

苏北花岗片麻岩地区 USLE 模型的试验研究^{*}

张文海¹, 张行南¹, 高之栋²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 江苏省赣榆县 夹谷山水土保持试验站, 江苏 赣榆 222100)

摘 要:针对苏北花岗片麻岩地区水土流失的自然状况,建立了 6 种径流小区进行试验研究,通过对各小区 364 次降雨径流与土壤流失量的相关分析,得出适合本地区降雨侵蚀力因子 R 值的简便算式,确定了 USLE 模型中其它诸因子的取值。运用 USLE 模型计算各小区的土壤侵蚀量与实测值进行偏差分析,偏差为 $-3.5\% \sim 9.9\%$,可信度达 90% 以上。在实际应用检验中,梯田偏差 5.64%,坡耕地偏差 12.36%,可信度达 87% 以上。由此说明,USLE 模型及其诸因子的取值方法在该地区的土壤侵蚀定量分析中具有很好的适用性。该项试验研究成果为该地区的水土流失预报与监测、水土保持规划及小流域综合治理提供了科学的依据。

关键词:江苏北部;花岗片麻岩区;土壤侵蚀;USLE 模型

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)04-0063-05

Experimental Study on USLE Model in Granite Gneiss Region of Northern Jiangsu Province

ZHANG Wen-hai¹, ZHANG Xing-nan¹, GAO Zhi-dong²

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Mount Jiagu Test Station of Soil and Water Conservation in Ganyu County, Ganyu, Jiangsu 222100, China)

Abstract: Based on the natural conditions of soil and water loss in the granite gneiss region of northern Jiangsu province, 6 types of runoff plots were set up and experimental study was carried out. By correlation analysis of runoff and soil loss from 364 events of rainfall, a simplified and convenient mathematical formula that is suitable to calculate rainfall erosion factor R value for the local region was established and other factors of USLE model were also determined. Error analysis of the soil loss of various plots calculated by USLE model and the actual measured value showed that the percentile error ranged from $-3.5\% \sim 9.9\%$ and the confidence level was more than 90%. In addition, practical application verification showed that the percentile error was 5.64% for the terrace field and 12.36% for the sloping field, and thus the confidence level was above 87%. This research result has provided a scientific basis for forecasting and monitoring the water and soil loss, for the comprehensive treatment of small watershed and for the soil and water conservation planning for the local region.

Key words: northern Jiangsu province; granite gneiss region; soil erosion; USLE model

土壤侵蚀及其导致的水土流失,已成为当今世界最为严重的环境问题之一。大量的水土流失造成土地退化、耕地减少、泥沙淤积、灾害加剧、环境恶化。由于土壤侵蚀的严重危害,国内外对土壤侵蚀的定量研究都非常重视^[1-7]。20 世纪 60 年代,美国水土保持专家 Wischmeier 等提出的通用土壤流失方程 (USLE)^[1],是目前土壤侵蚀量估算中较为广泛应用

的方法。该模型是在对大量小区观测数据统计分析后归纳出来的经验性公式,并对公式中各因子的取值做了详细的规定。方程问世后,成功的应用于亚、非、欧、美洲的一些国家和地区。土壤流失方程在世界各地应用过程中,人们渐渐发现,直接采用美国各因子的取值方法并不适合各地区的实际情况。各因子的取值随着各地气候、土壤条件、土地利用方式等的不同

* 收稿日期:2009-03-04

基金项目:江苏省水利厅项目“苏北片麻岩水土流失区土壤流失方程中的诸因子取值的实验研究”

作者简介:张文海(1967-),男,江苏赣榆县人,在职博士,高级工程师,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:shuili001@yahoo.com.cn

同而有差异。因此,促使水土保持工作者们对通用方程中各因子取值进行了广泛的研究^[8-15]。

为了摸清苏北花岗片麻岩地区水土流失规律及土壤侵蚀量,作者对苏北花岗片麻岩地区的土壤侵蚀情况进行了试验研究。该研究以 USLE 模型为基础,根据本地区气候特征、土壤条件和土地利用方式等,建立了 6 种不同小区进行试验。通过对 9 a 实测降雨、径流与土壤流失量的相关分析,提出了适合本地区气候特征和土壤条件的各项因子取值。运用 USLE 模型计算土壤侵蚀量,与实测土壤流失量进行偏差分析,并在实际应用中检验,结果显示,计算值与实测值相对偏差均小于 13%。说明 USLE 模型在苏北花岗片麻岩地区具有较好的适用性,可以用于本地区水土流失的监测和预报。

1 试验设置与方法

1.1 试验小区概况

试验小区选择在苏北地区的赣榆县夹谷山下水土试验站内,该地区是山东沂蒙山余脉的向南延伸,分布着大量的花岗片麻岩。该类岩石极易风化,形成的土壤质地疏松、颗粒较粗、结构性极差、有机质含量低,极易产生水土流失。该区属北温带湿润大陆海洋过渡区,降雨较充沛,年平均降雨量 875.4 mm,但不均匀,降雨多集中在 6 - 9 月,且多暴雨,降雨强度大,春、秋、冬三季雨水偏少。

1.2 试验小区设计

试验小区平行布设在坡度为 8 的同一坡面上,坡向为东西向,共设 6 个小区。为防止客水进入,小区四周设有楔形保护墙,下部设有集流槽、沉砂池、集水池,并互相连通。在集流槽出口,集水池入口分别装有 1/2 和 1/5 的三角堰,以分去超出的径流量。集水池一端设有排水管,便于雨后排水。小区地形特征与水土保持措施见表 1。

表 1 小区水土保持措施

小区名称	水土保持措施	
	耕作方式	植物措施
乔木小区	原坡栽植	火炬树、楸树混植
经济林小区	无埂梯田	山楂、花生、甘薯
牧草小区	原坡栽植	画眉草
顺坡小区	原状坡面	花生、甘薯轮作
标准小区	原状坡面	休闲地
梯田小区	石埂梯田	花生、甘薯轮作

注:各小区地面坡度均为 8°,坡宽均为 5 m,坡长 20 m,集水面积为 100 m²。

1.3 试验方法

该项试验采用体积法测定每次降雨的径流总

量,采集每次降雨径流中的水样,利用过滤烘干法获得泥沙流失量;用自记雨量计观测记录降雨过程、降雨量、强度;对各小区植被生长情况、覆盖度等进行日常定时、定位观测;对小区的土壤进行理化分析,最终确定土壤流失方程中诸因子取值。

2 USLE 模型中各因子的分析与研究

通用土壤流失方程 (USLE)^[1] 是美国农业部 (USDA) 水保局建立的以大量径流小区试验观测数据为基础的经验性方程,其表达式如式 (1)。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A ——年土壤流失量; R ——降雨侵蚀力因子; K ——土壤可蚀性因子; LS ——坡度坡长因子; C ——植被覆盖因子; P ——水土保持措施因子。

通用土壤流失方程 (USLE) 20 世纪 70 年代引入我国,各地水土保持学者对方程中诸因子的取值方法进行了深入研究^[5,8-15],得出了适合本地区的 R 、 K 、 LS 、 C 、 P 取值,进而对土壤侵蚀量进行定量分析。

2.1 降雨侵蚀力 R 值的确定

降雨侵蚀力 (R) 是降雨引起土壤侵蚀潜在能力的度量。是影响土壤侵蚀的主要因子,也是学者们研究的重点。 R 值的计算是基于次降雨资料,综合考虑降雨动能 (E) 和降雨强度 (I),根据降雨过程资料数据计算得出的。目前国内外在研究确定 R 的最佳计算组合时^[8-15],主要通过比较各种降雨参数与土壤流失量的相关系数大小,确定相关系数最大的为降雨侵蚀力 R 的最佳计算组合。 R 值的基本组合结构形式是降雨动能 E 与降雨强度 I 的乘积 (EI)。各地降雨特征和地理位置等因素不同, R 因子的取值亦不同。西北黄土地区的最佳 R 组合为 $R = EI_{10}$ ^[9],闽南地区为 $R = EI_{60}$ ^[10],东北黑土地地区为 $R = E_{60} I_{30}$ ^[11]。其中: R 为降雨侵蚀力; E 为侵蚀性降雨总动能; E_{60} 为 60 min 侵蚀性降雨动能; I_{10} 、 I_{30} 、 I_{60} 分别为 10、30、60 min 最大降雨强度。

2.1.1 降雨动能的计算 根据本区降雨特征,降雨动能采用威斯奇迈尔 (Wischmeier, W. H) 的计算公式计算。即

$$E = 210.2 + 89 \lg I \quad (2)$$

式中: E ——次降雨中某时段降雨产生的动能 (J/m^2); I ——某时段降雨强度 (cm/h)。

2.1.2 R 最佳计算组合的确定 本地区降雨侵蚀力 R 的确定是以标准小区 9 a 的实测资料为依据,取 64 次降雨径流资料为分析样本,计算各次降雨动能。筛选三个时段的降雨强度 I_{10} 、 I_{30} 、 I_{60} 与降雨总动能 E 、三个时段的降雨动能 E_{10} 、 E_{30} 、 E_{60} 组成 12 个组合,分别与实测土壤流失量进行相关分析,并模

拟直线和曲线相关两种形式,进行微机处理,结果见表 2。

表 2 土壤流失量与 EI_t , $E_t I_t$, E_t, I_t 相关系数

组合	$E_{60} I_{10}$	$E_{60} I_{30}$	$E_{60} I_{60}$	E_{10}	E_{30}	E_{60}	I_{10}	I_{30}	I_{60}
直线相关	0.445	0.468	0.505	0.442	0.529	0.546	0.440	0.537	0.555
曲线相关	0.507	0.517	0.525	0.485	0.591	0.585	0.483	0.619	0.548

组合	$E I_{10}$	$E I_{30}$	$E I_{60}$	$E_{10} I_{10}$	$E_{10} I_{30}$	$E_{10} I_{60}$	$E_{30} I_{10}$	$E_{30} I_{30}$	$E_{30} I_{60}$
直线相关	0.541	0.700	0.677	0.405	0.448	0.487	0.450	0.460	0.500
曲线相关	0.693	0.809	0.675	0.490	0.554	0.575	0.604	0.671	0.628

分析表 2 得出,在各种组合中曲线相关系数均大于直线相关系数,且 $E I_{30}$ 组合曲线相关系数最大为 0.809,达到显著相关 [$t_{0.01}(62) = 0.325$]。在这种情况下,选择降雨侵蚀力 R 值的计算组合时,还应考虑单因子最大时段雨强与土壤流失量的相关程度。在选定的 I_{10} 、 I_{30} 、 I_{60} 三个时段雨强中,以 I_{30} 为最大(0.619),达到显著相关。 R 值与土壤流失量呈幂函数(曲线)相关,且曲线相关系数比直线相关系数大 0.109。故本地区降雨侵蚀力 R 的最佳计算组合如式(3)。

$$R = EI_{30} \tag{3}$$

式中: R ——降雨侵蚀力($J \cdot cm / m^2 \cdot h$); E ——侵蚀性降雨总动能(J / m^2); I_{30} ——一次降雨中 30 min 最大降雨强度(cm / h)。

2.1.3 确定 R 值的简便算法 R 值的计算要求有完整的自记降雨过程线,但在摘取各降雨时段雨强

时非常繁琐费时,这些工作对于没有自记雨量计设备的站点来说就无法计算 R 值,因此,通过回归统计分析寻找 R 值的简便算法就成为必然。在回归统计中,以造成土壤流失的各次降雨量为自变量(X),以 $E I_{30}$ 所得的 R 值为因变量(Y),通过计算比较,采用 $Y = aX^b$ 曲线模拟它们之间的关系。求得回归方程如式(4)。

$$R = 0.2027 H^{1.4216} \tag{4}$$

式中: R ——降雨侵蚀力($J \cdot cm / m^2 \cdot h$); H ——次降雨量(mm)。

式(4)的相关系数 $r = 0.962$ [$t_{0.01}(62) = 0.325$], 回归相关系数达到极显著水平,从统计意义上讲,该式可作为花岗片麻岩地区降雨侵蚀力 R 值的简便算式。

为进一步检验式(4)的可行性,利用 9 a 的实测 R 值与采用(4)式计算的 R 值进行对比检验(见表 3)。

表 3 实测 R 值与计算 R 值对照表 ($J \cdot cm / (m^2 \cdot h)$)

年度	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
降雨量/mm	199.0	702.7	164.1	325.1	662.3	481.8	558.7	441.5	441.2
计算 R 值	166.8	886.1	169.2	294.1	476.7	418.7	557.3	528.7	622.6
实测 R 值	113.3*	948.0	130.5*	291.5	368.5*	498.9	637.3	451.5	622.2
相对偏差/%	47.2	- 6.5	29.6	0.8	23.4	- 16.1	- 12.5	17.1	0.1

*表示自记雨量计出现滑水,降雨强度不准确

检验表明:除自记雨量计出现滑水现象的年度外,其余 6 a 的 R 值相对偏差均在 18 % 以下,1992 年、1997 年两年几乎无偏差。因而进一步确定式(4)可以作为苏北花岗北片麻岩地区 R 值的简便算式。根据表 3 绘出各年降雨量与降雨侵蚀力的关系图,见图 1。从图 1 中可以看出,年降雨量与降雨侵蚀力之间存在显著的相关关系,降雨量与计算 R 值的相关系数为 0.858,与实测 R 值的相关系数为 0.816。

2.2 土壤可蚀性因子 K 值的确定

K 为土壤可蚀性因子,无量纲。 K 值的确定一般有实测法、诺模图法和经验公式法 3 种方法。

(1) 实测法。实测法分标准小区和非标准小区,标准小区的 K 值可直接用该小区的土壤流失量除以相应的 R 值,即可求得该地区土壤的 K 值,非标

准小区用该小区土壤流失量除以相应的 R 及 LS 值,即得该小区土壤的 K 值。

(2) 诺模图法。根据土壤颗粒组成,有机质含量,土壤结构和渗透性查表计算不同土壤的 K 值。查表顺序是:淤泥+细沙 砂子 土壤有机质 土壤结构 土壤渗透性 K 。

(3) 经验公式法。根据研究资料 K 值也可用下式(5)计算:

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) (N_1 \times N_2)^{1.14} + 3.25 (J - 2) + 2.5 (G - 3)}{100} \tag{5}$$

式中: K ——土壤可蚀性因子; OM ——有机质含量的百分数; N_1 ——粉粒+细沙粒含量的百分数(0.002~0.1 mm); N_2 ——砂粒含量的百分数(0.1

~ 2.0 mm) ; J ——土壤结构 ; G ——渗透速度。该小区的 K 值 3 种方法计算结果见表 4。

表 4 三种方法计算的土壤 K 值表

土壤名称	OM/ %	N ₁ / %	N ₂ / %	J	G	实测法	诺模图法	经验公式法
多砾质砂壤土	0.52	45.32	85.69	4	3	0.32	0.37	0.36
多砾质轻壤土	0.49	43.91	83.49	4	3	0.31	0.39	0.34

由表 4 可以看出,3 种方法的结果近似,只有诺模图法和公式法的结果偏大,偏差 13 % ~ 25 %,在无土壤实测资料情况下,采用诺模图法和经验公式法所得的结果减少 13 % ~ 25 %即可采用。

2.3 坡长与坡度因子 LS 值的确定

LS 因子也称地形因子, L 为坡长, S 为坡度。在实际工作中可把两者结合起来作为一个复合因子 LS 进行综合计算。它是在其它条件相同的情况下,特定坡面的土壤流失量与标准径流小区土壤流失量的比率。通过试验小区的坡长、坡度与土壤流失量的统计分析,则本地区的 LS 因子的计算公式采用:

$$LS = (\frac{L}{22})^{0.3} (\frac{S}{5.16})^{1.3} \tag{6}$$

式中: L ——坡长(m) ; S ——坡度(°)。

则将该小区的 L 、 S 值代入公式得 $LS = 1.72$,此值与查曲线图所得的值(1.76)近似,说明该公式亦适用于本地区。

2.4 植被覆盖因子 C 值的确定

植被覆盖因子 C 亦称生物学因子,其反映植物覆盖和作物栽培措施对防止土壤侵蚀的综合效果。 C 值随作物种类和耕作制度而变化。

2.4.1 农作物 C 值的计算 因子 C 是在特定条件下,耕种作物的土地与连续休闲地之间土壤流失量的比率。 C 值的计算公式如式(7)。

$$C_n = A / A \tag{7}$$

式中: C_n ——作物各时期的 C 值; A ——有植被生长小区的土壤流失量($t/hm^2 \cdot a$) ; A ——休闲地小区的土壤流失量($t/hm^2 \cdot a$)。

$$C = C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_3 R_3 + C_4 R_4 \tag{8}$$

式(8)中: C_1, C_2, C_3, C_4 为作物每个时期的 C_n 值; R_1, R_2, R_3, R_4 为作物每个时期的 R 值占全年 R 值的百分数。本试验中各农作物 C 值为 $C_{薯} = 0.227, C_{麦} = 0.153$ 。

2.4.2 林区、牧草区的 C 值计算 林区、牧草区的 C 值可直接借用国外数据,一般根据不同覆盖度来确定乔木区与牧草区的 C 值,由于覆盖度不同, C 值也不同。在实际应用时,可根据其覆盖度查表使用。本试验中乔木小区 $C = 0.04$,牧草小区 $C = 0.043$ 。

2.5 水土保持措施因子 P 值的确定

因子 P 是在其它条件相同,实施水土保持措施

后小区土壤流失量与无任何保护措施小区的土壤流失量之比。本项试验各种保土措施因子 P 值为:乔木小区 $P = 0.196$,经济林小区 $P = 0.139$,牧草小区 $P = 0.08$,顺坡小区 $P = 1.0$,梯田小区 $P = 0.055$,等高耕作 $P = 0.5$ 。

3 USLE 模型的应用

将上述计算分析所确定的 R 、 K 、 LS 、 C 、 P 值分别带入方程 $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ 进行土壤流失量的计算,并与小区实测的土壤流失量进行对比分析,见表 5。

表 5 实测土壤流失量与计算土壤流失量对比

t/(km ² · a)					
小区名称	乔木 小区	经济林 小区	牧草 小区	梯田 小区	顺坡 小区
实测均值 A	203.0	210.2	51.7	210.5	4516
计算均值 A	223.1	213.5	49.9	229	4423
偏差/ %	9.9	1.6	- 3.5	8.8	- 2.1

分析表 5 可知,各小区实测土壤流失量与计算土壤流失量均表现为顺坡小区 > 梯田小区 > 乔木小区 > 经济林小区 > 牧草小区,其中牧草小区土壤流失量都最小,说明牧草的水土保持效果好;顺坡小区土壤流失量都最大,是牧草小区的 87 倍,是梯田小区的 21 倍。说明顺坡耕作最易造成水土流失,生产中尽量避免此种耕作方式,而乔木小区、经济林小区、梯田小区都是很好的土地利用方式。各小区实测土壤流失量与计算土壤流失量偏差为 - 3.5 ~ 9.9 %,偏差都小于 10 %。说明用土壤流失方程计算土壤流失量的可靠性很高。

4 USLE 模型的可靠性验证

为了进一步检验土壤流失方程在实际应用中的可靠性,任意抽取 1985 年夹谷山下梯田、坡耕地(非试验小区)的实测资料进行计算分析。1985 年度共发生 9 次产流雨,采用公式 $R = 0.2027 H^{1.4216}$ 分次计算 R 值,求得 R 为 $414.304 J \cdot cm/(m^2 \cdot h)$;梯田实测土壤流失量为 $241.89 t/(km^2 \cdot a)$,坡耕地为 $2065.4 t/(km^2 \cdot a)$ 。采用土壤流失方程计算土壤流失量与实测量对比,并进行偏差分析。梯田区相对偏差为 5.64 %,坡耕地相对偏差为 12.36 %。

由此说明,土壤流失方程在本地区实际应用中较高的适用性和可行性。

5 结 论

(1)以江苏省赣榆夹谷山水土保持试验站 9 a 的实测资料为依据,研究了 USLE 模型中各因子的取值方法,并进行土壤流失量的计算分析,可信度达 87 % 以上,因此,该模型具有较高的适用性和可靠性,可以在本地区进行应用。

(2)降雨侵蚀力是影响土壤侵蚀的关键因子,也是本文研究的重点,提出了本地区降雨侵蚀力的最佳组合及 R 值的简便算式。各地降雨特征和地理位置等因素不同, R 因子的取值亦不同。

(3)从土壤流失方程可以看出, R 、 K 是自然因子,人们几乎不能改变它们,而 LS 、 C 、 P 则是可以改变的,因此,可以通过坡改梯、增加植被、调整种植结构等工程和生物措施来减少土壤流失量。

(4)该试验研究成果已成功应用到赣榆县小流域的综合治理和水土保持规划中,取得了显著成效。

参考文献:

[1] 刘宝元,谢云,张科利.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.

[2] 李纪人,黄诗峰,张行南.“3S”技术水利应用指南[M].北京:中国水利水电出版社,2002.

[3] 刘淼,胡远满.基于GIS、RS和RUSLE的林區土壤侵蚀量定量研究[J].水土保持研究,2004,11(3):21-24.

[4] Okan Fistikoglu,Nilgun B Harmancioglu. Integration of

GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion[J]. Water Resources Management,2002,250(16):447-467.

[5] 马琨,马斌,何宪平.宁晋黄土高原坡面土壤侵蚀与影响因子研究[J].水土保持研究,2007,14(1):7-10.

[6] Wischmeier W H,Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington:D C:U. S. Gov. Print Office,1978.

[7] Renard K G,Foster G R,Weesies G A,etal. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [M]. Washington D C:U. S. Gov. Print Office,1997.

[8] Nuno de S L,Miguel de A C. A new procedure to estimate the RUSLE EI_{30} index based on monthly rainfall data and applied to the arvoregion,Portugal[J]. Journal of Hydrology,2001,250(1):12-18.

[9] 贾志军.晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 R 值的确定[J].中国水土保持,1997(6):18-20.

[10] 黄炎和.闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J].水土保持学报,1992,6(4):1-5.

[11] 刘运河.水土保持[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1988:71-84.

[12] 高克昌,赵纯勇.重庆市主城区降雨侵蚀力的计算方法研究[J].中国水土保持,2002(6):22-24.

[13] 胡续礼,杨树江.几种降雨侵蚀力模型的比较研究[J].水土保持通报,2006,26(1):68-70.

[14] 赵文武,朱婧,郭雯雯.基于降雨量和降雨时间的月降雨侵蚀力简易算法[J].中国水土保持科学,2007,5(6):8-14.

[15] 刘和平,袁爱萍,路炳军,等.北京侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持研究,2007,14(1):215-217.

(上接第 62 页)

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范(GB50021-2000)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[2] 《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册[S].北京:中国建筑工业出版社,1992.

[3] 油新华.土石混合体随机结构模型及其应用研究[D].北京:北京交通大学,2001.

[4] Xiao Li, Qiulin Liao, Jianming He. In-situ Tests and Stochastic Structural Model of Rock and Soil Aggregate in the Three Gorges Reservoir Area [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(3):494-499.

[5] 李正川,刘贵应.三峡库区堆积层滑坡特性及其稳定性分析评价[J].科技咨询导报,2007(25):59.

[6] 廖红建,高石夯,盛谦,等.渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J].西安交通大学学报,2006,40(1):88-92.

[7] 王发读.浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J].水文地质工程地质,1995(1):20-23.

[8] 林卫烈,杨舜成.滑坡与降雨量相关性研究[J].福建水土保持,2003,15(1):28-33.

[9] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1087-1091.

[10] 王成华,夏绪勇.边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J].四川建筑科学研究,2002,28(3):34-39.