

吉林省不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征

宋爽¹, 牛天一², 陈长胜¹, 刘子琪¹, 李云峰³, 纪玲玲¹, 岳元¹

(1.吉林省气象台, 吉林 长春 130062; 2.吉林省气象服务中心,
吉林 长春 130062; 3.吉林省气象信息网络中心, 吉林 长春 130062)

摘要: [目的] 探究吉林省不同量级降雨条件下降雨侵蚀力的时空分布特征, 为该省气象灾害风险评估、水土流失防治提供科学参考。[方法] 基于1980—2022年吉林省51个站点的逐日降雨数据, 按雨量等级将其划分为不同量级降雨, 采用Xie提出的日降雨侵蚀力计算模型计算降雨侵蚀力, 利用M-K突变检验、变异系数、气候倾向率分析吉林省不同量级降雨侵蚀力时空变化特征。[结果] ①1980—2022年吉林省年均侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力分别为420.04 mm和1 967.12 MJ·mm/(hm²·h), 变异系数分别为0.27, 0.2, 均属中等变异; ②1980—2022年, 不同量级降雨侵蚀力随年际变化均呈上升趋势, 暴雨侵蚀力上升幅度最大, 为57.7 MJ·mm/(hm²·h·10 a), 中雨侵蚀力上升幅度最小, 为5.8 MJ·mm/(hm²·h·10 a), 大雨侵蚀力对年均降雨侵蚀力的贡献度最大, 为36.68%; ③不同量级降雨侵蚀力年内分布不均匀, 中雨侵蚀力在全年均有发生, 大暴雨侵蚀力仅发生在6—9月, 10月至翌年5月中雨侵蚀力在年降雨侵蚀力中占主导地位, 6—9月大雨和暴雨侵蚀力逐渐替代中雨侵蚀力在年降雨侵蚀力中起主导地位; ④年均侵蚀性降雨量、年均降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力空间分布均呈现中南高东西低的格局。[结论] 吉林省不同量级降雨侵蚀力区域特征明显, 明确了各量级降雨易产生土壤侵蚀可能性较高的时间和地区, 应因地制宜地制定气象灾害风险防御和水土保持防治措施。

关键词: 不同量级降雨侵蚀力; 侵蚀性降雨; 时空分布; 吉林省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0215-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 宋爽, 牛天一, 陈长胜, 等. 吉林省不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 215-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.023; Song Shuang, Niu Tianyi, Chen Changsheng, et al. Characteristics of rainfall erosivity under different magnitudes of rainfall in Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 215-224.

Characteristics of Rainfall Erosivity Under Different Magnitudes of Rainfall in Jilin Province

Song Shuang¹, Niu Tianyi², Chen Changsheng¹, Liu Ziqi¹, Li Yunfeng³, Ji Lingling¹, Yue Yuan¹

(1. Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun, Jilin, 130062, China;

2. Meteorological Service Center of Jilin Province, Changchun, Jilin 130062, China;

3. Jilin Province Meteorological Information Network Center, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: [Objective] To provide a reference for the assessment of meteorological disaster risk and prevention of soil erosion, the spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity under different levels of rainfall in Jilin Province were analysed. [Methods] Daily rainfall data from 51 meteorological stations in Jilin Province from 1980 to 2022 were divided based on different rainfall magnitudes according to the rainfall grade. The daily rainfall erosivity calculation model proposed by Xie was adopted to calculate the rainfall erosivity, and the M-K mutation test, coefficient of variation, and climate tendency rate were used to analyse the spatial and temporal distributions of different grades of rainfall erosivity. [Results] ① The average annual erosive rainfall and rainfall erosivity in Jilin Province during

收稿日期: 2024-01-26

修回日期: 2024-03-18

资助项目: 中国气象创新发展专项“气候变化背景下黑土区有机质含量与土壤侵蚀的监测评估和对策研究”(CXFZ2023J059); 吉林省科技发展计划项目“吉林省黑土区水力侵蚀短期降水风险评估及预警系统研发”(20230203134SF)

第一作者: 宋爽(1998—), 男(汉族), 辽宁省朝阳市人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为土壤侵蚀规律。Email: 1059078456@qq.com。

通信作者: 陈长胜(1976—), 男(汉族), 吉林省磐石市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事天气气候诊断分析和预测技术研究。Email: chencs_jiap@163.com。

1980—2022 were 420.04 mm and 1 967.12 MJ · mm/(hm² · h), and the coefficients of variation were 0.27 and 0.2, respectively, both of which showed moderate variations. ② Different grades of rainfall erosivity showed an upward trend during 1980—2022. The torrential rain erosivity showed the largest increase of 57.7 MJ · mm/(hm² · h · 10 a), whereas the moderate rainfall erosivity showed the smallest increase of 5.8 MJ · mm/(hm² · h · 10 a). The contribution of heavy rain erosivity to the average annual rainfall erosivity was the largest at 36.68%. ③ The distribution of different grades of rainfall erosivity was uneven throughout the year. Moderate rainfall erosivity occurred throughout the year, whereas heavy rainfall erosivity only occurred from June to September. Moderate rainfall erosivity played a dominant role in the annual rainfall erosivity from October to May of the subsequent year. From June to September, the heavy and torrential rain erosivities gradually replaced the moderate rainfall erosivity and played a dominant role in the annual rainfall erosivity. ④ The spatial distributions of the average annual erosive rainfall, average annual rainfall erosivity, and different grades of rainfall erosivity were higher in the central and southern regions and lower in the East and West. [Conclusion] The regional characteristics of different grades of rainfall erosivity in Jilin Province were obvious, and the time and region with high probabilities of soil erosion caused by rainfall of different magnitudes were clearly distinguished; thus, meteorological disaster risk prevention and soil and water conservation prevention measures should be formulated according to the local conditions.

Keywords: rainfall erosivity of different magnitudes; erosive rainfall; spatiotemporal distribution; Jilin Province

受全球气候变暖影响,大部分地区极端天气频发^[1]。降水是表征气候变化的重要气象要素之一,其时空分布不稳定性对旱涝等自然灾害发生起决定性作用,直接影响着社会经济的发展^[2]。降雨是土壤侵蚀发生时的动力来源,其持续时间、强度、次数等均会对土壤侵蚀面积产生重要影响^[3]。降雨侵蚀力表征降雨引发土壤侵蚀的潜在能力,是通用土壤流失方程(USLE, universal soil erosion equation)及修订版通用土壤流失方程(RUSLE, revised universal soil erosion equation)中的一个重要指标。1959年, Wischmeier等^[4]通过对美国8 000多个地块研究,提出将次降雨总能量(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并建立动能计算公式。但基于逐小时或分钟级的雨量信息资料获取难度较大,为克服降雨资料的限制,有关日^[5]、月^[6]、年^[7]降雨侵蚀力计算模型应运而生,因日降雨资料估算降雨侵蚀力的精度更高,故日降雨侵蚀估算模型得到了更广泛的应用。日降雨侵蚀力估算模型最为常用的有章文波等^[5]和 Xie Yun等^[8]两种, Chen Yuhong等^[9]通过对比章文波^[5]、Xie Yun等^[8]和 Yu Bofu等^[10]不同降雨侵蚀力估算模型,认为 Xie 提出的降雨侵蚀力估算公式用来估算中国大陆地区降雨侵蚀力最准确,邢贞相等^[11]认为 Xie 模型将一年划分为冷季和暖季,可使计算结果更加准确。目前,已有学者对降雨侵蚀力变化特征做了大量研究,王万中等^[12]、刘斌涛等^[13]、殷水清等^[14]基于全国不同年份、不同测站逐日降水资料,分析了中国降雨侵

蚀力年内、季节变化特征,发现中国年均降雨侵蚀力从东南沿海向西北内陆逐渐递减;诸多学者应用日降雨侵蚀力计算模型,分析了不同省市^[15-16]、流域等降雨侵蚀力年际变化^[17-18]、季节差异^[19-20];但已有降雨侵蚀力的研究主要集中在降雨侵蚀力的年际、年内、季节的时空变化上,针对不同量级降雨侵蚀力时空分布特征相关报道较少。赵平伟等^[21]对云南省不同量级研究发现,大雨侵蚀力在年降雨侵蚀力中起主导作用;吴洁玲等^[22]对韶关市降雨侵蚀力分析发现,大雨及以上量级降雨引起的降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力的77.05%;邹玉霞等^[23]对重庆市不同量级降雨侵蚀力分析发现,大雨引起的降雨侵蚀力对年均降雨侵蚀力贡献率最大,大暴雨对年降雨侵蚀力上升贡献率最高。不同量级降雨时空存在的差异必然会对土壤水蚀特征造成不同程度影响,赵平伟等^[24]研究发现,土壤水力侵蚀往往受降水日数影响相对较小,受年降雨量和降雨强度相对较大的降雨事件影响较大。综上,进行不同量级降雨侵蚀力的研究是有必要的,但吉林省还未有相关研究,因此,本文选取吉林省51个气象监测站点1980—2022年逐日降雨数据,利用 Xie等^[8]提出的日降雨侵蚀力计算模型计算吉林省不同量级降雨侵蚀力,分析吉林省不同量级降雨侵蚀力时空分布特征,以为农业生产活动、气象灾害风险评估和水土流失防治工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林省位于中国东北地区中部松辽平原腹地,东

经 $121^{\circ}38'—131^{\circ}19'E$, 北纬 $40^{\circ}52'—46^{\circ}18'N$ 。总体高程由东南向西北倾斜, 呈现出明显的东南高、西北低的特征, 地貌类型复杂, 有高山、盆地、丘陵、台地和平原。吉林省属温带大陆性季风气候, 深受季风和西风环流的影响, 降水主要集中在每年的 5—9 月份, 占全年降水量的 80%, 降水量由东南向西北递减。多年平均气温 $2\sim 6^{\circ}C$, 全年无霜期 130 d 左右, 全年日照时数 $2\ 200\sim 3\ 200\ h$ 。土壤类型以黑土、黑钙土和草甸土为主, 受人类活动影响, 土壤肥力下降, 土壤侵蚀明显。

根据 2022 年吉林省水土保持公报数据显示, 吉林省水土流失面积 $39\ 922.10\ km^2$, 占该省土地总面积的 20.99%, 其中水力侵蚀面积 $28\ 418.14\ km^2$, 占该省水土流失面积的 71.18%, 风力侵蚀面积 $11\ 503.96\ km^2$, 占全省水土流失面积的 28.82% (数据来源: 吉林省水利厅《水土保持公报》)。由水力侵蚀导致的水土流失仍很严重, 降雨侵蚀力是水力侵蚀计算中的一个重要因子, 其时空分布特征直接决定了水力侵蚀的时空分布, 因此, 对吉林省降雨侵蚀力的研究是十分必要的。

1.2 数据来源与处理

降水资料来源于吉林省气象局提供的吉林省 51 个气象站点 1980—2022 年的逐日降水资料, 以日降水资料为基础计算逐日降雨侵蚀力, 以此为基础计算不同量级降雨侵蚀力和年均降雨侵蚀力, 应用 ArcGIS 10.4 中精度更高、结果更可靠的普通克里金插值法对不同量级各站点降雨侵蚀力进行空间插值^[25], 得到空间连续分布的降雨侵蚀力分布图。本文根据吉林省各市地理位置, 认定白城市和松原市为吉林省西部地区, 长春市、四平市、辽源市、吉林市为中部, 通化市和白山市为南部, 延边朝鲜族自治州为东部。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法 本研究采用 Xie 提出的降雨侵蚀力估算模型, 根据日降雨量资料计算日降雨侵蚀力。降雨侵蚀力计算公式如下:

$$R_{\text{day}} = \alpha P_d^{1.7265} \quad (1)$$

式中: R_{day} 为日降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h)]$; P_d 为 $\geq 10\ mm$ 的日降雨量; α 取值暖季 (5—9 月) 为 0.393 7, 冷季 (10—4 月) 为 0.310 0~1。基于日降雨侵蚀力统计月、季、年值, 用算术平均方法计算多年平均降雨侵蚀力。

根据中国气象局规定, 参考高峰等^[26]和王瀛等^[27]研究结果, 将日降雨量 $\geq 10\ mm$ 的认定为侵蚀性降雨量, 侵蚀性降雨划分标准详见表 1, 应用 Xie 降雨侵蚀力估算模型, 分别计算不同量级降雨的降雨

侵蚀力, 各量级降雨侵蚀力的加和为该时段总的降雨侵蚀力。

表 1 降雨量级降雨侵蚀力等级

Table 1 Rainfall grade of rainfall erosivity grade

降雨量/mm	雨量级别	降雨侵蚀力级别
10~25	中雨	中雨侵蚀力
25~50	大雨	大雨侵蚀力
50~100	暴雨	暴雨侵蚀力
100~200	大暴雨	大暴雨侵蚀力
≥ 200	特大暴雨	特大暴雨侵蚀力

1.3.2 气候倾向率 气候倾向率是指以时间为自变量, 气象要素为因变量建立的一元线性方程斜率的 10 倍。当气候倾向率 > 0 时, 说明气象要素随时间变化呈上升趋势, 反之呈下降趋势, 其数值大小表征上升或下降幅度大小。

1.3.3 Mann-Kendall 突变检验 Mann-Kendall 突变检验法被广泛应用于气候变化趋势的检测, 并具有较好的实际应用效果。本文在 Matlab 软件中利用 M-K 检验方法对不同量级降雨侵蚀力的时间突变进行检验。

1.3.4 变异系数 (C_v) 本文使用 Excel 软件对侵蚀性降雨量和不同量级降雨侵蚀力进行变异系数计算, 其大小可以用来衡量气象要素的离散程度。 $C_v \leq 0.1$ 时为弱变异, $0.1 < C_v < 1$ 时为中等变异, $C_v \geq 1$ 时为强变异。

2 结果与分析

2.1 年侵蚀性降雨量、降雨侵蚀力特征分析

吉林省 1980—2022 年平均侵蚀性降雨量为 $420.04\ mm$, 多年侵蚀性降雨量变化范围为 $281.55\sim 605.3\ mm$; 多年平均降雨侵蚀力为 $1\ 967.12\ (MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h)$, 多年降雨侵蚀力介于 $1\ 109.09\sim 3\ 133.23\ (MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h)$ 。由图 1 可知, 年降雨侵蚀力和年侵蚀性降雨的年际波动变化过程基本一致, 这与邱美娟等^[17]对吉林省降雨侵蚀力时空分布特征研究所得出的结论一致。年降雨侵蚀力和年侵蚀性降雨的极值分布差异显著, 年降雨侵蚀力最大值出现在 2020 年, 最小值出现在 2009 年; 而侵蚀性降雨量最大值出现在 2022 年, 最小值出现在 2011 年; 年降雨侵蚀力和侵蚀性降雨与时间的线性拟合结果表明在 1980—2022 年年降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量呈增加趋势; 5 a 滑动平均曲线显示, 降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量随时间变化总体呈现出先波动减少后波动增加的趋势, 极值点出现在 2003—2004 年。年均降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的 C_v 值分别为 0.27 和 0.2,

均属于中等变异, 最大值分别为 2.82 和 2.15, 说明年均降雨侵蚀力的年际变化波动性要大于年侵蚀性降雨。

图 2 为年均降雨侵蚀力和侵蚀性降雨的 M-K 突变检验结果。由图 2 可以看出, 在 1980—2022 年年降雨侵蚀力突变点多于侵蚀性降雨的突变点, 即年降雨侵蚀力的年际变化波动性更大。1980—1999 年降雨侵蚀力主要以上升趋势为主, 且在 1987 年降雨侵蚀力通过了显著性检验, 上升趋势达到显著, 2000—2018 年降雨侵蚀力呈波动下降趋势, 2019—2022 年降雨侵蚀力呈上升趋势。年侵蚀性降雨量在 1980—2022 年未发生显著变化, 1980—2018 年主要以下降趋势为主, 2019 年开始呈现上升趋势。

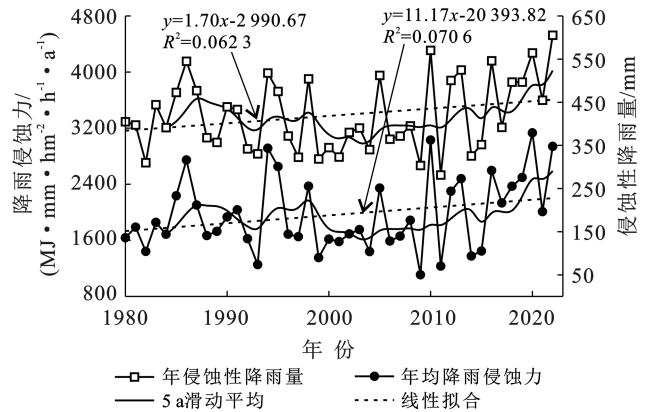


图 1 吉林省年均降雨侵蚀力和年均侵蚀性降雨量变化

Fig.1 Annual mean rainfall erosivity and annual mean rainfall erosivity in Jilin Province

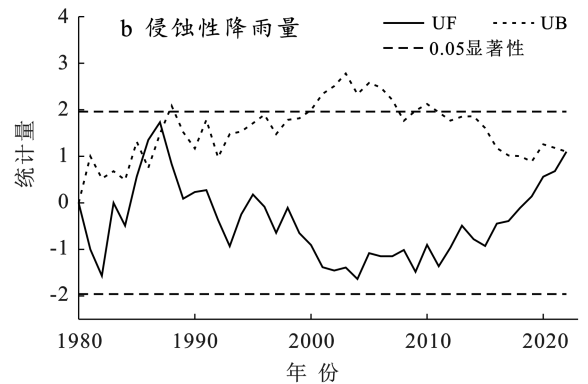
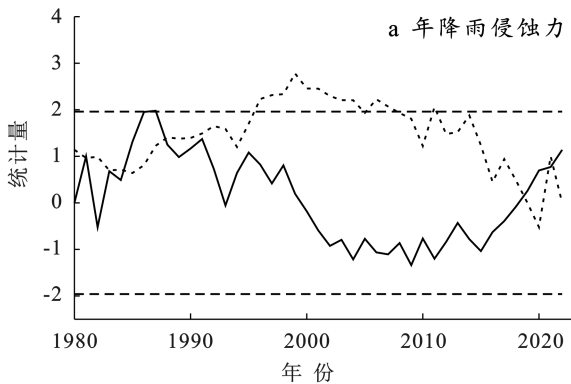


图 2 吉林省年均降雨侵蚀力和年均侵蚀性降雨量 M-K 突变分析

Fig.2 Analysis of M-K mutation of annual mean rainfall erosivity and annual mean rainfall erosivity in Jilin Province

2.2 不同量级降雨侵蚀力年际变化特征

图 3 为不同量级降雨侵蚀力的年际变化及 5 a 滑动平均曲线变化趋势特征。由图 3 可知, 研究期内吉林省各量级降雨侵蚀力变化趋势存在差异, 各量级降雨侵蚀力随年际变化均有不同程度的上升幅度, 其中, 暴雨侵蚀力上升幅度最大, 气候倾向率为 $57.70 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$, 中雨上升幅度最小, 气候倾向率为 $5.80 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$, 大雨和大暴雨降雨侵蚀力上升幅度分别为 $31.00 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$ 和 $15.40 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$ 。由 5 a 滑动平均曲线可以看出, 中雨侵蚀力年际变化过程中存在 1 次明显波动, 1 个明显的波谷出现在 2000 年, 在 1980—2000 年中雨侵蚀力呈波动下降趋势, 2000—2022 年呈波动上升趋势, 最大值出现在 2022 年, 为 $801.74 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。大雨侵蚀力年际变化过程中存在 2 次明显的波动, 波峰出现在 1986 年和 2022 年, 波谷出现在 1997 年。暴雨侵蚀力无明显波动情况, 研究期内总体呈波动上升趋势, 多年平均暴雨侵蚀力为

$506.47 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 最小值为 $118.13 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 出现在 2009 年, 最大值为 $1256.22 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 出现在 2020 年。并不是所有年份都会产生大暴雨侵蚀力, 故大暴雨侵蚀力存在 1 个明显波峰和多个波谷, 波峰出现在 1995 年, 侵蚀力为 $615.9 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 相较于其他降雨侵蚀力, 大暴雨侵蚀力年际间升降波动变化最为频繁。

由表 2 可知, 不同量级降雨侵蚀力参数变化差异较大。研究期内, 特大暴雨侵蚀力仅在 2017 年吉林省永吉地区出现 1 次, 数值平均化后比例较小, 不再将其用到各量级降雨侵蚀力分析中。大雨侵蚀力占总降雨侵蚀力的比值最大, 达 36.68% , 其次是中雨侵蚀力, 比例为 30.91% , 大暴雨侵蚀力比例最小, 为 6.57% , 但其变异系数最大, 达 1.06, 强变异水平, 其他量级降雨侵蚀力均属中等变异水平。不同量级降雨侵蚀力的 C_v 值、最大值与均值的比值均与降雨量等级呈正相关关系, 即随降雨侵蚀力等级的提升, C_v 值、最大值与均值的比值也随之增大。

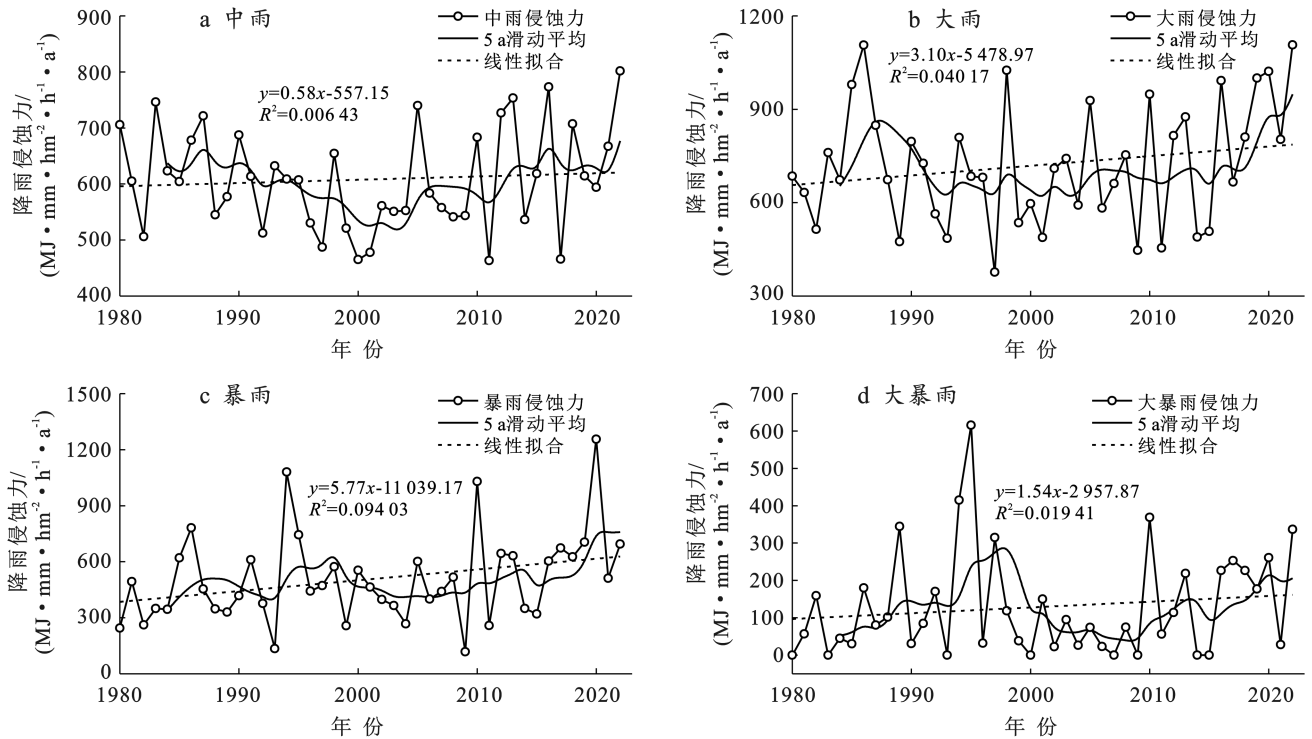


图 3 吉林省不同量级降雨侵蚀力年际变化

Fig.3 Interannual changes of rainfall erosivity of different orders of magnitude in Jilin Province

表 2 吉林省不同量级降雨侵蚀力年际变化参数

Table 2 Inter-annual variation parameters of rainfall erosivity of different orders of magnitude in Jilin Province

各等级降雨侵蚀力	均值	最大值	最小值	气象倾向率	C_v	最大值/均值	最大值/最小值	年降雨侵蚀力贡献度/%
中雨	608.12	801.74	463.53	5.8	0.15	1.32	1.73	30.91
大雨	721.61	1 106.8	376.86	31	0.27	1.53	2.94	36.68
暴雨	506.47	1 256.22	118.13	57.7	0.46	2.48	10.63	25.75
大暴雨	129.16	615.9	0	15.4	1.06	4.77		6.57
特大暴雨	1.74	74.96	0		6.48	43		0.09
年均	1967.12	3 133.23	1 109.09	111.7	0.27	1.59	2.83	100

注:降雨侵蚀力单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$ 。

2.3 不同量级降雨侵蚀力年内变化特征

如图 4 所示,不同量级降雨侵蚀力年内分布呈现出先增后减的变化特征,各月分布情况存在较大差异,降雨侵蚀力年内分布集中在 6—8 月份,这与赵萌醒^[28]研究结果相同。10 月至翌年 5 月,各量级降雨侵蚀力与降雨量成反比,即随着降雨量级的提升,降雨侵蚀力减少,中雨侵蚀力在该时段起主导作用;6—9 月,大雨侵蚀力逐渐增加,在年降雨侵蚀力的变化中占据了主导地位,此外,该时段内暴雨侵蚀力也在不断增加,其侵蚀力大小和主导地位逐渐超过了中雨侵蚀力。吉林省地区汛期为每年的 6—8 月份,该时段内各量级降雨侵蚀力占相应各量级年降雨侵蚀力的比,随着降雨量级的提升,降雨侵蚀力比例也随之增加,比例分别为:中雨侵蚀力 66.88%,大雨侵蚀力 80.51%,暴雨侵蚀力 87.38%,大暴雨侵蚀力 93.28%。

大暴雨侵蚀力出现时期最为集中,分布在 6—9 月份,最大值出现在 7 月,为 61.02 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$;中雨侵蚀力分布最为均匀,全年均有发生,最大值出现在 7 月,为 152.46 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$;大雨和暴雨最大值分别出现在 7 月和 8 月,为 244.45 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$,196.47 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$ 。

2.4 不同量级降雨侵蚀力空间分布特征

图 5 为利用克里金插值法对全省各站点不同量级降雨侵蚀力进行插值得到的各量级降雨侵蚀空间分布。由图 5 可知,吉林省侵蚀性降雨量和年均降雨侵蚀力空间分布基本一致,侵蚀性降雨量和年均降雨侵蚀力值均表现为:南部地区>中部地区>东部地区>西部地区,这与赵萌醒^[28]所得出的吉林省 2005,2010 和 2015 年降雨侵蚀力空间分布特征一致,此外,多年来吉林省水利厅发布的《水土保持公报》中吉林省水力侵

蚀强度分布也表现出南部地区的侵蚀强度大,陈建军等^[29]对吉林省土壤侵蚀敏感性的研究发现吉林省高度敏感区也主要集中在南部地区。各量级降雨侵蚀力空间分布存在差异性,中雨侵蚀力值呈现中南部大、东部偏大、西部偏小的空间格局,最大值为 897.84 (MJ·mm)/(hm²·h),出现在南部东岗,最小值为 359.19 (MJ·mm)/(hm²·h),出现在西部白城;大雨侵蚀力值空间分布规律和年降雨侵蚀力值空间分布规律最为相近,呈现出中南部偏大、东部和西部偏小,最大值出现在南部集安[1 160.25 (MJ·mm)/(hm²·h)],最小值在东部罗子沟[459.15 (MJ·mm)/(hm²·h)];暴雨侵蚀力值表现为南部最大,中西部偏大、东部偏小的空间格局,最大值为 1 256.08 (MJ·mm)/(hm²·h),在南部集安,最小值为 185.37 (MJ·mm)/(hm²·h),在东部罗子沟;大暴雨侵蚀力值空间分布有别于其他量级降雨侵蚀力值,其最值出现在中部地区,并表现出西部地区降雨侵蚀力大于东部地区,呈现出中西部偏

大、东部小的空间分布格局,最大值出现在南部永吉,为 368.3 (MJ·mm)/(hm²·h),部分地区在研究期内未产生大暴雨,故最小值为 0 (MJ·mm)/(hm²·h)。

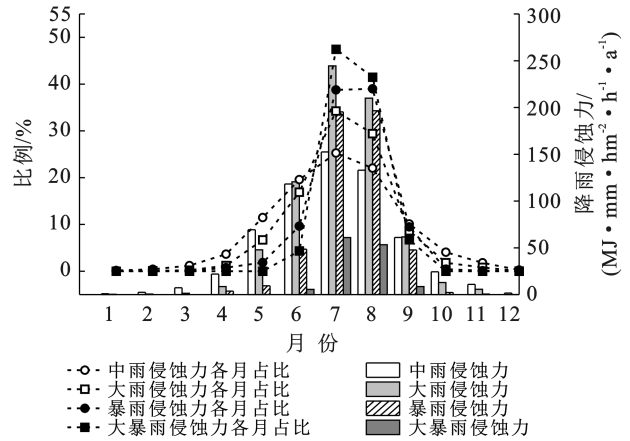


图 4 吉林省各月份不同量级降雨侵蚀力分布及比例
Fig.4 Distribution and proportion of rainfall erosivity of different orders in each month in Jilin Province

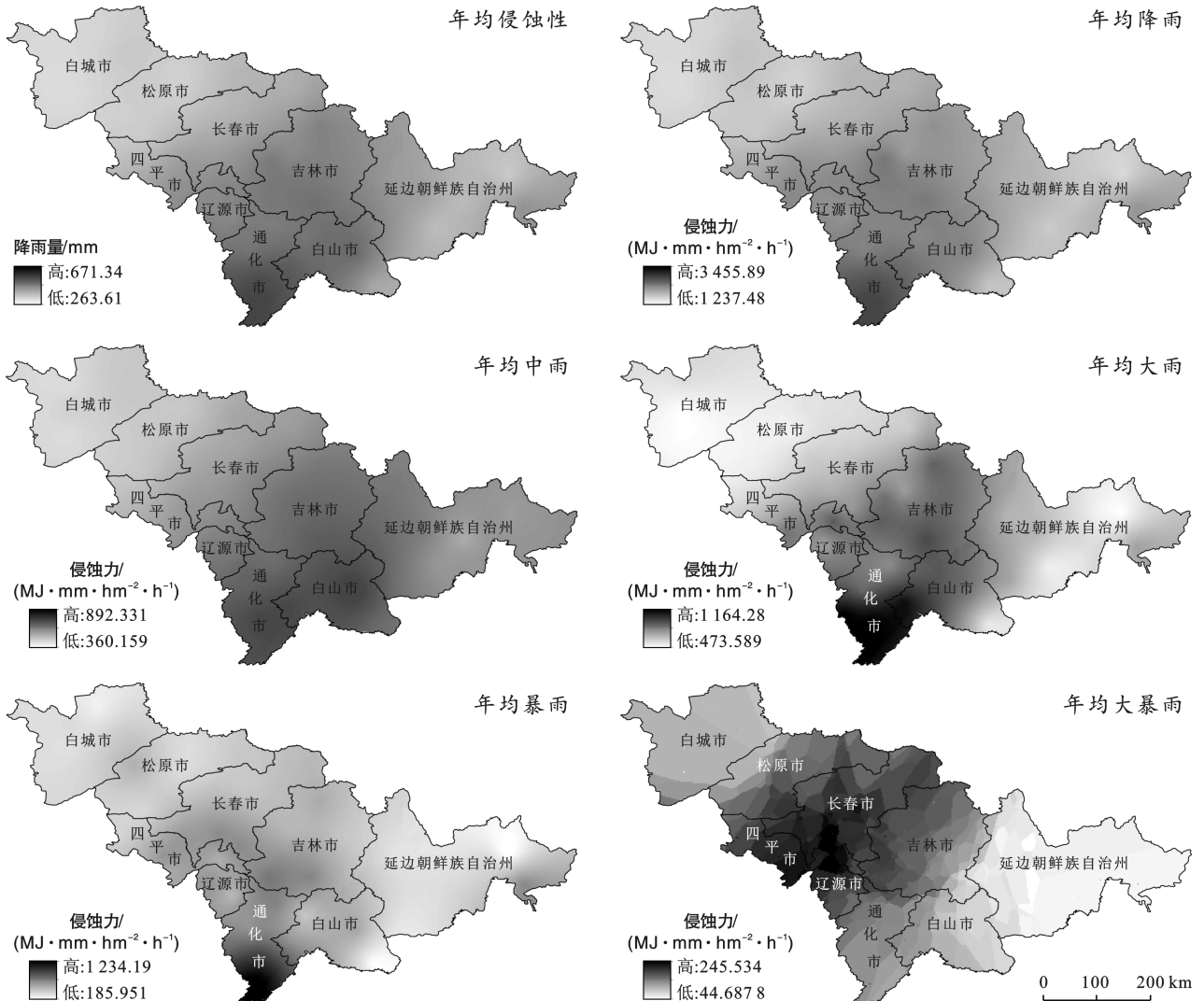


图 5 吉林省侵蚀性降雨量及不同量级降雨侵蚀力空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of erosive rainfall and rainfall erosivity of different magnitudes in Jilin Province

应用 Excel 计算出的各站点不同量级降雨侵蚀力随年份变化的气候倾向率,后经克里金插值得到的不同量级降雨侵蚀力气候倾向率空间分布特征,如图 6 所示。由图 6 可知,不同地区不同量级降雨侵蚀力的气候倾向率不同,各量级降雨侵蚀力随年份变化也表现出不同的发展趋势。中雨侵蚀力总体表现为西部、中部和南部地区呈上升趋势,且西部地区上升幅度较大,东部地区呈下降趋势。大雨侵蚀力西部地区呈现出明显的下降趋势,中部、南部和东部地区均有

不同程度的上升趋势。各地区暴雨侵蚀力气候倾向率均大于 0 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$,即全省各地区暴雨侵蚀力均有不同程度的上升趋势,其中,中部地区上升幅度最大,最大上升幅度为 $172.73 (\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$,出现在吉林市。大雨侵蚀力自西向东表现出下降—升高—下降的趋势,其中,最大上升幅度为 $270.5 (\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$,出现在永吉,公主岭地区下降幅度最大,为 $-155.71 (\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$ 。

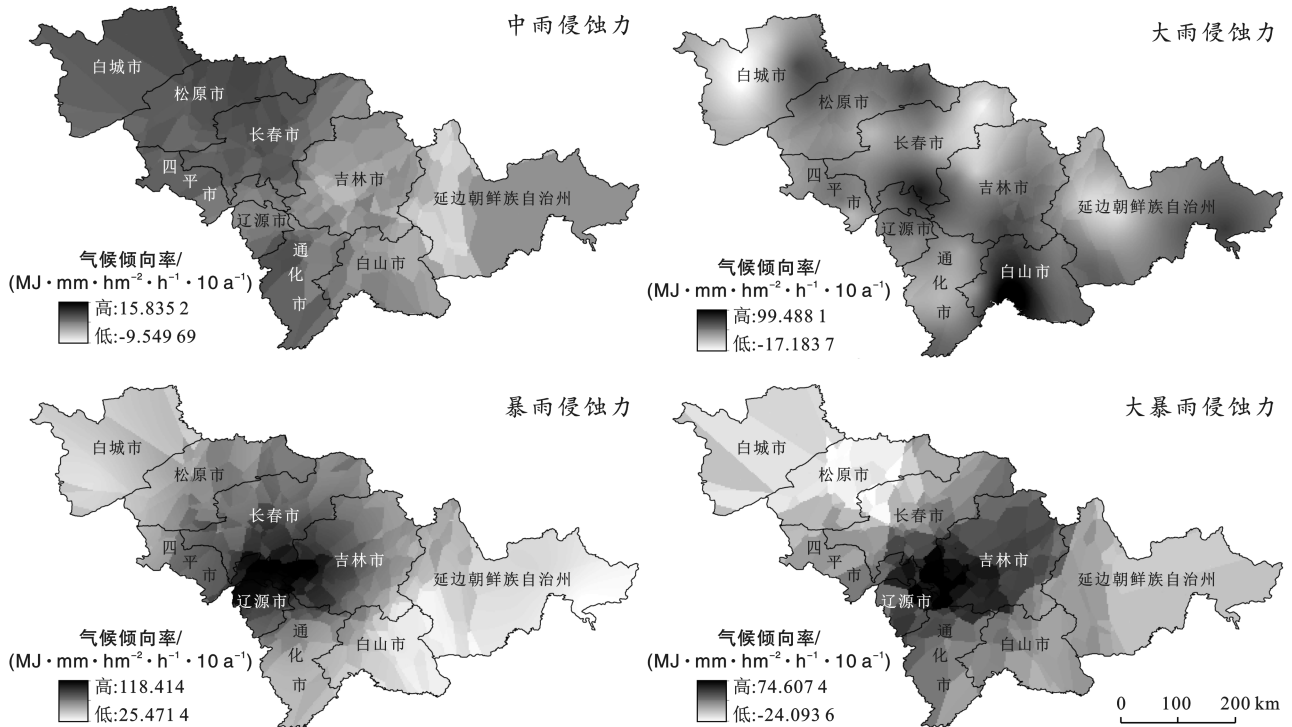


图 6 吉林省不同量级降雨侵蚀力气候倾向率空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of climatic tendency rates of rainfall erosivity at different orders of magnitude in Jilin Province

2.5 不同量级降雨侵蚀力突变检验

图 7 为应用 MATLAB 软件对不同量级降雨侵蚀力进行 Mann-Kendall 突变检验的结果。由图 7 可知,1980—2022 年吉林省中雨和大雨降雨侵蚀力主要以下降趋势为主,暴雨降雨侵蚀力以上升趋势为主,大暴雨降雨侵蚀力随时间变化呈现出先上升后下降的趋势。中雨侵蚀力在研究期内总体以波动下降趋势为主,在 2000—2004 年、2008—2009 年、2011 年通过 0.05 显著性检验,下降趋势达到显著;大雨侵蚀力在 1980—2022 年 M-K 突变检验的 UF 曲线均位于 0.05 置信区间内,即大雨侵蚀力在研究期内未发生显著性变化趋势,存在多个突变点,但均未通过显著性检验,在 1985—1991 年和 2019—2022 年 UF 曲线为正值,说明在这两段时期大雨侵蚀力呈上升趋势;暴雨侵蚀力在研究期内以波动上升趋势为主,且

在 2022 年达到显著上升趋势;大暴雨侵蚀力在 1980—2005 年和 2018—2022 年以波动上升趋势为主,2006—2017 年呈波动下降趋势,存在多个突变点,但均未通过显著性检验。

3 讨论

吉林省多年平均侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力年内变化和空间分布情况基本一致,空间分布呈现出中南高、东西低格局,证明降雨侵蚀力主要受侵蚀性降雨量的影响。吉林省受季风和西风环流的影响,导致降雨侵蚀力年内分配极度不均,超 50% 以上的降雨侵蚀力集中在 6—8 月,其中大雨侵蚀力贡献率最高,中雨侵蚀力次之。吉林省不同量级降雨侵蚀力空间上发展趋势表现为,暴雨侵蚀力在各地均呈上升趋势外,其余各量级降雨侵蚀力均呈现上升下降相结

合的趋势,主要表现为中部和南部地区上升,东部和西部地区下降趋势。不同量级降雨侵蚀力的空间分布差异明显,年均降雨侵蚀力空间分布主要受中雨和暴雨侵蚀力影响,高值区集中分布在中南部,应针对该地区提前制定防止大雨引起危害的保护性措施。此外,在研究中发现,一些地区其单次暴雨或大暴雨量占全年降雨量的 50% 以上,在进行年均分析过程中,这

一部分数据被平均化和弱化。赵平伟等^[24]研究认为土壤侵蚀受降雨强度影响较大,Shmilovitz Y 等^[30]研究发现,在耕地环境中,土壤流失主要是由短时强暴雨所引起的。因此,下一步将开展针对单次降雨过程所产生降雨侵蚀力的计算方法研究,以期为各地区提升暴雨风险灾害的预警能力和提前制定防治暴雨所引起的农业生产危害的保护性措施提供理论参考。

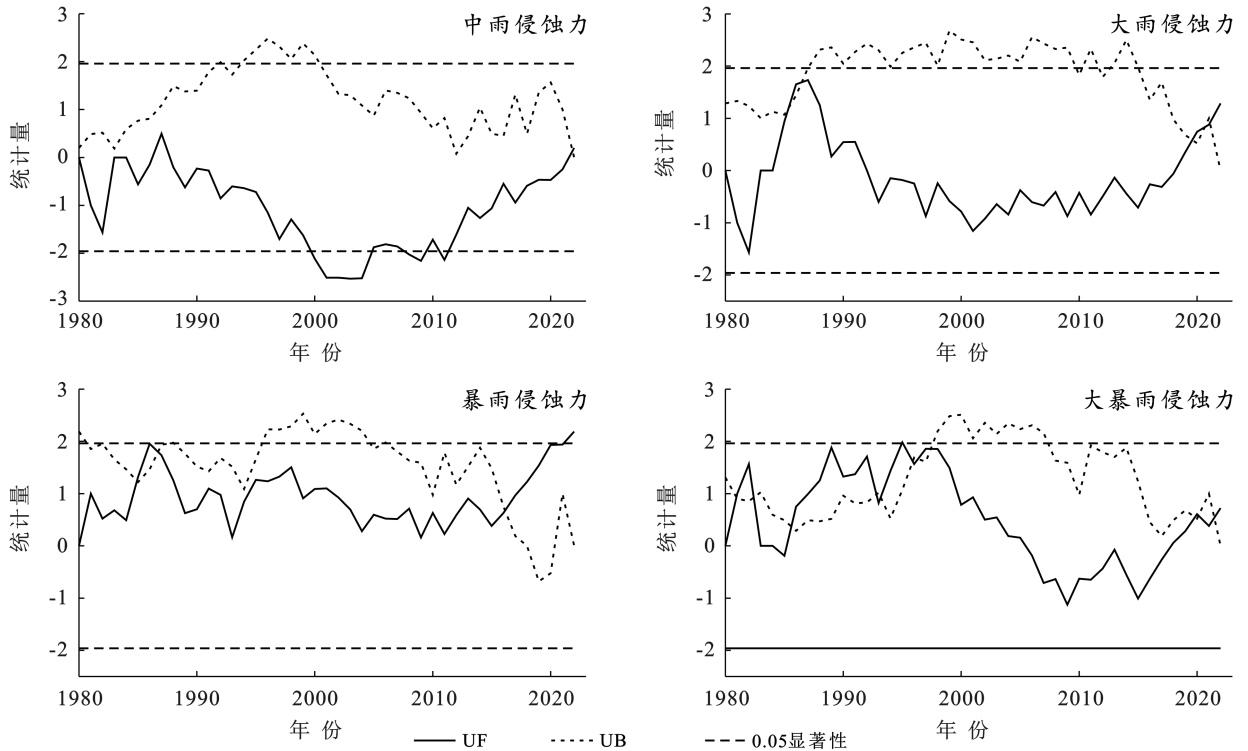


图 7 吉林省不同量级降雨侵蚀力 M-K 突变检验

Fig.7 M-K mutation test of rainfall erosivity of different orders of magnitude in Jilin Province

4 结论

(1) 吉林省多年平均侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力分别为 420.04 mm 和 1 967.12 (MJ·mm)/(hm²·h),二者年际波动变化基本一致,均呈上升趋势;在空间分布上均呈现出东西低、中南高的格局。

(2) 不同量级降雨侵蚀力随年际变化均呈现出不同程度的上升趋势,其中,暴雨侵蚀力上升幅度最大,为 57.7 (MJ·mm)/(hm²·h·10 a),中雨侵蚀力上升幅度最小,为 5.8 (MJ·mm)/(hm²·h·10 a)。

(3) 吉林省年降雨侵蚀力主要是由中雨和暴雨所产生的,且随降雨侵蚀力等级的提升,各量级降雨侵蚀力年际变化越剧烈,中雨、大雨、暴雨降雨侵蚀力的变异系数均属于中等变异,而大暴雨侵蚀力变异系数达 1.06,为强变异。

(4) 各量级降雨侵蚀力年内分布极不均匀,集中分布在 6—8 月,总体呈现出单峰型变化。

(5) 各量级降雨侵蚀力空间分布上总体呈现中、南高,东、西低的格局,中雨、大雨、暴雨侵蚀力的高值出现在南部地区,大暴雨侵蚀力的高值出现在中部地区,各量级降雨侵蚀力在中部和南部地区呈上升趋势,在西部和东部部分地区呈下降趋势。

(6) 今后将进一步开展不同量级降雨下的降雨侵蚀力与径流小区和河流水文资料分析的验证工作。

参考文献 (References)

- [1] 董林垚,郑艳霞,程冬兵,等.气候变化对降雨侵蚀力的影响研究综述[J].长江科学院院报,2015,32(3):59-63.
Dong Linyao, Zheng Yanxia, Cheng Dongbing, et al. Review on the impact of climate change on rainfall erosivity [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(3): 59-63.
- [2] 朱继前,韩美,徐泽华,等.淮河流域不同量级降雨时空分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2019,26(4): 87-95.

- Zhu Jiqian, Han Mei, Xu Zehua, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and factors of different magnitude rainfall in Huaihe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 87-95.
- [3] 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 Chengguang, Chen Xiaohong, Wang Zhaoli, 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.
- [4] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss Equation1 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1959, 23(3): 246.
- [5] 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 Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [6] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4): 287-306.
- [7] 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(1/2): 30-48.
- [8] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 547-558.
- [9] Chen Yuhong, Xu Menghua, Wang Zhaoli, et al. Reexamination of the Xie model and spatiotemporal variability in rainfall erosivity in mainland China from 1960 to 2018 [J]. *Catena*, 2020, 195: 104837.
- [10] Yu Bofu, Rosewell C J. A robust estimate of the R-factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*, 1996, 39(2): 559-561.
- [11] 邢贞相, 段维义, 刘明阳, 等. 四种网格化降水产品估算中国大陆区域降雨侵蚀力比较[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 100-109.
- Xing Zhenxiang, Duan Weiyi, Liu Mingyang, et al. Comparison of the four gridded precipitation products for estimating regional rainfall erosivity in mainland China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(5): 100-109.
- [12] 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, 9(4): 7-18.
- Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4): 7-18.
- [13] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. *地理研究*, 2013, 32(2): 245-256.
- Liu Bintao, Tao Heping, Song Chunfeng, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009 [J]. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 245-256.
- [14] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 105-113.
- Yin Shuiqing, Xue Xiaochan, Yue Tianyu, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 105-113.
- [15] 戴海伦, 苑爽, 张科利, 等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 37-41.
- Dai Hailun, Yuan Shuang, Zhang Keli, et al. Study on the spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 37-41.
- [16] 穆兴民, 戴海伦, 高鹏, 等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3): 37-43.
- Mu Xingmin, Dai Hailun, Gao Peng, et al. Spatial-temporal characteristics of rainfall erosivity in Northern Shaanxi Region in the Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(3): 37-43.
- [17] 邱美娟, 穆佳, 郭春明, 等. 1961—2015 年吉林省降雨侵蚀力的时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 295-302.
- Qiu Meijuan, Mu Jia, Guo Chunming, et al. Temporal-spatial variation characteristics of rainfall erosivity in Jilin Province during 1961 to 2015 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 295-302.
- [18] 魏兴萍, 肖成芳, 张爱国. 重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度对土壤侵蚀风险的评估[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 128-139.
- Wei Xingping, Xiao Chengfang, Zhang Aiguo. Assessment of rainfall erosivity and erosivity density on the risk of soil erosion in Chongqing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 128-139.
- [19] 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.
- Gao Ge, Yin Shuiqing, Chen Tao, et al. Spatiotemporal variation and cause analysis of rainfall erosivity in the Yangtze River Basin of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,

- 38(3):84-92.
- [20] 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 Xudong, Qi Shi, Chen Jiadong, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of rainfall erosivity in the nandu river basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(11):1464-1473.
- [21] 赵平伟, 郭萍, 李成武, 等. 云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12):2135-2141.
- Zhao Pingwei, Guo Ping, Li Chengwu, et al. Characteristic analysis of rainfall erosivity at each level in Yunnan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12):2135-2141.
- [22] 吴洁玲, 查轩, 陈世发, 等. 1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):21-26.
- Wu Jieling, Zha Xuan, Chen Shifa, et al. Variations of rainfall erosivity of different magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4):21-26.
- [23] 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 Yuxia, Fan Guozhong, Liu Shujing, et al. Spatiotemporal 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.
- [24] 赵平伟, 郭萍. 1980—2013 年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征[J]. 地理科学, 2015, 35(10):1306-1311.
- Zhao Pingwei, Guo Ping. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in Northwest Yunnan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10):1306-1311.
- [25] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10):209-219.
- Chen Zhengfa, Shi Dongmei, He Wei, et al. Spatial-temporal distribution and trend of rainfall erosivity in Yunnan Province [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10):209-219.
- [26] 高峰, 詹敏, 战辉. 黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J]. 中国水土保持, 1989(11):19-21.
- Gao Feng, Zhan Min, Zhan Hui. Study on criteria of erosive rain in farmland of chernozem in Heilongjiang Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(11):19-21.
- [27] 王瀛, 杨扬, 刘宝元, 等. 中国水蚀区 5 种典型土壤的侵蚀性降雨阈值比较[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4):227-233.
- Wang Ying, Yang Yang, Liu Baoyuan, et al. Erosive rainfall thresholds for five typical soils in water erosion region of China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4):227-233.
- [28] 赵萌醒. 基于 RUSLE 模型的吉林省水力土壤侵蚀定量研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Zhao Mengxing. Quantitative study on hydraulic soil erosion in Jilin Province based on RUSLE model [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.
- [29] 陈建军, 张树文, 李洪星, 等. 吉林省土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3):49-53.
- Chen Jianjun, Zhang Shuwen, Li Hongxing, et al. Assessment on sensitivity of soil erosion in Jilin Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(3):49-53.
- [30] Shmilovitz Y, Marra F, Wei Haiyan, et al. Frequency analysis of storm-scale soil erosion and characterization of extreme erosive events by linking the DWEPP model and a stochastic rainfall generator [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 787:147609.