

# 基于不同量级日降雨的赣南湘水流域降雨 侵蚀力时空变化特征分析

余敏琪<sup>1,2</sup>, 刘士余<sup>1,2</sup>, 盛菲<sup>1,2</sup>, 吴祎楠<sup>1,2</sup>, 刘长征<sup>1,2</sup>

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045;

2.江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 江西 南昌 330045)

**摘要:** [目的] 探明赣南湘水流域不同量级降雨侵蚀力时空变化特征, 为该流域的土壤侵蚀防治和生态环境治理提供重要的科学依据。[方法] 以赣南湘水流域为对象, 采用章文波日降雨模型, 通过对降雨侵蚀力的比较分析, 筛选普通克里金插值(OK)、反距离加权插值(IDW)和径向基函数插值(RBF)中的最优插值方法, 并对湘水流域降雨侵蚀力时空变化特征进行了分析。[结果] 结果表明: ①IDW比OK和RBF更适用于湘水流域。②1984—2021年湘水流域不同量级降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力的空间分布差异均随量级的增大而增大, 且二者总体均呈北部和南部偏高, 中部偏低的趋势。③1984—2021年湘水流域年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力的变异系数( $C_v$ )分别为0.26, 0.15, 0.25, 0.47, 均属于中等变异, 且年际变化趋势均不显著。不同量级降雨侵蚀力的大小、所占年降雨侵蚀力的比例、年际变化速率随量级的增大而增大, 且其震荡周期基本一致, 均为3~4个震荡周期。[结论] 赣南湘水流域北部是发生土壤侵蚀可能性较高的地区, 因地制宜加强该地区水土保持措施将有助于湘水流域的土壤侵蚀防治。

**关键词:** 湘水流域; 中雨、大雨、暴雨侵蚀力; 降雨侵蚀力; 江西省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)03-0274-10

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 余敏琪, 刘士余, 盛菲, 等. 基于不同量级日降雨的赣南湘水流域降雨侵蚀力时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 274-283. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.028; Yu Minqi, Liu Shiyu, Sheng Fei, et al. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in Xiangshui River basin of Southern Jiangxi Province based on different daily rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 274-283.

## Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics of Rainfall Erosivity in Xiangshui River Basin of Southern Jiangxi Province Based on Different Daily Rainfall

Yu Minqi<sup>1,2</sup>, Liu Shiyu<sup>1,2</sup>, Sheng Fei<sup>1,2</sup>, Wu Yinan<sup>1,2</sup>, Liu Changzheng<sup>1,2</sup>

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural

University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 2.Jiangxi Provincial Technology Innovation

Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of different magnitudes of rainfall erosivity in Xiangshui River basin of Southern Jiangxi Province were determined, in order to provide an important scientific basis for soil erosion prevention and ecological environmental management in the basin. [Methods] Taking Xiangshui River basin in Southern Jiangsu Province as the research object, the Zhang Wenbo daily rainfall model was used with comparative analysis of rainfall erosivity to select the optimal interpolation method among ordinary Kriging interpolation (OK), inverse distance weighted interpolation (IDW), and radial basis function interpolation (RBF). The spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity

收稿日期: 2023-10-10

修回日期: 2023-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同尺度上植被空间分布格局的水土保持效应研究”(31960331); 江西省水利科学院开放研究基金项目“森林植被空间分布格局的水土保持效应研究”(2023SKLS01)

第一作者: 余敏琪(2000—), 女(汉族), 江西省上饶市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与森林水文。Email: 2537016037@qq.com。

通信作者: 刘士余(1975—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与森林水文方面的研究。Email: 397013250@qq.com。

was analyzed in Xiangshui River basin. [Results] ① IDW was more suitable than OK and RBF in Xiangshui River basin. ② The spatial distribution differences of rainfall erosivity and annual rainfall erosivity of different magnitudes in Xiangshui River basin from 1984 to 2021 increased with the increase of magnitude, and both showed an overall trend of higher values in the north and south, and lower values in the central region. ③ The coefficients of variation of the erosion force of annual rainfall, moderate rain, heavy rain, and rainstorm in Xiangshui River basin from 1984 to 2021 were 0.26, 0.15, 0.25, and 0.47, respectively, all of which were classified as moderate variations, and the interannual variation trend was not significant. The magnitude of rainfall erosion force of different magnitudes, the proportion of annual rainfall erosion force, and the interannual change rate increased with the increase of magnitude. The oscillation cycles were basically the same, all of which were 3~4 oscillation cycles. [Conclusion] The northern part of the basin is a region with high possibility of soil erosion. Strengthening soil and water conservation measures in this region according to local conditions will help prevent and control soil erosion in the Xiangshui River basin.

**Keywords:** Xiangshui River basin; erosion of moderate rain, heavy rain, heavy rain; rainfall erosion force; Jiangxi Province

土壤侵蚀成因复杂、危害严重,是全世界不可忽视的环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。在全球气候变暖的背景下,中国极端降雨事件发生的频率不断增加<sup>[3-4]</sup>,导致降雨侵蚀力增大,而降雨侵蚀力的时空差异对土壤侵蚀的影响程度不同。因此,降雨侵蚀力的时空变化分析对优化水土保持措施具有十分重要的意义。

自 Wischmeier 等<sup>[5]</sup>首次用降雨动能( $E$ )和最大 30 min 雨强( $I_{30}$ )的乘积( $EI_{30}$ )来表示和度量次降雨侵蚀力后,章文波等<sup>[6]</sup>基于多个雨量站日降雨资料建立了日降雨模型,该模型被广泛用于中国降雨侵蚀力时空变化的研究<sup>[7-8]</sup>。同时,许多学者选用不同的插值方法来分析降雨侵蚀力的空间分布,并采用交叉验证选出最优插值方法。如白云博等<sup>[9]</sup>采用交叉验证得出反距离加权插值更适合安徽省,并指出安徽省降雨侵蚀力整体呈自北向南递增趋势,东西变化幅度不大。陈正发等<sup>[10]</sup>通过交叉验证指出克里金插值在云南省的精度最高,分析表明该省降雨侵蚀力呈自西南向东北递减的趋势。李钢等<sup>[11]</sup>通过交叉验证和方差分析等方法得出径向基函数插值更适合浙江省降雨侵蚀力空间变化的研究。当前,中国学者对年尺度下降雨侵蚀力的时空分布特征已取得一些定性和定量的研究结果,但土壤侵蚀往往与雨强较大的降雨事件有关,且已有学者开展相关研究,如邹玉霞等<sup>[12]</sup>分析得出重庆市年、不同量级降雨侵蚀力空间分布均呈东高西低的分布趋势。赵平伟等<sup>[13]</sup>指出中雨侵蚀力在云南省各区域呈减少趋势,而年、大雨和暴雨侵蚀力变化趋势有增有减,各量级降雨侵蚀力空间分布的差异随量级的增大而变大。综上可知,选用最优的插值方法开展不同量级降雨侵蚀力的时空变化研究对于土壤侵蚀的预测和治理是十分必要的。

江西省属于中国南方红壤区,是中国水土流失最严重的地区之一,当前,已有学者在该区开展年降雨侵蚀力时空分布的相关研究。如马良等<sup>[14]</sup>研究表明江西省多年平均降雨侵蚀力总体上呈增长趋势,空间上呈由西向东递增的规律。鲁向晖等<sup>[15]</sup>指出赣江流域年降雨侵蚀力总体上表现为不显著的增长趋势,空间上呈从东北向西南递减。但对流域尺度上不同量级降雨侵蚀力的时空分布研究较为少见。因此,本文基于赣南湘水流域 12 个雨量站 1984—2021 年的逐日降雨资料,采用日降雨模型计算降雨侵蚀力,选出流域最优插值方法,分析年尺度下不同量级降雨侵蚀力的空间变化特征,并借助 Mann-Kendall 检验、小波分析等方法分析其时间变化特征,研究结果可为湘水流域土壤侵蚀的防治提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

湘水流域位于江西省赣州市东南部,地处江西、福建以及广东三省交界处,发源于寻乌县罗珊乡天湖下,属长江流域鄱阳湖水系,是赣江上游贡江的源头之一,流经寻乌县、会昌县,其主河道长 103.4 km,流域面积为 2 049.3 km<sup>2</sup>(图 1)。本研究选取的为麻州水文站(115°28′12″E, 25°18′36″N)的控制范围(115°33′—116°2′E, 25°1′—25°37′N),约为 1 758 km<sup>2</sup>。研究区气候类型为亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 538.9 mm,多年平均降雨日数 142 d,且主要集中在 3—6 月,多年平均降雨侵蚀力 8 126.01(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。流域地势东南高西北低,地貌多为低山和丘陵,海拔 61~1 234 m,土壤类型主要为红壤,植被类型主要为马尾松,植被覆盖度较高。

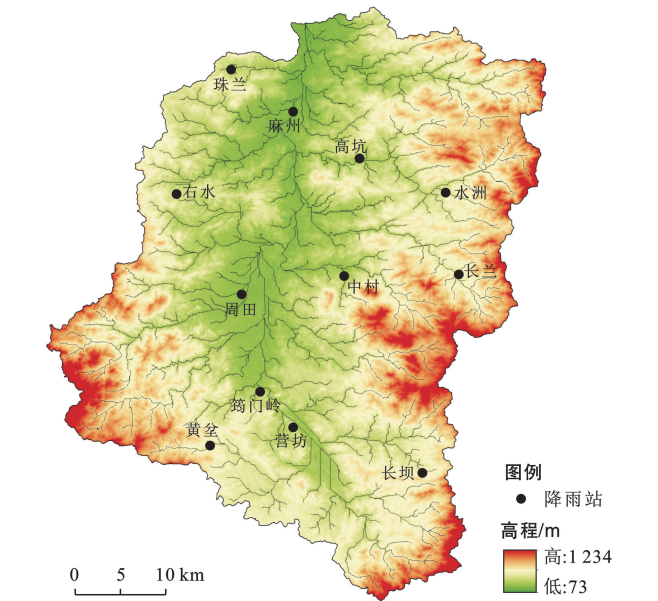


图 1 赣南湘水流域水系、地形及雨量站分布

Fig.1 Distribution of river system, topography and rainfall stations of Xiangshui River basin of Southern Jiangxi Province

### 1.2 数据来源及处理

本文资料来自江西省水文监测中心湘水流域

12 个雨量站 1984—2021 年的逐日降雨数据。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)以 10.0 mm 为侵蚀性降雨标准,将日降雨<10.0 mm 的定义为小雨日,将≥10.0 mm 且<25.0 mm 定义为中雨日,将≥25.0 mm 且<50.0 mm 定义为大雨日,将≥50.0 mm 定义为暴雨日。采用章文波日降雨模型<sup>[6]</sup>计算流域不同量级降雨侵蚀力。各雨量站年降雨特征及其在流域中的位置分别见表 1。

### 1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法 本研究基于章文波等<sup>[6]</sup>日雨量模型计算湘水流域 1984—2021 年的半月降雨侵蚀力,该模型目前使用次数最多且精度较高,广泛应用于中国南方地区降雨侵蚀力的计算,其计算公式为:

$$M=a\sum_{i=1}^k(P_i)b \tag{1}$$

式中: $M$  为某半月的降雨侵蚀力 $[(MJ\cdot mm)/(hm^2\cdot h\cdot a)]$ ;  $k$  为半月内的天数,以每月 1—15 日为一个半月,剩余为另一个半月;  $P_i$  为半月时段内第  $i$  天≥10 mm 的日降雨量,否则以 0 计算;  $a, b$  为模型参数,反映区域的降雨特征。

表 1 1984—2021 年赣南湘水流域雨量站基本情况

Table 1 Basic situation of rainfall stations in Xiangshui basin of Southern Jiangxi Province from 1984 to 2021

雨量站	地理位置		降雨量/mm			降雨日数/d
	东经	北纬	最大值	最小值	均值	
黄忿站	115°42′	25°11′	2 595.5	1 066.2	1 592.3	147
长坝站	116°00′	25°09′	2 431.5	988.0	1 548.3	143
营坊站	115°47′	25°12′	2 487.5	1 006.4	1 502.4	141
筠门岭站	115°45′	25°14′	2 348.5	959.8	1 518.5	143
周田站	115°44′	25°20′	2 340.5	812.9	1 476.1	135
中村站	115°50′	25°21′	2 514.5	962.8	1 518.0	138
长兰站	115°57′	25°21′	2 631.5	1 097.0	1 521.9	139
水洲站	115°56′	25°26′	2 507.5	1 008.3	1 591.1	147
高坑站	115°51′	25°28′	2 538.0	936.6	1 499.7	137
右水站	115°40′	25°26′	2 339.5	1 018.6	1 527.5	141
麻州站	115°47′	25°31′	2 422.0	1 016.9	1 589.5	147
珠兰站	115°43′	25°38′	2 192.5	1 043.5	1 557.9	139

1.3.2 Mann-Kendall 气候突变检验法 Mann-Kendall 气候突变检验法(M-K 检验)是一种非参数统计检验方法,是目前应用较为广泛的一种分析时间序列变化趋势的研究方法,其优点是计算简便、适用性强、定量化程度高<sup>[16]</sup>。  $Z$  为统计变量,当 $|Z| \geq 1.96$  时,表示趋势达到了  $p < 0.05$  的显著水平;当 $|Z| \geq 2.32$  时,表示趋势达到了  $p < 0.01$  的显著水平;否则为不显著。M-K 检验不但可以检验时间序列的变化趋势,还可以检验时间序列是否发生突变。  $UF_k$  和  $UB_k$  是

统计量序列,当两条统计量曲线在图上临界线之间相交,则交点对应的时刻是突变开始的时间。

1.3.3 小波分析 小波分析是反映不同时间尺度上序列周期变化特征的一种有效工具,常用于分析水文气象要素的长期变化特征<sup>[17]</sup>。本研究采用 Morlet 小波分析,通过绘制时间序列的小波系数实部等值线图和小波方差图,分析年、不同量级降雨侵蚀力的周期变化规律。

1.3.4 插值方法 克里金插值法(OK)、反距离加权

插值法(IDW)和径向基函数插值法(RBF)是目前较常见的 3 种插值方法,本研究选用以上 3 种方法对湘水流域年降雨侵蚀力进行插值。

(1) 克里金插值法。克里金插值法(OK)是一种用于空间插值的地统计学方法,其核心思想是两点属性值差异性与二者间距离在一定距离范围内成正比相关,被广泛用于多种学科<sup>[18]</sup>。克里金插值分为普通克里金、泛克里金和协同克里金等,普通克里金插值过程类似于加权滑动平均,是最普遍和广泛使用的克里金插值。因此,本研究选用的是普通克里金插值,其估算某测量点  $z$  值的通用方程为:

$$z_0=\sum_{i=1}^sz_iW_i$$

(2)

式中: $z_0$  为待估计值; $z_i$  为  $i$  点的已知值; $W_i$  是  $i$  点的权重; $s$  为样本数。

(2) 反距离加权插值法。反距离加权插值法(IDW)又称距离倒数权重插值法,其假设未知值的点受近距离已知点的影响比远距离已知点的影响更大<sup>[19]</sup>,具有计算简单、计算速度快的优点,其估算某测量点  $z$  值的通用方程为:

$$z_0=\frac{\sum_{i=1}^sz_i\frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^s\frac{1}{d_i^k}}$$

(3)

式中: $z_0$ ,  $z_i$  和  $s$  的含义与公式(2)相同,  $d_i$  是已知点  $i$  到测量点的距离,  $k$  为幂(统一幂为 2)。

(3) 径向基函数插值法。径向基函数插值法(RBF)是逼近理论中的有利工具<sup>[14]</sup>。相对来说,它会考虑研究对象存在着时间连续性和空间间断性等特性,是一种精确的插值方法。

1.3.5 插值检验方法 进行插值方法比较的一个常用方法是交叉验证(cross validate),它对每种插值方法重复以下步骤:除去数据中的一个已知点 A,用剩下的已知点进行插值,将插值所得 A 的测量值与真实值进行比较。本研究采用的是留一法交叉验证<sup>[20]</sup>,采用平均相对误差(MRE),平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为评价指标,选出最优插值方法,三者均为值越小表示插值方法效果越好,各指标计算公式为:

$$MRE=\frac{1}{S}\sum\frac{|z_i-z_0|}{z_0}$$

(4)

$$MAE=\frac{1}{S}\sum|z_i-z_0|$$

(5)

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{S}(z_i-z_0)^2}$$

(6)

式中:MRE 取值范围为 0~1,单位为%; MAE 取值>0,单位为(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a); RMSE 取值>0,单位为(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

2 结果与分析

2.1 插值方法比较

通过 3 种插值方法 12 次插值得出结果(表 2),可知,插值结果大小排序为“IDW>RBF>OK”和“OK>IDW>RBF”的数量较多,分别有 4 组和 3 组;排序“RBF>OK>IDW”和“RBF>IDW>IDW”的均为两组;排序为“OK>RBF>IDW”的数量最少,只有一组。每组训练集的插值结果较为平均,无明显偏大值和偏小值。

表 2 赣南湘水流域各雨量站降雨侵蚀力插值结果对比

Table 2 Comparison of rainfall erosivity interpolation results at different rainfall gauge stations of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province

序号	验证集结果/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )		训练集结果/(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )			比较
			OK	IDW	RBF	
1	黄忿站	8 347.15	8 119.73	8 145.59	8 145.42	IDW>RBF>OK
2	长坝站	8 145.59	8 097.00	8 052.97	8 064.06	RBF>IDW>OK
3	营坊站	7 928.64	8 132.19	8 099.07	8 116.05	RBF>OK>IDW
4	筠门岭站	8 063.62	8 092.23	8 026.59	8 008.42	OK>IDW>RBF
5	周田站	7 722.52	8 163.47	8 063.85	8 040.12	OK>IDW>RBF
6	中村站	7 892.07	8 139.76	8 078.14	8 048.16	OK>IDW>RBF
7	长兰站	7 994.74	8 253.95	8 216.05	8 246.89	OK>RBF>IDW
8	水洲站	8 548.76	8 546.29	8 548.74	8 548.03	IDW>RBF>OK
9	高坑站	8 026.87	8 435.97	8 300.21	8 622.08	RBF>OK>IDW
10	右水站	7 772.93	8 162.31	8 151.14	8 173.04	RBF>IDW>OK
11	麻州站	8 643.02	8 135.18	8 160.38	8 159.24	IDW>RBF>OK
12	珠兰站	8 434.82	8 151.96	8 302.20	8 252.85	IDW>RBF>OK



由表 3 可知,OK,IDW 和 RBF 这 3 种方法均达到一定插值精度,可以满足实际应用需求,但仍然存在一定差异。从 MRE,MAE 和 RMSE 来看,交叉验证的结果均为  $OK>RBF>IDW$ ,表明 IDW 的插值结果优于 OK 和 RBF,误差最小。因此,综合 3 项评价指标结果,本文选用 IDW 开展研究。

2.2 不同量级降雨侵蚀力空间变化

基于赣南湘水流域 12 个雨量站 1984—2021 年逐日降雨计算出每个雨量站 $\geq 10$  mm 的日平均降雨量和年平均降雨量,从而得到各雨量站的模型参数

$a,b$ 。采用章文波日降雨模型和泰森多边形法计算赣南湘水流域年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力(见表 4)。

表 3 三种插值方法结果比较

Table 3 Comparison of results of three interpolate methods			
名称	OK	IDW	RBF
MRE	0.031 4	0.025 9	0.030 0
MAE	253.973 4	209.766 1	242.793 6
RMSE	299.473 4	249.669 7	296.626 9

表 4 赣南湘水流域各雨量站不同量级降雨侵蚀力计算结果

Table 4 Calculation results of rainfall erosivity of different magnitudes at each rainfall gauge station of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province						
雨量站	模型参数		降雨侵蚀力/( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ )			
	$b$	$a$	年降雨侵蚀力	中雨侵蚀力	大雨侵蚀力	暴雨侵蚀力
黄盆站	1.552 1	0.915 3	8 347.15	2 126.50	3 198.76	3 021.89
长坝站	1.555 1	0.902 8	8 145.59	2 102.43	2 945.54	3 097.61
营坊站	1.549 6	0.926 2	7 928.64	2 035.95	2 795.28	3 097.41
筠门岭站	1.548 3	0.931 5	8 063.62	2 027.13	3 013.09	3 023.40
周田站	1.551 0	0.920 2	7 722.52	1 912.98	2 921.17	2 888.37
中村站	1.563 8	0.867 3	7 892.07	2 017.45	2 856.55	3 018.07
长兰站	1.552 4	0.914 2	7 994.74	2 036.03	3 050.74	2 907.97
水洲站	1.547 9	0.933 3	8 548.76	2 123.34	3 119.80	3 305.62
高坑站	1.541 4	0.962 1	8 026.87	1 956.12	2 805.93	3 264.82
右水站	1.566 0	0.858 6	7 772.93	2 038.78	3 129.29	2 604.85
麻州站	1.531 6	1.007 2	8 643.02	2 070.08	3 361.14	3 211.80
珠兰站	1.545 4	0.944 4	8 434.82	2 125.78	2 885.67	3 423.37

由表 4 可知,不同雨量站的模型参数相差不大,参数  $b$  极值差为 0.034 4,参数  $a$  极值差为 0.148 6。年降雨侵蚀力最小值在周田站,最大值在麻州站,极值差为  $920.5(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,极值比为 1.12;中雨、大雨、暴雨侵蚀力极值差分别为 213.52,565.86,818.52( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,极值比分别为 1.11,1.20,1.31。暴雨侵蚀力的极值差与年降雨侵蚀力的差异最小,中雨侵蚀力的极值比与年降雨侵蚀力的差异最小,且极值差和极值比均随量级的增大而增大。综上,年尺度下不同量级降雨侵蚀力在雨量站之间的大小差异不同(暴雨侵蚀力 $>$ 大雨侵蚀力 $>$ 中雨侵蚀力),差异随量级的增大而变大。

本研究选用 IDW 分析年尺度下不同量级降雨、降雨侵蚀力的空间变化,插值结果见图 2 和图 3。

由图 2 和图 3 可知,湘水流域年降雨侵蚀力与年降雨空间分布基本保持一致,不同量级降雨侵蚀力的空间分布与对应量级降雨的空间分布基本保持一致,且量级越大一致性越明显。流域年降雨侵蚀力北部地区呈东、西高于中部的趋势,中部地区东、西差异不大,南部地区呈西高东低的趋势。中雨侵蚀力整体

呈由流域的四个角向中间降低的趋势,大雨侵蚀力整体空间分布不明显,在珠兰站形成一个低值区,沿着流域边界向西南部呈先增高再降低而后又增高的趋势,暴雨侵蚀力北部和南部东、西差异不大,中部地区呈东、西较高而中部较低的趋势。湘水流域不同量级降雨侵蚀力与年降雨侵蚀力之间的空间分布有一定的差异,但暴雨侵蚀力更能影响年降雨侵蚀力的空间分布,如年降雨侵蚀力空间分布图中呈:高坑站 $>$ 周田站,而两个站中雨侵蚀力相差较小,大雨侵蚀力空间分布图表现为:高坑站 $<$ 周田站,暴雨侵蚀力空间分布图与年降雨侵蚀力一样,也表现为:高坑站 $>$ 周田站。总体上,湘水流域年、不同量级降雨侵蚀力总体均呈北部和南部高、中部低的趋势。由此可见,重视中村站西北方向土壤侵蚀的预测和治理并因地制宜增加水土保持措施会更有利于防治湘水流域的土壤侵蚀。

2.3 不同量级降雨侵蚀力时间变化

采用 M-K 趋势检验得出流域年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力的  $|Z|$  值分别为 0.43,0.10,0.63,0.20,均小于 1.96,表明年、不同量级降雨侵蚀力变化趋势

均不显著( $p>0.05$ )。不同量级降雨侵蚀力的  $UF_k$  和  $UB_k$  在置信区间中均存在多个交点,通过滑动  $t$  检验得出各突变点均未通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,表明没有发生显著性突变。

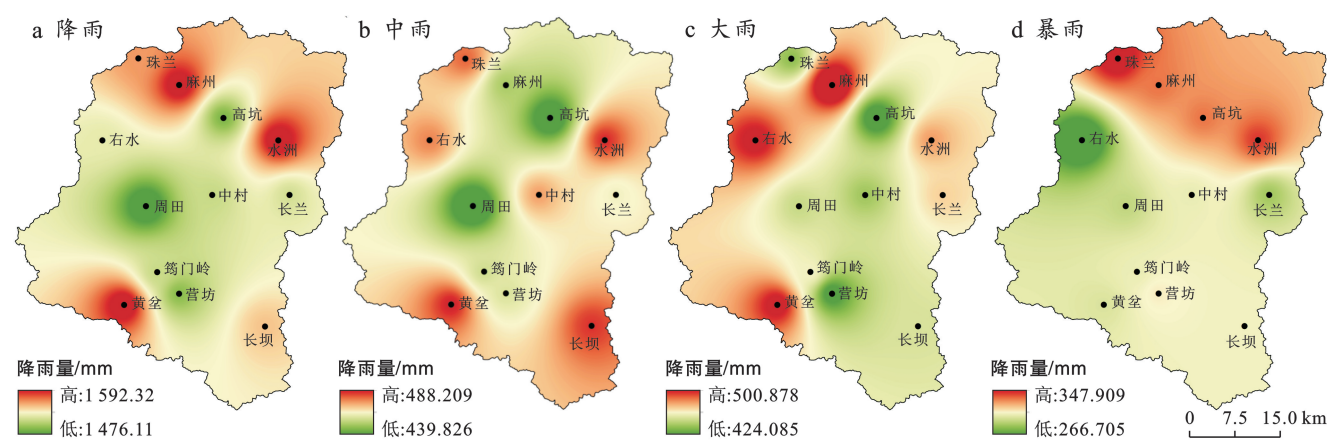


图2 赣南湘水流域年降雨和不同量级降雨插值结果

Fig.2 Interpolation results of annual rainfall and rainfall of different magnitudes of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province

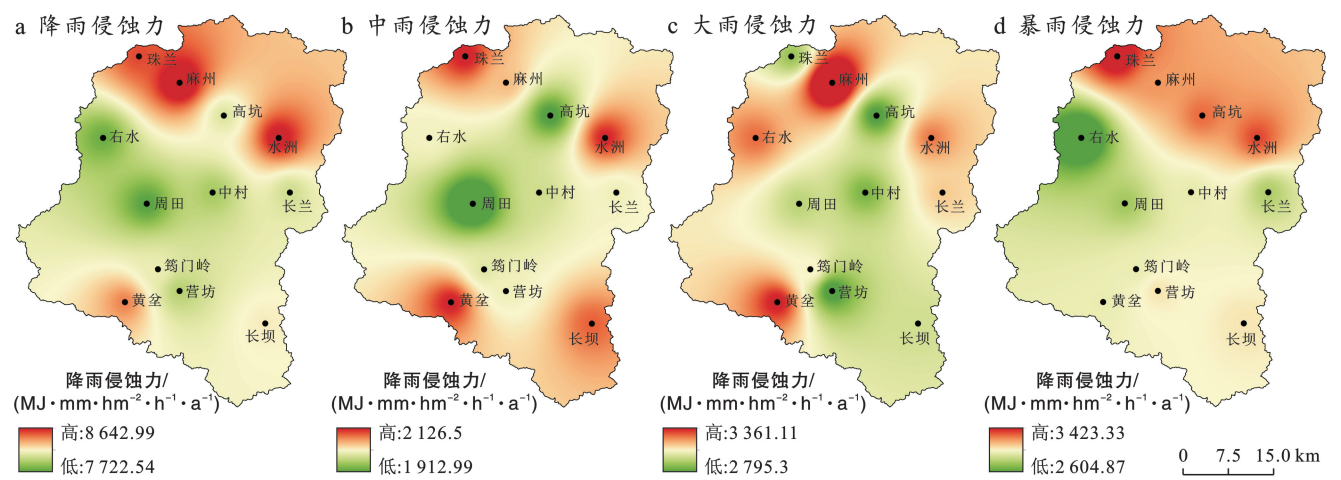


图3 赣南湘水流域年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力插值结果

Fig.3 Interpolation results of annual rainfall erosivity and rainfall erosivity of different magnitudes of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province

通过变异系数反映降雨侵蚀力的离散程度,  $C_V<0.1$  为弱变异,  $0.1\leq C_V<1$  为中等变异,  $C_V\geq 1$  为高度变异<sup>[21]</sup>。

由图4可知,湘水流域年降雨侵蚀力、不同量级降雨侵蚀力与年降雨、对应量级降雨的变化趋势基本保持一致,均呈波动变化趋势,最大值和最小值出现的年份相同,其中年降雨和年降雨侵蚀力最大值均出现在2016年,最小值均出现在1991年。年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力在1984—2021年的变异系数( $C_V$ )分别为0.26,0.15,0.25,0.47,均属于中等变异,其中暴雨侵蚀力的 $C_V$ 值最大,表明其年际变化最大。年降雨、中雨和暴雨侵蚀力均呈上升趋势( $p>0.05$ ),而大雨侵蚀力呈下降趋势( $p>0.05$ ),倾向率分别为14.212,1.9667,16.777和-4.532[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)]/a。因此,湘水流域不同量级降雨侵蚀力的年际变化速率随量级的增大而增大。

由图5实部等值线图可知,流域年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力在24~35a时间尺度上出现了2次“强—弱”交替震荡;中雨侵蚀力主要存在4~7,13~20和25~35a这3种时间尺度的周期变化;大雨侵蚀力主要存在3~9,10~18和22~35a这3种时间尺度的周期变化。由图6小波方差图可知,年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力小波方差的峰值出现在28,6,28和16a,分别为其第1主周期。

整体来看,图5和图6反映的年和不同量级降雨侵蚀力周期变化的时频特征差异不大,震荡周期基本一致,均为3~4个震荡周期,其中暴雨侵蚀力和年降雨侵蚀力的震荡周期基本一致,且变化较为稳定,但年降雨侵蚀力与大雨侵蚀力的主震荡周期一致。

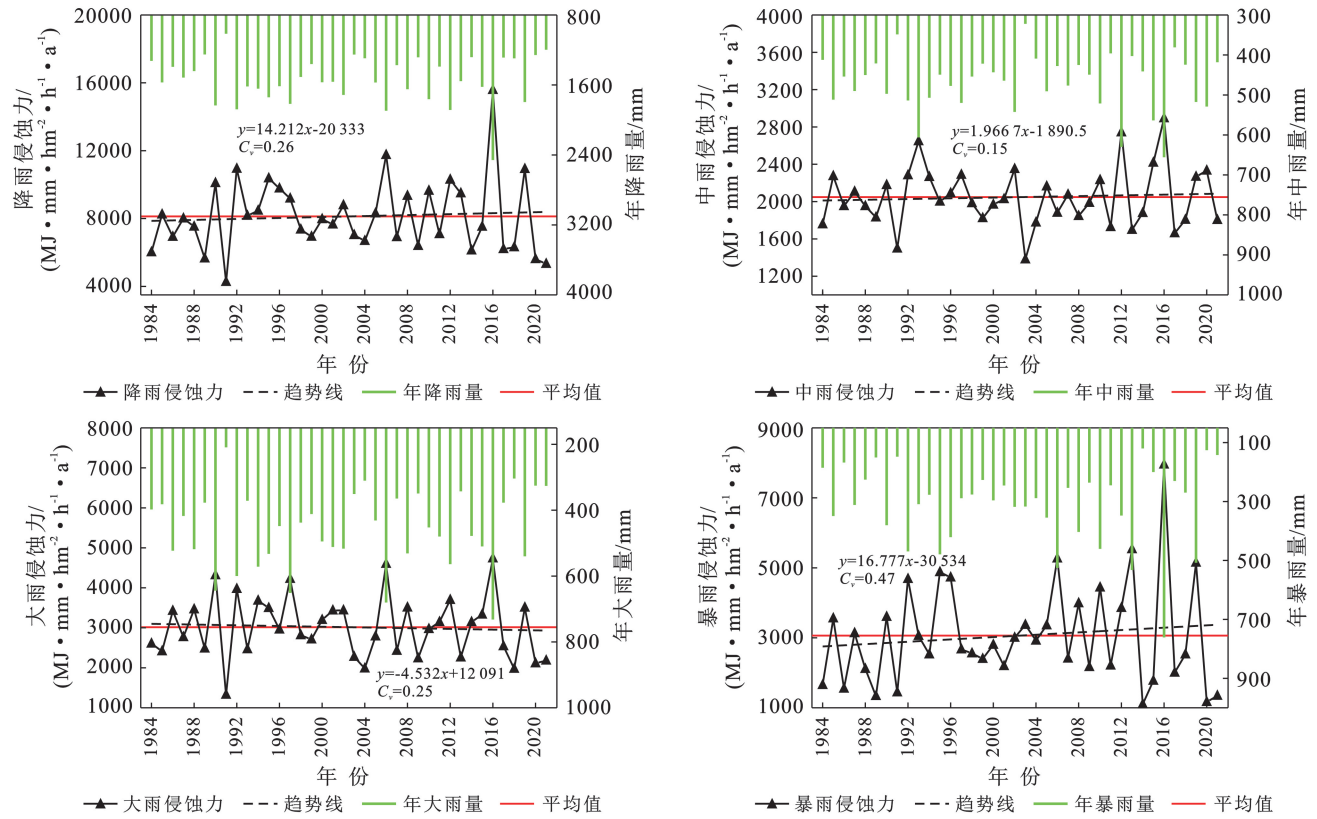


图 4 1984—2022 年赣南湘水流域年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力趋势变化

Fig.4 Interpolation results of annual rainfall erosivity and rainfall erosivity of different magnitudes of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province from 1984 to 2022

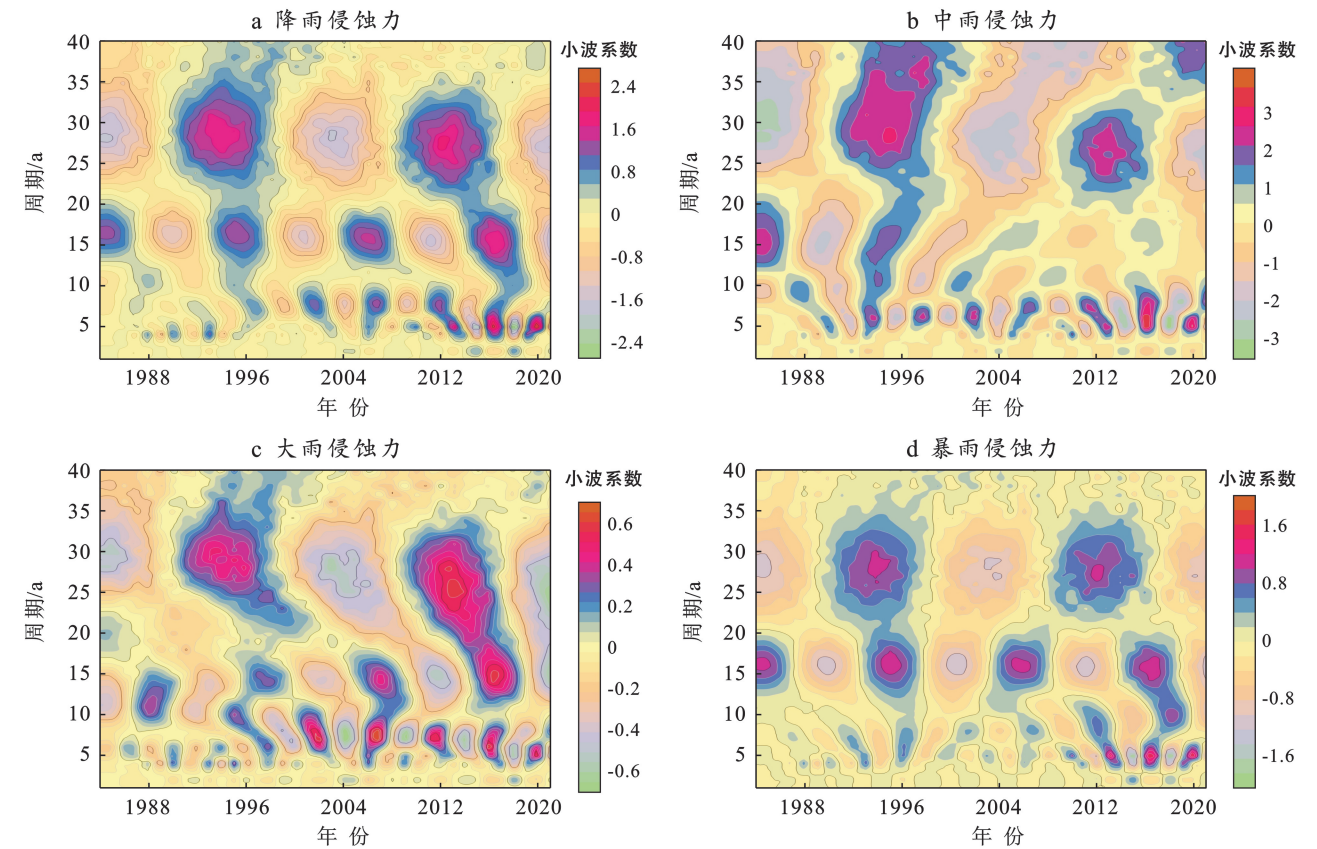


图 5 赣南湘水流域年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力小波系数实部等值线图

Fig.5 Annual rainfall erosivity and rainfall erosivity wavelet coefficient real contour plots of different magnitudes of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province



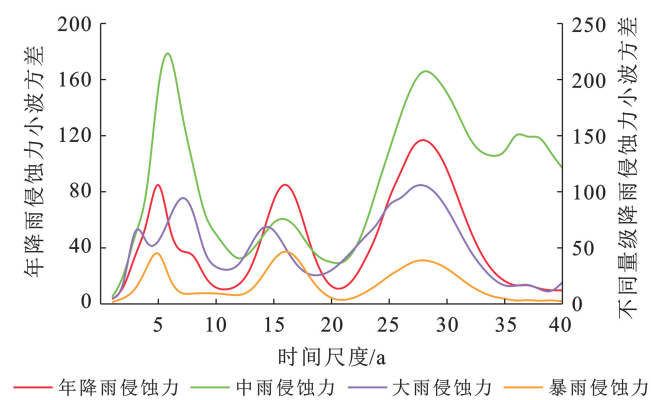


图 6 赣南湘水流域年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力小波方差图

Fig.6 Wavelet variance diagram of annual rainfall erosivity and rainfall erosivity of different magnitudes of Xiangshui River basin in Southern Jiangxi Province

### 3 讨论

在降雨侵蚀力空间分布研究中,采用相同的插值方法、不同的参数,会得到不同的预测结果。同理,基于相同的数据,选用不同的插值方法也将生成不同的插值结果。本文通过交叉验证得出 IDW 比 OK 和 RBF 的误差小, IDW 更适合湘水流域,与汪明冲等<sup>[22]</sup>在连江流域选用的最优插值方法一致,这是因为降雨侵蚀力空间分布的规律性以及连续性较差,而 OK 的空间内插是以空间连续性为隐含假设的, RBF 同样考虑研究对象存在着时间连续性和空间间断性等特性,这会降低 OK 和 RBF 的优势,而 IDW 仅考虑雨量站远近的影响。但李璐等<sup>[23]</sup>指出 OK 在江苏省降雨侵蚀力时空分布的研究中精度最高,这是由于插值方法的评判标准和地理位置、地形条件等因素的不同。因此,在以后的研究中,还需考虑经纬度、海拔、气温等影响因素。

湘水流域不同量级降雨侵蚀力与对应量级降雨之间的空间分布存在差异,且随量级的增大而减小,这是因为降雨侵蚀力是由降雨、降雨强度和降雨频率等因素共同决定的,大量级的降雨更能影响对应量级降雨侵蚀力空间分布。由此可以说明降雨侵蚀力的研究精确到量级是十分必要的。此外,流域不同量级降雨侵蚀力与年降雨侵蚀力之间的空间分布存在的差异随量级的增大而增大,这与芦鑫等<sup>[24]</sup>在秦岭南北地区的研究结果相一致,但暴雨侵蚀力更能影响年降雨侵蚀力的空间分布,这是因为暴雨侵蚀力对年降雨侵蚀力的贡献率最大。

1984—2021 年湘水流域年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力分别为 8 126.01, 2 047.93, 3 015.45, 3 062.64 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a), 中雨、大雨和暴雨侵蚀力

分别占年降雨侵蚀力的 25.20%, 37.11% 和 37.69%, 暴雨侵蚀力和大雨侵蚀力约占年降雨侵蚀力的 3/4, 且暴雨侵蚀力呈上升趋势 ( $p>0.05$ ), 表明湘水流域有向大量级降雨侵蚀力发展的趋势。流域中雨、大雨和暴雨侵蚀力变异系数分别为 0.15, 0.25, 0.47, 均为中等变异, 呈逐级递增的趋势, 暴雨侵蚀力的年际变化速率最大。年降雨侵蚀力和大雨侵蚀力的主震荡周期一致, 与中雨、暴雨侵蚀力的主震荡周期存在一定差异, 而赵平伟等<sup>[13]</sup>在云南省的研究结果表明年降雨侵蚀力与中雨、大雨侵蚀力的主震荡周期相同, 这是因为区域气候要素的波动周期会影响降雨侵蚀力的周期变化。可见, 湘水流域不同量级降雨侵蚀力的大小、所占年降雨侵蚀力的比例和年际变化速率均随量级的增大而增大, 暴雨侵蚀力越来越占据主导地位。这与前人的研究基本一致<sup>[25-26]</sup>, 说明这些地区向大量级降雨侵蚀力发展的趋势愈加明显。因此, 分析不同量级降雨侵蚀力的时空变化尤为重要。

### 4 结论

- (1) 从 MRE, MAE 和 RMSE 来看, 交叉验证的结果均为  $OK>RBF>IDW$ , 表明 IDW 比 OK 和 RBF 更适用于湘水流域。
- (2) 1984—2021 年湘水流域不同量级降雨侵蚀力与对应量级降雨空间分布的差异随量级的增大而减小, 而不同量级降雨侵蚀力与年降雨侵蚀力空间分布的差异随量级的增大而增大, 总体上, 湘水流域年、不同量级降雨侵蚀力均呈北部和南部偏高, 中部偏低的趋势。
- (3) 流域年降雨、中雨、大雨和暴雨侵蚀力在 1984—2021 年的变异系数 (CV) 分别为 0.26, 0.15, 0.25, 0.47, 年降雨、中雨和暴雨侵蚀力均呈上升趋势 ( $p>0.05$ ), 而大雨侵蚀力呈下降趋势 ( $p>0.05$ )。不同量级降雨侵蚀力大小、所占年降雨侵蚀力的比例、变异系数及年际变化速率随量级的增大而增大。年和不同量级降雨侵蚀力震荡周期基本一致, 均为 3~4 个震荡周期。

### 参考文献 (References)

[1] 徐晶, 徐征和, 李伟, 等. 济南市 1970—2016 年降雨侵蚀力时空变化[J]. 山地学报, 2018, 36(3): 391-400.  
Xu Jing, Xu Zhenghe, Li Wei, et al. Temporal and spatial changes of rainfall erosivity during 1970—2016 in Jinan City, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(3): 391-400.

[2] 姬志军, 张连明. 鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 81-84.



- Ji Zhijun, Zhang Lianming. Spatial-temporal variation of distribution of rainfall erosivity in Poyang Lake basin [J]. Yellow River, 2019, 41(6): 81-84.
- [3] 胡续礼, 姜小三, 尹黎明, 等. 昭平台水库上游区域降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1195-1198.
- Hu Xuli, Jiang Xiaosan, Yin Liming, et al. Temporal and spatial variance of rainfall erosivity in the upstream area of the Zhaopingtai Reservoir [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1195-1198.
- [4] 鲁克新, 李占斌, 鞠花, 等. 不同空间尺度次暴雨径流侵蚀功率与降雨侵蚀力的对比研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 204-208, 214.
- Lu Kexin, Li Zhanbin, Ju Hua, et al. Study on a comparison of runoff erosion power and rainfall erosivity for single rainstorm event under different spatial scales [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(10): 204-208, 214.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. United States, Dept. of Agriculture: Agriculture handbook (USA), 1978.
- [6] 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(6): 705-711.
- Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002(6): 705-711
- [7] 徐晶, 时延锋, 徐征和, 等. 1961—2020 年沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 36-44.
- Xu Jing, Shi Yanfeng, Xu Zhenghe, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in Yimeng Mountain area from 1961 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 36-44.
- [8] 蒋秋玲, 白芝兵. 广东省 2000—2019 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 珠江水运, 2021(23): 30-32.
- Jiang Qiuling, Bai Zhibing. Temporal and spatial variation characteristics of rainfall erosivity in Guangdong Province from 2000 to 2019 [J]. Pearl River Water Transport, 2021(23): 30-32.
- [9] 白云博, 王婷, 欧阳斯达, 等. 安徽省 1990—2010 年降雨侵蚀力分析[J]. 中国水土保持, 2020(6): 31-33.
- Bai Yunbo, Wang Ting, Ouyang Sida, et al. Analysis on rainfall erosivity in Anhui Province from 1990 to 2010 [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(6): 31-33.
- [10] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 209-219.
- Chen Zhengfa, Shi Dongmei, He Wei, et al. Spatial-temporal distribution and trend of rainfall erosivity in Yunnan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 209-219.
- [11] 李钢, 田刚, 张由松. 浙江省降雨侵蚀力三种空间插值方法对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊 1): 241-245.
- Li Gang, Tian Gang, Zhang Yousong. Comparative study of three spatial interpolation methods of rainfall erosivity in Zhejiang Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(Suppl.1): 241-245.
- [12] 邹玉霞, 樊国中, 刘淑婧, 等. 1960—2017 年重庆市不同量级降雨侵蚀力  $R$  值的时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 41-48.
- Zou Yuxia, Fan Guozhong, Liu Shujing, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity  $R$  values of different magnitudes in Chongqing from 1960 to 2017 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 41-48.
- [13] 赵平伟, 郭萍, 李成武, 等. 云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2135-2141.
- Zhao Pingwei, Guo Ping, Li Chengwu, et al. Characteristic analysis of rainfall erosivity at each level in Yunnan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(12): 2135-2141.
- [14] 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.
- Ma Liang, Jiang Guanghui, Zuo Changqing, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity changes in Jiangxi Province over more than 50 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 61-68.
- [15] 鲁向晖, 张海娜, 白桦, 等. 赣江流域 1986—2015 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 51-58.
- Lu Xianghui, Zhang Haina, Bai Hua, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1986—2015 in the Ganjiang River basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 51-58.
- [16] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析: 以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.
- Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China: A case study in the Chaobaihe River [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 309-317.
- [17] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 139-144.
- Xie Zhibo, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet wavelet analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):

139-144.

[18] 俱战省,张一澜,周旗.宝鸡市生产建设项目降雨侵蚀力算式及应用研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):82-88,96.

Ju Zhansheng, Zhang Yilan, Zhou Qi. Research and application of rainfall erosion equations for the production and construction projects in Baoji City [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021,32(1): 82-88,96.

[19] 孙从建,王佳瑞,郑振婧,等.黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J].干旱区地理,2020,43(3):568-576.

Sun Congjian, Wang Jiarui, Zheng Zhenjing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity and its influencing factors in the protected area of the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2020,43(3):568-576.

[20] 文冰梅,赵联文,黄磊. AIC 准则与留一法交叉验证渐近等价的证明[J].统计与决策,2022,38(6):40-43.

Wen Bingmei, Zhao Lianwen, Huang Lei. Proof of the asymptotic equivalence between AIC criterion and LOOCV [J]. Statistics and Decision, 2022,38(6):40-43.

[21] 杨文利,赵建民,朱平宗,等.南方红壤区潦水流域降雨侵蚀力时空特征[J].中国水土保持科学,2018,16(3): 18-25.

Yang Wenli, Zhao Jianmin, Zhu Pingzong, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity of the Lianshui Basin in the red soil region of South China [J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2018,16(3):18-25.

[22] 汪明冲,张新长,王兮之,等.粤北岩溶区连江流域降雨侵蚀力[J].热带地理,2016,36(3):495-502.

Wang Mingchong, Zhang Xinchang, Wang Xizhi, et al. Rainfall erosivity in the Lianjiang Watershed in karst area of Northern Guangdong, China [J]. Tropical Geography, 2016,36(3):495-502.

[23] 李璐,姜小三,孙永远.基于地统计学的降雨侵蚀力插值方法研究:以江苏省为例[J].生态与农村环境学报, 2011,27(1):88-92.

Li Lu, Jiang Xiaosan, Sun Yong. Geostatistics based spatial interpolation method for study of rainfall erosivity based on: A case study of Jiangsu [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011,27(1):88-92.

[24] 芦鑫,殷淑燕,高涛涛.1960—2017 年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(3):380-390.

Lu Xin, Yin Shuyan, Gao Taotao. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in the northern and southern regions of Qinling Mountains from 1960 to 2017 [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2019,46(3):380-390.

[25] 吴洁玲,查轩,陈世发,等.1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J].水土保持学报,2021,35(4):21-26.

Wu Jieling, Zha Xuan, Chen Shifa, et al. Variations of rainfall erosivity of different magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):21-26.

[26] 李维杰,王建力.太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征[J].自然资源学报,2019,34(4):785-801.

Li Weijie, Wang Jianli. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity at each level in Taihang Mountain [J]. Journal of Natural Resources,2019,34(4):785-801.

(上接第 273 页)

[29] 金晓斌,黄朝奎,杨绍辉,等.耕地“进出平衡”制度的实施障碍与应对策略[J].中国土地,2023(4):22-24.

Jin Xiaobin, Huang Chaokui, Yang Shaohui, et al. Obstacles to the implementation of the system of “balance in and out” of cultivated land and its countermeasures [J]. China Land, 2023(4):22-24.

[30] 祝存伟,陈洋,孙利云,等.基于遥感影像的耕地“非农化”“非粮化”监测方法探索[J].测绘与空间地理信息,2023,46(5):104-107.

Zhu Cunwei, Chen Yang, Sun Liyun, et al. Exploration on monitoring methods of “non-agriculturalization” and “non-grain growing” of cultivated land based on remote sensing images [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023,46(5):104-107.

[31] 丁书培,李蒙蒙,汪小钦,等.基于时序遥感数据的福州市耕地非农化特征及驱动因子分析[J].遥感技术与应用,2022,37(3):550-563.

Ding Shupe, Li Mengmeng, Wang Xiaoqin, et al. The use of time series remote sensing data to analyze the characteristics of non-agriculture farmland and their driving factors in Fuzhou [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022,37(3):550-563.

[32] 孔祥斌.耕地“非粮化”问题、成因及对策[J].中国土地,2020(11):17-19.

Kong Xiangbin.Problems, causes and countermeasures of farmland “non-grain” [J]. China Land, 2020(11): 17-19.

[33] 刘涛,史秋洁,王雨,等.中国城乡建设占用耕地的时空格局及形成机制[J].地理研究,2018,37(8):1609-1623.

Liu Tao, Shi Qiujie, Wang Yu, et al. Urban-rural development and occupation of cultivated land in China: Trends, geography, and drivers [J]. Geographical Research, 2018,37(8):1609-1623.