

基于日雨量的延安地区降雨侵蚀力动态特征分析

廖 鑫¹, 徐学选², 刘普灵²

(1. 西北农林科技大学 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:延安地区是黄土高原水土流失最为严重的地区之一。利用延安气象站 1951 - 2005 年的日降雨量数据, 采用日雨量侵蚀力模型估算延安地区降雨侵蚀力, 结果表明: 该地区降雨侵蚀力主要集中在 6 - 9 月, 占到了全年的 85.6%。年降雨侵蚀力的平均值为 $1\,765.73\text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 55 年间, 年降雨侵蚀力变异程度适中, 从整体上看, 趋势保持平稳, 其离差系数 C_v 和变异趋势系数 r 分别为 0.41 和 - 0.071。

关键词:降雨侵蚀力; 日雨量; 延安

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)02-0034-04

The Dynamic Feature Analysis of Rainfall Erosivity in Yan'an Area Based on Daily Rainfall Amounts

LIAO Xin¹, XU Xue-xuan², LIU Pu-ling²

(1. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Yan 'an is one of the areas in which the soil erosion is most serious on the loess plateau. Rainfall erosivity in Yan 'an area was estimated by the method of a simple model based on daily rainfall amounts using daily rainfall amounts data from 1951 to 2005 of Yan 'an weather stations. The results showed that the monthly rainfall erosivity mainly concentrated from June to September; the rainfall erosivity of this period is 85.6 % of annual rainfall erosivity. The annual average value of rainfall erosivity was $1\,765.73\text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, which was a moderate change in the values of erosivity per year. The paper used two indicators to describe the change of annual rainfall erosivity: the coefficient of variation C_v and the coefficient of changed trend r . By calculation, the coefficient of variation C_v was 0.41, the coefficient of changed trend r was - 0.071. So the whole trend of the yearly erosivity value among 55 years was balanced.

Key words: rainfall erosivity; daily rainfall amount; Yan 'an

1 概述

水土流失是目前世界上最严重的生态环境问题之一, 严重制约着农业生产, 阻碍了社会的可持续发展, 土壤侵蚀的产生是多种自然与社会因素相互作用的结果^[1]。降雨是土壤侵蚀的主要动力, 降雨侵蚀力从定量的角度评价了降雨对土壤颗粒分离和搬运的作用。它反映了降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, 是降雨物理性质的函数^[2]。如何准确计算降雨侵蚀力, 对土壤侵蚀的定量预报, 制定科学合理的水

土保持方案都有着重要的意义。

1958 年, Wischmeier 和 Smith 利用美国 35 个水土保持站 8 250 个小区的降雨、侵蚀资料, 发现降雨动能 E 和最大 30 min 雨强 I_{30} 的乘积 EI_{30} 与土壤流失量的相关性最好, 首次提出 EI_{30} 作为量度降雨侵蚀力的指标, 并应用于 USLE (Universal Soil Loss Equation) 和 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 中, 预报多年平均土壤流失量。该方法在世界上得到了广泛的推广。但是由于计算 EI_{30} 指标需要详尽的次降雨过程资料, 许多地区缺

* 收稿日期: 2008-05-15

基金项目: 国家重点基础研究计划(2007CB407205); 中科院西部项目(KZCX2 - XB2 - 05)

作者简介: 廖鑫(1982 -), 男, 河北省石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要从事遥感和 GIS 应用研究工作。E-mail: amd64_aaa@tom.com

通信作者: 刘普灵(1954 -), 男, 陕西蒲城人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀新技术、新方法研究。E-mail: pliu@ms.iswc.ac.cn

乏这样的资料,且计算过程费时费力,这就限制了 EI_{30} 指标的实际应用。因此,各国学者经过进一步的研究,相继推出了采用常规降雨资料估算降雨侵蚀力的简易算法,延伸了降雨侵蚀力的时间计算序列或增大了计算的站点密度。

不同的简易算法根据所使用的常规降雨资料类型的不同,可以分为 3 种类型:一类是根据年雨量的特征值(大于一定临界值的年降雨量或汛期雨量)与年特征雨强(如 I_{30} 或 I_{60})的乘积估算年降雨侵蚀力的值,如卜兆宏等^[3]、王万忠等^[4]提出的算法。二是采用月降雨量与年降雨量的模比系数估算年降雨侵蚀力的值,如吴素业^[5]、周伏建^[6]提出的算法。三是采用具有更多降雨特征信息的日降雨量估算降雨侵蚀力。

Richardson 等建立了幂函数结构形式的日雨量侵蚀力模型,但其参数具有明显的区域差异和季节变化,直接应用存在一定的不足。Yu 等对该模型进行了大量的修正工作,在澳大利亚建立了估算月侵蚀力的模型。章文波等^[7]也以此模型为基础,利用我国 71 个有代表性的气象站点的多年日降雨量资料,建立适用于我国的估算方法,可以较好的分析多年平均降雨侵蚀力及其季节分布。

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一,年土壤侵蚀模数为 5 000 ~ 10 000 t/(km² · a),部分区域超过 20 000 t/(km² · a)。水土流失问题已经严重的制约着这一地区的经济社会的可持续性发展。延安市位于黄土高原丘陵沟壑区,是黄河中上游水土流失的重灾区。通过对这一地区降雨侵蚀力的研究来预报水土流失量,对水土保持治理措施的合理实施,以及研究水土保持措施对控制水土流失作用方面都有着十分重要的意义。

2 资料和方法

2.1 研究区概况

研究所选的延安市位于陕西黄土高原丘陵沟壑区,介于北纬 35°21′ - 37°31′,东经 107°41′ - 110°31′ 之间,是黄河中上游水土流失最严重的地区之一,全区面积 3.7 万 km²,77.8% 的区域存在水土流失,年平均土壤侵蚀模数在 9 000 t/(km² · a)。年降雨量 500 mm 左右,70% 以上集中在 6 - 9 月。

2.2 研究资料

收集了延安市气象站从 1951 年 1 月到 2005 年 12 月这 55 a 间逐日降雨量资料,以及延安市燕沟流域 2003 - 2006 年的部分实测的降雨历时资料,作为分析延安市降雨侵蚀力特征的主要资料。

2.3 研究方法

利用月雨量和年雨量估算降雨侵蚀力是最为常见的一种降雨侵蚀力简易算法,但其属于比较粗略的雨量数据,用其估算精度自然会受到一定限制。日雨量包含着更多降雨特征信息,以其为基础建立降雨侵蚀力的简易估算模型,不仅精度有所提高,而且还能更好的反映降雨侵蚀力的季节变换规律。

Richardson 等研究发现,降雨侵蚀力 R 与降雨量 P 之间存在幂函数关系。即

$$R = aP^b \tag{1}$$

式中: a, b ——模型参数,章文波等通过对此模型的进一步研究,建立了适用于我国的计算半月降雨侵蚀力的模型。

$$R_i = \sum_{j=1}^k (P_j) \tag{2}$$

式中: R_i ——第 i 个半月时段内的降雨侵蚀力,单位为 MJ · mm/(hm² · h); P_j ——该半月时段内第 j 天的日降雨量,此降雨量为侵蚀性降雨,根据谢云等^[8]对侵蚀性降雨标准的研究,要求 $P_j \geq 12$ mm 否则计为 0 mm; k ——该半月侵蚀性降雨的天数,每月 1 - 15 日划分为前一个半月,16 日以后的划分为后一个半月,这样将全年划分为 24 个半月; a, b ——模型参数,根据区域的降雨特征进行计算。即

$$\begin{aligned} &= 0.8363 + 18.177/P_{d12} + 24.455/P_{y12} \\ &= 21.586 \cdot P_{d12}^{-0.1891} \end{aligned} \tag{3}$$

式中: P_{d12} ——日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均降雨量; P_{y12} ——日降雨量 ≥ 12 mm 的年平均降雨量。

采用此种模型计算降雨侵蚀力,其精度受到的所在区域降雨特征的影响,在降雨量比较丰富的地区模型精度更高,而在降雨强度高,历时短的地区,模型精度有一定程度的降低,但完全能用于估算多年平均降雨侵蚀力及其季节分布。

对延安地区降雨侵蚀力的年际变化的分析,主要采用离差系数 C_v 和趋势系数 r 两项指标,其计算公式如式(4)、式(5)。

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \tag{4}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \tag{5}$$

式中: n ——年份序号; x_i ——第 i 年的降雨侵蚀力; \bar{x} ——年降雨侵蚀力的样本平均值; $\bar{t} = \frac{(n+1)}{2}$ 。

C_v 值越大,说明所研究的时段内样本的变化幅度越大,一般认为 $C_v < 0.1$ 为弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 为中

等变异性, $C_v > 1$ 为高度变异性。趋势系数 r 用来反映样本长期变化的方向和程度, 其值为正表示样本在研究的时段内有线性增加的趋势, 反之则为有线性减少的趋势, r 绝对值的大小反映增减的快慢程度^[9]。

3 结果与分析

3.1 模型适用性评价

首先对所选用的模型的相关性进行验证, 由于降雨侵蚀力很难直接测量, 其精确值一般都是根据次降雨侵蚀力指标计算。我国次降雨侵蚀力指标采用次雨量 P 和 10 min 最大时段雨强 I_{10} 的乘积 PI_{10} , 它刻划土壤侵蚀的能力与常用侵蚀力指标 EI_{30} 相当, 但是由于缺乏长时间序列、大范围的次降雨资料, 谢云等^[10] 利用气象站部分年份的整编日雨强及相应雨量资料, 采用日雨量和日雨强乘积的形式, 与此降雨侵蚀力指标相比, 两者计算的侵蚀力具有高度的线性相关, 其回归系数达到了 0.966, 因此降雨侵蚀力的精确值可以采用日降雨指标表示。

$$R = 0.184 \sum_{i=1}^n (P_d I_{10d})_i \quad (6)$$

式中: R ——半月时段的降雨侵蚀力精确值, 单位为 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; P_d —— 12 mm 的日雨量, 否则记为 0, 单位为 mm ; I_{10d} ——日 10 min 最大雨强, 单位为 mm/h ; n ——半月时段的日数, i ——日的序号。

如图 1, 以延安市燕沟流域 2003 - 2006 年的部分实测的降雨历时资料为基础, 经检验, 以日降雨量为基础建立的半月降雨侵蚀力计算模型, 其方程的决定系数偏低, 为 0.521 2, 主要原因是降雨侵蚀力受雨量和雨强多方面影响, 在雨量不太丰富的地区, 该模型相关性较低。但是根据章文波等的研究日降雨量侵蚀力模型估算的多年平均降雨侵蚀力与侵蚀

力精确值基本一致, 他们之间的决定系数达到了 0.999。在置信水平为 0.01 时, 模型估算多年平均侵蚀力与侵蚀力精确值的相对误差没有显著性差异^[7]。采用日降雨量模型可以用来反映该地区降雨侵蚀力的季节特征和年际变化。

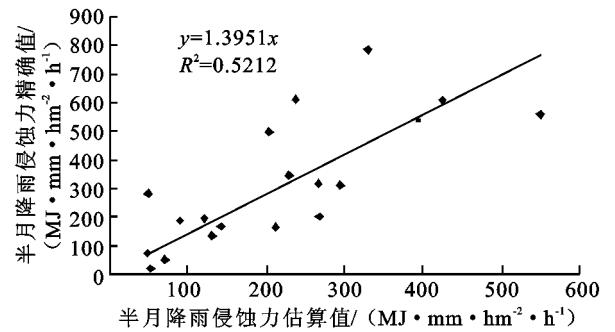


图 1 模型估算值与精确值的散点图

3.2 月降雨侵蚀力特征分析

从计算结果可以看出, 月降雨侵蚀力的变化幅度很大, 最大值为 $2\,842.77 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 最小值为 $0 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。最大值出现在 1981 年的 8 月, 与之对应的是月降雨量的最大值也出现在该月, 为 303.5 mm。表 1 为各月平均降雨量与降雨侵蚀力的对应关系。从图 1 中可以看出, 多年平均月降雨量的频率分布与多年平均月降雨侵蚀力的频率分布趋势基本吻合, 但是又不是完全一致, 7、8 月单位降雨量对降雨侵蚀力的贡献率明显的高于其他月份。这是因为 7、8 月多雨强较大的暴雨, 而其他月份的雨强相对较小, 所以 7、8 月的降雨产生的降雨侵蚀力更大, 这一结果也充分说明了降雨侵蚀力的大小不仅仅决定于降雨量, 还受雨强等其他降雨特征的影响。

6 - 9 月的降雨侵蚀力占到了全年的 85.6%, 降雨量为全年的 73.4%。其中 8 月的平均降雨侵蚀力最高, 为 $546.25 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 占全年的 30.94%, 对应的降雨量占全年的 23.23%。

表 1 月平均降雨量与月平均降雨侵蚀力的对应关系

项 目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
降雨量/mm	1.50	1.97	11.74	26.92	42.77	64.13	114.05	118.47	78.00	37.92	11.18	1.26
降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	0	0	10.98	41.54	118.52	211.92	483.71	546.25	269.59	73.04	10.17	0

3.3 年降雨侵蚀力特征分析

主要采用最大年降雨侵蚀力与年平均降雨侵蚀力的比值, 最大年降雨侵蚀力与最小年降雨侵蚀力的比值, 离差系数 C_v 和趋势系数 r 这 4 个指标进行分析。在所选的研究时段 1951 - 2005 年中, 年降雨侵蚀力的平均值为 $1\,765.73 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 最大值为 $4\,716.41 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ (1981 年),

其降雨量为 774 mm (最大年降雨量为 1964 年的 817.9 mm), 最小值为 $492.73 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ (1974 年), 其降雨量为 296.4 mm。(表 2) 通过计算得出, 最大年降雨侵蚀力为平均降雨侵蚀力的 2.67 倍, 其对应的降雨量为年平均降雨量的 1.52 倍; 最大年降雨侵蚀力为最小年降雨侵蚀力的 9.58 倍, 其对应降雨量为最小年降雨侵蚀力对应降雨量

的 2.61 倍。究其原因,1981 年有几次较大的暴雨:如 8 月 15 日的日降雨量达到了 139.9 mm;7 月 3 日达到了 62.4 mm;8 月 18 日为 45 mm;8 月 23 日为 44.2 mm。由于暴雨的雨强很大,其产生的降雨侵蚀力也就远远大于相同降雨量的小雨强降雨。

经过计算得出,1951 - 2005 年间延安市年降雨量离差系数 C_v 为 0.23,年降雨侵蚀力离差系数 C_v 为 0.41,说明研究时段内年降雨量和降雨侵蚀力变异程度均为适中。年降雨侵蚀力变化的趋势系数 r 为 - 0.071,这表明在 1951 - 2005 年间,降雨侵蚀力略有减少的趋势,但是幅度极小,基本上可以认为年

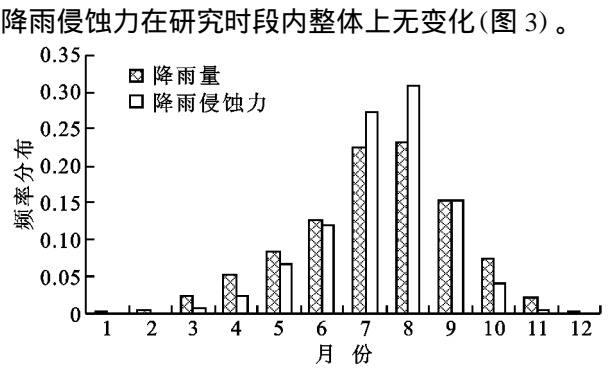


图 2 多年平均月降雨量与多年平均月降雨侵蚀力的频率分布关系

表 2 各年降雨侵蚀力估算值					
年份	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹)	年份	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹)	年份	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹)
1951	1280.10	1970	1433.88	1989	1787.53
1952	1085.02	1971	1456.07	1990	2020.15
1953	2082.62	1972	997.42	1991	1381.76
1954	947.37	1973	2278.35	1992	929.09
1955	1315.83	1974	492.14	1993	2386.27
1956	1631.99	1975	2355.85	1994	2178.31
1957	1472.57	1976	1374.01	1995	1254.64
1958	3311.07	1977	1124.57	1996	972.69
1959	1728.37	1978	1970.53	1997	1261.78
1960	1800.93	1979	2315.52	1998	1792.87
1961	3012.65	1980	1410.01	1999	828.61
1962	2059.46	1981	4716.41	2000	746.17
1963	2012.23	1982	1656.50	2001	2064.64
1964	2614.39	1983	2336.91	2002	1895.66
1965	943.73	1984	1933.47	2003	1862.27
1966	1810.05	1985	1872.42	2004	1148.68
1967	1587.94	1986	1380.23	2005	1592.18
1968	2082.39	1987	1753.53		
1969	1929.23	1988	3446.17		

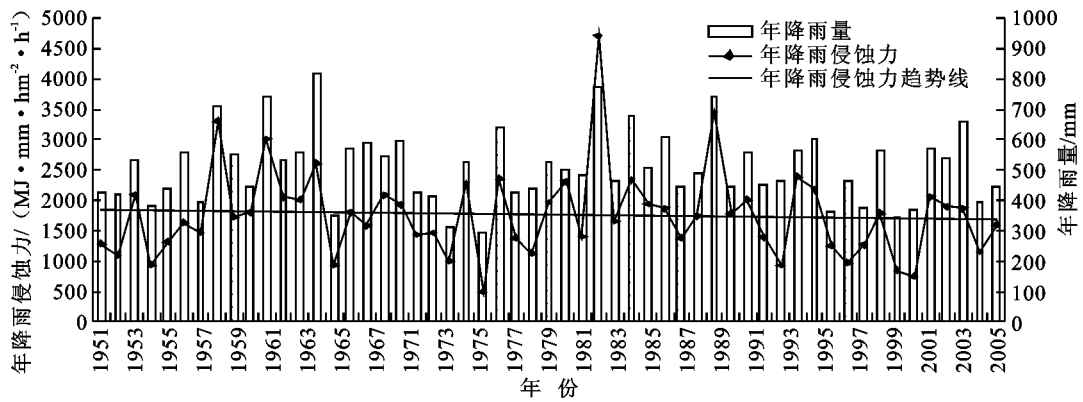


图 3 1951 - 2005 年间年降雨侵蚀力变化趋势

4 结 论

(1) 利用简易算法估算降雨侵蚀力,不仅简化了复杂的计算过程,促进了土壤侵蚀模型在实际预报

中的应用,而且大大推动了常规气象资料在土壤侵蚀定量研究中应用,延伸了降雨侵蚀力的时间计算序列或增大了计算的站点密度。

(下转第 41 页)

量的计算; E_i ——第 i 降雨侵蚀量的实测值; N ——试验观测样本量。

表 2 模拟精度与评价

模型	模型有效系数	平均误差率/ %
$E(I, S)$	0.99	1 %
$E(w, n)$	0.91	6.18 %

常规柯布 - 道格拉斯函数型等土壤侵蚀统计模型的有效系数 E_f 大多在 0.65 ~ 0.85 之间,平均误差率 多在 25 % ~ 40 % 之间^[9],大多不能满足工程应用对模拟精度的要求。本文两个二因子高维指数非线性模型的模型有效系数 $E_f > 0.91$,平均误差率 $< 6.2\%$,模拟精度较高。

4 结 论

(1) 基于单变量高维指数非线性 $GWS(n, 1)$ 模型的扩展,构建了多变量高维指数非线性模型 $GWS(n, m)$, $GWS(n, m)$ 模型具有非周期、非线性、非正态振荡递减特征,各自变量的弹性系数呈振荡递减并趋于零。这是 $GWS(n, m)$ 模型于常规模型的显著差别。经过 MATLAB 寻优,实现了模型参数搜索 —— 辨识。人工降雨条件下的坡耕地土壤侵蚀模拟结果表明:模型有效系数 $E_f > 0.91$,平均误差率 $< 6.2\%$,模拟精度较高。

(2) 应用 $GWS(n, m)$ 模型,通过对影响坡面土壤侵蚀的四大因子 (I, S, w, n) 进行系统研究,揭示了复杂信息的内在规律,有望建立具有广泛适用性的土壤侵蚀多变量高维指数非线性模型。为非线性

动力学研究提供新的建模思路,在生物、生态、资源等自然社会经济领域具有泛适用性,应用前景广阔。

参考文献:

[1] 罗志军,张俊. 土壤侵蚀模型的研究现状与展望[J]. 安徽农业科学,2007,35(27):574-576.

[2] 蔡强国,刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展,2003,22(3):242-250.

[3] Wischemier W H,Smith D D. Predicating rain fall dro-sion losses[R]. USDA Agriculture Handbook . U. S. Department of Agriculture,1978.

[4] Renard K G,Foster G R ,Weesies G A ,et al. Predic-ting soil erosion by water :A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss E2 equation (RUSLE) [M]. Washington: USDA Hand-book,1997:537.

[5] 陈永宝,陈志伟,郭志民. USLE 在我国的应用和发展[J]. 中国水土保持,2003(10):11-12

[6] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践,2005,25(4):22-28.

[7] 孙全敏,王占礼,邵明安. 生物种群 Logistic 扩展模型灰色增量生成参数辨识方法及应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(8):105-113.

[8] 孙全敏,王占礼,邵明安. 灰色非线性增量动态模型在农药残留量模拟中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(9):125-129.

[9] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,1(2):1-9.

(上接第 37 页)

(2) 延安地区降雨侵蚀力的季节分布明显,主要集中在 6 - 9 月,占全年降雨侵蚀力总量的85.6%,月降雨侵蚀力的频率分布与月雨量的频率分布趋势相吻合,但又不完全一致,它还受到雨强等其他降雨特征因子的影响。

(3) 在 1951 - 2005 年间,延安地区的年降雨侵蚀力在 492.14 ~ 4 716.41 MJ · mm/ (hm² · h) 之间,平均值为 1 765.73 MJ · mm/ (hm² · h),最大值为平均值的 2.67 倍,为最小值的 9.58 倍。年降雨侵蚀力的变异程度适中,其离差系数 C_v 为 0.41,变化趋势系数 r 为 - 0.071,在研究时段内整体上基本无变化。

参考文献:

[1] 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.

[2] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004:

310-337.

[3] 卜兆宏,董勤瑞,周伏建,等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究[J]. 土壤学报,1992,29(4):408-417.

[4] 王万忠,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算和分布() [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):29-39.

[5] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空规律[J]. 中国水土保持,1994(4):12-13.

[6] 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):12-18.

[7] 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.

[8] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[9] 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):54-60.

[10] 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.