

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

罗梦琦¹, 刘霞³, 郭红丽², 蒋丹丹¹, 吴芳², 姚露露²

(1. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029;

2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 3. 南京林业大学 水土保持学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为进一步提高水土流失动态监测精度,基于江苏省水土流失动态监测现设的74个站点和江苏省水文站网399个降雨监测站点的降雨参数计算降雨侵蚀力,采用克里金插值法获取其空间分布特征,并通过分层抽样、误差对比等方法分析不同站点密度对降雨侵蚀力计算结果的影响,进而探讨研究区的最优站点密度。结果表明:①基于现用水土流失动态监测站点数据计算的降雨侵蚀力($R_{动}$)与基于全省总站点数据计算的降雨侵蚀力($R_{真}$)在空间分布上大体一致,总体呈从南到北的递减趋势,主要在极值区域存在较大差异;②随着站点密度增加, $R_{动}$ 与 $R_{真}$ 的结果差异减小,降雨侵蚀力计算精度增加,在站点数从200增加为300时,差异显著减小;③基于优化站点(287个)计算的降雨侵蚀力(R_{287})与基于全省总站点数据计算的降雨侵蚀力($R_{真}$)的空间分布趋势基本一致,差异较小。根据研究区降雨量数理特征,采用样本量公式计算得到最优站点数量为287个。

关键词:降雨侵蚀力; 站点密度; 动态监测; 水土流失; 江苏省

中图分类号:S157 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2024)03-0007-0005

Study on optimization of site density of rainfall erosivity factor for dynamic monitoring of soil erosion in Jiangsu Province

LUO Mengqi¹, LIU Xia³, GUO Hongli², JIANG Dandan¹, WU Fang², YAO Lulu²

(1. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

3. School of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to further improve the dynamic monitoring accuracy of soil erosion, the rainfall erosivity was calculated based on the rainfall parameters of 74 existing sites of dynamic monitoring in Jiangsu Province and 399 monitoring stations in Jiangsu hydrology network, kriging interpolation method was used to obtain its spatial distribution characteristics, the influence of different site densities of rainfall erosivity was analyzed by the methods of stratified sampling and error comparison, then the optimal site density in the study area is discussed. The result shows that: ① Rainfall erosivity calculated based on the data of current soil erosion dynamic monitoring station ($R_{dynamic}$) and rainfall erosivity calculated based on total site data of the whole province (R_{real}), their spatial distributions are generally consistent, there is a decreasing trend from south to north, and there are great differences

收稿日期: 2023-12-14

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022045)

作者简介: 罗梦琦(1996—),女,硕士,研究方向为水土保持监测、信息化监管等。E-mail:975079422@qq.com

mainly in the extreme value region. ②As site density increases, the difference between R_{dynamic} and R_{real} decreases, the computational accuracy of rainfall erosivity increases, and the difference decreases significantly when the number of stations increases from 200 to 300. ③ The spatial distribution trend of rainfall erosivity calculated based on the (287) optimized sites (R_{287}) is basically the same as that of rainfall erosivity calculated based on the total sites of the whole province (R_{real}), with little difference. According to the mathematical characteristics of rainfall in the study area, the optimal number of stations is calculated as 287 by using the sample size formula.

Key words: rainfall erosivity; site density; dynamic monitoring; soil erosion; Jiangsu Province

水土保持是江河保护治理的根本措施,是生态文明建设的必然要求。根据《中国水土保持公报(2021年)》,全国水土流失面积为267.42万 km^2 ,其中水力侵蚀面积为110.58万 km^2 ,土壤侵蚀仍然是当今社会面临的一个严重生态环境问题^[1]。开展年度区域水土流失动态监测,掌握区域水土流失面积、强度及变化趋势,是落实国家生态文明建设决策部署的重要支撑^[2]。现阶段我国开展的水土流失动态监测,采用中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)^[3]。CSLE因子的取值与地区的气候、地形、土壤及土地利用等因素密切相关,模型计算方法及参数取值地区差异性显著,确定适合不同地区的模型参数值对区域水土流失动态监测成果质量具有重要意义。

降雨侵蚀力是CSLE模型中一个重要因子,反映了降雨对土壤侵蚀的能力^[4]。当前关于降雨侵蚀力的研究相对较为成熟,主要集中在降雨侵蚀力的简易算法、空间预测方法及时空分布特征研究。王万中等^[4-5]、吴素业等^[6]、章文波等^[7]利用年、月、日降雨资料建立了降雨侵蚀力简易算法。李璐^[8]、杨韶洋等^[9]分别在江苏省、三峡库区与沂蒙山区探索不同插值方法对降雨侵蚀力的影响。1995年,王万中等^[4]利用全国125个气象站多年平均降雨特征参数,绘制了全国年降雨侵蚀力 R 值分布空间图。2003年,章文波等^[10]利用全国564个气象站逐日降雨量资料,绘制了全国年降雨侵蚀力 R 值等值线图。针对降雨侵蚀力的研究中多关注降雨量资料系列长度、降水量、雨量级、降雨强度等雨量特征因子,但关于雨量样本数量及站点密度选取对降雨侵蚀力的影响研究较少。

本研究以江苏省为例,分析站点密度对降雨侵蚀力计算的影响。以江苏省水文站网中现有的445处降水量监测站点为样本总集,选取了1981—2017年441个站点日降水量资料,基于江苏省水土流失动态监测现用的74个站点和江苏省水文站网399个降雨监测站点的降雨参数计算降雨侵蚀力及

其空间分布特征;采用分层抽样方法对站点空间布局进行优化,分析不同站点密度对降雨侵蚀力计算结果的影响,从而获得江苏省水土流失动态监测降雨侵蚀力计算的最优站点密度,以期为我国优化水土流失动态监测降雨侵蚀力因子提供借鉴,为区域生态环境治理与农业生产提供指导。

1 研究区概况

江苏省介于东经 $116^{\circ}21' \sim 121^{\circ}56'$ 、北纬 $30^{\circ}45' \sim 35^{\circ}08'$ 之间,国土面积10.72万 km^2 (占全国的1.12%)。地处东部沿海地区,长江、淮河下游,东濒黄海,是长江三角洲重要组成部分,属重大国家战略发展区域长江经济带。全省地势平坦,西北高、东南低,平原辽阔、河湖众多、水网密布、海陆相邻。地处亚热带向暖温带过渡区,四季分明,气温起伏大;降水量年际变幅大,年内分布不均,汛期降水量较为集中。全省水土流失类型以水力侵蚀为主,局部区域存在风力侵蚀和重力侵蚀。2021年水土流失面积2199.75 km^2 ,占国土面积2.05%。水力侵蚀分布在丘陵岗地,风力侵蚀分布在黄河故道沿线、沿江和沿海平原沙土区,局部河道存在重力侵蚀。2021年,江苏省常住人口达8477.26万人,地区生产总值达280.65亿元。

2 数据和方法

2.1 资料选取

本研究搜集了1981—2017年江苏省441个站点逐日降水量资料,根据数据系列长度及质量筛选出399个站点降水量作为基础数据。2021年江苏省水土流失动态监测使用的降雨站点数量为74个,基本覆盖全省各级县市区,且空间分布相对均匀。

基于动态监测站点数(74)及研究区总站点数(399)计算降雨侵蚀力(R),采用克里金插值得到降雨侵蚀力空间分布,使用绝对误差(AE)和相对误差绝对值(ARE)两个指标评价分析其差异性,并以研究区总站点数(399)计算的降雨侵蚀力作为真值进

行不同站点密度降雨侵蚀力结果分析。采用分层抽样方法进行站点布局优化,并与基于动态监测站点数及总站点数的降雨侵蚀力结果进行精度对比,通过误差对比分析不同站点密度对降雨侵蚀力结果的影响,获取研究区最优站点密度。

2.2 降雨侵蚀力计算

冷暖季日雨量模型:该模型基于全国16个气象站逐分钟和逐日雨量建立,并针对暖季和冷季的雨型差异采用不同系数。

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (1)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (2)$$

式中: \bar{R} 为多年平均年降雨侵蚀力, $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,将一年划分为24个半月; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力; N 为时间序列长度; m 为第 i 年第 k 个半月内侵蚀性降雨日的数量(侵蚀性降雨日指日雨量大于等于10 mm的日子); $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性降水量,mm;如果某年某个半月内没有侵蚀性降水量,即 $j=0$,则令 $P_{i,0,k}=0$; α 为系数,在暖季(5—9月)取0.3937,在冷季(10—12月、1—4月)取0.3101。

2.3 空间分层抽样

根据分层抽样的样本量公式确定适合研究区降水量特征的样本容量,根据降水量空间分布特征进行分层,基于最优分配原则获得各层样本量;获得研究区优化站点数量。计算公式为

$$n = \frac{\sum W_i S_i^2}{S_{\text{ys}}^2 + \frac{1}{N} \sum W_i S_i^2} \quad (3)$$

$$n_i = n \frac{\sum W_i S_i^2}{W_i S_i^2} \quad (4)$$

$$W_i = n_i / n \quad (5)$$

式中: n 为总样本容量; n_i 为各层样本量; W_i 为权重; S_i 为各层标准差。

3 降雨侵蚀力站点密度优化研究

3.1 降雨侵蚀力差异性分析

基于动态监测站点数与全省总站点数计算降雨侵蚀力(R)并插值获得其空间分布。

基于动态监测站点数计算的 R 因子(以下简称 $R_{\text{动}}$)为3 319.90~6 116.17 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均值为4 796.35 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;总体呈由南向北、由东向西递减的趋势,在西南部区域(南京市、常州市、无锡市)存在高值中心;在中部(淮安市、泰州市)、

东南部(苏州市)存在低值中心。基于全省总站点数计算的 R 因子(以下简称 $R_{\text{真}}$)为3 034.50~6 199.72 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均值为4 700.40 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;总体呈南多北少的递减趋势,在东部沿海(盐城市)、南部(无锡市)区域存在高值中心。

$R_{\text{动}}$ 与 $R_{\text{真}}$ 在空间分布上大体一致,均呈现由南向北递减的趋势;在局部地区如研究区东北部、西南部存在一定的差异。 $R_{\text{动}}$ 站点分布较为分散,条带状分割趋势更为显著,空间变异性较小; $R_{\text{真}}$ 在研究区东北部及西南部区域站点较为密集,各站点间 R 值存在一定差异,导致 $R_{\text{真}}$ 具有较高的空间变异性。因此在 R 值较高的南部与东北部区域,不同站点密度间结果差异较为显著。

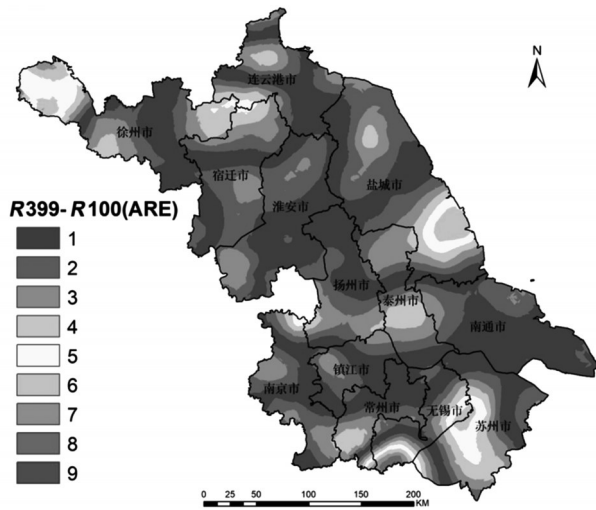
对 $R_{\text{动}}$ 与 $R_{\text{真}}$ 进行差异性对比分析,使用绝对误差(AE)和相对误差绝对值(ARE)指标进行评价,用ARE表示不同站点密度下 R 值变化幅度。 $R_{\text{动}}$ 与 $R_{\text{真}}$ 主要以负向差异为主,AE最小为-825.48,负向差异较大的区域主要位于研究区南部(南京市、常州市、无锡市)与东北部(连云港市),这几个区域均为 R 因子较高的区域, $R_{\text{动}}$ 值显著高于 $R_{\text{真}}$,且差异较大,变幅基本在12%以上。正向差异主要集中于研究区中部(淮安市、泰州市)与东南部(盐城市、无锡市、南通市、苏州市),AE最大为456.30,这几个区域均为 R 因子较低的区域;正向差异相对较小,变幅基本在0~8%。 $R_{\text{动}}$ 与 $R_{\text{真}}$ 的ARE平均值为3.58%,主要在极值区域存在较大差异。

站点数量为74时,在降雨侵蚀力较高的区域存在 R 值高估现象,在降雨侵蚀力较低的区域存在 R 值低估现象。整体来看,在站点密度较低时,降雨侵蚀力普遍较高,极值中心处 R 值差异显著。

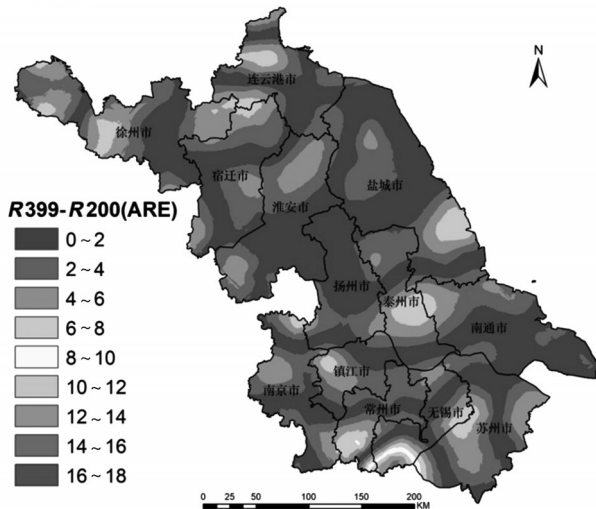
3.2 不同站点密度对降雨侵蚀力影响

动态监测站点数量较少,其降雨侵蚀力精度相对较低;研究区总站点数为399个,站点数量较多,在保证结果精度的前提下,为减少工作量、提高工作效率,对站点进行空间布局优化。在动态监测站点数(74个)与总站点数之间,分别选取100、200、300作为样本容量,对研究区采用分层经验抽样进行样本的选取;根据不同样本容量站点计算降雨侵蚀力及空间分布,并计算各密度下 R 值与 $R_{\text{真}}$ 差异(见图1)。 R_{100} 、 R_{200} 、 R_{300} 与 $R_{\text{真}}$ 变幅均值分别为2.15%、2.12%、0.66%,随着站点密度增加,差异减小,降雨侵蚀力精度增加;在站点从200增加为300时,差异较为显著,初步确定站点最优密度在300左右。

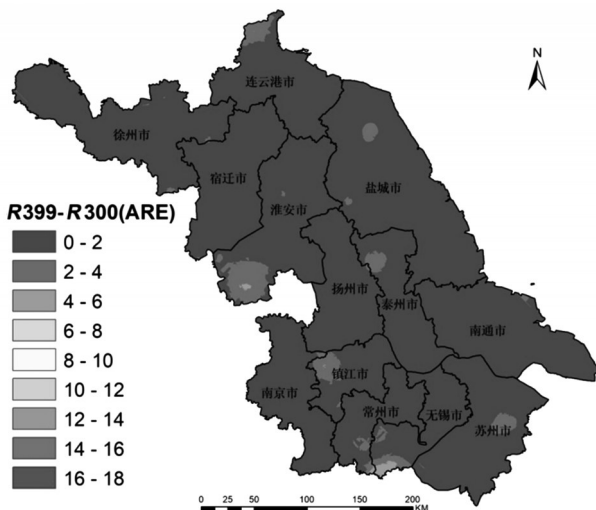
3.3 最优站点密度研究



(a) 样本容量100



(b) 样本容量200



(c) 样本容量300

图1 不同站点密度下R值变幅

根据研究区降水量数理特征,采用分层抽样样本量公式计算获取最适宜样本总量(287),以 R 值相近与空间分布均匀为原则分层抽取,对抽取后站点进行降雨侵蚀力计算及空间插值获得其 R 因子空间分布(见图2),并进行精度对比分析。

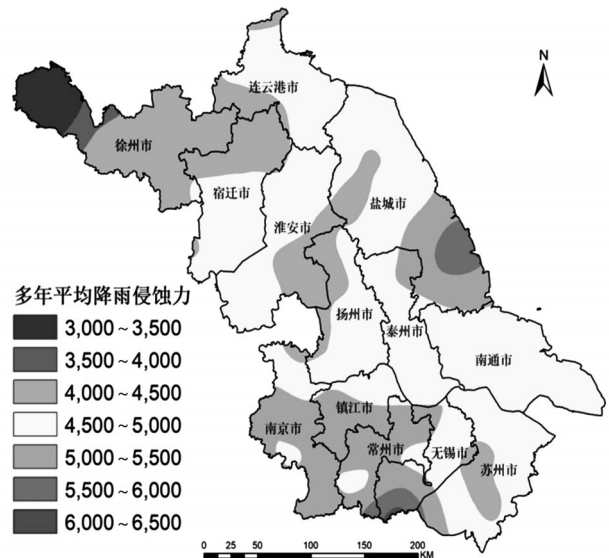
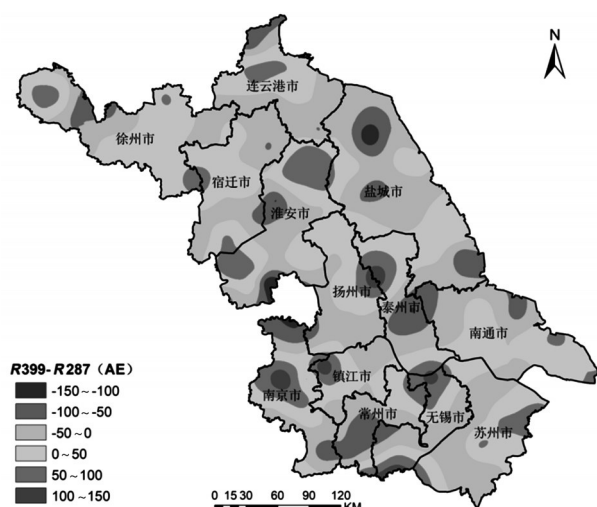
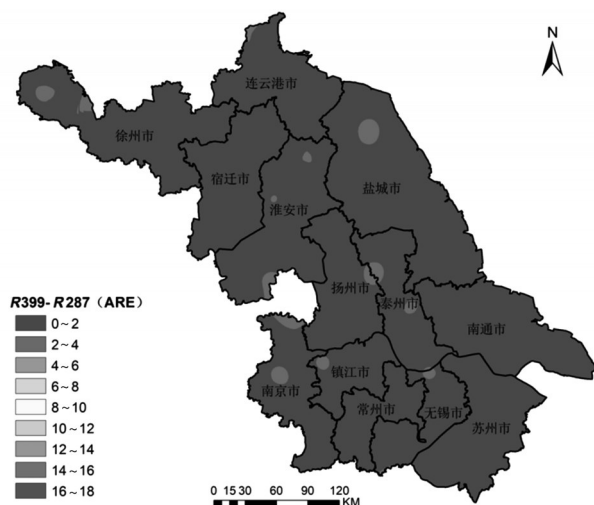


图2 优化后 R 因子空间分布(R_{287})

基于优化后站点数(287个)的 R 因子(以下简称 R_{287})为3 027.90~6 067.44 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均值为4 698.79 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;总体呈南多北少的递减趋势,在东部沿海区域(盐城市)、南部(无锡市)存在高值中心。 R_{287} 与 $R_{\text{真}}$ 的空间分布趋势基本一致,分布区间与平均值近似,差异较小。

对 $R_{\text{真}}$ 、 R_{287} 进行差异性分析(见图3),AE范围为-142.7~144.05,ARE范围为0%~3.22%。 $R_{\text{动}}$ 与 $R_{\text{真}}$ 的变幅均值为3.58%,37.61%区域差异小于2%; R_{287} 与 $R_{\text{真}}$ 变幅均值为0.65%,97.64%的区域差异变幅小于2%; R_{287} 与 $R_{\text{真}}$ AE区间显著减小,ARE均值小于1%,整体差异减小,降雨侵蚀力结果精度增加。对 R_{287} 、 R_{300} 与 $R_{\text{真}}$ 进行差异分析,变幅>2%的面积占比分别为2.36%、5.65%;与 R_{300} 相比, R_{287} 减少了站点数量,进一步缩小了与 $R_{\text{真}}$ 的差距,提高了工作效率与抽样精度,结果精度增加,是研究区最优站点密度。

根据研究区降水量数理特征采用空间分层抽样方法获取最优站点密度,在提升工作效率的同时提高了降雨侵蚀力结果精度,可为研究区降雨侵蚀力的获取及水土流失动态监测工作精度提高提供便利。

(a) $R_{399}-R_{287}$ 绝对误差 (AE)(b) $R_{399}-R_{287}$ 相对误差绝对值 (ARE)图3 $R_{真}-R_{287}$ 误差空间分布

4 结 论

(1) 基于现有动态监测站点数(74)计算的降雨侵蚀力($R_{动}$)平均值为 $4\,796.35\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; 基于全省水文站网的总站点数(399)计算的降雨侵蚀力($R_{真}$)平均值为 $4\,700.40\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; $R_{动}$ 与 $R_{真}$ 在空间分布上大体一致, 总体呈从南到北递减的趋势, 主要在极值区域存在较大差异。

(2) 不同站点密度降雨侵蚀力存在差异, 随着站点密度增加, 与基于总站点数(399)的降雨侵蚀力结果差异减小, 降雨侵蚀力精度增加; 在站点数

从200增加为300时, 差异显著减小, 初步确定最优站点密度在300左右。

(3) 基于最优站点密度(287)计算的降雨侵蚀力(R_{287})平均值为 $4\,698.79\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; 与 $R_{真}$ 的空间分布趋势基本一致。 R_{287} 与 $R_{真}$ 差异小于 $R_{动}$ 与 R_{300} 。

不同站点密度对降雨侵蚀力具有一定的影响, 本文基于江苏省水文站网中1981—2017年降水量的数理特征确定了降雨侵蚀力的最优站点密度, 其空间布局优化仍需要进一步的探索。同一站点密度下, 不同站点空间布局对降雨侵蚀力结果的影响仍需进一步确定。本文采用的是基于降水量的分层抽样方法, 后续可考虑将降雨侵蚀力特征(高、中、低)与影响因素(侵蚀力雨量、坡度、高程等)融入抽样方法的选取中去, 对降雨侵蚀力站点空间布局进行进一步优化探索。

参考文献:

- [1] 邓攀攀, 秦蓓蓓, 都利亚. 广东省1960—2018年间降雨侵蚀力时空变化特征分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(12): 61-66.
- [2] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线9省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 121-129.
- [3] 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.
- [4] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(I)[J]. 水土保持学报, 1995(4): 5-18.
- [5] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[J]. Agricultural Handbook, 1997.
- [6] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力指标的研究[J]. 中国水土保持, 1992(2): 36-37.
- [7] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003(1): 35-41.
- [8] 李璐. 江苏省降雨侵蚀力研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [9] 杨韶洋, 刘霞, 姚孝友, 等. 沂蒙山区降雨侵蚀力空间分布推算方法[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 1-10.
- [10] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003(1): 33-40.