

基于多源降水融合数据的江苏省降雨侵蚀力时空特征

鞠艳¹, 杨星¹, 齐斐¹, 夏骑兵², 张雯叶¹

(1.江苏省水利科学研究所, 江苏南京 210017; 2.南京市高淳区水务局, 江苏南京 211300)

摘要: [目的] 研究江苏省不同的时间和空间尺度的降雨侵蚀力及其侵蚀密度特征, 为区域降雨侵蚀力预测和土壤侵蚀控制的重要参考。[方法] 基于江苏省 96 个气象观测站点的降雨数据和 GPM IMERG, ERA5 降水产品, 研发了一种基于站点—卫星降水融合的降雨侵蚀力计算方法, 重建了江苏省 2001—2023 年降雨侵蚀力, 并进一步研究其侵蚀密度及易发区划分。[结果] ①该方法具有一定的可靠性, 融合降雨侵蚀力相较于卫星降雨侵蚀力和站点降雨侵蚀力, 具有较高的相关系数、较小的偏差和均方根误差, 能有效捕捉降雨侵蚀力的高值, 减少不确定性和误差。②2001—2023 年江苏省多年平均降雨侵蚀力为 4 709.39 MJ·mm/(hm²·h·a), 空间分布为北低南高, 季节差异明显, 夏季多冬季少。③2001—2023 年江苏省年降雨侵蚀力呈增加趋势, 气候倾向率季节存在差异, 春季、夏季和秋季研究区南部呈显著的增加趋势, 北部呈不显著的下降趋势, 冬季反之。④江苏省年侵蚀密度为 4.96 MJ/(hm²·h), 空间分布呈北高南低, 降雨侵蚀最易发区为徐州市东部、连云港市北部和镇江市西部、南京市北部零星地区, 不易受侵蚀的区域为扬州市和泰州市地区。[结论] 基于站点—卫星降水融合方法估算区域降雨侵蚀力较为可靠, 减少不确定性和误差, 提高了卫星遥感反演降水在土壤水蚀领域的应用精度。

关键词: 降雨侵蚀力; IMERG; ERA5; 降水融合数据; 侵蚀密度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0241-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 鞠艳, 杨星, 齐斐, 等. 基于多源降水融合数据的江苏省降雨侵蚀力时空特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 241-250. Ju Yan, Yang Xing, Qi Fei, et al. Spatiotemporal characteristics of rainfall erosivity based on multi-source precipitation merged data in Jiangsu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 241-250. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.025; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.025.

Spatiotemporal characteristics of rainfall erosivity based on multi-source precipitation merged data in Jiangsu Province

Ju Yan¹, Yang Xing¹, Qi Fei¹, Xia Qibing², Zhang Wenyue¹

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210017,

China; 2. Gaochun Water Affair Authority, Nanjing City, Nanjing, Jiangsu 211300, China)

Abstract: [Objective] Integrated rainfall erosivity in Jiangsu Province was evaluated at different temporal and spatial scales, and the erosion density characteristics in Jiangsu Province were explored to provide an important reference for regional rainfall erosivity prediction and soil erosion control. [Methods] This study developed a station-satellite merged calculation method for rainfall erosivity based on rainfall data from 96 meteorological stations and precipitation products of GPM IMERG and ERA5. The rainfall erosivity of Jiangsu Province from 2001 to 2023 was reconstructed, and its erosivity density and prone area division were studied. [Results] ① Method reliability was confirmed because the fusion rainfall erosivity had a higher correlation coefficient, lower deviation, and lower root mean square error than did the rainfall erosivity calculated by satellites and stations. This method captures high values of rainfall erosivity and reduces uncertainty and error. ② The mean annual rainfall erosivity in Jiangsu Province from 2001 to 2023 was

收稿日期: 2024-12-20

修回日期: 2025-01-02

采用日期: 2025-01-06

资助项目: 江苏省水利科技项目“高邮灌区仿真模拟技术研究及应用”(Z2022041); 江苏省水利科学研究所自主科研经费专项资金项目“多源降水融合的江苏省降雨侵蚀力及其变化研究”(2023Z046)

第一作者: 鞠艳(1996—), 女(汉族), 江苏省泰州市人, 硕士, 工程师, 主要从事水文与水土资源。Email: 747030693@qq.com。

通信作者: 杨星(1978—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源与水环境、港口、海岸及近海工程。Email: ydaxue@163.com。

4 709.39 MJ·mm/(hm²·h·yr); the spatial distribution was ‘low in the north, high in the south’. Seasonal rainfall erosivity showed a pattern of ‘more in summer, less in winter’. ③ Annual rainfall erosivity in Jiangsu Province showed an increasing trend from 2001 to 2023. The climate tendency rate showed a significant increasing trend in the south of Jiangsu Province in spring, summer, and autumn, and an insignificant decreasing trend in the north, which was the opposite in winter. ④ The annual erosivity density of Jiangsu Province was 4.96 MJ/(hm²·h), and the spatial distribution was ‘high in the north, low in the south’. The areas most vulnerable to rainfall erosivity were east of Xuzhou, north of Lianyungang, west of Zhenjiang, and the northern part of Nanjing City. The less vulnerable areas were Yangzhou City and Taizhou City. [Conclusion] The estimation of regional rainfall erosivity based on site-satellite precipitation merged data is reliable, reduces uncertainty and error, and improves the accuracy of satellite remote sensing applied in the field of soil erosion.

Keywords: rainfall erosivity; IMERG; ERA5; merged precipitation data; erosivity density

降雨侵蚀力是造成土壤侵蚀的重要因素之一,随着全球气候变化,极端降水事件频发,降水的强烈变化会引发区域性的洪涝和水土流失灾害^[1],严重威胁社会发展和生命财产安全。因此,准确评估降雨侵蚀力对土壤流失易发区预测、水土保持措施制定和水土保持规划制定具有重要意义^[2-3]。

降水资料的高时空分辨率是衡量降雨侵蚀力可靠性的关键^[4],目前估算降雨侵蚀力主要通过地面气象站观测降水^[5]、卫星遥感反演降水^[6]和雷达测雨^[7]结合不同的模型获取。高歌等^[8]基于 1961—2017 年国家气象站的均一化逐日降水资料分析表明,长江流域降雨侵蚀力及 10 a 一遇次降雨侵蚀力增加趋势明显;刑贞相等^[9]选用 4 种网格化降水产品评估中国不同区域的降雨侵蚀力。结果表明,中国逐日网格降水量实时分析系统数据集(CGDPA),在除青藏高原以外地区整体有较好的适用性。然而,现有技术中针对降雨侵蚀力的估算方法存在以下几方面问题:①地面气象站观测降水数据以点代面的空间精度较差,仅能反映站点附近有限区域的侵蚀状况,且站点稀疏的地区降水资料获取较难,长时间序列不够完整,难以准确估算降雨侵蚀力的时空变异性^[6]。②卫星降水产品由于传感器性能、反演算法等原因,在高纬度地区不确定性大,估算降雨侵蚀力精度相对较低^[10]。③雷达测雨易受地形、天气和覆盖度等影响,且覆盖范围有限,大尺度计算降雨侵蚀力存在空间分异性^[11]。江苏省作为南方水蚀区水土流失重点防治省份之一,近年来对降雨侵蚀力研究较少,罗梦琦等^[12]基于站点降水数理特征,确定了降雨侵蚀力的最优站点密度计算,不同站点空间布局对其有较大影响;余寒等^[13]基于近 50 a 江苏省降水数据,研究发现降雨侵蚀力呈增加趋势,其中苏南地区呈显著增加趋势,降雨侵蚀力季节差异明显,总体呈夏季多冬季少,其中夏季降雨侵蚀力占全年的 60% 以上。

基于以上问题,本研究基于江苏省 96 个气象观测站点的降雨数据和 GPM IMERG, ERA5 降水产品,研发了一种基于站点—卫星降水融合的降雨侵蚀力计算方法,重建了江苏省 2001—2023 年降雨侵蚀力,从不同的时间尺度和空间尺度对融合降雨侵蚀力进行评估,并分析研究区的时空变化及侵蚀密度特征,进一步划定降雨侵蚀易发区,以期为区域降雨侵蚀力预测和土壤侵蚀防治提供重要参考^[14]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏省位于中国大陆东部沿海地区中部,地处 116°18′—121°57′E, 30°45′—35°20′N 之间(图 1),总面积 1.07×10⁵ km²。研究区地势平坦,以平原和丘陵山区为主,水网密布,湖泊众多。受亚热带季风气候的影响,该地区气候温和,四季分明,多年平均气温在 13.6~16.1℃;降雨量充沛,年降雨量为 704~1 250 mm,年内分配不均,汛期较为集中;土壤类型丰富,主要包括棕壤、褐土、潮土、水稻土等。

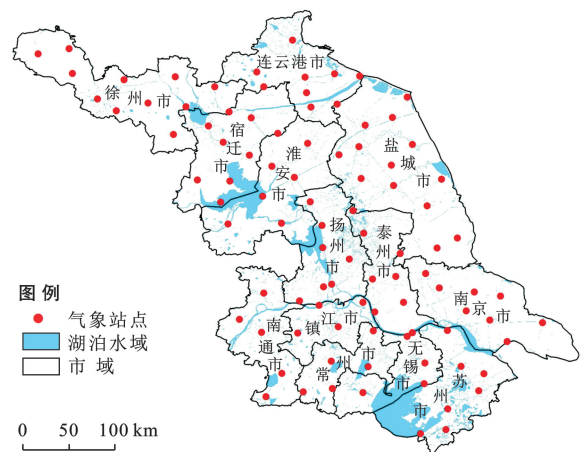


图 1 江苏省水域及气象站点分布

Fig.1 Distribution of water areas and meteorological stations in Jiangsu Province

1.2 数据来源

采用的数据包括实测数据和遥感数据,其中,实测数据选自国家气象中心的江苏省 96 个气象观测站点 2001—2023 年的逐日降雨量(图 1);遥感数据包括 GPM IMERG 逐日降水产品(<https://disc.gsfc.nasa.gov>)、ERA5 的降水、气温、风速产品(<https://cds.climate.copernicus.eu>)、江苏省 DEM 数据(<https://www.gscloud.cn>)等。具体数据信息见表 1。

表 1 多源数据信息

Table 1 Multi-source data information

数据用途	数据名称	空间分辨率	时间分辨率
降水数据优选	地面观测降水		天(d)
	GPM IMERG 降水	0.1°×0.1°	天(d)
	ERA5 降水	0.1°×0.1°	小时(h)
局部地形因子	DEM	90 m×90 m	
	坡度	90 m×90 m	
	坡向	90 m×90 m	
	地表粗糙度	90 m×90 m	
全局气象因子	气温	0.1°×0.1°	小时(h)
	风速	0.1°×0.1°	小时(h)

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力融合方法 降雨的精度和时空分布直接影响降雨侵蚀力的可靠性,获取高时空分辨率的降水数据对提高降雨侵蚀力精度十分重要。为此,本研究开发了一种基于站点—卫星降水融合的降雨侵蚀力计算方法。具体计算步骤如下。

(1) 卫星降水优选及插值。通过对比地面观测站点的实测数据与对应栅格的卫星降水数据,若 IMERG 数据与实测数据误差较小,则该栅格选用 IMERG 数据,否则选用 ERA5 数据;对于无地面观测站点的栅格,参考相关研究^[15-16],春季(3—5 月)和夏季(6—8 月)选择 IMERG 数据,秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月)选择 ERA5 数据。以此为基础,采用克里金插值法将较粗空间分辨率的卫星降水数据(0.1°)降尺度到更高的空间分辨率(90 m)。

(2) 降水影响因子选取。通过主成分分析法^[17]和相关研究^[18-19]对降水的影响因子进行分析,得到降水的主要影响因素,包括局部地形因子(DEM、坡度、坡向和地表粗糙度)和全局气象因子(气温、风速),裁剪得到江苏省的各影响因子分布。

(3) 降水融合模型构建。根据地面观测站点的实测数据与对应栅格的卫星降水数据,计算两者之间的降水偏差,计算公式为:

$$b(i) = P_o(i) - P_s(i) \quad (1)$$

式中: $b(i)$ 为地面观测站 i 处实测降水数据和对应栅格 i 的卫星降水偏差(mm); $P_o(i)$ 为地面观测站 i 处的观测降水数据(mm); $P_s(i)$ 为地面观测站 i 对应栅格 i 的降尺度卫星降水数据(mm)。

根据局部地形因子和全局气象因子与降水偏差之间的关系,基于地理加权回归模型估算格点的降水偏差^[20],计算公式为:

$$B(i) = \beta_0 + \sum_{m=1}^n \beta_m(i) * X_m(i) + \epsilon \quad (2)$$

$$\beta_m(i) = [X^T \omega(i) X]^{-1} X^T \omega(i) b(i) \quad (3)$$

式中: $B(i)$ 为栅格 i 处的关系模型; β_0 为常数项回归系数; $\beta_m(i)$ 为栅格 i 处的第 m 个变量的回归系数; $X_m(i)$ 为栅格 i 处所对应的第 m 个变量; X^T 为矩阵转置; $\omega(i)$ 为空间权函数; n 为变量个数; ϵ 为随机误差。变量包括局部地形因子(DEM、坡度、坡向和地表粗糙度)和全局气象因子(气温、风速)。其中,空间权函数采用高斯权函数来拟合^[21],计算公式为:

$$\omega(i) = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{b}\right) \quad (4)$$

式中: d_{ij} 为地面观测站点 i 与最邻近栅格点 j 的距离; b 为权重与距离之间函数关系的非负衰减参数,依据 AI 法则来确定^[22]。

将降尺度降水数据与降水偏差模型进行叠加,得到高时空分辨率的降水融合数据,计算公式为:

$$P_{GWR}(i) = P_s(i) + B(i) \quad (5)$$

式中: $P_{GWR}(i)$ 为栅格 i 处的降水融合数据,时空分辨率为 1 d,90 m。

(4) 降雨侵蚀力计算。采用冷暖季日雨量公式计算降雨侵蚀力,该模型基于全国气象站逐分钟和逐日雨量建立,并对冷暖季雨型变化采用不同系数。目前该公式在全国范围内应用广泛^[8,12,23-24],计算公式为:

$$R_{day}(i) = \alpha P_d(i)^{1.7265} \quad (6)$$

式中: $R_{day}(i)$ 为栅格 i 处的日降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)]; $P_d(i)$ 为栅格 i 处降雨量大于 10 mm 的日降雨量(mm);暖季(5—9 月) α 取值为 0.393 7,冷季(10 月至次年 4 月) α 取值为 0.310 1。

1.3.2 降雨侵蚀力评估 为验证该融合方法的降雨侵蚀力结果(R_{merged})的可靠性,采用几种常用的统计指标来衡量其与地面观测站点插值降雨侵蚀力结果($R_{station}$)、卫星降水计算的降雨侵蚀力结果($R_{satellite}$)的准确度,包括偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)和相关系数(R)^[25],计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (9)$$

式中: y_i 为栅格 i 处的 R_{merged} 或 $R_{\text{satellite}}$ [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; x_i 为栅格 i 处的 R_{station} [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$].

1.3.3 时空特征分析 采用气候倾向率^[5]分析降雨侵蚀力变化趋势,计算公式为:

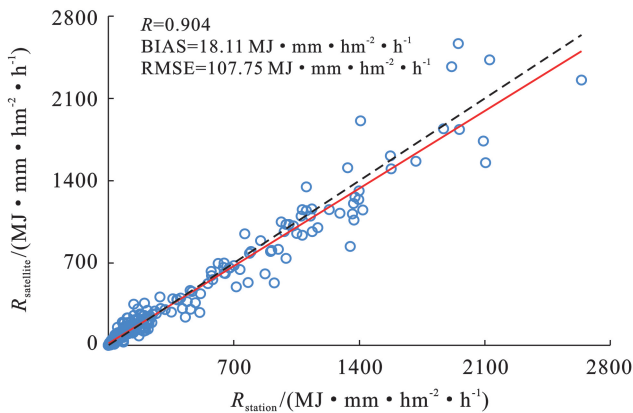
$$y_i = a + b \cdot t_i \quad (10)$$

式中: y_i 为降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; t_i 为对应的时间;回归系数的 10 倍即为气候倾向率 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$]; $10 b > 0$ 表示随时间增加而呈上升趋势,反之呈下降趋势。

时间 t_i 与变量 y_i 的相关系数是判断变化趋势显著性的重要指标,计算公式为:

$$r = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}} \quad (11)$$

在显著性水平 α 下,若 $|r| > r_\alpha$,表明随时间变化



趋势显著,反之不显著。

1.3.4 侵蚀密度 采用侵蚀密度(ED)来评估降雨侵蚀力的强度,计算公式为:

$$\text{ED} = \frac{R_{\text{merged}}}{P} \quad (12)$$

式中:ED 为侵蚀密度 [$\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; R_{merged} 为年均降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; P 为年均降雨量 [mm/a]. ED 值高的地区表明有强降水和潜在高径流发生^[26],更易发生水土流失。

2 结果与分析

2.1 融合降雨侵蚀力精度分析

图 2 为卫星降雨侵蚀力($R_{\text{satellite}}$)、融合降雨侵蚀力(R_{merged})与站点降雨侵蚀力(R_{station}) 在月尺度上的散点密度图,从图 2a 中可以看到 $R_{\text{satellite}}$ 具有较大的不确定性,尤其是在高值区散点分布更为离散,散点拟合线与 1:1 线偏离较大,其对应的统计指标结果较差,3 个统计指标的值分别为: $R = 0.904$, $\text{BIAS} = 18.11 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, $\text{RMSE} = 107.75 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$.图 2b 中融合算法 R_{merged} 的 3 个统计指标均有较大的提高,分别为: $R = 0.973$, $\text{BIAS} = 14.25 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, $\text{RMSE} = 69.01 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,在高值区散点更为集中,散点拟合线与 1:1 线更为接近,因此融合降雨侵蚀力的精度有了较大的提高。

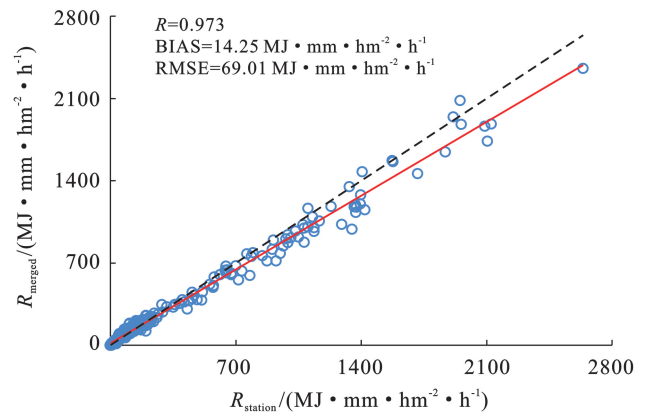


图 2 卫星降雨侵蚀力、融合降雨侵蚀力与站点降雨侵蚀力在月尺度上的散点密度

Fig.2 Scatter density of satellite-based rainfall erosivity ($R_{\text{satellite}}$), merged rainfall erosivity (R_{merged}), and station-based rainfall erosivity (R_{station}) at monthly scale

进一步分析了 96 个站点的卫星降雨侵蚀力($R_{\text{satellite}}$)、融合降雨侵蚀力(R_{merged})与站点降雨侵蚀力(R_{station})统计指标,图 3 为对比分析统计指标的箱型图,96 个站点的 R_{merged} 的相关系数高于 $R_{\text{satellite}}$ (图 3a); R_{merged} 的偏差范围明显小于 $R_{\text{satellite}}$ (图 3b),其平均偏差也明显降低,为 $7.27 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$;

与偏差结果相似, R_{merged} 的均方根误差范围明显小于 $R_{\text{satellite}}$ (图 3c),其平均均方根误差也显著降低。为验证该算法在空间分布上对降雨侵蚀力精度是否有所提高统计了指标空间分布(图 4)。从图 4 中可以看到,该算法在多数站点的精度均有所提升, R_{merged} 的相关系数有较大提升,均方根误差有所减小,该算法不

受局部站点的限制,可以在整个研究区取得较好的融合效果。综上所述,基于多源降水融合算法的降雨侵

蚀力在时间和空间尺度上显著提升了原始卫星降雨侵蚀力的准确性,进一步证明该方法的有效性。

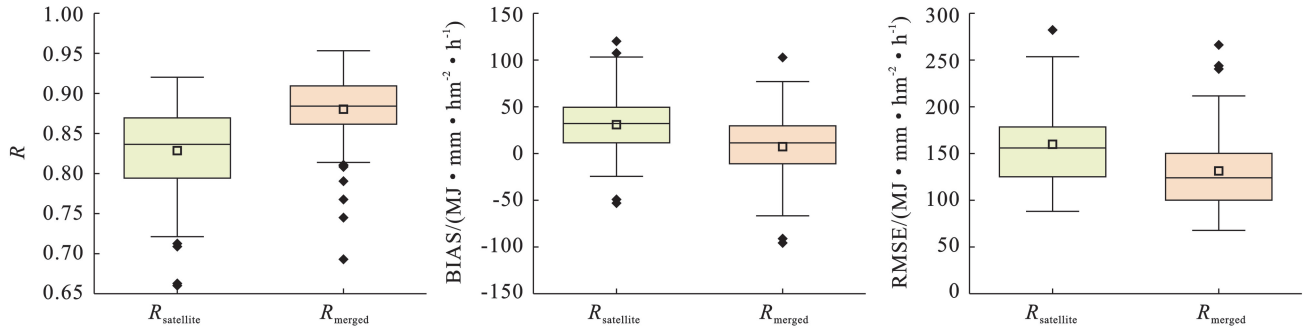


图 3 卫星降雨侵蚀力($R_{\text{satellite}}$)、融合降雨侵蚀力(R_{merged})与站点降雨侵蚀力(R_{station})在 96 个站点的统计指标箱型图
Fig.3 Box plots of statistical metrics for satellite-based rainfall erosivity ($R_{\text{satellite}}$), merged rainfall erosivity (R_{merged}), and station-based rainfall erosivity (R_{station}) across 96 stations

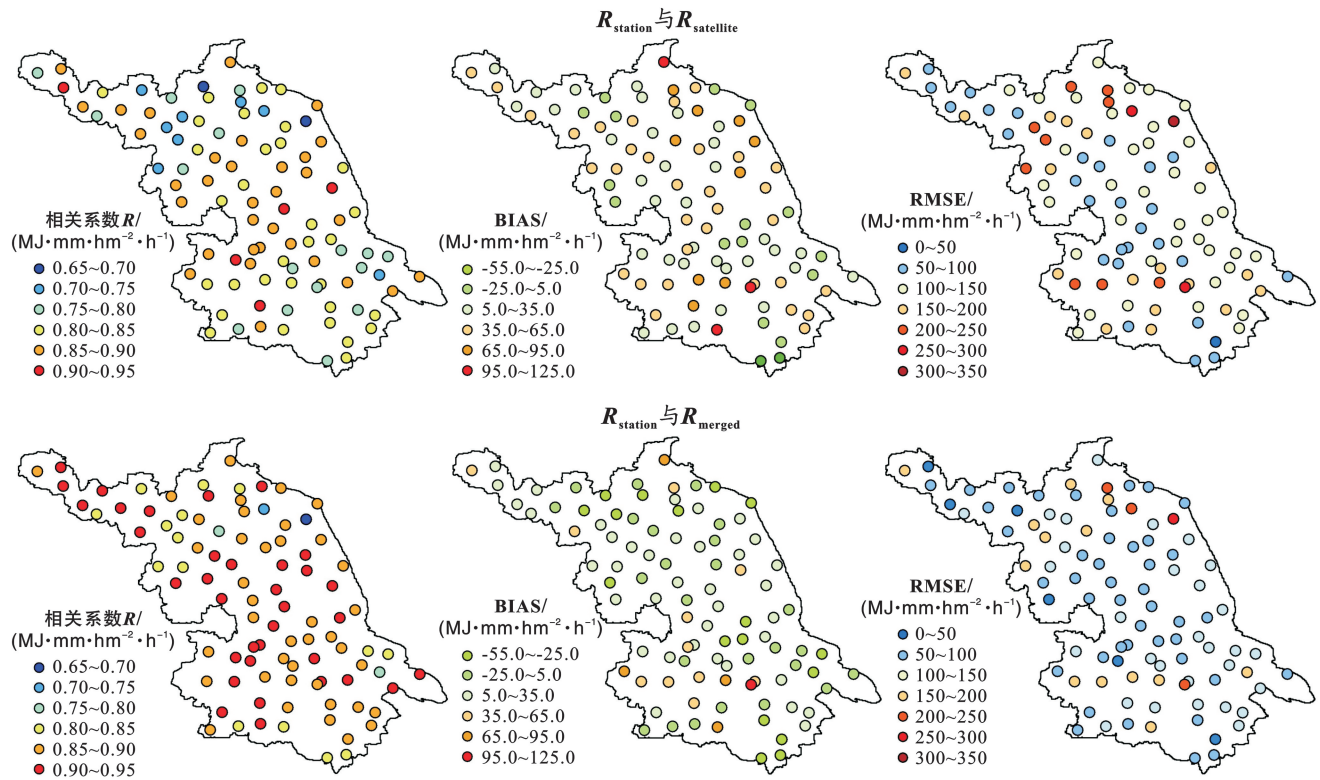


图 4 96 个站点月尺度统计指标的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of monthly scale statistical indicators of 96 stations

2.2 降雨侵蚀力时空变化特征

图 5a 为 2001—2023 年江苏省年均降雨侵蚀力的空间分布,可以看出江苏省年均降雨侵蚀力为 $4\ 709.39\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,变化范围在 $3\ 658.18 \sim 6\ 352.49\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 之间,空间分布总体呈北低南高,高值区主要分布在镇江市西部和无锡市南部一带,低值区主要在徐州市北部。江苏省 2001—2023 年降雨侵蚀力变化趋势如图 5b 所示,图中阴影部分表示该区域变化趋势显著,即通过了显著性水平 95% ($\alpha < 0.05$) 检验。结果表明,2001—2023

年江苏省年降雨侵蚀力呈增加趋势,气候倾向率为 $7.09\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\ \text{a})$,其中,无锡和苏州南部地区降雨侵蚀力呈显著增加趋势,气候倾向率为 $12.46\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\ \text{a})$;淮安市、盐城市西部和连云港市北部地区降雨侵蚀力呈减少趋势但不显著,气候倾向率为 $-6.42\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\ \text{a})$;其他地区降雨侵蚀力变化较小且不显著。由于近年来江淮梅雨带北移和东亚季风水汽输送异常,其所携带的大量水汽在长江中下游广大地区稳定滞留,导致苏南地区降雨侵蚀力有所增强。

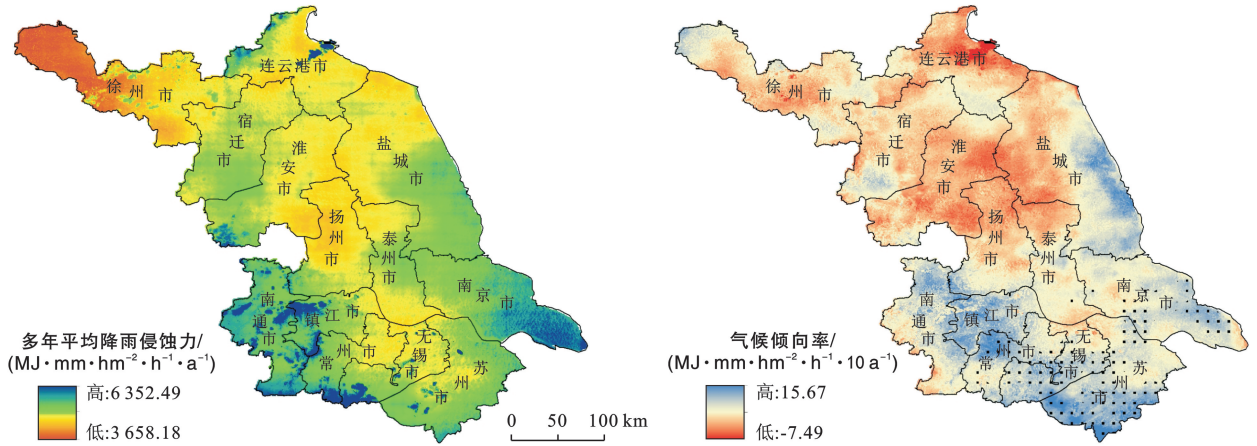


图 5 2001—2023 年江苏省年均降雨侵蚀力、气候倾向率及其显著性空间分布

Fig.5 Spatial distribution of mean annual rainfall erosivity, climate tendency rate and significance of annual rainfall erosivity in Jiangsu Province from 2001 to 2023

江苏省降雨侵蚀力在不同季节的空间分布如图 6 所示。由于受地形、海拔高度等的影响,降雨侵蚀力季节差异明显。由图 6b 可见,江苏省夏季(6—8 月)年均降雨侵蚀力最大为 $3\,258.14\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,约占全年降雨侵蚀力的 69.18%,其变化范围为 $2\,382.67\sim 4\,451.92\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,

与年降雨侵蚀力空间分布不同,江苏省夏季降雨侵蚀力的空间分布总体呈南低北高,高值区主要在宿迁市、徐州市北部和南京市东部,低值区主要在无锡市和苏州市,造成这一明显现象原因可能与江苏省南北延伸的地理特征以及处于亚热带和暖温带的气候过渡带有关。

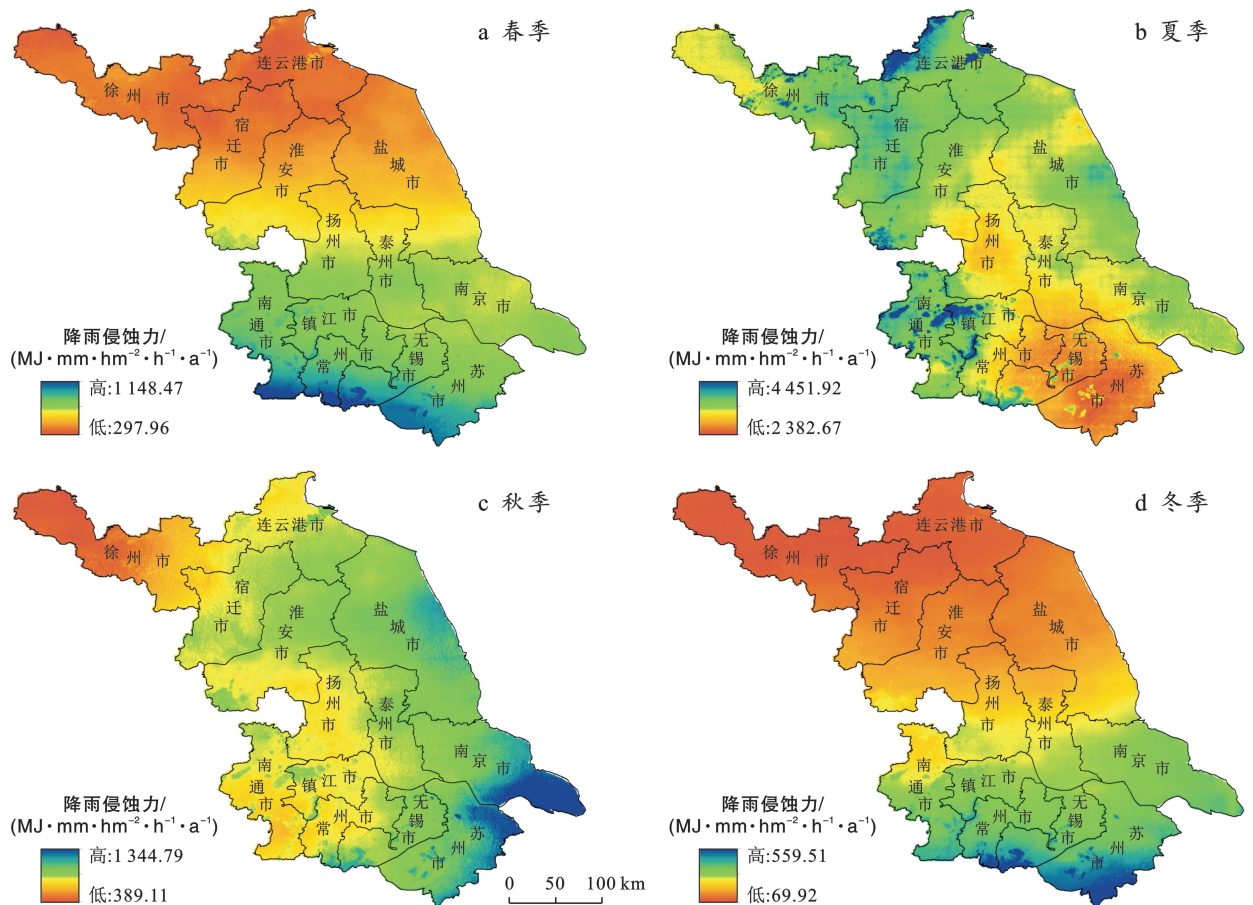


图 6 2001—2023 年江苏省不同季节降雨侵蚀力的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of rainfall erosivity across different seasons in Jiangsu Province from 2001 to 2023

近 30 a 来,东太平洋海温的年代际异常导致季风区夏季雨带北移,逐渐北抬的西太平洋副高压加强与江淮梅雨锋系叠加作用,使得苏北地区的强对流天气增多,苏北地区强降水事件频发。图 6d 表明冬季(12月至次年 2月)年均降雨侵蚀力最小为 $193.65 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,约占全年降雨侵蚀力的 4.11%,变化范围为 $69.92 \sim 559.51 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,空间分布差异显著,降雨侵蚀力自扬州泰州中部以北地区较小,以南地区较大。从图 6a 和图 6c 可以看到,春季(3—5月)和秋季(9—11月)年均降雨侵蚀力相差不大,分别为 $520.74 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 和 $736.87 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,各占全年降雨侵蚀力的 11.06% 和 15.65%,其中春季降雨侵蚀力空间分布与冬季一致;秋季降雨侵蚀力呈西北低东南高,低值区主要分布在徐州西北部,高值区主要分布在南通东南部和苏州东北部。

图 7 进一步分析了降雨侵蚀力季节变化的空间分

布,图 7b 表明夏季降雨侵蚀力在研究区西南部呈显著的增加趋势,10 a 间平均增幅约为 $12.3 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$,东北部的降雨侵蚀力呈不显著的下降趋势,其他地区变化幅度较小且不显著。由于苏南地区城市化水平较高,雨岛效应更为显著,且受东亚夏季风的影响更为强烈,导致苏南地区夏季降水增加趋势显著。图 7d 表明冬季降雨侵蚀力变化趋势总体呈北部增加趋势,其中宿迁市呈显著增加趋势,研究区东南部呈不显著的下降趋势。近年来随着全球气温升高,冬季季风逐渐减弱,近地表西伯利亚高压减弱,使得冬季气温增加,侵蚀性降雨增多,冬季降雨侵蚀力呈现增湿的态势。春季降雨侵蚀力变化南北差异显著(图 7a),自扬州泰州中部以北地区呈下降趋势,以南地区呈增加趋势。从图 7c 可以看出,秋季降雨侵蚀力变化趋势在研究区东部呈显著增加趋势,其中南通东南部增加趋势最大,研究区西部地区呈不显著的下降趋势。

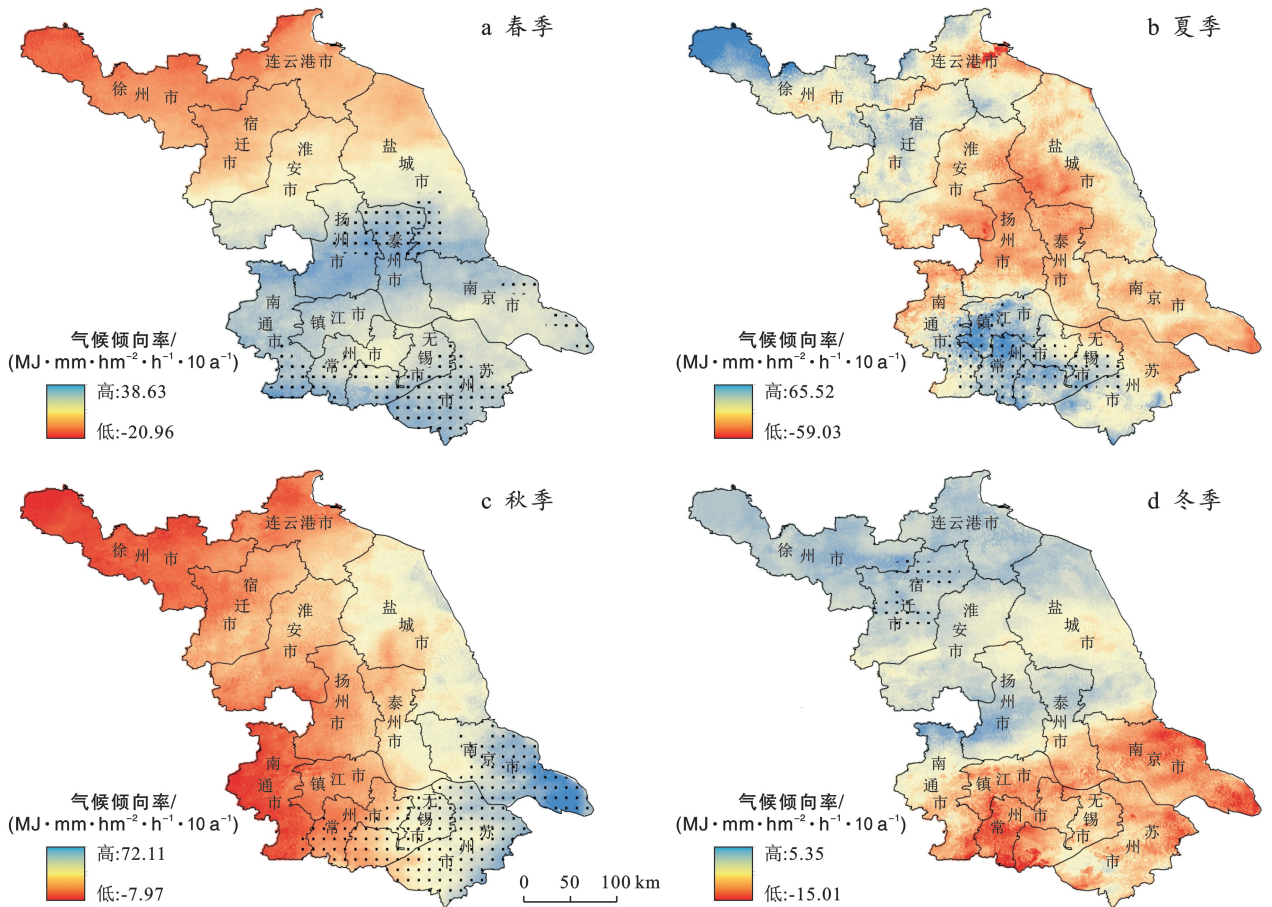


图 7 2001—2023 年江苏省季节降雨侵蚀力气候倾向率及其显著性空间分布

Fig.7 Spatial distribution of climate tendency rate and significance of seasonal rainfall erosivity in Jiangsu Province from 2001 to 2023

2.3 侵蚀密度及易发区划分

2001—2023 年的侵蚀密度如图 8a 所示,江苏省年

侵蚀密度为 $4.96 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,变化范围为 $3.86 \sim 5.85 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,与降雨侵蚀力分布不同,侵蚀密

度空间分布呈北高南低,高值区主要分布在徐州市的东部、连云港市的北部地区,低值区在苏州市的南部地区。为进一步识别降雨侵蚀易发区,根据几何间隔法将侵蚀密度(ED)和年均降雨量分为 4 类,分别代表极低(Q_1)、低(Q_2)、高(Q_3)、极高(Q_4)等级,形成 ED 和年均降雨量的耦合图^[21,27]来探究侵蚀敏感性(图 8b)。最易受影响的为 ED 值极高且年均降雨量

极低区域,如徐州市的东部、镇江市的西部和南京市的北部零星地区,以及 ED 值极高且年均降雨量极高的区域,如连云港市的北部和盐城市的东部地区;敏感性低为 ED 值极低且年均降雨量极低区域,如扬州市和泰州市地区。此外,降雨量较高但降雨分布均匀,ED 值非常低的区域也不易受到侵蚀,如苏州市的南部和南通市的西部地区。

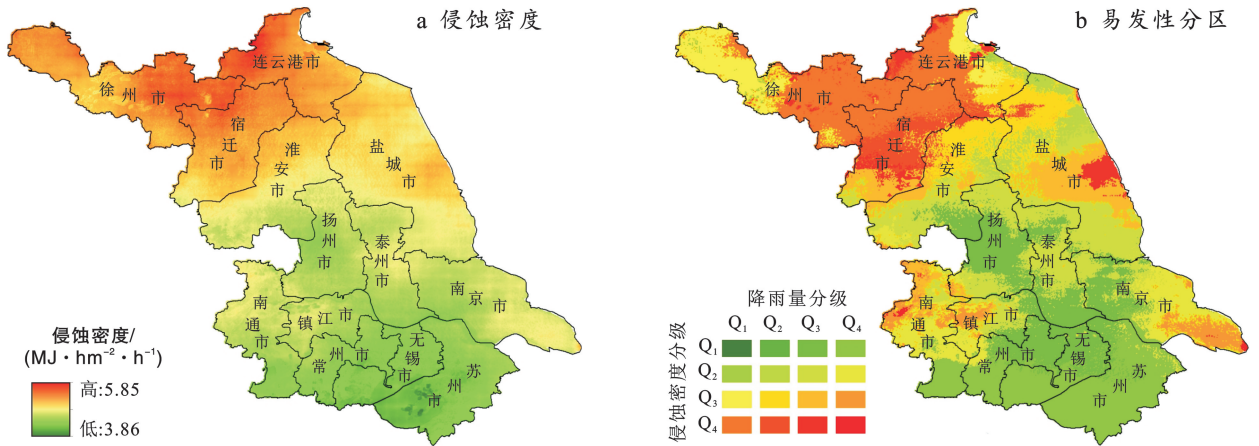


图 8 江苏省侵蚀密度及潜在侵蚀易发区空间分布

Fig.8 Spatial distribution of erosivity density and potentially erosion-susceptible areas in Jiangsu Province

3 讨论

江苏省作为南方水蚀区水土流失重点防治省份之一,江苏省年均降雨侵蚀力为 $4\ 709.39\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,空间分布呈北低南高,与罗梦琦等^[12]基于最优站点密度计算的降雨侵蚀力结果基本一致。其中,夏季降雨侵蚀力苏北地区较高,该地区应作为江苏省夏季水土流失防治的重点,这与余寒等^[13]研究结果基本一致。近年来极端降水事件频发,侵蚀性降雨增多,降雨侵蚀力变化明显。近 20 a 江苏省降雨侵蚀力呈增加趋势,其中苏南地区呈显著增加趋势。受地形、气候等的影响,降雨侵蚀力季节差异明显,总体呈夏季多冬季少,其中夏季降雨侵蚀力占全年的 60%以上^[13];受东亚夏季风的影响和较高城市化水平带来的“雨岛效应”^[28],苏南地区夏季的降雨侵蚀力呈显著的增加趋势,在今后应加强对夏季的降雨侵蚀力的监管。

江苏省土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,相关动态监测数据指出,全省现有水土流失面积 $2\ 290.18\ \text{km}^2$,空间分布上主要集中在南京市北部、常州市南部、连云港市北部、淮安市西南部、镇江市西部等的山丘区^[29],与本研究基于侵蚀密度和年均降雨量的耦合图,预测的全省降雨侵蚀最易发区基本一致。降雨侵蚀力空间分异受降雨量、降雨强度、地形、气候等影

响,在未来应多关注极端天气下降雨侵蚀力高值区及易发区,探究其与大气环流等多种因素影响,减少区域水土流失风险,为区域降雨侵蚀预测、土壤流失防治和水土保持措施制定提供科学依据。

4 结论

(1) 基于站点—卫星降水融合方法的降雨侵蚀力具有一定的可靠性,融合降雨侵蚀力相较于卫星降雨侵蚀力和站点降雨侵蚀力,在时间尺度上显著提升了准确性,具有较高的相关系数、较小的偏差和均方根误差,有效捕捉降雨侵蚀力的高值,减少不确定性和误差。

(2) 2001—2023 年江苏省多年平均降雨侵蚀力为 $4\ 709.39\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,空间分布为北低南高;受地形、气候等的影响,降雨侵蚀力季节差异明显,季节分布总体呈:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,其中夏季降雨侵蚀力占全年的 69.18%,春秋两季各占全年降雨侵蚀力的 11.06%和 15.65%,冬季仅占全年的 4.11%。

(3) 2001—2023 年江苏省年降雨侵蚀力呈增加趋势,气候倾向率为 $7.09\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\ \text{a})$,其中,降雨侵蚀力变化空间分布上苏南地区呈显著增加趋势,苏北部地区呈减少趋势但不显著;季节气候倾向率变化差异显著,其中,春季、夏季和秋季降雨侵蚀

力在研究区南部呈显著的增加趋势,北部呈不显著的下降趋势,冬季反之。

(4) 江苏省年侵蚀密度为 $4.96 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 空间分布呈北高南低,结合侵蚀密度和年均降雨量的耦合图探究降雨侵蚀敏感性,江苏省侵蚀敏感高的区域为徐州市东部、连云港市北部和镇江市西部、南京市北部零星地区,敏感性低的区域为扬州市和泰州市地区。

参考文献 (References)

- [1] 鞠艳,杨星,董阿忠,等.里下河平原区径流模拟及其对极端降水响应分析[J].水文,2024,44(4):82-88.
Ju Yan, Yang Xing, Dong Azhong, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Lixia River plain [J]. Journal of China Hydrology, 2024,44(4):82-88.
- [2] 宋爽,牛天一,陈长胜,等.吉林省不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征[J].水土保持通报,2024,44(4):215-224.
Song Shuang, Niu Tianyi, Chen Changsheng, et al. Characteristics of rainfall erosivity under different magnitudes of rainfall in Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):215-224.
- [3] 张悦,张艳,史飞航,等.基于不同模型的黄河中游降雨侵蚀力时空变化分析[J].水土保持通报,2023,43(2):220-229.
Zhang Yue, Zhang Yan, Shi Feihang, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in middle reaches of Yellow River based on different models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):220-229.
- [4] Yue Tianyu, Xie Yun, Yin Shuiqing, et al. Effect of time resolution of rainfall measurements on the erosivity factor in the USLE in China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020,8(4):373-382.
- [5] 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.
- [6] 梁宇靖,沈润平,师春香,等.基于 CLDAS 融合降水的中国降雨侵蚀力研究[J].干旱区地理,2022,45(5):1333-1346.
Liang Yujing, Shen Runping, Shi Chunxiang, et al. Rainfall erosivity in China based on CLDAS fusion precipitation [J]. Arid Land Geography, 2022,45(5):1333-1346.
- [7] 田丹丹,殷水清.雷达测雨及其在土壤侵蚀中的应用研究进展[J].水土保持学报,2019,33(6):1-9.
Tian Dandan, Yin Shuiqing. Advances in radar rainfall measurement and its application in soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):1-9.
- [8] 高歌,殷水清,陈涛,等.长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析[J].农业工程学报,2022,38(3):84-92.
Gao Ge, Yin Shuiqing, Chen Tao, et al. Spatiotemporal variation and cause analysis of rainfall erosivity in the Yangtze River basin of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(3):84-92.
- [9] 邢贞相,段维义,刘明阳,等.四种网格化降水产品估算中国大陆区域降雨侵蚀力比较[J].农业工程学报,2023,39(5):100-109.
Xing Zhenxiang, Duan Weiyi, Liu Mingyang, et al. Comparison of the four gridded precipitation products for estimating regional rainfall erosivity in Mainland China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(5):100-109.
- [10] 熊立华,刘成凯,陈石磊,等.遥感降水资料后处理研究综述[J].水科学进展,2021,32(4):627-637.
Xiong Lihua, Liu Chengkai, Chen Shilei, et al. Review of post-processing research for remote-sensing precipitation products [J]. Advances in Water Science, 2021,32(4):627-637.
- [11] 戴强,刘超楠,张亚茹,等.基于多模式雷达遥感的陆表降雨反演研究进展[J].遥感学报,2023,27(7):1574-1589.
Dai Qiang, Liu Chaonan, Zhang Yaru, et al. Development of precipitation retrieval based on multimode radar remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(7):1574-1589.
- [12] 罗梦琦,刘霞,郭红丽,等.江苏省水土流失动态监测降雨侵蚀力因子站点密度优化研究[J].江苏水利,2024(3):7-11.
Luo Mengqi, Liu Xia, Guo Hongli, et al. Study on optimization of site density of rainfall erosivity factor for dynamic monitoring of soil erosion in Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources, 2024(3):7-11.
- [13] 余寒,杨凯,闵俊杰,等.近 50 年江苏省降雨侵蚀力的时空变化[J].江西农业学报,2018,30(10):106-111.
Yu Han, Yang Kai, Min Junjie, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity in Jiangsu Province in recent 50 years [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018,30(10):106-111.
- [14] 齐斐,张春强,刘霞,等.基于 M-K 检验和地统计分析的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J].水土保持

- 通报, 2021, 41(5):146-153.
- Qi Fei, Zhang Chunqiang, Liu Xia, et al. Spatiotemporal variation trend analysis of rainfall erosivity in Yimeng Mountain region based on M-K test and geostatistical analysis [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5):146-153.
- [15] 梁宇靖. CLDAS-precp 融合降水改进及其在降雨侵蚀力中的应用[D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- Liang Yujing. Improvement of CLDAS-precp fusion precipitation and its application in rainfall erosivity [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.
- [16] 李麒麟, 张万昌, 易路, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. *水科学进展*, 2018, 29(3):303-313.
- Li Qilun, Zhang Wanchang, Yi Lu, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over China's Mainland [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3):303-313.
- [17] Ju Yan, Yang Xing, Wang Dongmei, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation in the Lixia River basin, China, between 1960 and 2019 under global warming, atmospheric circulation, and local effects [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2023, 28(10):05023016.
- [18] Li Peixi, Yu Zhongbo, Jiang Peng, et al. Spatiotemporal characteristics of regional extreme precipitation in Yangtze River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603:126910.
- [19] Sobie S R, Murdock T Q. High-resolution statistical downscaling in Southwestern British Columbia [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(6):1625-1641.
- [20] Chao Lijun, Zhang Ke, Li Zhijia, et al. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558:275-289.
- [21] Fenta A A, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Improving satellite-based global rainfall erosivity estimates through merging with gauge data [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620:129555.
- [22] Tu Jun, Xia Zongguo. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression: I. Model design and evaluation [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 407(1):358-378.
- [23] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10):45-51.
- Yin Shuiqing, Zhang Wenbo, Xie Yun, et al. Spatial distribution of rainfall erosivity in China based on high-density station network [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):45-51.
- [24] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. *中国水土保持*, 2013(10):26-34.
- Liu Baoyuan, Guo Suoyan, Li Zhiguang, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):26-34.
- [25] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6):104-110.
- Ju Yan, Zhang Ke, Li Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6):104-110.
- [26] Dabney S M, Yoder D C, Vieira D A N, et al. Enhancing RUSLE to include runoff-driven phenomena [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(9):1373-1390.
- [27] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54:438-447.
- [28] 惠品宏, 陈燕, 杨杰, 等. 针对江苏省气温和降水的高分辨率降尺度模拟及预估[J]. *气象科学*, 2022, 42(4):481-494.
- Hui Pinhong, Chen Yan, Yang Jie, et al. Dynamical downscaling and projection of surface air temperature and precipitation in Jiangsu Province with high resolution [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(4):481-494.
- [29] 张洋, 彭瑶, 刘竞妍, 等. 江苏省水土流失重点防治区划分[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2):300-306.
- Zhang Yang, Peng Yao, Liu Jingyan, et al. Regionalization of key preventing and controlling areas of soil and water loss in Jiangsu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2):300-306.