

基于遥感的水土流失长时序监测分析

雷少华,徐 春,韩丹妮,金 秋,耿 韧*

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:基于遥感卫星降雨数据和降雨侵蚀力本地优化方法,结合土地利用、土壤、地形等数据,利用中国土壤流失方程,对南京市2001—2020年土壤侵蚀情况进行遥感监测。归因分析表明,土地利用、植被覆盖度、降雨等均对南京市水土流失面积年际变化产生影响,其中降雨是首要驱动因素。研究成果为其他缺资料地区开展基于卫星降雨数据的降雨侵蚀力本地优化提供借鉴,为水土流失长时序监测评价提供了数据和技术支持。

关键词:土壤侵蚀;降雨侵蚀力;遥感;长时序;南京市

中图分类号:TP 79

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)01-0028-0004

Analysis on long time sequence monitoring of soil erosion based on remote sensing

LEI Shaohua, XU Chun, HAN Danni, JIN Qiu, GENG Ren*

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on remote sensing satellite rainfall data and local optimization method of rainfall erosivity, combined with land use, soil, terrain and other data, the soil erosion in Nanjing from 2001 to 2020 was monitored by remote sensing using China's soil loss equation. Attribution analysis shows that land use, vegetation coverage and rainfall all have an impact on the annual change of soil erosion area in Nanjing, of which rainfall is the primary driving factor. The research results provide reference for other regions lacking data to carry out local optimization of rainfall erosivity based on satellite rainfall data, and provide data and technical support for long-term sequence monitoring and evaluation of water and soil erosion.

Key words: soil erosion; rainfall erosivity; remote sensing; long time sequence; Nanjing City

土壤侵蚀是我国生态安全面临的主要问题之一,可导致水系泥沙淤积、水利系统运行效率降低甚至瘫痪,因此开展土壤侵蚀长时序连续监测研究十分必要。

与传统方法相比,遥感技术凭借快速、实时、低

成本、大面积监测等优点,已成为土壤侵蚀监测的重要方式^[1-2]。梁文广等^[3]和马力等^[4]利用2000、2008、2014年遥感数据提取的植被与作物覆盖因子对南京市进行了水土流失监测,认为轻度及以上水土流失区域是水土流失治理的重点;邵方泽等^[5]基

收稿日期:2022-11-07

基金项目:南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y922001, Y921008, Y921005);
南京水务科技项目(202103)

作者简介:雷少华(1991—),男,工程师,博士,主要从事环境遥感、水土保持遥感研究。E-mail: shaohualei@nhri.cn

通信作者:耿韧(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事水土保持研究。E-mail: rgeng@nhri.cn

于遥感技术,利用改进的土壤流失方程(RUSLE),认为南京市2006、2010、2014年水土流失主要发生在城市及山丘边缘植被覆盖度较低的区域;郭赓等^[6]研究了南京市土地利用变化对土壤侵蚀的响应,发现87%以上的土壤侵蚀量动态变化集中在林地与耕地;杨德菲等^[7]基于Landsat遥感卫星影像提取了南京市植被信息,认为2017年植被覆盖面积比2009年降低了8.6%;林杰等^[8]通过耦合叶面积指数、植被覆盖管理措施因子与¹³⁷Cs同位素示踪技术,表明抵抗土壤侵蚀能力较弱区域面积持续升高,从1988年到2013年,升高面积占南京市总面积的3.88%~5.02%。

然而由于基础资料的缺乏,现有研究多基于某一特定时期遥感数据,将植被覆盖或降雨侵蚀力等因子在多年时间跨度内预设为某一固定值,缺少对区域土壤侵蚀发生、发展等中间过程的逐年监测。同时,高歌等^[9]和余寒等^[10]分析了过去50余年逐日降雨资料,认为每年侵蚀性的降水量、侵蚀性降雨日数动态变化大,年际差异大,导致利用多年平均降雨侵蚀力结果计算逐年土壤侵蚀强度的不确定性增大。

因此,本研究以南京市为例,通过对长时间序列遥感数据中土地利用、植被覆盖度等信息的挖掘,构建基于遥感卫星降雨数据的降雨侵蚀力本地化方法,进而揭示区域土壤侵蚀时空变化特征,为水土保持精细化监测提供技术支撑和数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏省南京市下辖鼓楼区、玄武区、建邺区、秦淮区、栖霞区、雨花台区、浦口区、六合区、江宁区、溧水区、高淳区11个区。地貌以低山、丘陵、岗地和平原洲地为主,四季分明,夏季雨热同期,冬季低温少雨,2001—2020年平均降水量约为1 090 mm,平均气温15.5℃。辖内以黄棕壤为主,广泛分布于南北低山丘陵和岗地,耕作土壤主要为水稻土。自然植被包括针叶林、落叶阔叶林、落叶与常绿阔叶混交林、竹林等。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤侵蚀计算

中国土壤流失方程综合考虑了多因子的影响,原理如下:

$$A=R \cdot K \cdot L_s \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀

力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L_s 、 B 、 E 、 T 分别为坡长坡度因子、生物措施因子、工程措施因子、耕作措施因子,无量纲。

1.2.2 统计与分析方法

根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),南京市土壤微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀分级的土壤侵蚀模数(单位: $t/(hm^2 \cdot a)$)判定范围分别为<500,500~2500,2 500~5 000,5 000~8 000,8 000~15 000,>15 000。

选取应用广泛的决定系数(R^2)进行年际趋势与拟合鲁棒性分析, R^2 越大表示年际趋势越明显或拟合鲁棒性越好。选取平均绝对百分比误差(MAPE)评价模型的精确度,MAPE越小表明模型精度越高。

1.2.3 逐年降雨侵蚀力计算

降雨侵蚀力计算如下:

$$R_{\alpha} = \sum_{i=1}^{24} \overline{R_{\text{半月}i}} \quad (2)$$

$$\overline{R_{\text{半月}i}} = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^m (\alpha \cdot P_{y,i}^{1.7265}) \quad (3)$$

$$\overline{WR_{\text{半月}i}} = \frac{\overline{R_{\text{半月}i}}}{R_{\alpha}} \quad (4)$$

$$R_{\alpha} = 0.0011 \cdot P_{\alpha}^{2.1949} \quad (5)$$

式中: $\overline{R_{\text{半月}i}}$ 为第*i*个半月的降雨侵蚀力,*i*取1~24; P_y 为该年第*y*个侵蚀性日雨量,mm; α 为回归系数,冷季(10—12月,1—4月), $\alpha=0.3101$,暖季(5—9月), $\alpha=0.3937$; y 为0~*m*,指该年第*i*个半月内降水量大于等于10 mm的侵蚀性降雨总日数。*m*为半月内侵蚀性降雨日数^[11]。根据南京站逐日降雨资料和以上公式,计算可得南京市2001—2020年逐年降雨侵蚀力 R_{α} 。将南京市2001—2020年逐年降水量 P_{α} 与 R_{α} 进行多种拟合,发现幂函数拟合效果最优,精度满足监测需求。

2001—2020年逐月1 km分辨率降雨量栅格数据根据英国East Anglia大学气候研究所与WorldClim发布的全球气候数据集,通过Delta空间降尺度生成,使用496个独立气象观测点数据验证后结果可信。该栅格数据按照年度累加后得到年降水量栅格,根据公式(5),重采样后生成30 m空间分辨率的逐年降雨侵蚀力数据。

1.2.4 逐年生物措施与植被覆盖度计算

利用30 m分辨率Landsat遥感数据区分了耕地、林地、草地、水、裸地 and 建设用地6种土地利用类

型,验证总精度约80%。耕地、水域、裸地、建设用地 B 分别赋值为1、0、1、0.01。林地和草地 B 值与低山丘陵岗地($L_s > 2$)植被覆盖度根据《2021年度水土流失动态监测技术指南》方法计算得到。

1.2.5 其他因子计算

南京市30 m分辨率DEM数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,镶嵌、填洼后,利用GIS水文分析工具提取 L_s 因子。土壤可蚀性因子选用全国第一次水利普查水土保持情况普查成果。南京市溧水区和高淳区同属沿江平原丘陵水田旱三熟二熟区,其耕地 T 赋值0.338;其他地区同属江淮平原麦稻两熟兼旱三熟区,其耕地 T 赋值0.392。南京市水土保持工程措施主要有造林和梯田2种。其中梯田面积一共8.48 km²,占南京市总面积的比例不足0.13%,且布局分散,难以在

30 m分辨率尺度下解译, E 统一按1赋值处理。

2 结果分析

2.1 南京市土壤侵蚀面积时空变化特征

根据2018年江苏省水土保持公报,南京市轻度及以上水土流失面积为386.13 km²,本研究计算同年水土流失面积343.57 km²,MAPE为11.02%,检验精度较高,表明该算法可用于2001—2020年南京市长时间序列的土壤侵蚀强度监测分析。

2001—2020年,南京市微度侵蚀面积5 564.85 km²,占全市总面积的84.50%(图1)。轻度及以上水土流失面积350.08 km²,占全市总面积的5.31%。其中轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积为242.44 km²、53.40 km²、24.76 km²、19.90 km²和9.58 km²,分别占水土流失面积的69.25%、15.25%、7.07%、5.68%和

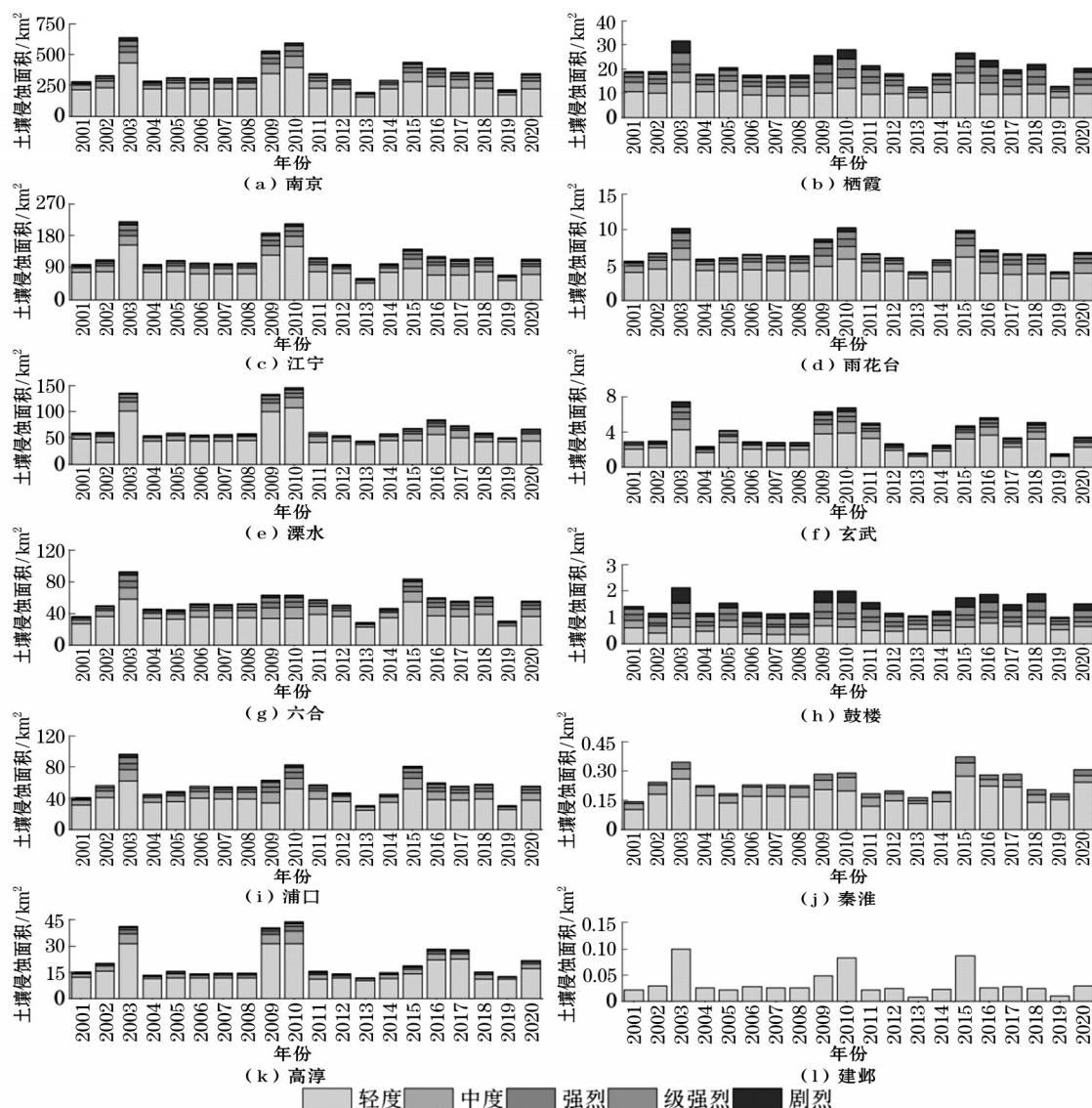


图1 南京及各辖区2001—2020年土壤侵蚀动态监测柱状图

2.74%。

在年际变化上,南京市轻度及以上水土流失面积波动较大。其中2003年、2009—2010年、2015年水土流失面积相对较大,2003年为研究期内最大。2001年、2004年、2013年及2019年水土流失面积相对较小,2013年为研究期内最小。

在空间分布上,下辖各区水土流失面积从大到小依次为江宁区、溧水区、浦口区、六合区、高淳区、栖霞区、雨花台区、玄武区、鼓楼区、秦淮区、建邺区。从水土流失面积占各区面积比例看,从大到小依次为江宁区、溧水区、浦口区、栖霞区、玄武区、雨花台区、六合区、鼓楼区、高淳区、秦淮区、建邺区。秦淮区和建邺区水土流失面积均低于 0.3 km^2 ,小于区总面积的1%,且2001—2020年间建邺区水土流失全部为轻度侵蚀;江宁区、溧水区、浦口区水土流失面积较大,约占区面积的6.2%~7.6%。其中,2013年各级水土流失面积较小,但该年溧水区水土流失面

积最大。在总体水土流失面积较大年份(2003年、2009—2010年、2015年),江宁区水土流失占该区面积比例分别为6.27%、13.63%、13.99%,面积也同期较其他区最大。

整体而言,南京市2011—2020年水土流失面积平均为 311.74 km^2 ,较2001—2010年均值下降了超过20%,区域生态环境明显改善。

2.2 南京市土壤侵蚀变化归因分析

如图2(a)和(b)所示,南京市2001—2020年降水量介于 $800 \sim 1\,400 \text{ mm}$,平均为 $1\,090 \text{ mm}$,降雨侵蚀力介于 $3\,100 \sim 8\,100 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均为 $5\,150 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。2003年、2010年、2015—2016年降水量及降雨侵蚀力相对较大,2015—2016年降雨强度大、暴雨量最多,因此降雨侵蚀力也最大;2001年、2004年、2012年及2019年降水量及降雨侵蚀力因子相对较小。

2001—2020年逐年降水量随着年份有先增加

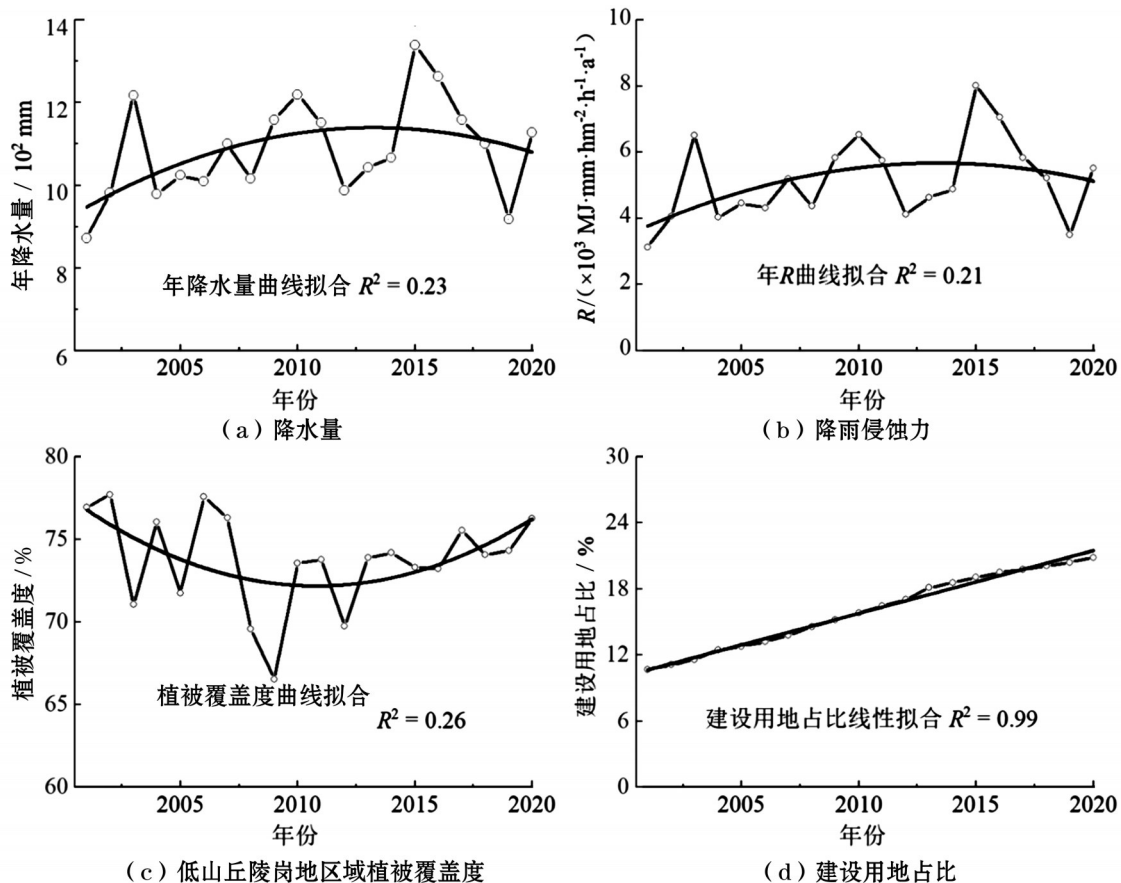


图2 南京市2001—2020年降水量、降雨侵蚀力、低山丘陵岗地区域植被覆盖度变化趋势和建设用地占比

后减小的趋势。年均降水量为 $1\,115 \text{ mm}$,较2001—2010年增加了5.5%,但同期降雨侵蚀力均值由 $4\,849 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 增加到 $5\,455 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot$

$\text{h} \cdot \text{a})$,增加了12.5%。

图2(c)显示南京市 $L_s > 2$ 的低山丘陵岗地区域

(下转第35页)

省去了内业中数据计算判断和录入步骤,同时根据需求可随时通过网络查阅巡测数据或将数据发送到相关部门,为决策部门实时提供实测流量数据,提高决策的时效性。下一步,需制定采集设备输入输出格式的国家标准,让这类设备可以真正融入到水文测流行业中来。

参考文献:

- [1] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 45-49.

- [2] 韩晓彤. 走航式 ADCP 的初步探讨和实际应用[J]. 河北水利, 2018(9): 46-47.
- [3] 吴志勇, 徐梁, 唐运忆, 等. 水文站流量在线监测方法研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 1-7.
- [4] 阮聪, 胡春杰, 杨洋, 等. 基于云平台的德宏州中小河流雨情监测系统设计与实践[J]. 电子设计工程, 2020, 28(15): 70-73, 78.
- [5] 章树安, 张留柱, 梁家志. 美国水文要素采集与传输技术简介及几点认识[J]. 水文, 2000, 20(1): 62-63, 61.
- [6] 高超, 邓瑶, 张小潭, 等. 多普勒流速仪测量数据挖掘与二次开发研究[J]. 水力发电, 2019, 45(7): 108-110.

(上接第 31 页)

植被覆盖度介于 66.55%~77.72%, 平均为 73.77%, 逐年植被覆盖度有随年份先下降后升高的趋势($R^2=0.26$)。同时, 根据图 2(d) 土地利用类型提取结果, 2001—2020 年南京市建设用地面积占比从 10.68% 上升到了 20.85%, 面积增长约 95%, 表示南京市内开发建设活动不断加剧。随着生态为基发展方针的确立, 南京市开展了矿山生态修复、环境整治等工程, 增大了绿化面积, 提高了区域植被覆盖度, 水土保持工作取得一定成效。因此, 2008—2020 年, 低山丘陵岗地区域植被覆盖度随年份有增大趋势($R^2=0.54$)。

2001—2020 年, 南京市水土流失面积与降水量及降雨侵蚀力大小关系较为密切($R^2=0.49$), 与逐年植被覆盖度有一定的负相关关系($R^2=0.16$), 相较而言, 降雨侵蚀力是驱动年际水土流失面积变化的主要因素。

3 结 论

基于卫星遥感降雨数据的年降雨侵蚀力计算方法精度较高, 可为无雨量站降雨资料区提供土壤侵蚀强度监测思路和方法。

2001—2020 年, 南京市轻度及以上水土流失面积平均值为 350.08 km², 但时空差异大, 布局分散。近 10 年南京市水土保持工作取得一定成效, 水土流失面积下降超过了 20%, 区域生态环境明显改善。南京市水土流失防治面临自然和人为双重压力, 但降雨侵蚀力是驱动年际水土流失面积变化的关键因素。随着南京市城市化进程不断加剧, 要更加注意防范人为水土流失。

参考文献:

- [1] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 73-79.
- [2] 陈羽璇, 杨勤科, 刘宝元, 等. 基于 CSLE 模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(6): 86-93.
- [3] 梁文广, 钱钧, 高士佩, 等. 基于“3S”技术的南京市水土流失定量监测及分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 51-56.
- [4] 马力, 卜兆宏, 梁文广, 等. 基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 602-614.
- [5] 邵方泽, 张慧, 缪旭波. 基于 RUSLE 模型的南京市 2006—2014 年水土侵蚀时空分布特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 264-269.
- [6] 郭赓, 丁鸣鸣, 钱洲, 等. 1986—2013 年南京市土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 108-116.
- [7] 杨德菲, 潘洁, 杨存建, 等. 基于 Landsat 遥感卫星影像的南京市植被动态变化研究[J]. 生态科学, 2021, 40(4): 177-183.
- [8] 林杰, 董波, 潘颖, 等. 南京市植被覆盖管理措施因子的时空格局动态变化[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 617-626.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.