

# 基于土壤侵蚀模型的浅层滑坡预警研究

吕佼佼<sup>1</sup>, 范文<sup>1</sup>, 吕远强<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤西安设计工程有限责任公司岩土所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 利用土壤侵蚀模型进行浅层滑坡的预警研究, 为山区滑坡预警预报工作提供参考。[方法] 选取陕西省紫阳县境内 440 km<sup>2</sup> 区域作为典型研究区, 在已有历史滑坡资料、气象资料和卫星资料的基础上, 基于土壤侵蚀模型(USLE), 并结合地理信息系统(GIS), 确定滑坡临界土壤侵蚀强度, 再根据降雨侵蚀力与降雨量之间的关系, 推求滑坡点的预警降雨量。[结果] 土壤侵蚀强度与滑坡的发生存在较好的相关性, 研究区域滑坡预警的临界土壤侵蚀强度按等级分别为 69.6, 136.7, 179.4 t/km<sup>2</sup>。[结论] 相比以往仅仅统计滑坡与降雨之间关系的传统方法, 基于土壤侵蚀模型的方法考虑更全面, 也易于实现。

**关键词:** 浅层滑坡; 土壤侵蚀; 秦巴山区; 滑坡预警

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)03-0227-04

**中图分类号:** P642.22, P208

**文献参数:** 吕佼佼, 范文, 吕远强. 基于土壤侵蚀模型的浅层滑坡预警研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 227-230. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.038; Lu Jiaojiao, Fan Wen, Lu Yuanqiang. Research on early warning of shallow landslide based on soil erosion model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 227-230. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.038

## Research on Early Warning of Shallow Landslide Based on Soil Erosion Model

LÜ Jiaojiao<sup>1</sup>, FAN Wen<sup>1</sup>, LÜ Yuanqiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
2. Geotechnical Institute of China Coal Xi'an Design and Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] Using the soil erosion model in early warning of shallow landslide, to provide a new reference for landslide early warning work in mountain area. [Methods] A typical area covering 440 km<sup>2</sup> in Ziyang County of Shaanxi Province was taken as research area, where the historical landslide data, meteorological data and satellite data were collected. Universal soil loss equation(USLE) combined with GIS was used to determinate the critical soil erosion intensity. Upon which, the early warning rainfall amount was derived based on the relationship between rainfall erosivity and rainfall amount. [Results] A significant correlation between soil erosion and the landslide was found. The critical soil erosion in the research area ranked 69.6, 136.7, 179.4 t/km<sup>2</sup> respectively. [Conclusion] Compared to the traditional way that only the statistical relationship between landslide and rainfall is considered, the method which based on the USLE is easily applied and has a high practical value.

**Keywords:** shallow landslides; soil erosion; Qinba Mountains; landslide early warning

滑坡是最常见的地质灾害之一,它是指在多种内外因素耦合作用下导致坡体物质失去稳定而发生的变形破坏。秦巴山区作为中国南北的地理分界,同时也是地质灾害的高发地带。据不完全统计,从1980—2011年期间,陕西省共发生滑坡等地质灾害近万起,死亡超过1.2万余人,且多数发生在陕南的秦巴山区<sup>[1]</sup>。秦巴山区发生滑坡的最主要诱发因素

是降雨<sup>[2]</sup>,以陕西省紫阳县地质灾害详细调查为例,2012年全县共调查878处地质灾害,其中有90%为浅层滑坡,且其中88%由降雨诱发<sup>[3]</sup>。虽然单个浅层滑坡危害不是很大,但在强降雨条件下,大规模的群发性浅层滑坡却会给当地居民生命财产造成巨大的损失。降雨量与滑坡发生的关系研究成为有效预测滑坡的关键,国内外诸多学者进行了相关研究工

收稿日期:2016-10-11

修回日期:2016-11-13

资助项目:国家自然科学基金项目“降雨诱发软弱变质岩斜坡浅表层变形破坏机理研究”(41272282);中国地质调查局地质调查工作项目“秦巴山区浅表层滑坡变形破坏机理研究”(1212011220135)

第一作者:吕佼佼(1989—),男(汉族),山西省河曲县人,博士研究生,研究方向为地质灾害研究与防治。E-mail:411535234@qq.com。

作,研究方法归纳起来可以分为两大类:一类是统计分析方法,Glade 等<sup>[4]</sup>提出了包括日降雨量模型、前期日降雨量模型和前期土体中含水状态模型在内的 3 个模型,李媛等<sup>[5]</sup>、谢剑明等<sup>[6]</sup>、李铁峰等<sup>[7]</sup>对国内不同地区的降雨诱发滑坡进行了临界值研究,分别从滑坡与前期降雨量的逻辑关系、前期有效降雨量的关系入手,得到了有效降雨量模型,但这类统计模型需要较多的资料和数据,且并没有考虑地质环境条件等因素。二是采用机理分析方法,降雨滑坡形成机理的本质在于雨水入渗斜坡后降低了土体的黏聚力和摩擦角,破坏了斜坡的力学平衡体系,导致斜坡失稳变形。如何玉琼等<sup>[8-9]</sup>结合 GIS 研究了降雨通过渗透作用导致斜坡失稳的过程,建立了降雨阈值模型,降雨模型试验也被用于降雨与滑坡的关系研究<sup>[10-11]</sup>。但机理分析方法需要对滑坡点进行大量的数据观测或试验,很难推广到区域的预报预警。

近年来研究结果表明,地质灾害是土壤侵蚀过程的继承和伴生,在一定的区域尺度上,可以用土壤侵蚀的强度近似表示地质灾害的发育程度<sup>[12-13]</sup>。周琪龙<sup>[14]</sup>研究认为在沟谷地区土壤侵蚀可随着地表和地下径流的作用可形成浅层滑坡。国外学者针对 Penang Island 等区域的研究也证明了土壤侵蚀强度与滑坡的发生具有较好的相关性<sup>[15]</sup>。

本文拟以陕西省紫阳县为研究区域,采用土壤侵蚀模型(USLE),结合研究区实际情况,在 ArcGIS 的支持下,得到研究区的土壤侵蚀强度图,通过对卫星资料、地理信息资料以及降雨资料等进行分析,得出与土壤侵蚀强度对应的滑坡发生临界雨量,以便为秦巴山区滑坡防治工作提供参考。

## 1 研究区概况

研究区域位于陕西省紫阳县南部,地理坐标东经 108°15′—108°30′,北纬 32°20′—32°30′,地处川陕渝交界,面积 440 km<sup>2</sup>,任何流向由南向北,区内最高点海拔 1 707 m,最低点海拔 316 m,相对高差 1 391 m。沟谷深切,沟谷密度较大,由于地质条件复杂、降雨充沛等影响,滑坡频率高、分布广,是陕西省最严重地区之一,数字化高程 316~1 707 m。地貌以中山为主,总的地势南高北低。海拔高度与坡度分布详见表 1。

研究区属北亚热带湿润季风气候区,年平均气温 15.1 ℃,年降水总量 1 066 mm,最多年降水量 1 682.8 mm,雨季主要分布在 6—9 月,其次年内降水分布极不平均,其中夏、秋两季月平均降雨量占全年降雨量 90%。主要出露震旦系、奥陶系、志留系碳

硅质板岩,粉砂岩,薄层泥灰岩,沟谷斜坡凹槽部位主要为坡积、坡残积黏性土夹大量的碎石、岩屑。

表 1 研究区域坡度和海拔统计

坡度/(°)	面积比例/%	海拔/m	面积比例/%
0~5	8.44	316~500	29.29
5~15	17.45	500~800	17.67
15~25	16.86	800~1 000	11.68
25~35	17.19	1 000~1 200	11.72
35~50	25.05	1 200~1 500	17.63
50~60	15.01	1 500~1 707	12.01

## 2 研究方法

### 2.1 资料来源及预处理

滑坡灾害资料来源于 1:50 000 紫阳县地质灾害详细调查以及当地国土部门,数字化高程模型(DEM)精度为 10 m×10 m,植被覆盖信息来源 Spot5 影像(成像时间 2010 年 10 月)解译所得,土地利用信息来源于紫阳县国土部门。数据在使用前必须进行处理,统一到相同的分辨率和参考坐标系,以保证数据空间分析的可操作性。本文以 WGS84 为地理坐标,UTM 投影坐标为基准坐标系。

### 2.2 USLE 土壤侵蚀强度计算

USLE 为通用土壤流失方程,是考虑了包括降雨因子、地形因子、植被盖度因子、成土母质因子、土地利用类型及侵蚀防治措施因子等的综合函数,USLE 有大量实地观测数据统计分析验证,已是应用最广泛的土地侵蚀预测模型。USLE 模型计算式如下:

$$E_q = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot V \cdot P \quad (1)$$

式中: $E_q$ ——年平均土壤侵蚀强度(t/hm<sup>2</sup>); $R$ ——降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]; $K$ ——土壤可蚀性因子[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]; $L$ ——坡长因子; $S$ ——坡度因子; $V$ 和 $P$ ——植被覆盖因子和土地利用类型因子。

降雨侵蚀力因子 $R$ 是反映降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,由于研究区缺乏详尽的降雨资料,本文采用简化的 Wischmeier 算式,由于该公式既考虑年降水量和月降水量,公式形式又相对简单,且已经被成功应用于很多不同区域。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.51(p_i^2/p) - 0.8188]} \quad (2)$$

式中: $p_i$ ——月降水量(mm); $p$ ——年降水量(mm)。根据公式(2)计算各年的 $R$ 值,再取其平均值。

土壤可蚀性因子 $K$ 是土壤对雨滴和地表径流剥

蚀和搬运的敏感程度,本文  $K$  值的计算方法是采用

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ 0.0256 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left( 1.0 - \frac{0.75S_n}{S_n + \exp(22.9S_n - 5.51)} \right) \quad (3)$$

式中:  $S_a$ ——砂粒(0.05~2 mm)的重量百分数;  $S_i$ ——粉粒(0.002~0.05 mm)的重量百分数;  $C_i$ ——黏粒(<0.002 mm)的重量百分数,  $S_n = 1 - S_a/100$ ;  $C$ ——百分数表示的土壤有机碳含量。通过中国土种数据库,查找并提取表层土壤的砂粒等的含量,带入公式(3)计算  $K$  值。

坡长坡度因子  $LS$  是反映地貌特征对土壤侵蚀影响的因子,可由 DEM 数据,通过 ArcGIS 9.3 软件进行地形特征分析和计算。坡长因子采用 McCool 坡长因子算法:

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (4)$$

$$m = \beta/(1+\beta)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.0896)/[3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56]$$

式中:  $L$ ——坡长因子;  $\lambda$ ——由 DEM 提取的坡长(m);  $m$ ——坡度坡长指数;  $\theta$ ——DEM 提取的坡度( $^\circ$ );  $\beta$ ——坡度修正值( $^\circ$ )。

USLE 方程多适用于缓坡,而研究区域坡度  $\geq 15^\circ$  的区域占 82%,因此坡度因子  $S$  的计算缓坡( $0^\circ < \theta < 10^\circ$ )采用 McCool 坡度公式,陡坡( $\theta \geq 10^\circ$ )采用刘宝元的坡度公式<sup>[17]</sup>。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S$ ——坡度因子;  $\theta$ ——坡度( $^\circ$ )。

植被覆盖因子  $V$  是植被的覆盖程度对土壤侵蚀的抑制程度,其取值范围为 0~1。本文选用蔡崇法等<sup>[16]</sup>建立的回归方程,其公式如下:

$$V = \begin{cases} 1 & (c < 0) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & (0 < c \leq 78.3\%) \\ 0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $c$ ——植被覆盖度(%)。

土地利用类型因子  $P$  是基于经验和物理过程的混合模型,其取值在 0~1,取值越小,表示土壤侵蚀越不明显。在土壤侵蚀预报中,国内尚没有普遍性的水土保持措施因子赋值标准。本文采用结合研究区的实地考察给不同的土地利用类型赋值的方法确认。赋值结果为:居民点和水域为 0,旱地 0.4,林地和灌木地为 0.5,草地 0.3。

## 2.3 滑坡预警研究

2.3.1 滑坡临界土壤侵蚀强度的计算 滑坡的发生

Williams 等发展的 EPIC 模型<sup>[16]</sup>,计算公式如下:

$$R_c = \alpha^i R_i \quad (7)$$

除了跟当天降雨量有关外,还与前期降雨量密不可分,因此用于滑坡灾害分析的降雨量数据一般是取自滑坡发生当日以及前几日的逐日降雨记录,公式(7)可用于计算有效降雨量<sup>[18]</sup>:

$$R_c = \alpha^i R_i \quad (7)$$

式中:  $R_c$ ——单日有效降雨量(mm);  $R_i$ ——滑坡当天倒数第  $i$  ( $i=0,1,\dots$ ) 天的实际降雨量(mm);  $\alpha$ ——降雨系数,取 0.8;姬怡微<sup>[19]</sup>根据相关性分析得出了紫阳县浅层滑坡发生与前 10 d 以内的有效降雨量最相关,因此模型  $i$  值最大选定为 9。

利用滑坡发生前 10 d 以内的逐日降雨量求得相应的有效降雨量,即可计算该时段内的降雨侵蚀力,本文选用 CREAMS 模型计算:

$$M = \sum_{c=0}^9 1.03R_c^{1.51} \quad (8)$$

式中:  $M$ ——10 d 内降雨侵蚀力之和;  $R_c$ ——单日有效降雨量(mm)。将  $M$  替代(1)式中  $R$  即可求出研究区内每个滑坡的临界土壤侵蚀强度。

2.3.2 滑坡临界降雨量的计算 根据前文求得的滑坡临界土壤侵蚀强度,再利用(1)式反求出降雨侵蚀力,最后带入(8)式即可求得滑坡发生当天降雨量。

## 3 结果与分析

### 3.1 滑坡密度与土壤侵蚀强度分析

利用 USLE 模型计算研究区域年平均土壤侵蚀强度,并参照水利部颁布的土壤侵蚀分类分级标准<sup>[20]</sup>,获得研究区域年平均土壤侵蚀等级分布图,本研究收集了近 16 a 在研究区发生的 117 次浅层滑坡事件,并将滑坡发生的位置叠加在土壤侵蚀强度上。

利用频数比的方法来表现土壤侵蚀与滑坡的关系。如表 2 所示,117 处不同的滑坡发生地,滑坡点大部分分布在土壤侵蚀等级较高区域上。从频次比看,剧烈侵蚀区域的频次比是 5.34,大于中度侵蚀和强度侵蚀区域的频率比,表明极强度侵蚀区域发生滑坡的可能性大于中度侵蚀和强度侵蚀区域。相关性较好,可以用来预测浅层滑坡。

### 3.2 区域滑坡临界土壤侵蚀强度的确定

根据国土资源部和中国气象局规定,地质灾害气象风险预报等级由强到弱分为警报,预警与注意 3 个等级,按 USLE 模型算法,计算 78 个滑坡个例的土壤侵蚀模数,取其中最小值为 69.6 t/km<sup>2</sup> 为该区域

的滑坡气象风险预警等级 3 级的临界土壤侵蚀强度。分别选取发生滑坡 30%, 50% 的概率为 2 级、1 级的预警等级, 同样计算出研究区域滑坡预警等级的临界土壤侵蚀强度分别为 136.7, 179.4 t/km<sup>2</sup>。

表 2 陕西省紫阳县土壤侵蚀强度与滑坡发生数频次比

侵蚀等级	像元数	像元数百分数/%	滑坡点	占滑坡总量/%	频次比
微度	1 511 414	26.50	2	1.71	0.06
轻度	645 723	11.32	12	10.26	0.91
中度	1 405 954	24.65	14	11.97	0.49
强度	1 249 863	21.91	27	23.08	1.05
极强度	580 579	10.18	28	23.93	2.35
剧烈	310 441	5.44	34	29.06	5.34
合计	5 703 944	100	117	100.00	—

### 3.3 实例验证

从剩余的滑坡点中选取 5 个滑坡点进行临界雨量进行验证(表 3), 发现 5 个样本的实际有效雨水中, 全部超过了临界雨量, 其中 2 个为 3 级, 2 个为 2 级, 1 个为 1 级。结果表明各滑坡点临界雨量均有较好的预警效果。

表 3 陕西省紫阳县滑坡临界降雨量验证

发生时间	有效雨量/ mm	不同预警等级临界降雨量/mm		
		3 级	2 级	1 级
20110623	20.7	16.7	21.8	30.4
20110914	37.2	21.3	36.4	40.6
20110913	26.5	22.4	30.7	41.2
20110917	40.6	28.1	33.4	38.7
20000713	91.1	30.4	42.5	80.7

## 4 讨论与结论

紫阳县地处陕西省秦巴山区, 其特殊的自然地理位置和地质构造背景决定了区内第四系主要为残坡积黏性土夹大量的碎石、岩屑, 在强降雨作用下易发生浅层滑坡, 现有预警方法多为经验方法和针对均一土质的入渗计算与稳定性计算, 而本方法从降雨—土壤侵蚀—滑坡的思路入手基于 USLE 土壤侵蚀模型推算滑坡预警点的临界雨量, 将降雨、植被及土地利用状况等因素纳入计算, 得出了较为合理的预警结果。但本文研究尚有如下问题:

研究采用的侵蚀模型和各个侵蚀因子的算法大多数是利用国内外现有方法和成果来确定的。考虑到侵蚀因子  $R$ ,  $K$  的地区适用性,  $P$  因子赋值的复杂性, 在以后的工作中, 要结合研究区更详细的资料数据, 改进各个侵蚀因子的算法和模型算法, 从而提高研究结果的准确性、可靠性。

现实中地理信息数据更新快, 而已有的 DEM 数据与土地利用等数据很难及时更新; 滑坡的发生除降雨诱发外, 与人类活动程度相关性极大, 本文研究区域东南部山高坡陡、侵蚀强烈, 但人烟稀少, 滑坡数也相对较少, 这些需要在今后的研究中加以改进。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 熊炜. 秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [2] 赵世发, 王俊, 杜继稳, 等. 秦巴山区地质灾害成因及预报预警[J]. 气象科技, 2010, 38(2): 263-269.
- [3] 熊炜, 范文. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 228-233.
- [4] Glade T, Crozier M, Smith P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(6-8): 1059-1079.
- [5] 李媛. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- [6] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 101-105.
- [7] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 33-35.
- [8] 何玉琼, 徐则民, 王志奇, 等. 滑坡降雨阈值模型的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(4): 1112-1118.
- [9] 何玉琼, 徐则民, 王志奇, 等. 基于 GIS 的耦合模型在斜坡稳定分析中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 32(2): 100-104.
- [10] 雍睿, 胡新丽, 唐辉明, 等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 3018-3027.
- [11] 左自波. 降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [12] 何东升. 延安地区土壤侵蚀与地质灾害相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 梁益同, 柳晶辉, 李兰, 等. 基于土壤侵蚀模型的滑坡临界雨量估算探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 464.
- [14] 周琪龙. 黄土沟壑区土壤侵蚀与浅层滑坡相关关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [15] Pradhan B, Chaudhari A, Adinarayana J, et al. Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: A case study at Penang Island, Malaysia[J]. Environmental monitoring and assessment, 2012, 184(2): 715.

黄土中节理发育,斜坡临空面产生卸荷裂缝,这都成为地表水的优势渗流通道,使得更多的水下渗至土体的深部,在水的软化和润滑作用下,土体抗剪强度降低,斜坡稳定性变小,从而诱发黄土滑坡灾害。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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):530-541.
- [2] 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.
- [3] 刘海松,倪万魁,杨泓全,等.黄土路基降雨入渗现场试验[J].地球科学与环境学报,2008,30(1):60-63.
- [4] 李萍,李同录,付昱凯,等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(10):3551-3560.
- [5] 王德潜.洛川黄土潜水补给特征[J].水文地质工程地质,1982(5):1-8.
- [6] 阎太白,王德潜.洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J].地质论评,1983,29(5):418-427.
- [7] 雷祥义.陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J].工程地质学报,1995,3(1):56-64.
- [8] 李同录,龙建辉,李新生.黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J].工程地质学报,2007,15(4):500-505.
- [9] Gao G. Formation and development of the structure of collapsing loess in China [J]. Engineering Geology, 1988,25(2/3/4):235-245.
- [10] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.
- [11] 孙其诚,王光谦.颗粒流动力学及其离散模型评述[J].力学进展,2008,38(1):87-100.
- [12] 王光谦,倪晋仁.颗粒流研究评述[J].力学与实践,1992,14(1):7-19.
- [13] 周健,池永.颗粒流方法及 PFC2D 程序[J].岩土力学,2000,21(3):271-274.
- [14] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [15] 周剑,张路青,戴福初,等.基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,31(S1):2650-2659.
- [16] Gunn R, Kinzer G D. The terminal fall velocity for water droplets in stagnant air[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1949,6(4):243-248.
- [17] 彭建兵,李庆春,陈志新,等.黄土洞穴灾害[M].北京:科学出版社,2009.
- [18] 吴益平,张秋霞,唐辉明,等.基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J].地球科学:中国地质大学学报,2014,39(7):889-895.
- [19] 姬怡微.降雨诱发地质灾害预警预报研究[D].西安:长安大学,2013.
- [20] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007[S].北京:中国水力水电出版社,2008.

(上接第 230 页)

- [16] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [17] 黄金良,洪华生,张珞平,等.基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J].水土保持学报,2004,18(5):75-79.