

# 黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法

顾璟冉<sup>1</sup>, 张兴奇<sup>1</sup>, 顾礼彬<sup>1</sup>, 郭新亚<sup>1</sup>, 杨光熹<sup>2</sup>, 顾再柯<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 贵州省水土保持监测站, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** [目的] 对黔西高原地区侵蚀性降雨特性进行分析并探索降雨侵蚀力的简易算法, 为该区土壤侵蚀预报模型的建立提供理论依据。[方法] 利用径流小区观测法, 基于毕节小区 2012—2014 年 53 次降雨过程资料进行分析。[结果] (1) 降雨量( $P$ )和最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )是影响坡面产流、产沙的两个主要因子。坡面产流、产沙与最大 60 min 雨强( $I_{60}$ )显著相关; (2) 坡面产流产沙与二元复合因子的相关系数显示,  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  和  $I_{30} I_{60}$  是影响坡面产流、产沙的 3 类主要降雨复合指标,  $EI_{30}$  和  $EI_{60}$  与坡面产流产沙的相关系数间相差较小; (3) 基于坡面产流、产沙与降雨单指标和降雨复合指标的相关关系, 确定了简易算法的参数。[结论] 基于可比性, 以  $R = EI_{30}$  作为参照值对 3 种简易算法的结果进行决定系数和偏差率比较后, 得到研究区便捷、快速的降雨侵蚀力简易算法为:  $R = 0.344(PI_{60})$ 。

**关键词:** 降雨侵蚀力; 产流产沙; 简易算法; 黔西高原地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0204-05

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 顾璟冉, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 204-208. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.039

## Simple Algorithm of Rainfall Erosivity in West Guizhou Plateau Area

GU Jingran<sup>1</sup>, ZHANG Xingqi<sup>1</sup>, GU Libin<sup>1</sup>, GUO Xinya<sup>1</sup>, YANG Guangxi<sup>2</sup>, GU Zaike<sup>2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang, Guizhou 550002, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of rainfall were analyzed and the simple algorithm of rainfall erosivity of West Guizhou plateau area were studied to provide theoretical basis for the building of the soil erosion prediction model. [Methods] 53 rainfall events of Bijie area from 2012 to 2014 were obtained by means of runoff plots observation. [Results] The results showed that: (1) rainfall amount( $P$ ) and rainfall energy of 60 minutes( $E_{60}$ ) were two important affecting factors on the processes of slope runoff and sediment. Slope runoff and sediment yield were found significantly correlated with rainfall intensity of 60 minutes( $I_{60}$ ). (2) The correlation coefficients between runoff/sediment and the mixed factors of rainfall indicated that  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  and  $I_{30} I_{60}$  were three kinds of the most important impacting factors on soil erosion process. What is more, the correlation coefficient between runoff/sediment and  $EI_{60}$  was slightly different with the one between runoff/sediment and  $EI_{30}$ . (3) Parameters of simple algorithm of rainfall erosivity were determined based on the above analyses. [Conclusion] Through the comparison of determination coefficients and the average error rates obtained from three algorithms, the simple algorithm of rainfall erosivity of the study area was expressed as  $R = 0.344(PI_{60})$  with reference to  $R = EI_{30}$  for its comparability.

**Keywords:** rainfall erosivity; runoff and sediment; simple algorithm of rainfall erosivity; West Guizhou plateau area

降雨侵蚀力( $R$ )是表征降雨引起土壤侵蚀的潜在能力的重要指标, 是美国通用土壤流失方程

(USLE)的基本参数之一<sup>[1]</sup>。降雨侵蚀力因子与土壤可蚀性因子、地形因子、地表覆盖因子和管理因子

收稿日期: 2015-03-05

修回日期: 2015-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特地区人类活动主导下的生态环境变化与流域水文循环响应耦合机理研究”(41371045), “贵州喀斯特地区坡耕地坡度、坡长与水土流失关系研究”(KT201007); 贵州省水利厅重点科研项目(KJZD200801; 2006200); 江苏高校优势学科建设工程项目

第一作者: 顾璟冉(1989—), 女(汉族), 江苏省无锡市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 15996375091@139.com。

通信作者: 张兴奇(1964—), 男(汉族), 贵州省仁怀市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源与水土保持方面的研。E-mail: zxqrh@nju.edu.cn。

以及水土保持措施因子共同作用,决定了一个地区的土壤流失量。Wischmeier<sup>[1]</sup>发现土壤侵蚀量与降雨动能和最大 30 min 雨强复合指标( $EI_{30}$ )密切相关。Wischmeier 提出的降雨侵蚀力经典算法需要详细的降雨过程资料,而许多地区因缺乏该资料而无法应用,很多学者开始探索降雨侵蚀力的新算法以利用易得的降雨资料来代替长系列的降雨过程资料<sup>[2-3]</sup>。贵州喀斯特地貌发育,山高地陡,地表崎岖,水土流失和石漠化严重<sup>[4]</sup>。对该地区的降雨侵蚀力已有相关研究,李瑞等<sup>[5]</sup>探讨了黔南州龙里县的羊鸡冲小流域降雨与坡面产沙的关系,得到产沙与降雨量相关性较高而与雨强的相关并不明显;戴海伦等<sup>[6]</sup>研究得出贵州省的降雨侵蚀力以  $EI_{30}$  来计算,并提出了降雨侵蚀力指数形式的简易算法;许月卿等<sup>[7]</sup>选择基于日降雨量的月降雨侵蚀力算法,估算了贵州省降雨侵蚀力,并分析了其时空分异规律;刘斌涛等<sup>[8]</sup>采用章文波提出的多年平均降雨侵蚀力算法探讨西南山区降雨侵蚀力的空间分布特征,并指出贵州省东南部是降雨侵蚀力的明显上升区。本研究基于野外径流小区观测试验,得到降雨特征因子与土壤侵蚀的关系,探讨降雨侵蚀力的简易算法,以便能够快速估算降雨侵蚀力( $R$ ),为黔西高原地区土壤侵蚀预报与防治提供帮助。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

毕节市位于长江上游的贵州西北部乌蒙山腹地,处于滇东高原向黔中山区丘陵过渡的倾斜地带,地形多山多丘陵。属亚热带湿润季风气候,多年平均降水量 1 100~1 300 mm,降水多集中于夏季,降雨量的年际变化相对稳定<sup>[9]</sup>。野外径流小区布设在毕节石桥小流域,流域面积 8.19 km<sup>2</sup>,海拔 1 400~1 740 m,相对高差 340 m。石桥小流域碳酸盐类石灰岩广泛分布,小流域内平均裸岩率达 30%,植被覆盖率,是贵州省境内具有代表性的喀斯特石漠化地区。小流域内分布有大量坡耕地,坡面土壤厚度 0.2~0.5 m。研究区分别设置了坡度、坡长、农作物、水保措施和标准等类型小区,本研究的径流、泥沙数据来自两个标准小区,两个标准小区的布设一致:为裸土,坡度为 5°,投影坡长为 20 m,宽 5 m,水平面积为 100 m<sup>2</sup>,坡位为中坡,土壤类型为黄壤,土层厚度为 0.35 m,基岩为石灰岩。小区底部设置水泥制集流槽,并设有集流池和一级分流池,集流池采用 9 孔分流与一级分流池连接。

### 1.2 研究资料与方法

1.2.1 径流深 每次降雨产流产沙后在两小时内完成实地观测取样,观测分流池、集流池中的水深,坡面径流深计算公式为:

$$h=10^3V/S$$

$$V=S_1h_1+rS_2h_2$$

式中: $h$ ——坡面径流深(mm); $V$ ——坡面总产流体积(m<sup>3</sup>); $S$ ——野外径流小区面积(m<sup>2</sup>); $S_1$ ——集流池池底面积(m<sup>2</sup>); $h_1$ ——集流池水深(m); $r$ ——一级分流系数; $S_2$ ——一级分流池池底面积(m<sup>2</sup>); $h_2$ ——一级分流池水深(m)。

1.2.2 产沙量 每次降雨产流产沙后在两小时内完成实地观测取样,收集集流槽槽土并称其质量,取 3 个土样采用烘干法测定槽土含水率,以此计算槽土质量。将集流池和分流池内径流泥沙混合液搅拌均匀,采集体积为 1 000 ml 的水沙样品 3 个,将水沙样品静置、烘干、称重,求平均值测得含沙率,以此计算集流池和分流池中的产沙量。坡面产沙量计算公式为:

$$W_v=10^{-6} [10^3(S_1h_1C_1+rS_2h_2C_2)+m(1-c)]$$

式中: $W_v$ ——坡面总产沙量(t); $C_1$ ——集流池含沙率(g/L); $C_2$ ——一级分流池含沙率(g/L); $m$ ——集流槽槽土质量(g); $c$ ——集流槽槽土含水率(%)。

1.2.3 降雨过程 降雨过程由 2012—2014 年自记雨量计记录,通过自记雨量计自记纸摘录计算了 53 次降雨过程中的降雨量( $P$ )、各时段雨强( $I_5, I_{10}, I_{15}, I_{30}$  和  $I_{60}$ )。整理了上述 2 个标准小区的径流、泥沙资料。用 SPSS 17.0 软件进行数据分析,用 Excel 软件制图。降雨总动能( $E$ )和最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$E=\sum_{k=1}^n(e_kP_k)$$

$$e_k=0.119+0.873\lg i_k$$

式中: $E$ ——降雨总动能(MJ/hm<sup>2</sup>); $e_k$ —— $k$  时段单位降雨动能[MJ/(hm<sup>2</sup>·mm)]; $P_k$ —— $k$  时段降雨量(mm); $i_k$ —— $k$  时段降雨强度(mm/h); $R$ ——降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)]; $I_{30}$ ——最大 30 min 降雨强度(mm/h)。

1.2.4 降雨侵蚀力简易算法 分析比较产流、产沙与降雨单因子和复合因子的关系,得出与土壤流失相关性强的降雨单因子和复合因子,以降雨侵蚀力经典算法计算的  $R$  值( $R=EI_{30}$ )为简易算法的参照值,参照降雨侵蚀力简易算法的结构关系:降雨量指标指数关系<sup>[10]</sup>、雨量和雨强复合指标的线性关系<sup>[11]</sup>和时段雨强的二元复合结构指标的线性关系<sup>[12-13]</sup>,对研究区

的降雨侵蚀力进行了估算,建立研究区的降雨侵蚀力简易算法。在计算过程中,对计算结果与参照值从两方面进行比较验证:(1)模型决定系数 $R^2$ (由回归分析得到);(2)相对误差率 $E_r$ <sup>[14]</sup>,用来反映降雨侵蚀力的相对误差,计算公式为:

$$E_r = \left| \frac{R_{\text{简}} - R}{R} \right| \times 100\%$$

式中: $E_r$ ——相对误差(%); $R_{\text{简}}$ ——简易算法拟合的降雨侵蚀力值 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $R$ ——降雨侵蚀力( $EI_{30}$ ) $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 。

决定系数反映了降雨侵蚀力变化量中能够被解释的比率,相对误差系数反映了估算的降雨侵蚀力值与参照值的相对差异<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨特征

53次降雨按照气象学上的雨量标准进行分级(图1),得出研究区小雨( $\leq 10$  mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)和暴雨(50~100 mm)次数分别占38%,30%,21%和11%。53次降雨事件的降雨量在4.8~87 mm之间。中雨以上降雨事件按照最大30 min雨强( $I_{30}$ )<sup>[16]</sup>,分为3种雨强类型,即低雨强型降雨( $I_{30} \leq 10$  mm/h)、中雨强型降雨( $10 < I_{30} < 30$  mm/h)和高雨强型降雨( $I_{30} \geq 30$  mm/h)。16次中雨事件中11次(占69%)、11次大雨事件中7次(占64%)以及6次暴雨事件(占100%)是中、高雨强型降雨。中雨以上降雨事件产生的泥沙量约是泥沙总量的99%,中高雨强型降雨是该部分泥沙产生的动力来源。小雨占有降雨事件次数的1/3,但小雨事件产生的泥沙量仅约占泥沙总量的1%,小雨雨量少,研究表明小雨事件下坡面泥沙的产生与时段雨量的集中程度<sup>[12]</sup>有关:20次小雨事件中12次是集中在60 min内,12次中的7次事件的约50%及以上的降雨量集中于5 min(图2),7次降雨事件的产沙量就占了小雨部分总产沙量的48%。

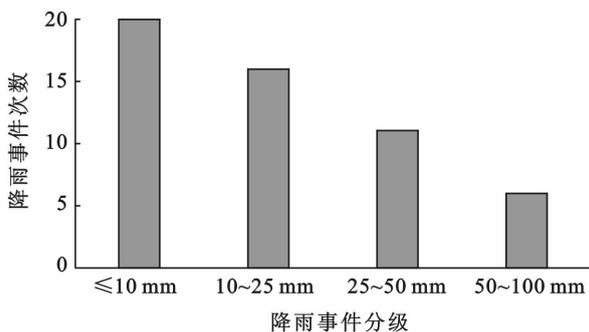


图1 降雨量分类

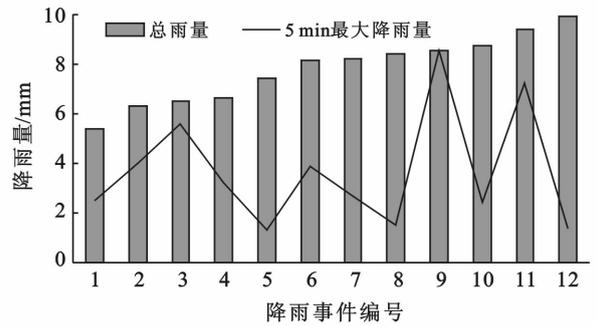


图2 最大5 min降雨量集中程度

### 2.2 坡面产流产沙与降雨特征指标关系分析

#### 2.2.1 坡面产流、产沙与降雨特征单指标的关系

研究区坡面产流、产沙与次降雨总动能( $E$ )以及最大60 min降雨动能( $E_{60}$ )的相关系数(表1)表明,坡面产流、产沙与 $E$ 和 $E_{60}$ 显著相关。产流量、产沙量与 $E_{60}$ 的相关系数分别为0.690和0.778,表明 $E_{60}$ 是影响研究区坡面产流、产沙的主要指标。径流深、产沙量与降雨量的相关系数分别为0.692和0.684(表1);降雨量、各时段雨强(即 $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )、降雨总动能( $E$ )以及最大60 min动能( $E_{60}$ )对坡面产流的影响表明,降雨量是影响研究区坡面产流的主要指标。坡面产沙和降雨量的相关性达到了显著相关水平,相关系数表明降雨量是影响研究区坡面产沙的主要指标之一。径流深和产沙量与时段雨强(即 $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )的相关系数大致随着时段的延长而增大,增幅微弱;坡面产流与 $I_{30}, I_{60}$ 的相关系数相对较大,即 $I_{30}, I_{60}$ 对坡面产流的影响较大;研究区坡面产流、产沙和时段雨强均显著相关,其中与 $I_{60}$ 的相关性最为明显。

#### 2.2.2 坡面产流、产沙与降雨特征复合指标的关系

坡面产流量、产沙量与最大60 min降雨动能( $E_{60}$ )和各时段雨强(即 $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )复合因子的相关系数表明坡面产流、产沙与 $E_{60}, I_{60}$ 呈显著相关关系,而坡面产流量、产沙量与降雨总动能( $E$ )和各时段雨强(即 $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )复合因子的相关系数分别大于0.6, 0.7(表2),其中坡面产沙与 $EI_{60}$ 的相关系数最大,为0.858,相比较坡面产沙与 $EI_{30}$ 的相关系数大小,两者相差微小。坡面产流量、产沙量与雨量和各时段雨强(即 $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )复合指标的相关系数分别大于0.6, 0.7(表3),坡面产流、产沙和 $PI_{60}$ 呈显著相关关系,其中坡面产沙与 $PI_{60}$ 的相关系数最大,为0.873。坡面产流量、产沙量与时段雨强的二元复合结构指标的相关系数分别大于0.3与0.6(表4),坡面产流量、产沙量与 $I_{30}, I_{60}$ 的相

关系数分别为 0.641 和 0.821,表明  $I_{30} I_{60}$  的二元复合结构指标能够很好地反映研究区坡面产流、产沙的特点。坡面产流产沙与指标  $EI_{60}$  和  $EI_{30}$  的相关系数间相差不大,基于经典算法  $R = EI_{30}$  的通用性,为使

简易算法结果具有可比性,选取  $R = EI_{30}$  作为作为研究区的简易算法的拟合参照值,从而建立基于降雨单因子指标或降雨复合因子指标的降雨侵蚀力简易算法,实现降雨侵蚀力的简化计算。

表 1 径流深、产沙量与降雨单因子的相关系数

项目	$P$	$I_5$	$I_{10}$	$I_{15}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$E$	$E_{60}$
径流深	0.692**	0.475**	0.458**	0.554**	0.627**	0.683**	0.504**	0.690**
产沙量	0.684**	0.568**	0.571**	0.590**	0.696**	0.763**	0.541**	0.778**

注: \* 表示数据的两尾检验的结果相关性在 0.05 的水平上显著相关; \*\* 表示所有数据的两尾检验的结果相关性在 0.01 的水平上显著相关。下同。

表 2 径流深、产沙量与降雨动能和雨强复合因子的相关系数

项目	$EI_5$	$EI_{10}$	$EI_{15}$	$EI_{30}$	$EI_{60}$	$E_{60} I_5$	$E_{60} I_{10}$	$E_{60} I_{15}$	$E_{60} I_{30}$	$E_{60} I_{60}$
径流深	0.622**	0.618**	0.682**	0.708**	0.733**	0.544**	0.547**	0.611**	0.639**	0.675**
产沙量	0.784**	0.787**	0.789**	0.843**	0.858**	0.754**	0.762**	0.764**	0.827**	0.854**

表 3 径流深、产沙量与雨量雨强复合因子的相关系数

项目	$PI_5$	$PI_{10}$	$PI_{15}$	$PI_{30}$	$PI_{60}$
径流深	0.651**	0.647**	0.721**	0.749**	0.773**
产沙量	0.782**	0.788**	0.805**	0.859**	0.873**

### 2.3 降雨侵蚀力简易算法

基于降雨量指标指数关系、雨量雨强复合指标的线性关系和时段雨强的二元复合结构指标的线性关

系,构建了相关的降雨侵蚀力简易算法,拟合分析得到不带常数的算法拟合度较优:

$$R_1 = P^{1.345} \quad (R^2 = 0.905)$$

$$R_2 = 0.344(P I_{60}) \quad (R^2 = 0.921)$$

$$R_3 = 0.323(I_{30} I_{60}) \quad (R^2 = 0.944)$$

式中: $R_1, R_2, R_3$ ——降雨侵蚀力  $[MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h)]$ ;  $P$ ——降雨量(mm);  $I_{30}$ ——最大 30 min 雨强 (mm/h);  $I_{60}$ ——最大 60 min 雨强(mm/h)。

表 4 径流深、产沙量与各时段雨强复合因子(二元结构)的相关系数

项目	$I_5 I_{10}$	$I_5 I_{15}$	$I_5 I_{30}$	$I_5 I_{60}$	$I_{10} I_{15}$	$I_{10} I_{30}$	$I_{10} I_{60}$	$I_{15} I_{30}$	$I_{15} I_{60}$	$I_{30} I_{60}$
径流深	0.390*	0.458**	0.503**	0.543**	0.442**	0.499**	0.544**	0.569**	0.611**	0.641**
产沙量	0.601**	0.613**	0.701**	0.745**	0.606**	0.705**	0.752**	0.710**	0.755**	0.821**

### 2.4 简易算法的比较分析

降雨侵蚀力简易算法除了要求雨量资料容易获取,计算简便,具有年际稳定性以外,还需要计算结果能满足精度要求。对上述 3 种计算方法的误差进行了分析(表 5)。 $R_1$  的相对误差在 50% 以上,说明该算法精度很差; $R_2$  的年最低相对误差是 4.75%,年最高相对误差是 14.74%,平均为 8.36%; $R_3$  的年最低相对误差是 4.43%,年最高相对误差是 15.38%,平均为 10.53%。分析算法的估计效果, $R_2, R_3$  拟合小雨量以及中雨量降雨事件的值较拟合高雨量降雨事件的值的拟合效果好,拟合低强度以及中强度(以  $I_{30}$  为标准)降雨事件的值较拟合高强度降雨事件的值的拟合效果好; $R_2, R_3$  拟合的值偏高, $R_2$  高估范围在 0.781~394.407  $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h)$ , $R_3$  高估范围在 0.050~150.891  $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h)$ 。比较两式的计算值,除个别  $R_2$  计算值高估严重,总体高估不严

重; $R_2$  有 40% 的低估值, $R_3$  有 38% 的低估值。 $R_3$  拟合小部分高雨量高强度降雨事件容易出现偏低值, $R_2$  在拟合这部分高雨量高强度降雨事件的效果比  $R_3$  稍好。由于本文只选取了 3 a 的数据,所以该结果还待进一步验证,基于上述分析结果, $R_2$  是较适用于研究区的降雨侵蚀力简易算法。当高雨量高强度降雨事件较少时,也可以采用  $R_3$  计算降雨侵蚀力值。

表 5 降雨侵蚀力 3 种简易算法的相对误差 %

年份	$R_1$	$R_2$	$R_3$
2012 年	53.34	4.75	11.79
2013 年	55.06	14.74	15.38
2014 年	57.82	5.56	4.43
3 a 平均	55.41	8.36	10.53

## 3 结论

(1) 在黔西高原地区,径流深、产沙量与降雨量

( $P$ )、最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )的相关系数都大于 0.6,降雨量和最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )是影响坡面产流、产沙的两个主要因子。坡面产流产沙均与最大 60 min 雨强( $I_{60}$ )相关明显。

(2) 黔西高原地区坡面产流产沙与二元复合指标  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  和  $I_{30} I_{60}$  的相关系数表明,  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  和  $I_{30} I_{60}$  是影响坡面产流、产沙 3 种主要的降雨复合指标,  $EI_{30}$  和  $EI_{60}$  与坡面产流产沙的相关系数间相差较小。

(3) 基于可比性,黔西高原地区降雨侵蚀力简易算法的拟合参照值通过经典算法结构  $R = EI_{30}$  得到。该地区降雨侵蚀力的简易算法为:  $R = 0.344(PI_{60})$ 。该算法能便捷、快速地预测该地区的降雨侵蚀力,为土壤侵蚀预报模型的建立提供理论依据。

#### [参 考 文 献]

[1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[J]. US Washington D C: Agriculture Handbook No 537, 1978.

[2] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(1):153-156.

[3] 章文波,谢云,刘宝元.用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(3):384-390.

[4] 严毅,陈登.贵州省毕节市土地石漠化现状与治理对策

[J]. 内蒙古林业调查设计,2011,34(5):43-46.

[5] 李瑞,李勇,刘云芳.贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J].水土保持研究,2012,19(3):3560-3562.

[6] 戴海伦,苑爽,张科利,等.贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J].水土保持研究,2013,20(1):37-41.

[7] 许月卿,周巧富,李双成.贵州省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J].水土保持通报,2005,25(4):11-14.

[8] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J].地球科学进展,2012,27(5):499-509.

[9] 罗宁,许炳南,文继芬,等.贵州大气降水的时空分布规律研究[J].贵州气象,2006,30(4):3-7.

[10] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.

[11] 伍育鹏,谢云.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.

[12] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M].北京:科学出版社,1996.

[13] 姚治君,廖俊国,陈传友.云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J].自然资源学报,1991,6(1):45-54.

[14] 徐丽,谢云,符素华,等.北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究[J].水土保持研究,2007,14(6):433-437.

[15] 符素华,段淑怀,吴敬东,等.北京山区次降雨侵蚀力[J].水土保持学报,2002,16(1):37-39.

[16] 蒋荣.地形因子对贵州喀斯特地区坡面土壤侵蚀的影响[D].江苏南京:南京大学,2013.

(上接第 203 页)

[22] 李洪成.数据的正态性检验方法及其统计软件实现[J].统计与决策,2009(12):155-156.

[23] 陆运清.用 Pearson's 卡方统计量进行统计检验时应注意的问题[J].统计与决策,2009(15):32-33.

[24] Steinskog D J, Tjostheim D B, Kvamstø N G. A cautionary note on the use of the Kolmogorov-Smirnov test for normality [J]. Monthly Weather Review, 2007,135(3):1151-1157.

[25] 林两位,王莉萍.用 Pearson-III 概率分布推算重现期年最大日雨量[J].气象科技,2005,33(4):314-317.

[26] Houghton J C. Birth of a parent: The Wakeby distribution for modeling flood flows [J]. Water Resource

Research, 1978,14(6):1105-1109.

[27] 李宏伟.水文频率参数计算方法与应用研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.

[28] 中华人民共和国水利部. SL44-2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S].北京:中国水利水电出版社,2006.

[29] 陆文秀,刘丙军,陈俊凡,等.近 50 a 来珠江流域降水变化趋势分析[J].自然资源学报,2014,29(1):80-90.

[30] Park J S, Jung H S, Kim R S, et al. Modelling summer extreme rainfall over the Korean peninsula using Wakeby distribution [J]. International Journal of Climatology, 2001,21(11):1371-1384.