

DOI: 10.20103/j.stxb.202407231738

李嘉睿, 李乐, 郝泽周, 高丙涛, 叶天一, 孙冰, 陈雷, 裴男才. 1982—2022 年南方红壤区降雨侵蚀力时空格局演变及其归因分析. 生态学报, 2025, 45(9): 4248–4262.

Li J R, Li L, Hao Z Z, Gao B T, Ye T Y, Sun B, Chen L, Pei N C. Spatial-temporal pattern evolution and attribution analysis of rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4248–4262.

1982—2022 年南方红壤区降雨侵蚀力时空格局演变及其归因分析

李嘉睿^{1,2}, 李 乐^{1,*}, 郝泽周¹, 高丙涛¹, 叶天一¹, 孙 冰¹, 陈 雷³, 裴男才¹

1 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520

2 南京林业大学, 南京 210037

3 国际竹藤中心, 北京 100102

摘要: 降雨侵蚀力是衡量降雨对土壤侵蚀潜力的重要指标, 研究其长期演变规律对于区域水土保持规划及生态系统管理具有重要意义。基于南方红壤区 279 个气象站 1982—2022 年逐日降雨资料, 采用 Mann-Kendall 非参数检验、Kriging 插值、重力模型、地理探测器等方法分析了南方红壤区降雨侵蚀力的变化趋势、分布特征及影响因素, 以期为南方红壤区土壤侵蚀预报及水土流失治理提供参考。结果表明: 南方红壤区 1982—2022 年均降雨侵蚀力为 $8786.95 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 呈显著上升趋势。季节降雨侵蚀力分布不均, 约有五成发生在夏季, 受降雨侵蚀的风险最高; 南方红壤区年降雨侵蚀力变化范围为 $3628.89—24654.70 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 总体呈现自北向南增加的趋势, 大部分分区 (83.7%) 的年降雨侵蚀力呈现上升趋势; 侵蚀性降雨量的 q 值为 0.872, 是南方红壤区降雨侵蚀力增加的主要驱动力, 侵蚀性降雨日数、雨强和纬度是次要影响因素, q 值分别为 0.504、0.492 和 0.388。交互作用上, 侵蚀性降雨量与侵蚀性雨强交互作用的 q 值最大为 0.950。经纬度和海拔等地理因子根据区域的不同表现出不同的影响力, 南方红壤区降雨侵蚀力的变化是多种因素共同作用的结果。由于地貌复杂、气候变化加剧和人类高强度活动, 南方红壤区水土流失问题依然严峻, 应根据各分区具体情况进一步加强相应的水土保持措施。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空变化; 侵蚀性降雨; 影响因子; 南方红壤区

Spatial-temporal pattern evolution and attribution analysis of rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022

LI Jiarui^{1,2}, LI Le^{1,*}, HAO Zezhou¹, GAO Bingtao¹, YE Tianyi¹, SUN Bing¹, CHEN Lei³, PEI Nancai¹

1 Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

2 Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

Abstract: Rainfall erosivity serves as an important indicator of soil erosion potential due to rainfall. Analyzing the long-term evolution of rainfall erosivity is significant for regional soil and water conservation planning and ecosystem management. This study used the daily rainfall data from 279 meteorological stations in the southern red soil region from 1982 to 2022 to analyze rain fall erosivity. The rainfall erosivity at each station was calculated using the Zhang model. The spatial-temporal variation trend, distribution characteristics and climatic and geographic drivers of the rainfall erosivity were analyzed using the Mann-Kendall test, the Kriging interpolation, the gravity model and GeoDetector. The results show that the annual average rainfall erosivity in the southern red soil region was $8786.95 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ from 1982—2022, exhibiting a

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFF1303004); 国家自然科学基金项目 (32301669)

收稿日期: 2024-07-23; 网络出版日期: 2025-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zglkylile@163.com

significant upward trend. Seasonal rainfall erosivity was unevenly distributed, with approximately 50% occurring in summer, leading to the highest soil erosion risk due to rainfall. The annual rainfall erosivity in the southern red soil region ranged from 3,628.89 to 24,654.70 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹ and showed an overall spatial trend of increasing from north to south. Most subregions (83.7%) also had an increasing annual rainfall erosivity. Erosive rainfall had a q -value of 0.872 and was the main driving force of the increase in rainfall erosivity in the southern red soil region. The number of erosive rainfall days, rainfall intensity and latitude were the secondary influencing factors, with a q -value of 0.504, 0.492 and 0.388, respectively. The q -value for the interaction between erosive rainfall and intensity was the highest (0.950). Geographical factors, such as latitude, longitude and elevation, showed different influences across regions. The variations in rainfall erosivity resulted from the combined effect of various factors. Due to the complex topography, exacerbated climate change and intense human activities, soil and water erosion remained a significant issue in the southern red soil region. Therefore, it is imperative to enhance soil and water conservation measures based on specific regional conditions. The findings can provide a reference for soil erosion forecast and management in the southern red soil area.

Key Words: rainfall erosivity; spatiotemporal characteristics; erosive rainfall; influencing factor; red soil region

土壤侵蚀,特别是广泛发生的水力侵蚀,是导致全球范围内土壤肥力下降、土地退化和水质恶化的重要因素,严重威胁粮食安全和生态系统可持续性^[1-2]。区域降水特征、植被覆盖、土地利用、土壤、地形等均是影响土壤侵蚀的重要因素^[3-4]。其中,降雨是诱发土壤侵蚀的原动力^[5],通过雨滴击溅和径流剥蚀的方式对于土壤进行破坏和分离^[6]。降雨侵蚀力(rainfall erosivity)将雨滴能量与降雨强度耦合,反应了降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,是区域土壤侵蚀潜在风险评估及预测的重要指标^[7]。降雨侵蚀力大小与降雨历时、雨量、强度、雨型等降雨特征紧密相关^[8],其时空分布在一定程度上决定了土壤侵蚀强度的时空变化规律^[9]。在全球气候变化的背景下,暴雨频次、雨量和降水强度呈显著增加趋势^[8],这将进一步加剧土壤侵蚀风险。因此,在长时间尺度上分析降雨侵蚀力的时空变化对土壤侵蚀预报及水土流失治理具有重要意义^[10]。

从降雨侵蚀力的估算方法来看,基于次降雨动能(E)与最大 30 min 降雨强度(I_{30})乘积表征的降雨侵蚀力是国内外学者公认的经典算法(即 EI_{30} 经典算法)^[11]。但该方法计算过程繁琐且高时间分辨率降雨数据难以获取,在降雨侵蚀力长期趋势及大尺度估算中局限性较大。作为替代方案,学者们基于常规降雨资料提出了日(小时)、月、年雨量侵蚀力计算模型^[12-14],为流域乃至区域尺度降雨侵蚀力估算提供了有效途径。其中章文波等^[15]提出的用日雨量估算半月降雨侵蚀力的模型在不同空间尺度上(国家、省域、流域)得到了广泛的验证和应用,特别是在南方降雨丰富地区^[16-18]。以往研究表明,受降雨特征和地理要素(地形地貌、地理位置等)空间异质性的影响,降雨侵蚀力格局具有空间分异和区域特征。例如,高歌等^[19]对长江流域 1961—2017 年降雨侵蚀力的时空变化及成因进行研究发现,受雨强显著增加的影响,长江流域年降雨侵蚀力变化速率增加,对水土流失的预防和治理十分不利;卢旭东等^[6]分析表明南渡江流域降雨侵蚀力整体呈现波动上升趋势,年内分布集中在 7—9 月;马亚丽等^[20]的研究表明洮河流域的降雨侵蚀力呈现增加趋势;操月等^[8]研究表明近百年西南地区降雨侵蚀力有 47.59% 的区域呈现减少趋势,32.91% 的区域呈现增加趋势;黄土高原地区的年降雨侵蚀力呈现下降趋势^[21-22]。空间相关性和异质性是自然界中存在秩序、格局和多样性的基本原因^[23]。因此,深入分析降雨侵蚀力的长期演变规律,探索不同发展和生态背景下的区域差异,对区域生态系统管理具有重要的理论和现实意义。

我国是土壤侵蚀最严重的国家之一,近十年来我国水土保持工作成就显著,但由于特殊的自然地理和气候条件,以及现代化、城镇化的快速发展,我国的水土保持工作仍然面临严峻形势。据中国水土保持公报显示,2023 年全国水土流失面积达 262.76 万 km²,其中水力侵蚀面积 107.14 万 km²^[24]。土壤侵蚀引起的生态环境恶化趋势仍未得到根本改变,依然是限制区域可持续发展的重要因素。南方红壤区是我国水土保持规划的 8 个一级区之一,包含洞庭湖、鄱阳湖等重要湿地,长江、珠江三角洲等重要城市群,同时也是重要的粮食、

经济作物生产基地。南方红壤区的水土流失多呈斑点状分布,隐蔽性强,潜在危险性大,虽然林草覆盖率较高,但其林相单一,且多为中、幼年林,导致了“远看青山在,近看水土流”的现象^[25]。2022 年该区水土流失面积 12.87 万 km², 占其土地总面积的 10.45%, 且全部为水力侵蚀^[23]。尽管已有研究揭示了南方红壤区个别流域的降雨侵蚀力时空变化规律^[26—28], 但受地形、降水等因素显著差异的影响,降雨侵蚀力时空演变特征在流域间乃至流域内部不尽相同,且缺乏对其与气象、地理因子关系的深入分析。因此,红壤区降雨侵蚀力演变的地域差异特征及影响因素仍不明晰。鉴于此,本文基于南方红壤区 279 个气象站 1982—2022 年逐日降雨数据,采用 Theil-Sen 中值趋势及 Mann-Kendall 检验、Kriging 插值、重力模型和地理探测器等方法,分析了南方红壤区降雨侵蚀力在长时间尺度上的时空分布特征、变化趋势和影响因素,以期为南方红壤区域土壤侵蚀风险判定、预测和生态安全格局评价提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南方红壤区(107°28′—122°56′E, 18°08′—34°07′N)以大别山为北屏,巴山、巫山为西障,西南以云贵高原为界,东南直抵海域。涉及江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、香港、澳门等省(自治区、特别行政区)的全部或部分地区的部分地区,分属长江、珠江和东南诸河流域。该地区山地、丘陵、平原交错分布,河湖水网密布,地貌特征复杂。气候上,该地区以亚热带、热带季风气候为主,大部分地区年均降雨量 800—2000 mm,远大于全国年均降雨量。土壤类型主要为红壤、黄壤,非地带性土壤有紫色土、石灰土、水稻土等,土壤结构薄而疏松,局部地区崩岗发育。高强度的降雨对疏松地表土壤的破坏和短时间形成的径流作用非常显著,极易诱发严重的水土流失。长期剧烈的人类活动加上特殊的地质条件,南方红壤区正面临着越来越严重的水土流失威胁。

1.2 数据来源

本研究采用的数据集来自中国气象局国家气候中心,选取南方红壤区及其周边 279 个国家级标准气象站 1982—2022 年的逐日降水数据,资料序列完整,已对数据准确性进行质量控制,可信度较高。为了方便分析降雨侵蚀力分布特征,按照《全国水土保持区划》(试行)将南方红壤区划分为 8 个水土保持二级区划与 29 个水土保持三级区划。具体分区及气象站点分布见图 1。

1.3 降雨侵蚀力计算方法

本文基于章文波模型^[15]计算日降雨侵蚀力,计算方法如下:

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

式中: R 为某半月的降雨侵蚀力 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹; k 为半月时段内的天数; P_j 为半月内第 j 天的日侵蚀性降雨量。其中侵蚀性降雨定义为日降雨量 ≥ 12 mm。 α 、 β 为模型待定参数,可用以下公式估算:

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

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

式中: P_{d12} 、 P_{y12} 分别为 ≥ 12 mm 的日平均降雨量(mm)和年平均降雨量(mm)。

1.4 统计分析

1.4.1 时间趋势分析

Theil-Sen Median 方法和 Mann-Kendall 检验由于不需要遵循一定的样本分布和避免异常值干扰等优点被广泛应用于判断气候、水文要素随时间变化的情况。在本研究中,降雨侵蚀力趋势的显著性以 $P < 0.05$ 的置信水平评估。根据标准化检验统计量 Z 的值,将结果分为显著变化($Z \geq 1.96$ 或 $Z \leq -1.96$) 和不显著变化

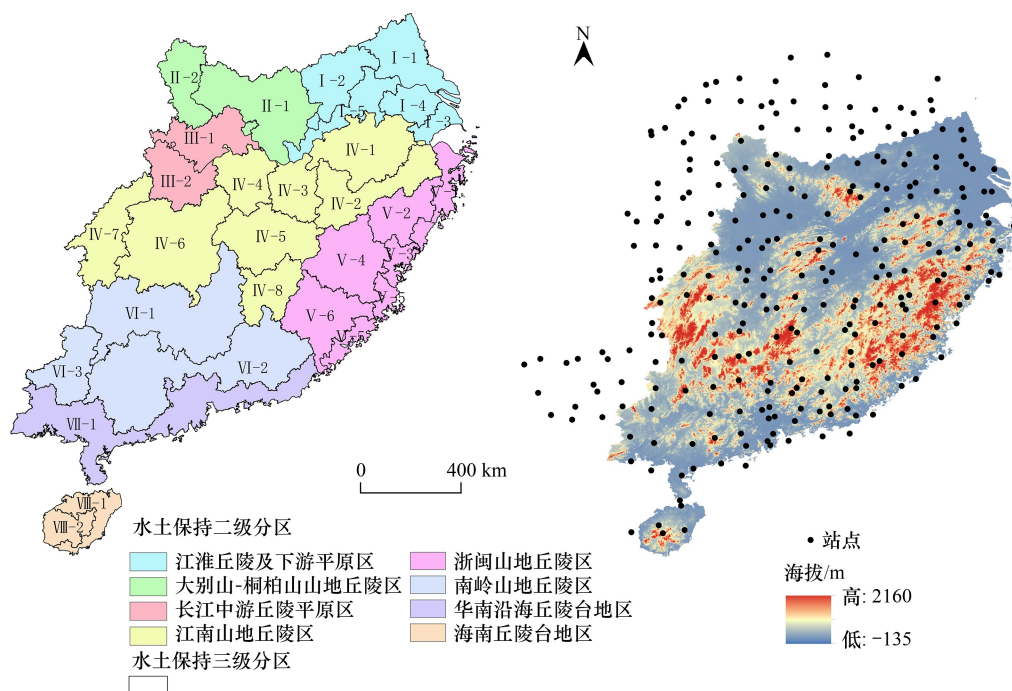


图1 南方红壤区水土保持区划及气象观测站点分布

Fig.1 Soil and water conservation division and distribution of meteorological observation stations in the red soil region of southern China

I-1:江淮下游平原农田防护水质维护区; I-2:江淮丘陵岗地农田防护保土区; I-3:浙沪平原人居环境维护水质维护区; I-4:太湖丘陵平原水质维护人居环境维护区; I-5:沿江丘陵岗地农田防护人居环境维护区; II-1:桐柏大别山地丘陵水源涵养保土区; II-2:南阳盆地及大洪山丘陵保土农田防护区; III-1:江汉平原及周边丘陵农田防护人居环境维护区; III-2:洞庭湖丘陵平原农田防护水质维护区; IV-1:浙皖低山丘陵生态维护水质维护区; IV-2:浙赣低山丘陵人居环境维护保土区; IV-3:鄱阳湖丘陵平原农田防护水质维护区; IV-4:幕阜山九岭山地丘陵保土生态维护区; IV-5:赣中低山丘陵土壤保持区; IV-6:湘中低山丘陵保土人居环境维护区; IV-7:湘南山地保土生态维护区; IV-8:赣南山地土壤保持区; V-1:浙东低山岛屿水质维护人居环境维护区; V-2:浙西南山地保土生态维护区; V-3:闽东北山地保土水质维护区; V-4:闽西北山地丘陵生态维护减灾区; V-5:闽东南沿海丘陵平原人居环境维护水质维护区; V-6:闽西南山地丘陵保土生态维护区; VI-1:南岭山地水源涵养保土区; VI-2:岭南山地丘陵保土水源涵养区; VI-3:桂中低山丘陵土壤保持区; VII-1:华南沿海丘陵台地人居环境维护区; VIII-1:海南沿海丘陵台地人居环境维护区; VIII-2:琼中山地水源涵养区

($-1.96 < Z < 1.96$)。随后根据趋势变化特征将结果进一步分为显著增加($S \geq 0.0005$ 、 $Z \geq 1.96$)、轻微增加($S \geq 0.0005$ 、 $-1.96 < Z < 1.96$)、无变化($-0.0005 < S < 0.0005$ 、 $-1.96 < Z < 1.96$)、轻微减少($S \leq 0.0005$ 、 $-1.96 < Z < 1.96$)、显著减少($S \leq 0.0005$ 、 $Z \leq -1.96$)5个等级。具体公式详见参考文献^[29-30]。

1.4.2 空间插值法

为了解降雨侵蚀力的空间分布,采用克里金(Kriging)插值法实现连续空间值的预测。克里金是一种地统计学插值技术,基于待估点邻域样本点的空间位置关系,以变异函数为基本工具,对待估点进行线性无偏、最优化估计^[16]。本文相关分析与制图采用 ArcGIS 10.8 完成。

1.4.3 重力模型

重力模型是用来分析和预测空间相互作用能力的数学模型,能够动态的反应变量的传递过程。在地理领域,它可以反应地理现象的变化程度和趋势。降雨侵蚀力的重力模型算法如下^[31]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (4)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \tag{5}$$

式中: X 、 Y 为重力坐标, X_i 为第*i*个气象站的经度, Y_i 为第*i*个气象站的纬度, R_i 为第*i*个气象站的月或年平均降雨侵蚀力。

1.4.4 最优参数地理探测器

地理探测器是一种探测空间异质性,揭示其背后驱动力的统计学方法,能够定量分析影响降雨侵蚀力空间变化的驱动因子以及不同驱动因子之间的协同作用^[32]。最优参数地理探测器可以根据自然断点、分位数、等区间、几何区间和标准差五种方法^[33],选取最优的参数组合对每个解释变量的*q*值进行计算。

本研究采用分异及因子探测和交互作用探测分析南方红壤区地理因子和气象因子(表1)对降雨侵蚀力空间分异的解释程度,并衡量各因子间的相互作用。地理探测器模型表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{6}$$

式中,*q*为驱动因子对降雨侵蚀力空间分异的解释力,*q*值越大,各因子对降雨侵蚀力的解释力越强; $h = 1, \dots, L$ 为降雨侵蚀力和影响因子的分层; N_h 和*N*分别为层*h*和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层*h*和全区的方差。

表1 影响因子分类

Table 1 Impact factor classification

环境因素 Environmental factors	变量 Variable	变量符号 Variable symbol	环境因素 Environmental factors	变量 Variable	变量符号 Variable symbol
地理因子 Geographical factors	纬度(°)	X1	气候变量 Climatic variables	侵蚀性降雨量(mm)	X4
	经度(°)	X2		侵蚀性降雨日数(d)	X5
	海拔(m)	X3		侵蚀性雨强(mm/d)	X6

X1: 纬度 Latitude; X2: 经度 Longitude; X3: 海拔 Elevation; X4: 侵蚀性降雨量 Erosive rainfall volume; X5: 侵蚀性降雨日数 Erosive rainfall days; X6: 侵蚀性雨强 Erosive rainfall intensity

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力时间变化特征

2.1.1 年际变化

对1982—2022年南方红壤区年降雨侵蚀力进行趋势分析(图2),多年平均降雨侵蚀力为8786.95 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹,整体呈现上升趋势,上升速率为每年上升18.79 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹。年降雨侵蚀力在1991年发生突变,1982—1990年降雨侵蚀力与年份的线性回归斜率为-89.2,1991年后变为正相关,斜率为9.9。年均降雨侵蚀力最小值出现在2011年,为7043.568 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹,2016年为最大值11663.767 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹。

南方红壤区不同尺度下1982—2022年降雨侵蚀力的M-K趋势检验结果见表(2)。在0.1显著性水平下,整个南方红壤区的*Z*值超过了1.64的阈值,年降雨侵蚀力呈现显著增加趋势。8个二级区划的*Z*检验值在-0.034—1.516之间。其中,只有长江中游丘陵平原区为负*Z*值,年降雨侵蚀力呈现不显著下降趋势,其余皆为正*Z*值。29个三级区划的*Z*检验值在-0.348—2.752之间,南阳盆地及大洪山丘陵保土农田防护区、江汉平原及周边丘陵农田防护人居环境维护区和闽东南沿海丘陵平原人居环境维护水质维护区的年降雨侵蚀力呈现不显著下降趋势。在0.05显著性水平下,太湖丘陵平原水质维护人居环境维护区、浙沪平原人居环境维

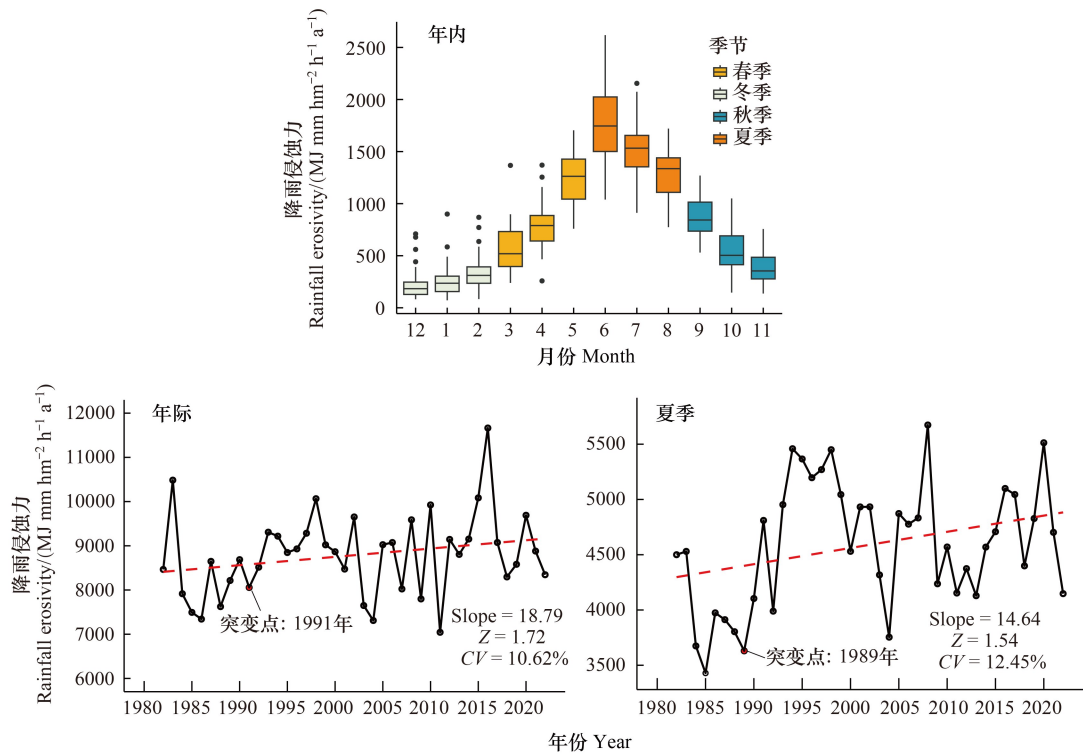


图 2 1982—2022 年南方红壤区降雨侵蚀力的时间分布

Fig.2 Temporal distribution of rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022
Slope: 斜率; Z: M-K 检验统计量; CV: 变异系数 Coefficient of Variation

护水质维护区、浙赣低山丘陵人居环境维护保土区和浙东低山岛屿水质维护人居环境维护区的年降雨侵蚀力呈显著增加趋势。在 0.1 显著性水平下,浙西南山地保土生态维护区、南岭山地水源涵养保土区和湘西南山地保土生态维护区也呈现显著增加趋势,其余三级区呈不显著增加趋势。

表 2 南方红壤区年降雨侵蚀力趋势变化

Table 2 Trend changes of annual rainfall erosivity in the red soil region of southern China

水土保持区划 Soil and water conservation division	年均降雨侵蚀力 Average annual rainfall erosivity/ (MJ mm hm ⁻² h ⁻¹ a ⁻¹)	Z 值 Z value
南方红壤区 Red soil region of southern China	8786.952	1.719 *
江淮丘陵及下游平原区 Yangtze-Huai hill and lower plain	6649.928	1.516
大别山-桐柏山山地丘陵区 Dabie-Tongbai mountainous and hilly region	6874.720	0.101
长江中游丘陵平原区 Hilly plain in the middle reaches of the Yangtze River	7707.796	-0.034
江南山地丘陵区 Jiangnan mountainous and hilly region	9500.007	1.157
浙闽山地丘陵区 Zhejiang and Fujian mountainous and hilly region	9542.681	1.202
南岭山地丘陵区 Nanling mountainous and hilly region	10226.139	1.314
华南沿海丘陵台地区 Coastal hilly region of south China	14102.662	0.730
海南丘陵台地区 Hainan hilly region	16777.241	1.404

* 代表 0.1 显著性检验

2.1.2 年内变化

图 2 反映了降雨侵蚀力的年内变化特征。可以看出,降雨侵蚀力呈现先上升后下降的趋势,月季差异显著。高值集中出现在 6、7 月份,平均降雨侵蚀力分别为 1775.72 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹ 和 1515.48 MJ mm hm⁻² h⁻¹

a^{-1} , 夏季平均降雨侵蚀力达 $4448.27 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 占全年总降雨侵蚀力的 49.88%, 因此南方红壤区在夏季受水力侵蚀的潜在风险最高。

分析汛期降雨侵蚀力的变化趋势对准确识别土壤侵蚀危险期具有重要意义^[34], 因此本文对夏季降雨侵蚀力进行了 Mann-Kendall 趋势检验(图 2)。结果表明, 夏季降雨侵蚀力呈现不显著的上升趋势, 上升速率为每年上升 $14.38 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 突变点为 1989 年, 年际间波动比年降雨侵蚀力稍大, 变异系数 CV 值为 0.12。

2.2 降雨侵蚀力空间分布特征

2.2.1 年空间分布

如图 3 所示, 南方红壤区年降雨侵蚀力总体上呈现由北到南增加趋势, 但局部以赣北和海南为中心形成了两个高值区, 降雨侵蚀力超过 $10000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 占整个研究区域的 38.3%, 水土流失严重。年降雨侵蚀力变化范围为 $3628.89\text{--}24654.70 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 平均值为 $9841.00 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 标准差达 $2873.69 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 空间差异较大。水土保持二级区划年降雨侵蚀力顺序为: 海南丘陵台地区 > 华南沿海丘陵台地区 > 南岭山地丘陵区 > 浙闽山地丘陵区 > 江南山地丘陵区 > 长江中游丘陵平原区 > 大别山-桐柏山地丘陵区 > 江淮丘陵及下游平原区, 整体上年降雨侵蚀力随着区划所处纬度的减小而增大。

对 1982—2022 年南方红壤区年降雨侵蚀力进行逐像元 Sen 及 M-K 趋势检验(图 3), 结果表明南方红壤区 16.3% 的区域年降雨侵蚀力呈不显著下降趋势, 主要分布在大别山-桐柏山地丘陵区、江汉平原东部和华南沿海地区东部。9.8% 的区域年降雨侵蚀力呈显著上升趋势, 主要分布在南岭山地水源涵养保土区西部和浙沪平原人居环境维护水质维护区, 这些区域面临着更严重的水土流失风险。

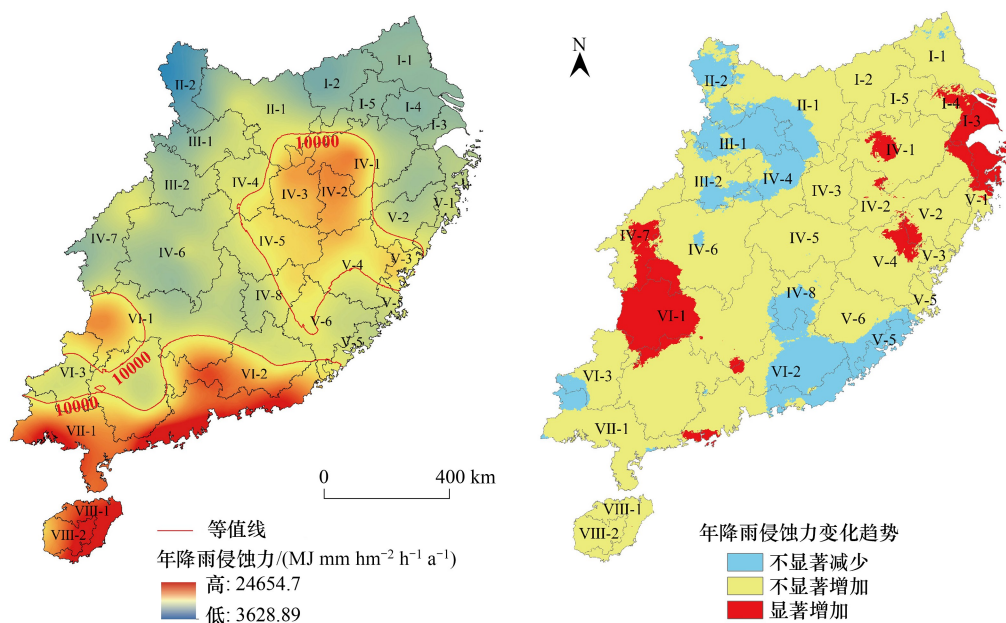


图 3 1982—2022 年南方红壤区年降雨侵蚀力及其变化趋势的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual rainfall erosivity and its changing trend in the red soil region of southern China from 1982 to 2022

2.2.2 季节空间分布

如图 4 所示, 春、冬两季降雨侵蚀力高值区比较分散, 分布于江南山地丘陵区、浙闽山地丘陵区、南岭山地丘陵区和华南沿海丘陵台地区; 夏季降雨侵蚀力空间分布与年尺度上的空间分布相似, 但更加集中在华南沿海丘陵台地区, 降雨侵蚀力为 $7860.185 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 占比 19.7%; 秋季降雨侵蚀力高度集中于海南丘陵台地区, 降雨侵蚀力为 $6615.658 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 占南方红壤区秋季降雨侵蚀的 39.5%。南方红壤区降雨侵蚀随季节变化而表现出不同的分布特征, 应结合各时期具体情况, 有针对性的制订水土保持措施。

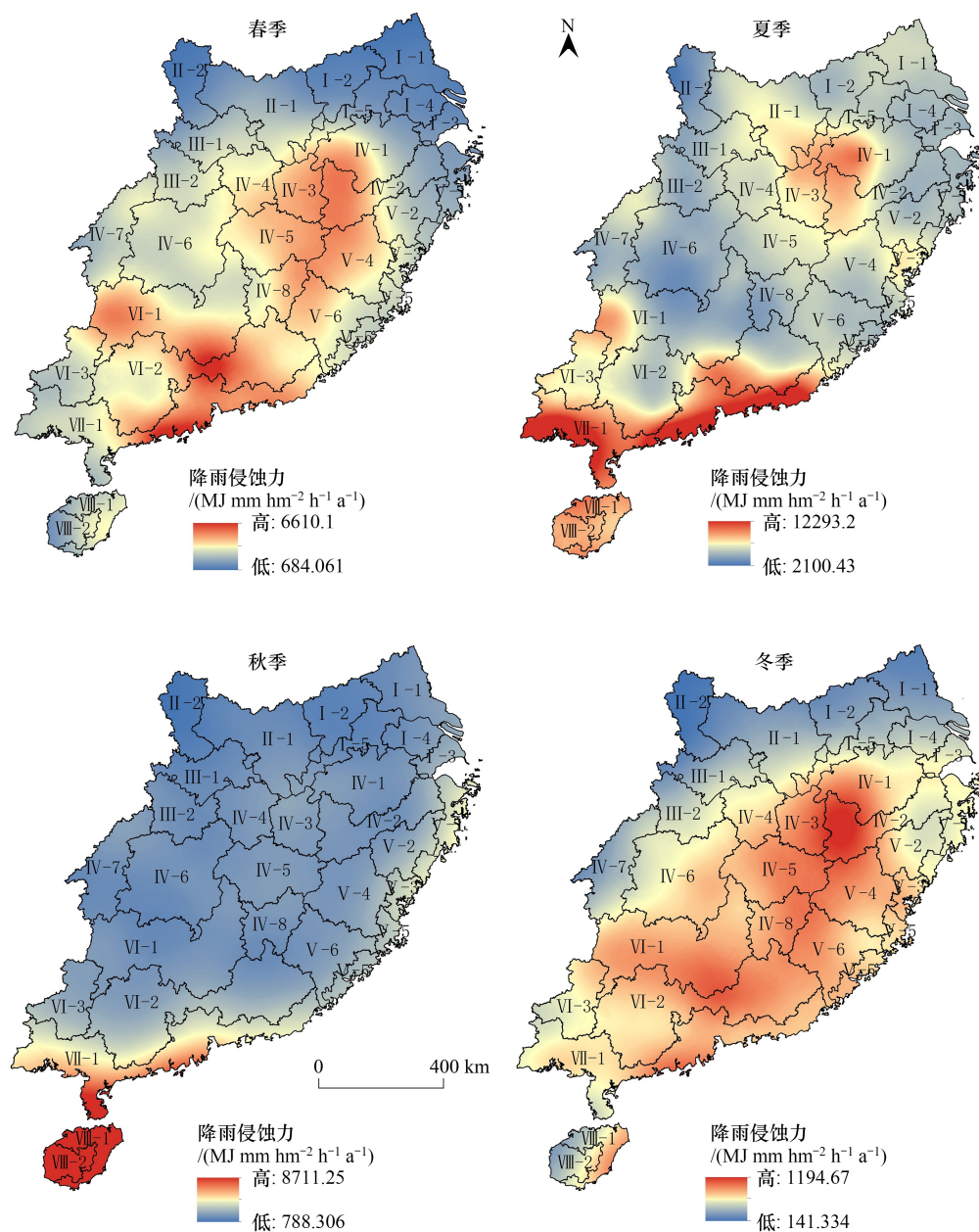


图4 1982—2022 年南方红壤区不同季节降雨侵蚀力空间分布

Fig.4 Spatial distribution of seasonal rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022

由图5可以看出,不同季节降雨侵蚀力变化趋势存在明显差异。春季,8.82%的区域呈下降趋势,分布于东南沿海,91.18%的区域呈上升趋势,其中洞庭湖丘陵平原农田防护水质维护区和湘西南山地保土生态维护区呈显著上升趋势。夏季南方红壤区大部分区域(97.58%)降雨侵蚀力呈上升趋势,浙闽山地丘陵区、南岭山地丘陵区、海南丘陵台地区的大部分区域和江南山地丘陵区南部出现显著上升趋势,占全区面积47.16%,降低趋势出现在南阳盆地及大洪山丘陵保土农田防护区和江汉平原及周边丘陵农田防护人居环境维护区。秋季降雨侵蚀力变化趋势不显著,江淮丘陵及下游平原区、大别山-桐柏山山地丘陵区、长江中游丘陵平原区及江南山地丘陵区北部呈不显著下降趋势,其余大部分区域(78.10%)呈不显著上升趋势。冬季有97.48%的区域降雨侵蚀力呈上升趋势,其中江淮丘陵及下游平原区、浙皖低山丘陵生态维护水质维护区、浙东低山岛屿水质维护人居环境维护区大部分区域的冬季降雨侵蚀力呈显著上升趋势。

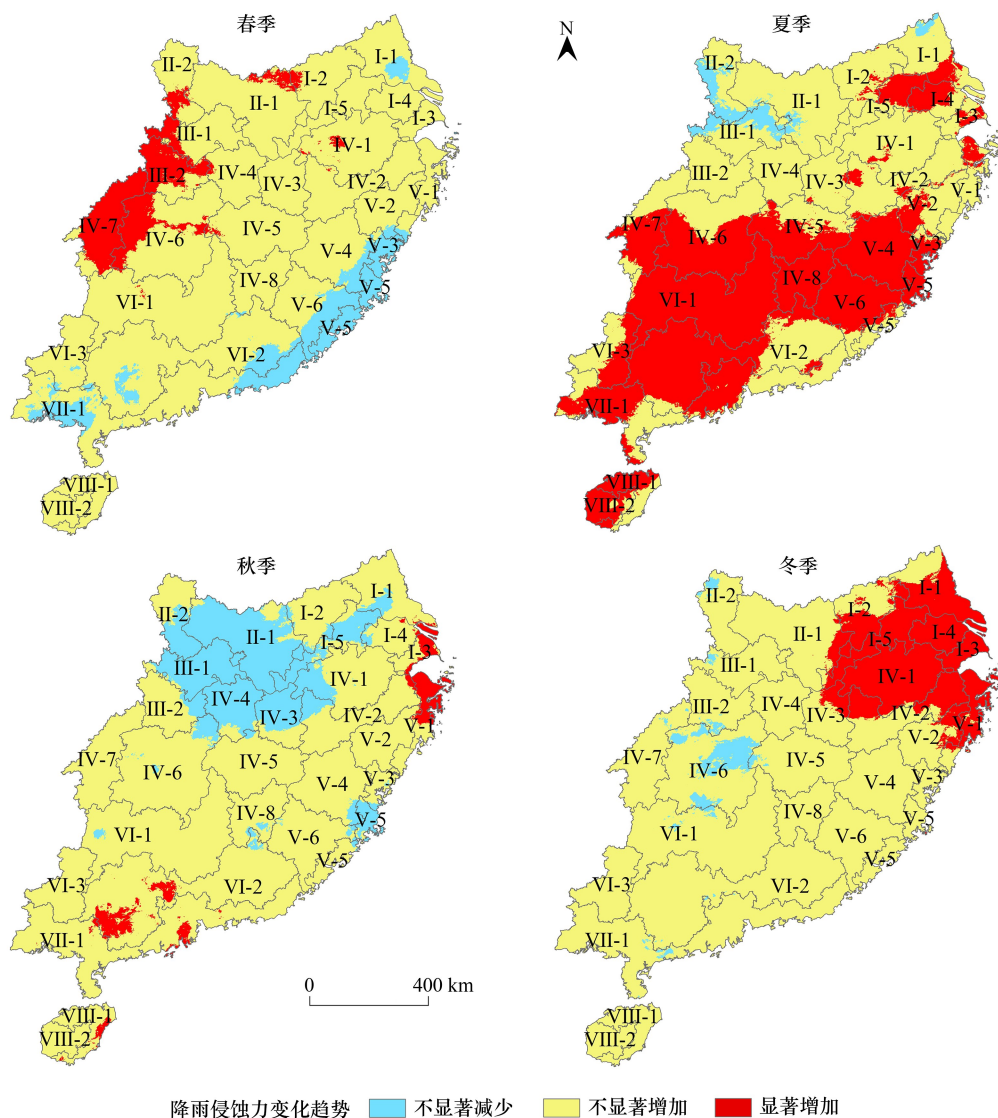


图5 1982—2022年南方红壤区季节降雨侵蚀力变化趋势空间分布

Fig.5 Spatial distribution of seasonal rainfall erosivity in the southern red soil region from 1982 to 2022

2.2.3 降雨侵蚀力的重心变化

为全面了解季风和雨带运动影响下年际与年内降雨侵蚀力的动态变化过程,本研究使用重力模型计算了南方红壤区年、月降雨侵蚀力的重心(图6和图7)。结果表明,南方红壤区年降雨侵蚀力的重心位于南岭山地水源涵养保土区北部,地理坐标为 114.393°E , 27.174°N 。月降雨侵蚀力的重心集中分布在赣中低山丘陵土壤保持区、湘中低山丘陵保土人居环境维护区、赣南山地土壤保持区和南岭山地水源涵养保土区的交界地带,且随月份有明显迁移。从图6月降雨侵蚀力的重心变化发现,1—12月重心直线累计移动距离近885.85 km,1—3月重心先向东北方向移动,3—5月重心迁移方向发生变化,向西南由赣中低山丘陵土壤保持区迁移至南岭山地水源涵养保土区,直线移动近151.41 km。5—7月重心向北迁移至赣中低山丘陵土壤保持区,此后又向南折返,于10月到达湘中低山丘陵保土人居环境维护区,然后向东迁移至赣中低山丘陵土壤保持区。

南方红壤区1982—2022年降雨侵蚀力的重心集中在赣中低山丘陵土壤保持区和南岭山地水源涵养保土区边界,与月降雨侵蚀力的重心分布相似。根据一阶标准差椭圆的分析结果,68%的年降雨侵蚀力重心位于长轴65 km,短轴25 km的椭圆区域内,椭圆的方位角在东北方向约 13° ,说明年降雨侵蚀力的重心沿东北—西南方向延伸。

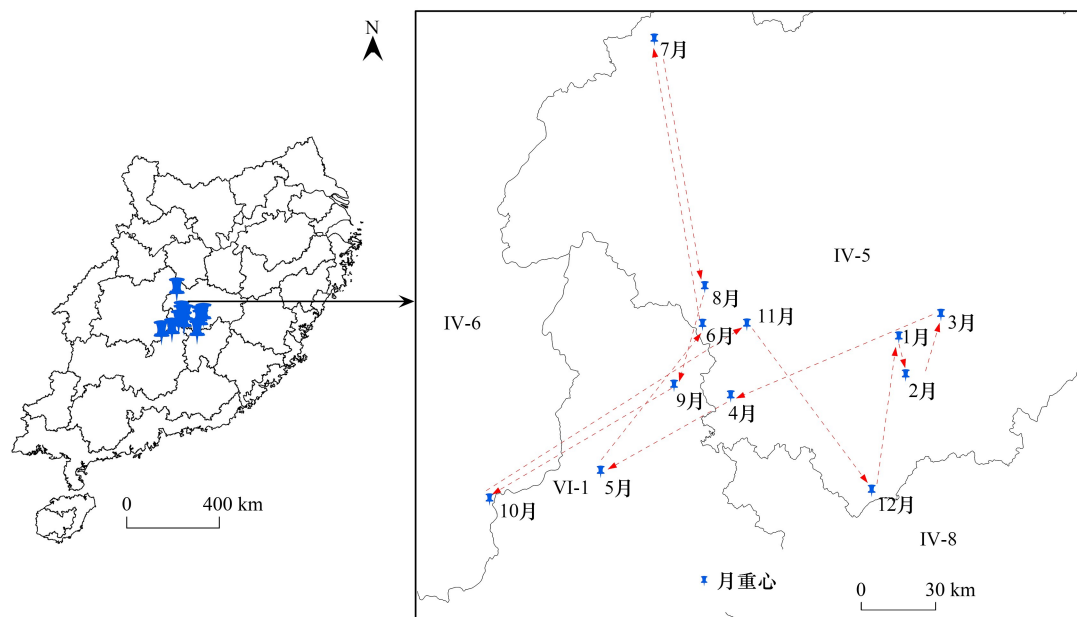


图 6 1982—2022 年南方红壤区月降雨侵蚀力的重心变化

Fig.6 Changes in the center of gravity of monthly rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022

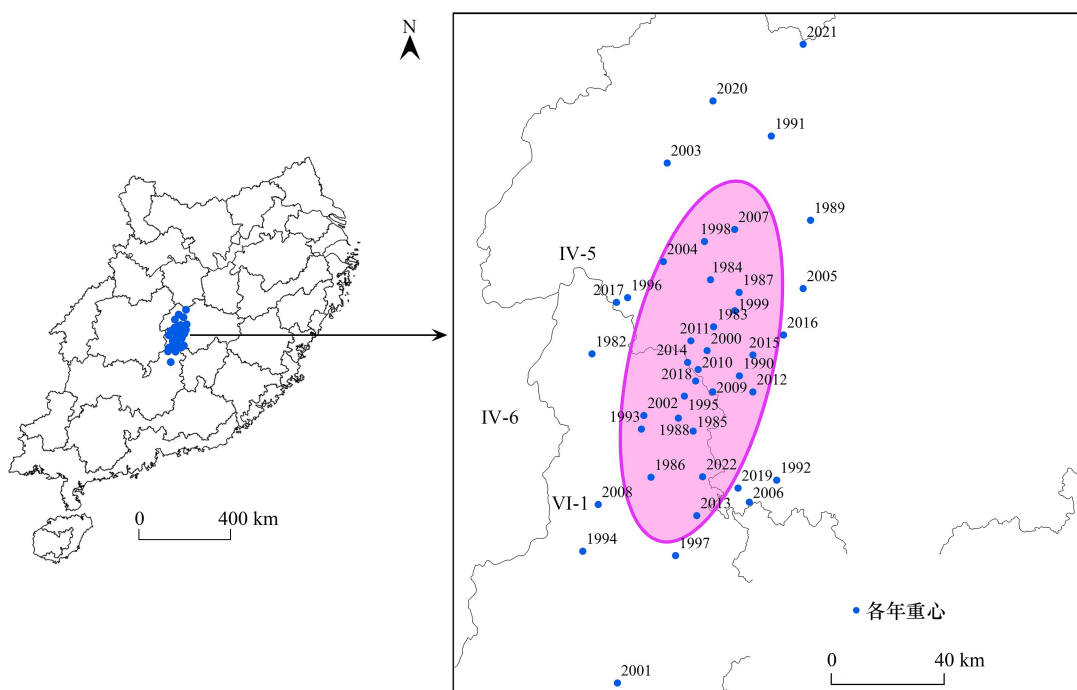


图 7 1982—2022 年南方红壤区年降雨侵蚀力的重心变化

Fig.7 Changes in the center of gravity of annual rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022

2.3 成因分析

2.3.1 单因子探测

由图 8 可知,南方红壤区各影响因子 q 值排序为:侵蚀性降雨量>侵蚀性降雨日数>侵蚀性雨强>纬度>海拔>经度。侵蚀性降雨量的 q 值最高,为 0.872,是影响降雨侵蚀力变化的主要因素。侵蚀性降雨日数、侵蚀性雨强和纬度表现出超过 30%的解释能力,是次要影响因素。经度和海拔在全区 q 值较小影响微弱。

在二级区划尺度上,气象因子 q 值与全区差别不大,解释力均超过 30%,对降雨侵蚀力具有显著的影响。而不同区划地理因子的影响力水平表现出差异,江淮丘陵及下游平原区、浙闽山地丘陵区、南岭山地丘陵区 3 个地理因子的 q 值均在 0.1 附近,对降雨侵蚀力的变化影响较小;大别山-桐柏山山地丘陵区 3 个地理因子的解释力均在 20% 左右,对降雨侵蚀力的变化有一定影响;长江中游丘陵平原区和江南山地丘陵区的降雨侵蚀力变化受到经度和海拔的一定影响,受纬度影响较小;华南沿海丘陵台地区纬度和海拔的影响力水平在 20% 以上,经度的影响力水平小于 10%;3 个地理因子在海南丘陵台地区对降雨侵蚀力的解释力均在 30% 以上,有较大影响。

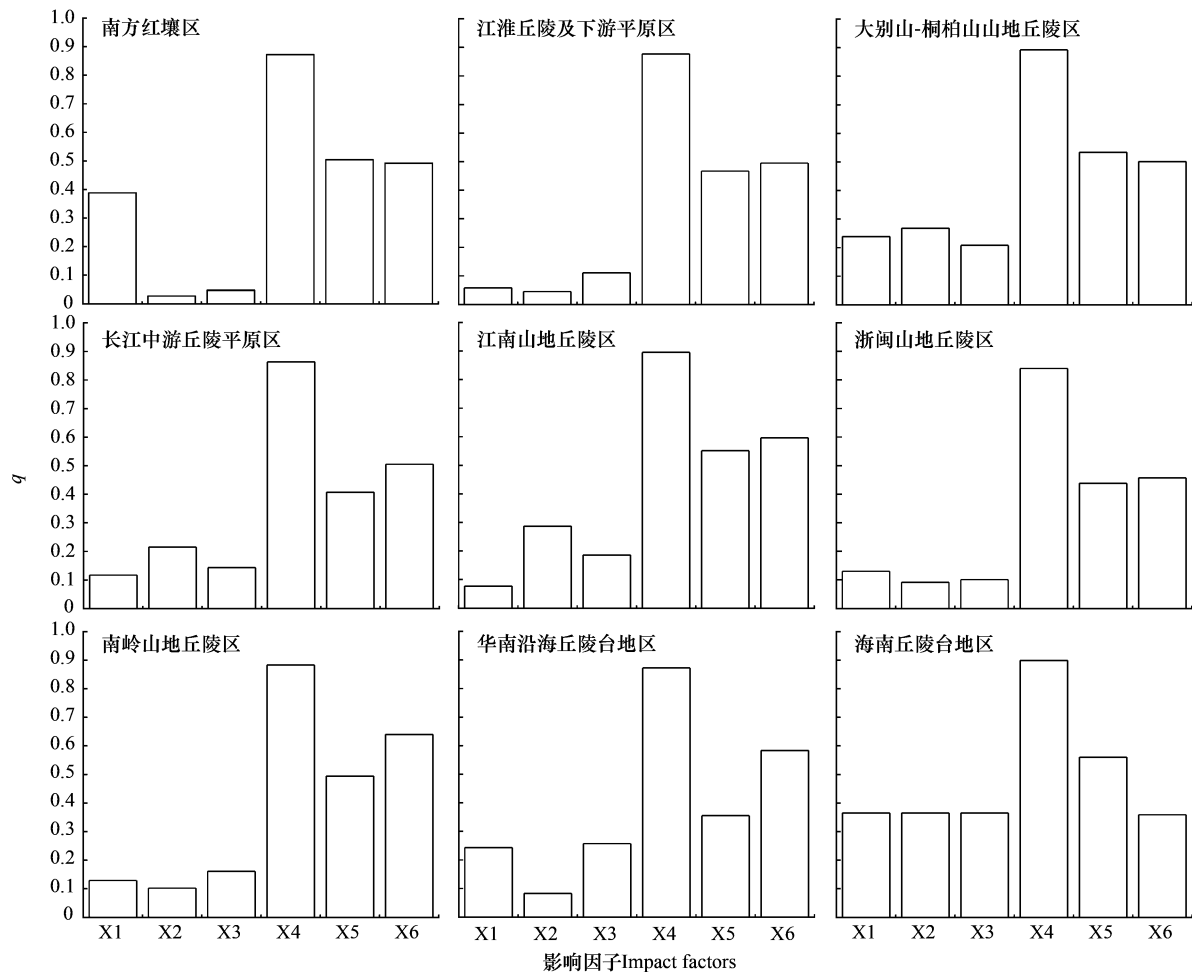


图 8 单因子探测 q 值

Fig.8 Single factor detection q value

X1: 纬度 Latitude; X2: 经度 Longitude; X3: 海拔 Elevation; X4: 侵蚀性降雨量 Erosive rainfall volume; X5: 侵蚀性降雨日数 Erosive rainfall days; X6: 侵蚀性雨强 Erosive rainfall intensity

2.3.2 交互因子探测

根据地理探测器的交互探测结果可知(图 9),南方红壤区大多数驱动因子之间呈现双因子增强关系,少数因子之间表现为非线性增强。侵蚀性降雨量与其他因子的交互作用最强, q 值均在 0.89 以上,其中侵蚀性降雨量与侵蚀性雨强交互作用的 q 值最大(0.950),这与土壤侵蚀对强降雨事件更敏感有关。气象与地形因子的交互作用在 0.528–0.912 之间,说明降雨侵蚀力的变化是两者共同作用的结果。

不同分区气象因子之间、气象因子与地理因子之间的交互作用并无明显差异,但在地理因子之间的交互作用影响水平差异较大,江淮丘陵及下游平原区、长江中游丘陵平原区和海南丘陵台地区的地理因子之间均

呈现非线性减弱或单因子非线性减弱,两者结合小于各自的解释力。

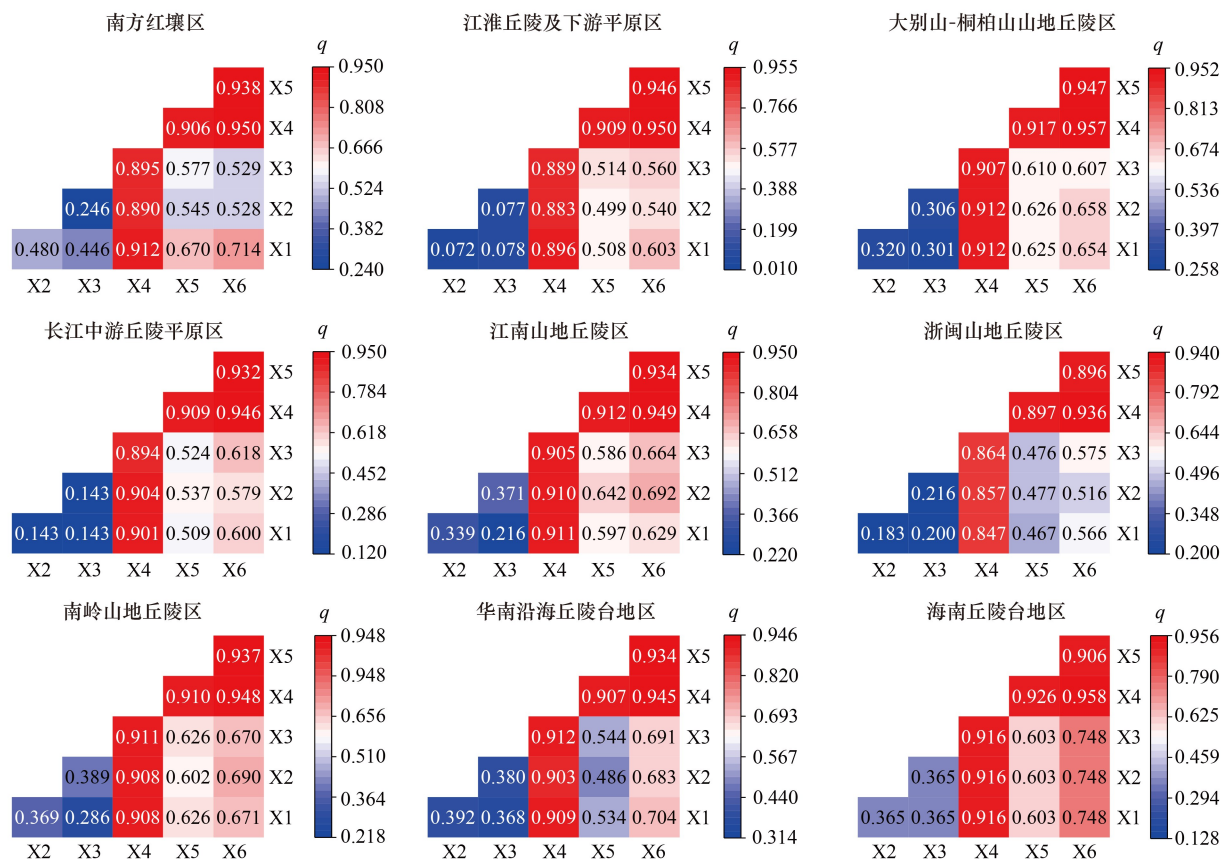


图9 交互因子探测 q 值

Fig.9 Interaction factor detects q value

X1: 纬度 Latitude; X2: 经度 Longitude; X3: 海拔 Elevation; X4: 侵蚀性降雨量 Erosive rainfall volume; X5: 侵蚀性降雨日数 Erosive rainfall days; X6: 侵蚀性雨强 Erosive rainfall intensity

2.3.3 降雨侵蚀力与地理因子的关系分析

为进一步分析地理因子对降雨侵蚀力的影响,将南方红壤区各区划降雨侵蚀力与经纬度及海拔等地理因子进行相关性分析(表3),结果表明地理因子对降雨侵蚀力的影响在不同分区表现出明显的差异。在南方红壤区全区,降雨侵蚀力与纬度和海拔呈显著负相关,相关系数分别为 -0.736 和 -0.115 ,与经度则无显著关系;大别山-桐柏山山地丘陵区降雨侵蚀力与经度和纬度分别呈显著正相关和负相关,相关系数分别为 0.759 和 -0.651 ;长江中游丘陵平原区和海南丘陵台地区的降雨侵蚀力与经度均呈显著正相关,相关系数分别为 0.633 和 0.816 ;江南山地丘陵区降雨侵蚀力与海拔呈显著正相关,相关系数 0.552 ;浙闽山地丘陵区降雨侵蚀力与经度、纬度均呈显著负相关,相关系数分别为 -0.495 和 -0.374 ;江淮丘陵及下游平原区和南岭山地丘陵区降雨侵蚀力与纬度均呈显著负相关,相关系数分别为 -0.428 和 -0.419 ;华南沿海丘陵台地区降雨侵蚀力与经纬度和海拔关系不显著。

3 讨论

降雨侵蚀力是表征降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标,其时空分布特征对于区域水土保持规划、农业和生态保护以及灾害控制等具有重要意义。本研究对1982—2022年南方红壤区降雨侵蚀力的年际、年内时空分布特征进行了分析,结果表明1982—2022年南方红壤区年均降雨侵蚀力为 $8786.95 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$,在

空间上变化较大,变化范围为 3628.89—24654.70 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹,与刘斌涛等^[35]的研究结果基本一致,即中国湿润地区年均降雨侵蚀力一般高于 4000 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹。降雨侵蚀力总体上呈现南高北低的分布规律,集中分布在海南、华南沿海和赣北,与 Lai 等^[36]珠江流域降雨侵蚀力主要分布在珠江三角洲、东江流域和北江流域的研究结果基本吻合,也与郑潇等^[37]对江西省降雨侵蚀力研究得出的降雨侵蚀分布赣北>赣中>赣南相吻合。

表 3 南方红壤区降雨侵蚀力与地理因子相关系数及显著性检验

Table 3 Correlation coefficient and significance test between rainfall erosivity and geographical factors in the red soil region of southern China

水土保持区划 Soil and water conservation division	相关系数 Correlation coefficient <i>r</i>		
	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude
南方红壤区 Red soil region of southern China	-0.736 **	-0.019	-0.115 *
江淮丘陵及下游平原区 Yangtze-Huai hill and lower plain	-0.428 **	-0.016	0.036
大别山-桐柏山山地丘陵区 Dabie-Tongbai mountainous and hilly region	-0.651 **	0.759 **	-0.370
长江中游丘陵平原区 Hilly plain in the middle reaches of the Yangtze River	-0.045	0.633 **	-0.047
江南山地丘陵区 Jiangnan mountainous and hilly region	0.180	0.207	0.552 **
浙闽山地丘陵区 Zhejiang and Fujian mountainous and hilly region	-0.347 **	-0.495 **	0.181
南岭山地丘陵区 Nanling mountainous and hilly region	-0.419 **	0.045	-0.265
华南沿海丘陵台地区 Coastal hilly region of south China	-0.251	0.046	-0.167
海南丘陵台地区 Hainan hilly region	-0.051	0.816 *	0.591

* 代表 0.1 显著性检验, ** 代表 0.05 显著性检验

南方红壤区降雨侵蚀力在季节上也分布不均,受亚洲夏季风的影响,49.88%的降雨侵蚀发生在夏季,春季(26.81%)和秋季(16.56%)次之,只有 6.76%的降雨侵蚀发生在冬季,降雨侵蚀发生的高频时段大致与梅雨期对应。降雨侵蚀力月重心的迁移同样与亚洲季风密切相关,春季东南季风开始盛行,将湿润的水汽输送到西部。5 月后,受东亚季风与南亚季风的协同影响^[38],重心向北迁移。8—10 月,西南季风占据主导地位,贡献大部分水汽,降雨侵蚀力重心向西南方向移动。之后冬季西北季风代替夏季风盛行,雨带迅速向东部后退,完成一个季节循环。年降雨侵蚀力重心的延伸方向与卜文惠等^[39]江淮流域大范围雨带呈“西南-东北”向分布的结果相吻合,进一步说明降雨侵蚀力重心的迁移与季风和雨带的运动息息相关。

根据地理探测器探测结果可知,侵蚀性降雨量是影响南方红壤区降雨侵蚀力变化的主导因子,侵蚀性雨强和降雨日数是次要影响因素,而经纬度和海拔等地理因子则根据区域的不同表现出不同的影响力。交互探测的结果说明降雨侵蚀力对极端降水事件更加敏感,南方红壤区各因子之间表现出的双因子增强和非线性增强关系说明这些因子对于降雨侵蚀力的影响并不是独立或简单叠加的关系。综上所述,南方红壤区降雨侵蚀力的变化是多种因素共同作用的结果,因此在预防水土流失时应因地制宜,制订针对性、精细化的水土保持措施和区域治理政策,如坡耕地修筑梯田,荒山荒坡封禁治理,增加近地面植被覆盖以防治林下水土流失,以谷坊、拦沙坝等工程措施控制沟道、崩岗侵蚀发育,条件允许时可发展经果林,形成多目标、多功能、高效益的防护体系^[40—42]。

近些年来,南方红壤区各区域土壤侵蚀状况有不同程度的好转,流域输沙量也显著下降^[43],说明水土流失治理卓有成效,也与华南地区近年遭受的持续极端干旱有关^[44]。然而,本研究发现近 40 年来南方红壤区的降雨侵蚀力呈现显著上升趋势,对水土流失预防和治理十分不利,何绍浪等^[45]、Qin 等^[46]在南方地区开展的研究也证实了这一点。综合上述分析结果,在对南方红壤区土壤侵蚀治理过程中,需要重点关注以下 3 个方面。1) 在空间上,南岭山地丘陵区、华南沿海丘陵台地区和海南丘陵台地区的多年平均降雨侵蚀力超过 10000 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹,是土壤侵蚀的高风险区,需要重点治理;浙赣低山丘陵人居环境维护保土区、浙东低山岛屿水质维护人居环境维护区等地区不仅降雨侵蚀力有显著上升的趋势,而且地形陡峭,土层疏松,同时受到人为活动的剧烈影响,应做好监测和预防措施,提前防止潜在的水土流失风险。2) 在时间上,49.88%的降雨侵蚀力集中分布在夏季,高强度降雨形成的径流和壤中流为土壤侵蚀提供了外营力,饱和的水分会破坏

土体的结构,高温则加速了岩土母质的风化和裂隙的产生,为重力侵蚀提供了基础^[47],因此夏季是滑坡、崩岗等灾害的高发时段。3)侵蚀性降雨量与侵蚀性雨强的交互作用对降雨侵蚀力的解释力水平最高,应重视极端降水事件对土壤侵蚀产生的影响。与正常降水事件相比,极端降水事件具有变异性、突发性、破坏性等特点^[48],对陆地生态系统造成更持久和严重的破坏^[49],在全球气候变暖的背景下,未来极端降水事件将变得更加频繁和剧烈,这对南方红壤区的水土保持措施提出了更高的考验和要求。

本文仍然存在一些不足之处。有研究表明,降雨侵蚀力的时空变化还受到太阳黑子、厄尔尼诺-南方涛动、地形、人类活动等多种因素的共同影响^[8,50],本研究受数据获取限制,未能对这些因素进行分析。另外,研究降雨侵蚀力的未来趋势变化对于土壤侵蚀潜在危险判定和水土保持措施优化具有重要意义。因此在后续的研究中应拓宽时间序列和指标体系,结合 CMIP6、R/S 分析等方法更全面地了解区域降雨侵蚀力特征。

4 结论

(1)1982—2022 年南方红壤区的年均降雨侵蚀力为 $8786.95 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$,呈显著上升趋势。季节降雨侵蚀力分布不均,夏季降雨侵蚀力占全年的 49.88%,受降雨侵蚀的风险最高,冬季降雨侵蚀力仅占 6.76%。

(2)南方红壤区的年降雨侵蚀力总体上由北向南呈现上升趋势,局部以赣北和海南为中心形成了两个高值区,空间差异较大。南方红壤区 83.7% 区域的年降雨侵蚀力呈现上升趋势,因降雨侵蚀力增加而引发土壤水蚀的风险在加剧。随着季节的变化,月降雨侵蚀力的重心在赣中低山丘陵土壤保持区、湘中低山丘陵保土人居环境维护区、赣南山地土壤保持区和南岭山地水源涵养保土区之间迁移,年降雨侵蚀力的重心位于南岭山地水源涵养保土区北部。

(3)侵蚀性降雨量的 q 值为 0.872,是南方红壤区降雨侵蚀力增加的主要驱动力,侵蚀性降雨日数、雨强和纬度是次要影响因素, q 值分别为 0.504、0.492 和 0.388。交互作用上,侵蚀性降雨量与侵蚀性雨强交互作用的 q 值最大为 0.950。经纬度和海拔等地理因子根据区域的不同表现出不同的影响力,南方红壤区降雨侵蚀力的变化是多种因素共同作用的结果。

参考文献 (References):

- [1] Wuepper D, Borrelli P, Finger R. Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 51-55.
- [2] Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(3): 203-225.
- [3] 张宁, 张光辉, 邢书昆. 东北黑土区土壤侵蚀阻力对土地利用类型的响应与影响因素. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 40-48.
- [4] 廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 唐颖, 李鹏. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力. *水土保持研究*, 2024, 31(5): 139-147.
- [5] 李乐, 刘常富. 三峡库区面源污染研究进展. *生态科学*, 2020, 39(2): 215-226.
- [6] 卢旭东, 齐实, 陈家东, 郭建超, 张林, 周飘. 南渡江流域降雨侵蚀力时空分布与变化趋势研究. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(11): 1464-1473.
- [7] Goebes P, Seitz S, Geißler C, Lassu T, Peters P, Seeger M, Nadrowski K, Scholten T. Momentum or kinetic energy - How do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 310-316.
- [8] 姬兴杰, 刘美, 吴稀稀, 丁亚磊, 朱业玉. 1961—2019 年黄河流域降雨侵蚀力时空变化特征分析. *农业工程学报*, 2022, 38(14): 136-145.
- [9] 操玥, 王世杰, 白晓永, 李汇文, 王明明, 吴路华. 近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变. *生态学报*, 2018, 38(24): 8766-8773.
- [10] 邹玉霞, 樊国中, 刘淑婧, 曾凤铃, 张伟, 张卫华. 1960—2017 年重庆市不同量级降雨侵蚀力 R 值的时空变化特征. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 41-48.
- [11] 江源天, 王文婷, 谢云, 贺增. 基于 IMERG 反演降水数据估算广东省降雨侵蚀力. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 153-164.
- [12] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales. *Soil Research*, 1996, 34(1): 139.
- [13] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, Nearing M A, Zhao Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 547-558.
- [14] 郭新波, 王兆骞, 张如良. 浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 35-37, 128.
- [15] 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. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- [16] 艾明乐, 赵强, 王奎峰, 张太平, 李新颖. 1957—2017 年泾河流域降雨量及降雨侵蚀力时空变化分析. *水资源与水工程学报*, 2021, 32

- (4): 93-100.
- [17] 顾朝军, 朱永清, 李仁华, 姚赫. 鄱阳湖流域降雨侵蚀力变化及其对入湖悬移质输沙量的影响. 水土保持学报, 2021, 35(6): 45-54.
- [18] 贾路, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 徐国策, 李斌斌. 长江经济带降雨侵蚀力与 NDVI 耦合协调关系时空变异分析. 农业工程学报, 2023, 39(4): 102-114.
- [19] 高歌, 殷水清, 陈涛, 黄大鹏, 王文婷. 长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析. 农业工程学报, 2022, 38(3): 84-92.
- [20] 马亚丽, 牛最荣, 张芮, 郑志琴, 孙栋元. 洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系. 水土保持研究, 2023, 30(4): 90-97, 109.
- [21] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, Leng G Y, Huang Q, Wang L, Xue Q. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications. CATENA, 2018, 166: 279-289.
- [22] 马道铭, 回毅滢, 赵炯昌, 王百群, 于洋. 近 60 年山西省降雨侵蚀力时空变化特征. 水土保持研究, 2023, 30(6): 24-31, 48.
- [23] Li L, Wang N, Hao Z Z, Sun B, Gao B T, Gou M M, Wang P, Pei N C. Urbanization intensifies the imbalance between human development and biodiversity conservation: Insights from the coupling analysis of human activities and habitat quality. Land Degradation & Development, 2024, 35(11): 3606-3626.
- [24] 王一峰, 屈丽琴, 李建明, 李力. 基于近 20 年《中国水土保持公报》的水土流失治理分析. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 59-65.
- [25] 梁音, 张斌, 潘贤章, 史德明. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 22-27.
- [26] 吴洁玲, 查轩, 陈世发, 毛兰花, 黄博文. 1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化. 水土保持学报, 2021, 35(4): 21-26.
- [27] 温天福, 张范平, 胡建民, 刘章君. 1958—2014 年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征. 水土保持研究, 2020, 27(1): 7-14, 20.
- [28] 曹裔, 高超, 张晓明, 王顺杰, 杨清杰. 湖北省侵蚀性降雨时空分布特征. 水土保持研究, 2023, 30(1): 41-46, 53.
- [29] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.
- [30] Wang G J, Peng W F, Zhang L D, Zhang J, Xiang J Y. Vegetation EVI changes and response to natural factors and human activities based on geographically and temporally weighted regression. Global Ecology and Conservation, 2023, 45: e02531.
- [31] Guo B, Luo W, Han B M, Liu Y, Yang F, Fan Y W, Chen S T, Yang X, Jiang L, Chen X, Wang Z, Sun G Q. Multiple spatial - temporal scale change patterns of rainfall erosivity in China over past 58 years based on gravity centre model. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 2200-2219.
- [32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [33] 宝力格, 刘伟维. “双碳”目标下北京市城市形态时空演变及其对碳排放的影响. 生态学报, 2024, 44(17): 7507-7519.
- [34] 冯笛珂, 符素华, 丁建新, 颜婷燕, 徐发军, 腾润平, 张大勇. 北京市近 40 年来降雨侵蚀力时空变异特征. 水土保持学报, 2024, 38(4): 132-142.
- [35] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 郭兵, 史展, 张超, 孔博, 何兵. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256.
- [36] Lai C G, Chen X H, Wang Z L, Wu X S, Zhao S W, Wu X Q, Bai W K. Spatio-temporal variation in rainfall erosivity during 1960—2012 in the Pearl River Basin, China. CATENA, 2016, 137: 382-391.
- [37] 郑潇, 白淑英, 高吉喜. 1961—2019 年江西省降雨侵蚀力时空变化分析. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2023, 15(3): 357-366.
- [38] 桓玉, 李跃清. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异常的关系. 高原气象, 2018, 37(6): 1563-1577.
- [39] 卜文惠, 陈昊明, 李普曦. 江淮流域大范围雨带降水的精细化特征研究. 气象学报, 2023, 81(3): 361-374.
- [40] 莫明浩, 谢颂华, 聂小飞, 胡松. 南方红壤区水土流失综合治理模式研究——以江西省为例. 水土保持通报, 2019, 39(4): 207-213.
- [41] Chen J, Xiao H B, Li Z W, Liu C, Ning K, Tang C J. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data. Science of the Total Environment, 2020, 735: 139517.
- [42] Li Z W, Ning K, Chen J, Liu C, Wang D Y, Nie X D, Hu X Q, Wang L X, Wang T W. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: Evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121109.
- [43] 石海霞, 梁音, 朱绪超, 曹龙熹. 南方红壤区水土流失治理成效的多尺度趋势分析. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 66-74.
- [44] Hu Y P, Zhou B T, Wang H J, Zhang D P. Record-breaking summer-autumn drought in southern China in 2022: Roles of tropical sea surface temperature and Eurasian warming. Science China Earth Sciences, 2024, 67(2): 420-431.
- [45] 何绍浪, 郭小君, 李凤英, 李娜, 何小武. 中国南方地区近 60 a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1406-1416.
- [46] Qin W, Guo Q K, Zuo C Q, Shan Z J, Ma L, Sun G. Spatial distribution and temporal trends of rainfall erosivity in mainland China for 1951 - 2010. CATENA, 2016, 147: 177-186.
- [47] 廖义善, 唐常源, 袁再健, 卓慕宁, 黄斌, 聂小东, 谢真越, 李定强. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展. 土壤学报, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [48] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. Climatic Change, 1992, 21(3): 289-302.
- [49] 吴欣宇, 朱秀芳. 中国不同植被区对极端气候的响应差异. 生态学报, 2023, 43(24): 10202-10215.
- [50] 李俊, 盛菲, 刘士余, 张婷, 余敏琪. 赣南九曲水流域降雨侵蚀力变化规律及其影响因素. 水土保持学报, 2022, 36(4): 63-73.