

DOI: 10.20103/j.stxb.202401020004

王雪雯,董晓华,马耀明,龚成麒,魏冲,陈玲,安敏.长江中下游降雨侵蚀力时空变化及其与植被覆盖的关系.生态学报,2024,44(20):9364-9378.  
Wang X W, Dong X H, Ma Y M, Gong C Q, Wei C, Chen L, An M. Spatio-temporal variation of rainfall erosivity and its relationship with vegetation coverage in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9364-9378.

# 长江中下游降雨侵蚀力时空变化及其与植被覆盖的关系

王雪雯<sup>1,2</sup>,董晓华<sup>1,2,\*</sup>,马耀明<sup>1,3,4,5,6,7,8</sup>,龚成麒<sup>1,2</sup>,魏冲<sup>1,2</sup>,陈玲<sup>1,2</sup>,安敏<sup>9</sup>

1 三峡大学水利与环境学院,宜昌 443002

2 三峡库区生态环境教育部工程研究中心,宜昌 443002

3 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境重点实验室地气作用与气候效应团队,北京 100101

4 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

5 兰州大学大气科学学院,兰州 730000

6 西藏珠穆朗玛特殊大气过程与环境变化国家野外科学观测研究站,定日 858200

7 中国科学院加德满都科教中心,北京 100101

8 中国科学院中国-巴基斯坦地球科学研究中心,伊斯兰堡 45320

9 三峡大学经济与管理学院,宜昌 443002

**摘要:** 充分掌握大尺度流域降雨侵蚀力的时空变化特征对流域水土保持、防洪减灾和生态环境保护至关重要。基于长江中下游的 119 个气象站点 57a 逐日降雨资料,通过 Xie 模型计算各站降雨侵蚀力,使用旋转经验正交函数(EOF)法对降雨侵蚀力进行区域划分;结合 Mann-Kendal 检验、重标极差( $R/S$ )法和相关性分析方法分析长江中下游降雨侵蚀力的时空变化特征,并揭示其与植被覆盖度之间的关系。结果表明:(1)长江中下游降雨侵蚀力整体呈上升趋势,年均降雨侵蚀力为  $5643\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。(2)不同季节降雨侵蚀力空间分布存在差异。冷季降雨侵蚀力空间分布不均,高值区主要集中在流域的西部和东北部,而暖季降雨侵蚀力则表现为以江西省为中心沿西北方向递减的空间分布格局,最大值和最小值出现在鄱阳湖环湖区(III区)和长江干流武汉以下段及太湖水系(IV区)。(3)长江中下游相邻地理分区间降雨侵蚀力变化速率差异较大,降雨侵蚀力区域性差异显著。其中 III 区、湘江及赣江流域(I区)和 IV 区年均降雨侵蚀力呈显著增长趋势( $P<0.05$ )且未来将保持该趋势,为水土保持重点关注区域。(4)研究所发现的长江中下游水土保持重点关注区域的降雨侵蚀力与植被覆盖度存在负相关。但值得注意的是 I 区在冷季呈现正相关,而且其中的湘江上游流域出现显著正相关。研究表明降雨侵蚀力是影响地表侵蚀过程的关键因素,侵蚀性降水会影响植被覆盖情况,进而影响地表的侵蚀过程。因此在重点关注高降雨侵蚀力地区的同时还需加强植被保护工作。研究结果可为长江中下游区域水土保持及生态环境保护工作提供科学依据。

**关键词:** 长江中下游流域;降雨侵蚀力;旋转经验正交函数;植被覆盖度

## Spatio-temporal variation of rainfall erosivity and its relationship with vegetation coverage in the middle and lower reaches of the Yangtze River

WANG Xuewen<sup>1,2</sup>, DONG Xiaohua<sup>1,2,\*</sup>, MA Yaoming<sup>1,3,4,5,6,7,8</sup>, GONG Chengqi<sup>1,2</sup>, WEI Chong<sup>1,2</sup>, CHEN Ling<sup>1,2</sup>, AN Min<sup>9</sup>

1 College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

2 Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

**基金项目:** 科技部科技基础资源专项、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0103);欧洲空间局、中国国家遥感中心联合资助“龙计划”5 项目(58516)

**收稿日期:** 2024-01-02; **网络出版日期:** 2024-07-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

3 *Land-Atmosphere Interaction and its Climatic Effects Group, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

4 *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

5 *College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

6 *National Observation and Research Station for Qomolangma Special Atmospheric Processes and Environmental Changes, Dingri 858200, China*

7 *Kathmandu Center of Research and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

8 *China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Islamabad 45320, Pakistan*

9 *College of Economics and Management, Three Gorges University, Yichang 443002, China*

**Abstract:** It is very important to fully grasp the spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in large-scale watershed for soil and water conservation, flood control and disaster reduction, and ecological environment protection. Based on the 57-year daily rainfall data of 119 meteorological stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the rainfall erosivity of each station was calculated by Xie model, and the Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF) method was used to divide the rainfall erosivity. The spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the middle and lower reaches of the Yangtze River were analyzed by Mann-Kendal test, rescaled range ( $R/S$ ) method and correlation analysis method, and the relationship between rainfall erosivity and vegetation coverage was revealed. The results show that: (1) the erosive power of rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River is on an overall upward trend, with an average annual erosive power of rainfall of  $5,643\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ . (2) The spatial distribution of rainfall erosivity in different seasons is different. The spatial distribution of rainfall erosivity in the cold season is uneven, and the high value areas are mainly concentrated in the west and northeast of the basin. The rainfall erosivity in the warm season shows a spatial distribution pattern of decreasing along the northwest direction with Jiangxi Province as the center. The maximum and minimum values appear in the Poyang Lake area (Area III) and the lower reaches of the Yangtze River and the Taihu River system (Area IV). (3) The change rate of rainfall erosivity in the adjacent geographical divisions of the middle and lower reaches of the Yangtze River is quite different, and the regional difference of rainfall erosivity is significant. Among them, the annual average rainfall erosivity in Area III, Xiangjiang River and Ganjiang River Basin (Area I) and Area IV showed a significant growth trend ( $P < 0.05$ ) and would maintain this trend in the future, which is the key area of soil and water conservation. (4) There is a negative correlation between rainfall erosivity and vegetation coverage in the key areas of soil and water conservation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in this study. However, the notable exception is that Area I shows a positive correlation in the cold season, and there is a significantly positive correlation in the upper reaches of the Xiangjiang River. Studies showed that rainfall erosivity is a key factor influencing surface erosion processes, and that erosive precipitation affects vegetation cover, which in turn affects surface erosion processes. Therefore, it is necessary to focus on the areas with high rainfall erosivity and at the same time strengthen the vegetation protection. The results of the study can provide a scientific basis for soil and water conservation and ecological environmental protection in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Vegetation cover, as an important type of ground cover, can influence the erosion process of the ground surface under high rainfall erosion.

**Key Words:** the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin; rainfall erosivity; rotating empirical orthogonal function; vegetation coverage

长江中下游流域是长江流域洪涝灾害最集中、最严重、最频繁的地区<sup>[1]</sup>,洪涝灾害的频发不仅给当地的农作物和居民生活造成了严重的影响,还加剧了该地区的土壤侵蚀和水土流失问题。土壤侵蚀和水土流失是全球面临的重要生态环境问题<sup>[2]</sup>,2015年世界土壤资源状况报告中土壤侵蚀被确定为十大土壤威胁之一,它不仅会对农业生产和社会经济造成威胁,也是造成土地退化的最重要因素。全球每年因土壤侵蚀而弃耕的土地达到500万 $\text{hm}^{2[3]}$ ,根据《2019年中国水土保持公报》<sup>[4]</sup>,2019年我国共有271.08万 $\text{km}^2$ 土地存在土壤侵蚀

现象,约占我国陆地面积的 41.86%。土壤侵蚀的本质是土壤受到外营力作用,被破坏、分离、搬运和沉积的过程<sup>[5]</sup>,其类别主要有水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀等,2019 年长江流域水土流失面积 34.15 万 km<sup>2</sup>,其中水力侵蚀占水土流失总面积的 95.67%,故水力侵蚀在长江流域内发生尤其广泛。区域降雨特征、地形因素、植被特征、土壤类型等都是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[6]</sup>。在全球气候变化的背景下,降水特征发生明显变化,极端降水的增加会加剧土壤侵蚀<sup>[7]</sup>。与此同时,全球植被明显变化,特别是一些区域例如中国<sup>[8]</sup>,植被覆盖面积显著增加,这有利于缓解我国整体的土壤侵蚀现状。因此关注降水与植被等因素的变化对于评估长江中下游流域土壤侵蚀的变化及影响具有十分重要的意义<sup>[9]</sup>。

降雨是引起土壤侵蚀的动力因子之一,降雨侵蚀力常作为衡量降雨导致土壤侵蚀的潜在能力<sup>[10]</sup>。1965 年 Wischmeier 等<sup>[11]</sup>首次提出土壤侵蚀通用方程(Universal Soil Loss Equation, USLE),方程中以降雨总动能  $E$  与 30min 最大雨强  $I_{30}$  的乘积  $EI_{30}$  作为衡量降雨侵蚀力大小的指标,该指标也被证明适用于中国<sup>[12]</sup>。2008 年刘宝元等<sup>[13]</sup>以 USLE 为蓝本,根据我国水土保持的实际情况建立了中国土壤侵蚀预报方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)<sup>[14]</sup>,但该方程与 USLE 类似,缺乏对物理过程的考虑,且其中的降雨侵蚀力指标数据要求高,计算方法复杂且耗时,在实际应用中受到了很大限制。为了克服这一难题,国内学者开发了计算降雨侵蚀力的相关模型<sup>[15-16]</sup>,其中基于日降雨的降雨侵蚀力模型因其高精度得到了广泛应用。在众多日模型中,章文波等<sup>[17]</sup>根据全国 71 个代表性气象站建立的半月侵蚀力简易算法模型应用<sup>[18-19]</sup>较多,然而 Xie 等<sup>[20]</sup>发现章文波的方法在较高侵蚀力的地区会存在高估降雨侵蚀力的现象,且使用时需要率定<sup>[20]</sup>,因此提出了一种修正的 Xie 模型;Chen 等<sup>[21]</sup>将 Xie 的方法与更为精确的小时模式方法对比,认为 Xie 的方法公式简洁且估算精度高,验证了 Xie 模型的合理性。

气象要素在海拔差异较大的地区表现出明显的空间异质性<sup>[22]</sup>。近年来,广泛开展的基于经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)和旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)的气候要素场的量化研究,实现了区域气候场的时空分解<sup>[23]</sup>。REOF 分析相较传统的 EOF 分析更为优越,它能够有效地解构出主导型的空间模态,且所分解出的各空间模态高度相关<sup>[22]</sup>,这使得 REOF 在降雨分区<sup>[24]</sup>、气温分区<sup>[25]</sup>、旱涝灾害时空特征分区<sup>[26]</sup>等多种气候分析领域得到了广泛的应用。降雨侵蚀力作为衡量降雨导致土壤侵蚀的潜在能力<sup>[10]</sup>,与降雨直接相关,因此 REOF 同样具备适用于降雨侵蚀力特征分区研究的潜质<sup>[27]</sup>。目前,降雨侵蚀力研究主要集中在整体流域或将流域划分为上中下游或以行政区为单位进行时空变化分析<sup>[28]</sup>,不能充分反映区域降雨侵蚀力的差异性<sup>[27]</sup>,使用 REOF 对大尺度流域的降雨侵蚀力进行特征分区,可从新的角度深入了解大尺度流域降雨侵蚀力的时空分布特征。

降雨侵蚀力一直是人们研究和关注的热点,特别是对于区域降雨侵蚀力的研究<sup>[29-30]</sup>,可以帮助准确估算降雨侵蚀力并对其空间分布和演变有清晰的掌握<sup>[31]</sup>。相关研究表明<sup>[2]</sup>,土地坡度、植物覆盖情况以及降雨量等因素都与降雨侵蚀力存在一定的关系。姬兴杰等<sup>[32]</sup>分析了黄河流域降雨侵蚀力与地理和气象因素之间的关系,研究结果显示降雨侵蚀力与经度、纬度、坡度等地理因子均呈极显著相关关系。降雨侵蚀力表征最大半小时降水所携带的动能,与降雨直接相关。降水作为影响植被覆盖度的主要气象因子,通常与植被覆盖呈正相关<sup>[33-34]</sup>,特别是在极端降水条件下,其对植被生长具有促进作用<sup>[35]</sup>。研究表明,植被的增加可以保护土壤不被水滴滴溅侵蚀,避免径流对土壤进行冲刷侵蚀,并改善土壤结构<sup>[36]</sup>,是减少土壤侵蚀的重要方法。因此,区域植被变化情况的监测和评估对于掌握区域土壤侵蚀风险是必要的<sup>[9]</sup>。目前关于长江中下游流域降雨侵蚀力和其植被覆盖度的研究已经取得了非常丰富的成果<sup>[29]</sup>,但降雨侵蚀与植被覆盖在该地区的相互作用关系仍需深入探究。即在大尺度区域尤其是不同地理环境下,降雨侵蚀力是影响地表侵蚀过程的关键因素,侵蚀性降水会影响植被覆盖情况,进而影响地表的侵蚀过程。鉴于此,本研究以长江中下游流域 119 个气象站点 57 年逐日降雨资料为基础,使用 Xie 模型,结合统计分析的方法,分析长江中下游流域区域降雨侵蚀力时空变化,并从栅格尺度上综合考虑其与植被覆盖度的相关关系,以期为长江中下游流域生态环境保护和土地资源的合理利用提供科学依据。

## 1 研究区域概况与数据来源

### 1.1 研究区域概况

长江中下游是我国人口最密集,经济最为发达的地区之一,也是生态文明建设的先行示范重点区域。这里拥有丰富的自然资源,被誉为“鱼米之乡”,是中国重要的粮食和渔业生产基地。该地区位于长江三峡以东,地跨湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江、上海等 6 省 1 市,地理范围介于  $106^{\circ}$ — $122^{\circ}$ E 至  $25^{\circ}$ — $35^{\circ}$ N 之间(图 1),属亚热带季风气候,全年温暖湿润,长江中下游流域的地势起伏较大,海拔高度在  $-142$ — $3549$ m 之间,年降水量在  $1000$ — $1500$ mm 左右,且呈现明显的季节性分布。夏秋季节为降雨的高峰期,尤其是在汛期(5—10 月),降雨量更为集中和强烈,容易引发水土流失和洪涝灾害,对下游生态和人民财产安全造成威胁。

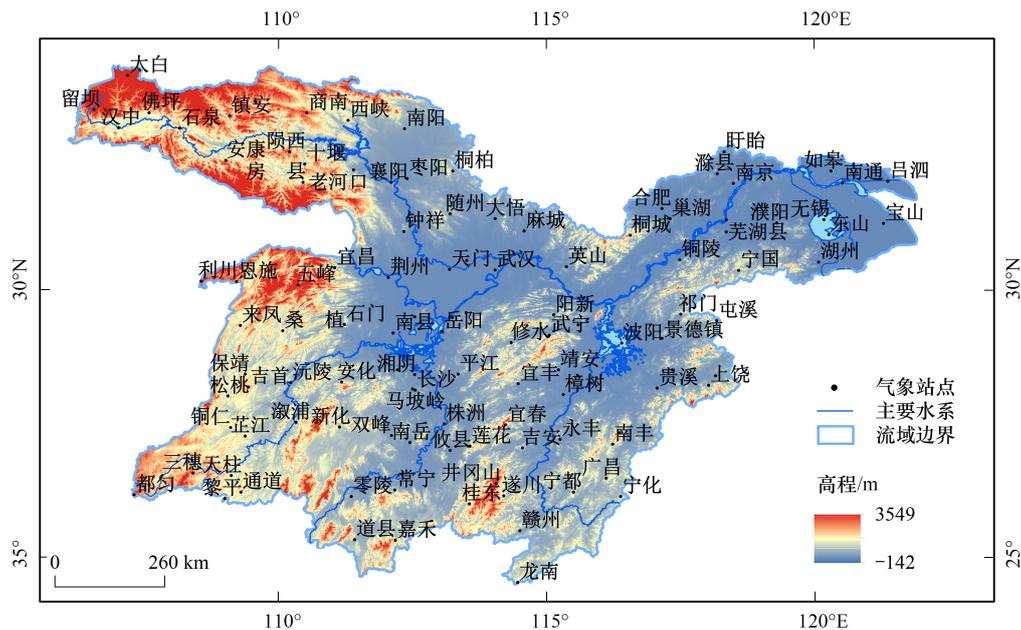


图 1 长江中下游流域概况图

Fig.1 Overview of the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin

### 1.2 数据来源

采用 1963—2019 年长江中下游流域内 119 个国家气象站经过均一化处理的逐日降水数据,时间长度为 57a。研究所选用的气象站均匀分布于长江中下游流域内,站点密度为  $7380\text{km}^2/\text{站}$ ,满足研究需求<sup>[37]</sup>,为保证降水资料可靠性,采用考虑高程的协同克里金法对缺测数据进行插补延长,并对降水数据进行质量控制检验,通过质量检查的数据用于降雨侵蚀力的计算。同时收集 1999—2019 年月度植被 NDVI 栅格数据,分辨率为  $1\text{km}$ ,由中国科学院地理科学与资源研究所网站(<http://www.resdc.cn>)提供,对其采用最大值合成法生成植被指数数据,并计算得年降雨侵蚀力数据。数字高程模型数据来自地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>),使用地理信息系统(ArcGIS)对该数据进行融合、裁剪、坐标系转换后得到如图 1 所示高程图。

## 2 研究方法

基于长江中下游流域 119 个气象站点的日降雨数据和月 NDVI 数据,首先采用降雨侵蚀力计算方法得到该地区的日降雨侵蚀力,使用植被覆盖度计算方法获取该地区植被覆盖情况;然后使用 REOF 法对长江中下游进行区域划分,结合 Mann-Kendal 趋势检验和重标极差法( $R/S$ )法分析各区域不同降雨侵蚀力时空变化规律;最后通过相关性分析法揭示长江中下游流域降雨侵蚀力与植被覆盖度之间的关系。

## 2.1 降雨侵蚀力计算方法

降雨侵蚀力是一种反应潜在土壤侵蚀的动力指标<sup>[38]</sup>,潜在土壤侵蚀随着降雨侵蚀力增大而增强,反之则减弱。根据前人的研究,在章文波等<sup>[17]</sup>模型和 Xie 方法<sup>[20]</sup>计算全国各站点降雨侵蚀力的过程中,Xie 方法的估算结果与实际降雨侵蚀力相对更接近,而章文波等模型通常会高估降雨侵蚀力,因此本研究采用 Xie 方法进行研究。在 Xie 方法中,将日降雨值 $\geq 10\text{mm}$ 的降雨定义为具有侵蚀性的降雨。计算公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_d)^{1.7265} \quad (1)$$

式中, $R_i$ 表示一年中第*i*个月的降雨侵蚀力,单位为 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $k$ 为第*i*个月中日降雨量达到 $10\text{mm}$ 的天数; $P_d$ 为第*i*个月中降雨量达到 $10\text{mm}$ 的第*j*天的日降雨量,单位为 $\text{mm}$ ;  $\alpha$ 为参数,根据经验其取值在暖季(5—9月)为 $0.3937$ ,在冷季(10—次年4月)为 $0.3101$ 。

## 2.2 旋转经验正交函数(EOF)法

旋转经验正交函数(Rotating Empirical Orthogonal Function, REOF)<sup>[39]</sup>是在经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)的分解基础上,选择累计方差通过 North 显著性检验<sup>[40]</sup>的几个主成分作为荷载特征向量,对荷载特征向量进行方差最大正交旋转,通过旋转得到的空间模态。相比传统的 EOF 分析,REOF 方法克服了每个荷载向量都较均匀地描述变量场变率结构的缺陷<sup>[41—42]</sup>,能够更清晰地反映各个区域空间上的相关分布特征<sup>[27]</sup>,是分离变量场典型空间结构的一种可靠方法<sup>[43]</sup>。North 等<sup>[40]</sup>在研究中指出,在 $95\%$ 置信度水平下的特征根的误差如下:

$$\Delta\lambda = \lambda \times \sqrt{\frac{2}{N^*}} \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 是特征根, $N^*$ 是数据的有效自由度,根据误差范围按顺序依次检查特征根。如果前后两个特征根之间误差范围有重叠,则没有通过显著性检验<sup>[44]</sup>。

本研究中将使用最大方差经验正交旋转对长江中下游 119 个站点的降雨侵蚀力进行分析,使旋转分解后得到的各个模态能够表征整个长江中下游流域不同降雨侵蚀特征的子区域。

## 2.3 植被覆盖度计算方法

植被覆盖度(Fraction Vegetation Coverage, FVC)一般被认为植被的叶、茎、枝等在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是刻画地表植被覆盖的重要参数,也是反应植被生长状态的重要指标,在植被变化、生态环境、水土保持等方面问题研究中起到重要作用<sup>[45]</sup>。本文的植被覆盖度计算是由归一化植被指数 NDVI 使用像元二分模型提取所得,该模型计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}} \quad (3)$$

式中, $NDVI_{\text{soil}}$ 取置信度 $5\%$ 的 NDVI 值, $NDVI_{\text{veg}}$ 取置信度 $95\%$ 的 NDVI 值,受年份、大气等条件影响, $NDVI_{\text{soil}}$ 和 $NDVI_{\text{veg}}$ 会随时间和空间的不同而产生变化。植被覆盖度分级标准<sup>[46]</sup>如表 1 所示。

表 1 长江中下游植被覆盖度分级标准

Table 1 Classification standard of vegetation coverage in the middle and lower reaches of the Yangtze River

划分等级 Grades	分级标准 Grading standard	植被覆盖度/% Vegetation coverage	地表景观特征 Characteristics of surface landscape
1	低覆盖度	0—20	沙漠、水域等
2	中低覆盖度	20—40	5%—20%草地、耕地
3	中覆盖度	40—60	20%—50%草地、稀疏林地
4	中高覆盖度	60—80	>50%草地、郁闭灌丛
5	高覆盖度	80—100	草地、林地、森林等

## 2.4 Mann-Kendal 趋势检验法

Mann-Kendal (*MK*) 趋势检验是一种非参数的判断时间序列变化趋势的分析方法,该方法具有检验范围宽,受人为影响较小的特点<sup>[47]</sup>。其计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S>0) \\ 0 & (S=0) \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S<0) \end{cases} \quad (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1 < i < j < n) \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中, $Z$  为检验统计量,  $\text{sgn}$  为符号函数,  $\text{Var}$  为计算方差函数,  $x_i, x_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的时间序列值;  $n$  为时间序列长度。在给定显著性水平  $\alpha$  下,当  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时,表明时间序列变化趋势显著,当  $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$  时,表明时间序列变化趋势不显著。当  $|Z| > 1.96$  时,表明时间序列变化趋势通过了 95% 的显著性水平检验。

## 2.5 重标极差法

重标极差法 (Rescaled Range Analysis,  $R/S$ ) 是由水文学家 H.E.Hurst 于 20 世纪初提出的,其被广泛的应用于气象变量时间序列分析中<sup>[48]</sup>。在  $R/S$  分析过程中,Hurst 指数是定量分析时间序列的特征指数,它能够区分随机与非随机序列<sup>[24]</sup>。经过长期的理论分析和模拟试验研究,Hurst 发现了如下经验公式:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = \left(\frac{\pi\tau}{2}\right)^H \quad (7)$$

式中, $\tau$  为任意正整数, $R(\tau)$  和  $S(\tau)$  分别为某一时间序列的极差和标准差, $H$  成为 Hurst 指数,位于  $[0-1]$  之间,Hurst 指数  $H$  值可以细分为以下四种形式: $0 < H \leq 0.35$  为强反持续性, $0.35 < H \leq 0.5$  为弱反持续性, $0.5 < H \leq 0.65$  为弱持续性, $0.65 < H \leq 1$  为强持续性<sup>[49]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 长江中下游整体降雨侵蚀力的时空变化特征

为全面了解长江中下游流域不同季节降雨侵蚀力的表现情况,本文根据降雨侵蚀力模型中参数  $\alpha$  的取值不同,将长江中下游的降雨侵蚀力分为冷季(10—次年 4 月)和暖季(5—9 月)进行时空变化分析,其中降雨侵蚀力趋势变化分析结果如图 2。如图 2 所示,长江中下游降雨侵蚀力整体呈上升趋势,年均降雨侵蚀力为  $5643 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,年均变化速率为  $15.37 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,年均降雨侵蚀力最大值和最小值分别出现在 2016 年和 1978 年,分别为  $8286, 3527 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。长江中下游暖季和冷季的年均降雨侵蚀力分别为  $4338, 1305 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,年均变化速率分别为  $14.19, 5.48 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,暖季年均降雨侵蚀力平均值为冷季的 3.5 倍,说明长江中下游降雨侵蚀力季节性差异显著。

长江中下游降雨侵蚀力空间分布情况如图 3 所示。由图 3 可知,长江中下游流域降雨侵蚀力空间差异显著,年均降雨侵蚀力最高值和最低值分别为  $10949, 2022 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,流域内整体年均降雨侵蚀力表现为由西北向东南逐渐增加的趋势特征。长江中下游冷季年均降雨侵蚀力以江西省为中心由最高值  $2688 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  沿西北方向递减至最低值  $163 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,减小幅度为  $505 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。长江中下游暖季年均降雨侵蚀力空间分布不均,高值区分别集中在流域的西部和东北部地区,年均降雨侵蚀力最高值为  $8856 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,约为冷季的 3.3 倍,年均降雨侵蚀力季节性差异显著。

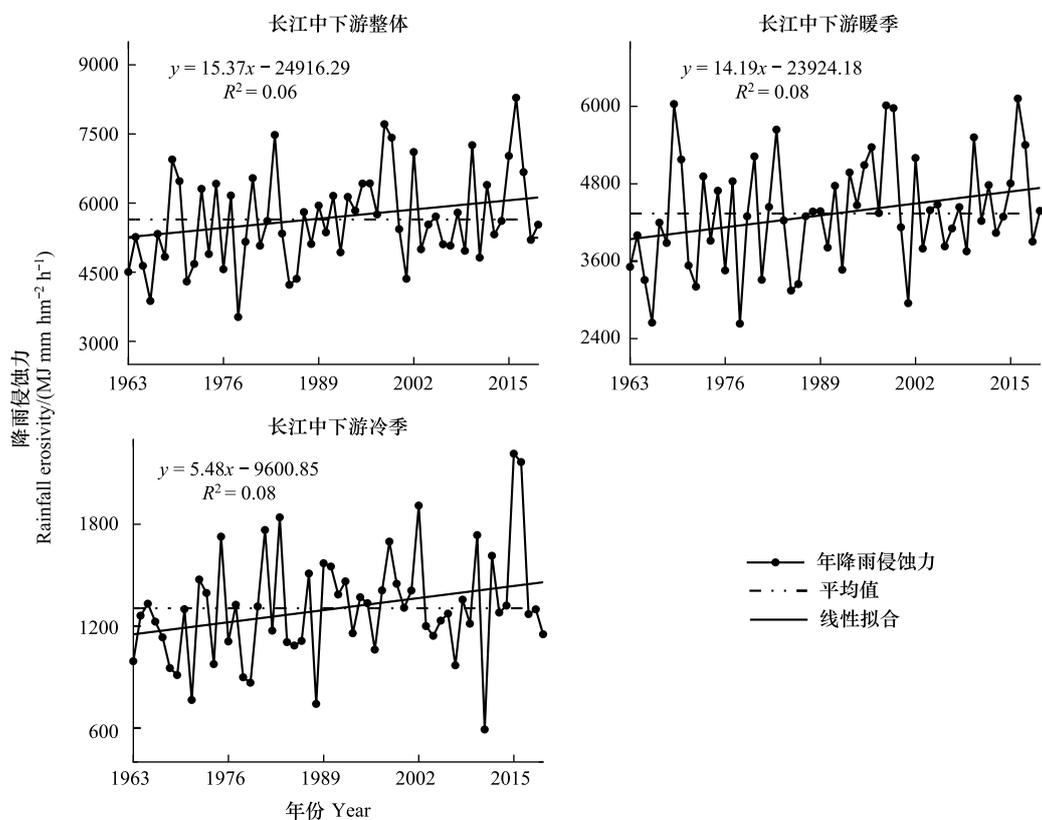


图2 1963—2019年长江中下游年均降雨侵蚀力趋势分析

Fig.2 Trend analysis of annual average rainfall erosivity in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1963 to 2019

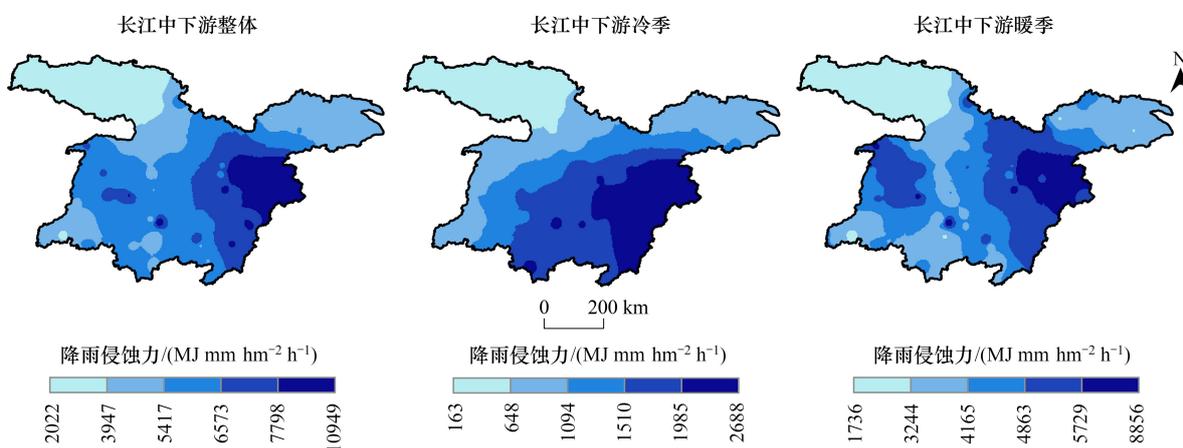


图3 1963—2019年长江中下游降雨侵蚀力空间分布

Fig.3 Spatial distribution of rainfall erosivity in the middle and lower reaches of the Yangtze River (1963—2019)

### 3.2 基于 REOF 的长江中下游分区降雨侵蚀力分析

#### 3.2.1 基于 REOF 的长江中下游降雨侵蚀力地理分区结果

对所选取的长江中下游 119 个站点 1963—2019 年的年均降雨侵蚀力进行 EOF 分解,可以得到 119 个主成分及 119 个特征值,从第 7 个主成分起,特征值未能通过 North 显著性检验。选取前 6 个可以反映长江中下游年降雨侵蚀力的主要空间分布特征的空间模态。对已得到的 6 个空间模态进行旋转,获取前 6 个空间模态

的方差贡献率以及累计方差贡献率,结果见表 2。绘制长江中下游荷载向量的 6 个模态分布图,将 6 个空间模态划分为 3 个阈值区间,调整每个区间的最优值,其可视化分布结果可见图 4。选取深色部分的高荷载区绘制长江中下游地理分区示意图,结果见图 5。

表 2 1963—2019 年长江中下游 119 个站点 6 个空间模态 REOF 计算结果

Table 2 Spatial modal REOF results for 119 stations in the middle and lower Yangtze River

模态 Modes	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulated variance contribution rate/%	模态 Modes	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulated variance contribution rate/%
1	0.14	0.14	4	0.08	0.40
2	0.10	0.24	5	0.06	0.46
3	0.08	0.32	6	0.06	0.52

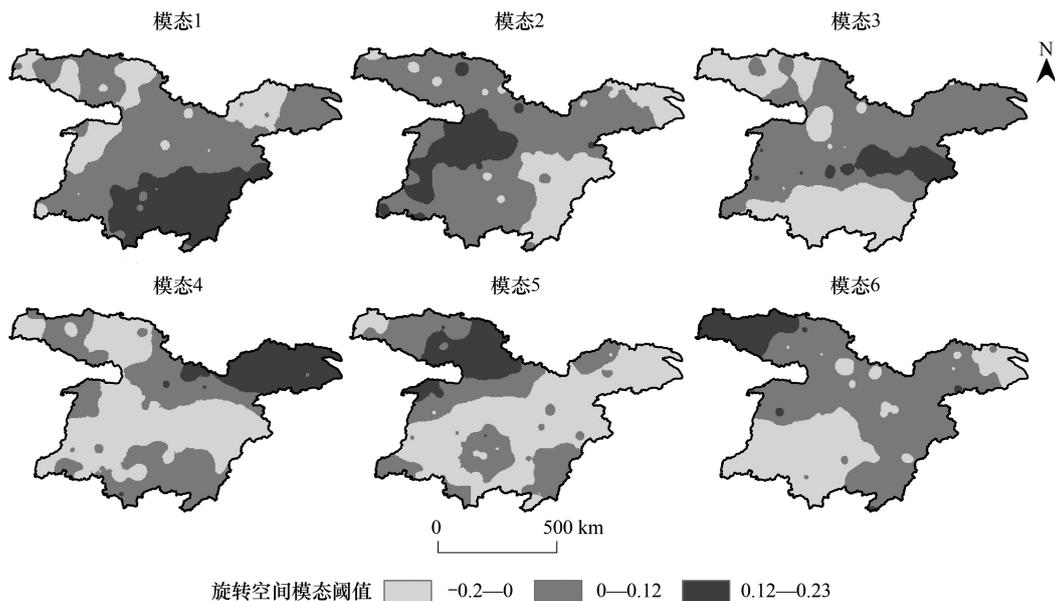


图 4 长江中下游降雨侵蚀力旋转空间模态分布

Fig.4 Spatial mode distribution of rainfall erosivity rotation in the middle and lower reaches of the Yangtze River

由图 5 可知,1963—2019 年长江中下游降雨侵蚀力可以分为 6 个地理分区,分别为湘江及赣江水系(I 区)、洞庭湖水系(II 区)、鄱阳湖环湖区(III 区)、长江干流武汉以下段及太湖水系(IV 区)、丹江口库区及下游流域(V 区)、丹江口上游流域(VI 区)。其累计方差贡献率达 52%(表 2),区域内 119 个气象站点地理分区见表 3。

### 3.2.2 长江中下游各地理分区降雨侵蚀力时空变化特征

本研究使用  $R/S$  重标极差法以及  $MK$  趋势检验对长江中下游 6 个地理分区以及各分区暖季、冷季的年降雨侵蚀力进行历史和未来趋势的探讨。由表 4 可知,在长江中下游 6 个地理分区中,年均降雨侵蚀力最大值和最小值出现在 III 区和 VI 区,分别为  $7621$ 、 $2871 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,且相邻地理分区降雨侵蚀力变化速率差异较大,说明降雨侵蚀力区域性差异显著。57 年间,仅 V 区的降雨侵蚀力呈现下降趋势,其余各区的降雨侵蚀力均呈现上升趋势,其中 I 区和 IV 区通过 95% 显著性检验,并分别以  $31.30$ 、 $30.30 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  的变化速率增长,长江中下游 I 区过去对未来降雨侵蚀力趋势的持续性影响最为明显,该区未来的降雨侵蚀力显著上升且呈现强持续性,值得注意的是 III 区降雨侵蚀力增长速度较快为  $27.50 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,以上结果表明长江中下游 III 区、I 区和 IV 区降雨侵蚀力未来持续显著增长,增长速率较快,相较于其他区域遭受水力侵蚀的风险更大。

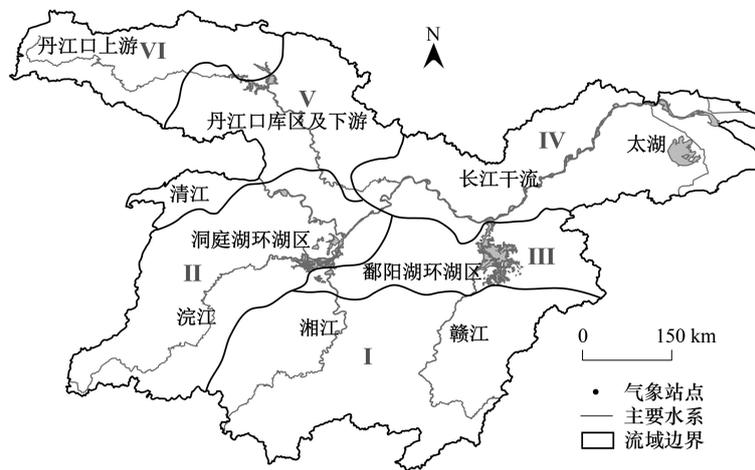


图 5 长江中下游地理分区示意图

Fig.5 Geographical division of the middle and lower reaches of the Yangtze River

表 3 长江中下游 119 个气象站点地理分区

Table 3 Geographical division of 119 meteorological stations in the middle and lower Yangtze River

区号 District number	气象站点 Meteorological station	数量 Number
I	马坡岭、长沙、宜丰、新化、双峰、南岳、攸县、株洲、莲花(江西省)、宜春、吉安、零陵、衡阳、常宁、桂东、井冈山、遂川、道县、嘉禾、赣州、樟树、贵溪、上饶、永丰、南城、南丰、宁都、广昌、宁化、龙南	30
II	宜昌、荆州、来凤、桑植、石门、监利(湖北省)、南县、洪湖、嘉鱼、岳阳、保靖、松桃、吉首、沅陵、常德、安化、沅江、铜仁、芷江、溆浦、凯里、都匀、三穗、黎平、天柱、通道	26
III	修水、湘阴、平江、阳新(湖北省)、武宁、波阳、祁门、景德镇、屯溪、靖安、南昌、德兴、玉山	13
IV	麻城、孝感、武汉、盱眙、滁县、南京、如皋、南通、吕泗、桐城、合肥、巢湖、马鞍山、芜湖县、濮阳、无锡、昆山、吴县东山、宝山、英山、铜陵、宁国、湖州、庐山	24
V	南阳、陕西、十堰、房县、老河口、襄阳、枣阳、桐柏(河南省)、钟祥、随州、大悟、利川(出界)、建始、恩施、五峰、天门	16
VI	太白、留坝、汉中、佛坪、商县、镇安、商南、西峡、石泉、安康	10

表 4 1963—2019 年长江中下游各地理分区年均降雨侵蚀力分析结果

Table 4 Annual average rainfall erosivity analysis results in middle and lower reaches of the Yangtze River (1963—2019)

区号 Zones	年均降雨侵蚀力 Average annual rainfall erosivity/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	变化速率 Change rate/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Z	95%显著性趋势 95%Significant trend	Hurst 指数 Hurst index	趋势 Future trend
I	6554	31.30	2.29	显著上升	0.75	强持续性
II	5643	14.36	1.37	不显著上升	0.53	弱持续性
III	7621	27.54	1.85	不显著上升	0.65	弱持续性
IV	5395	30.30	2.26	显著上升	0.65	弱持续性
V	4435	-6.95	-0.92	不显著下降	0.34	强反持续性
VI	2871	5.48	1.00	不显著上升	0.66	弱持续性

Z<sub>1-α/2</sub> = ±1.96 为 95%置信度水平

由表 5 可知,长江中下游暖季降雨侵蚀力最大值和最小值分别出现在 III 区和 VI 区,分别为 5528、2551MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,相邻地理分区间降雨侵蚀力增长速率变化差异显著,说明暖季降雨侵蚀力存在显著区域性差异。6 个地理分区中,有 1 个地理空间分区的降雨侵蚀力呈现下降趋势,5 个地理空间分区的降雨侵蚀力呈现上升趋势,其中,仅 I 区和 IV 区通过 95%显著性检验,并分别以 21.94、36.11MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>的变化

速率增长。长江中下游 I 区、III 区和 VI 区过去对未来降雨侵蚀力趋势的持续性影响最为明显均呈现强持续性, II 区和 V 区的未来降雨侵蚀力趋势呈现弱反持续性和强反持续性, 即未来除 II 区降雨侵蚀力存在下降或不变趋势外其余各区均呈现上升趋势。该结果表明 1963—2019 年长江中下游暖季降雨侵蚀力未来呈现显著增长趋势, 其中 I 区、III 区和 IV 区降雨侵蚀力未来持续显著增长, 易遭受水力侵蚀。

表 5 1963—2019 年长江中下游暖季各地理分区年均降雨侵蚀力分析结果

Table 5 Annual average rainfall erosivity analysis results in middle and lower reaches of the Yangtze River (Warm Season, 1963—2019)

区号 Zones	年均降雨侵蚀力 Average annual rainfall erosivity/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	变化速率 Change rate/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Z	95% 显著性趋势 95% Significant trend	Hurst 指数 Hurst index	趋势 Future trend
I	4584	21.94	2.09	显著上升	0.76	强持续性
II	4447	9.90	1.07	不显著上升	0.45	弱反持续性
III	5528	14.68	1.45	不显著上升	0.66	强持续性
IV	4376	26.11	2.35	显著上升	0.63	弱持续性
V	3791	-7.11	-0.79	不显著下降	0.34	强反持续性
VI	2551	7.02	1.20	不显著上升	0.68	强持续性

$Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$  为 95% 置信度水平

由表 6 可知, 长江中下游冷季 6 个分区年均降雨侵蚀力最大值和最小值出现在 III 区和 VI 区, 分别为 2093、320 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 相邻地理分区间降雨侵蚀力增长速率变化差异显著, 说明暖季降雨侵蚀力存在显著区域性差异。1963—2019 年期间, VI 区的降雨侵蚀力呈现下降趋势, 其余各区的降雨侵蚀力均呈现上升趋势, 其中, 仅 I 区和 III 区通过 95% 显著性检验, 并分别以 9.36、12.87 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> 的变化速率增长。长江中下游 I 区和 III 区过去对未来降雨侵蚀力趋势的持续性影响最为明显, 均呈现显著增长趋势, II 区、IV 区和 VI 区的未来降雨侵蚀力趋势呈现弱持续性。该结果表明 1963—2019 年长江中下游冷季年均降雨侵蚀力整体呈现增长趋势, 其中 I 区和 III 区降雨侵蚀力未来表现为持续显著增长, 但相较于整体和暖季, 冷季侵蚀程度较小。

表 6 1963—2019 年长江中下游冷季各地理分区年均降雨侵蚀力分析结果

Table 6 Annual average rainfall erosivity analysis results in middle and lower reaches of the Yangtze River (Cold Season, 1963—2019)

区号 Zones	年均降雨侵蚀力 Average annual rainfall erosivity/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	变化速率 Change rate/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Z	95% 显著性趋势 95% Significant trend	Hurst 指数 Hurst index	趋势 Future trend
I	1970	9.36	1.98	显著上升	0.71	强持续性
II	1196	4.46	1.27	不显著上升	0.65	弱持续性
III	2093	12.87	2.15	显著上升	0.68	强持续性
IV	1019	4.19	1.58	不显著上升	0.54	弱持续性
V	655	0.16	-0.19	不显著上升	0.46	弱反持续性
VI	320	-1.54	-1.04	不显著下降	0.63	弱持续性

$Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$  为 95% 置信度水平

### 3.2.3 长江中下游流域重点区域降雨侵蚀力月尺度趋势分析结果

为了更好的理解和评估降雨对地表产生的侵蚀效应, 根据长江中下游各分区降雨侵蚀力时空变化分析结果, 选择降雨侵蚀力未来持续增长的三个区域湖南、江西和安徽 (III 区、I 区和 IV 区) 作为重点研究区域, 按照冷季 (10—次年 4 月) 和暖季 (5—9 月) 进行月尺度降雨侵蚀力趋势分析, 如表 7。

由表 7 可知, 长江中下游流域全年降雨侵蚀力最高值出现在暖季的 6 月, I 区、III 区和 IV 区 6 月平均降雨侵蚀力分别为 1556、2080、1212 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 其中 III 区 6 月平均降雨侵蚀力为全年最高值, 增长速率为

3.93MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>。长江中下游流域内 6—9 月三个区域降雨侵蚀力差异较大,5 月及 10 月—次年 4 月 IV 区降雨侵蚀力明显低于 I 区和 III 区。暖季 5—8 月平均降雨侵蚀力普遍高于冷季,且未来呈现持续增长趋势,9 月平均降雨侵蚀力低于暖季平均值,III 区 9 月未来呈现下降趋势。冷季平均降雨侵蚀力高值出现在 3—4 月,最高值出现在 III 区 4 月,平均降雨侵蚀力为 812MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,增长速率为 2.70MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,冷季最低值出现在 IV 区 12 月,平均降雨侵蚀力为 48MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。值得注意的是,冷季的 III 区的 1 月、3 月、4 月以及 I 区的 3 月、11 月降雨侵蚀力变化速率较快,分别为 2.05、4.47、2.70、3.57、3.40MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>。

表 7 1963—2019 年长江中下游重点区域月均降雨侵蚀力分析结果

Table 7 Monthly average rainfall erosivity analysis results in key areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River (1963—2019)

暖季月份 Warm season month	月均降雨侵蚀力 Monthly average rainfall erosivity/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )			变化速率 Change rate/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )			冷季月份 Cold season month	月均降雨侵蚀力 Monthly average rainfall erosivity/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )			变化速率 Change rate/ (MJ mm hm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )		
	I	III	IV	I	III	IV		I	III	IV	I	III	IV
5	1189	1336	560	2.44	1.74	-0.92	10	229	208	194	-1.58	-0.68	0.68
6	1556	2087	1212	6.67	3.93	9.01	11	207	185	122	3.40	1.97	0.10
7	783	1122	1265	8.94	4.33	7.06	12	99	88	48	1.48	0.98	0.63
8	703	656	856	3.47	4.95	8.89	1	114	119	67	1.23	2.05	1.73
9	354	326	484	0.41	-0.27	2.07	2	201	218	94	1.97	1.38	1.24
—	—	—	—	—	—	—	3	427	462	183	3.57	4.47	0.67
—	—	—	—	—	—	—	4	692	812	311	-0.71	2.70	-0.65

### 3.3 长江中下游流域植被覆盖度时空分布特征

长江中下游植被类型丰富多样,但不同地区的植被覆盖度存在差异,本文对长江中下游 1999—2019 年暖季和冷季植被覆盖度进行空间分析。长江中下游流域植被覆盖度空间变化如图 6 所示,长江中下游流域低植被覆盖度主要集中在长江干流武汉以下段及太湖水系(IV 区)。流域内暖季植被覆盖普遍较高,主要以中高植被覆盖为主,冷季植被覆盖分布不均,高覆盖度主要集中在湘江及赣江水系(I 区)和鄱阳湖环湖区(III 区)。1999—2019 年长江中下游暖季植被覆盖度整体呈现改善趋势,改善区域占长江中下游流域总面积的 66%,主要分布在 V 区和 VI 区。34%的区域植被覆盖度呈现退化趋势,主要分布在 I 区、III 区和 IV 区。1999—2019 年长江中下游冷季植被覆盖度整体呈现改善趋势,改善区域占长江中下游流域总面积的 61%,主要分布在 I 区、II 区和 VI 区。39%的区域植被覆盖度呈现退化趋势,主要分布在 III 区、IV 区和 V 区。

### 3.4 长江中下游重点区域降雨侵蚀力与植被覆盖度的相关性分析

本文利用相关性分析法分析检验长江中下游流域 1999—2019 年暖季和冷季重点区域降雨侵蚀力与植被覆盖度之间的关系,如图 7 所示。由图 7 可知,暖季降雨侵蚀力与植被覆盖度之间的相关系数为-0.90—0.96,其中,相关系数为正值的像元面积占长江中下游流域面积的 56.4%,主要分布在 II 区和 V 区;相关系数为负值的像元面积占 43.6%,主要分布在 I 区、III 区、IV 区和 VI 区,重点区域(I 区、III 区和 IV 区)降雨侵蚀力与植被覆盖度主要呈负相关。冷季降雨侵蚀力与植被覆盖度之间的相关系数为-0.86—0.90,其中,相关系数为正值的像元面积占长江中下游流域面积的 41%,主要分布在 I 区;相关系数为负值的像元面积占 59%,主要分布在 II 区、III 区、IV 区、VI 区和 V 区,重点区域降雨侵蚀力与植被覆盖度主要呈负相关,值得注意的例外是 I 区在冷季呈现正相关,而且其中的湘江上游流域出现显著正相关。

## 4 讨论

降水是影响土壤侵蚀的主要因素,1963—2019 年长江中下游流域降雨侵蚀力整体表现为由西北向东南递增的空间分布格局,该结果与其它研究结果一致<sup>[50—51]</sup>。流域内降雨侵蚀力呈现上升趋势,最大值和最小值

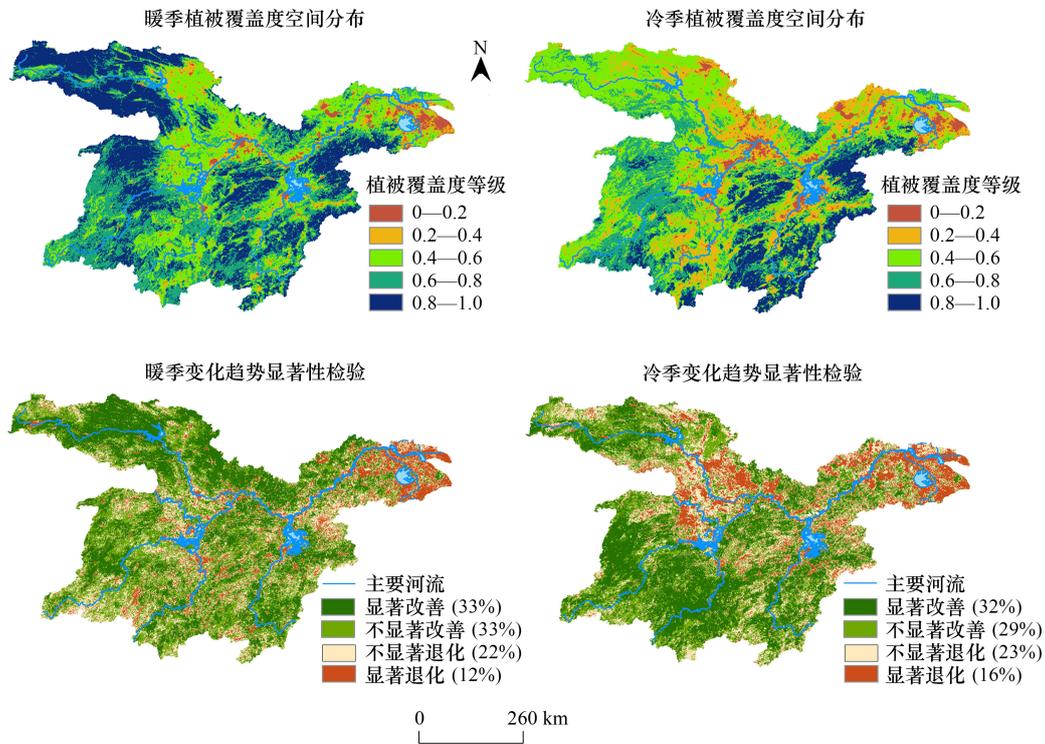


图 6 1999—2019 年长江中下游年均植被覆盖度及变化趋势空间分布

Fig.6 Annual average vegetation coverage and its change trend and its spatial distribution in the middle and lower reaches of the Yangtze River (1999—2019)

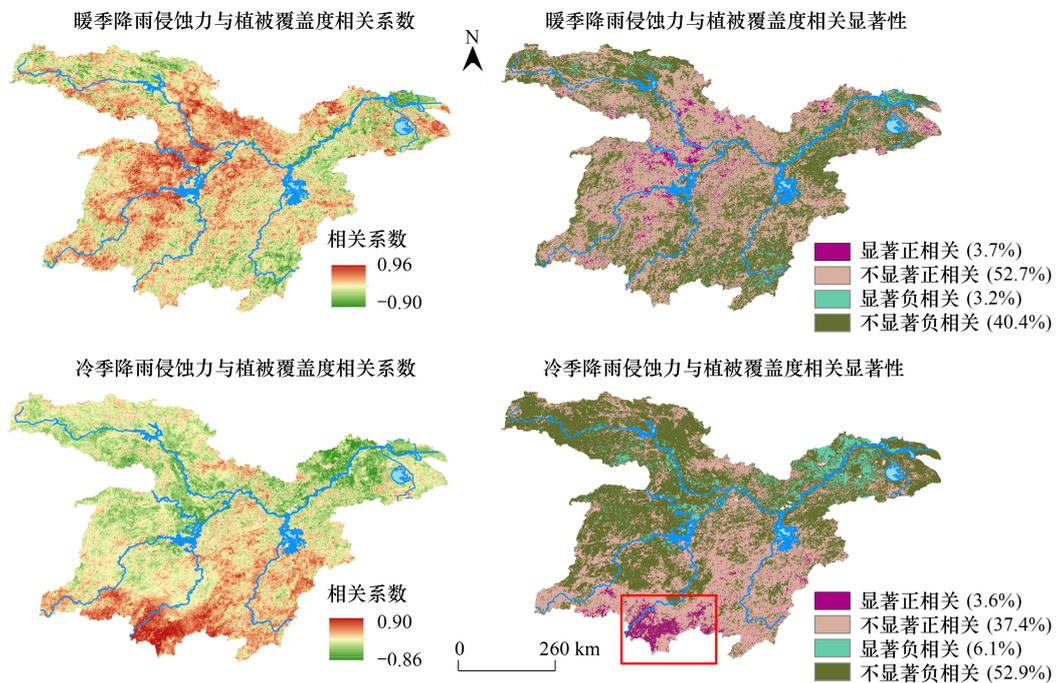


图 7 1999—2019 年长江中下游流域降雨侵蚀力与植被覆盖度相关系数及其显著性空间分布

Fig.7 Correlation coefficient between rainfall erosivity and vegetation coverage and its significant spatial distribution in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin (1999—2019)

分别出现在 2016 年和 1978 年。降雨侵蚀力存在显著的年际波动,这与高歌等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。说明针对不同降雨资料选择不同的降雨侵蚀力模型,可以得出大致相同的降雨侵蚀力结果。良好的植被覆盖是防止土壤侵蚀的重要措施,1999—2019 年长江中下游植被覆盖度整体呈改善趋势,长江中游地区是我国植被恢复和重建的主要区域,流域内主要以中高植被覆盖为主。由于长江下游地区养殖业在全国占有举足轻重的地位,也是我国水稻等粮食作物的主产区,受人类活动影响较大,导致低植被覆盖度主要集中于下游地区,植被覆盖呈现退化趋势。

本研究基于 REOF 将长江中下游进行区域划分,结果发现 III 区、I 区和 IV 区降雨侵蚀力未来持续增长,可能原因是其位于长江中下游流域东部地区,该区域地势起伏较大,地理位置临近海洋,受海洋水汽影响较大,故侵蚀性降雨高于流域其它区域。在月尺度降雨侵蚀力分析中暖季和冷季降雨侵蚀力最大值均出现在 III 区鄱阳湖流域,陆建忠等<sup>[52]</sup>研究表明鄱阳湖流域湿地和农田面积减少,植被覆盖度降低,建筑用地增加均导致了该地区土壤侵蚀量增加,这也从一定程度上表明,土壤侵蚀的多少不完全取决于降雨侵蚀力,也与人类活动以及植被覆盖情况有一定的联系<sup>[53-54]</sup>。因此在接下来的研究中应重点关注 III 区、I 区和 IV 区所处的安徽、湖南、江西三个省份降雨侵蚀力发生情况,尤其是 III 区可作为长江中下游流域水土流失的关键区域,以便有针对性的做好预防工作。

许多研究表明,降雨侵蚀力是造成土壤侵蚀的重要动力因子<sup>[38]</sup>,植被覆盖是阻止土壤侵蚀的重要环境因子<sup>[36]</sup>。降雨侵蚀力越大土壤侵蚀风险越大,植被覆盖度越大土壤侵蚀风险越小<sup>[55]</sup>。研究表明长江中下游降雨侵蚀力与植被覆盖度之间存在相关关系,在重点关注区域 III 区、I 区和 IV 区主要呈现为负相关,这与普遍的研究结果一致<sup>[56-57]</sup>。但值得注意的例外是 I 区冷季主要呈现正相关,而且其中的湘江上游流域出现显著正相关。长江中下游地区东临黄海和东海,地势平坦且没有山脉阻挡,容易遭受水涝及台风等气候灾害的影响,导致临海的重点区域植被覆盖普遍呈现退化趋势。I 区主要位于江西和湖南两省,地势多为丘陵和山地,这种地形地貌有利于植被的生长和覆盖的同时也容易受到降雨侵蚀的影响。近年来由于气候变暖以及持续的暖冬影响,该地区冷季植被生长环境发生改变,导致农作物生长季节延长,植被覆盖呈现增长趋势,使得 I 区冷季降雨侵蚀力与植被覆盖度呈现正相关。另外位于湖南省湘江上游的零陵、道县和嘉禾三个气象站点所在地区是我国重要的粮食产地,特别是双季稻的主要产区。随着气候变暖以及降水事件的多发,使该地区农作物在冷季得到原有人为灌溉的同时获得了更多的雨水补充,导致农作物产量显著增长,增加了植被覆盖面积,在一定程度上减弱了降雨对土壤的冲刷作用。研究发现<sup>[58]</sup>该地区坡度普遍大于 45°,当坡度效应大于植被阻碍的能力时,降雨对该地区土壤侵蚀的影响同样也会增强。因此湘江上游流域降雨侵蚀力与植被覆盖度之间呈现显著的正相关关系。综上所述,区域降雨侵蚀力会影响区域植被覆盖情况,进而影响侵蚀性降水对地表的侵蚀过程,故可以在该地区种植固土能力更强的作物,以便即使在侵蚀性降水超出一般植被抵御能力时,这些作物的根系和冠层仍能有效地保护土壤,减少土壤的侵蚀程度。需要注意的是除了植被覆盖度外,气候灾害、极端气候和坡度也是影响该地区降雨侵蚀过程的重要因素。本研究没有将气温、日照时数、极端气候事件变化这些影响土壤侵蚀的重要气象因子加入分析,导致分析结果不全面。因此后续研究可以结合土地利用类型、气候要素、人类活动等多方面开展深入研究。

## 5 结论

(1) 长江中下游降雨侵蚀力整体呈上升趋势,年均降雨侵蚀力为 5643 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,最大值和最小值分别出现在 2016 年和 1978 年,分别为 8286、3527 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。

(2) 长江中下游流域不同季节下降雨侵蚀力的空间分布特征存在差异。流域内暖季和冷季的年均降雨侵蚀力分别为 4338、1305 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,其中冷季降雨侵蚀力时空分布不均,高值区主要集中在流域的西部和东北部,而降雨侵蚀力在暖季表现为以江西省为中心沿西北方向递减的空间分布格局,减小幅度为 505 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,最大值和最小值出现在鄱阳湖环湖区(III 区)和长江干流武汉以下段及太湖水系(IV 区),分别

为 7621、2871 MJ mm hm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>。

(3) 长江中下游相邻地理分区间降雨侵蚀力变化速率差异较大,降雨侵蚀力区域性差异显著。其中 III 区、湘江及赣江流域(I 区)和 IV 区年均降雨侵蚀力呈显著增长趋势( $P < 0.05$ )且未来将保持该趋势,为水土保持重点关注区域。

(4) 长江中下游植被覆盖空间变化差异显著,整体呈改善趋势。流域内暖季(冷季)改善区域占总面积的 66%(61%),主要分布在 VI 区和 V 区(I 区、II 区和 VI 区);暖季(冷季)退化区域占总面积的 34%(39%),主要分布在 I 区、III 区和 IV 区(III 区、IV 区和 V 区)。

(5) 长江中下游水土保持重点关注区域的降雨侵蚀力与植被覆盖度存在负相关关系。I 区在冷季呈现正相关,其中的湘江上游流域出现显著正相关。

在大尺度区域尤其是不同地理环境下,降雨侵蚀力是影响地表侵蚀过程的关键因素,侵蚀性降水会影响植被覆盖情况,进而影响地表的侵蚀过程。因此在重点关注高降雨侵蚀力地区的同时还需加强植被保护工作。研究结果可为长江中下游区域水土保持及生态环境保护工作提供科学依据。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 王蒙,殷淑燕.近 52a 长江中下游地区极端降水的时空变化特征.长江流域资源与环境,2015,24(7):1221-1229.
- [ 2 ] 郑粉莉,唐克丽,张科利,查轩,白红英.自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变.生态学报,1995,15(3):251-259.
- [ 3 ] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制.环境科学,1998,19(5):88-92,97.
- [ 4 ] 中华人民共和国水利部.2019 年中国水土保持公报.2019. [2024-04-11] [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202009/t20200924\\_1448752.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202009/t20200924_1448752.html).
- [ 5 ] 史志华,刘前进,张含玉,王玲,黄萱,方怒放,岳紫健.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望.土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [ 6 ] 王慧琴,孙保平,余新晓,信忠保,贾国栋.华北北部区域土壤侵蚀及影响因素的时空变化.中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):8-18.
- [ 7 ] Jia L, Yu K X, Li Z B, Li P, Zhang J Z, Wang A N, Ma L, Xu G C, Zhang X. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load. Catena, 2022, 210: 105931.
- [ 8 ] 李广东.全球土地覆被时空变化与中国贡献.地理学报,2022,77(2):353-368.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,谢云,高歌.中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究.农业工程学报,2019,35(9):105-113.
- [ 11 ] Wischmeier W H, Smith D D, States U, University P. Predicting Rainfall Erosion losses: A Guide to Conservation Planning. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [ 12 ] 王万中,焦菊英,郝小品,张宪奎,卢秀琴,陈法扬,吴素业.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I).水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [ 13 ] Baoyuan L, Keli Z, Yun X. An empirical soil loss equation[C]//Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China. 2002: 26-31.
- [ 14 ] 周正朝,上官周平.土壤侵蚀模型研究综述.中国水土保持科学,2004,2(1):52-56.
- [ 15 ] 邵祎婷,何毅,穆兴民,高鹏,赵广举,孙文义.秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征.长江流域资源与环境,2019,28(2):416-425.
- [ 16 ] 卜兆宏,宫世俊,阮伏水,蔡士强.降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用.遥感技术与应用,1992,7(3):1-10.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 阮欧,刘绥华,杨广斌,谢波.1966-2017 年贵州省降雨侵蚀力的时空分布特征.水土保持通报,2020,40(3):35-42,32.
- [ 19 ] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,赵仕威,吴旭树,于海霞.珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征.农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] Chen Y H, Xu M H, Wang Z L, Chen W J, Lai C G. Reexamination of the Xie model and spatiotemporal variability in rainfall erosivity in mainland China from 1960 to 2018. Catena, 2020, 195: 104837.
- [ 22 ] 薄会娟,林青霞,李璐,魏冲,龚成麒.基于 REOF 的两种卫星降水产品(IMERG 和 MSWEP)在金沙江流域降水分区尺度精度评估.湖泊科学,2024,36(2):620-634.
- [ 23 ] 胡刚,石星军,宋慧.基于 REOF 和 ESMD 的降水场时空耦合分析:以山东省冬季降水为例.中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):132-139.
- [ 24 ] 龚成麒,董晓华,董立俊,吴寒雨,欧阳习军.雅砻江流域 REOF 分区的降水特征及其未来趋势分析.水土保持研究,2022,29(3):

78-87.

- [25] 杨若子, 周广胜. 1961-2013年东北三省玉米低温冷害强度的时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(14): 4386-4394.
- [26] 刘智勇, 周平, 彭资, 甘先华, 郭乐东, 赖仁审. 基于旋转经验正交函数法的广东省干湿状况时空特征分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(5): 153-160, 168.
- [27] 魏冲, 董晓华, 龚成麒, 马耀明, 喻丹, 薄会娟, 赵文义. 基于 REOF 的淮河流域降雨侵蚀力时空变化. 农业工程学报, 2022, 38(12): 135-144.
- [28] 索笑颖, 刘玉春, 赵光耀, 田国纯, 张卫平, 白龙飞. 河北省山区降雨侵蚀力的时空变化特征. 水土保持通报, 2020, 40(6): 259-265.
- [29] 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.
- [30] 高歌, 韩振宇, 殷水清, 黄大鹏, 王文婷. 黄河流域 1961—2017 年降雨侵蚀力特征与未来变化预估应用. 基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 575-590.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 周美林, 刘家宏, 刘希胜, 王亚琴. 青海湖流域植被动态变化驱动力及空间粒度效应. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1497-1506.
- [34] 马云飞, 何全军, 张月维, 石艳军, 李建平, 袁福香. 气候因子和人类活动对松辽流域植被叶面积指数动态的影响. 生态学报, 2024, 44(5): 2043-2056.
- [35] 王晓蕾, 石守海, 陈江朝霞. 黄河流域植被覆盖度变化及驱动因素. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5358-5368.
- [36] 闫帅旗, 朱冰冰, 边焜. 不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征. 农业工程学报, 2021, 37(3): 116-123.
- [37] 陈东东, 程路, 栗晓玮, 李金建. 基于地统计学的四川省降雨侵蚀力时空分布特征. 生态学杂志, 2014, 33(1): 206-213.
- [38] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [39] Lian T, Chen D K. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability. *Journal of Climate*, 2012, 25(15): 5361-5373.
- [40] North G R, Bell T L, Cahalan R F, Moeng F J. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [41] Horel J D. A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern Hemisphere 500 mb height field. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(10): 2080-2092.
- [42] Du Y, Wang F, Wang T Y, Liu W W, Liang L L, Zhang Y, Chen Y F, Liu J X, Wu W, Yu K F, Zhang J. Multi-scale ocean dynamical processes in the Indo-Pacific Convergence Zone and their climatic and ecological effects. *Earth Science Reviews*, 2023, 237: 104313.
- [43] Bi S B, Qiu X K, Wang G J, Gong Y C, Wang L Y, Xu M Y. Spatial distribution characteristics of drought disasters in Hunan Province of China from 1644 to 1911 based on EOF and REOF methods. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16): 533.
- [44] 赵嘉阳, 王文辉, 靳全锋, 田超, 杨淑妍, 林玉蕊. 基于 EOF 的福建省降水量时空变化特征分析. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(2): 73-79.
- [45] 苏朔, 宫兆宁, 张文静, 张园, 王一飞. 北运河流域植被覆盖度变化及其生态环境质量评估. 环境科学学报, 2022, 42(1): 19-27.
- [46] 罗鸿, 杨存建. 长江上游近 19 年植被覆盖度动态变化及驱动力分析. 生态科学, 2023, 42(1): 234-241.
- [47] 管晓祥, 刘翠莘, 鲍振鑫, 金君良, 王国庆. 黄河源区植被 NDVI 演变及其与降水、气温的关系. 水土保持研究, 2021, 28(5): 268-277.
- [48] 吴拥政. 重标极差法及其应用. 统计与决策, 2004(8): 23-24.
- [49] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应. 自然资源学报, 2014, 29(3): 398-409.
- [50] 朱大运, 杨倩, 陈海, 陈静, 李少男. 1960-2017 年贵州省不同水系降雨侵蚀力时空变异特征. 水土保持通报, 2021, 41(1): 6-14.
- [51] 钱峰, 董林垚, 黄介生, 刘洪鹄, 韩培, 孙蓓. 基于 Hurst 指数与相关系数的降雨侵蚀力变异识别与分级方法. 农业工程学报, 2018, 34(14): 140-148.
- [52] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 刘海, 肖靖靖, 殷剑敏. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-344, 397.
- [53] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 张铁钢, 徐国策, 高海东. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究. 生态学报, 2016, 36(18): 5691-5700.
- [54] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响. 生态学报, 2021, 41(6): 2248-2260.
- [55] 高宇, 樊军, 彭小平, 王力, 米美霞. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究. 生态学报, 2014, 34(23): 7038-7046.
- [56] 肖继兵, 孙占祥, 刘志, 郑家明, 刘洋, 冯良山, 杨宁, 白伟. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响. 农业工程学报, 2017, 33(22): 159-166.
- [57] 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.
- [58] 杨振, 丁启燕, 周晴雨, 刘会敏. 长江中下游地区人口健康水平空间分异特征与地理影响因子. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 77-84, 72.