

日降雨对降雨侵蚀力年雨量简易算法的影响分析

汪言在¹, 闫冬², 李月臣¹, 张述林¹, 苟诗薇³

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875;

3. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 使用重庆市沙坪坝气象站 1951—2010 年日降雨数据构建降雨侵蚀力年雨量简易算法, 分析年雨量简易算法预测精度, 确定了年雨量算法预测精度最高时对应的日雨量, 并进一步探讨了年降雨侵蚀力和降雨参数的时间变化特征。结果表明: (1) 年雨量与年降雨侵蚀力呈指数关系。日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与年降雨侵蚀力的关系最为密切; 采用日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量算法预测年降雨侵蚀力的精度均优于其他日雨量对应算法。 (2) 1951—2010 年年降雨侵蚀力与年降雨参数随时间变化趋势不显著。对于某一变化趋势时段, 日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与时间的相关系数和年降雨侵蚀力与时间的相关系数数值相近。可使用日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量作为替代指标分析水土流失对气候变化的响应。该文研究结果可为提高降雨侵蚀力简易算法预测精度, 深入理解降雨侵蚀力对气候变化的响应以及区域水土流失防治提供参考。

关键词: 年降雨侵蚀力; 日雨量; 重庆市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)03-0150-06

中图分类号: S157.1

Impacts of Daily Rainfall on Simple Algorithm of Annual Rainfall Erosivity

WANG Yan-zai¹, YAN Dong², LI Yue-chen¹, ZHANG Shu-lin¹, GOU Shi-wei³

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Daily rainfall data of 1951 to 2010 obtained from Shapingba weather station was used to build simple algorithm of rainfall erosivity. Accordingly, the prediction accuracy of the simple algorithm was analyzed, the daily rainfall corresponding to the highest prediction accuracy was determined, and the temporal characteristics of annual rainfall erosivity and rainfall parameters were explored. The main results are as follows: (1) There is an exponential relationship between annual rainfall erosivity and annual rainfall. The annual rainfall with daily rainfall of ≥ 25 mm presents the closest relation with annual rainfall erosivity. Additionally, the accuracy for annual rainfall algorithm using daily rainfall of ≥ 25 mm in the prediction of rainfall erosivity is better than the algorithms using other levels of daily rainfall. (2) The changes of annual rainfall erosivity and rainfall parameters with time in the year from 1951 to 2010 are not significant. But for a certain period of time, the correlation coefficient between time and the annual rainfall with daily rainfall of ≥ 25 mm is similar to that between time and annual rainfall erosivity. The responses of soil erosion to climate change can be analyzed by using the annual rainfall with daily rainfall of ≥ 25 mm as an alternative indicator. The results from the research can be used for reference in enhancing the prediction accuracy of the simplified model for annual rainfall erosivity and understanding the responses rainfall erosivity to climate change and regional soil and water loss control.

Keywords: annual rainfall erosivity; daily rainfall; Chongqing City

水土流失是影响生态环境与经济全球性问题^[1-3], 利用通用土壤流失方程 (USLE) 预测和评价水土流失是目前最常用的方法之一^[4]。降雨侵蚀

力因子 R 是通用土壤流失方程中表征土壤潜在侵蚀能力的首要基础因子^[5]。该指标与降雨分布、强度及雨量之间有密切关系, 是研究水土流失对降雨变化乃

收稿日期: 2011-09-06

修回日期: 2011-11-09

资助项目: 重庆市教委科技项目“三峡库区重庆段土壤侵蚀潜能时空变化规律研究”(KJ110608); 重庆师范大学校级青年基金项目“三峡库区重庆段降雨侵蚀力时空分布规律研究”(10XLQ02)

作者简介: 汪言在 (1983—), 男 (汉族), 山东省济宁市人, 博士, 讲师, 研究方向为土壤侵蚀与风沙工程。E-mail: wzy2003qu@gmail.com。

至全球气候变化响应的最佳参数^[6]。进行降雨侵蚀力年际变化分析有助于理解水土流失对降水变化的响应^[7],降雨侵蚀力计算及降雨侵蚀力时间序列构建是目前降雨侵蚀力研究的重要内容^[8]。

依照降雨资料类型,降雨侵蚀力算法可分为两类,(1)次降雨侵蚀力指标算法,其中包括雨强与降雨动能组合算法(如 EI_{10} ^[9], EI_{30} ^[4], EI_{60} ^[10]等);雨强与雨量组合算法(如 PI_5 ^[11], PI_{10} ^[12], PI_{30} ^[13], PI_{60} ^[14]等)。年降雨侵蚀力等于年内所有次降雨侵蚀力指标之和^[4]。次降雨算法存在数据获取较难,数据时长较短,数据处理繁琐等问题^[15]。基于常规气象资料,研究者使用简易算法构建年降雨侵蚀力时间序列。(2)简易算法,指构建常规雨量资料与降雨侵蚀力之间最佳关系式^[16](多使用决定系数 r^2 衡量),包括日雨量算法、月雨量算法、年雨量算法等^[17]。简易算法可弥补次降雨资料的时间长度不足、计算繁琐等缺点,使用简易算法构建降雨侵蚀力长时间序列对于理解全球变化引起的土壤侵蚀变化具有重要实践意义^[7]。

简易算法存在精度不足问题,研究者提出了相应的改进方法。针对日雨量算法,引入侵蚀性降雨标准^[18],或使用日雨量与雨强相结合方法^[19]。针对月雨量算法,或使用日雨量标准^[20],或在月雨量简易算法中引入日降雨信息(使用最大日降雨量、降雨日数等)^[3]。针对年雨量算法,在算法中引入日降雨参数(雨量、降雨日数等)^[8],也有提出使用汛期雨量^[21]进行预测。由上述改进方法可知,时间尺度差异造成的误差是影响简易算法精度的重要因素^[22],低分辨率降雨资料(月、年降雨)与日降雨参数相结合是提高简易算法精度的有效方法,然而目前就低分辨率降雨资料(年、月雨量)简易算法中,加入日降雨信息对简易算法的影响研究少有见到。因此本文选取重庆市沙坪坝气象站1951年1月1日至2010年12月31日共60 a日降水数据,分析日雨量对降雨侵蚀力年雨量简易算法的影响,确定年雨量简易算法预测精度最佳时对应的日雨量。以期通过本研究,为深入理解降雨侵蚀力对降水变化以及气候变化的响应,提高降雨侵蚀力简易算法预测精度及区域水土流失防治提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区选择

本文所选气象站点位于重庆市沙坪坝区,地处四川盆地东部的平行岭谷区,地理坐标为北纬 $29^{\circ}35'$,东经 $106^{\circ}28'$ 。该区域属亚热带季风湿润气候,降雨集中在5—10月^[23],水土流失面积广,侵蚀强度大,是我国水土流失较为严重的地区之一^[24]。

1.2 数据获取

选取沙坪坝站1951年1月1日—2010年12月31日日降水数据,数据来源于中国国家气象局。气象站点日降水资料有多种记录形式,根据本文研究需要,结合研究站地理位置,参考相关研究^[25],本文仅考虑降雨量。

1.3 数据处理与分析

依据研究目标,首先求算1951—2010年逐年降雨侵蚀力,并将该值作为基础数据;其次使用年雨量(使用1951—2000年共计50 a时长数据)与逐年降雨侵蚀力构建年雨量简易算法,比较不同日雨量对应的年雨量简易算法拟合的决定系数 r^2 ,确定当 r^2 最大时,年雨量简易算法对应的日雨量;然后使用年雨量算法预测2001—2010年逐年降雨侵蚀力,将预测值与基础数据相比较,确定误差最小时对应的日雨量;最后分析降雨侵蚀力及最优雨量下降雨参数在1951—2010年随时间变化趋势。具体如下:

(1)逐年降雨侵蚀力计算。由于缺少次降雨数据,本文使用日雨量简易算法^[18]计算年降雨侵蚀力。

$$R = \alpha \sum_{j=1}^k (d_j)^{\beta} \quad (1)$$

式中: R ——降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; d_j ——年内 j 日侵蚀性降雨(侵蚀性降雨标准 ≥ 12 mm); k ——全年侵蚀性降雨日数; α, β ——简易算法参数,分别为0.174和1.987^[18]。将1951—2010年60 a逐年降雨侵蚀力作为基础数据。

(2)年雨量时间序列定义。定义21个日雨量标准 $i=(0, 5, 10, \dots, 100)$,由此获得21组年雨量时间序列 P_i 。如 P_5 表示日雨量 ≥ 5 mm的年雨量序列; P_{10} 表示日雨量 ≥ 10 mm的年雨量序列。

(3)年雨量简易算法。21组年雨量序列与年降雨侵蚀力序列进行回归拟合(时长为1951—2000年),获取21个年雨量简易算法。比较简易算法的决定系数 r^2 ^[26],分析日雨量对年雨量简易算法的影响。

(4)年雨量简易算法精度分析。使用上述21个年雨量简易算法预测2001—2010年逐年降雨侵蚀力,比较预测值与基础数据的误差。精度评价使用平均绝对百分比误差:

$$MAPE = \frac{\sum | (y_i - \hat{y}_i) / y_i |}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中:MAPE——平均绝对百分比误差,度量预测精度; y_i ——基础数据; \hat{y}_i ——年雨量简易算法预测值; n ——预测年数,这里取值为10。通过对比21个MAPE值确定最优年雨量简易算法及其对应的日雨量值。

(5)降雨侵蚀力与年降雨参数趋势分析。分析1951—2010年降雨侵蚀力及年降雨参数(最优年雨量

简易算法对应的日雨量)时间变化趋势,趋势分析使用累积距平方法^[27],显著性检验使用线形倾向估计法。

2 结果与讨论

2.1 逐年降雨侵蚀力

1951—2010 年逐年降雨侵蚀力数值在 1 689.92 (2001 年)~16 616.95 (2007 年) $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ 之间,降雨侵蚀力平均值为 5 419.42 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$,标准差为 3 127.43 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$,变异系数为 57.71 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ 。总体来看,降雨侵蚀力数值主要集中在 2000~7500 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$,多属中等强度年降雨侵蚀力^[15],但出现极大值的年份较集中,如大于 7 500 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ 的年份达到 9 a,其中有 5 a 分布在 1990—2010 年(图 1)。

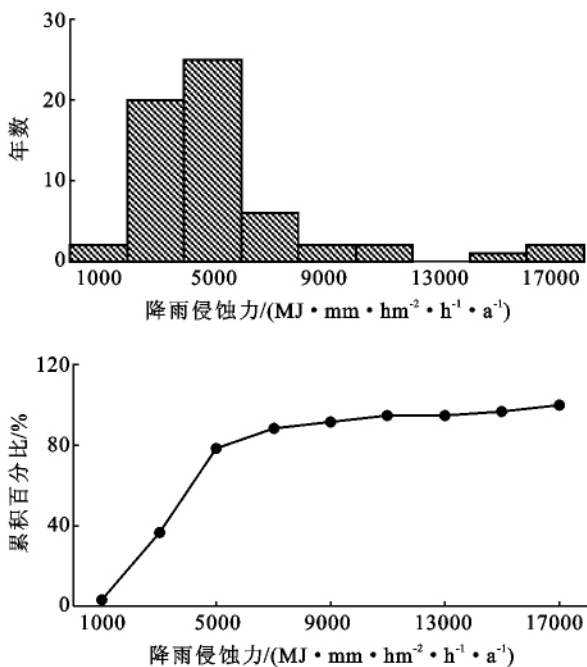


图 1 逐年降雨侵蚀力统计

2.2 降雨侵蚀力年雨量简易算法

使用 21 组年雨量时间序列与逐年降雨侵蚀力时间序列(时长为 1951—2000 年),构建 21 个降雨侵蚀力年雨量简易算法。结果表明,年雨量与逐年降雨侵蚀力之间均呈指数关系($p < 0.01$):

$$R = Ae^{BP_i} \quad (3)$$

式中: R ——年降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; A, B ——指数函数关系式(简易算法)的参数,其值由数据拟合获取; P_i ——不同日雨量对应的年雨量(mm)。简易算法拟合效果使用决定系数 r^2 进行衡量。为直观反映算法拟合效果,同时节省篇幅,本文

仅给出日雨量 $\geq 0 \text{ mm}$, $\geq 25 \text{ mm}$, $\geq 50 \text{ mm}$, $\geq 75 \text{ mm}$ 和 $\geq 100 \text{ mm}$ 对应的年雨量简易算法回归曲线作为示例予以说明(图 2)。

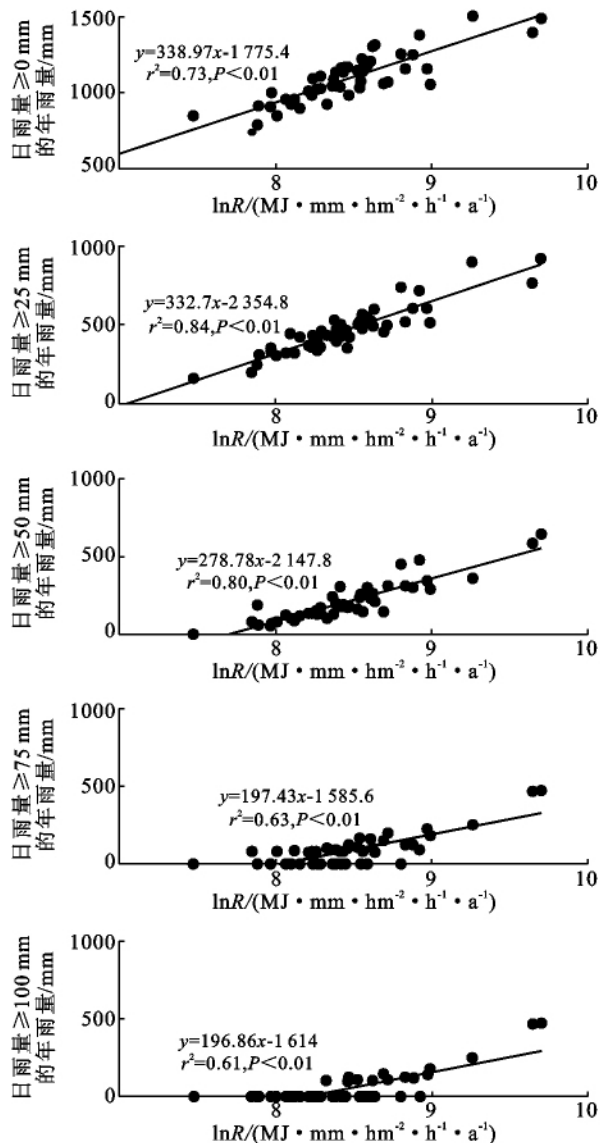


图 2 部分降雨侵蚀力年雨量简易算法拟合效果示例

降雨侵蚀力年雨量简易算法中,参数 A, B 及拟合决定系数 r^2 结果显示,21 组简易算法获取的参数 A 值大小介于 443.68~4028.6,平均值为 2 497.34。参数 B 值大小介于 0.002 1~0.003 4,平均值为 0.002 8。决定系数 r^2 数值范围在 0.60~0.84(图 2),平均值为 0.72。总体来看,21 个简易算法都存在较高的决定系数,且都经过显著性检验(在 0.01 显著水平下)。

为讨论日雨量对年雨量简易算法的影响,对 21 个日雨量标准与 3 个参数的关系进行分析(图 3)。结果表明,参数 A 随日雨量标准的增大而增大;参数 B 变化较复杂,随日雨量标准增大,呈先增大后减小趋势,当日雨量标准为 60 mm 时参数 B 最大;随日雨

量标准增大,拟合决定系数 r^2 也呈先增大后减小趋势,当日雨量标准在 15~60 mm 时, r^2 值较大,其中

日雨量标准为 25 mm 时, r^2 值最大,说明日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与年降雨侵蚀力关系最密切。

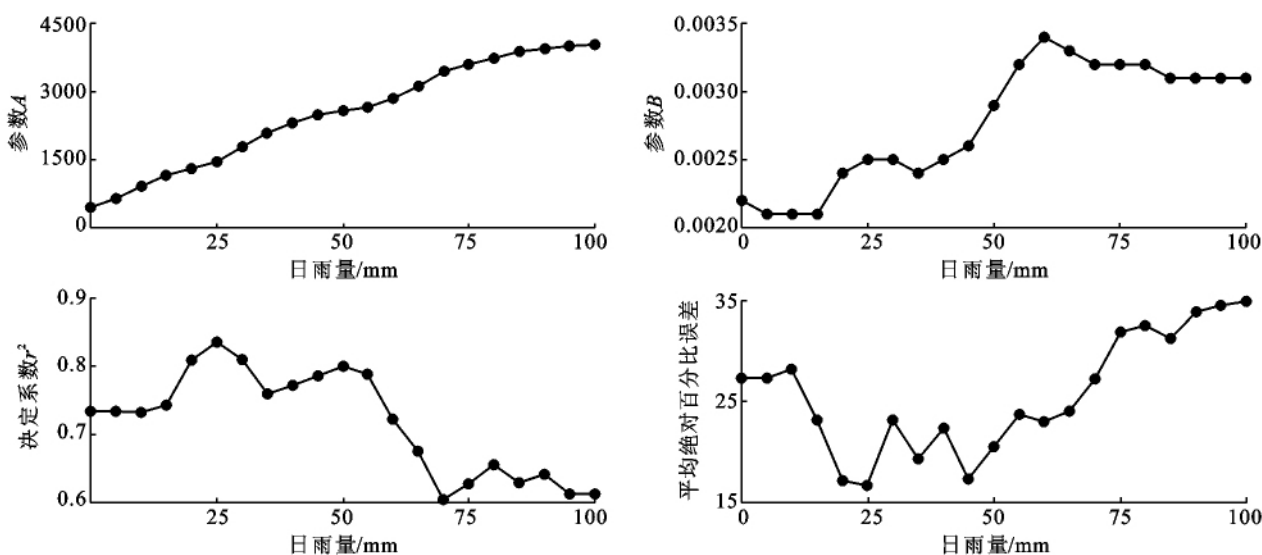


图3 简易算法参数及其预测精度

使用已建立的 21 个关系式计算 2001—2010 年逐年降雨侵蚀力,检验年雨量简易算法的预测精度。平均绝对百分比误差 MAPE 显示(图 3),随雨量标准增大,MAPE 呈先减小后增大趋势,日雨量标准为 20,25 和 45 mm 时,MAPE 值相对较小,分别为 17.2,16.65 和 17.31,表明日雨量为 25 mm 时,年降雨侵蚀力预测效果最好。

降雨侵蚀力简易算法拟合效果分析和简易模型预测效果分析均表明,日雨量为 25 mm 时对应的年雨量简易算法为最优算法。日雨量的确定,为进一步分析年降雨侵蚀力变化提供了基础。

2.3 降雨侵蚀力及降雨参数趋势分析

对 1951—2010 年降雨侵蚀力时间序列、年雨量时间序列、日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量时间序列和日雨量 ≥ 25 mm 的年雨日时间序列进行趋势分析,上述变量的累积距平数值结果(图 4)显示,1951—2010 年,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨日变化分 3 个阶段,1951—1961 年呈减小趋势,1961—1999 年呈增大趋势,1999—2010 年呈减小趋势(图 4a)。日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量变化也呈 3 个阶段,趋势发生转折对应的年份与年雨量一致,只是在 1961—1995 年阶段,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量变化速率比前者大(图 4b)。年雨量变化在 1951—1961 年呈迅速下降趋势,1961—1995 年呈缓慢变化趋势,1995—2010 年呈快速增长趋势(图 4c)。降雨侵蚀力呈先下降后上升趋势,转折年在 1995 年左右(图 4d)。总体来看,降雨侵蚀力和降雨参数在一定时间段呈现不同变化趋势,变化趋势发生转折对应的年份稍有差异,大体出现在 60 年代初期和 90 年代中后期。

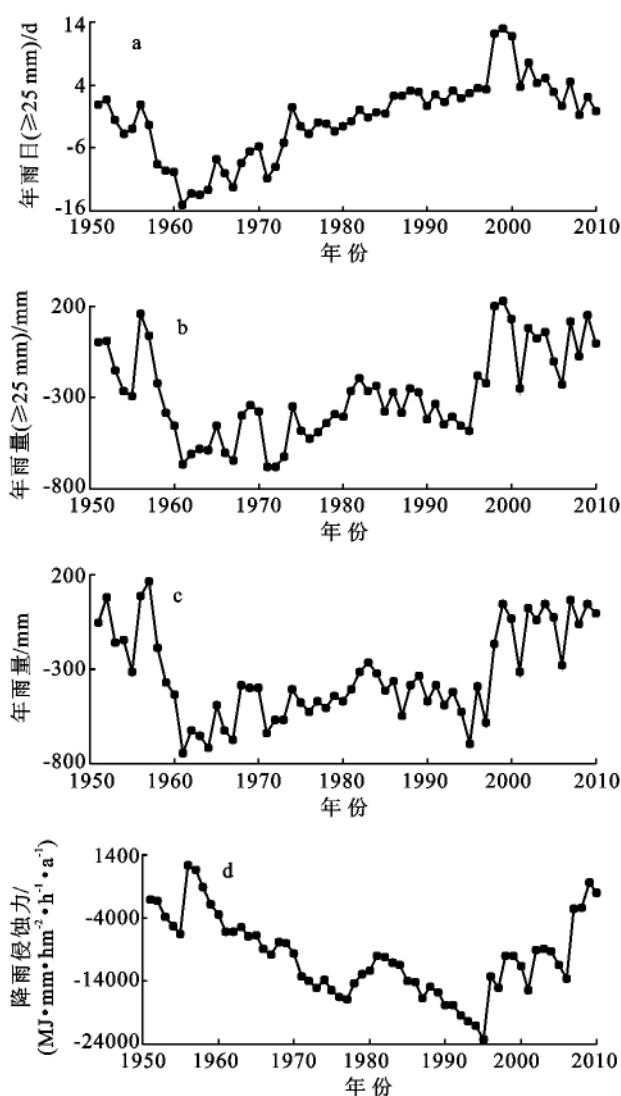


图4 降雨参数及降雨侵蚀力累积距平特征

使用线形倾向估计方法对不同时期段降雨侵蚀力和年降雨参数变化趋势进行显著性检验。结果显示(表 1),上述参数的变化趋势均不显著(在 0.05 显著水平下)。

比较降雨侵蚀力、年降雨参数与时间的相关系数 r 值,降雨侵蚀力与日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量之间

不同时期 r 值均较接近,如 1951—1961 年,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与时间的相关系数 r 值为 -0.28 ,年降雨侵蚀力与时间的相关系数 r 值为 -0.13 ,相比其他两个参数与时间的相关系数,二者较为接近。降雨侵蚀力与日雨量 ≥ 25 mm 的年雨日数之间 r 值差异最大。

表 1 降雨侵蚀力、年降雨参数与时间的相关系数 r

| 项 目 | 降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) | 年雨量/mm | 年雨量/mm (日雨量 ≥ 25 mm) | 年雨日数/d (日雨量 ≥ 25 mm) |
|-----------------|--|---------|------------------------------|------------------------------|
| 1951—2010 | 0.19 | 0.11 | 0.10 | 0.03 |
| 1951—1961 | -0.13 | -0.33 | -0.28 | -0.41 |
| 1961—1995(1999) | -0.03 | -0.06 | -0.02 | 0.14 |
| 1995(1999)—2010 | -0.01 | -0.17 | -0.10 | 0.08 |

2.4 讨论

通过分析可知,年雨量与逐年降雨侵蚀力之间呈指数关系,与缪驰远等^[23]使用次降雨数据获取的结论一致,进一步表明使用日雨量简易算法获取的年降雨侵蚀力作为基础数据是可行的。为分析日雨量对年雨量简易算法的影响,本文构建了降雨侵蚀力年雨量算法,并对其预测精度进行检验,结果表明,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与年降雨侵蚀力之间关系最为密切。高克昌等^[21]研究认为,重庆主城区次降雨侵蚀性标准为 25 mm,并且次降雨 ≥ 25 mm 的年雨量与逐年降雨侵蚀力存在密切关系,本文结果与其相吻合。一般而言,日雨量越大,其对应的日平均雨强越大。对于短时间(次)降雨侵蚀过程,研究表明,不同降雨强度下,土壤侵蚀强度随降雨历时会产生不同的变化趋势。降雨强度越大,其累积降雨量越大,土壤侵蚀强度发生急剧增大的幅度也越大^[28]。但对于长时间(年)降雨而言,日雨量频数呈 Gamma 分布^[29],降雨发生频数多随日雨量增大而减小。综合 2 种时间尺度的降雨特征及降雨侵蚀过程,某种程度上存在特定日雨量标准,使得既能反映强(短)降雨造成的侵蚀,又能反映全年降雨对土壤侵蚀的影响。研究也认为,多年尺度上,更少与更多降水均意味着减少土壤侵蚀模数,表明特定降水量与土壤侵蚀模数之间存在更为密切关系^[30]。王万忠等^[31]对中国降雨侵蚀力雨量特征进行研究,认为南方地区 ≥ 20 mm 的降雨对年降雨侵蚀力贡献最大。其结论与本文研究提出对于重庆沙坪坝地区而言,日雨量 ≥ 25 mm 的降雨对该地区年降雨侵蚀力贡献最大的结论相符。

在确定日雨量的基础上,本文对年降雨侵蚀力及降雨参数时间序列进行了初步分析。尽管 1951—2010 年上述参数变化趋势均不显著,但是就上述

参数与时间相关系数的比较发现,对于存在一定趋势的时段,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与时间的相关系数和年降雨侵蚀力与时间的相关系数数值相近。日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量时间序列可作为替代指标分析水土流失对气候变化的响应。另外日雨量 ≥ 25 mm 标准与我国气象站规定的大雨雨量标准一致,该雨量值的确定,将有助于提高降雨侵蚀力的预测精度,并为研究区水土流失防治提供参考。

3 结论

(1) 研究区年降雨侵蚀力与年雨量呈指数关系。日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与年降雨侵蚀力的关系最为密切;降雨侵蚀力年雨量简易算法中,日雨量 ≥ 25 mm 的算法预测效果最好。

(2) 年降雨侵蚀力与年降雨参数时间序列表明,1951—2010 年 60 a 间时间序列呈一定变化趋势,但变化趋势并不显著。对于存在一定趋势的时段,日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量与时间的相关系数和年降雨侵蚀力与时间的相关系数数值相近。可使用日雨量 ≥ 25 mm 的年雨量时间序列分析水土流失对气候变化的响应。

致谢:本文得到北京师范大学地理与遥感学院章文波副教授,国家气候中心廖要明博士提供帮助,表示感谢!

[参 考 文 献]

- [1] Renschler C S, Mannaerts C, Diekkrüger B, et al. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk: Rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain [J]. Catena, 1999, 34(3/4): 209-225.
- [2] Ramos M C, Martínez-Casasnovas J A. Nutrient losses

- from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event[J]. *Catena*, 2004, 55(1/5): 79-90.
- [3] Diodato N. Predicting RUSLE monthly erosivity index from readily available rainfall data in Mediterranean Area[J]. *The Environmentalist*, 2005, 25(1): 63-70.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb. 1978.
- [5] 章文波, 谢云, 刘宝元, 等. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. *山地学报*, 2003, 21(1): 33-40.
- [6] Sepaskhah A R, Sarkhosh P. Estimating storm erosion index in southern region of I. R. IRAN[J]. *Iranian Journal of Science & Technology. Transaction B, Engineering*, 2005, 29(3): 357-363.
- [7] 张光辉. 黄河流域降雨侵蚀力对全球变化的响应[J]. *山地学报*, 2005, 23(4): 420-424.
- [8] Diodato N, Ceccarelli M, Bellocchi G. Decadal and century-long changes in the reconstruction of erosive rainfall anomalies in a Mediterranean fluvial basin[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(13): 2078-2093.
- [9] 王万忠, 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.
- [10] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简易算法与时空分布规律研究[J]. *中国水土保持*, 1994(4): 12-13.
- [11] 史东梅, 卢喜平, 蒋光毅, 等. 紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 116-123.
- [12] 章文波, 谢云, 刘宝元, 等. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. *地理研究*, 2002, 21(3): 384-391.
- [13] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. *泥沙研究*, 1991(4): 39-46.
- [14] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J]. *亚热带水土保持*, 1989(2): 58-60.
- [15] Silva A M. Rainfall erosivity map for Brazil[J]. *Catena*, 2004, 57: 251-259.
- [16] 卜兆宏, 宫世俊, 阮伏水, 等. 降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用[J]. *遥感技术与应用*, 1992, 7(3): 1-10.
- [17] 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): 35-42.
- [18] 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): 705-712.
- [19] 谢云, 章文波, 刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(6): 53-56.
- [20] 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.
- [21] 高克昌, 赵纯勇. 重庆市主城区降雨侵蚀力计算方法与特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(6): 13-17.
- [22] Diodato N, Bellocchi G. Assessing and modeling changes in rainfall erosivity at different climate scales[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(7): 969-980.
- [23] 缪驰远, 徐霞, 魏欣, 等. 重庆市主城区降雨侵蚀力特征分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(4): 54-61.
- [24] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(长江上游及西南诸河区卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] 房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(5): 711-718.
- [26] 陈晓安, 蔡强国, 郑明国, 等. 黄土丘陵区的小巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J]. *泥沙研究*, 2010(1): 5-11.
- [27] 信忠保, 许炯心, 马元旭. 近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J]. *地理科学*, 2009, 29(1): 98-104.
- [28] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 24-29.
- [29] 丁裕国. 降水量 GAMMA 分布模式的普适性研究[J]. *大气科学*, 1994, 18(5): 552-560.
- [30] 王光谦, 李铁键. 流域泥沙动力学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [31] 王万忠, 焦菊英, 郝小品. 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.