

滑坡侵蚀定量评价模型及应用研究

郑书彦

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 用信息量方法建立了滑坡侵蚀定量评价模型。其基本步骤为: 第一步分析、罗列影响滑坡侵蚀形成的因子, 计算各因子所提供的滑坡侵蚀发生的信息量, 筛选与滑坡侵蚀关系密切的主要变量; 第二步将研究区进行区段划分, 计算每一区段各因子信息量的总和, 其大小反映了各区段滑坡侵蚀的强烈程度, 各区段的集合即为整个研究区的滑坡侵蚀强烈程度——滑坡侵蚀定量评价模型。用建立的定量评价模型对铜川市滑坡侵蚀进行定量评价, 将研究区 82.5 km² 分为: 剧烈侵蚀区 13.0 km² (占 15.76%), 强烈侵蚀区 20.0 km² (占 24.24%), 中度侵蚀区 25.25 km² (占 30.61%), 轻度侵蚀区 6.0 km² (占总面积的 7.27%), 微弱侵蚀区 18.25 km² (占 22.12%)。铜川市滑坡侵蚀中等以上强度区面积 58.25 km², 占研究区总面积的 70.61%, 说明铜川市滑坡侵蚀非常剧烈。

关键词: 滑坡侵蚀; 定量评价模型; 应用研究

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0047-05

中图分类号: P642.22

Applied Research on Quantitative Evaluation Model of Landslide Erosion

ZHENG Shu-yan

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Institute of Water Resources and Hydroelectricity, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The information method principle was applied in the mathematical evaluation model of landslide erosion. The first step of it was to analyze the factors affecting landslide process, and determine the main factors by calculating and comparing their contributions to landslide erosion. After section division for the research region, the second step was to summarize the information of selected factors to reflect the degree of landslide erosion on each section, and then set up a quantitative evaluation model for landslide erosion, which was applied for landslide erosion evaluation in Tongchuan City. Results indicated that in the research region of 82.5 km², the area of highly intensive erosion was 13.0 km², accounting for 15.76% of the total; the area of intensive erosion was 20.0 km², accounting for 24.24% of the total; the area of moderate erosion was 25.25 km², accounting for 30.61% of the total; the area of light erosion was 6.0 km², accounting for 7.27% of the total; and the area of slight erosion was 18.25 km², accounting for 22.12% of the total. Thus the area of landslide erosion above middle class was 58.25 km², accounting for 70.61% of the total area, which implies that landslide erosion in Tongchuan City is serious.

Keywords: landslide erosion; quantitative evaluation model; applied research

1 建立滑坡侵蚀定量评价模型的数学原理

本研究用信息量数学模型建立滑坡侵蚀定量评价模型^[1-6]。信息量算法在数学上属于单变量统计分析法。由前苏联维索科奥斯特罗夫斯卡娅(. . . °ÄÄ¼ÄÄÄÄÄÄ³ Ä¼½, 1968) 及恰金(. . . ¼º¿, 1969) 先后应用该方法于区域找矿, 其基本步骤分两步(赵鹏大等, 1983)^[7]: 第一步计算各地质因素所提

供的找矿信息, 定量地评价各因素对指导找矿的作用, 借以选择与矿化关系密切的变量。第二步计算每个单元中各因素信息量的总和, 其大小反映了该单元相对的找矿意义, 用以评价找矿远景区。

借鉴以上原理, 本研究用信息量方法建立滑坡侵蚀定量评价模型的基本步骤为: 第一步分析滑坡侵蚀的形成条件、促滑因素、触发因素等, 罗列影响滑坡侵蚀形成的内部条件与外部条件因子, 计算各因子所提供的滑坡侵蚀发生的信息量, 定量评价各因子对滑坡

收稿日期: 2006-10-24

修稿日期: 2007-03-18

资助项目: 中国博士后科学基金项目(2003034413); 国家自然科学基金项目(40371075)

作者简介: 郑书彦(1958-), 男(汉族), 甘肃省宁县人, 博士后研究人员, 副教授, 硕士生导师。主要从事水土保持和边坡稳定的教学与科研工作。E-mail: zsyuan@chd.edu.cn.

侵蚀的贡献,筛选与滑坡侵蚀关系密切的主要变量;第二步将研究区进行区段划分,计算每一区段各因子信息量的总和,其大小反映了各区段滑坡侵蚀的强烈程度,各区段的集合即为整个研究区的滑坡侵蚀强烈程度—滑坡侵蚀定量评价模型。

1.1 主要因子确定及因子状态划分

主要因子的确定是根据本区滑坡侵蚀形成条件的研究,确定与滑坡侵蚀形成关系密切的主要因子。因子的性质有两种。

(1) 状态离散性的因子,如岩性因子、地层结构因子、人类活动强度、地下水出露因子等,这类因子各状态间没有明显的内在联系,划分状态时主要考虑有关滑坡侵蚀形成的理论。

(2) 连续状态的因子,如坡高、坡角等,划分时不能只考虑数量级的大小,关键是确定因子与滑坡侵蚀产生联系的分界点,状态划分的合理与否,对提供固有的滑坡侵蚀信息影响很大,好的状态划分使不同状态信息的差距足够大,且信息量的不同状态呈规律性递减或递增,这种规律要能最大表征滑坡侵蚀的意义。因而,因子状态的划分需要多方案的比较和筛选,以便最终方案能客观的反映区域滑坡侵蚀规律。

1.2 因子信息量计算

某种因子对滑坡侵蚀的作用,可通过对这些因子所提供滑坡侵蚀信息量的计算来评价,即用信息的大小来评价因子与滑坡侵蚀关系的密切程度,信息用条件概率计算:

$$I(X_i, S) = \lg [P(S | X_i) / P(S)]$$

式中: $I(X_i, S)$ —— X 因子 i 状态提供滑坡侵蚀 S 发生的信息; $P(S | X_i)$ —— X 因子 i 状态存在条件下,滑坡侵蚀 S 实现的概率; $P(S)$ —— 滑坡侵蚀 S 发生的概率。

实际应用时,因 $P(S)$ 在工作初期不易估计,根据概率乘法定理,上式可变为:

$$I(X_i, S) = \lg [P(X_i | S) / P(X_i)]$$

式中: $P(X_i | S)$ —— 滑坡侵蚀 S 发生的条件下出现 X_i 的概率; $P(X_i)$ —— 研究区中因子 X_i 出现的概率。具体运算时,总体概率用样本频率来估计:

$$I(X_i, S) = \lg \frac{P(X_i | S)}{P(X_i)} = \lg \frac{N_i / N}{M_i / M}$$

式中: $I(X_i, S)$ —— X 因子 i 状态指示滑坡侵蚀 S 的信息量; N_i —— 具有因子值 X_i 的滑坡侵蚀单元数; N —— 研究区中滑坡侵蚀单元总数; M_i —— 有因子 X_i 的单元数; M —— 研究区单元总数。

分析上式可知,若 $P(X_i | S) = P(X_i)$, 则 $I(X_i, S) = 0$, 这表示因子 X_i 不提供任何滑坡侵蚀信息,即

因子 X_i 的存在与否对滑坡侵蚀无影响。若 $P(X_i | S) < P(X_i)$, 则 $I(X_i, S) < 0$, 这表示在因子 X_i 存在条件下对滑坡侵蚀更为不利,即因子 X_i 的存在反而不利于滑坡侵蚀的发生。若 $P(X_i | S) > P(X_i)$, 则 $I(X_i, S) > 0$, 表示因子 X_i 能提供滑坡侵蚀信息,且 $I(X_i, S)$ 越大,提供的滑坡侵蚀信息越多,即因子 X_i 越大越有利于滑坡侵蚀的发生。

1.3 计算各单元的信息总量

求各单元信息量总和可直接反映各单元对滑坡侵蚀的贡献大小,各单元信息量的总和能客观的反映该单元因子对滑坡侵蚀的有利程度。若影响滑坡侵蚀的因子有 n 个,则这些因子综合作用下提供本单元内滑坡侵蚀发生的总信息量为:

$$I = \sum_{j=1}^n I(X_j, S) = \sum_{j=1}^n \lg \frac{N_j / N}{M_j / M} \quad (1)$$

1.4 确定信息临界值

滑坡侵蚀信息临界值的确定方法较多,主要有以下 4 点: ① 类比法。根据研究区内已知滑坡侵蚀信息大小的对比,对已知滑坡侵蚀信息由大到小排序给出一定可靠系数,确定临界值。② 作图法。以横坐标为信息量,纵坐标为单元频数,作信息的单元频数曲线并找出拐点,拐点的横坐标即为临界值。③ 计算概率法。先利用 a, b 确定临界值的方法确定临界值并设为 1,即单元信息和 ≥ 1 为滑坡侵蚀发生区。以 ≥ 1 为分界线进行统计,确定单元信息 ≥ 1 的总数,单元信息 ≥ 1 的总数中已知有滑坡侵蚀单元,已知无滑坡侵蚀单元。则已知有滑坡侵蚀单元除以单元信息 ≥ 1 的总数的百分数必然远大于已知无滑坡侵蚀单元除以单元信息 ≥ 1 的总数的百分数。另外,在信息量 < 1 的单元中,存在已知有滑坡侵蚀单元,这时,已知有滑坡侵蚀单元除以单元信息量 < 1 的总数的百分数将十分小。这意味着在信息量 ≥ 1 的单元中,存在滑坡侵蚀的概率很大,而在信息量 < 1 的单元中存在滑坡侵蚀的概率很小。④ 作图法。将各单元的信息量总和投影于各单元中心,绘制信息量等值线图,然后将已知滑坡侵蚀投影于等值线图上,划分滑坡侵蚀的强烈程度。

2 铜川市滑坡侵蚀定量评价模型

铜川市位于黄土高原南缘,是陕西省重要工业生产基地,是滑坡的集中区之一。近年来由于煤炭资源的不断开采及人为活动的影响,生态环境日益恶化,加上本区气候多大雨、暴雨,致使滑坡侵蚀、崩塌侵蚀经常发生,水土流失日益严重。为配合铜川市的综合治理,特进行滑坡侵蚀定量评价。在本次工作区 82.5

km² 的范围内, 在充分收集利用已有资料的基础上, 对铜川市的滑坡侵蚀开展了全面的现场调查研究工作, 在现场调查阶段对铜川市形成滑坡侵蚀的自然地质环境、典型滑坡分布、特征和社会经济环境进行重点区段的调查, 据前人资料和本次现场调查, 对 127 个滑坡(其中老滑坡 43 个、新滑坡 84 个, 占 28.2%), 272 处崩塌(占 60.3%), 52 个滑塌(占 11.5%)造表登记, 编绘 1: 10 000 铜川市滑坡分布图, 然后进行室内资料整理。

室内资料整理阶段进行了滑坡形成条件的分析, 选择 10 个因子参加滑坡侵蚀强度评价, 进行因子作用程度分析, 在 1: 10 000 地形图上制作网格, 网格横向间距与纵间间距一致, 均为 500 m, 并从左到右, 从上至下编号, 研究区内 82.5 km² 共分 330 个网格单元。在网格图上依次计算 10 个因子的信息量, 并按前述公式计算网格单元的信息量总和。分析确定临界值, 确定侵蚀强度分界值。用上述方法分析确定铜川市滑坡侵蚀发生的临界值分别为: V 级: 剧烈侵蚀区, 信息量 > 0.50, IV 级: 强烈侵蚀区, 信息量 0.3~0.5, III 级: 中度侵蚀区, 信息量 0.0~0.3, II 级: 轻度侵蚀区, 信息量 -1.0~0.0, I 级: 微弱侵蚀区, 信息量 < -1.0。将侵蚀分区临界值输入计算机, 用计算机编绘滑坡侵蚀等值线图、并打印输出。

将滑坡分布现状点绘在滑坡侵蚀强度评价图上, 进行比较查对, 对侵蚀强度和滑坡分布差别大而导致异常的区域, 到现场进行重点查对, 修正滑坡侵蚀强度分区界线, 使之与实际相符。

2.1 因子的选择与因子状态划分

区域滑坡侵蚀的定量评价, 与滑坡侵蚀的形成分析有关, 其评价因子的筛选源于滑坡形成条件^[8-10]。根据现场的调查与分析, 本研究将地形因素(相对高差、地形坡度和沟谷切割密度)、地质因素(地层结构、地震加速度)、地下水出露位置、气候水文因素(植被盖度)、人类活动强度等做为滑坡侵蚀定量评价的主要因素, 具体如下。

(1) 地形因素。选择相对高差、地形坡度和沟谷切割密度 3 个因子来进行滑坡侵蚀的定量评价, 这 3 个因子能完全刻划地形的特征。相对高差: > 50 m, 25~50 m, < 25 m; 地形坡度: > 45°, 20°~45°, < 20°; 沟谷切割密度: 密, 中, 稀。

(2) 地质因素。地层结构、地震加速度, 是滑坡侵蚀评价的重要因子, 应该予以考虑。一般大比例尺、小范围内的地震因素因为地震烈度相同而无法考虑, 但地震因素十分的重要, 铜川地区地震烈度高达 VI 度, 中小地震经常不断, 应以地震加速度予以考虑。

地震加速度: 高; 小; 地层结构: 坡体全部由黄土组成; 坡体上基岩 < 25%, 黄土 > 85%。

(3) 地下水出露。地下水对滑坡面的浸润、对滑带土的软化作用均对滑坡侵蚀的形成十分重要, 应予以足够的重视。地下水出露位置: 在坡脚基岩面上, 在黄土坡体中, 坡脚无地下水出露。

(4) 气候水文因素。主要以植被盖度来考虑, 分为: 小; 中等; 高。

(5) 人类活动强度。人类不合理的工程活动和经济活动, 是加快滑坡形成的外部条件。在滑坡侵蚀评价中, 人类活动强度比较难以确定, 这里根据居民点分布密度、铁路、公路、矿业开发等确定。人类活动强度: 强, 中, 弱。

综合上述分析, 我们选择地形、地质、地下水出露内部条件中 6 个因子, 在气候水文和人类活动强度外部条件中选择 2 个因子, 共 8 个因子参与滑坡侵蚀定量评价(表 1)。

表 1 因子信息量状态

因子	因子状态	N_i	M_i	$\frac{N_i/N}{M_i/M}$	$\lg \frac{N_i/N}{M_i/M}$
相对高差	> 50m	131	177	1.372	0.1374
	25~50 m	43	84	0.949	-0.0227
	< 25m	5	69	0.134	-0.8718
地形	地形坡度				
	> 45°	103	157	1.216	0.0850
	20°~45°	73	107	1.265	0.1020
沟谷密度	< 20°	2	66	0.056	-1.2504
	密	76	93	1.515	0.1804
	中	60	154	0.722	-0.1413
地质	地层结构				
	黄土与基岩	82	103	1.476	0.1691
	黄土	96	227	0.784	-0.1057
地下水出露位置	地震加速度				
	高	75	116	1.199	0.0787
	小	103	214	0.892	-0.0495
气候水文	黄土底部的基岩面上	57	65	1.626	0.2111
	黄土坡体中	48	76	1.171	0.0685
	无地下水出露	73	189	0.716	-0.1450
人类活动	植被盖度				
	小	133	154	1.601	0.2044
	中等	28	115	0.451	-0.3454
人类活动	强度大	116	141	1.525	0.1833
	强度中等	49	107	0.849	-0.0711
	强度小	13	82	0.294	-0.5318

注: $M = 330, N = 178$ 。

2.2 计算并分析各因子状态信息量

铜川市滑坡侵蚀的宽度一般以中型、小型为主, 巨型、大型较少, 鉴于此, 把铜川市的印台区、王益区及部分周边地区 82.5 km² 的面积划分为 500 m × 500

m 的正方形网格共计 330 个单元。在这 330 个单元中,根据本次现场调查和前人资料,共有 178 个滑坡单元。各因子状态的信息量计算结果列于表 1,对该区滑坡侵蚀产生意义较大的指标(正指标)共 10 个:
 ①地下水出露在黄土底部的基岩面上: 0.211 1;
 ②植被盖度小: 0.204 4; ③人类活动强度大: 0.183 3; ④沟谷密度密: 0.180 4; ⑤地层结构黄土与基岩: 0.169 1; ⑥相对高差 > 50 m: 0.137 4; ⑦地形坡度 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$: 0.102 0; ⑧地形坡度 > 45° : 0.085 0; ⑨地震加速度高: 0.078 7; ⑩地下水出露在黄土坡体中: 0.068 5。

计算结果表明,各因子对滑坡侵蚀的贡献程度是不同的。地下水出露在黄土底部的基岩面上影响最大,往后从大到小依次为植被盖度小、人类活动强度大、沟谷密度密、地层结构黄土与基岩、相对高差大于 50 m、地形坡度 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、地形坡度大于 45° 、地震加速度高、地下水出露在黄土坡体中共 8 个因子状态(表 1)。

2.3 计算各单元信息量的综合

利用公式(1)计算各单元信息量的综合,得到 330 个单元的信息量。计算对各单元内有利及不利因子状态都已考虑,因此总和能客观的反映该单元产生滑坡侵蚀的可能性大小。计算是通过计算机来完成的,各单元产生滑坡的信息量计算结果列表从略。

2.4 确定信息临界值并绘图

我们将滑坡侵蚀信息的频数统计列于表 2。以横坐标为信息量,纵坐标为单元频数,作滑坡信息的单元频数曲线(图 1),分析图 1 找出拐点,拐点的横坐标即为临界值。我们确定 -1.0, 0.0, 0.3, 0.5 这 4 个拐点作为临界值。据此将滑坡信息总量 I 分为 5 个等值区: $I \leq -1.0$, $-1.0 < I \leq 0.0$, $0.0 < I \leq 0.3$, $0.3 < I \leq 0.5$, $I \geq 0.5$ 。

将各单元的信息量总和投影于各单元中心,绘制信息量等值线图(图从略),划分滑坡侵蚀的强烈程度。信息量 I 与滑坡侵蚀发生的可能性之间存在着一定相关关系,结合现场调查及室内分析我们将研究区滑坡侵蚀强度划分为 5 个区。① $I \leq -1.0$, 为微弱侵蚀区段,其中滑坡侵蚀没有出现; ② $-1.0 < I \leq 0.0$, 为轻度侵蚀区段,其间有滑坡侵蚀发生,但数量极少; ③ $0.0 < I \leq 0.3$, 中度侵蚀区段,滑坡侵蚀已有发生; ④ $0.3 < I \leq 0.5$, 强烈侵蚀区,滑坡侵蚀数量多、规模大; ⑤ $I \geq 0.5$, 为剧烈侵蚀区,滑坡侵蚀发生的频率高、规模巨大、形成的侵蚀量巨大。据此绘制滑坡侵蚀强度图如图 2。

表 2 信息量与频数

信息量	- 2.0~ - 1.81	- 1.8~ - 1.61	- 1.6~ - 1.41
频数	29	41	1
信息量	- 1.4~ 1.21	- 1.2~ 1.01	- 0.2~ - 0.01
频数	0	2	0
信息量	- 0.8~ - 0.61	- 0.6~ - 0.41	- 0.4~ 0.21
频数	0	3	6
信息量	- 1.0~ - 0.81	0.0~ 0.09	0.1~ 0.19
频数	15	18	45
信息量	0.2~ 0.29	0.3~ 0.39	0.4~ 0.49
频数	38	42	38
信息量	0.5~ 0.59	0.6~ 0.69	0.7~ 0.79
频数	20	15	17

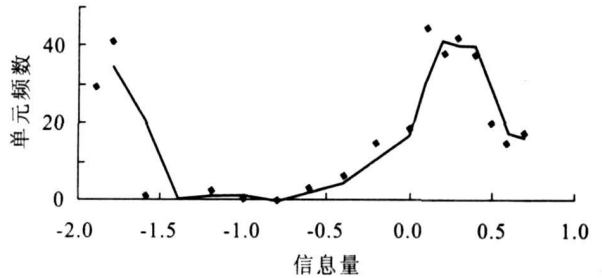


图 1 信息量与频数图

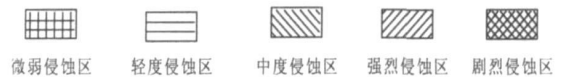
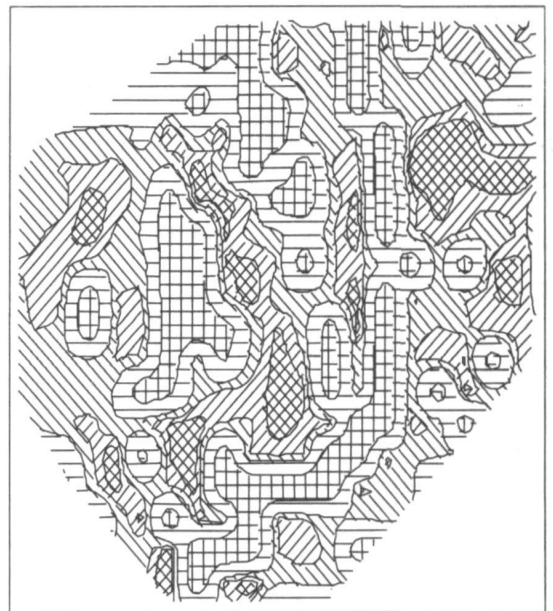


图 2 铜川市滑坡侵蚀强度图

3 铜川市滑坡侵蚀定量评价

铜川市位于我国黄土高原西部的河谷地带。漆水河及其支流王家河等河流经过市区。漆水河及其主要支流两岸的黄土塬边斜坡上建设工业、民用建筑物, 整个城市镶嵌于黄土高原的残塬深沟之中。随着黄土高原的缓慢抬升, 黄土高原受到强烈的侵蚀切割, 黄土塬地貌逐渐广泛发育为黄土梁、峁, 为滑坡侵蚀提供了有力的物质基础。黄土塬边坡斜坡地带是人们居住和工程活动的场地, 经常的人类经济、工程活动已经成为一种强大的营力, 而且具有巨大的破坏和毁灭力量。

铜川市滑坡侵蚀强度分为剧烈侵蚀区、强烈侵蚀区、中度侵蚀区、轻度侵蚀区、微弱侵蚀区等5个侵蚀强度区(图2)。在滑坡侵蚀强度图上, 我们将单元数、各区面积等列于表3。

表3 滑坡侵蚀定量评价基本数据统计

分区	界限 下限	范围	面积/ km ²	单元数	比例/%
I	-2.0	-2.0~-1.01	18.25	73	22.12
II	-1.0	-1.0~-0.01	6.00	24	7.27
III	0.0	-0.0~0.29	25.25	101	30.61
IV	0.3	0.3~0.49	20.00	80	24.24
V	0.5	0.5~0.79	13.00	52	15.76
合计			82.50	330	100.00

由表3, 图2可知, 铜川市滑坡剧烈侵蚀区面积13.00 km², 占总面积的15.76%, 强烈侵蚀区面积20.00 km², 占总面积的24.24%, 中度侵蚀区面积25.25 km², 占总面积的30.61%, 轻度侵蚀区面积6.00 km², 占总面积的7.27%, 微弱侵蚀区面积18.25 km², 占总面积的22.12%。

铜川市滑坡侵蚀中等以上强度区面积58.25 km², 占到了调查区总面积82.5 km²的70.61%, 可见铜川市滑坡侵蚀程度还是非常剧烈的。

我们将铜川市滑坡现场调查结果作实际滑坡侵蚀量等值线图, 比较图2与实际滑坡侵蚀量等值线图我们看到, 信息量法得出的滑坡侵蚀强度图与实际滑坡侵蚀量等值线图有很好的一致性。

由图2实际滑坡侵蚀量等值线图可以看出, 属于强烈侵蚀、剧烈侵蚀的斜坡主要分布于城关—七里铺、小河沟—杨树沟、五里铺—原畔村及瓦窑沟、雷家沟一带支沟与主沟的交汇处, 以及漆水河两侧和侵蚀切割强烈的支沟两侧, 约占整个评价区的40.0%, 33.0 km²。这些地段具有强烈切割形成的高陡斜坡,

也是城市容量有限, 逐步向沟谷发展的扩展部位, 人类的工程、经济活动非常强烈, 人类工程活动使大部分高陡斜坡破坏。属于轻微侵蚀、轻度侵蚀的区域主要位于黄土塬面、梁峁顶部及漆水河及其主要支流河谷底部, 约占整个评价区的29.39%, 24.25 km²。

4 结论

通过铜川市滑坡侵蚀定量评价模型的研究、应用、分析, 说明用数学方法进行滑坡侵蚀定量评价是可行的, 可靠性和可信度也比较高, 这无疑为滑坡侵蚀防治工作提供了方便而有力的手段, 它的推广应用将大大促进滑坡侵蚀由定性描述向定量评价的转化, 使我们逐步的从纯经验判断中摆脱出来, 将大大的提高滑坡侵蚀研究工作和防治工作的水平。

黄土高原地域辽阔, 地质地貌条件复杂, 在不同地区应用时, 信息量统计分析因素的选取及数量可能是不同的, 因子状态的划分也不一致, 但其基础都是周密的现场调查及认真细致的研究工作。本研究只是数学理论在滑坡侵蚀定量评价中的初步应用, 虽已显示了良好的发展前景, 但由于工作区段还比较小, 地区还不够广, 均有待今后在使用中逐步完善与提高。滑坡侵蚀定量评价模型的推广应用, 则不仅可为滑坡侵蚀工作提供现代化的资料管理、积累、统计手段, 还可从宏观上研究滑坡侵蚀的分布规律和特点, 并增强滑坡侵蚀防治工作的主动性。

[参 考 文 献]

- [1] Eckel E B. Landslides and Engineering Practice [R]. Highway Research Board, Special Report 29, 1958.
- [2] 山田刚二, 度正亮, 小桥澄治. 地す¹・É・斜面崩壊の实态² 对策[M]. 日本: 山海堂, 1971.
- [3] Broms B B. Landslides, Foundation Engineering Handbook[M]. Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- [4] 郑书彦. 滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [5] 郑书彦, 李占斌, 李喜安. 宝塔山滑坡侵蚀有限元分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 113—116.
- [6] 郑书彦, 李占斌, 李喜安. 黄土滑坡稳定性及其整治对策研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 25—27.
- [7] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [8] 章根德, 剡公瑞. 岩体高边坡流变学性状有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 1—9.
- [9] 张信宝, 柴宗新. 黄土高原重力侵蚀的地形与岩性组合因子分析[J]. 水土保持通报, 1989, 9(5): 40—44.
- [10] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 科学技术出版社, 1990.