m²,占总侵蚀面积的 13.3%,单位面积侵蚀量为 0.8 t/m²,其影响范围和造成的侵蚀最小。

表 2 重力侵蚀数量特征

侵蚀类型	数量/处	土壤侵蚀面积/m ²	重力侵蚀量/t	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)	单位面积侵蚀量/(t·m ⁻²)	侵蚀面积比/%	侵蚀量比/%
滑坡	49	9895.2	14749.9	9161.5	1.5	44.3	64.7
泥石流	14	9457.9	5652.5	3510.9	0.6	42.4	24.8
崩塌	7	2962.7	2380.4	1478.5	0.8	13.3	10.5
总量	70	22315.8	22782.8	14150.8	2.9	100.0	100.0

3.2 重力侵蚀空间分布特征

3.2.1 不同地形的重力侵蚀分布 随着坡度的增加,重力侵蚀面积和侵蚀量呈现增大的趋势(图 2a)。重力侵蚀集中发生在坡度为 30°~40°的斜坡上(31.4%),其次是 40°~50°(28.6%)和>50°(15.7%),侵蚀面积分别为 4 060.2,7 778.4,8 987.6 m²,侵蚀量分别为 5 817.0,7 850.1,5 339.4 t。重力侵蚀面积和侵蚀量随着坡度变率的增加表现为上升趋势(图

2b)。当重力侵蚀发生在坡度变率 85°~90°时,侵蚀面积最广、水土流失最严重,侵蚀面积为 11 495.3 m²,占侵蚀总面积的 51.5%,侵蚀量为 9 013.2 t,占侵蚀总量的 39.6%。

从坡向(图 3)来看,重力侵蚀发生在北坡的可能性最高(30.0%),其次为东南(12.9%)和东北坡(12.9%)。北坡侵蚀面积为 14 580.5 m²,侵蚀量为 10 628.6 t。随着坡向变率的增加,重力侵蚀面积和侵蚀量均呈现

上升趋势(图 4)。重力侵蚀集中发生在坡向变率 $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的斜坡上(68.6%),侵蚀面积为 $17\,867.6\text{ m}^2$,

占侵蚀总面积的 80.1%,侵蚀量为 $17\,149.6\text{ t}$,占侵蚀总量的 75.3%。

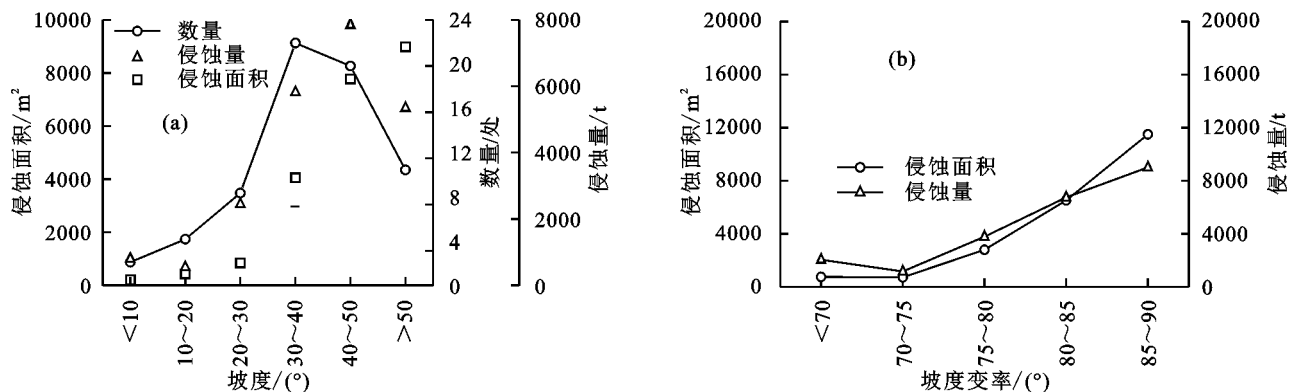


图 2 不同坡度和坡度变率侵蚀特征

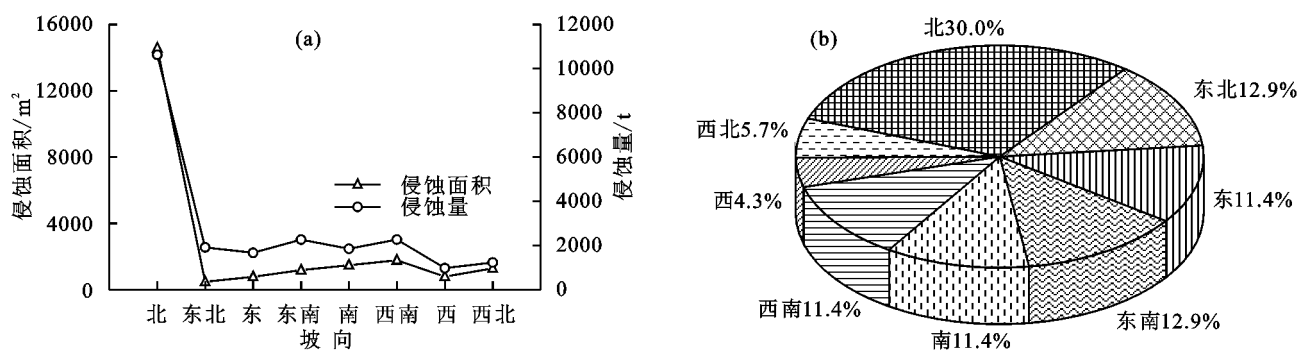


图 3 不同坡向侵蚀特征及频数分布

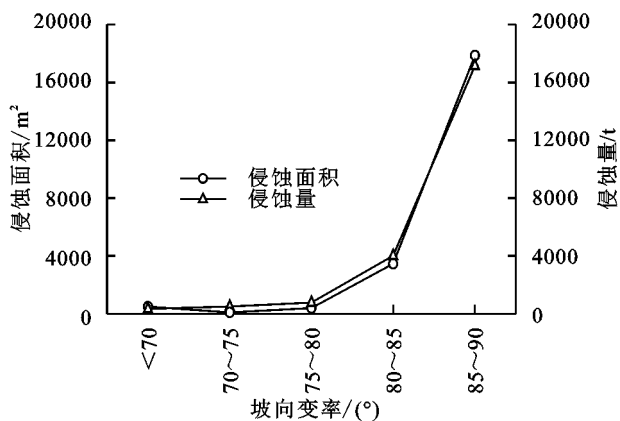


图 4 不同坡向变率侵蚀特征

研究区的高程在 $368\sim 663\text{ m}$,重力侵蚀主要发生在高程 $450\sim 500\text{ m}$ 的范围内(图 5),大多处于小流域中坡位(图 6),共 49 处重力侵蚀发生在中坡位,侵蚀面积为 $14\,160.8\text{ m}^2$,占侵蚀总面积的 67.9%,侵蚀量为 $15\,821.0\text{ t}$,占侵蚀总量的 67.9%,造成大范围、严重的水土流失,其次是下坡位(12 处),侵蚀面积为 $1\,727.0\text{ m}^2$,侵蚀量为 $3\,267.3\text{ t}$ 。发生在上坡位的重力侵蚀,单位侵蚀面积和单位侵蚀量最大,分别为 $603.1\text{ m}^2/\text{处}$, $410.5\text{ t}/\text{处}$ 。

3.2.2 不同土地利用类型的重力侵蚀特征 通过解译小流域重力侵蚀地块上的土地利用,表明发生重力侵蚀的土地利用类型主要包括梯田、林地、草地和其他土地(图 7)。在该次暴雨中,重力侵蚀集中发生

在梯田(28 处),侵蚀面积为 $10\,801.1\text{ m}^2$,侵蚀量为 $10\,476.0\text{ t}$ 。而发生在草地的重力侵蚀仅 10 处,少于林地,但其侵蚀面积($4\,712.3\text{ m}^2$)和侵蚀量($3\,837.5\text{ t}$)均超过林地($2\,521.4\text{ m}^2$, $3\,377.7\text{ t}$)。

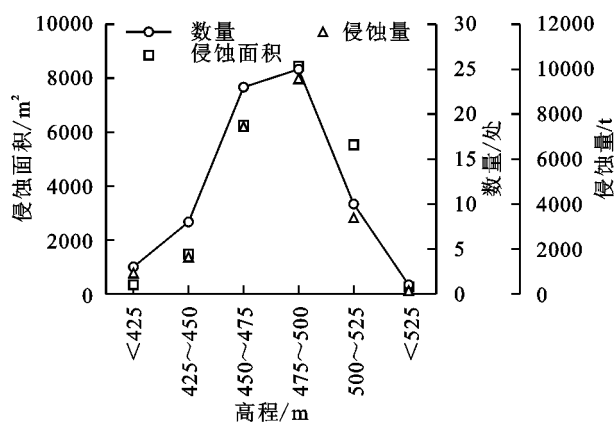


图 5 不同高程侵蚀特征

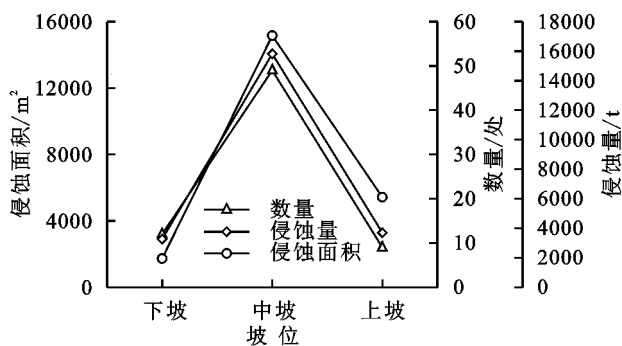


图 6 不同坡位侵蚀特征

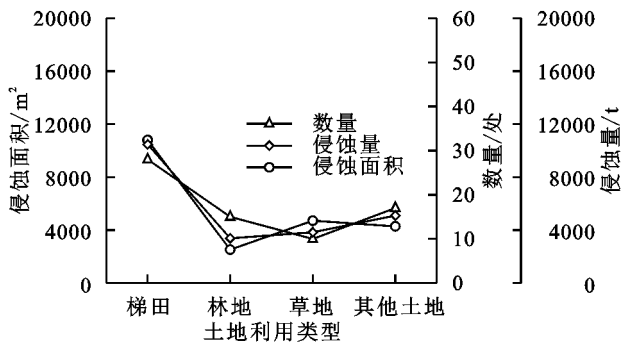


图 7 不同土地利用类型侵蚀特征

3.2.3 人类活动影响下的重力侵蚀特征 由图 8 可知,重力侵蚀集中分布在距梯田 40 m 范围内(94.3%)。其中,发生在梯田四周 0~10 m 内的侵蚀最为严重,侵蚀面积为 13 024.7 m²,侵蚀量为 13 529.9 t。其次是距梯田 10~20 m 范围内,侵蚀面积为 4 801.4 m²,侵蚀量为 4815.7 t。随着距道路距离的增加,侵蚀面积和侵蚀量呈减少的趋势(图 9)。67.1% 的重力侵蚀分布在距离道路 40 m 范围内,侵蚀面积为 16 109.9 m²,占侵蚀总面积的 72.2%;侵蚀量为 14 942.3 t,占侵蚀总量的 65.6%。5.71% 的侵蚀分布在距离道路 80 m 范围外,侵蚀面积为 1 103.9 m²,侵蚀量为 1 306.4 t。

3.3 环境因子对重力侵蚀的贡献

重力侵蚀与环境因子的冗余分析结果(图 10)显示,

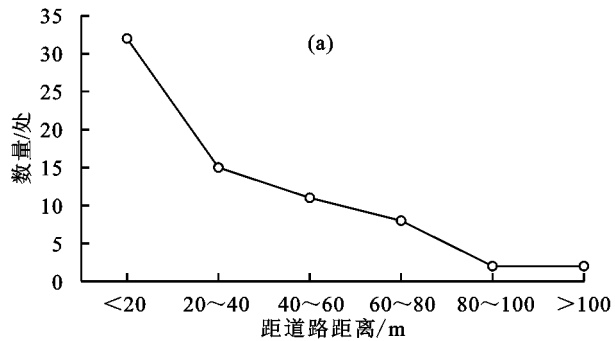
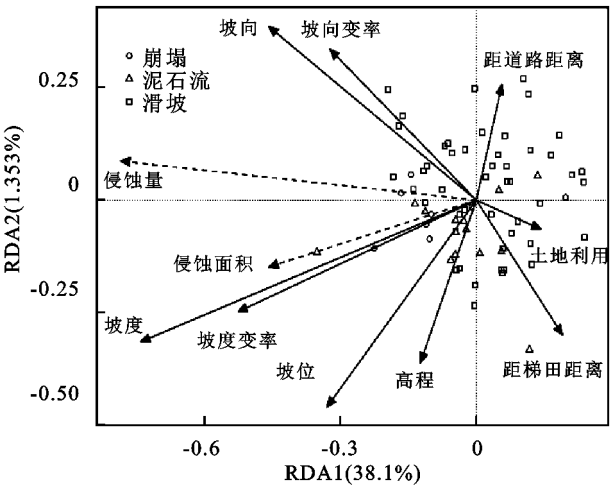


图 9 距道路不同距离侵蚀特征



注:蒙特卡洛检验 $F=4.343$, $p=0.002$;实线箭头为解释变量;虚线箭头为响应变量。

图 10 重力侵蚀与环境因子的 RDA 二维排序图

第 1 轴和第 2 轴分别解释了 38.1% 和 1.4% 的变异。第 1 轴中贡献最大的是坡度,第 2 轴中距道路和梯田距离与典范轴的相关系数分别为 0.548,0.515。环境因子中坡度对重力侵蚀的影响最显著($p=0.001$),其次是坡度变率($p=0.013$)和坡向($p=0.032$)。重力侵蚀面积、侵蚀量均与坡度变率、坡度、坡位、高程、坡向和坡向变率表现为正相关,与距梯田距离、距道路距离和土地利用呈负相关。重力侵蚀量与坡度、坡度变率的相关性较强,与高程、坡位的相关性较弱;侵蚀面积与坡度间夹角小,相关性较强,与高程夹角接近 90°,呈较弱的负相关关系。

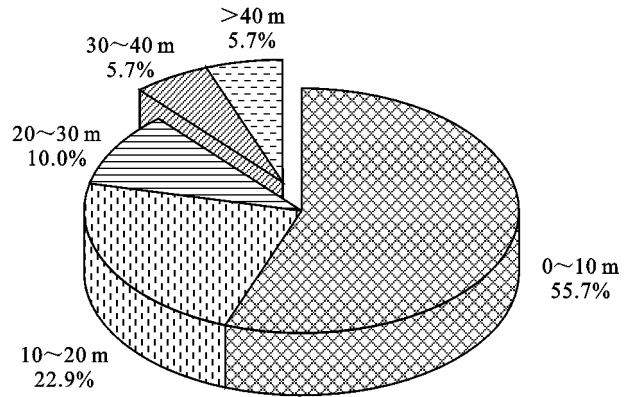
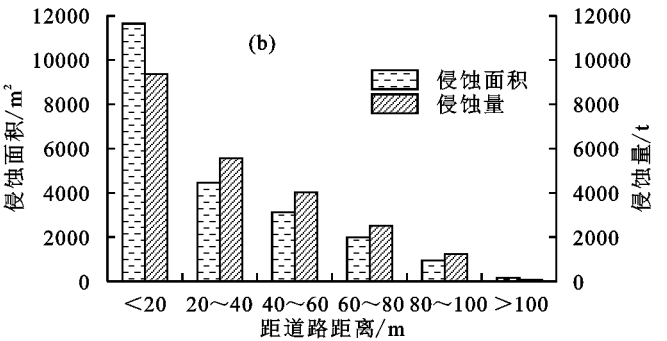


图 8 距梯田不同距离重力侵蚀频数



4 讨论

坡度是重力侵蚀最重要的限制性因素。重力侵蚀主要发生在 30°~50° 的斜坡上,随着坡度的升高,侵蚀量和侵蚀面积持续增加。但当坡度 >50° 时,侵蚀发生概率却呈下降趋势。当坡度 >50° 时,重力分量的作用会阻止土层停留在 >50° 的斜坡上,导致重力侵蚀发生的概率降低^[14,20]。坡度变率反映地面坡度的变化率,其对重力侵蚀面积的影响大于侵蚀量。坡度变率较高的地区在降雨后易发生侵蚀^[21],且坡度的剧烈突变增加了侵蚀力^[22],造成严重的水土流失。由于小流域的北坡光照时间短,且在“利奇马”台风的影响下,降雨量超过 570 mm,强降雨无法完全下渗,导致地表径流增加。同时,北坡的土石道路和耕地汇集的雨水来不及随着排水沟流走,最终致使小

流域北坡梯田田坎、道路两侧滑塌的概率增加。

在全球气候变化的背景下,极端暴雨事件加重区域水土流失防治的难度^[23]。目前,人们难以直接干预重力侵蚀发生的内外营力,因此改变人类活动应成为重力侵蚀防治的重心^[24]。基于本研究结果,建议在道路两侧、坡度 $>30^\circ$ 的陡坡采用防护网等边坡防护措施,增加坡面植被覆盖,改善土壤结构,在边坡上部设置截、排水沟等;可为现有梯田设置暗管排水系统,排出土壤多余水分,并采用种植苗木等措施防护梯田田坎。

5 结论

(1)小流域内重力侵蚀受灾严重。侵蚀共 70 处,主要类型为滑坡(49 处),其造成的水土流失危害和影响范围最大,其次是泥石流(14 处)和崩塌(7 处)。

(2)重力侵蚀的分布受环境因素影响。从坡度来看,重力侵蚀集中分布于 $30^\circ\sim 50^\circ$ 的斜坡上。从坡向和坡位来看,重力侵蚀发生在北坡和中坡位的概率最高。侵蚀位置多集中在高程 450~500 m、距道路 40 m 的范围内。当坡度变率和坡向变率为 $85^\circ\sim 90^\circ$ 时,发生重力侵蚀的概率更大。在不同的土地利用类型中,梯田最易发生重力侵蚀。

(3)坡度是影响重力侵蚀的最重要因素。重力侵蚀面积、侵蚀量均分别与坡度变率、坡度、坡位、高程、坡向和坡向变率呈正相关,与距梯田距离、距道路距离和土地利用类型呈负相关。

(4)人类活动导致发生重力侵蚀的概率增大。特大暴雨下,严重的重力侵蚀多发生在梯田田坎、道路边坡等位置。因此,建议加强坡度 $>30^\circ$ 的陡坡边坡防护,增加坡面植被覆盖,在边坡上部设置截、排水沟;可为现有梯田设置暗管排水系统,加强梯田田坎防护。

参考文献:

- [1] Xu X Z, Liu Z Y, Xiao P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. Catena, 2015, 135: 231-239.
- [2] 高航,徐向舟,肖培青,等.暴雨条件下植被对沟坡重力侵蚀速率和规模的影响[J].水土保持研究,2021,28(6): 17-24.
- [3] 胡胜,邱海军,王宁练,等.地形对黄土高原滑坡的影响[J].地理学报,2021,76(11):2697-2709.
- [4] Guo W Z, Chen Z X, Wang W L, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2020, 350: e106879.
- [5] 舒章康,李文鑫,张建云,等.中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J].中国工程科学,2022,24(5):116-125.
- [6] 余璐,徐向舟,张茂省,等.黄土高原重力侵蚀对地貌因素的敏感性分析[J].水土保持学报,2019,33(4):119-125.
- [7] 高健健,艾琦森,韩立钦,等.2017—2018 年黄土丘陵沟壑区第一副区辛店沟流域重力侵蚀观测数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2021,6(3):113-120.
- [8] 薛海,何沛华,王文成.黄河中游地形河网分形与重力侵蚀关系研究[J].人民黄河,2008,30(9):67-68.
- [9] 李琦.黄土丘陵地区重力侵蚀区域植被分布特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [10] 赵兴阳,徐向舟,蒋云钟,等.暴雨条件下植被对黄土沟坡重力侵蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):58-63.
- [11] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].水土保持学报,2021,35(1):149-153.
- [12] 李小光,郭少武,宋星杰,等.基于 ArcGIS 的露天矿山土石方量测算方法研究[J].金属矿山,2020(12):210-215.
- [13] 从辰宇,韩剑桥,焦菊英,等.台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究:以山东省临朐县为例[J].水土保持通报,2019,39(5):337-344.
- [14] Chen X, Chen W. GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods[J]. Catena, 2021, 196: e104833.
- [15] 李强,张景发,罗毅,等.2017 年“8·8”九寨沟地震滑坡自动识别与空间分布特征[J].遥感学报,2019,23(4): 785-795.
- [16] 李星,杨赛,李远耀,等.面向区域滑坡易发性精细化评价的改进斜坡单元法[J].地质科技通报,2023,42(3):81-92.
- [17] 龙健,廖洪凯,李娟,等.基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤—石漠化关系研究[J].环境科学,2012,33(6): 2131-2138.
- [18] Guo M M, Yang B, Wang W L, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2019, 345: e106847.
- [19] 刘振坤,吴华勇,刘峰,等.中国焦化场地近 20 年时空演变特征及驱动因素[J].生态环境学报,2021,30(3): 604-613.
- [20] 田媛,巨能攀,解明礼,等.滑坡编录表达模式对易发性评价结果的影响[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(5):606-615.
- [21] 南富森,李宗省,张小平,等.基于 MGWR 的黄河流域土壤有机碳密度和影响因素分析[J].环境科学,2022, 44(2):912-923.
- [22] Wang Z G, Zhang G H, Wang C S, et al. Assessment of the gully erosion susceptibility using three hybrid models in one small watershed on the Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: e105481.
- [23] 黄萱.植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [24] 张金良.黄河泥沙入黄的机理及过程探讨[J].人民黄河,2017,39(9):8-12.