

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.033

冯笛珂, 符素华, 丁建新, 等. 北京市近 40 年来降雨侵蚀力时空变异特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 132-142.

FENG Dike, FU Suhua, DING Jianxin, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Beijing in recent 40 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 132-142.

北京市近 40 年来降雨侵蚀力时空变异特征

冯笛珂¹, 符素华¹, 丁建新², 颜婷燕³, 徐发军³, 腾润平³, 张大勇³

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 北京市水生态保护与水土保持中心, 北京 101117)

摘要: [目的] 降雨侵蚀力可以反映降雨对土壤侵蚀的潜在作用, 是评价区域土壤侵蚀风险的重要指标。分析北京市 1981—2020 年降雨侵蚀力时空变异特征, 对科学评估和防治区域水土流失风险具有重要意义。[方法] 基于 1981—2020 年北京市及周边地区 119 个雨量站点逐日降水数据, 采用 Kriging 插值、Mann-Kendall 非参数检验、小波分析等方法对北京市年降雨侵蚀力和中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)、暴雨(≥ 50 mm)降雨侵蚀力的空间分布、趋势变化以及周期变化特征进行分析。[结果] 北京市 1991—2020 年年降雨侵蚀力范围为 1 691.51~3 914.89 (MJ·mm)/(hm²·h·a), 年降雨侵蚀力与大雨和暴雨的降雨侵蚀力的空间分布特征相似, 与中雨的降雨侵蚀力的空间分布特征有所差异。空间整体上表现为从东北向周围递减的趋势。近 40 年来, 北京中雨侵蚀力呈显著增加趋势, 年降雨侵蚀力、大雨、暴雨以及夏季 7、8 月的降雨侵蚀力变化趋势均不显著, 且均没有发生显著的突变。局部区域如密云、平谷一带的年降雨侵蚀力下降趋势相对较大。年降雨侵蚀力以及中、大、暴雨的降雨侵蚀力变化的主周期约为 25 年, 且存在 2~3 次“低—高”交替变化。[结论] 研究结果可为北京开展水土保持工作、农业和生态保护等工作提供科学依据。

关键词: 降雨侵蚀力; Mann-Kendall 检验; 小波分析; 时空分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2024)04-0132-11

Temporal and Spatial Variations of Rainfall Erosivity in Beijing in Recent 40 Years

FENG Dike¹, FU Suhua¹, DING Jianxin², YAN Tingyan³,

XU Fajun³, TENG Runping³, ZHANG Dayong³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Beijing Water Ecological Protection and Soil and Water Conservation Center, Beijing 101117, China)

Abstract: [Objective] Rainfall erosivity serves as an indicator to assess the potential impact of rainfall on soil erosion, playing a crucial role in evaluating regional soil erosion risk. Therefore, analyzing the temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Beijing from 1981 to 2020 holds significant importance for scientifically assessing and preventing regional soil erosion risks. [Methods] This study employed Kriging interpolation, Mann-Kendall non-parametric test, and wavelet analysis based on daily precipitation data collected from 119 rainfall stations in Beijing and its surrounding areas between 1981 and 2020. These methods were utilized to analyze the spatial distribution, trend changes, and periodic fluctuations of annual rainfall erosivity as well as erosivity associated with moderate rain (10~25 mm), heavy rain (25~50 mm), and extreme rain (≥ 50 mm) in Beijing. [Results] The annual rainfall erosivity in Beijing ranged from 1 691.51 to 3 914.89 (MJ·mm)/(hm²·h·a) during the period from 1991 to 2020. The spatial distribution characteristics of annual rainfall erosivity exhibited similarities with heavy rain and rainstorm but differed

收稿日期: 2024-03-13

修回日期: 2024-04-15

录用日期: 2024-04-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-13

资助项目: 北京市水土流失监测专项(2023SJCZJCZX36); 国家自然科学基金项目(42130701)

第一作者: 冯笛珂(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fdk0604@163.com

通信作者: 符素华(1973—), 女, 教授, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

from moderate rain patterns. Overall, there was a decreasing trend observed from northeast regions towards the surrounding areas. Over the past four decades, moderate rainfall erosivity demonstrated a significant increasing trend in Beijing; however, no significant mutations or trends were observed for annual rainfall erosivity, heavy rain events, rainstorms or July-August summer precipitation erosivity. Notably large decreasing trends were identified for annual rainfall erosivity within local areas such as Miyun and Pinggu districts. The main cycle for both annual rainfall erosivity and medium-to-heavy intensity precipitation lasted approximately twenty-five years with two to three alternating “low-high” changes. [Conclusion] The study can offer a scientific foundation for soil and water conservation, agricultural practices, and ecological preservation in Beijing.

Keywords: rainfall erosivity; Mann-Kendall test; wavelet analysis; temporal and spatial distribution

Received: 2024-03-13

Revised: 2024-04-15

Accepted: 2024-04-25

Online(www.cnki.net): 2024-06-13

土壤侵蚀会导致土地生产力下降,泥沙淤积,引起洪涝灾害和生态环境恶化等问题,对农业生产和人类的生存发展都造成了严重影响,已成为土壤环境质量研究的热点问题之一^[1-3]。降雨是土壤侵蚀的主要驱动因子之一,降雨侵蚀力是表征降雨引起土壤侵蚀能力的重要指标,对定量预报土壤侵蚀和揭示气候变化对土壤侵蚀的影响具有重要意义^[4-5]。过去几十年来,全球气候变化导致的极端降水事件增多,旱涝灾害频发,严重威胁粮食安全和人民生命财产安全,降雨的变化进而导致降雨侵蚀力发生变化,因此,研究降雨侵蚀力的时空分布特征对于精准预报土壤侵蚀以及小流域综合治理具有重要的指导意义。

近年来,关于降雨侵蚀力的研究大多聚焦于计算模型以及时空变化上。降雨侵蚀力的计算模型主要可以分为两类,一类是利用次降雨动能和强度计算得到,1959年,WISCHMEIER等^[6]最先提出降雨侵蚀力计算模型,将次降雨总能量(E)与该次降雨最大30 min雨强(I_{30})的乘积 EI_{30} 作为降雨侵蚀力指标。此方法虽然能够进行精确计算,但计算过程较为复杂且降雨资料不易收集,在实际应用中较为困难。另一类是根据不同研究区的降雨侵蚀特点,利用基本降雨资料建立的基于日降雨量、月降雨量、年降雨量的简易计算模型。如章文波等^[7]利用全国71个代表性气象站资料,建立了利用日雨量估算降雨侵蚀力的简易算法模型,在全国尺度范围有一定的精度。LEE等^[8]以韩国为研究区,提出了一个基于年降雨量的简易侵蚀模型。XIE等^[9]利用16个站点记录的日降雨量数据,建立了适用于中国东部水蚀区的降雨侵蚀预报模型。徐丽等^[10]建立了用日、月或年雨量估算多年平均降雨侵蚀力和用日雨量估算年降雨侵蚀力的模型,该模型可为北京地区土壤侵蚀量估算等服务。这些简易模型计算精度高且容易获得降雨资料,可为不同区域土壤侵蚀研究提供理论依据。在降雨

侵蚀力的时空变化方面,由于降雨侵蚀力受降雨量、降雨强度、地形、气候等多种因素的影响,不同区域的降雨侵蚀力时空分布特征表现出差异。相关研究^[11]表明,在过去50年,黄土高原降雨侵蚀力空间分布呈现出由东南向西北递减的格局。西南土石山区的年降雨侵蚀力在过去50多年呈上升趋势,空间分布上总体表现为东高西低的格局^[12]。珠江流域降雨侵蚀力从东到西逐渐递减,大部分地区年降雨侵蚀力呈上升趋势,个别站点上升显著^[13]。上述研究成果可为区域生态治理和水土保持提供重要参考。但是,现有的研究多倾向于分析多年平均年降雨侵蚀力的年际和季节变化,而对于不同量级降雨的降雨侵蚀力变化特征以及年内变化如汛期降雨侵蚀力的变化特征研究较少。每年的土壤侵蚀主要出现在大的降雨事件上,因此分析不同量级降雨的降雨侵蚀力变化特征对区域土壤侵蚀防治具有重要意义。

北京市作为我国的首都,属于水力侵蚀为主的北方土石山区,降水分配不均,极端降水事件频繁发生。2023年7月29日,受台风“杜苏芮”影响,北京遭遇了特大暴雨灾害,特别是门头沟区和房山区等山前平原地区遭遇了山洪内涝叠加灾害,人员伤亡和财产损失极其严重^[14]。为了更好地了解气候变化对大城市造成的影响,开展不同区域、不同降雨条件下降雨侵蚀力的时空分布的研究具有重要意义。目前针对北京市降雨侵蚀力的研究集中在计算方法以及土壤侵蚀监测方面。如符素华等^[15]发现,CREAMS模型中的次降雨侵蚀力公式计算结果在北京山区不同地区有较好的稳定性;叶芝茵等^[16]研究了北京市降雨侵蚀力及其空间分布,但该研究仅基于20个站点1980年以前的日雨量资料计算多年平均降雨侵蚀力,降雨侵蚀力等值线图是利用113个站点的月雨量资料绘制得到,研究所用站点数量少且时间较为久远。目前关于北京长时间序列降雨侵蚀力的研究仍然较少,缺

乏最新的研究。因此,本研究基于 1981—2020 年北京市 119 个雨量站的日雨量数据计算得到降雨侵蚀力,采用 Kriging 插值, Mann—Kendall 非参数检验、小波分析等方法,分析了北京市近 40 年来的降雨侵蚀力时空变异特征,以期为北京市水土保持和生态保护等工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京地处华北平原西北部(图 1),西部山地属太行山脉,北部山地属燕山山脉,东南部为冲积平原,中心位于 $116^{\circ}25'29''\text{E}$, $39^{\circ}54'20''\text{N}$ 。全市总面积 $16\,400\text{ km}^2$,其中山区面积约占 62%。北京的土壤类型共划分为 7 个土类,18 个亚类,62 个土属,以褐土为主,占北京土壤总面积的 65% 左右。境内流经的主要河流有永定河、潮白河、北运河、拒马河等。气候属于典型的暖温带半湿润半干旱季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年平均气温约为 $10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量约为 600 mm ^[17]。降水季节分配很不均匀,全年降水 75% 集中在夏季,7,8 月常有暴雨。

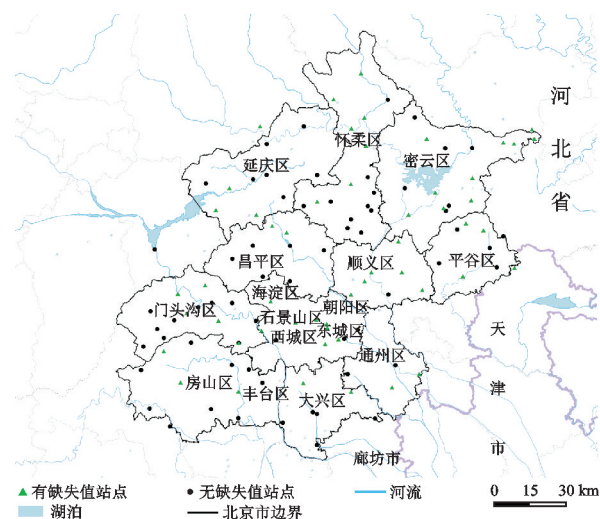


图 1 研究区地理位置和雨量站分布

Fig. 1 The geographical location and distribution of rainfall stations in the study area

1.2 数据来源与处理

本研究采用的数据来自北京市水土保持与生态环境研究中心,包括北京市及其周边地区 119 个雨量站 1981—2020 年的日雨量数据(图 1)。本研究采用 1991—2020 年 30 年的数据分析北京市降雨侵蚀力的空间分布特征,部分站点存在数据缺失,因此采用 65 个数据完整的站点 1981—2020 年 40 年的数据分析北京市降雨侵蚀力的时间变化特征。其中,个别年份年降雨侵蚀力的缺失值采用相邻站点线性回归方法进行插补,相邻站点数据的相关性在 $p=0.05$ 水平上均通过了显著性检验。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算 采用刘宝元等^[18]建立的北京土壤流失方程中的降雨侵蚀力算法。其计算公式为:

当日雨量 $< 100\text{ mm}$ 时,日降雨侵蚀力计算公式为:

$$R_d = 1.384 P_d^{1.453} \quad (1)$$

当日雨量 $\geq 100\text{ mm}$ 时,日降雨侵蚀力计算公式为:

$$R_d = 0.3954 P_d^{1.6709} \quad (2)$$

式中: R_d 为各站日降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; P_d 为各站有效日雨量 (mm) ,当实际日雨量大于或等于 10 mm 时,有效日雨量等于实际日雨量,否则为 0。

根据降水量等级国家标准《GB/T 28592—2012》^[19],将日降雨 $< 10\text{ mm}$ 的定义为小雨日,将 $\geq 10\text{ mm}$ 且 $< 25\text{ mm}$ 定义为中雨日,将 $\geq 25\text{ mm}$ 且 $< 50\text{ mm}$ 的定义为大雨日, $\geq 50\text{ mm}$ 的定义为暴雨日,以此来分别计算不同量级降雨的降雨侵蚀力,并统计出相应的年降雨侵蚀力,作为分析不同雨型时空变化的数据基础。为避免与基于全年日降雨统计的年降雨侵蚀力名称重复,后面不同量级降雨的年降雨侵蚀力直接按雨量级别进行简称,如中雨的年降雨侵蚀力简称为中雨侵蚀力。

1.3.2 空间和时间变化分析

(1) 空间插值

克里金插值是一种基于空间自相关性的插值方法,通过对已知点数据进行插值,生成连续的表面以推断未知点的值,适用于空间分布特征的分析与预测。本研究采用 ArcGIS 地统计模块的普通克里金插值方法,分析北京市年均降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力空间分布特征。

(2) 趋势分析

降雨侵蚀力的年际和年内变化趋势以及突变检验通过 Mann—Kendall(MK)检验法进行分析,该方法能够检验时间序列中的长期变化趋势,并判断突变点具体发生的时间^[20-21]。

将降雨侵蚀力数据按照时间序列依次排列为 $X_n = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$,定义统计量 S 为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & (x_i - x_j < 0) \\ 0 & (x_i - x_j = 0) \\ 1 & (x_i - x_j > 0) \end{cases}$$

式中:若 S 为正,说明降雨侵蚀力随时间序列趋于增加;若 S 为负,说明降雨侵蚀力随时间序列趋于减少。

计算统计变量 Z 值:

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

式中: $\text{var}(S)$ 为 S 的方差, 当 $Z > 0$ 时, 呈现上升趋势; 当 $Z < 0$ 时, 呈下降趋势; 对于给定显著性水平 $p=0.05$, 当 $|Z| \geq 1.96$ 时, 表示通过 95% 信度检验, 即发生显著变化。

对于具有 n 个样本量的时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 构造一秩序列:

$$S_i = \sum_{j=1}^k R_i, (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (5)$$

式中: R_i 为 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数。

定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (6)$$

式中: $\text{var}(S_k)$ 为 S_k 的方差; $E(S_k)$ 为 S_k 的平均值。

将时间序列逆序排布为 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$, 按照上述方法重新计算出 UB_k , 同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1$, 且当 $k=1$ 时, $UB_1 = 0$ 。绘制 UB_k 和 UF_k 曲线, 若 2 条曲线在显著性水平边界线内相交则认为在交点处发生突变。

(3) 周期性分析

小波分析是一种时域和频域的分析方法, 可以在时间变化上分析降雨侵蚀力的周期性变化规律^[22]。本研究采用 Morlet 小波分析, 通过 MATLAB 计算小波系数和小波系数实部, 并绘制小波系数实部等值线图和小波方差图, 分析北京市近 40 年来的降雨侵蚀力周期变化规律。

2 结果与分析

2.1 空间分布特征

由图 2 可知, 北京市年降雨侵蚀力值的范围为 1 691.51~3 914.89 (MJ·mm)/(hm²·h·a), 整体上呈现出东北偏高、西部偏低的特点, 高值中心出现在北京东北部, 即怀柔南部、顺义东部、密云南部及平谷, 均达到 3 000 (MJ·mm)/(hm²·h·a) 以上。西部低值区呈现出明显的阶梯状递减趋势, 包括延庆、昌平西部和门头沟西部地区, 降雨侵蚀力在 2 700 (MJ·mm)/(hm²·h·a) 以下。此外, 中雨侵蚀力变化范围为 566.50~855.89 (MJ·mm)/(hm²·h·a), 空间分布与年降雨侵蚀力的空间分布呈现出一定的差异性。表现为自西南向东北呈先降低然后又增高的趋势, 高值区出现在东北部即密云、平谷一带, 低

值中心位于门头沟和丰台交界地带。而大雨和暴雨侵蚀力与年降雨侵蚀力的空间分布较为相似, 分别处于 634.71~1 303.40, 442.37~1 767.87 (MJ·mm)/(hm²·h·a) 的范围中, 均表现出东高西低的特点。大雨侵蚀力高值位于怀柔南部、密云南部及平谷, 而暴雨侵蚀力高值中心位于怀柔东南部和密云东部。北京西部和北部接太行山脉和燕山山脉, 东南是缓缓向渤海倾斜的大平原, 地势西北高东南低, 而年降雨侵蚀力总体上表现为西低东高的特点, 可能与北京是典型的温带大陆性季风气候有关, 西部更为寒冷干燥, 东部受夏季风影响, 暖湿空气经燕山及太行山脉抬升, 在山前迎风坡形成多雨区。因此, 地形和降雨量是区域降雨侵蚀力的重要影响因素, 对空间分布格局具有显著影响。

2.2 趋势变化特征

2.2.1 年际变化 对 1981—2020 年年降雨侵蚀力及中、大、暴雨降雨侵蚀力进行 Mann-Kendall 趋势分析(图 3)。年降雨侵蚀力无显著趋势性变化; 中雨侵蚀力呈现出显著的增加趋势 ($p=0.03$), 增加率为 3.79 (MJ·mm)/(hm²·h·a); 而大雨和暴雨侵蚀力基本没有变化, 但年际间升降变化极为频繁。此外, 40 年间降雨侵蚀力的 CV 值表明, 4 种情况下的降雨侵蚀力均表现出一定的时间变异性, 暴雨侵蚀力的 CV 值最大, 为 0.66, 其次是大雨, 中雨的 CV 值最小, 为 0.17。因此, 降雨量级越高, 其对应的侵蚀力年际变化波动越大。尽管中雨侵蚀力显著上升, 但由于其产生的降雨侵蚀力较小, 而暴雨频率低但一次产生的降雨侵蚀力大, 所以综合来看, 年降雨侵蚀力的年际变化上升趋势不显著。

为深入了解年降雨侵蚀力及中、大、暴雨侵蚀力的变化细节, 采用 Mann-Kendall 突变方法检验其局部变异性。对于年降雨侵蚀力来说, UF 曲线均在 95% 置信区间内, 说明变化不显著(图 4)。在 2002 年以前 UF 曲线呈现出波动上升趋势, 2002 年以后呈现出波动下降趋势。其中, UF 和 UB 曲线在置信区间内有多次相交, 在 1983 年、1985 年、1992 年、1994 年、2015 年、2018 年均发生突变, 但在 1981—2020 年均未超过 0.05 显著性置信水平, 说明北京近 40 年来降雨侵蚀力虽波动较多, 但总体变化趋势不显著。中雨、大雨和暴雨侵蚀力 MK 检验结果表明, UF 曲线均呈现出多次波动上升或下降趋势, 且发生突变次数较多, 但不显著。总体而言, 在 0.05 显著性置信水平下, 近 40 年降雨侵蚀力的变化均不显著, 且暴雨侵蚀力的变化趋势和突变点与年降雨侵蚀力的极为相似。由此可见, 虽然暴雨发生频率小, 历时短, 但暴雨产生的降雨侵蚀力大, 对年降雨侵蚀力影响也较大。

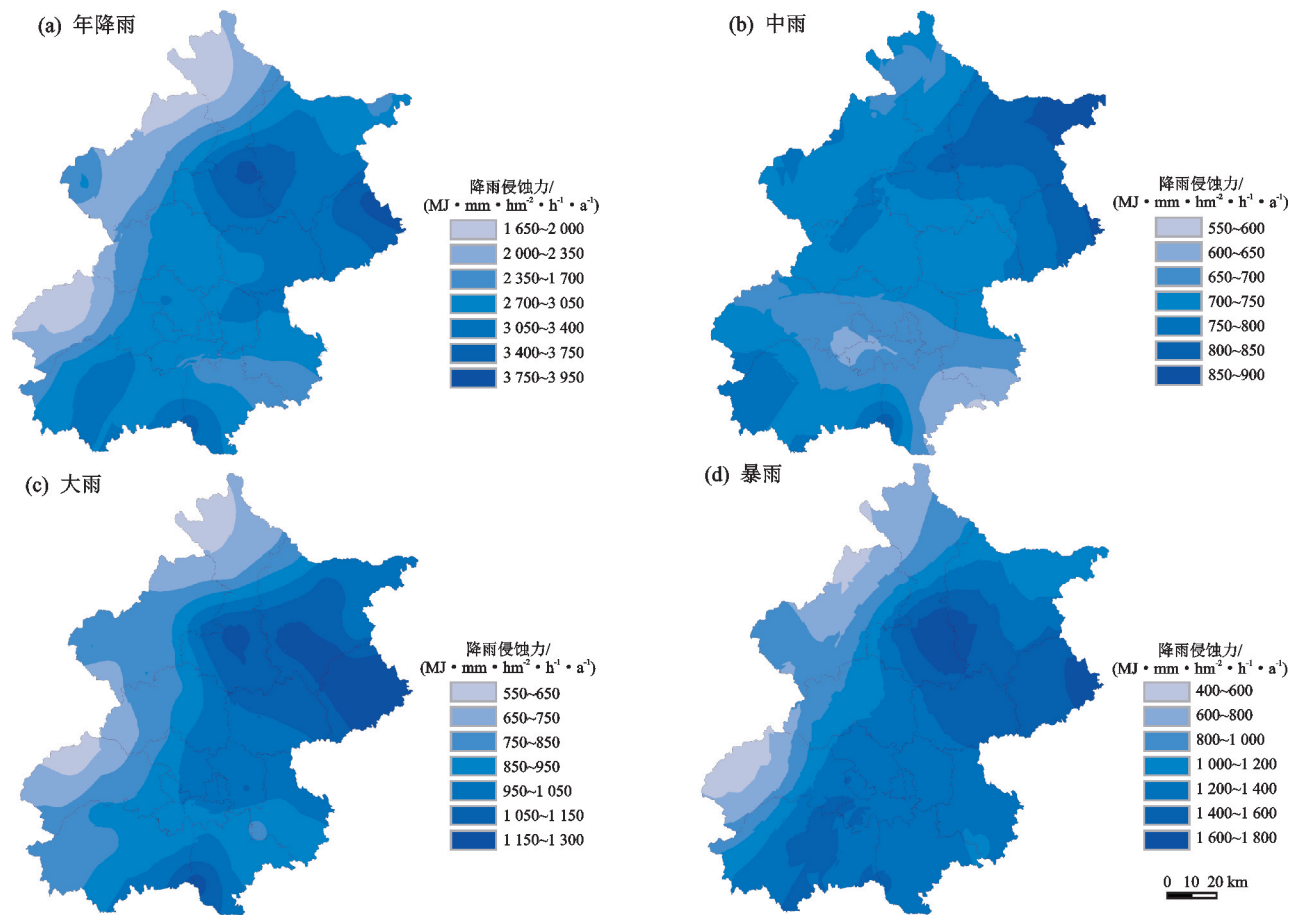


图 2 多年平均降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of multi-year average rainfall erosivity and different grades of rainfall erosivity

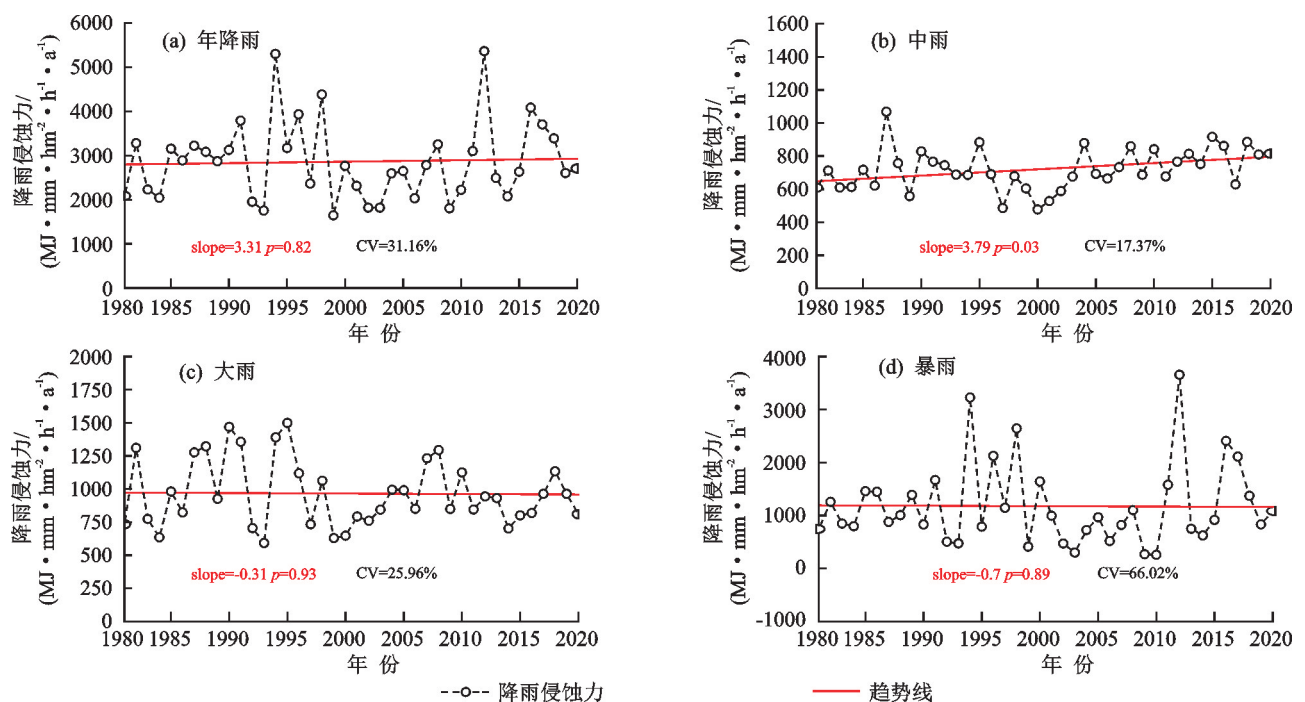


图 3 年和不同量级降雨侵蚀力变化趋势

Fig. 3 The variation trend of annual rainfall erosivity and different grades of rainfall erosivity

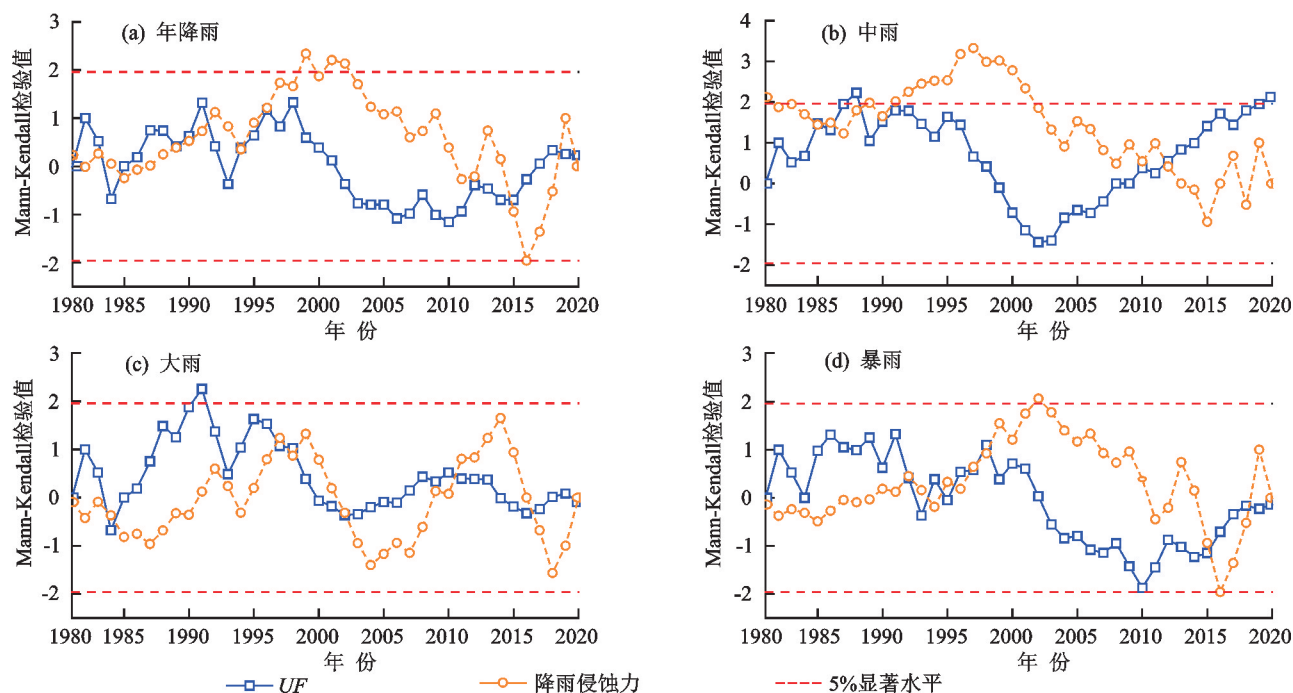


图 4 年和不同量级降雨侵蚀力 M-K 检验

Fig. 4 The M-K test for assessing annual rainfall erosivity and different grades of rainfall erosivity

为进一步分析北京降雨侵蚀力的空间变化趋势,统计了 1981—2020 年降雨侵蚀力 Mann-Kendall

统计量 Z 值,并进行 Kriging 空间插值。北京降雨侵蚀力空间变化趋势呈现出地区差异(图 5)。

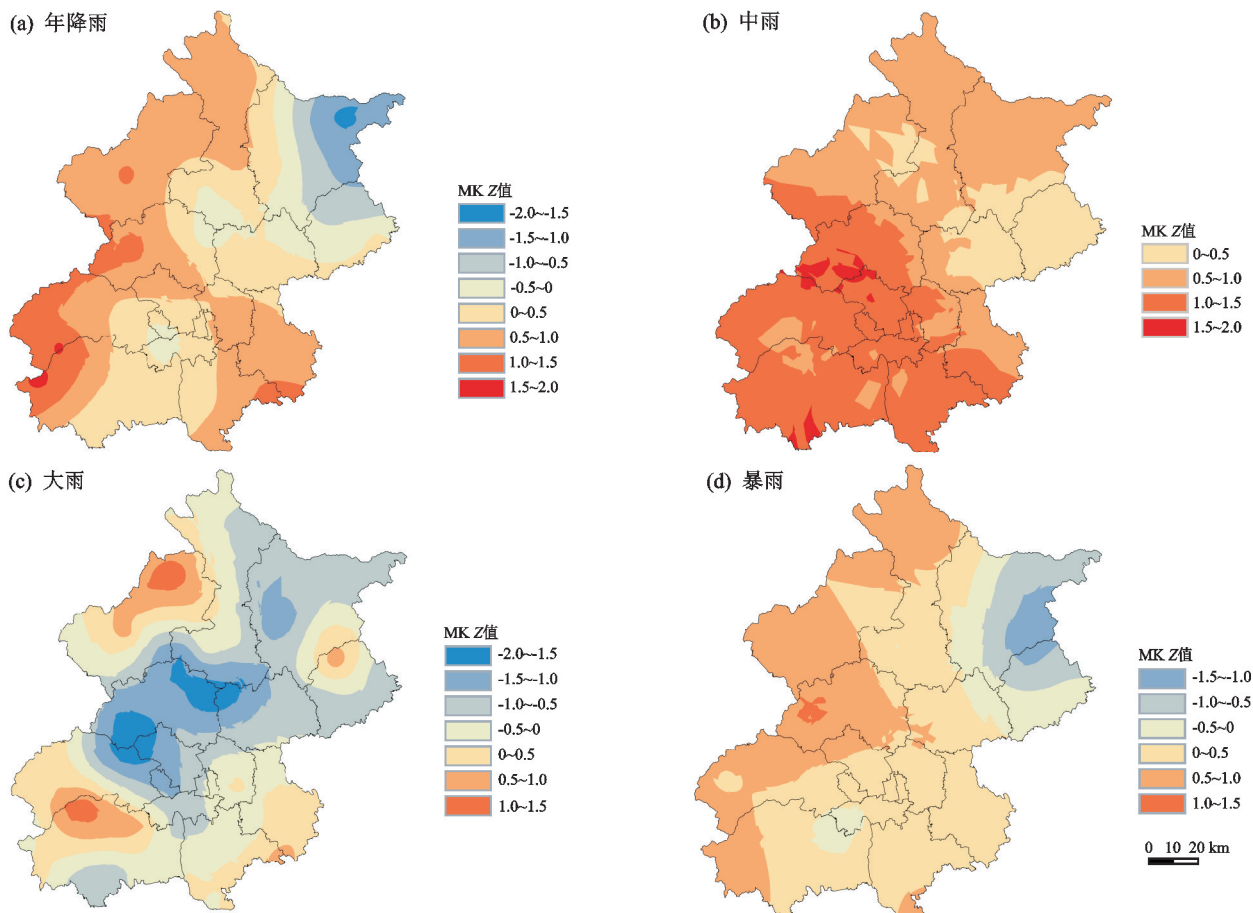


图 5 1981—2020 年北京市年降雨侵蚀力变化趋势空间分布

Fig 5 The spatial distribution of annual rainfall erosivity change trend in Beijing from 1981 to 2020

年降雨侵蚀力在东北部呈减小趋势,在除密云、平谷外的大部分地区呈增加趋势,西部山丘区增加相对较大,但均没有通过显著性检验($|Z| < 1.96$),变化不显著。中雨侵蚀力在北京全域均呈不显著的增加趋势,大部分地区大雨侵蚀力呈不显著减小趋势。暴雨侵蚀力变化趋势的空间特征与年降雨侵蚀力趋势相似,暴雨对年降雨侵蚀力影响较大。总体来看,年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力在空间上的变化趋势均不显著,与年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力相比,中雨和大雨侵蚀力的变化特征表现出一定的差异性。

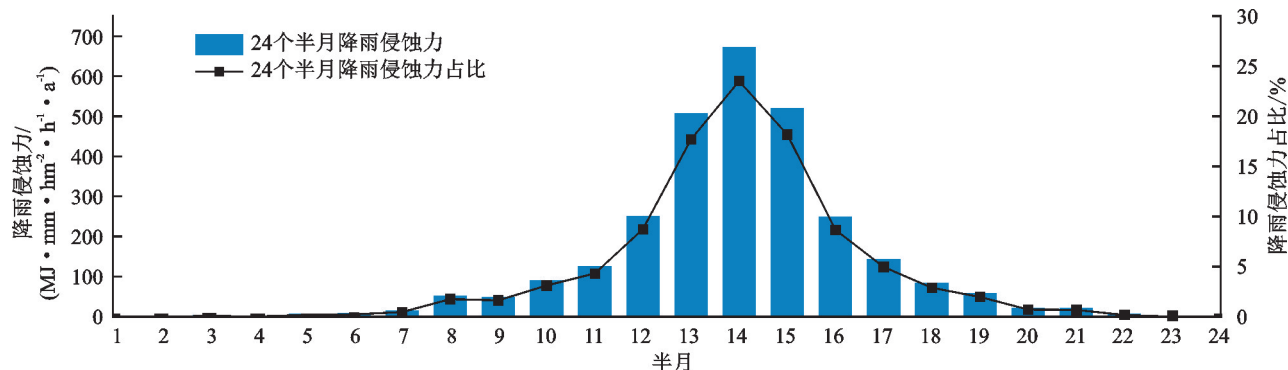
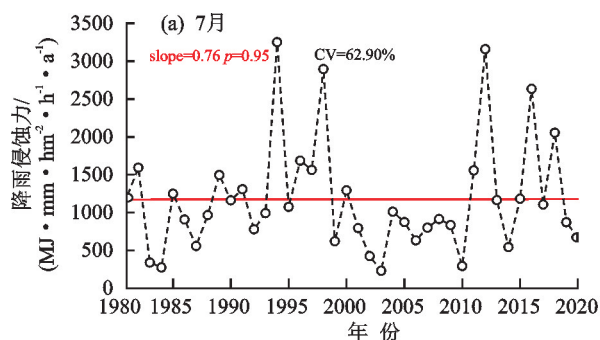


图 6 北京市多年平均 24 个半月降雨侵蚀力变化及占比

Fig. 6 The variation and proportion of annual average rainfall erosivity over a period of 24 half-months in Beijing

(2) 7, 8 月降雨侵蚀力变化趋势

北京降雨主要发生在夏季,7, 8 月的降雨侵蚀力占全年的 68.04%,对全年降雨侵蚀力的大小有很大影响,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。对 7, 8 月降雨侵蚀力进行 Mann-Kendall 趋势分析(图 7)。可以看出,7, 8 月降雨侵蚀力均无显著的趋势性变化,但年际间波动较大,7 月变异系数 CV 值达到 0.63,8 月 CV 值为 0.56。



2.2.2 年内变化

(1) 24 个半月降雨侵蚀力及占比

降雨侵蚀力年内变化特征利用半月时段步长的降雨侵蚀力值来衡量,统计了 1981—2020 年 24 个半月降雨侵蚀力及其占比(图 6)。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。高值集中在第 13~15 个半月,分别为 504.83, 670.39, 518.23 (MJ·mm)/(hm²·h),占比分别为 17.70%, 23.51%, 18.17%,即 7 月和 8 月上旬降雨侵蚀力达到最大。

(3) 1981—2020 年 7, 8 月降雨侵蚀力变化趋势的空间分布特征

汛期不同月份地区间降雨侵蚀力变化也存在差异(图 8)。7 月大部分地区降雨侵蚀力均呈不显著的增加趋势,只有密云和平谷的东北部部分地区呈不显著的减小趋势。北京几乎所有地区 8 月的降雨侵蚀力均呈减小趋势,其中东部减小相对明显,同样不显著。

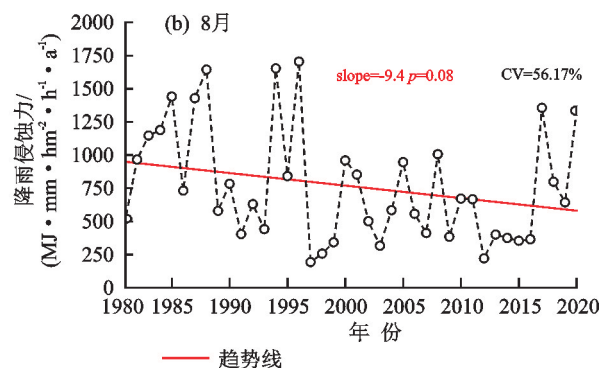


图 7 降雨侵蚀力变化趋势

Fig. 7 The variation trend of rainfall erosivity

2.3 周期变化特征

利用小波分析对 1981—2020 年年降雨侵蚀力和中、大、暴雨侵蚀力进行周期分析(图 9 和图 10)。可以看出,年降雨侵蚀力存在 4, 7~9, 16, 26 年共 4 个时间尺度的振荡周期,在 25~30 年时间尺度上出现了 2 次“低—高”循环交替,1995 年以前周期变化不明显,2000 年之后才有较为明显的周期变化。通过

方差分析可以看出,年降雨侵蚀力周期变化存在 5 个峰值,其中 8 年为最大峰值,说明 8 年为降雨侵蚀力变化的第 1 主周期,26 年为第 2 主周期。中雨侵蚀力存在 5, 15, 25~26 年共 3 个时间尺度的振荡周期,在 20~30 年出现了 2 次“低—高”循环交替。大雨侵蚀力存在 6~8, 12~14, 20, 24~27 年时间尺度的振荡周期,在 20~30 年出现了 3 次“低—高”循环。暴

雨侵蚀力存在 4,7~9,17,25 年时间尺度的振荡周期,在 20~25 年出现了 3 次“高一低”循环,但在 17 年的时间尺度上周期变化极不明显,且在 4 年时间尺度上 2005 年之后才有明显的周期变化。各量级降雨侵蚀力主周期存在一定差异,中雨、大雨、暴雨侵蚀力的第 1 主周期分别为 26,27,25 年。整体来看,在 25 年左右时间尺度上,中雨和大雨侵蚀力周期变化在整个时段内都比较稳定,而暴雨侵蚀力的周期变化则影响了最终年降雨侵蚀力的周期变化。

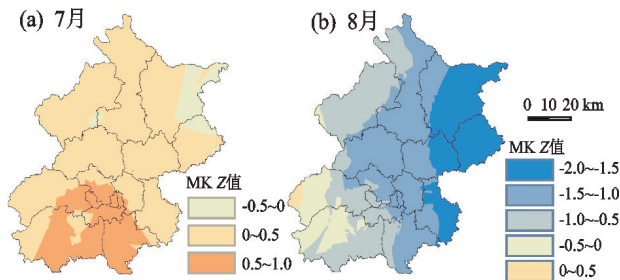


图 8 降雨侵蚀力变化趋势空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of rainfall erosivity

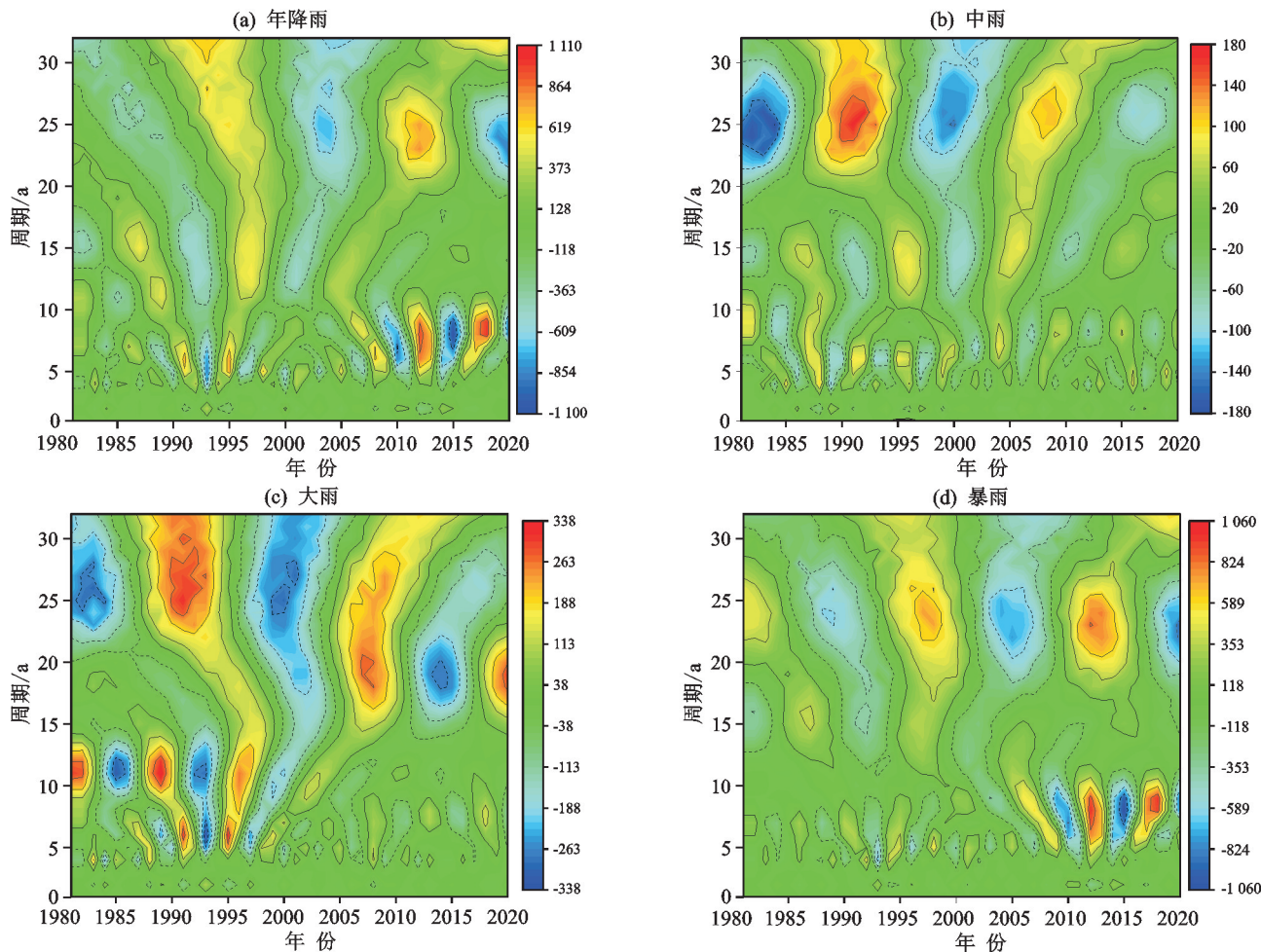


图 9 1981—2020 年北京市年和不同量级降雨侵蚀力小波实部等值线图

Fig. 9 Wavelet real part contour map of annual rainfall erosivity and different grades of rainfall erosivity in Beijing from 1981 to 2020

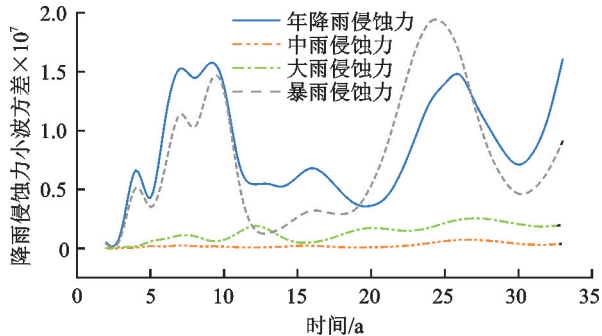


图 10 1981—2020 年北京市年和不同量级降雨侵蚀力小波方差
Fig. 10 The wavelet difference of annual rainfall erosivity and different grades of rainfall erosivity in Beijing from 1981 to 2020

3 讨论

北京市部分地区作为我国的水土流失重点防治区,深入了解北京降雨侵蚀力的时空变异特征,可为今后北京更好地开展水土保持工作提供理论依据。北京年降雨侵蚀力范围为 1 691.51~3 914.89 (MJ·mm)/(hm²·h·a),与叶芝菡等^[16]的研究相比数值偏低,这可能是由于计算降雨侵蚀力的模型和站点数据不同,他们是基于 20 个雨量站的日降雨数据,而本研究采用的是 119 个站点的日降雨数据。北京地形复杂多样,增加雨量站密度能更好地评价降雨侵蚀力的空间差异。在空间分布上年降雨侵蚀力和大雨、暴

雨侵蚀力空间特征相似,表现为东北偏高,西部偏低的特点,与北京近几十年来降水量的空间分布特征基本一致^[23]。而中雨侵蚀力的空间分布呈现出了一定的差异,自西南向东北呈先降低又增高的趋势,高值位于密云、平谷一带。大雨和暴雨产生的降雨侵蚀力对年降雨侵蚀力影响较大,这与芦鑫等^[24]在秦岭南北地区的研究结果一致。

地形和气候是导致降雨侵蚀力的空间分布差异的重要原因,XU等^[25]研究发现,由于中国西南喀斯特地区南部靠近海洋,水汽充足,年降雨侵蚀力的空间分布呈南部大于北部的趋势。钟科元等^[26]研究发现,松花江流域东、中、西部的地形地貌差异是导致降雨侵蚀力变化存在差异的重要原因。金沙江流域降雨侵蚀力的地区差异与地形密切相关,总体上高程越小的地区,降雨侵蚀力越大,主要原因是地形阻碍影响了水汽输送^[27]。孙建等^[28]研究发现,北大西洋涛动,厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)、西太平洋指数等环流因子与黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力关联较弱,而冷暖季的变化与研究区整体的降雨侵蚀力变化存在显著的负相关关系。但有其他学者^[29]研究发现,贵州降雨侵蚀力大小与 ENSO 的持续时间呈正比。因此,区域降雨侵蚀力与地形地势、降雨量和降雨强度以及大尺度环流因子等都有关系,影响程度因区域的不同而有差异。就本研究而言,北京三面环山,山区面积占 60%以上,东部的燕山山脉,西北的太行山余脉和西南的军都山形成了一个半封闭的地形,使得大部分水汽由东南方向进入华北平原时,受到山脉的阻挡,从而导致山地附近降水较多,因此降雨侵蚀力也较大;西部山丘区处于背风坡,湿度降低,所以降雨侵蚀力较小。而东北部地势较高,如密云、怀柔等地区地形起伏较大,容易形成上升气流,大雨暴雨日数较多,所以形成降雨侵蚀力高值区。降雨侵蚀力的空间分异与降雨量、降雨强度、地形等多种因素有关,在未来的研究中可进一步考虑更多的影响因素,更全面地了解区域降雨侵蚀力特征。

从年内变化来看,汛期 7 月降雨侵蚀力变化基本不大,而 8 月呈现不显著的下降趋势,东部下降尤为明显。但不同区域各降雨类型的年际变化趋势存在明显差别。总体来看,大雨和暴雨侵蚀力呈不显著下降趋势,中和了中雨侵蚀力的上升趋势,因此年降雨侵蚀力最终呈现不显著的上升趋势。北京市年降雨侵蚀力与不同量级雨量产生的降雨侵蚀力年际变化趋势的空间分布差异明显,东北部年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力均呈下降趋势,其余地区均呈上升趋势,西部山丘区上升相对较大。中雨侵蚀力在北京全域均

呈不显著的增加趋势,除西部边缘外,大部分地区大雨侵蚀力则呈不显著的减小趋势。西部地区降雨侵蚀力的增强在一定程度上为滑坡泥石流等地质灾害提供了条件,因此这些地区应关注暴雨事件对土壤侵蚀的潜在风险,并采取相应的防范措施。在过去 40 年,北京年降雨侵蚀力,中、大和暴雨侵蚀力均未发生显著突变,但年际间波动较大。总的来说,尽管近 40 年来降雨侵蚀力波动变化,且变化趋势呈现出区域差异,但均不显著,因此,未来北京在针对降雨侵蚀力所采取的防范措施方面不需要有大的改变。

综合来看,北京年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力时空变化特征并不十分显著,除人为等因素影响外,受地形和降雨量影响较大。暴雨对北京年降雨侵蚀力的影响尤为显著,许多学者^[30-31]在其他地区的相关研究中也证实了这一点。因此,未来需要更多地关注在气候变化条件下暴雨事件增多导致区域年降雨侵蚀力出现高值的现象,进而减小区域水土流失发生的风险。

4 结 论

(1) 1991—2020 年北京年降雨侵蚀力范围为 $1\,691.51 \sim 3\,914.89$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,年降雨侵蚀力与大雨和暴雨侵蚀力呈现出相似的空间分布特征,高值区出现在东北地区,由东北向西北、东南方向递减。

(2) 近 40 年来,北京年降雨侵蚀力总体变化趋势不明显,年际间波动较大,发生突变年份较多,且随着降雨量级增大,其年际变化越剧烈。年降雨侵蚀力和暴雨侵蚀力在东北地区呈现出下降趋势,中雨侵蚀力在北京全域均表现出上升趋势;北京降雨侵蚀力高值主要集中在夏季,7 月降雨侵蚀力基本没有变化,而 8 月则呈现出下降趋势,东部地区下降趋势相对较大。

(3) 北京市年降雨侵蚀力和中、大、暴雨降雨侵蚀力分别存在 8,26,27,25 年的主变化周期,在 25~30 年时间尺度上均存在 2~3 次“低—高”循环交替。中雨和暴雨侵蚀力周期变化在整个时段内都比较稳定,暴雨侵蚀力的周期变化对最终年降雨侵蚀力的周期变化有较大影响。

参考文献:

- [1] FENTA A A, YASUDA H, SHIMIZU K, et al. Spatial distribution and temporal trends of rainfall and erosivity in the Eastern Africa region[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(25):4555-4567.
- [2] LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatio-temporal variation in rainfall erosivity during 1960—2012 in the Pearl River Basin, China[J]. Catena, 2016,

- 137;382-391.
- [3] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.
- LIU B Y, ZHANG K L, JIAO J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 345-350.
- [4] RAN Q H, SU D Y, LI P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J]. Journal of Hydrology, 2012, 424: 99-111.
- [5] 马道铭,回毅滢,赵炯昌,等.近60年山西省降雨侵蚀力时空变化特征[J].水土保持研究,2023,30(6):24-31,48.
- MA D M, HUI Y Y, ZHAO J C, et al. Spatiotemporal characteristics of rainfall erosivity in Shanxi Province in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 24-31, 48.
- [6] WISCHMEIER W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(3): 246-249.
- [7] 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[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.
- [8] LEE J H, HEO J H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1): 30-48.
- [9] XIE Y, YIN S Q, LIU B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.
- [10] 徐丽,谢云,符素华,等.北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究[J].水土保持研究,2007,14(6):398-402.
- XU L, XIE Y, FU S H, et al. Simple method of estimating rainfall erosivity under different rainfall amount of Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 398-402.
- [11] JIA L, YU K X, LI Z B, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load [J]. Catena, 2022, 210: e105931.
- [12] 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 Y X, FANG Z, LIU S J, 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.
- [13] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等.珠江流域1960—2012年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on Pearl River Basin during 1960—2012 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 159-167.
- [14] 刘家宏,梅超,王佳,等.北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(9):50-55.
- LIU J H, MEI C, WANG J, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing [J]. China Flood and Drought Management, 2023, 33(9): 50-55.
- [15] 符素华,段淑怀,吴敬东,等.北京山区次降雨侵蚀力[J].水土保持学报,2002,16(1):37-39,57.
- FU S H, DUAN S H, WU J D, et al. Estimation of daily rainfall erosivity in Beijing mountainous area [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(1): 37-39, 57.
- [16] 叶芝菡,刘宝元,章文波,等.北京市降雨侵蚀力及其空间分布[J].中国水土保持科学,2003,1(1):16-20.
- YE Z H, LIU B Y, ZHANG W B, et al. Study on rainfall erosivity and its spatial distribution in Beijing [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 16-20.
- [17] 汲欣愉,黄弘.气候变化背景下北京市极端降水时序特征研究[J].灾害学,2023,38(1):177-185.
- JI X Y, HUANG H. Research on temporal variation of extreme precipitation in Beijing under climate changes [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 177-185.
- [18] 刘宝元,毕小刚,符素华等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- LIU B Y, BI X G, FU S H, et al. Beijing soil loss equation [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 28592—2012 降水量等级 [S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, GB/T 28592—2012 Grade of precipitation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [20] 朱大运,杨倩,陈海,等.1960—2017年贵州省不同水系降雨侵蚀力时空变异特征[J].水土保持通报,2021,41(1):6-14.
- ZHU D Y, YANG Q, CHEN H, et al. Spatiotemporal variations in rainfall erosivity of different river systems in Guizhou Province during 1960—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 6-14.
- [21] 王佳欢,张晨星,杨新兵,等.基于GIS的白洋淀流域降雨侵蚀力时空分布特征分析[J].水土保持研究,2023,30(1):18-24.
- WANG J H, ZHANG C X, YANG X B, et al. Analysis on spatiotemporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Baiyangdian Basin based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 18-24.
- [22] 卢旭东,齐实,陈家东,等.南渡江流域降雨侵蚀力时空

- 分布与变化趋势研究[J].生态与农村环境学报,2023,39(11):1464-1473.
- LU X D, QI S, CHEN J D, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of rainfall erosivity in the nan-driviver basin[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(11):1464-1473.
- [23] 王秀荣,王维国,刘还珠,等.北京降水特征与西太副高关系的若干统计[J].高原气象,2008,27(4):822-829.
- WANG X R, WANG W G, LIU H Z, et al. Beijingregion precipitation feature and some statistics of relationship between it and SHWP[J].Plateau Meteorology, 2008,27(4):822-829.
- [24] 芦鑫,殷淑燕,高涛涛.1960—2017 年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(3):380-390.
- LU X, YIN S Y, GAO T T. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in the northern and southern regions of Qinling Mountains from 1960 to 2017 [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2019, 46(3):380-390.
- [25] XU X J, YAN Y J, DAI Q H, et al. Spatial and temporal dynamics of rainfall erosivity in the Karst region of southwest China: Interannual and seasonal changes[J]. Catena,2023,221:e106763.
- [26] 钟科元,郑粉莉.1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J].自然资源学报,2017,32(2):278-291.
- ZHONG K Y, ZHENG F L. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River Basin from 1960 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources,2017,32(2):278-291.
- [27] 彭玉芝,范建容,于江,等.金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2018,38(2):8-13.
- PENG Y Z, FAN J R, YU J, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Jinsha River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(2):8-13.
- [28] 孙从建,王佳瑞,郑振婧,等.黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J].干旱区地理,2020,43(3):568-576.
- SUN C J, WANG J R, ZHENG Z J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity and its influencing factors in the protected area of the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 568-576.
- [29] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H, et al. Variation characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province and the correlation with the El Niño Southern Oscillation [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 691:835-847.
- [30] YANG F B, LU C H. Spatiotemporal variation and trends in rainfall erosivity in China's dryland region during 1961—2012 [J]. Catena, 2015, 133:362-372.
- [31] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H, et al. Variation characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province and the correlation with the El Niño Southern Oscillation [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 691:835-847.
- (上接第 131 页)
- [25] 朱慧鑫,邓羽松,夏振刚,等.鄂东南花岗岩崩岗剖面土壤液塑限特征及影响因子分析[J].中国水土保持科学, 2016,14(5):1-7.
- ZHU H X, DENG Y S, XIA Z G, et al. Liquid and plastic limits and influencing factors for the profiles of collapse slope in Southeast of Hubei Province [J]. Science of Soil and Water Conservation,2016,14(5):1-7.
- [26] DENG Y S, XIA D, CAI C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(8): 1863-1873.
- [27] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: An overview [J]. Engineering Geology,2002,64(1):65-87.
- [28] IGWE O, FUKUOKA H. The effect of water-saturation on the stability of problematic slopes at the Iva Valley area, Southeast Nigeria [J]. Arabian Journal of Geosciences,2015,8(5):3223-3233.
- [29] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
- DENG Y S. Study on characteristics, distribution and geographical environmental factors of granite collapse in Southern China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2018.
- [30] ANDERSON R L, ROWNTREE K M, LE ROUX J J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion [J]. Catena,2021,206:e105482.
- [31] TAO Y, HE Y B, DUAN X Q, et al. Preferential flows and soil moistures on a Benggang slope: Determined by the water and temperature co-monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2017,553:678-690.