

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0048

向灵芝,杨为民,李浩,等.基于地貌演化的黄土滑坡敏感性分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):173-181. XIANG L Z, YANG W M, LI H, et al. Sensitivity of loess landslides based on geomorphic evolution theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 173-181. (in Chinese)

基于地貌演化的黄土滑坡敏感性分析

向灵芝¹,杨为民²,李浩³,田尤⁴,杨培丰¹

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;2. 中国地质科学院 地质力学研究所,北京 100081;
3. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051;4. 中国地质调查局 探矿工艺研究所,成都 611734)

摘要:甘肃天水麦积区位于陇西黄土高原,受强降雨和历史地震的影响,地表沟壑纵横,滑坡分布广泛。如何判断不同成因滑坡的敏感性与地貌演化阶段的对应关系是值得深入研究的问题。通过详细的野外调查,总结滑坡的形态特征,将区内滑坡分为降雨诱发型和地震诱发型。基于地貌演化理论,利用面积-高程曲线参数 HI 值和 K 值判断各小流域发育阶段与侵蚀程度,开展研究区滑坡敏感性分区。结合野外实地调查获得的滑坡分布数据,计算各个不同敏感区的地震滑坡和降雨滑坡面积比例,探讨不同成因形成的滑坡的分布趋势与地貌演化阶段的对应关系,并对敏感性分区结果进行验证。分析结果表明:高敏感区(壮年期)HI 值为 0.35~0.6,占全区总面积的 67.87%;中敏感区(幼年期)HI 值为 0.6~1,占全区总面积的 21.33%;低敏感(老年期)区 HI 值为 0~0.35,占全区总面积的 10.8%。K 值与 HI 值整体呈正相关关系。各敏感性分区内地震与降雨滑坡的面积与分区面积的比值随敏感性的增加而增加,降雨滑坡在中敏感(幼年期)区中分布比例最高,多为黄土浅表层滑坡,地震诱发滑坡在高敏感区(壮年期)中分布比例最高。

关键词:地貌演化;面积-高程曲线;敏感性;地震滑坡;降雨滑坡

中图分类号:P642.22 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensitivity of loess landslides based on geomorphic evolution theory

XIANG Lingzhi¹, YANG Weimin², LI Hao³, TIAN You⁴, YANG Peifeng¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Institute of Geomechanics, Beijing 100081, China; 3. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, China; 4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 611734, China)

Abstract: Maiji District of the Tianshui city in Gansu Province is located in the Longxi Loess Plateau, northwest China. The landslides are widely distributed on broken ground due to heavy rainfall and historical earthquakes. How to estimate the relationship between the sensitivity of landslides with different causes and the geomorphic evolution stage of ground is of great interests. This paper summarized the morphological features of landslides through detailed field investigation, and divided them into rainfall induced or earthquake induced. The parameters HI and K in the area-altitude curve of the geomorphologic evolution theory were calculated to assess evolution stages and erosion extent of each catchments. Regional landslide susceptibility zoning was mapped. Combining with actual landslide distribution data, the ratio of seismic landslide and rainfall landslide in each sensitive zone were estimated. Furthermore, the correspondence between landslide distribution with different causes and geomorpho-

收稿日期:2018-07-22 修回日期:2019-01-23 网络出版时间:2019-03-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190304.1449.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(41605165);中国地质调查局地质调查项目(12120114035601)

作者简介:向灵芝(1980—),女,重庆人,副教授,博士,主要从事地质灾害演化、风险与岩土力学分析。E-mail:xlz1223xlz@sina.com

logic evolution stage was discussed to verify the sensitivity zoning. Three conclusions were drawn: The high sensitivity partition with parameters of HI 0.35 to 0.6 accounted for 67.87% of the region; The moderate sensitivity partition with HI from 0.6 to 1 accounted for 21.33% of the region; and the low sensitivity partition with HI from 0 to 0.35 accounted for 10.8% of the region. The parameters HI and K were positively correlated. The ratio of the two type landslides areas to their sensitive area increased with sensitivity. The rainfall landslide mainly occurred in the moderate sensitivity partition and showed shallow landslide. The seismic landslide mainly occurred in the high sensitivity partition.

Key words: geomorphologic evolution; area-altitude curve; sensibility; seismic landslide; rainfall landslide

我国西北地区的黄土高原是世界上最大的黄土堆积区,地表广泛覆盖晚更新世沉积的马尔黄土(Q₃),由于其沉积时间短,岩性软弱,垂直节理发育且具有湿陷性。黄土高原一方面由于地处季风区,各地7—9月降水量之和占全年降水总量的60%以上,丰水年和干旱年降水量可相差2~5倍^[1];另一方面地震在部分地区作用强烈,历史地震频发。近年来滑坡呈频发态势,如何判断不同成因滑坡与不同地貌演化期坡体稳定性的耦合关系,即滑坡的敏感性值得深入研究。

众多学者对单一成因(地震或降雨)的滑坡敏感性分析方面有较多探讨,其中常采用的方法为基于地质环境背景因子进行分析,如对地层岩性、地质构造、降雨、坡体结构、坡度、沟谷密度等因子进行分析,运用数理统计分析方法进行敏感度计算^[2-10]。如何对同一个地区不同成因的滑坡进行分析的相关研究还比较缺乏。而1899年戴维斯提出了地貌侵蚀循环理论,认为地貌的演变是内外营力共同作用的结果,提出地貌演变的三个阶段:幼年期、壮年期和老年期。20世纪50年代,美国地貌学家 STRAHLER^[11]提出了将戴维斯模型量化的办法,即面积-高程曲线(HI线)。在此基础上,众多学者^[12-18]从地质学、水文学的角度,结合GIS技术研究了高程积分的计算方法、尺度效应以及对流域侵蚀量、岩性构造等方面的影响。其中,李泳等^[19]学者以云南东川蒋家沟源地小流域面积-高程曲线为基础,将流域的面积-高程曲线的积分值表征为可提供给滑坡、泥石流等不良地质现象的松散固体物质量的大小,曲线的不同形态特征表征流域的比降等地貌特征值,具体讨论了流域可能发生泥石流的曲线形态和演化趋势。从而使HI曲线成为判断不同地貌演化阶段的小流域中发生滑坡、泥石流敏感性的一种有效方法。本文基于以上研究,运用面积-高程曲线的方法,以甘肃天水麦积区幅范围为例,通过实地调查,总结降雨和地震滑坡的典型特征,建立滑坡分布数据库。通过计算该区各子流域的面积-高程曲线积分值

(HI)与曲线特征参数K,确定各流域的地貌演化阶段,由此判断其滑坡敏感性。进一步利用实地调查所得的滑坡分布数据,判断不同成因滑坡的地貌演化易发阶段,对敏感性分区结果进行验证,为黄土地区滑坡敏感性研究作参考。

1 研究区概况

1.1 地质环境条件

甘肃天水麦积区幅范围,地处陇西黄土高原,属于暖温带季风气候带,但受大陆性气候影响明显,表现为半湿润半干旱气候,年降水量分配不均,降水集中且岩土体风化强烈,地貌上呈现出黄土高原特有的梁、峁、塬和冲沟等地貌类型。区内最高点是西南角的鸡木塬坎山地,海拔1 923.21 m,最低处是渭河河谷东侧边界地区,海拔1 060.83 m,地形坡度为15°~61°。区内主要河流包括北西-南东流向的渭河及两条主要支流-北西西流向的籍河和近南北流向的牛头河。区域表面主要覆盖全新世Q₄和晚更新世Q₃的黄土堆积物,底部基岩为新近系泥岩或早元古界的变质岩,主要出露于沟谷下部和牛头河两岸斜坡,形成研究区典型的上部黄土下部基岩的二元沉积结构。构造区属于西秦岭断裂区,实地调查表明区内发育6条断裂带,活动性强烈的西秦岭北缘断裂带天水段-凤凰山断裂(F₁)和天水-宝鸡断裂(F₂)(图1)。历史地震频发,据史料记载,公元前193年至今,相邻区域共发生81次较强地震,麦积区范围的地震有734年天水7.0级地震和1654年天水南8.0级地震,震中位置分布为马跑泉镇一带和天水镇西北一带^[20-21]。每次强烈地震都伴随有大规模滑坡发生。根据全国第5代地震动区划图,该区地震动加速度高达0.3g,因此该区发生大规模黄土滑坡的可能性极大。

1.2 滑坡发育情况

研究区内黄土滑坡是在内、外动力地质作用下形成的,它既受环境地质条件制约,又受地震、降雨、人类工程活动等因素控制^[22-23]。相关研究表明,该区内区内90%的滑坡由降雨、地震引起^[24-26]。本研

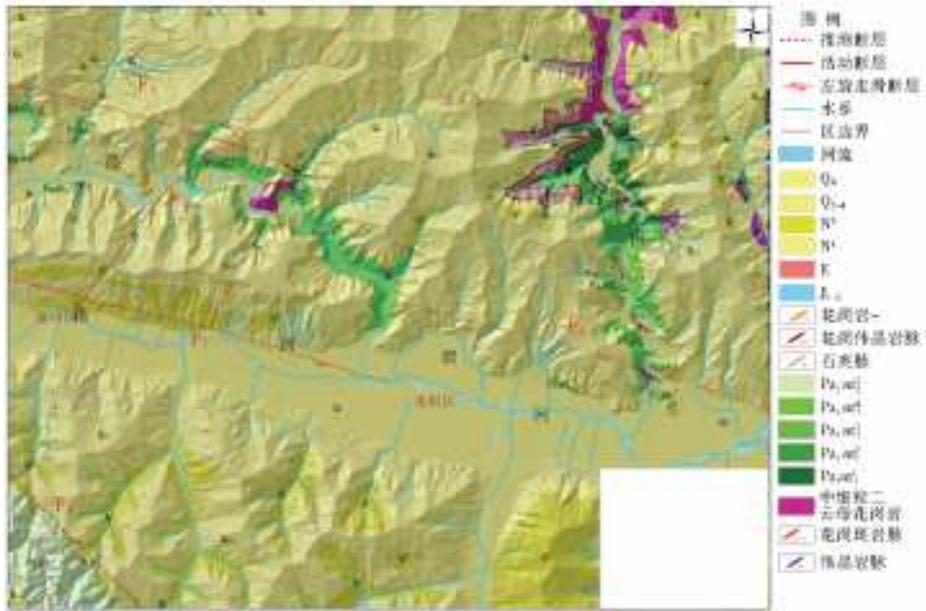


图1 研究区地形地质

Fig. 1 Topographic and geological map of the study area

究综合遥感影像解译和详细的野外调查,确定全区共发育滑坡 438 处(图 2)。通过分析滑坡的形态特

征,总结出该区共有两类典型成因的滑坡,即地震诱发滑坡(212 处)和降雨诱发滑坡(226 处)。

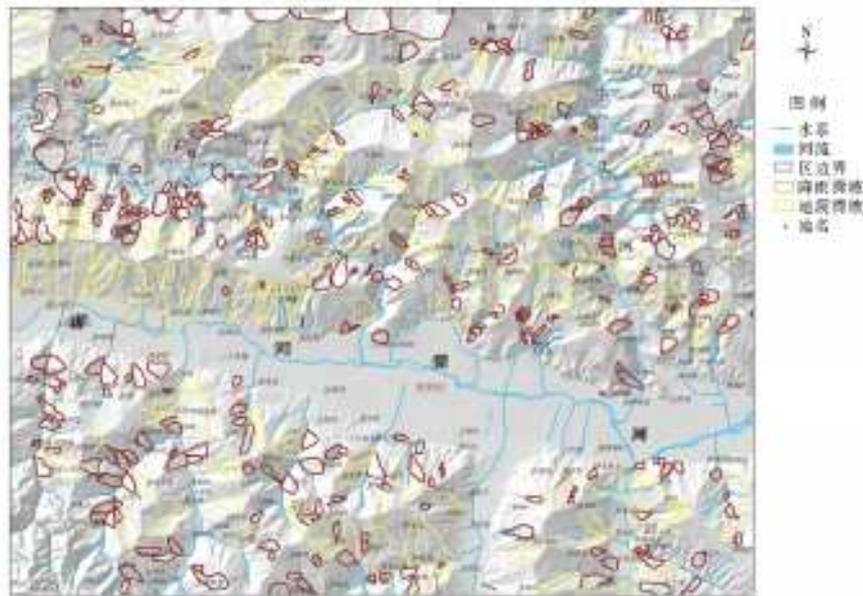


图2 滑坡分布

Fig. 2 The landslide distribution in research area

(1)地震滑坡

受地震激发而形成的滑坡一般位于黄土梁两侧坡面和断裂附近,高程较高处,滑坡后壁陡直,相对高差大,最高达 80 m,滑体厚度一般大于 20 m,最厚近 100 m,滑坡规模通常较大且滑体滑移距离较远。该类滑坡发生时间较早,圈椅状地貌明显,后壁和侧壁形态保存较完整,滑坡要素基本保存齐全,部分最早期次发生的仅保存圈椅状地貌,滑坡形态遭后期改造严重^[22]。其类型包括黄土内滑坡、顺层滑坡及切层滑坡。如税湾村-柳沟里滑坡群(图 3),该

滑坡位于 105.910°E, 34.590°N,共包括 5 个滑坡,各边坡呈凸型或阶梯型,滑体为中更新世、晚更新世的黄土,滑床为新近系的红色泥岩。滑坡内沟谷切割较深,后壁和侧壁清晰可见,后壁陡坎最高达 80 m,临空面陡峭,滑体保存较好,且多数具有次级滑面。如税湾滑坡共有 4 级滑动面,发育陡直的次级滑坡后壁(图 4),滑体厚度为 80~100 m,滑坡体上滑坡裂隙密集分布,坡体结构破碎。

(2)降雨滑坡

降雨诱发型滑坡大多位于渭河两岸支沟河流两



图 3 税湾村-柳沟里地震滑坡群

Fig. 3 Landslide group caused by earthquake in SuiWan-LiuGouLi



图 4 税湾滑坡次级滑坡

Fig. 4 The secondary landslide of SuiWan landslide

侧岸坡,距离水系较近,滑体厚度较小,一般小于 20 m,规模较小,基本为小型或中型滑坡,滑移距离较短,后壁陡坎明显,但高度通常小于 20 m。该类滑坡形态保存完整,滑坡要素完全,通常滑坡体变形强烈,滑动迹象明显,如后壁陡坎完整,滑坡体上剪张裂缝发育,后壁发育拉张裂缝,滑坡体上发育醉汉林等^[22]。小型滑坡表现为坡面浅层滑坡,如李家湾村西北滑坡群(图 5)。此滑坡群位于牛头河右岸,地理坐标为 105.937°E,34.608°N。滑坡群由西向东共发育 3 个滑坡,且 1 号滑坡发育嵌套小滑坡(2 号滑坡)(图 6)。滑坡体平面上呈弧形,剖面上呈勺型,滑体为晚更新世的马兰黄土,滑床为新近系的泥岩。滑坡后壁均高 20~30 m,侧壁均高 5~15 m,滑体厚 30 m。



图 5 李家湾村西北滑坡群图

Fig. 5 Northwest landslide group of Lijiawan village



图 6 1 号滑坡发育嵌套小滑坡

Fig. 6 Nested landslide of #1 landslide

2 滑坡敏感性分析方法

2.1 面积-高程曲线物理意义及特征参数

面积-高程曲线的物理意义推导如下:设任意一个三维空间中的小流域(山体),其底面投影积为 A ,相对高差为 H 。流域内每条等高线以上的投影面积为 a ,可求该等高线的面积比 $x=a/A$ 。每条等高线所对应的高程与流域最低点的高差为 h ,可计算等高线的高程比 $y=h/H$ 。全流域内从沟口到沟顶不同等高线可对应计算出一系列 (x,y) 值。以 x 为横坐标, y 为纵坐标绘制散点,再将散点数据进行函数拟合得到曲线方程,最终绘出面积-高程(HI)曲线(图 7)。曲线左下方与坐标轴之间的面积值可通过计算曲线在 X 轴 $(0,1)$ 区间内的积分得。该积分值即为面积-高程积分值(HI 值)(式(1)),可代表流域在沟口海拔以上的现阶段物质总量。

$$HI = \int_0^1 f(x) dx \quad (1)$$

由于 x,y 本质上是面积比和高程比, $x,y \in (0,1)$,则必有 $HI \in (0,1)$ 。由图 7 可见,流域从幼年期到老年期,其 HI 曲线逐渐由凸变凹,曲线与坐标轴的面积即 HI 值不断减小,这表明同一个流域依次经历幼年、壮年、老年,即流域内岩土体在外营力的作用下随着时间演化而被侵蚀。

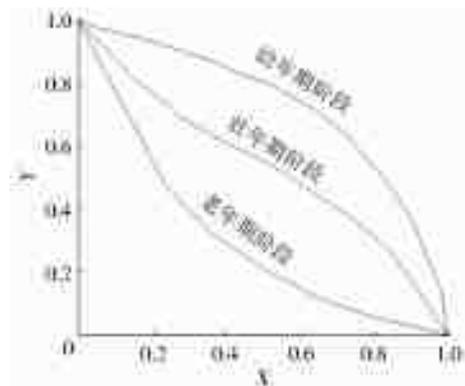


图 7 面积-高程曲线示意图

Fig. 7 The area-altitude curve

2.2 滑坡敏感性的确定

根据面积-高程(HI)曲线的物理意义,可进一步推论地貌演化阶段与流域内斜坡稳定性的关系。当流域处于幼年期时,HI值趋近1,曲线为上凸型,流域内岩土体物质质量巨大,地表从平原状态开始接受流水、风等外营力的侵蚀,斜坡坡面开始出现纹沟、细沟,局部地区出现浅层滑移,流域内斜坡岩土体大部分地区仍处于相对稳定状态,出现大规模的滑坡的概率相对较小。当流域进入壮年期后,HI曲线斜率逐渐变大,表明其流域内沟道逐渐加深,侵蚀速度和规模迅速增加,发生滑坡的概率也相应急剧增大,进入老年期后,HI曲线变为下凹形态,斜率减小,HI值减小,意味着坡体物质质量和坡面的势能都大幅度下降,斜坡向准平原化演进,滑坡发生概率低。因此对应于不同演化阶段流域发生滑坡的敏感性由大到小分别为:壮年>幼年>老年。许多学者依据不同滑坡、泥石流频发区域内各子流域的HI值来对其演化阶段进行分级判定时,HI值分级界限不尽相同^[18-19,27-29],此分析选取应用较多的一种分级界限来对研究区的各流域进行判定:当 $0 \leq HI < 0.35$ 时,流域处于老年期,对应滑坡低敏感区;当 $0.35 \leq HI < 0.6$ 时,流域处于壮年期,对应滑坡高敏感区;当 $0.6 \leq HI < 1$ 时,流域处于幼年期,对应滑坡中敏感区。并进一步根据实际滑坡在各敏感区的分布情况来检验敏感性分区的效果。另外,评价同一发育阶段流域的敏感性则可利用曲线的K值^[30]来进行判断,其含义为HI值的一半所对应的y值大小。如图8所示的两条曲线HI值相等,但 $K_1 > K_2$,表示 f_1 曲线所代表的该流域内处于上游地区的面积大于 f_2 ,说明该流域上游地区堆积物保留较多,具有较高的势能,发生滑坡的可能性越高,即滑坡敏感性越高。

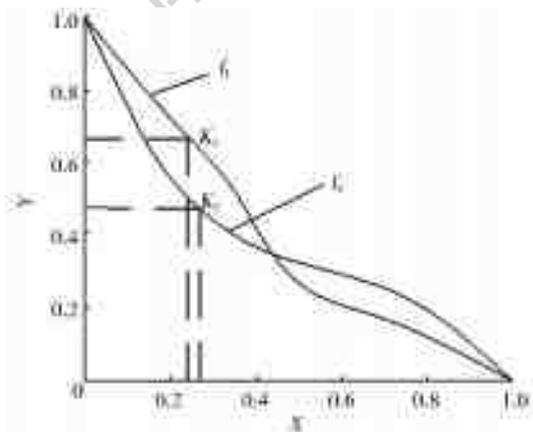


图8 敏感性参数K值图

Fig. 8 The sensibility parameter K

3 计算分析及验证

3.1 HI值计算实例

以赵集滑坡(地震诱发)所在流域范围为例进行HI值计算演示。该小流域位于 $106^{\circ}49'30''E$, $34^{\circ}35'N$,沟口高程为1099.96 m,流域内最高高程为1507.03 m,相对高差H为407.07 m。流域面积A为 1.2 km^2 ,按50 m等高距提取等高线。利用ArcGIS软件中3D analyst命令模块中的area and volume命令,计算每条等高线以上对应的投影面积a,分别计算各条等高线对应的x和y。在EXCEL中将表内各组x和y值进行一元二次函数曲线拟合(图9),计算曲线积分值HI为0.54。利用matlab编制程序计算得到其K值为0.69。

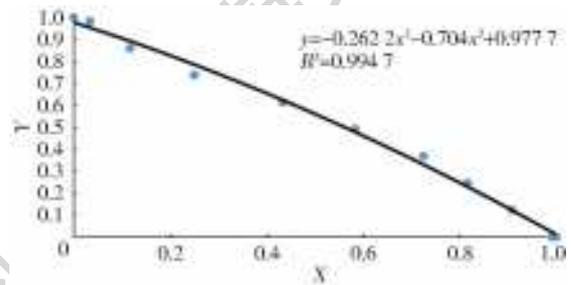


图9 赵集流域HI曲线拟合

Fig. 9 HI curve fitting in Zhao Ji river basin

3.2 结果分析

(1)阈值为800的子流域。

基于ArcGIS水文提取模块,以800为汇流阈值共划分380个子流域。HI值计算结果见表1,属于老年期($HI < 0.35$)有90个,壮年期($0.35 < HI < 0.6$)251个,幼年期($0.6 < HI < 1$)39个,分别占总数的23.7%,66.3%和10.3%。根据流域演化阶段(HI值)和滑坡敏感性的对应关系,可得研究区滑坡敏感性分区图(图10)。K值计算结果位于(0.11~0.92)区间内(图11)。将各流域K值按等间距分为三级:其中K值小于0.309的流域仅12个;在0.309~0.615区间内的共142个,占总数的37.4%;在0.62~0.92区间内的共226个,占总数的59.5%。由表1可知,K值与HI值基本呈正相关,即HI值越高,流域的地貌演化阶段越年轻,其上游堆积物质量越多,K值越大,对于具有相同HI值的流域,可根据K值进一步细化其滑坡敏感性。综合以上计算结果可得,研究区各流域发育阶段以壮年期为主,大部分容易发生侵蚀,且流域内上游堆积物相对较多,处于不稳定的状态,易受到降雨、地震等因素的影响,导致滑坡大规模暴发的概率很大。

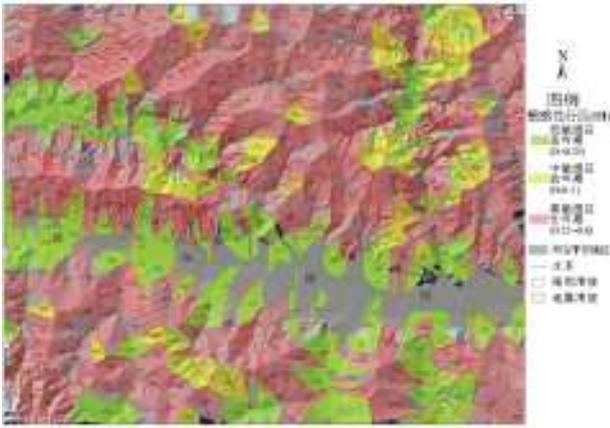


图 10 研究区滑坡敏感性(流域演化阶段)分区

Fig. 10 The sensibility zoning map of landslide

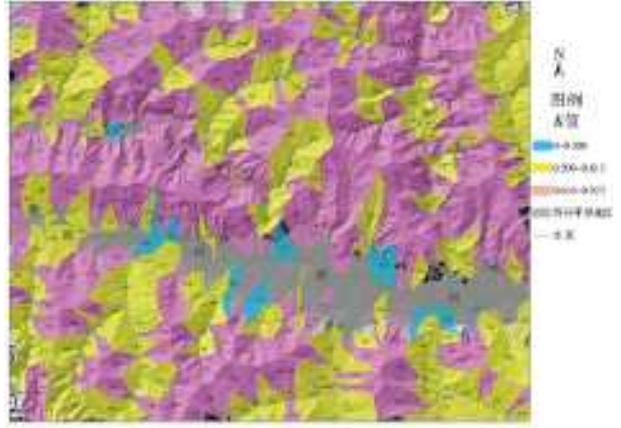


图 11 研究区 K 值计算结果

Fig. 11 The K values in research area

表 1 流域敏感性(HI)值与 K 值相关性统计

Tab. 1 Correlation between HI and K values

流域敏感性 分级	低敏感 ($0 < HI < 0.35$)	中敏感 ($0.6 < HI < 1$)	高敏感 ($0.35 < HI < 0.6$)
流域个数 (占总数的比例)	90(23.7%)	39(10.3%)	251(66.1%)
K 值平均值	0.51	0.74	0.63

(2)阈值为 2 000 的子流域。

以汇流阈值为 2 000 共得到 129 个子流域,计算结果表明属于老年期($HI < 0.35$)的流域有 25 个,壮年期($0.35 < HI < 0.6$)有 94 个,幼年期($0.6 < HI < 1$)有 10 个,分别占总数的 12.89%,72.87%和

7.57%。

对比阈值 800 和 2 000 的子流域的计算结果,阈值越大,子流域面积越大,使得壮年期的流域(HI 值趋近 0.5 左右)个数增多,老年期和幼年期的分区面积明显减小。因考虑大流域单元时,不利于判别具体坡体发生滑坡的敏感性,应选择较小的阈值即 800 的子流域计算结果作为滑坡敏感性分区验证对象。

3.3 滑坡敏感性分区结果验证

对阈值为 800 的子流域的计算结果,分类统计研究区各级别敏感区(演化阶段)的子流域的面积,统计各敏感区内滑坡(总滑坡、降雨滑坡、地震滑坡)的分布面积,并计算其面积比值,统计结果见表 2。

表 2 滑坡面积比例统计

Tab. 2 The proportion of rainfall and seismic landslide areas

敏感性分区	各敏感区	总滑坡(地震、		降雨滑坡 面积 D/km ²	总滑坡面积 比例(B/A)/%	地震滑坡面积 比例(C/A)/%	降雨滑坡面积 比例(D/A)/%
	总面积 A/km ²	降雨)面积 B/km ²	地震滑坡面积 C/km ²				
低敏感区(老年期)	86.23	12.56	7.39	5.13	14.56	8.56	5.95
中敏感区(幼年期)	38.06	10.63	6.17	4.47	27.93	16.22	11.75
高敏感区(壮年期)	269.33	79.23	53.60	25.48	29.42	19.90	9.46
全区	429.96	103.27	67.81	35.46	24.02	15.77	8.25

由表 2 可知,就绝对面积而言,总滑坡以及两类滑坡(地震诱发、降雨诱发)的面积在高敏感区最大,分别为 79.23,53.60 和 25.48 km²,说明滑坡在壮年期流域占绝对优势。在中敏感区和低敏感区内各类滑坡的面积相差不大,反而是低敏感区内滑坡面积稍高,其原因在于整个研究区内低敏感区面积(86.23 km²)为中敏感区面积(38.06 km²)的 2.3 倍。因此有必要将各敏感区内滑坡的面积与各敏感区面积的比值进行计算,来表征各敏感区滑坡发生的概率大小。从计算结果可知,研究区实际总滑坡在各敏感区内的面积比例与敏感性分区结果相符,对应于高、中、低敏感区的面积比例分别为

29.42%、27.93%和 14.56%,说明敏感性分级界限的划定较合理。

而对两种不同诱发因素的滑坡在各敏感区的面积比例表明,计算结果与不同因素诱发滑坡的地质地貌条件相对应。地震诱发滑坡高敏感区(壮年期流域)的分布比例最高,为 19.90%;而降雨诱发滑坡则在中敏感区(幼年期)内面积比例最高,为 11.75%。图 3 所示的地震滑坡-税湾村-柳沟里滑坡群流域演化阶段计算结果均为壮年期,税湾村滑坡 HI 值为 0.54,曲线拟合见图 12。此类地震滑坡多位于黄土梁两侧,原本在流水和重力的侵蚀下,沟谷纵横且垂直节理发育的坡体,在地震波的震动下,

处于高位和活动断裂附近的坡体动响应明显,迅速解体下滑形成地震滑坡。

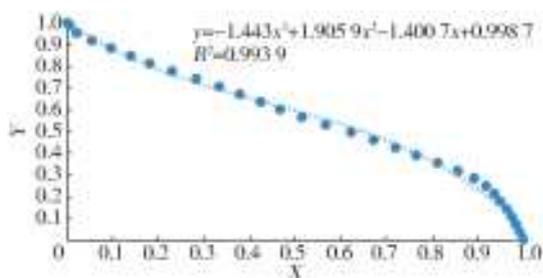


图 12 税湾滑坡演化曲线

Fig. 12 The evolution curve in ShuiWan drainage basin

降雨滑坡面积比值为幼年期>壮年期>老年期,表明降雨对幼年期地貌演化的影响最大。由于该区降雨滑坡一般属于浅表层滑坡,位于坡体的中下部且邻近干流河道,与幼年期坡体内沟谷切割相对微弱的演化特征相对应。图 5 所示的李家湾村西北滑坡群的 1 号滑坡流域 HI 值为 0.63,其流域演化曲线见图 13,属于幼年阶段。其典型降雨滑坡形成过程为:首先黄土坡面遭降雨入渗侵蚀成细沟,坡面汇水流入冲沟切割坡脚,且坡体具有表层马兰黄土的松散结构、垂直节理发育等特性,其沟头溯源侵蚀速度非常迅速,流域呈树枝状水系向上游发展,在沟头处形成小型崩塌、滑坡,逐渐连接成圆弧状,向圈椅状地貌演化,最终形成滑坡。

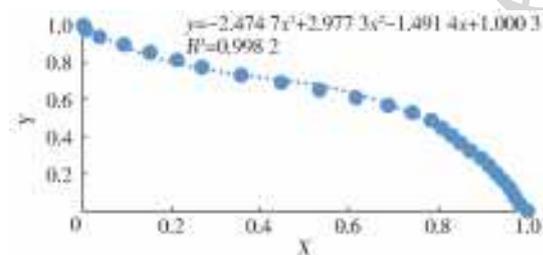


图 13 李家湾村西北滑坡群流域演化曲线

Fig. 13 The evolution curve of northwest landslide group in Lijiawan village

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究区阈值为 800 的小流域 HI 值介于 0.19~0.79,以壮年期(0.35<HI<0.6)为主,占总数的 67.87%。K 值介于 0.11~0.92,与 HI 值呈正相关关系。表明研究区大部分流域的演化阶段属于壮年期,流域内斜坡岩土体侵蚀速度和规模均处于最高峰时期,坡体敏感性高,易发生大规模滑坡灾害。

(2) 滑坡敏感性分区与实际调查所得滑坡的分布总体上具有一致性。两类滑坡面积在分别在高、中、低敏感区的面积比例分别为 29.42%、27.93%

和 14.56%,其高敏感区和中敏感区内的面积比例较接近,是由于两种成因滑坡在分别在不同演化阶段的坡体分布优势不同。降雨诱发的滑坡在幼年期流域(中敏感区)比例最高,多为浅表层滑坡,系沟谷溯源侵蚀,河流切割坡脚形成;地震滑坡在壮年期(高敏感区)的比例最高,多位于坡体上部、近梁顶和活动断裂带附近,流域切割较深且地震动响应明显。分析结果可为进一步研究以及工程实践活动提供参考。

4.2 讨论

(1) 对比阈值为 800 和阈值为 2 000 提取的子流域 HI 计算结果,表明阈值越高,子流域面积越大,其 HI 值普遍集中于 0.5 左右,不利于判别具体坡面的滑坡敏感性。因此要细化地貌演化阶段对滑坡的分布规律,可进一步对更小阈值提取的子流域进行分析。

(2) 由于研究区位于西秦岭断裂构造活跃区,该区地貌演化过程受多次构造运动的影响,具有多阶段性的特点。因而滑坡的成因具有多样性、多种因素共同作用的特征,本次分析只针对其主要形态特征进行分类,为黄土滑坡敏感性分析作参考。

参考文献(References):

- [1] 王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,2005. (WANG N Q, ZHANG Z Y. Study on landslide hazard of Loess [M]. Lanzhou: Publishing House of Lanzhou University, 2005. (in Chinese))
- [2] 陶舒,胡德勇,赵文吉,等. 基于信息量与逻辑回归的次生滑坡灾害敏感性分析—以汶川县北部为例[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1594-1605. (TAO S, HU D Y, ZHAO W J. Susceptibility assessment of secondary landslides triggered by earthquakes: A case study of northern Wenchuan [J]. Geographical Research, 2010, 29(9): 1594-1605. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/yj2010090006.
- [3] 许冲,戴福初,姚鑫,等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 15-25. (XU C, DAI F C, YAO X, et al. Gis platform and certainty factor analysis method based wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 15-25. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9665. 2010. 01. 003.
- [4] WU X L, REN F, NIU R Q. Landslide susceptibility assessment using object mapping units, decision tree, and support vector machine models in the Three Gorges of China [J]. Environ Earth Sci, 2014, 71(11): 4275-4783. DOI: 10. 1007/s12665-013-2863-4.
- [5] CHOI J, OH, H J, WON J S, et al. Validation of an ar-

- tificial neural network model for landslide susceptibility mapping[J]. *Environ Earth Sci*, 2010, 60(3): 473-483. DOI: 10. 1007/s12665-009-0188-0
- [6] DIEU T B, BISWAJEET P, OWE L, et al. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh Province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models[J]. *Catena*, 2012, 96: 28-40. DOI: 10. 1016/j. catena. 2012. 04. 001.
- [7] AKGUN A, SEZER E A, NEFESLIOGLU H A, et al. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 38(1): 23-34. DOI: 10. 1016/j. cageo. 2011. 04. 012.
- [8] HE S W, PAN P, DAI L, et al. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China[J]. *Geomorphology*, 2012, 171-172: 30-41. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2012. 04. 024.
- [9] 谭龙, 陈冠, 王思源, 等. 逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(1): 56-63. (TAN L, CHEN G, WANG S Y, et al. Landslide susceptibility mapping based on logistic regression and support vector machine[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(1): 56-63. (in Chinese)) DOI: j. issn. 1004-9665. 2014. 01. 008.
- [10] 王志恒, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析——以四川省低山丘陵区为例[J]. *灾害学*, 2014, 29(2): 109-115. (WANG Z H, HU Z W, ZHAO W J, et al. Susceptibility analysis of precipitation-induced landslide disaster-pregnant environmental factors based on the certainty factor probability model-Taking the hilly area in Sichuan as example [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(2): 109-115. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2014. 02. 022.
- [11] STRAHLER A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology[J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1957(38): 913-920. DOI: 10. 1029/TR038i006p00913.
- [12] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义[J]. *山地学报*, 2009, 27(3): 285-292. (ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al. Geomorphology characteristic and tectonic response of the northern Tianshan represented by hypsometric integral[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(3): 285-292. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-2786. 2009. 03. 005.
- [13] 祝士杰, 汤国安, 李发源, 等. 基于 DEM 的黄土高原面积高程积分研究[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 921-932. (ZHU S J, TANG G A, LI F Y, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 921-932. (in Chinese)) DOI:
- [14] WALCOTT R C, SUMMERFIELD M A. Scale dependence of hypsometric integrals: An analysis of southeast African basins[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1-2): 174-186. DOI: org/10. 1016/j. geomorph. 2007. 08. 001.
- [15] 陈彦杰, 郑光佑, 宋国城. 面积尺度与空间分布对流域面积高度积分及其地质意义的影响[J]. *地理学报(中国台湾)*, 2005(39): 53-69. (CHEN Y J, ZHENG G Y, SONG G C [J]. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications[J]. *Journal of Geographical Science (Taiwan, China)*, 2005(39): 53-69. (in Chinese))
- [16] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 面积高程积分值计算方法的比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 171-175. (CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al. Comparison of hypsometric integral methods[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 171-175. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2015. 100.
- [17] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. *水土保持学报*, 1988, 1(2): 1-7. (AI N S. Comentropy in erosional-drainage-system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 1(2): 1-7. (in Chinese))
- [18] 艾南山, 岳天祥. 再论流域系统的信息熵[J]. *水土保持学报*, 1988, 2(4): 1-9. (AI N S, YUE T X. Second discussion of the comentropy of drainage-system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 2(4): 1-9. (in Chinese))
- [19] 李泳, 陈晓清, 胡凯衡, 等. 流域特征曲线与泥石流活动[J]. *山地学报*, 2006, 24(3): 320-326. (LI Y, CHEN X Q, HU K H, et al. Characteristic curves and debris flow activity of a valley[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(3): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-2786. 2006. 03. 009.
- [20] 雷中生, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 734 年天水 7 级地震考证与发震构造分析[J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 51-62. (LEI Z S, YUAN D Y, GE W P, et al. Textual research on the Tianshu im 7 earthquake in 734 ad and analysis of its causative structure[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 51-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-4967. 2007. 01. 004.
- [21] 刘白云. 甘东南地区两次 8 级历史疑难地震发震构造与发震机制研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2012. (LIU B Y. Study on the occurrence and occurrence mechanism of two Ms 8. 0 -magnitude historical disturbed earthquake in southeast of Gansu Province[D].

- Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Earthquake Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [22] 田尤,杨为民,黄晓,等.天水市麦积区幅黄土滑坡发育分布特征及其孕灾因素分析[J].地质力学学报, 2016, 22(1): 25-38. (TIAN Y YANG W M, HUANG X, et al. Distribution characteristics and inducing factors of loess landslide in maiji mappable unit, tianshui[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 25-38. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6616. 2016. 01. 003.
- [23] 田尤,杨为民,刘廷,等.天水锻压机床厂滑坡变形破坏机制及形成演化[J].地质力学学报, 2015, 21(2): 298-308. (TIAN Y, YANG W M, LIU T, et al. Deformation mechanism and evolutionary process of TianShui forging machine plant[J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(2): 298-308. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6616. 2015. 02. 020.
- [24] 吴玮江.天水市滑坡泥石流灾害[J].水文地质工程地质, 2003(05): 75-78. (WU W J. Landslide and debris flow hazards in city of Tianshui[J]. hydrogeology and Engineering Geology, 2003(5): 75-78. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2003. 05. 017.
- [25] 朱文忠.天水市地质灾害现状与防治对策[J].甘肃科技, 2004(6): 12-13. (ZHU W Z. Geological disaster situation and countermeasures of Tianshui[J]. Gansu Science and Technology, 2004(6): 12-13. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0952. 2004. 06. 006.
- [26] 吴玮江,贺斌英.天水市的环境地质问题[J].甘肃科学学报, 2003(S1): 200-205. (WU W J, HE B Y. The problems of environmental geology in Tianshui City[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003(S1): 200-205. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-0366. 2003. z1. 048.
- [27] 信忠保,许炯心,马元旭,等.黄土高原面积—高程分析及其侵蚀地貌学意义[J].山地学报, 2008, 23(3): 356-363. (XIN Z B, XU J X, Ma Y X. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in the loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 23(3): 356-363. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-2786. 2008. 03. 017.
- [28] 王晓鹏,潘懋,任群智.基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J].北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 211-215. (WANG X P, PAN M, REN Z Q. Hazard assessment of debris flow on geomorphic information entropy in catchment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(2): 211-215. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0479-8023. 2007. 02. 010.
- [29] 赵洪壮,李有利,杨景春,等.面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J].地理研究, 2010, 29(2): 271-282. (ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 271-282. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/yj2010020010.
- [30] 向灵芝,李泳,陈洪凯,等.基于流域演化的泥石流敏感性分析[J].长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 984-992. (XIANG L Z, LI Y, CHEN H K, et al. Sensitivity analysis of debris flow along highway based on geomorphic evolution theory[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2015, 24(11): 984-992. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201511024.

(上接第 172 页)

- [22] 黄勋,唐川.基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评估[J].地球科学进展, 2016, 31(10): 1047-1055. (HUANG X, TANG C. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1047-1055. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2016. 10. 1047.
- [23] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫.基于 FLO-2D 数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J].工程地质学报, 2016, 24(2): 228-234. (LIANG H X, SHANG M, XU X. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228-234. (in Chinese) DOI: 10. 13544/j. cnki. jeg. 2016. 02. 008.
- [24] 龚柯,杨涛,夏晨皓,等.基于 FLO-2D 的泥石流危险性评价——以四川省汶川县绵鹿镇簇头沟为例[J].水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 134-138. (GONG K, YANG T, XIA C H, et al. Assessment on the hazard of debris flow based on FLO-2D: A case study of debris flow in Cutou Gully, Wenchuan, Sichuan[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 134-138. (in Chinese) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2017. 06. 23.
- [25] 常鸣.基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评估研究[D].成都:成都理工大学, 2014. (CHANG M. Quantitative risk assessment of debris flow in co-seismic area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))