

# 香溪河流域降雨侵蚀力特征及简易算法初步研究

张 革<sup>1</sup>, 刘德富<sup>2,3</sup>, 宋林旭<sup>1</sup>, 朱晓明<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北工业大学 资源与环境学院, 武汉 430068)

**摘 要:**降雨侵蚀力表示降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,对土壤侵蚀定量预报及评价研究有重要意义。利用三峡库区香溪河流域兴山气象站 1990—2009 年 20 a 的逐日降雨量资料,采用日降雨侵蚀力模型估算了研究区的降雨侵蚀力,分析了降雨侵蚀力的年内、年际演变特征,并以此为基准值建立了降雨侵蚀力简易算法模型。结果表明:香溪河流域年内降雨侵蚀力  $R$  主要集中在 5—8 月,占全年的 71%,峰值与侵蚀性降雨峰值一致,均出现在 7 月; $R$  值年际变化较大,变异系数达到 0.36,多年平均降雨侵蚀力为  $4\,361.55\text{ (MJ} \cdot \text{mm)/}(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , $R$  值与年降雨量和年侵蚀性降雨量年际变化趋势基本一致,但也存在少数异常年份,多年降雨侵蚀力年际变化趋势系数为 0.106,呈增加趋势;简易算法模型决定系数均在 0.9 以上,相对误差较小,均能满足要求,可应用于研究流域,但降雨侵蚀力精确值未知,模型参数有待进一步优化。

**关键词:**日雨量;降雨侵蚀力;演变特征;简易算法模型;香溪河流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0007-06

## Rainfall Erosivity Characteristics and Simple Estimation Method in Xiangxi River Watershed

ZHANG Ge<sup>1</sup>, LIU De-fu<sup>2,3</sup>, SONG Lin-xu<sup>1</sup>, ZHU Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3. College of Resources and Environment Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Rainfall erosivity shows the potential ability of the soil loss caused by rainfall and it is very important for predicting soil loss quantitatively. A rainfall erosivity model using daily rainfall amounts to estimate half month rainfall erosivity directly was adopted to calculate the rainfall erosivity in study area by using daily rainfall data from Xingshan weather station during 1990—2009 of Xiangxi river watershed in Three Gorges Reservoir, and to analyze evolution characteristics of rainfall erosivity between year and interannual, and simple arithmetic models were established. The results show that the distribution of  $R$  in Xiangxi River Watershed mainly focused on the period from May to August, accounting for 71% of all year value, and its peak appears in July consistent with erosive rainfall. The interannual variability of  $R$  value is very large, and the coefficient of variation reaches to 0.36. Yearly average rainfall erosivity is  $4\,361.55\text{ (MJ} \cdot \text{mm)/}(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ . The interannual variability trend of  $R$  value is the same as the trend annual rainfall and erosive rainfall, but there are also some abnormal years. Trend coefficient of rainfall erosivity is 0.106, which is increasing. The coefficient of determination of simple arithmetic models is all over 0.9, and relative error is small, meeting requirements, which can use to study area. Due to the exact value of  $R$  unknown, the model parameters will be further optimized.

**Key words:** daily rainfall amount; rainfall erosivity; evolution characteristics; simple algorithm model; Xiangxi River watershed

收稿日期:2013-01-15

修回日期:2013-03-21

资助项目:国家自然科学基金面上项目(51179095);国家自然科学基金青年基金(51009080,51009081,51209123);三峡大学研究生科研创新基金(2012CX014)

作者简介:张革(1987—),男,湖北省武汉人,硕士研究生,主要从事生态水工学方面研究。E-mail:gzhang481@163.com

通信作者:刘德富(1962—),男,湖北枝江人,教授,博士生导师,主要从事生态水工学研究工作。E-mail:dfliu@ctgu.edu.cn

土壤侵蚀是目前较为严重的生态环境问题之一,并日益受到人们的关注,定量预报土壤侵蚀对控制流域水土流失、农业面源污染及制定相应控制措施等具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。在引起土壤侵蚀的各种因素中,降雨是最主要的动力因子<sup>[4-5]</sup>。降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,即降雨侵蚀力(Rainfall Erosivity,简称 $R$ ),是土壤流失方程中一个重要的基本计算因子<sup>[6-8]</sup>。在基于USLE或RUSLE模型中也得到了应用,如坡面非点源污染模型CREAMS<sup>[9]</sup>、农业非点源污染模型AnnAGNPS及SWAT模型等。

Wischmeier<sup>[10]</sup>在1958年根据美国8 000多个小区年降雨径流资料的分析,首次提出以次降雨总动能 $E$ 与30 min最大雨强 $I_{30}$ 的乘积 $EI_{30}$ 作为衡量降雨侵蚀力的指标,定量表征次降雨可能引起土壤侵蚀的能力。考虑到 $EI_{30}$ 指标是经过统计分析得出的,Wischmeier提出应至少使用20 a以上长度的降雨过程资料计算来保证指标的精度<sup>[2,6]</sup>。王万中等<sup>[11]</sup>经过研究,认为以 $EI_{30}$ 作为侵蚀力指标在我国同样适宜。

由于采用降雨侵蚀力指标计算降雨侵蚀力需要有次降雨过程资料,而在许多国家和地区很难获得长时间序列资料,且资料的整理十分繁琐,进而限制了降雨侵蚀力指标的推广使用,因此许多研究者提出利用气象站常规降雨资料估算降雨侵蚀力的简易算法<sup>[12]</sup>。月或年降雨量是较易获得的雨量资料,利用这些资料计算降雨侵蚀力是较为常见的降雨侵蚀力简易算法<sup>[13-15]</sup>。考虑到日降雨量比月、年降雨量提供更多的降雨特征信息,以日雨量为基础资料的简易算法也得到了不断的发展,相关研究证明以日降雨量计算的多年平均降雨侵蚀力精度最高<sup>[1]</sup>。在已建立的日降雨侵蚀力计算简易算法模型中,Richardson等<sup>[16]</sup>建立了幂函数结构形式的日雨量侵蚀力模型,得到许多学者的进一步分析验证<sup>[17-22]</sup>,但模型中参数具有明显的季节性和区域性,存在一定的不足。章文波等<sup>[23]</sup>利用日雨量资料提出了适合于我国的日降雨侵蚀力模型,用其模型计算多年平均降雨侵蚀力及季节分布能够得到较好的效果。

为了尽可能精确估算降雨侵蚀力 $R$ 值,本文以香溪河流域为研究区,收集了香溪河流域具有代表性的兴山气象站20 a的逐日降雨量资料,利用日降雨侵蚀力模型计算降雨侵蚀力,分析研究区降雨侵蚀力的变化特征,并以此方法计算的降雨侵蚀力 $R$ 作为基准值,通过非线性回归分析建立基于月、年降雨量资料的侵蚀力模型,以期为该區水土流失及土壤侵蚀研究等提供科学依据。

## 1 研究区概况

香溪河流域(110°25′—111°00′ E, 30°38′—31°34′N)位于湖北省西部,长江西陵峡北侧,干流全长94 km,流域面积3 099 km<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。香溪河口距三峡大坝约29 km,是三峡库区坝首的首条一级支流,发源于神龙架林区,流经兴山、秭归,最终在秭归县香溪镇注入长江,是兴山县境内最大的水源。流域属亚热带大陆性季风气候,年平均气温16.6℃,雨量充足,年降雨量为850~1 400 mm,汛期4—9月,其中有雨日67 d,雨量占总雨量的77%<sup>[25]</sup>。香溪河流域属农林复合小流域<sup>[26]</sup>,自然植被和农作物品种丰富,随海拔高度成带状分布。流域内有7种土壤类型,即:黄壤、黄棕壤、棕壤、暗棕壤、石灰土、水稻土、紫色土,其中以黄棕壤和石灰土为主<sup>[27]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及预处理

日降雨量是目前气象站公开发布的最详细降雨量整编资料,利用兴山县气象局提供的兴山气象站1990—2009年20 a的逐日降雨量资料进行分析研究。在所有的降雨中,只有侵蚀性降雨会引起土壤流失<sup>[3]</sup>。已有研究表明,通过摘录侵蚀性降雨,可使工作量减少79%<sup>[4,28]</sup>,还能提高降雨侵蚀力的计算精度,因而需要对日降雨量基础数据进行预处理。侵蚀性降雨标准采用谢云等人<sup>[4]</sup>的研究成果:雨量标准为12 mm,平均雨强0.04 mm/min,最大30 min雨强0.25 mm/min。依据标准,摘录出兴山气象站20 a日降雨量数据中的499次侵蚀性降雨,并分别按日、月和年尺度计算相应的雨量。

### 2.2 研究方法

由于长时间序列次降雨资料的获取难度较大,利用降雨侵蚀力指标 $EI_{30}$ 计算降雨侵蚀力受到一定程度的限制。国内外学者根据各自的资料,建立了很多计算降雨侵蚀力 $R$ 的简易算法模型。这些计算方法大致分为三类:一是根据年降雨量与年特征雨强(如 $I_{30}$ 或 $I_{60}$ )的乘积估算年 $R$ ,如王万中等<sup>[29]</sup>提出的年降雨侵蚀力计算模型;二是利用月降雨量与年降雨量的模比系数估算年 $R$ ,如周伏建等<sup>[30]</sup>提出的计算方法;三是基于日雨量建立的日雨量简易算法。其中一些模型区域性较强,不适合在其它流域及地区使用,而也有一些模型在应用时效果较好,在其它地区可以借鉴。

已有的研究表明,利用日降雨资料计算的降雨侵蚀力结果精度较月、年尺度雨量资料要高。本文

从大量简易算法模型中选出如下具有代表性的方法进行研究区降雨侵蚀力的计算。

2.2.1 降雨侵蚀力的计算 本研究采用章文波等<sup>[23]</sup>修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型计算降雨侵蚀力,其简易算法模型形式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (1)$$

式中:  $R_i$ ——第  $i$  个半月时段内的降雨侵蚀力值  $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $k$ ——半月时段内的天数,半月时段的划分以每月第 15 日为界,每月前 15 天作为一个半月时段,该月剩下部分作为另一个半月时段,这样将全年依次划分为 24 个时段;  $P_j$ ——半月时段内第  $j$  天的日降雨量,要求日降雨量  $\geq 12 \text{ mm}$ ,否则以 0 计算,阈值 12 mm 与中国侵蚀性降雨标准一致<sup>[4]</sup>;  $\alpha, \beta$ ——模型参数,根据区域降雨特征进行计算。具体计算公式如下:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中:  $P_{d12}$ ——日降雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的日平均降雨量 (mm);  $P_{y12}$ ——日降雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的年平均降雨量 (mm)。

通过侵蚀性降雨标准确定产生土壤侵蚀的日平均降雨量和年平均降雨量,利用公式(2),(3)估算模型参数  $\alpha, \beta$ ,结合公式(1)即可求得逐年半月降雨侵蚀力,再进行汇总求得月降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力及多年平均年降雨侵蚀力。

我国降雨存在较为明显的长期变化趋势<sup>[31]</sup>,可以用趋势系数来表示降雨等气候要素的长期变化。降雨侵蚀力是降雨特性的函数<sup>[32]</sup>,降雨侵蚀力的年际变化同样也可以用趋势系数来表示,以反映降雨侵蚀力长期变化趋势的方向和程度。当趋势系数为正,表示在所在的时段内有增加的趋势,反之则有减少的趋势,趋势系数的绝对值越大表示年际变化程度越大。

2.2.2 降雨侵蚀力简易模型建立 考虑到非国家级气象站和水文站获取长时间序列逐日降雨资料并不容易,整理过程较为繁琐,而月、年降雨量相对较易获得,且许多土壤侵蚀模型在计算土壤侵蚀量时只需要多年平均降雨侵蚀力  $R$  值,而不需要详细的日降雨侵蚀力,将以上由日降雨侵蚀力模型计算的结果作为基准值,建立逐月、月平均、逐年降雨侵蚀力简易算法模型,以期对香溪河流域类似研究提供参考。

降雨量和侵蚀力一般表现为幂函数结构形式<sup>[16]</sup>,这与降雨特性有关。通常,历时短、大雨强降雨,往往雨量不大,但具有较大的降雨动能,进而具有

较大的降雨侵蚀力。幂函数结构形式能够体现小雨范围内降雨侵蚀力增加快的特点<sup>[12]</sup>。以章文波等建立的日降雨侵蚀力模型计算的结果作为基准值,建立逐月、月平均、逐年降雨侵蚀力简易算法模型。

(1) 逐月降雨侵蚀力模型,其简易算法模型定义如下:

$$R_{i\text{月}} = \alpha_1 P_{i\text{月}}^{\beta_1} \quad (4)$$

式中:  $R_{i\text{月}}$ ——第  $i$  月降雨侵蚀力  $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $P_{i\text{月}}$ ——第  $i$  月侵蚀性降雨量 (mm);  $\alpha_1, \beta_1$ ——模型参数。

(2) 年际相同月平均降雨侵蚀力模型,其简易算法模型定义如下:

$$R_{\text{月均}} = \alpha_2 P_{\text{月均}}^{\beta_2} \quad (5)$$

式中:  $R_{\text{月均}}$ ——月平均降雨侵蚀力  $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $P_{\text{月均}}$ ——月平均侵蚀性降雨量 (mm);  $\alpha_2, \beta_2$ ——模型参数。

(3) 逐年降雨侵蚀力模型,其简易算法模型定义如下:

$$R_{i\text{年}} = \alpha_3 P_{i\text{年}}^{\beta_3} \quad (6)$$

式中:  $R_{i\text{年}}$ ——第  $i$  年降雨侵蚀力  $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $P_{i\text{年}}$ ——第  $i$  年侵蚀性降雨量 (mm);  $\alpha_3, \beta_3$ ——模型参数。

上述建立的降雨侵蚀力模型是非线性多参数模型,有  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3$  和  $\beta_3$  共 6 个参数,均可采用非线性回归拟合确定。其中,逐月、月平均降雨侵蚀力模型均可通过累加汇总得到年平均降雨侵蚀力。

模型的优劣评估主要通过决定系数  $R^2$  和相对误差系数  $E_r$  来反映,决定系数通过回归分析直接得到,误差系数定义如下:

$$E_r = |R - R'|/R \quad (7)$$

式中:  $R$ ——由公式(1)计算的相应降雨侵蚀力值  $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $R'$ ——建立的简易模型计算的相应降雨侵蚀力值。

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨侵蚀力特征分析

3.1.1 降雨侵蚀力年内变化 图 1 为研究区月平均降雨量、侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力  $R$  值分布图,从图中看出,香溪河流域降雨季节分配不均,呈单峰分布状态,主要集中在 4—9 月,占全年降雨量的 77.3%,而最大月均降雨量出现在 7 月,占全年的 16.4%,其中 20 a 最大月降雨量出现在 1998 年 8 月,降雨量为 358.9 mm;侵蚀性降雨相比降雨量分布主要时段并不完全一致,主要发生在 5—8 月,时间有所缩短,占全年侵蚀性降雨量的 67.7%,峰值亦出

现在 7 月份;降雨侵蚀力月平均  $R$  值分布与侵蚀性降雨趋势基本一致, $R$  值变化范围为  $6.65 \sim 924.36$   $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,其中 5—8 月  $R$  值累计占总量的 71%,峰值出现在 7 月,与侵蚀性降雨最大月份一致。经分析可知,降雨量分布与降雨侵蚀力分布并不完全一致,其原因主要是由不同时期的降雨特征决定的,并不是所有的降雨都会产生土壤侵蚀,当次降雨雨强大,雨滴动能也大,满足降雨侵蚀标准时才会产生土壤侵蚀,研究区 1—4 月及 9—12 月降雨量小,且降雨雨强小,降雨侵蚀力较小,而 5—8 月降雨量大,夏季暴雨较多,雨强较大,降雨侵蚀力较大。

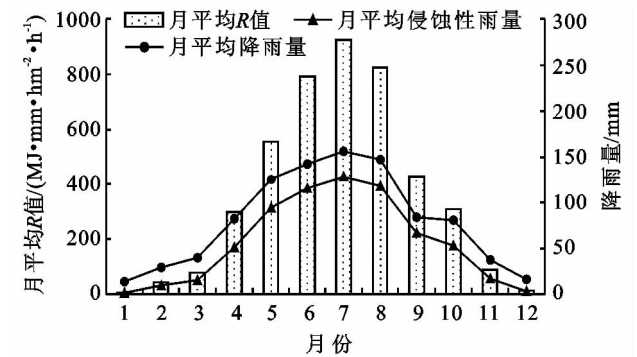


图 1 降雨侵蚀年内变化

3.1.2 降雨侵蚀力的年际变化 从图 2 看出,香溪河流域降雨侵蚀力  $R$  值的年际变化较大,为  $2\,597.34 \sim 8\,017.05$   $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,最大值与最小值相差 3.09 倍,变异系数为 36%,最大值出现在 2003 年,此时年降雨量  $1\,341.7$  mm 亦最大,多年平均降雨侵蚀力为  $4\,361.55$   $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,该值与吴昌广<sup>[33]</sup>、王明晓<sup>[34]</sup>等研究结果相近。多年平均降雨量为  $954.42$  mm,多年平均侵蚀性降雨量占前者的 70.6%,为  $673.74$  mm。降雨量和侵蚀性降雨量年际分布变异系数较  $R$  小,分别为 19%和 27%。 $R$  值与年降雨量和年侵蚀性降雨量变化趋势基本一致,但也存在少数异常年份,如 2007—2008 年降雨量和侵蚀性降雨量均减少,但降雨侵蚀力  $R$  值略有增加;年  $R$  值和年降雨量最大值均出现在 2003 年,而此时年

侵蚀性降雨量比最大值略小,最大值出现在 1996 年。出现以上少数异常年份变化情况可能是与选用的侵蚀性降雨标准  $12$  mm 有关,该侵蚀性降雨标准是谢云等人基于陕西团山沟小流域及所在小区降雨过程资料建立的黄土高原坡面侵蚀标准,在香溪河流域并不一定适用,有待进一步研究。

为了解降雨侵蚀力的长期变化趋势,根据文献<sup>[31]</sup>的方法,经计算,1990—2009 年降雨侵蚀力年际变化趋势系数为  $0.106$ ,表示香溪河流域降雨侵蚀力呈正增加趋势,即降雨引起土壤侵蚀的能力正在增加,需增强流域水土保持治理工作,防止土壤流失情况的不断恶化。

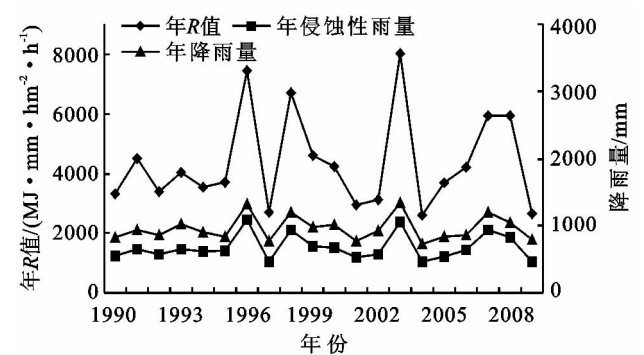


图 2 降雨侵蚀年际变化

### 3.2 降雨侵蚀力简易算法

利用香溪河流域兴山气象站 1990—2009 年 20 a 的逐日降雨量资料,以日降雨侵蚀力模型计算的结果作为基准值,进行汇总得到建立简易模型所需的相应尺度的降雨侵蚀力,经非线性回归分析得到各模型参数,简易算法模型公式如下:

$$R_{i月} = 2.396P_{i月}^{1.2057} \quad R^2 = 0.9803 \quad (8)$$

$$R_{月均} = 3.7208P_{月均}^{1.1215} \quad R^2 = 0.9990 \quad (9)$$

$$R_{i年} = 1.0043P_{i年}^{1.2839} \quad R^2 = 0.9657 \quad (10)$$

其中:各公式中的变量含义同上。3 个简易算法模型的回归参数  $\beta$  为  $1.1215 \sim 1.2839$ ,比较接近,参数  $\alpha$  差异较大,最大值为  $3.7208$ ,最小值为  $1.0043$ (表 1)。

表 1 各类简易算法模型回归统计结果

降雨侵蚀力简易 算法模型类型	模型参数		决定系数	相对误差		
	$\alpha_i$	$\beta_i$		最大值	最小值	平均值
逐月	2.3960	1.2057	0.9803	0.4191	0.0016	0.1139
月平均	3.7208	1.1215	0.9990	0.0964	0.0156	0.0461
逐年	1.0043	1.2839	0.9657	0.1305	0.0011	0.0497

对公式(8)—(10)进行相对误差分析,以日降雨侵蚀力模型计算的结果作为纵坐标,简易算法模型计算结果为横坐标,对模拟结果进行对比,采用线性拟合分析决定系数,评价简易算法模型的优劣。

逐月简易算法模拟结果相对误差为  $0.16\% \sim 41.9\%$ ,平均  $11.4\%$ ,其中相对误差在  $20\%$  以内的占到总数的  $83.1\%$ ,相对误差超过  $30\%$  的仅为  $3.6\%$ ,逐月基准值与模拟值基本一致,决定系数达到

0.941 7(图3)。月平均简易算法模拟结果相对误差为1.56%~9.64%,平均4.61%,月平均基准值与模拟值决定系数达到0.994 2(图4)。逐年简易算法模拟结果相对误差为0.11%~13.05%,平均4.97%,其中相对误差在10%以内的占到总数的90%,逐年基准值与模拟值决定系数为0.967 6,拟合效果较好(图5),利用逐年简易算法模拟结果计算多年平均降雨侵蚀力,与采用日降雨侵蚀力模型计算的多年平均降雨侵蚀力相对误差仅为0.14%,绝对误差只有6.22 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)。综上分析,评估简易算法模型优劣的两个重要指标决定系数R<sup>2</sup>和相对误差系数E<sub>r</sub>均能够满足要求,表示建立的简易模型可信,可以应用于香溪河流域。

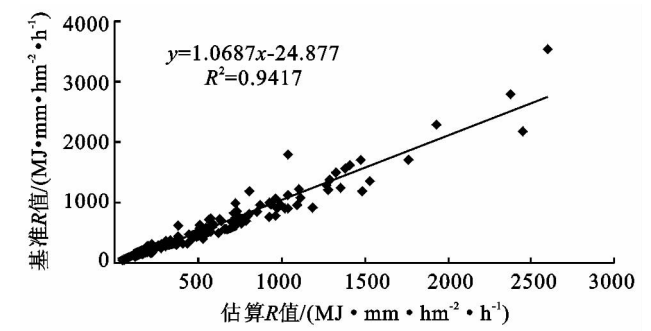


图3 逐月简易算法与基准值对比

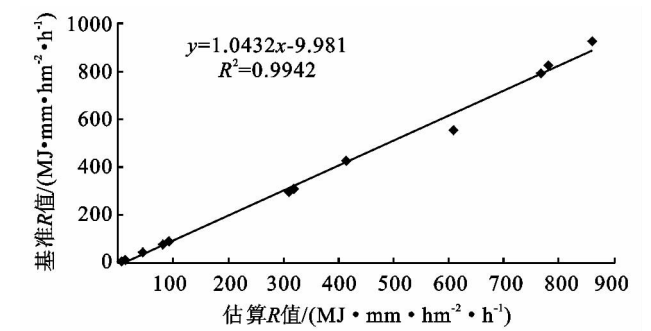


图4 月平均简易算法与基准值对比

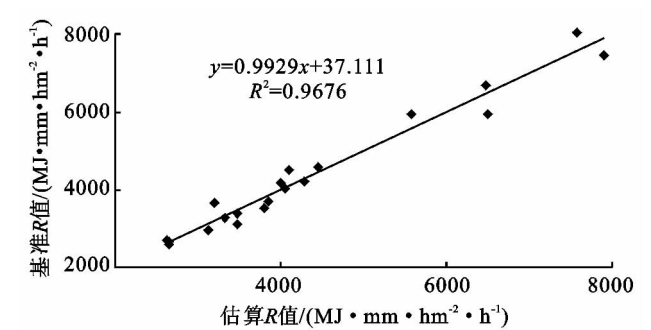


图5 逐年简易算法与基准值对比

从以上的分析可以看出,建立的逐月、月平均、逐年降雨侵蚀力简易算法模型模拟结果与基准值相对误差较小,满足要求,拟合直线的决定系数都在0.9以上,即简易算法计算结果与基于日降雨侵蚀力模型计算的结果较为接近。由于缺乏次降雨过程资料,降

雨侵蚀力的精确值难以获得,采用章文波日降雨侵蚀力模型计算结果作为基准值建立简易模型,忽略了基准值与精确值之间的误差,若能获取长时间序列次降雨资料,建立的模型将会更加合理,估算结果更加准确。

## 4 结论

本文利用香溪河流域具有代表性的兴山气象站1990—2009年20 a的逐日降雨量资料,采用日降雨侵蚀力模型对各半月降雨侵蚀力进行计算,从月和年的尺度对降雨量、侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力变化趋势进行系统分析,并基于日降雨侵蚀力模型计算结果建立了逐月、月平均、逐年降雨侵蚀力简易算法模型,对算法模型进行了优劣评价。结果表明:

(1) 香溪河流域降雨季节分配不均,呈单峰分布状态,主要集中在4—9月,占全年降雨量的77.3%,而最大月均降雨量出现在7月。侵蚀性降雨主要发生在5—8月,相比降雨量分布并不完全一致,占全年侵蚀性降雨量的67.7%,峰值亦出现在7月份。降雨侵蚀力月平均R值分布与侵蚀性降雨趋势基本一致,峰值均出现在7月,R值变化范围为6.65~924.36 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),其中5—8月R值累计占总量的71%。

(2) 20 a降雨侵蚀力R值的年际变化较大,为2 597.34~8 017.05 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),变异系数为36%,多年平均降雨侵蚀力为4 361.55 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),该值与前人研究结果相近,结果真实可靠。最大值出现在2003年,降雨侵蚀力年际变化趋势系数为0.106,呈正增加趋势,需增强流域水土保持治理工作,防止土壤流失情况的进一步恶化。多年平均降雨量为954.42 mm,多年平均侵蚀性降雨量为673.74 mm。降雨量和侵蚀性降雨量年际分布变异系数较R小,分别为0.19和0.27。R值与年降雨量和年侵蚀性降雨量变化趋势基本一致,但也存在少数异常年份,可能与选用的谢云等提出的侵蚀性降雨标准有关。

(3) 以日降雨侵蚀力模型计算结果作为基准值建立的简易模型决定系数都较高,均在0.9以上,相对误差也满足要求,模型拟合效果较好,可应用于香溪河流域。鉴于缺乏流域次降雨过程资料,采用章文波日降雨侵蚀力模型计算结果作为基准值建立的简易模型,忽略了基准值与精确值之间的误差,若能获取详细次降雨资料,依据降雨侵蚀力R精确值建立的模型将会更加合理,估算结果更加精确。

## 参考文献:

- [1] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.
- [2] 刘正佳,刘占仁,王丝丝,等. 基于日降雨的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 水土保持研究,2012,19(2):34-38.
- [3] 章文波,谢云,刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展[J]. 水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [4] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [5] 张黎明,林金石,于东升,等. 我国南方地区降雨侵蚀力指标  $R$  的建立研究:以江西鹰潭地区为例[J]. 水土保持研究,2011,18(5):1-4.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning [M]. Agriculture Handbook No. 537, USDA, 1978.
- [7] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. National Technical Information Service, USDA, 1997.
- [8] 范建容,严冬,郭祥. GIS 支持下的长江上游降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. 水土保持研究,2010,17(1):92-96.
- [9] Knisel W G. CREAMS: A Field Scale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems[M]. Conservation Research Report No. 26, USDA, 1980.
- [10] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.
- [11] 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(I)[J]. 水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [12] 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):398-402.
- [13] Ferro V, Porto P, Yu B. A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and south-eastern Australia[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(1): 3-24.
- [14] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the  $R$ -factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994, 157(1): 287-306.
- [15] Yu B, Rosewell C J. A robust estimators of the  $R$ -reaction for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 559-561.
- [16] 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.
- [17] Haith D A, Merrill D E. Evaluation of a daily rainfall erosivity model[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(1): 90-93.
- [18] Sheridan J M, Davis F M, Hester M L, et al. Seasonal distribution of rainfall erosivity in peninsular Florida [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1555-1560.
- [19] Selker J S, Haith D A, Reynolds J E. Calibration and testing of a daily rainfall erosivity model. [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5): 1612-1618.
- [20] Bagerello V, D'Asaro F. Estimating single storm erosion index[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(3): 785-791.
- [21] Elsenbeer H, Cassel D K, Tinner W. A daily rainfall erosivity model for Western Amazonia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 48(5): 439-444.
- [22] Yu B. Rainfall Erosivity and its Estimation for Australia's Tropics[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36(1): 143-165.
- [23] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
- [24] 王欢,韩霜,邓红兵,等. 香溪河河流生态系统服务功能评价[J]. 生态学报,2006,26(9):2971-2978.
- [25] 崔玉洁,刘德富,宋林旭,等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J]. 水文,2012,31(6):18-23.
- [26] 宋林旭,刘德富,肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(8):990-996.
- [27] 盛前丽,张洪江. 香溪河流域不同土地利用类型的产流特性研究[J]. 西部林业科学,2009,38(2):28-32.
- [28] Xie Y, Liu B, Nearing M A. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1843-1847.
- [29] 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(II)[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):29-39.
- [30] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标  $R$  值[J]. 水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [31] 任国玉,吴虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报,2000,11(3):322-330.
- [32] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [33] 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.
- [34] 王明晓. 三峡库区降雨侵蚀力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.