

# 1958—2014 年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征

温天福, 张范平, 胡建民, 刘章君

(江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

**摘 要:**降雨侵蚀力可用于表征降雨对土壤侵蚀的潜在能力,研究其时空变化特征对流域土壤侵蚀风险评估、水土流失防控等工作具有重要意义。利用赣江流域 12 个气象站 1958—2014 年逐日降雨资料计算降雨侵蚀力,采用 TFPW-MK 法、小波分析和 Kriging 插值等方法分析了流域降雨侵蚀力时空变化规律。结果表明:赣江流域多年平均降雨侵蚀力值空间分布范围为  $6\,059.9 \sim 8\,724.7$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,空间上自西南向东北呈现递增趋势;大部分站年降雨侵蚀力以上升为主,1958—2014 年流域年降雨侵蚀力上升了  $588.639$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,上游区变化较小,中下游上升趋势较明显,其中 7—9 月变化显著。此外,流域年降雨侵蚀力的变化主周期为 4.1 a,且存在 2.0~5.2 a 的振荡周期。研究表明赣江流域因降雨侵蚀力增加而引发水土流失的风险在加剧,对于下游地区表现尤为突出,结论可为赣江流域水土保持、农业开发等提供决策依据。

**关键词:**降雨侵蚀力; TFPW-MK 法; 小波分析; 时空变化; 赣江流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0007-08

## Spatiotemporal Variation of Rainfall Erosivity During the Period 1958—2014 in Ganjiang River Basin

WEN Tianfu, ZHANG Fanping, HU Jianmin, LIU Zhangjun

(Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** A rainfall erosivity factor can be used to measure the rain potential ability to cause soil erosion. It is important to analyze on the characteristics of rainfall erosivity, the assessment of soil erosion risk and the prevention and control of soil erosion. In this paper, the monthly rainfall erosivity model was introduced to calculate the rainfall erosivity. Ganjiang River Basin (GRB) was taken as the study case. The daily rainfall data of 12 meteorological stations from 1958 to 2014 were used in the model. The methods including TFPW-MK, wavelet analysis and Kriging interpolation were used to analyze the spatiotemporal variation of rainfall erosivity. The results show that the range of annual rainfall erosivity in GRB is  $6\,059.9 \sim 8\,724.7$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$  during the period 1958—2014, the average annual rainfall erosivity increases from southwest to northeast in general, annual rainfall erosivity of most stations displays the increasing trends from 1958 to 2014; the annual areal rainfall erosivity of GRB shows the significant increasing trend with yearly average slope of  $12.250$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , annual areal rainfall erosivity of upper basin shows the slightly decreasing trend, while it displays the increasing trend in the middle and lower basins, especially for the period from July to September; In addition, the rainfall erosivity frequency from 1958 to 2014 had the main period of 4.1 years, with an oscillation periods of 2.0~5.8 years, indicating that the risk of soil erosion in GRB is increasing, especially in the lower basin. These results can provide the important reference for soil and water conservation planning, agricultural developing in this basin.

**Keywords:** rainfall erosivity; TFPW-MK; wavelet analysis; spatiotemporal variation; Ganjiang River Basin

水土流失容易造成土壤肥力下降、河道阻塞和湖库富营养化,对下游输移和沉积区河流系统调整及环境变化产生较大的影响<sup>[1]</sup>。我国极端降水事件多发生于长江中下游和江南地区以及高原东南部,且在這些地区极

端降水事件持续时间较长<sup>[2]</sup>。降雨是南方地区导致水土流失的重要的气象驱动力,坡面泥沙剥蚀量随着降雨能和径流能的增加而增加,雨滴击溅作用于泥沙剥蚀量效果显著<sup>[3]</sup>。降雨侵蚀力(rainfall erosivity)可表征降雨引

起土壤侵蚀的潜在能力,是通用土壤流失方程(USLE)及其修正方程(RUSLE)中降雨因子的表征量<sup>[4]</sup>。分析降雨侵蚀力时空的变化规律,对于土壤侵蚀评估、流域综合治理以及水土保持优化等具有重要意义。

Wischmeier 等<sup>[5]</sup>首次提出 EI30 表征降雨侵蚀能力并得到广泛应用,有学者选取 EI10, EI60, EI75 作为指标,但计算此类指标需长序列(至少 20 a)场次降雨数据。为此,众多学者利用年、月、日常规降雨数据建立了简易算法<sup>[6-8]</sup>,其中基于日雨量的降雨侵蚀力精度较高,得到广泛应用。目前,学者从不同角度研究不同地区降雨侵蚀力时空特征,结果表明多数地区呈上升趋势,成果为区域农业管理等提供重要参考<sup>[9-15]</sup>。降雨侵蚀力为水文—气象要素,其时间序列存在着非正态分布且具有一定自相关特征,当前对降雨侵蚀力时间变化进行分析和检验,主要采用线性趋势法和 Mann-Kendall (MK) 秩次相关检验法等。TFPW-MK 法作为一种去趋势的非参数检验方法,更适合用于具有自相关性的顺序变量的检验,该方法已在降雨、径流等水文气象要素趋势中得到应用。降雨侵蚀力空间变化一般采用空间插值法分析地区差异,考虑其变化趋势存在着一定的空间自相关性的特点,可选用地统计插值中更灵活、更精确的克里金法(Kriging)作为空间插值方法。因此,TFPW-MK 法和克里金插值两种方法结合对研究降雨侵蚀力变化的时空变化特征具有一定优势。

由于山区丘陵起伏交错,降雨相对集中以及部分山丘开垦扰动,江西中度及以上侵蚀面积占侵蚀总面积 2.66 万 km<sup>2</sup> 的 44%<sup>[16]</sup>,且 90% 以上为水力侵蚀。赣江是江西境内第一大河流,集水面积 8.09 万 km<sup>2</sup> (外洲站以上),流域土层较薄、土质松散,上游山坡陡峭,丘陵地带坡耕地密集,曾经是全国水土流失最严重的 8 个片区之一<sup>[17]</sup>;中下游经济较为发达,生产活动中时有破坏植被,造成局部土壤侵蚀加剧。降雨侵蚀力的时空变化容易影响土壤侵蚀分布,同时诱发滑坡、崩塌等地质灾害,本文选取赣江流域,基于 12 个气象站日降雨资料计算降雨侵蚀力,利用 TFPW-MK 方法,小波分析和 Kriging 插值等方法系统分析流域降雨侵蚀力时空演潜特征,更好地掌握降雨侵蚀的变化规律,为流域水土流失防治和农业开发提供科学依据,有效应对土壤侵蚀受气候变化的影响。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

赣江流域地处长江中下游右岸,以山区丘陵为主,占总面积的近 80%,流域水系发达,主要支流有湘水、梅江、桃江、蜀水、孤江、乌江、袁水等<sup>[18]</sup>,见图 1。以

干流水文站为界,栋背站以上为流域上游,栋背站至峡江站为中游,峡江站至外洲站为下游,集水面积分别为 40 231 km<sup>2</sup>, 22 493 km<sup>2</sup>, 18 224 km<sup>2</sup>。赣江流域地处中亚热带湿润季风气候区,四季分明,流域多年平均降水量 1 626.8 mm,多年平均径流深 849 mm。每年 4—6 月进入梅雨季,暴雨集中且历时长,占全年降水量的 46.8%;7—9 月常出现台风型暴雨。流域多年平均悬移质含沙量为 0.165 kg/m<sup>3</sup>,多年平均年输沙量 908.6 亿 t,上游输沙量占总量的 71.6%,全年输沙量主要集中在汛期<sup>[19]</sup>,其中 4—6 月占 65.9%。

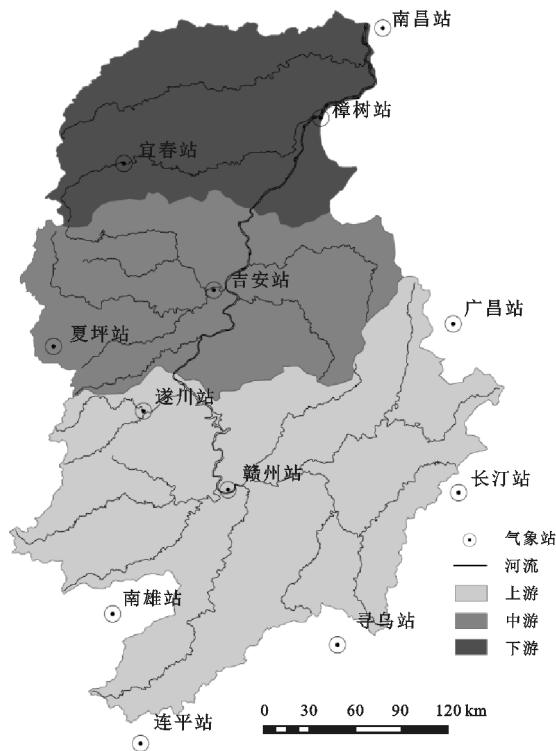


图 1 赣江流域气象站分布

### 1.2 数据来源与处理

本文选取赣江流域及周边 12 个气象站点 1958—2014 年逐日降水资料,数据来源于中国气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),质量可靠。12 个气象站点位置分布较为均匀。在 12 个站点中,1 个站点(夏坪站)数据缺测 14 a 数据(1999—2006 年、2009—2014 年),缺测比例为 25%,不宜进行查补延长。因此,在分析 1999—2006 年、2009—2014 年降雨侵蚀力时,夏坪站不作考虑,利用其余 11 个站点数据进行分析。

## 2 研究方法

### 2.1 降雨侵蚀力

基于日降雨量的侵蚀力模型较多,本文选取 Yu 和 Rosewell 等<sup>[20-21]</sup>提出的降雨侵蚀力模型,该模型引入余弦函数,可反映降雨侵蚀力随季节变化的特点,在国内有较好的应用<sup>[22-23]</sup>,其模型公式如下:

$$\hat{E}_i = \alpha [1 + \eta \cos(2\pi fi + \omega)] \sum_{d=1}^N R_d^\beta \quad (1)$$

当  $R_d > R_0$  ( $i=1, 2, \dots, 12$ )

式中:  $\hat{E}_i$  为第  $i$  个月的降雨侵蚀力 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ];  $R_d$  为第  $d$  日的降雨量 ( $\text{mm}/\text{d}$ );  $R_0$  为产生土壤侵蚀的临界降雨强度;  $N$  为第  $i$  月中降雨量超过临界降雨量的天数 ( $\text{d}$ );  $\alpha, \eta, f, \omega, \beta$  均为模型参数;  $f$  取  $1/12$ ;  $\omega$  取  $5\pi/6$  (北半球);  $\beta$  取值范围为  $1.2 \sim 1.8$ , 本文取  $1.5$ ,  $\alpha$  和  $\eta$  计算公式如式 (2) 和式 (3)。

$$\begin{cases} \lg \alpha = 2.11 - 1.57\beta & P \geq 1050 \text{ mm} \\ \alpha = 0.395 \{1 + 0.098^{[3.26(S/P)]}\} & 500 < P < 1050 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

$$\eta = 0.58 + 0.25P/1000 \quad (3)$$

式中:  $S$  为夏半年 (5—10 月) 降雨量 ( $\text{mm}$ );  $P$  为年均降雨量 ( $\text{mm}$ )。

## 2.2 时空变化分析方法

### 2.2.1 TFPW-MK 秩次相关检验

受亚热带季风气候的影响, 赣江流域的降雨在年内不同季节呈现较明显的差异。本文以年、季、汛期以及典型月份为分析时间段, 按上游、中游和下游 3 个水资源三级区, 着重分析降雨侵蚀力趋势和周期两方面特征。时间划分具体为: 按 1—3 月, 4—6 月, 7—9 月和 10—12 月分为 4 个时段, 汛期为 4—9 月。

降雨侵蚀力时间序列存在着非正态分布特征, 采用秩次相关法进行检验较合适。Mann-Kendall 法<sup>[24]</sup> (简称 MK 法) 不受样本分布类型和少数异常值的干扰的秩次相关法, TFPW-MK 法是一种去趋势预置白法 (TFPW) 的 MK 趋势检验法, 可有效降低序列中自相关性对检验结果的影响, 可定量检验变化趋势的显著性。步骤如下: 首先根据式 (4) 计算样本序列  $X(t)$  ( $t=1, 2, \dots, n$ ) 的倾斜度  $\beta$ , 通过  $X_1(t) = X(t) - \beta t$  去除样本趋势项形成新序列  $X_1(t)$ ; 然后利用式 (5) 计算  $X_1(t)$  的一阶自相关系数  $r_1$ , 并进行显著性检验; 若未通过检验  $|r_1| \leq r_a$ , 则对  $X(t)$  序列进行 M-K 检验, 否则通过式 (6) 去自相关项并还原趋势项形成新序列  $X_2(t)$ , 并对  $X_2(t)$  序列进行 MK 检验。

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_j - x_i}{j - i} \right], 1 < i < j < N \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x}_{i+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - \bar{x}_{i+1})^2}} \\ r_a &= \frac{1 \pm 1.645 \sqrt{n-2}}{n-1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$X_2(t) = X_1(t) - r_1 X_1(t-1) + \beta t \quad (6)$$

### 2.2.2 小波分析

小波变换由傅里叶分析和窗口傅里叶变换发展而来, 可通过伸缩和平移实现时间和频

域的局域变换, 可得到对时间序列周期变化进行多尺度细化分析, 常用于水文气象序列的时频分析。本文选用 Morlet 小波作为母函数进行小波分析 (wavelet analysis), 其表达式见公式 (7)<sup>[25]</sup>:

$$\varphi(t) = e^{i\omega t} \cdot e^{-t^2/2} \quad (7)$$

式中:  $\varphi(t)$  为小波变换函数;  $\omega$  为无量纲常数, 且当  $\omega \geq 5$  时可满足允许性条件。小波功率谱  $E_a$  表示尺度为  $\alpha$  的能量密度, 可提取序列主周期和振荡周期。利用红噪声标准谱对小波功率谱进行显著性检验, 当  $E_a$  大于理论功率谱  $Q$  时, 周期则具有显著性, 公式如下:

$$Q = \frac{\sigma^2 P_a \chi_n^2}{n} \quad (8)$$

$$P_a = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi \Delta t / 1.033\alpha)} \quad (9)$$

式中:  $\sigma^2$  为数据序列的方差;  $\chi_n^2$  为显著性水平下自由度为  $n$  的卡方值;  $P_a$  为红噪声标准谱;  $\Delta t$  为数据序列的时间间隔, 本文取 1;  $\alpha$  为序列滞后数为 1 的自相关系数。

### 2.2.3 克里金插值法

克里金 (Kriging) 插值法是地统计学的主要内容之一, 是基于区域样本点的实测数据, 根据待估点邻域样本点的空间位置关系, 对待估点进行的一种无偏最优估计, 比其他传统方法更符合实际情况, 结果更可靠、更精确<sup>[26]</sup>。根据半变异函数的不同有不同的插值形式, 其中常用的为基于球面函数的普通克里金插值方法, 本文利用 ArcGIS 10.2 的地理统计模块实现空间内插。

为了检验样本数量是否满足克里金插值法的要求, 从 12 个气象站选取赣州站、吉安站和樟树站代表上中下游, 运用交叉验证法检验多年平均降雨侵蚀力<sup>[27]</sup>, 结果表明 3 个站点相对误差 RE (Relative Error) 分别为 12.59%, 2.79% 和 -2.56%, 误差相对较小, 结合在该区域的相关研究<sup>[15]、[28]</sup>, 利用 12 个站点运用空间插值结果可表征赣江流域降雨侵蚀力的空间规律。

## 3 结果与分析

### 3.1 赣江流域空间变化

利用式 (3) 计算 1958—2014 年各气象站逐月降雨侵蚀力, 并累加得到站点季度、年降雨侵蚀力以及多年平均降雨侵蚀力, 运用 Kriging 法对全流域进行插值, 得到赣江流域多年平均降雨量和多年平均侵蚀力空间分布图 (图 2)。

区域年降水量的大小主要取决于较大场次降雨情况, 而侵蚀性降雨其降雨强度相对较大, 当前大中流域的侵蚀性雨量阈值研究较少, 参考相关

文献<sup>[27-28]</sup>,本文取 12.7 mm/d,对比图 2A 和 2B,赣江流域多年平均降水量与多年平均侵蚀力在空间上的分布规律基本一致。采取线性回归法分析赣江

流域降雨侵蚀力与年降雨量的相关关系,结果表明二者相关系数  $R$  为 0.75 以上( $p<0.01$ ),具有较好的相关关系。

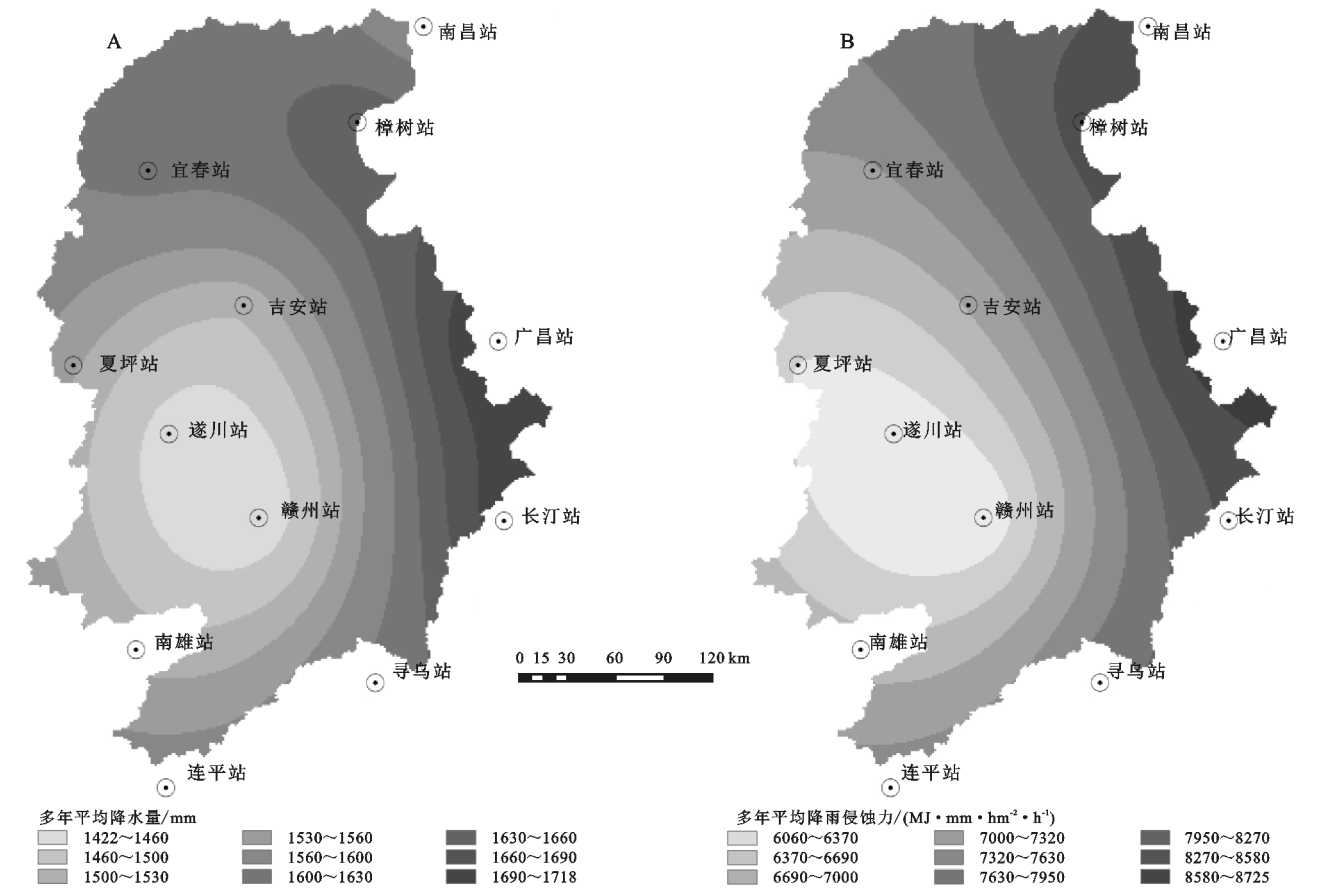


图 2 赣江流域多年平均降水量及降雨侵蚀力分布

1958—2014 年赣江流域多年平均降雨侵蚀力值(图 2B)的变化范围 6 059.9~8 724.7 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),空间差异性较小,平均值为 7 272.6 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),标准差为 703 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)。流域降雨侵蚀力总体上自西南向东北呈现递增趋势,上游源头赣闽边界区以及下游赣江尾闾区降雨侵蚀力较大,而在湘赣交界的罗霄山脉为低值区,这表明源头区及尾闾区雨蚀风险较大,应加强水土涵养和水保措施。按上游、中游和下游 3 个区域和 4 个季度进行统计,多年平均降雨侵蚀力年内和区域分配结果见表 1。3 个区域每个季度的降雨侵蚀力和比重均较为接近,主汛期(4—6 月)3 个区域占全年比重均在 55% 以上,但中游区多年平均降雨侵蚀力最小,为 3 805 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h);后汛期(7—9 月)下游区占全年比重最小,占比 29.5%。汛期(4—9 月)3 个区域占比均达 90% 以上,下游区降雨侵蚀力最大,为 7 342 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h);其他两个季度(1—3 月、10—12 月),3 个区域多年平均降雨侵蚀力约为 350 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),所占比重仅为 5% 左右。因此,赣江流域年降雨侵蚀力大小主要由 4—9 月份

降雨侵蚀力组成,尤以 4—6 月主汛期的贡献最大,应加大汛期防护措施,提高水土流失防范力度。

3.2 气象站点变化分析

由 3.1 节可知,赣江流域降雨侵蚀力的分配在年内不同季节、汛期和非汛期有着明显的差异。针对 12 个气象站 1958—2014 年逐日降雨量计算年、季及汛期降雨侵蚀力,进一步分析各站点值随时间变化规律。选定显著性水平为 0.05,利用 TFPW-MK 法分析 1958—2014 年的 57 a 的降雨侵蚀力变化情况和显著程度。

表 2 为站点降雨侵蚀力趋势变化统计,图 3 为全年和季度的站点变化趋势。由表 2 和图 3 可知,受侵蚀性降雨量的影响,上游 5 个站点年降雨侵蚀力呈下降变化,中下游站点以上升为主,其中樟树站呈显著上升趋势( $p<0.05$ ),表明流域中下游区雨蚀风险在不断增加,尤其以下游河口处明显;由于年侵蚀性降雨主要集中在汛期(4—9 月),大部分站点又以汛期降雨侵蚀力以上升为主,变化趋势与年降雨侵蚀力基本一致,下降趋势的站点分布在流域的上游区。

表 1 赣江流域多年平均降雨侵蚀力及比例

时段	上游		中游		下游		全流域	
	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/
	(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	%	(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	%	(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	%	(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	%
1—3 月	361	4.7	321	4.7	363	4.5	355	4.7
4—6 月	4389	57.4	3805	55.3	4976	62.0	4443	58.3
7—9 月	2574	33.7	2404	34.9	2366	29.5	2496	32.7
10—12 月	323	4.2	353	5.1	325	4.0	328	4.3
汛期(4—9 月)	6964	91.1	6209	90.2	7342	91.4	6939	91.0
全年(1—12 月)	7648	100	6883	100	8030	100	7622	100

表 2 赣江流域降雨侵蚀力变化站点个数统计

不同时段	上升站点为个数			下降站点个数		
	显著	不显著	合计	显著	不显著	合计
	上升	上升		上升	上升	
1—3 月	1	6	7	0	5	5
4—6 月	0	5	5	0	7	7
7—9 月	1	10	11	0	1	1
10—12 月	0	4	4	0	8	8
汛期	0	8	8	0	4	4
全年	1	6	7	0	5	5

分析季度降雨侵蚀力,对于 1—3 月,赣州、宜春、

遂川、长汀和寻乌 5 个站呈下降趋势,其余 7 个站点呈上升趋势,其中南昌站呈显著上升趋势( $p<0.05$ );对于 4—6 月,南昌、吉安、宜春、樟树和夏坪 5 个站点呈上升趋势,其余站点呈下降趋势;对于 7—9 月,除寻乌站外,其余 11 个站点均呈上升趋势,宜春站呈显著上升趋势( $p<0.05$ ),表明全流域洪水和水土流失风险在不断增大,应注重后汛期赣江全流域的水土保持;对于 10—12 月,除南昌、吉安、樟树和寻乌外,其他站点为下降趋势,但均无显著变化趋势,且主要分布在中上游区。

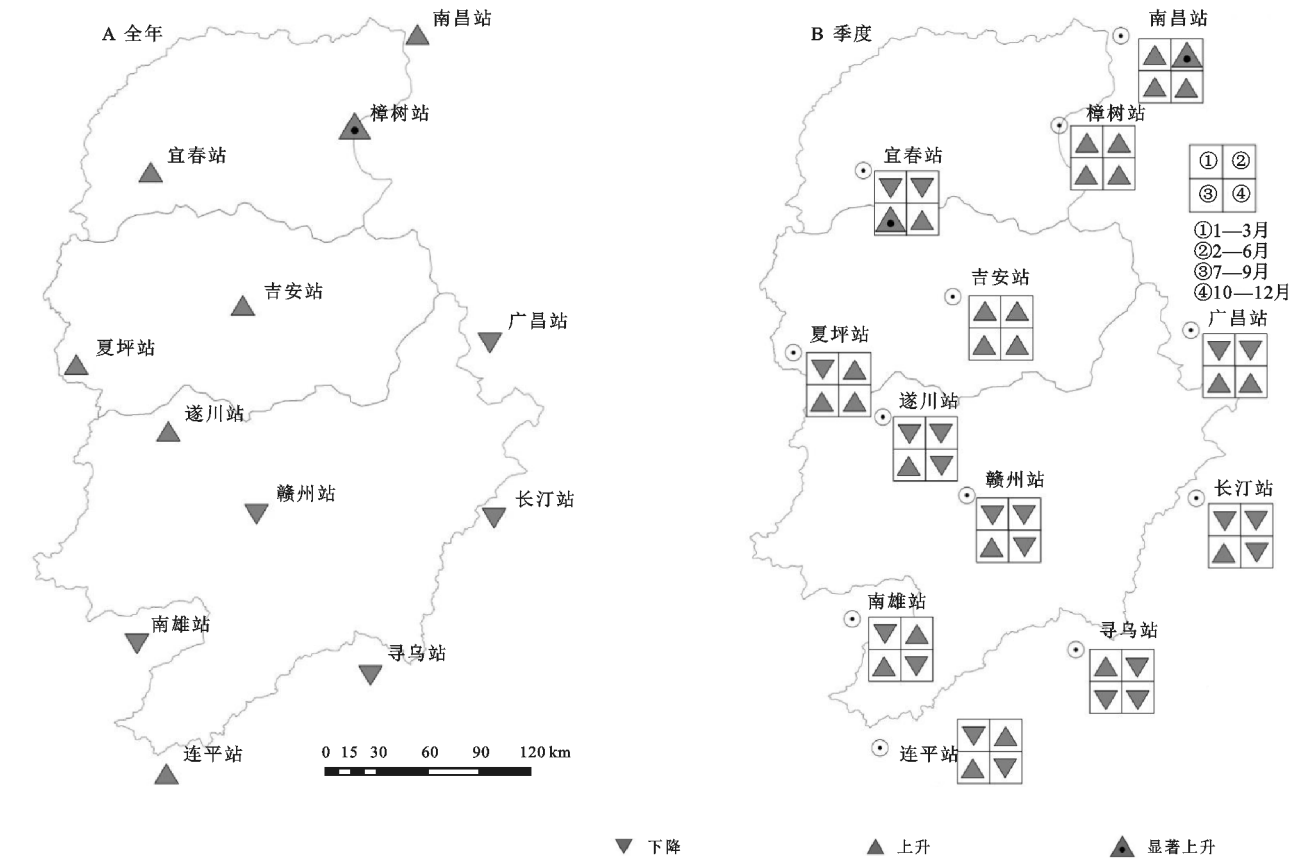


图 3 1958—2014 年气象站降雨侵蚀力趋势变化

3.3 赣江流域年际变化

3.3.1 趋势性分析 流域面降雨侵蚀力由站点降雨侵蚀力的算术平均计算,为分析流域月降雨侵蚀力变化,将 1958—2014 年分为 5 个时段:1958—1970 年、

1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2014 年。由图 4 可知,赣江流域月降雨侵蚀力最大月份为 6 月,平均值为 2 217 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),其次为 5 月份,最小月份为 1 月,平均值

为  $15 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 极值相差近 150 倍, 年内月降雨侵蚀力分布极不均匀。相同月份 5 个时段间变化有所差别, 月降雨侵蚀力最大的 4 个月(5 月、6 月、7 月和 8 月)占年降雨侵蚀力的 75%, 注重降低 5 月至 8 月水土流失风险, 对于全年赣江流域水土保持具有重要作用。选取最大的 4 个月为典型, 运用线性回归分别对其进行趋势分析, 见图 5 可知, 5 月和 6 月没有趋势变化, 7 月和 8 月份有上升趋势, 尤以 7 月变化较明显。

从 4 个季度来看, 5 个时段的主汛期(4—6 月)降雨侵蚀力占全年比重均在 50% 以上, 最小比重时段(1991—2000 年)降雨侵蚀力为  $4\,389 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 占全年比例为 53.3%, 最大比重时段(1958—1970 年)降雨侵蚀力为  $4\,691 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 占比达

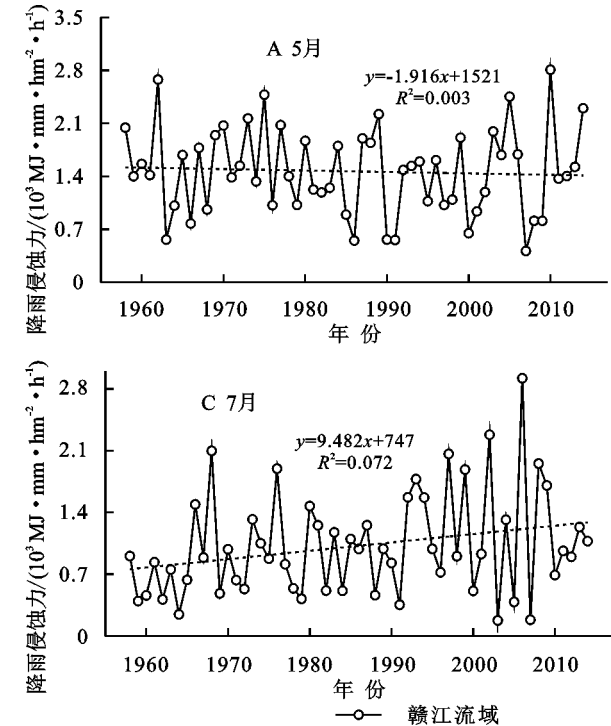


图 5 赣江流域典型月降雨侵蚀力趋势变化

与站点分析类似, 运用 TFPW-MK 法分析流域面降雨侵蚀力趋势, 结果见表 3 和图 6。赣江流域降雨侵蚀力变化存在明显的空间差异, 年降雨侵蚀力倾斜率  $\beta$  变化范围  $0.718 \sim 34.707 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 整体上上游区变化较小, 中下游上升趋势较明显, 其中最大变化点位于樟树站和夏坪站。

对于年降雨侵蚀力, 全流域上升了  $588.639 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 多年倾斜率  $\beta$  为  $12.250 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。对于上中下游而言, 上游年降雨侵蚀力略有上升, 而中游和下游上升趋势较明显, 倾斜率  $\beta$  分别为  $28.505 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,  $34.707 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 其中下游上升趋势显著

$62.5\%$ ; 汛期(4—9 月)降雨侵蚀力占全年比重  $89.4\% \sim 91.6\%$ , 与流域河道输沙时段基本一致; 年降雨侵蚀力最大时段为 1991—2000 年, 约为  $8\,234 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , 其次为 2001—2014 年, 最小时段为 1981—1990 年, 约为  $6\,995 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

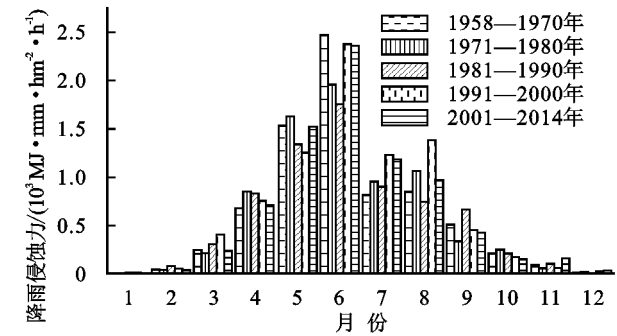
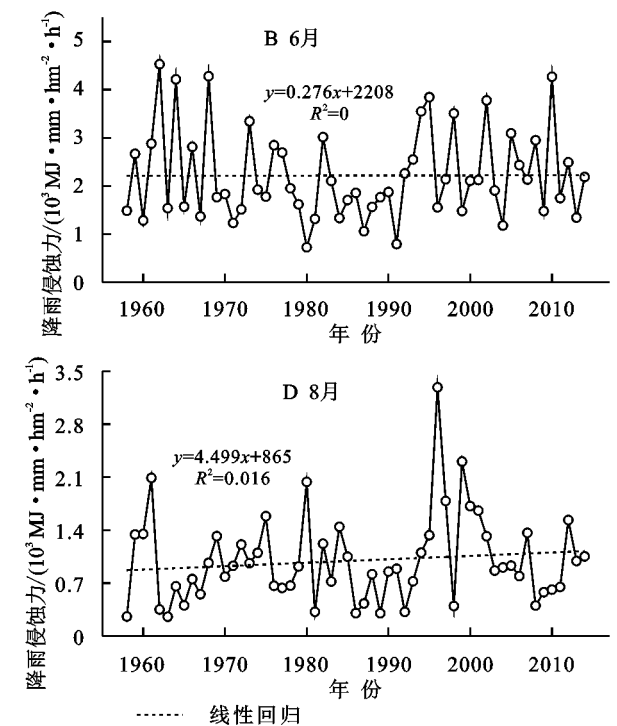


图 4 赣江流域不同时段月降雨侵蚀力变化



( $p < 0.05$ )。汛期(4—9 月)降雨侵蚀力上升趋势较明显, 多年倾斜率  $\beta$  为  $9.587 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

对于季度降雨侵蚀力, 流域除 10—12 月有下降, 其他 3 个季度为上升趋势, 其中 7—9 月上升最快且具有显著性( $\alpha = 0.05$ ), 多年倾斜率  $\beta$  为  $12.481 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

此外, 主汛期(4—6 月)整体分布与全年基本一致, 但较全年降雨侵蚀力下游上升幅度变小, 而上游区则下降速率变大。对于上中下游而言, 中下游在 4 个季度均为上升趋势, 且下游在 7—9 月呈上升趋势显著( $p < 0.05$ ), 上游在 1—3 月和 7—9 月呈上升趋势, 4—6 月和 10—12 月呈下降趋势。

表 3 赣江流域年降雨侵蚀力趋势变化

区域	1—3 月		4—6 月		7—9 月		10—12 月		汛期(4—9 月)		全年(1—12 月)	
	MK 值	$\beta$	MK 值	$\beta$	MK 值	$\beta$	MK 值	$\beta$	MK 值	$\beta$	MK 值	$\beta$
上游	0.199	0.360	-1.081	-12.695	1.411	10.150	-0.709	-1.263	0.062	1.241	0.021	0.718
中游	0.847	0.937	0.833	10.908	0.984	10.370	0.083	0.147	1.356	24.365	1.563	28.505
下游	0.888	1.418	1.039	13.422	1.976 *	15.051	0.860	1.489	1.549	25.811	1.962 *	34.707
全流域	0.709	0.869	0.117	0.822	1.921	12.481	-0.379	-0.681	0.819	9.587	0.902	12.250

注：“\*”表示趋势呈显著性变化( $\alpha=0.05$ )。

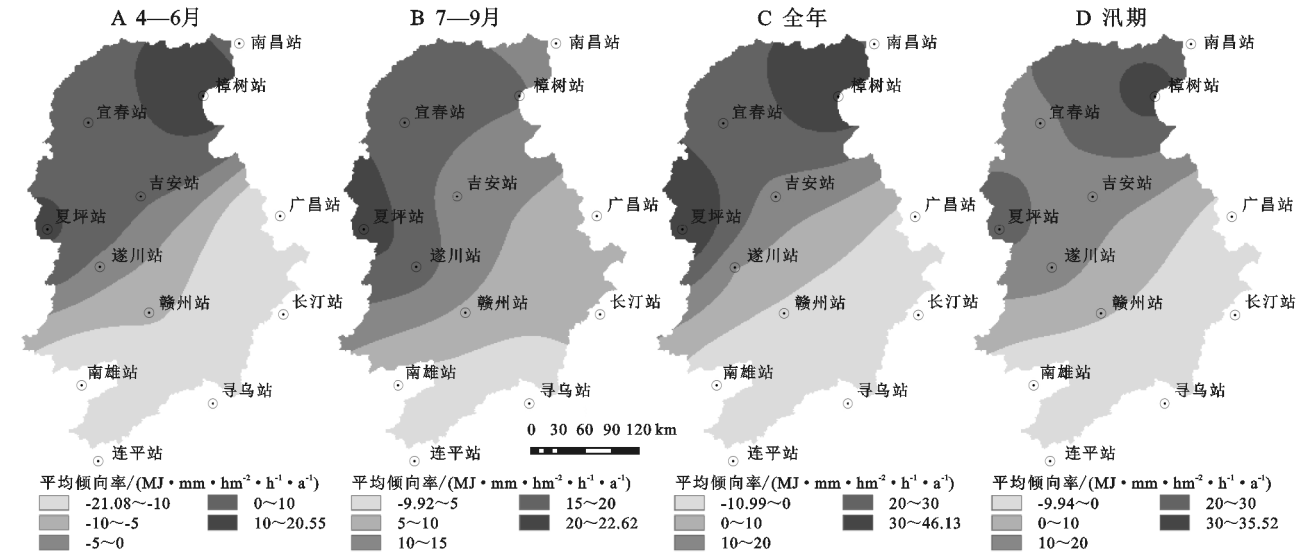


图 6 赣江流域降雨侵蚀力倾向率分布

3.3.2 周期性分析 针对全流域和上中下游的年降雨侵蚀力序列,本文运用小波分析,通过小波方差图分析序列的主要周期成分和周期振荡,结果见表 4,流域年降雨侵蚀力主周期为 4.1 a,振荡周期为 2.0~5.2 a,在上中下游 3 个区域中,上游主周期和振荡幅度均最小,分别为 2.5 a 和 2.0~5.8 a,下游主周期和振荡周期幅度为最大。此外,主汛期(4—6 月)分析结果表明,流域降雨侵蚀力主周期为 2.5 a 为,振荡周期为 2.0~7.2 a,与流域年降雨侵蚀力周期特性有一定差别。在土地开发利用中,针对不同区域的周期性特点,在降雨侵蚀力高值时段加强水土保持设施的维护,降低山区丘陵区土壤扰动,可有效地提升水土保持管理成效。

表 4 赣江流域降雨侵蚀力周期性

参数	主周期	振荡周期
流域—全年	4.1a	2.0~5.2a
流域(4—6 月)	2.5a	2.0~7.2a
上游—全年	2.5a	2.0~5.8a
中游—全年	3.5a	2.0~6.5a
下游—全年	4.1a	2.0~7.5a

以流域年降雨侵蚀力为例,赣江流域降雨侵蚀力具有较明显的多周期嵌套、强弱交替出现的特征。在 1958—2014 年年降雨侵蚀力序列存在 2.5,4.1,6.9,11.7,

23.4 a 的周期,其中仅有 2.5,4.1 a 周期通过了 95% 的红噪声检验。4.1 a 周期对应的小波方差峰值较 2.5 a 的高,表明 4.1 a 为该序列的主周期。在连续小波变换图中,能量密度的峰值主要集中在 1960—1965 年、1970—1976 年、1962—1978 年、1984—1998,2000—2008 年 5 个时段。其中,1960—1965 年、1970—1976 年和 2000—2009 年分别以 2.0~4.2 a,2.0~3.8 a,2.0~5.2 a 为显著周期,并均通过红噪声检验。此外,1962—1978 年、1984—1998 年存在 7.0~7.4 a 和 21~27 a 的变化周期,但没有通过红噪声检验。因此,流域年降雨侵蚀力主周期为 4.1 a 为,振荡周期为 2.0~5.2 a。

3.4 讨论

降雨侵蚀力受侵蚀性降雨影响显著,赣江流域多年平均降雨侵蚀力 7 272.6 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),低于鄱阳湖流域多年平均降雨侵蚀力<sup>[15]</sup>,与周边相比,高于湖南省,低于安徽、福建、广东等东南省区<sup>[12]</sup>,这与所处的气候条件不同有关。赣江流域 10—12 月降雨侵蚀力呈下降趋势,但全年略有上升趋势,主要是由于 7—9 月降雨侵蚀力上升趋势显著导致( $\alpha=0.05$ )。此外,月降雨侵蚀力主要集中 4—6 月,且无显著性变化,建议加强水土流失防治,同时警惕 7—9 月因降雨侵蚀力增强而导致的水土流失增加的风险。

赣江流域降雨侵蚀力空间上与鄱阳湖流域类似,自东向西逐渐增加,南北方向差异较小,东西方向仍是引起赣江降雨侵蚀力变化的地理主轴,也进一步表明降雨侵蚀力受沿东南登陆的台风型降雨影响明显。赣江流域土壤侵蚀严重区较为集中在上游区(即赣南地区),但上游区年降雨侵蚀力略有下降,一定程度上有利于赣南水土流失治理;赣江中下游区为人类活动较为强区域,降雨侵蚀力上升趋势较为明显,需进一步强化公众的水保意识,提高区域的水土保持措施。

## 4 结论

(1) 赣江流域多年平均侵蚀力与多年平均降水量的空间分布基本一致,空间差异性较小,总体上呈自西南向东北呈现递增趋势。此外,上中下游 3 个区域降雨侵蚀力占 4 个季度比例相似且主要集中在汛期(4—9 月),主汛期(4—6 月)占全年比重均在 55% 以上。

(2) 中下游站点年降雨侵蚀力呈上升变化,其中樟树站显著上升,上游区年降雨侵蚀力有下降趋势,汛期变化趋势与年降雨侵蚀力基本一致,以上升为主;1—3 月和 7—9 月多数站点呈上升趋势,显著上升趋势分布于下游区,4—6 月和 10—12 月多数站点呈下降趋势,显著下降趋势主要分布在上游区。

(3) 流域年降雨侵蚀力存在上升趋势,上游略有上升,中游和下游上升趋势较明显,其中下游变化显著( $p < 0.05$ );流域除 10—12 月有下降,其他 3 个季度为上升趋势,其中 7—9 月上升最快且具有显著性( $p = 0.05$ );中下游在 4 个季度均呈上升,且下游在 7—9 月呈上升趋势显著( $p < 0.05$ ),上游在 1—3 月和 7—9 月呈上升趋势,4—6 月和 10—12 月呈下降趋势。周期分析表明,在 1958—2014 年年均降雨侵蚀力的变化主周期为 4.1 a,且存在 2.0~5.2 a 的振荡周期。

赣江流域以红壤土为主,抗侵蚀能力较差,从赣江流域降雨侵蚀力空间分布规律来看,流域大部分地区降雨侵蚀力呈上升趋势,特别在 7—9 月份表现明显,意味着赣江流域因降雨侵蚀力增加而引发水土流失的风险在加剧。对于赣江流域下游地区,对农田、林草地的开发利用尤为突出,而降雨侵蚀力呈显著上升趋势( $p < 0.05$ ),若不重视水土保持措施,容易加剧水土流失。本文仅对赣江流域 1958—2014 年降雨侵蚀力变化特征进行分析,一定程度上揭示了流域降雨侵蚀力的时空演变规律,以后的研究需进一步结合下垫面特点和人类活动方式,提出更具体的水土保持建议,为降低赣江流域水土流失风险提供更有效且更有针对性的措施。

## 参考文献:

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [2] 王志福,钱永甫.中国极端降水事件的频数和强度特征[J].水科学进展,2009,20(1):1-9.
- [3] 李光录,吴发启,庞小明,等.泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J].水科学进展,2008,19(6):868-874.
- [4] 程琳琳,赵文武,张银辉,等.集水区尺度降雨侵蚀力空间分布对土壤流失的影响[J].农业工程学报,2009,25(12):69-73.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [USA] [R]. United States: Dept. of Agriculture, Agriculture Handbook(Usa),1978.
- [6] Angulo-Martínez M, Beguería S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin(NE Spain)[J]. Journal of Hydrology(Amsterdam),2009,379(1/2):111-121.
- [7] 杨轩,梁音,方继青,等.基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型[J].土壤学报,2010,47(2):216-222.
- [8] Richardson C W, Forster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1983,26(1):153-156.
- [9] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.
- [10] KEO Soksamngang,何洪鸣,赵宏飞,等.黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-6.
- [11] Huang J, Zhang J C, Zhang Z X, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960—2005 in the Yangtze River basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2):337-351.
- [12] 何绍浪,郭小君,李凤英,等.中国南方地区近 60 a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):115-125.
- [13] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等.珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- [14] 邵祎婷,何毅,穆兴民,等.秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):416-425.
- [15] 曾瑜,厉莎,胡煜彬.1961—2014 年鄱阳湖流域降雨侵蚀力时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2019,35(1):106-114.
- [16] 张利超,王辉文,谢颂华.江西省水土流失现状与发展趋势分析[J].水土保持研究,2016,23(1):356-359.
- [17] 龚向民,李昆,刘筱琴,等.赣江流域水土流失现状与发展态势研究[J].人民长江,2006,37(8):48-50.

- [12] 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2010.
- [13] 傅伟,陈洪松,王克林.喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究[J].中国生态农业学报,2007,15(5):59-62.
- [14] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.
- [15] 陈美淇,魏欣,张科利,等.基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J].水土保持学报,2017,31(3):16-21.
- [16] 周晓晴,马芊红,张科利.基于样带的陕西省水土流失规律研究[J].水土保持研究,2018,25(4):47-53.
- [17] 何永彬,张信宝,文安邦.西南喀斯特山地的土壤侵蚀研究探讨[J].生态环境学报,2009,18(6):2393-2398.
- [18] 赵文武,傅伯杰,吕一河,等.多尺度土地利用与土壤侵蚀[J].地理科学进展,2006,25(1):24-33.
- [19] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [20] 蔡卓杰,卢远,谢坤坚.广西人类活动对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持,2017(2):51-53.

(上接第 6 页)

- [10] 吴昌广,林德生,肖文发,等.三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J].应用生态学报,2011,22(1):151-158.
- [11] 王明晓.三峡库区降雨侵蚀力研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [12] 卢喜平.紫色土丘陵区降雨侵蚀力模拟研究[D].重庆:西南大学,2006.
- [13] 史东梅,江东,卢喜平,蒋光毅.重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J].农业工程学报,2008(09):16-21.
- [14] United States Department of Agriculture. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation. Technical Bulletin Number 1768[R]. Washington D C:Usda-Ars, 1990:56-72.
- [15] 李树利. USLE 模型在川中紫色土区应用研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [16] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987,30:1389-1396.
- [17] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978:537.
- [19] 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].水土保持报,2000,14(2):19-24.
- [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:中国水利水电出版社,2008.

(上接第 14 页)

- [18] 郑海金,方少文,杨洁,等.近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析[J].水土保持学报,2012,26(1):28-32.
- [19] 肖洋,张汶海,张颖.赣江中下游近 60 年水沙时空分布特征[J].水文,2014,34(6):86-92.
- [20] Yu B, Rosewell. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales [J]. Australian Journal of Soil Research, 1996,34(1):139-152.
- [21] Yu B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics [J]. Australian Journal of Soil Research, 1998,36(1):143-165.
- [22] 宁丽丹,石辉.利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力[J].水土保持研究,2003,10(4):183-186.
- [23] 胡续礼,潘剑君,杨树江,等.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.
- [24] 林璐,刘金涛,甘升伟,等.基于 TFPW-MK 法的太湖流域湖西区降水时空变化分析[J].水电能源科学,2018,36(4):1-5.
- [25] 刘卫林,刘丽娜.修河流域洪水变化特征及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2018,130(5):316-322.
- [26] 孟庆香,刘国彬,杨勤科.基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J].水土保持研究,2010,17(1):10-14.
- [27] 汪青静,许崇育,陈华.克里金日降水插值的不同变异函数比较分析[J].水资源研究,2016,5(5):469-477.
- [28] 马良,姜广辉,左长清,等.江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J].农业工程学报,2009,25(10):61-68.