

黄土高原重力侵蚀对地貌因素的敏感性分析

余璐¹, 徐向舟¹, 张茂省², 刘广全^{3,4}

(1.大连理工大学水利工程学院, 大连 116024; 2.中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 3.中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4.国际泥沙研究培训中心, 北京 100048)

摘要: 地形属性是影响降雨引发重力侵蚀的形成、演变、分布和危害的重要因素。以延安市宝塔区为例, 基于已有文献和调查数据, 采用GIS和RS技术, 以及改进的增长率敏感系数法对影响黄土高原重力侵蚀的地貌等因素进行敏感性分析。结果表明: (1) 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, 且都呈正相关关系; 重力侵蚀总量、滑坡侵蚀量、崩塌侵蚀量对坡度的敏感系数分别达到60.5, 1 616.6, 89.3。 (2) 对重力侵蚀总量和滑坡侵蚀量而言, 距河流距离、高程是次重要影响因素; 而对崩塌量而言, 植被覆盖率、坡面曲率是次重要影响因素。 (3) 研究区域中小型重力侵蚀发生次数较多, 大型重力侵蚀发生频数较少, 但大型重力侵蚀对侵蚀总量的贡献较大; 其中, 体积大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型崩滑侵蚀虽然发生频数仅占总数的13%, 但其侵蚀量却占重力侵蚀总量的57%。研究结果可为黄土高原地区水土流失综合治理及生态恢复提供参考依据。

关键词: 重力侵蚀; 影响因素; 敏感性; RS; GIS; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0119-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.017

Sensitivity Analysis of Gravity Erosion to Topography Factors on the Loess Plateau, China

YU Lu¹, XU Xiangzhou¹, ZHANG Maosheng², LIU Guangquan^{3,4}

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100038; 4. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100084)

Abstract: Topography attributes are the most important factors in controlling the initiation, evolution, distribution and damage of the gravity erosions triggered by rainfall. Based on the existing references and survey data, the revised increase-rate-analysis method, Arc GIS and Remote Sensing were used to evaluate the sensitivity of the gravity erosion to the topography factors in the Baota District, Yan'an City. The results showed that: (1) The slope gradient was the most important influential variable. The total amount of the gravity erosion, the amount of landslide and the amount of avalanche were all positively correlated with the gradients and their sensitivity parameters on the slopes were 60.5, 1 616.6 and 89.3, respectively. (2) For the total amount of gravity erosion and the amount of landslide, the distance to streams and the altitude were the second important factors. For the amount of avalanche, the vegetation cover and slope curvature were the second important factors. (3) The small-scale and medium-scale gravity erosion occurred frequently, and the large-scale gravity erosion had a low occurrence frequency, but the large-scale gravity erosion contributed more to the total amount of the gravity erosion. Among them, the events of large-scale gravity erosions with the amount greater than $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ only contributed 13% to the total frequency. Nevertheless, the contribution of the large-scale gravity erosions was up to 57% to the total amount of the failure masses. The results would provide a scientific basis for soil conservation and ecology restoration on the Loess Plateau, China.

Keywords: gravity erosion; impact factor; sensitivity analysis; RS; GIS; Loess Plateau

收稿日期: 2019-02-18

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602, 2016YFC0501705); 国家自然科学基金项目(51879032, 41530640); 延安市重大科技项目(2016CGZH-14-03)

第一作者: 余璐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: better_yulu@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 徐向舟(1969—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事水土保持与可持续发展研究。E-mail: xzxu@dlut.edu.cn

重力侵蚀是指岩体或土体在重力作用下失去平衡而发生位移的过程^[1],包括崩塌、滑坡、泥石流等形式^[2]。重力侵蚀影响因素可分为岩土性质、地形地貌、植被等内部决定性因素和降雨、地震、冻融、人类活动等外部触发因素 2 大类^[3],地形属性是影响降雨引发重力侵蚀的形成、演变、分布和危害的重要因素。重力侵蚀控制因素众多且各因素非线性叠加,不同类型的重力侵蚀触发条件不同;并且重力侵蚀的发生存在随机性和非连续性的特点,导致重力侵蚀野外观测数据缺乏,目前该方向的研究处于相对薄弱的状态。分析影响黄土高原重力侵蚀的地貌影响因素,无论是在侵蚀演变机理的理论上,还是在水土流失综合治理的技术上都有重要的意义。

重力侵蚀的敏感性分析是研究重力侵蚀的主控因素、发生规律和成因理论的重要手段之一。重力侵蚀研究中常用的敏感性分析方法可分为知识驱动法和数据驱动法 2 大类。知识驱动法强烈依赖于专家的知识 and 经验,是依靠专家打分来确定各因素权重的定性、半定量的分析方法,包括层次分析法^[4]、专家系统法和模糊数学等,该方法具有一定的主观性和不确定性;数据驱动法是基于数学模型的统计分析方法,如逻辑回归^[5]、信息量模型^[6]、CF 多元回归模型^[7]等,该方法减少了主观因素干扰,具有较强的客观性和科学性。敏感系数是指在其他条件不变的情况下,某些关键参量值发生变化给目标值带来变动的程度,是目标值变动百分比与参量值变动百分比之间的倍数关系。Xu 等^[8]提出了基于增长率敏感性系数法(increase-rate-analysis method,IRA),即:根据自变量增长变化和与之对应的因变量变化大小的比值来探讨自变量对因变量敏感性的定性与定量相结合的分析方法,并采用该方法评价了重力侵蚀随降雨持续时间和坡度梯度等因素变化的变化规律^[8]。在此基础上,Luas-Borja 等^[9]又提出了根据影响因素重要性排序,适用于大量数据影响因素敏感性分析的改进的增长率分析方法(revised increase-rate-analysis method,RIRA),该方法已在墨西哥西北部 Culiacan 流域的淤地坝工况影响因素分析中得到成功的运用^[9]。

本文以黄土高原中部典型重力侵蚀区域的陕西省延安市宝塔区为研究对象,基于已有的陕西省在该区域的地质灾害调查数据^[10],结合不同类型重力侵蚀量的大小,来评价分析高程、坡度、坡面曲率(坡形)、距河流距离和植被覆盖度 5 个因素变化对各类重力侵蚀量敏感程度,研究结果可为黄土高原地区重力侵蚀灾害预警、侵蚀演变规律和水土流失综合治理

提供重要的科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于陕西省延安市宝塔区(图 1),地理坐标为北纬 $36^{\circ}10'33''$ — $37^{\circ}02'05''$,东经 $109^{\circ}14'10''$ — $110^{\circ}50'43''$,海拔 $860.6\sim 1\,525.0\text{ m}$,面积 $3\,556\text{ km}^2$ 。宝塔区为陕北黄土高原丘陵沟壑区与高原沟壑区交接过渡地带。研究区属半湿润半干旱的大陆性季风气候,年均气温 7°C ,年均降水量 550 mm ,且时空分布不均,6—9 月降雨量占全年降水的 70% ^[10]。植被类型属于从森林向森林—草原过渡,乔林植被多发育在海拔较高的山地和沟谷中。土壤以黄绵土为主,其次为褐土。辖区内有 2 条黄河一级河流——延河和汾河,其中,延河流域是黄河泥沙主要来源区之一^[11]。本区黄土结构松散,土壤的抗剪强度降低,崩塌、滑坡等重力侵蚀发生频繁。人类活动因素也是区域内重力侵蚀地质灾害的直接诱因,如城镇与农村建设发展、铁路公路修建、水利工程建设、矿产资源开发以及农业活动等分布于水土保持情况较差的河谷及其两侧,导致地质灾害频发、水土流失严重^[10]。



图 1 研究区域地理位置

2 材料与方法

本文使用的数据主要包括崩滑灾害、地形地貌、植被覆盖度等多个数据集:(1)滑坡和崩塌灾害坐标点、侵蚀量数据由张茂省等^[10]结合 2005 年陕西地质灾害详细调查示范项目,运用遥感解译和野外调查相结合的调查方法获得,灾害要素尺寸采用地质罗盘、红外测距仪及目估等方法测绘获得。本研究将灾害点定位于 Google 地图上,调查得到滑坡 293 个,崩塌 52 个,由于 2 个崩滑点超出研究区范围,因此最终选取滑坡 292 个、崩塌 51 个作为研究对象。(2)研究区内重力侵蚀发生形式主要为滑坡、崩塌 2 种类型。崩塌是斜坡岩土的剪应力大于抗剪强度时,岩土在陡坡面上未发生明显位移,即向临空面突然倾倒、崩落岩土体碎裂、顺坡翻滚而下的现象^[1],发育特征为坡体坡面形态呈凸形,垂直节理裂缝发育,无明显的滑动面,一般规模较小等^[10];滑坡是岩土体在重力作用下

沿一定的破坏面整体或局部保持岩土体结构而向下活动的过程和现象^[12]。滑坡的特点之一是滑块整体移动,即具有“原岩性”^[13],主要发育特征有边界轮廓清晰,具有明显的圈椅状形态,后缘滑壁保留或部分保留,滑坡形态较完整等^[10]。根据重力侵蚀发生的规模的大小,参照滑坡和崩塌规模级别分类标准^[14],将重力侵蚀量划分为 $0 \sim 10 \times 10^4$, $10 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4$, $100 \times 10^4 \sim 1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 3 个区间,分别对应小型、中型和大型重力侵蚀,并统计每个区间内重力侵蚀量及其百分比。(3)本研究以分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的数字高程模型的 GDEM 栅格数据集(来源于中国科学院地理空间数据云),运用 ArcGIS 软件分别生成高程、坡度、坡面曲率(坡形)和水系分布数据。其中,坡面曲率是指局部地表坡面的曲折状态,用来表示坡形。按照坡面曲率的数值,可将坡形划分为:曲率大于 0.5 的凸形坡、曲率小于 -0.5 的凹形坡和曲率为 -0.5 ~ 0.5 的平直坡。(4)研究区遥感图像为 2005 年 11 月 2 日和 2005 年 10 月 17 日 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 分辨率的 Landsat 7 ETM+ 卫星遥感图像(来源于中国科学院地理空间数据云)。采用基于像元二分模型的植被覆盖度遥感估算方法^[15],经过辐射定标、大气校正、图像镶嵌与裁剪等预处理,通过归一化植被指数 NDVI 的计算,进而估算出研究区植被覆盖度信息。

采用 RIRA 方法计算重力侵蚀对各影响因素敏感性。为了量化地形地貌和植被覆盖度对重力侵蚀的影响,首先,采用公式(1)计算重力侵蚀增长率 $R_{Pi}(\%)$:

$$R_{Pi} = \frac{2(P_i - P_{i-1})}{P_i + P_{i-1}} \quad (1)$$

式中: P 为重力侵蚀量(m^3); i 为排序后的调查数据顺序。然后,计算各影响因子变化增长率 $R_{ti}(\%)$,以分析影响因素对重力侵蚀的影响:

$$R_{ti} = \frac{2(t_i - t_{i-1})}{t_i + t_{i-1}} \quad (2)$$

式中: t_i 和 t_{i-1} 分别是顺序相连的影响因素的值。于是第 j 个影响因素的敏感系数 s_j 计算公式为:

$$s_j = \frac{\overline{(R_{Pi,j}/R_{ti,j})}_{i=1,N}}{\min(|\overline{(R_{Pi,j}/R_{ti,j})}_{i=1,N}|)_{j=1,M}} \quad (3)$$

式中: j 为影响因子的顺序数; N 为试验数据的组数; M 为影响因子的个数,即高程、坡度、坡面曲率、距河流距离以及植被覆盖度。敏感系数易于比较因子之间对重力侵蚀变化的响应情况,能够直观反映出重力侵蚀对各影响因子的敏感程度。正数表示侵蚀量对各因素呈正相关性,负数则表示呈负相关性。某因素的敏感系数的绝对值越大,说明因变量对该影响因素

的敏感程度越高。

RIRA 的计算步骤为:首先,将因变量(如重力侵蚀量、崩滑面类型)和自变量(如坡度、坡高、降雨量等影响因素)分列列出,并把各列数据根据因变量从小到大的顺序对各行数据排序,试算出各影响因素的敏感系数;其次,以敏感系数绝对值较大的自变量优先,对因变量相同的各行数据重新排序,计算敏感系数。如果计算得出的敏感系数绝对值大小的顺序及正负号与本次的排序一致,则计算完成;否则,以最近一次计算得出的敏感系数绝对值较大的自变量优先,对因变量相同的各行数据重新排序,继续计算敏感系数。

3 结果与分析

3.1 重力侵蚀分布特征

调查统计结果表明,研究区内侵蚀总量达 $15\,569.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,且侵蚀规模差异大,单个崩滑侵蚀量最大值为 $750 \times 10^4 \text{ m}^3$,最小值为 $0.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。侵蚀量为 $100 \times 10^4 \sim 1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型重力侵蚀累计侵蚀总量最大,为 $8\,913.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,占侵蚀总量的 57%;其次为中型重力侵蚀的侵蚀量,为 $6\,155.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,占侵蚀总量的 40%;小型重力侵蚀的侵蚀量则最小,为 $501.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,占侵蚀总量的 3%(图 2)。从重力侵蚀发生频数来看,研究区内重力侵蚀发生频数大,所调查的崩滑侵蚀数量总共 343 处,崩滑土体体积不足 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的中小型者有 297 次,占侵蚀总频数的 87%,即在该区域中小型重力侵蚀发生次数多。其中,体积在 $0 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的小型崩滑有 135 个,占总数的 39%,体积在 $10 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的中型崩滑有 162 个,占总数的 47%。而大型崩滑侵蚀的侵蚀量虽占总量的 57%,但发生频数仅有 46 次,占总数的 13%。

不同类型重力侵蚀的侵蚀规模和发生频率各不相同。研究区域的滑坡触发的次数高于崩塌的次数,前者发生频数是后者的 5.7 倍,侵蚀量更是崩塌侵蚀量的 60.2 倍,滑坡对研究区域重力侵蚀发生次数和侵蚀量影响显著。可见,该区的滑坡是分布较广、数量较多的地质问题之一。崩塌的触发机理与滑坡不同,当沟水冲刷搬运下部堆积物,上部陡壁在重力作用下产生的重力矩大于土体的抗拉力矩时,上部土层失去平衡才发生崩塌^[16-17]。刘秉正等^[18]对渭北地区的研究结果认为,黄土重力侵蚀发生的频率崩塌大于滑坡。与本文结果不同,是因为二者研究区域不同,一个主要在高原沟壑区,另外一个主要在丘陵沟壑区,加之黄土垂直节理发育,陡壁分布广泛,小型崩塌分布众多,崩塌体多数坠落破碎,难以长期保存,调查

中没有一一调查^[10]。

由此可见,研究区域的重力侵蚀发生频数大,中小型重力侵蚀发生次数多。大型重力侵蚀发生频数少,但对侵蚀总量有主要的贡献。区域内主要有崩塌和滑坡两种侵蚀类型,滑坡是该地区主要的重力侵蚀类型,其对于该地区重力侵蚀的发生数量和侵蚀总量方面的都有重要的贡献。

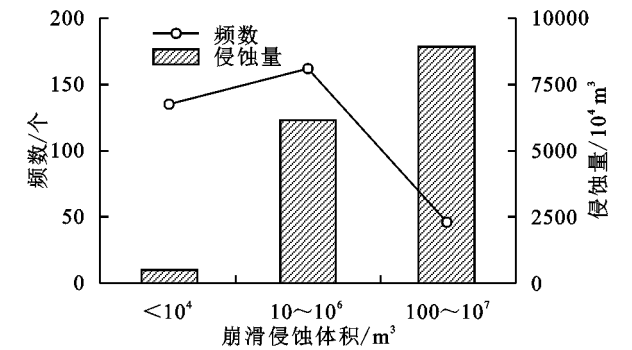


图2 重力侵蚀灾害发生频数与侵蚀量

3.2 重力侵蚀量的影响因素

下垫面地貌是影响重力侵蚀的发生、发展的重要因素。本文选取高程、坡度、坡面曲率(坡形)、距离河流距离和植被覆盖度 5 个内部因素为研究因子进行探讨分析,采用 RIRA 评价重力侵蚀量对所选定的 5 个因子的敏感程度。

大气降水被广泛认为是重力侵蚀的主要触发和诱导因素^[19]。大气降水不仅降低土壤黏聚力,而且改变土壤含水量,从而使得边坡土体的重量发生变化,当边坡土体的重量引起的下滑力与土体抗剪强度的平衡被打破时,边坡土体在重力的作用下开始下移。研究区域 2000—2003 年 3 年间累计触发重力侵蚀 29 次^[10],其中,6—9 月共发生 24 次,占总发生次数的 82.8%。这与研究区域降水集中在 6—9 月完全同期。

下垫面的地形地貌因素是孕育重力侵蚀的重要

因素。重力侵蚀灾害点分布与各因素的关系见图 3。坡度因素对重力侵蚀、滑坡侵蚀和崩塌侵蚀都有重要的影响。坡度不但影响重力侵蚀发生的频率,并且影响重力侵蚀发生的类型和规模^[20]。陡峭的坡地使得各类重力侵蚀发生的坡面角度很容易达到内摩擦角而发生物质移动。

距河流距离对重力侵蚀分布的影响较大。相关统计^[21]表明,重力侵蚀多发生河谷地带,在甘肃省的黄河谷地、湟水谷地,陕西省渭河北侧谷地、泾河谷地,以及陕西省的无定河、延河等河流的较大支流谷地等地重力侵蚀较为发育。研究区域重力侵蚀较为集中的分布于河流流域的两侧(图 3b),在河谷的两岸和冲沟的中、下游,由于沟谷水流的底切作用和地下水的下渗作用,土体黏聚力降低,使得土体失稳发生滑坡现象。而崩塌在冲沟和河谷两岸及冲沟沟头存在较为普遍,沟水冲刷搬运下部堆积物,使得上部土体失去平衡,崩塌土体脱离母体并快速落下。

高程是重力侵蚀研究中常被考虑和分析的影响因素之一。高程对地质灾害发育产生影响的原因很多,如不同高程范围具有不同的气候特点,因坡度差异而存在局部及洼地,是否存在滑动的临空面以及不同高程范围内的人类活动强度差异等^[13]。研究区高程范围为 815~1 521 m(图 3c),重力侵蚀大多分布于 815~1 200 m,而在 1 200~1 521 m 范围内分布较少。

植物覆盖对重力侵蚀的影响作用存在正反两方面的作用。植被根系能通过增加土壤的抗剪强度而减轻土壤层的蠕动,从而与崩滑侵蚀量呈现负相关关系;另一方面,在延安羊圈沟流域,被观察到随着植被覆盖度的增大,坡面径流量增加,从而加大流域的沟谷侵蚀^[22]。植物的根劈作用也可能促进重力侵蚀的发生^[23]。

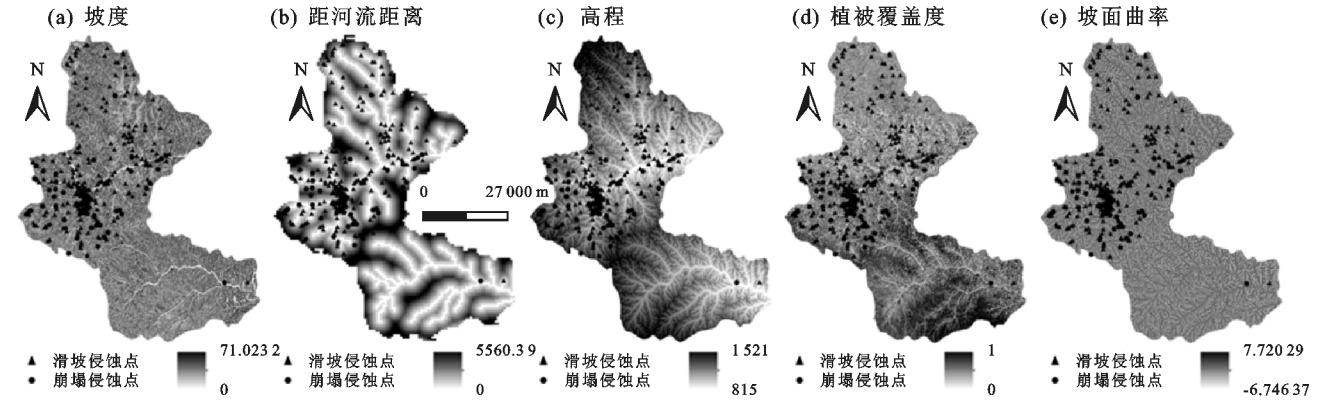


图3 重力侵蚀灾害点分布与各因素的关系

斜坡边坡形态(坡面曲率)是通过影响边坡受力情况从而来控制边坡的稳定性。凹形斜坡易汇集雨水,雨水沿斜坡入渗,使岩体抗剪强度降低而发生失

稳变形。同时,凸形斜坡岩体的势能比平直斜坡的高,更接近力学平衡的极限值,也容易受到更强的风化作用,从而也可能导致边坡失稳现象的发生。

3.3 影响因素的敏感性

在分析大暴雨引发几种因素与滑坡侵蚀的关系后,Grozier 等^[24]的研究结果表明,滑坡的发生不能只用降雨分布规律等因素来解释,事实上,滑坡触发前的地形性质也对其产生了一定的影响^[17]。不同影响因素对重力侵蚀影响的敏感系数差异较大(表 1),坡度对重力侵蚀有重要的影响,其敏感系数为 60.5;其次为距河流距离和高程的敏感系数为负数,分别为-15.5 和-7.4,即随着上述因素的增加重力侵蚀量逐渐减小;再次为植被覆盖度和坡面曲率,敏感系数分别 2.4 和-1.0。

从表 1 可见,坡度对滑坡侵蚀量有显著的影响,其敏感系数为 1 616.6。高程、距河流距离因素和植被覆盖度的敏感系数大小相当,其敏感系数分别为-446.0,-434.4 和 121.2。坡面曲率的敏感系数为-1.0,与坡度、高程、植被覆盖度和距河流距离因素相比,坡面曲率因素对滑坡侵蚀量的影响很小,可以忽略不计。坡度、坡面曲率、高程和距河流距离因素对崩塌侵蚀量的敏感系数都为正值,分别为 89.3,42.0,15.5 和 1.0,而植被覆盖度的敏感系数为负数,为-54.0;另一方面,崩塌和滑坡侵蚀规模对坡度因素都较为敏感,敏感系数分别为 0.6 和 0.08,相比之下,前者敏感系数是后者的 7.5 倍,说明坡度的变化更容易触发大规模的崩塌运动。

表 1 重力侵蚀量对各影响因素的敏感系数

影响因素	敏感系数		
	重力侵蚀总量	滑坡侵蚀量	崩塌侵蚀量
坡度	60.5	1616.6	89.3
距河流距离	-15.5	-434.4	1.0
高程	-7.4	-446.0	15.5
植被覆盖度	2.4	121.2	-54.0
坡面曲率	-1.0	-1.0	42.0

综上,坡度、植被覆盖度、高程、距河流距离和坡面曲率因素对重力侵蚀的触发规模有重要的影响。在高程较大、距离河流距离越远的区域,触发重力侵蚀规模较小;不同的重力侵蚀类型触发条件不同,坡度、高程和距河流距离因素的变化对滑坡侵蚀规模有一定的影响,而坡面曲率和植被覆盖度对其影响不大。对于滑坡侵蚀量,其与坡度呈正相关关系,与距河流距离和高程呈负相关,而坡面曲率和植被覆盖度对其影响不大。对于崩塌侵蚀量,坡度、坡面曲率、高程、距河流距离以及植被覆盖度对其都有显著的影响。考虑到其他因素的综合作用,植被覆盖度增加对崩塌侵蚀量表现出一定的抑制作用,而其他影响因素的增加加大了该区域的崩塌侵蚀量。此外,相对于滑

坡,崩塌侵蚀量更容易受坡度变化的影响。

4 讨论

4.1 重力侵蚀敏感性分析方法对比

在黄土高原地区地质灾害频繁发生,不同学者对地质灾害数据进行分析,比较了各个影响因素的重要程度。张茂省等^[10]采用指标贡献率法计算了宝塔区地质灾害易发区划中各个影响因素的权重。其中,坡度指标权重确定为 0.1,植被指标权重和坡形指标权重分别为 0.05 和 0.04。在该地区,层次分析法也被运用于危险性指标权重确定中^[25],结果得出坡度、植被和坡形的权重分配分别为 0.06,0.03 和 0.02。上述文献的结果表明,坡度重要程度大于植被大于坡形因素,与本文的滑坡侵蚀敏感程度分析结果相符。但上述学者在权重确定中综合了专家经验和前人研究成果,具有一定的人为主观性,本文的敏感分析基于统计分析更加客观。在黄土高原陕甘宁地区,层次分析法也被运用于易发性分区评价中的评价因子权重值确定^[26],研究得出距河流距离权重值(0.2)大于坡度权重值(0.08)、植被覆盖度权重值(0.07)、坡形权重值(0.04)和高程权重值(0.02)。然而,本文得到坡度重要程度大于距河流距离,高程重要程度大于植被和坡形。造成结果不同的原因可能是该文献权重计算参考专家打分的方式有一定的主观性。此外,本文采用的 DEM 栅格分辨率为 30 m×30 m,栅格内的所有值为网格中心点的值或该网格单元的平均值,这对数据精度结果有一定的影响。

已有研究采用多种方法对其他国家的滑坡灾害进行敏感性分析。Youssef 等^[27]先后运用增强回归树(BRT)、分类回归树(CART)等方法对沙特阿拉伯 Wadi Tayyah 盆地的滑坡进行敏感性分析,并验证上述方法在滑坡易发性评价中都具有较好的精度,研究得到增强回归树(BRT)计算出的因子权重为坡度(34.2)大于高程(9.8)、距河流距离(6.2)和曲率(5.8),分类回归树(CART)计算获得因子的重要性排序为坡度(39%)大于高程(17%)、距河流距离(2%)和曲率(1%),上述计算结果均与本文的滑坡影响因子的贡献排序相同。在马来西亚槟榔屿地区,人工神经网络法被运用在敏感性分析中,Pradhan 等^[28]运用人工神经网络在训练过程中获得各层之间的最终权重以及滑坡灾害的 9 个因素的贡献重要性。其中,坡度的权重值最大(0.9),明显大于植被覆盖率(0.2)、坡面曲率权重值(0.2)和距离水系距离权重值(0.07)。与本文计算得到的滑坡影响因素重要性排序相比,仅有距离河流距离因素排序有所不同,本文得到距河流因

素的贡献度大于植被覆盖度大于坡面曲率因素。造成上述问题的原因可能是本文研究区域的人类活动中心以及城市人口中心都位于河谷地区^[10],大量的人类活动对边坡失稳运动存在促进作用,人类活动强度与距水系距离的大小相一致,使得距水系距离因素排序较为靠前。此外,由于气候、土壤性质的不同,滑坡等重力侵蚀的触发具有区域特征,也可能是造成结果不同的原因之一。

4.2 重力侵蚀产生机制分析

本文分析得到坡度因素的变化对各类重力侵蚀触发最为重要,尤其是对崩塌侵蚀的影响。在西峡县的野外调查^[29]也表明,坡度大于 45° 时,斜坡坡度越高,滑坡发生减少,更易形成崩塌;距离河流距离对重力侵蚀和滑坡侵蚀触发规模的影响次重要。流域两侧的地下水通过软化、潜蚀岩土,降低了岩土体的强度,同时产生动、静水压力和孔隙水压力,并对岩土产生浮托力及增大岩土自重等作用加剧边坡失稳;高程因素对滑坡侵蚀和重力侵蚀的影响排序分别位于2、3位。随着高程因素由低到高的变化使得重力侵蚀的总侵蚀量和滑坡侵蚀量减少,但使崩塌侵蚀量增加。高程对地质灾害发育的作用一般没有直接的影响,而是通过影响气候特点、植被类型和植被覆盖度、集水区面积及不同高程范围内的人类活动强度差异等方面来综合体现^[13,30];植被覆盖度因素对崩塌侵蚀影响较大,为次重要影响因素,而对滑坡侵蚀和重力侵蚀影响较小。本文分析得到植物覆盖率的增加与崩塌侵蚀量呈负相关关系,即表现出抑制作用,而与重力侵蚀总量和滑坡侵蚀量呈正相关关系,即表现为促进作用。重力侵蚀的发生不是单一因子作用的结果,而是多种因子相互影响、相互作用所导致的结果。总体来说,植被对斜坡稳定的积极或者消极作用取决于坡度,即在陡峭的斜坡上植被可能会导致斜坡失稳^[31];坡面曲率对滑坡侵蚀和崩塌侵蚀与其他因素相比影响不大。负向凹形斜坡受沿斜坡走向方向应力支撑较为稳定,而正向类型斜坡应力集中程度减缓,使得稳定程度降低。并且在坡面形态发生转折或土体相对突出的部分,土体风化和蠕变过程也会降低土体的结构强度。因此,正向凸形坡更易导致重力侵蚀的发生。

本研究运用改进的基于变量增长率的敏感性分析方法来研究各个影响因素对重力侵蚀触发的贡献。该方法能定量、准确地描述重力侵蚀对影响因素的敏感性,以及众多因素对黄土地区重力侵蚀发生的贡献程度排序,有助于更好地了解黄土高原地区重力侵蚀

的孕育机理。因此,本文的研究结果可为深入了解黄土高原重力侵蚀发生机制和重力侵蚀治理提供参考依据。

5 结论

(1)坡度对重力侵蚀总量和滑坡侵蚀量、崩塌侵蚀量的影响最大,且均为正相关关系;重力侵蚀总量、滑坡侵蚀量、崩塌侵蚀量对坡度的敏感系数分别达到60.5,1 616.6,89.3。

(2)对重力侵蚀总量和滑坡侵蚀量而言,距河流距离和高程是次重要影响因素;对崩塌量而言,植被覆盖率和坡面曲率是次重要影响因素。重力侵蚀总量对距河流距离和高程的敏感系数分别为-15.5,-7.4;滑坡侵蚀量对距河流距离和高程的敏感系数分别为-434.4,-446.0;崩塌量对植被覆盖率和坡面曲率的敏感系数分别为-54.0,42.0。

(3)研究区域中小型重力侵蚀发生次数较多,大型重力侵蚀发生频数较少,但大型重力侵蚀对侵蚀总量有主要的贡献。重力侵蚀中,崩滑土体体积不足 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的中小型崩滑占侵蚀总频数的87%,而体积大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型崩滑侵蚀虽然发生频数仅占总数的13%,但后者侵蚀量却占重力侵蚀总量的57%。

本文选择坡度、高程、坡形(坡面曲率)、距离河流距离和植被覆盖度5个内部地形因子作为研究对象,分析多种因子共同作用下的不同类型重力侵蚀的触发机理、演变过程和发生规模。但受资料的限制,文中尚缺乏对外部促发因子(如降雨强度、降雨时间、气候变化、治沟造地、兴修农田等)与重力侵蚀关系的敏感性分析,有待在将来的研究中补充和改进。

参考文献:

- [1] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Xu X Z, Liu Z Y, Wang W L, et al. Which is more hazardous: avalanche, landslide, or mudslide? [J].Natural Hazards,2015a,76(3):1939-1945.
- [3] Wu W, Sidle R C. A Distributed slope stability model for steep forested basins [J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts,1995,33(4):178A.
- [4] Wu C H, Chen S C. Determining landslide susceptibility in Central Taiwan from rainfall and six site factors using the analytical hierarchy process method[J].Geomorphology,2009,112(3):190-204.
- [5] Duman T Y, Can T, Gokceoglu C, et al. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey[J].Environmental Geology,2006,51(2):241-256.

- [6] 吴丽清,廖婧,王威,等.基于 AHP-信息量法的武汉地区岩溶地面塌陷危险性评价[J].长江科学院院报,2017,34(4):43-47.
- [7] 刘艳辉,刘传正,唐灿,等.基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):92-97.
- [8] Xu X Z, Liu Z Y, Xiao P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J].Catena,2015b,135:231-239.
- [9] Lucas-Borja M E, Zema D A, Guzman M D H, et al. Exploring the influence of vegetation cover, sediment storage capacity and channel dimensions on stone check dam conditions and effectiveness in a large regulated river in México[J].Ecological Engineering,2018,122:39-47.
- [10] 张茂省,校培喜,魏兴丽.延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M].北京:地质出版社,2008.
- [11] 苗连朋,温仲明,张莉.植被变化与水沙响应关系研究:以延河流域为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):75-81.
- [12] 谢全敏,夏元友.滑坡灾害评价及其治理优化决策新方法[M].武汉:武汉理工大学出版社,2008.
- [13] 李会中.滑坡识别与案例剖析[M].武汉:武汉理工大学出版社,2011.
- [14] 郑书彦,李占斌.滑坡侵蚀研究[M].郑州:黄河水利出版社,2005.
- [15] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.
- [16] 曹银真.黄土地区重力侵蚀的机理及预报[J].水土保持通报,1981(4):19-22.
- [17] 陈安强,张丹,范建容,等.元谋干热河谷沟壁崩塌的力学机制与模拟试验[J].中国水土保持科学,2012,10(3):29-35.
- [18] 刘秉正,翟明柱,吴发启.渭北高原沟谷侵蚀初探[J].水土保持研究,1990(2):25-33.
- [19] Ali A, Huang J, Lyamin A V, et al. Boundary effects of rainfall-induced landslides [J]. Computers and Geotechnics,2014,61:341-354.
- [20] 甘枝茂.黄土高原地貌与土壤侵蚀研究[M].西安:陕西人民出版社,1989.
- [21] 松永光平,甘枝茂.黄土高原重力侵蚀的地质地貌因素分析:从发生的规模频度看区域特征[J].水土保持通报,2007,27(1):55-57.
- [22] Liu Y, Fu B, Lü Y, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J].Geomorphology,2012,138(1):404-414.
- [23] 孙尚海,张淑芝.中沟流域的重力侵蚀及其防治[J].中国水土保持,1995(9):25-27.
- [24] Crozier M J, Eyles R J, Marx S L, et al. Distribution of landslips in the Wairarapa hill country[J].New Zealand Journal of Geology and Geophysics,1980,23(5/6):575-586.
- [25] 薛强.延安宝塔区地质灾害危险性评价研究[D].西安:西安科技大学,2008.
- [26] 郑苗苗.黄土高原陕甘宁地区地质灾害数据库建设与危险性评价[D].西安:长安大学,2017.
- [27] Youssef A M, Pourghasemi H R, Pourtaghi Z S, et al. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia[J].Landslides,2016,13(5):839-856.
- [28] Pradhan B, Lee S. Landslide risk analysis using artificial neural network model focussing on different training sites[J].International Journal of Physical Sciences,2009,4(1):1-15.
- [29] 刘翠然,许铜建,樊德军,等.西峡县滑坡、崩塌地质灾害地层地貌因素分析[J].建筑技术,2017,48(12):1302-1305.
- [30] 兰恒星,伍法权,周成虎,等.基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [31] Vergani C, Giadrossich F, Salbitano F, et al. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review[J].Earth-Science Reviews,2017,167:88-102.