

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.06.015

龙训建, 李天阳, 罗宏森, 等. 重庆市不同生态功能区的降雨侵蚀时空分异研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(6): 162-174.

重庆市不同生态功能区的降雨侵蚀时空分异研究

龙训建¹, 李天阳¹, 罗宏森¹, 叶琰¹,
叶勇¹, 张钰欣¹, 王子衿²

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆两江新区西南大学附属中学, 重庆 401120

摘要: 水土流失是影响区域生态安全的重要因素, 深入了解区域降雨侵蚀时空异质性有利于更有针对性地实施水土保持措施。基于重庆市 32 个国家级气象站点 2009—2022 年逐小时降雨数据, 应用降雨侵蚀力简易模型计算了研究区内不同生态功能区的降雨侵蚀力和侵蚀密度的时空分异性。结果表明: ① 各生态功能区的降雨侵蚀力和侵蚀密度年际变化的标准差为 $340.01 \sim 687.17 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.15 \sim 0.21 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 变异系数为 $0.16 \sim 0.25$ 和 $0.05 \sim 0.08$; 年内分布表现为夏季最高, 冬季最低, 其中夏季降雨侵蚀力占比 $50.78\% \sim 55.72\%$; 侵蚀密度作为非共识性指标, 在揭示侵蚀风险方面比降雨侵蚀力更为敏感。② 在年际变化中, 降雨侵蚀力的年均值高值区主要分布在大巴山生态屏障区和三峡库区核心区生态涵养区的部分区域, 低值区位于丘陵谷地生态品质提升区; 年降雨侵蚀力最大值出现在 2021 年大巴山生态屏障区的城口县, 达 $4\,676.44 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 最小值出现在 2011 年丘陵谷地生态品质提升区的永川区, 仅 $806.25 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; 季节尺度上, 春季高值区发生在武陵山生态屏障区, 夏、秋时段的高值区出现在大巴山生态屏障区和三峡库区核心区生态涵养区以中山地貌为主的区域, 冬季整体变化较弱。③ 降雨侵蚀密度的空间分布特征表明, 高值区分布在大巴山生态屏障区, 低值区分布在大娄山生态屏障区; 季节尺度上的高值区存在空间差异, 春季高值区发生在武陵山生态屏障区, 夏季高值区发生在大巴山生态屏障区和丘陵谷地生态品质提升区的部分区域, 秋、冬季高值区发生在三峡库区核心区生态涵养区。

关键词: 水土保持; 降雨侵蚀力; 侵蚀密度; 生态功能区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)06-0162-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal Differentiation of Rainfall Erosion in Different Ecological Functional Zones of Chongqing

LONG Xunjian¹, LI Tianyang¹, LUO Hongsen¹, YE Yan¹,
YE Yong¹, ZHANG Yuxin¹, WANG Zijin²

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. High School Affiliated to Southwest University, Chongqing 401120, China

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42107347); 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2023TIAD-KPX0075)。

作者简介: 龙训建, 博士, 副教授, 主要从事水资源利用及水环境保护研究。

通信作者: 叶琰, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。

Abstract: Rainfall erosion plays a critical role in influencing regional ecological security. Detailed understanding the spatial and temporal heterogeneity of regional rainfall erosion is conducive to more targeted implementation of soil and water conservation measures. This study utilized hourly rainfall data from 32 national meteorological stations in Chongqing spanning from year 2009 to 2022 to examine the spatio-temporal variability of rainfall erosivity and erosion density within ecological environmental management units. The results showed that: ① The standard deviation of inter-annual changes in rainfall erosivity and erosion density across various ecological functional zones ranged from 340.01 to 687.17 MJ · mm/(hm² · h) and 0.15 to 0.21 MJ/(hm² · h · a), with a coefficient of variation of 0.16 to 0.25 and 0.05 to 0.08, respectively. The distribution was uneven throughout the year, with the highest values occurring in summer and the lowest in winter. Summer rainfall erosivity accounted for 50.78% to 55.72% of the total, indicating its significant impact on erosion risks compared to other seasons. As a non-consensus index, erosion density is more sensitive than rainfall erosivity in revealing erosion risk. ② In terms of spatial distribution, high annual average values of rainfall erosivity were concentrated in the Daba Mountain ecological barrier zone and part of the Three Gorges reservoir area core ecological conservation zone, while low values were found in the ecological quality improvement zone of hilly valleys. The maximum annual rainfall erosivity occurred in 2021 in Chengkou County, within the Daba Mountain ecological barrier zone, reaching 4 676.44 MJ · mm · /(hm² · h). The minimum value was recorded in 2011 in Yongchuan District, located in the ecological quality improvement zone of hilly valleys, at only 806.25 MJ · mm · /(hm² · h). For seasonal scale, the high-value area was located in the Wuling Mountain ecological barrier zone in spring, while during summer and autumn, they were distributed in the Daba Mountain ecological barrier zone and the middle mountain part of the Three Gorges reservoir area core ecological conservation zone. However, the variation in winter was relatively insignificant. ③ The characteristics of spatial distribution of erosion density indicated that high annual average values were concentrated in the Daba Mountain ecological barrier zone, while low values were in the Daloushan ecological barrier zone. There were seasonal spatial differences. As discussed, high-value zones in spring occurred in the Wuling Mountain ecological barrier zone. In summer, the high-value zones present in Daba Mountain ecological barrier zone and parts of the ecological quality improvement zone of hilly valleys. While the high-value zones shifted to the Three Gorges reservoir area core ecological conservation zone during autumn and winter seasons.

Key words: soil and water conservation; rainfall erosivity; erosion density; ecological function regionalization

土壤侵蚀的本质是土壤或其他地面组成物质受到自然营力作用或自然营力与人类活动的综合作用被剥蚀、破坏、分离、搬运和沉积的过程^[1-2]。土壤侵蚀形式和影响因子多种多样,气候因子是土壤侵蚀最主要的自然影响因子,降雨则是最直接评价土壤侵蚀潜力的因子^[3-5]。降雨侵蚀具有发生范围广泛、局部破坏性强的特点,因此常被作为水土保持工作中估算土壤流失的重要因子之一^[6-8]。侵蚀密度指评价单元或评估地块上发生土壤侵蚀模数的高低程度,可以直观表征土壤流失对降雨事件的敏感性,是一个非共识性的水土保持工作评价指标^[9-10]。

当今时代,生态环境保护已成为全球关注的焦点^[11-14]。为有效解决生态环境恢复中的水土流失问题,土壤侵蚀与环境变化的相关定量和关系模型的研究发挥了重要的促进作用^[15-17],如在研究手段上,Sooryamol等^[18]应用SWAT模型模拟评估了小喜马拉雅山地区小流域气候变化对土壤侵蚀的影响,为保护区域脆弱环境提供了可靠的土壤侵蚀评估成果。Chen等^[19]在对多个生态系统的可持续维护实证研究中指出,目前在生态功能方面的研究大多侧重于对生态保护区的空间识别和优化,人类发展需求及其对生态保护的影响研究还不全面。此外,受数据限制的影响,大量研究集聚在大尺度模式或气象融合产品的拟合评估方面,以实现生态环境保护在宏观层面的关注与决策^[20-22]。针对不同区域实际情况建立不

同指标和不同数据精度的降雨侵蚀力简易模型,仅需较小时间尺度的降雨量数据即可获得相对可接受的具有实际工作指导意义的相应成果^[23],事实上却因地面气象站点实测降雨数据的多种限制导致开展相关评估研究工作应用不足^[24-25]。单纯的区域降雨侵蚀力时空特征研究成果,尚未建立起以生态功能区为单元的、能与生态环境防治相关的、系统性的直接支撑关系。

生态功能区是在生态学原理和方法的基础上,基于生态系统目标、自然规律和人类活动的客观认识,综合考虑不同自然区域特征、区域环境保护和资源可持续开发而划分的多种功能与保护对策的区域^[26]。龙训建等^[27-28]分别以降雨侵蚀力 EI_{30} 计算公式和章文波的日雨量简易算法模型对降雨侵蚀力时空特征开展了研究,但该研究成果以行政区域划分为基础,尚不能很明确地解释重庆市各生态功能区的降雨侵蚀时空特征,对指导区域水土保持工作还存在一定的提升空间。此外,估算降雨侵蚀力和侵蚀密度能够较好地评估区域土壤侵蚀时空分布特征,也成为区域生态环境可持续防治工作中更为可靠的参考依据^[29-31]。基于此,本研究以重庆市生态功能区为研究单元,从年、季、月多种时间尺度探讨降雨侵蚀力和侵蚀密度的时空变化特征;明晰各生态功能区在年、季尺度的空间分布差异,为更小尺度的水土流失防治和生态功能保护提供参考,促进区域自然环境与社会经济的协同共生发展。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况和数据

重庆市位于中国内陆西南部、长江上游地区,市境面积 8.24 万 km^2 ,辖 38 个区县(26 区、8 县、4 自治县)。常住人口 3 213.3 万人,城镇化率 70.96%;境内流域面积大于 50 km^2 的河流共 374 条,其中长江横贯全境,流程 691 km;多年平均降雨量 1 100~1 200 mm,降雨量相对充沛但时空分布不均。重庆市四季分明,采用全国统一的四季划分结果,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。

本次使用的 32 个国家级气象站点 2009—2022 年逐小时降雨量气象产品由中国气象数据网(<http://www.cma.gov.cn>)和重庆唯胜气象信息有限公司提供。在国家重点生态功能区划分基础上,重庆市规划和自然资源局 2022 年发布了《重庆市国土空间生态保护修复规划(2021—2035 年)》,聚焦“长江上游重要生态屏障全面筑牢,山清水秀美丽之地基本建成”的总体目标,综合考虑山、水(湖)、林(草)、田 4 个主要要素,以保持长江生态原真性和完整性为核心,依托各地特色生态资源,针对性地划分适合重庆市市境市情的生态功能分区,即丘陵谷地生态品质提升区(HZ)、大巴山生态屏障区(DBZ)、三峡库区核心区生态涵养区(TZ)、大娄山生态屏障区(DLZ)、武陵山生态屏障区(WZ)。各气象站点和各生态功能区涉及的环境管控单元分布情况如图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨侵蚀力

综合比较现有的侵蚀性降雨日雨量划分标准,利用日雨量数据构建降雨侵蚀力模型^[32-33],以史东梅等^[34-35]、翁薛柔等^[25]在重庆市各小流域开展的多种降雨侵蚀力成果为参考依据,本研究选用史东梅等^[36]推荐的降雨侵蚀力简易计算模型计算日降雨侵蚀力($R_{\text{日}}$):

$$R_{\text{日}} = 2.294\ 4\ P_{\text{日}} + 0.066\ P_{\text{日}}^2 \quad (1)$$

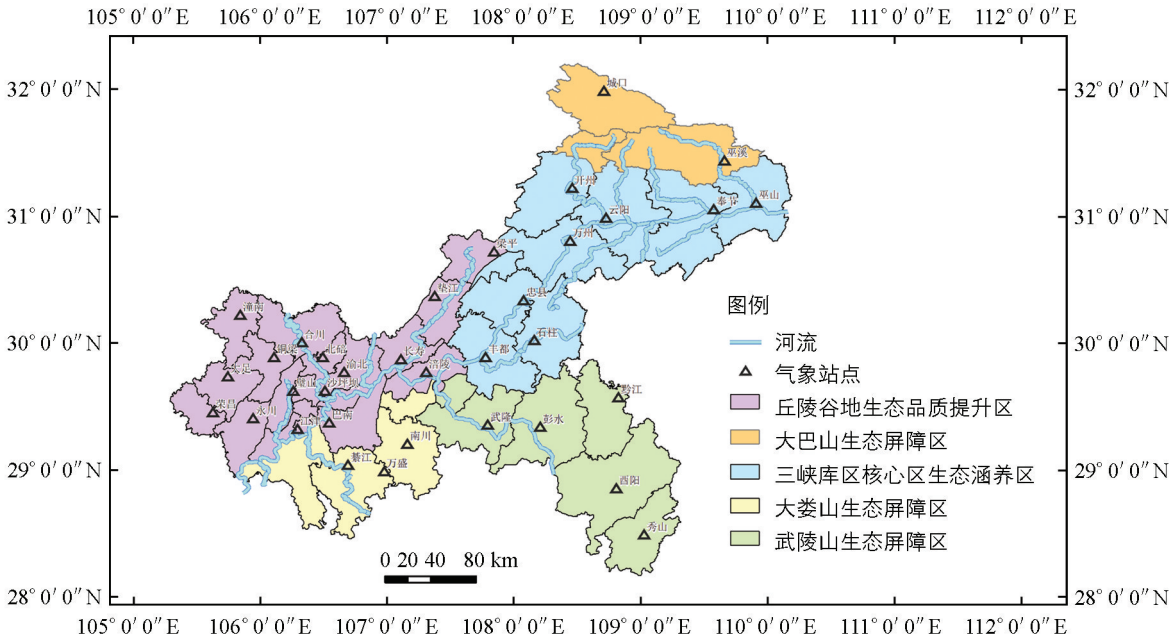
式中: $P_{\text{日}}$ 为日降雨量(mm), $P_{\text{日}} \geq 12\ \text{mm}$ 。各生态功能区及全市的降雨侵蚀力(R)采用面积加权法求得,对日降雨侵蚀力按月、季、年逐次累积得到对应时段的降雨侵蚀力。

1.2.2 侵蚀密度

单位时间内单位侵蚀性雨量产生的侵蚀强度称为侵蚀密度(E_{D})^[37],其计算公式为:

$$E_{\text{D}} = \frac{R}{P} \quad (2)$$

式中: R 为日、月、季、年降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; P 为日、月、季、年侵蚀性雨量(mm)。



审图号：渝 S(2024)058 号

图 1 研究区及气象站点位置

1.2.3 趋势变化和空间特征分析

在 Origin 2022 软件中绘制各生态功能区降雨侵蚀力和侵蚀密度箱线图、计算降雨侵蚀力和侵蚀密度的年际变异系数(C_v)和皮尔逊趋势系数(r):

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}}{\bar{R}} \tag{3}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(t - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2}} \tag{4}$$

式中: R_i 为第 i 年的降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; $\bar{R}$ 为多年平均降雨侵蚀力; n 为年份; $t = (n+1)/2$. C_v 越大, 表明年降雨侵蚀力波动幅度越明显. 皮尔逊趋势系数 $r > 0$, 表明降雨侵蚀力在研究时段内有线性增加的趋势, 反之则反; $|r|$ 大小表示随时间的增减幅度.

基于 GIS 中地统计学分析工具的空间插值优势, 在 ArcGIS 10.5 软件中用反距离权重法绘制降雨侵蚀力和侵蚀密度在不同时段的空间分布图, 并与生态功能区叠加, 生成基于生态功能区的降雨侵蚀力和侵蚀密度空间分布图.

2 结果与分析

2.1 时间变化特征

2.1.1 年际变化特征

以研究区内各生态功能区为基本单元, 统计得到各生态功能区降雨侵蚀力和侵蚀密度的变异参数结果. 由表 1 可知, 大巴山生态屏障区的雨量指标、降雨侵蚀力和侵蚀密度均为最高, 三峡库区核心区生态涵养区年均降雨量最小, 丘陵谷地生态品质提升区年均侵蚀雨量最小. 大巴山生态屏障区年均降雨量达 1 219.69 mm, 是重庆市年均降雨量的 1.15 倍; 丘陵谷地生态品质提升区年均降雨量仅 1 033.57 mm, 是

重庆市年均降雨量的 0.98 倍,是大巴山生态屏障区的 0.85 倍。大巴山生态屏障区年均侵蚀雨量在各生态功能区中最高,为 902.44 mm;占比也最高,为总降雨量的 73.99%,发生天数为 29.71 d/a。丘陵谷地生态品质提升区的年均侵蚀雨量最少,仅 696.50 mm,占总降雨量的 67.39%,发生天数仅为 24.70 d/a,比大巴山生态屏障区年平均少约 5 d。

各生态功能区降雨侵蚀力最大值出现在大巴山生态屏障区,最小值则位于大娄山生态屏障区,标准差变化范围为 340.01~687.17 MJ·mm/(hm²·h),变异系数为 0.16~0.25,皮尔逊趋势系数为 0.08~0.35,研究时段内各区域的降雨侵蚀力均呈微弱增加趋势。

侵蚀密度的多年平均值为 2.76~3.09 MJ/(hm²·h·a),最大值出现在大巴山生态屏障区,最小值出现在大娄山生态屏障区;标准差变化范围为 0.15~0.21 MJ/(hm²·h·a),变异系数为 0.05~0.08,皮尔逊趋势系数为-0.60~0.36。除三峡库区核心区生态涵养区外,其余各区均表现出微弱减少趋势。

表 1 变异性参数统计表

参数		生态功能区					重庆
		丘陵谷地生态品质提升区	大巴山生态屏障区	三峡库区核心区生态涵养区	大娄山生态屏障区	武陵山生态屏障区	
年均降雨量/mm		1 033.57	1 219.69	1 032.90	1 055.00	1 094.47	1 058.32
年均侵蚀雨量/mm		696.50	902.44	743.78	708.46	758.62	729.72
侵蚀雨量占降雨量的比值		67.39	73.99	72.01	67.15	69.31	68.95
侵蚀性降雨的年平均发生天/(d·a ⁻¹)		24.70	29.71	26.79	27.34	28.13	26.31
降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	平均值	2 085.25	2 784.57	2 135.95	1 952.33	2 322.40	2 166.11
	标准差	340.01	687.17	511.03	417.99	530.83	287.52
	C _v	0.16	0.25	0.24	0.21	0.23	0.13
	r	0.33	0.08	0.24	0.35	0.16	0.46
侵蚀密度/ (MJ·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	平均值	2.99	3.09	2.87	2.76	3.06	2.97
	标准差	0.17	0.20	0.15	0.21	0.19	0.09
	C _v	0.06	0.06	0.05	0.08	0.07	0.03
	r	-0.36	-0.13	0.36	-0.11	-0.60	-0.36

绘制 2009—2022 年降雨侵蚀力和侵蚀密度年值箱线图。由图 2a 可知,重庆市(CQ)年均降雨侵蚀力为 2 166.11 MJ·mm/(hm²·h)。大巴山生态屏障区(DBZ)的降雨侵蚀力年际间变化最为剧烈,多年平均值最大,达 2 784.57 MJ·mm/(hm²·h);武陵山生态屏障区(WZ)次之,为 2 322.40 MJ·mm/(hm²·h);大娄山生态屏障区(DLZ)均值最小且年际间变化也最小,仅 1 952.33 MJ·mm/(hm²·h),是大巴山生态屏障区的 0.70 倍。

图 2b 表明,重庆市(CQ)降雨侵蚀密度中位数为 1.96 MJ/(hm²·h·a)。比较各生态功能区的年际变化特征,以大巴山生态屏障区(DBZ)的年际间变化最为剧烈,多年平均值为 2.25 MJ/(hm²·h·a);三峡库区核心区生态涵养区(TZ)次之,为 1.97 MJ/(hm²·h·a),大娄山生态屏障区(DLZ)年际变化最小,均值仅 1.80 MJ/(hm²·h·a),是重庆市多年平均值的 0.92 倍、大巴山生态屏障区的 0.80 倍。

2.1.2 季节变化特征

由图 3a 表明,降雨侵蚀力季节均值在夏季最高,冬季最低,这与区域降雨量的季节分布特性相一致。各功能分区在夏季的降雨侵蚀力为 1 084.43~1 479.01 MJ·mm/(hm²·h),占全年总降雨侵蚀力的 50.78%~55.72%,其中大巴山生态屏障区(DBZ)夏季降雨侵蚀力占比最高,三峡库区核心区生态涵

养区(TZ)夏季降雨侵蚀力相对最低;研究区内冬季降雨通常持续时间短、雨量偏小,导致冬季的降雨侵蚀力极低,仅 8.31~26.30 MJ·mm/(hm²·h),占全年总降雨侵蚀力的 0.42%~0.94%。

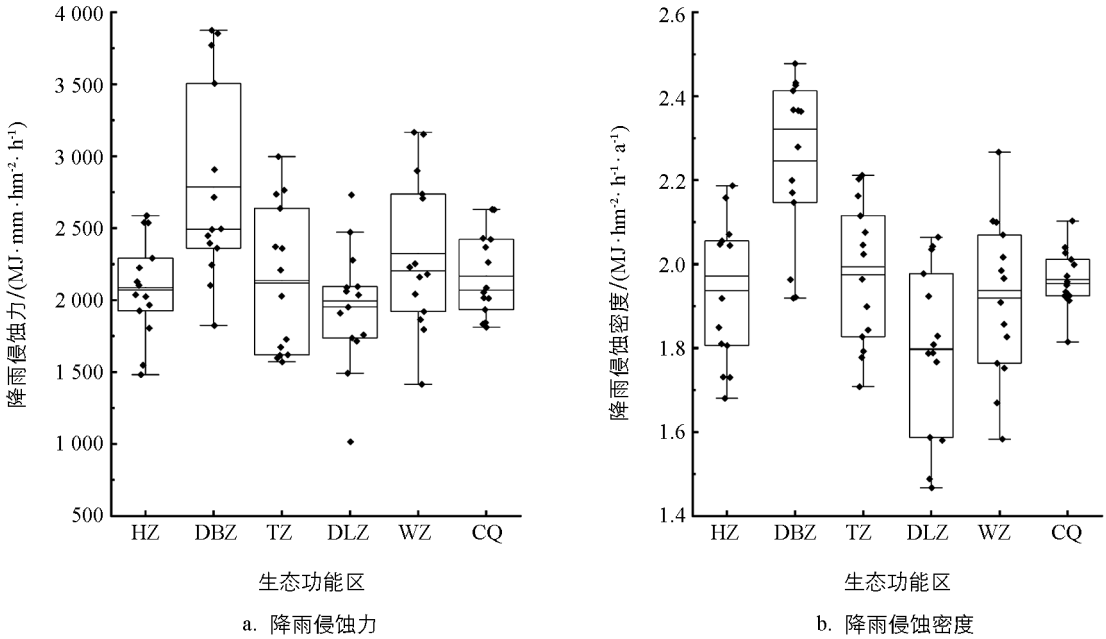


图 2 各生态功能区降雨侵蚀力和侵蚀密度年际变化箱线图

侵蚀密度季节平均值的高值时段出现在夏季,达 2.49~2.91 MJ/(hm²·h·a),其中大巴山生态屏障区(DBZ)最高;低值出现在冬季,仅 0.12~0.37 MJ/(hm²·h·a),其中丘陵谷地生态品质提升区(HZ)最低(图 3b)。

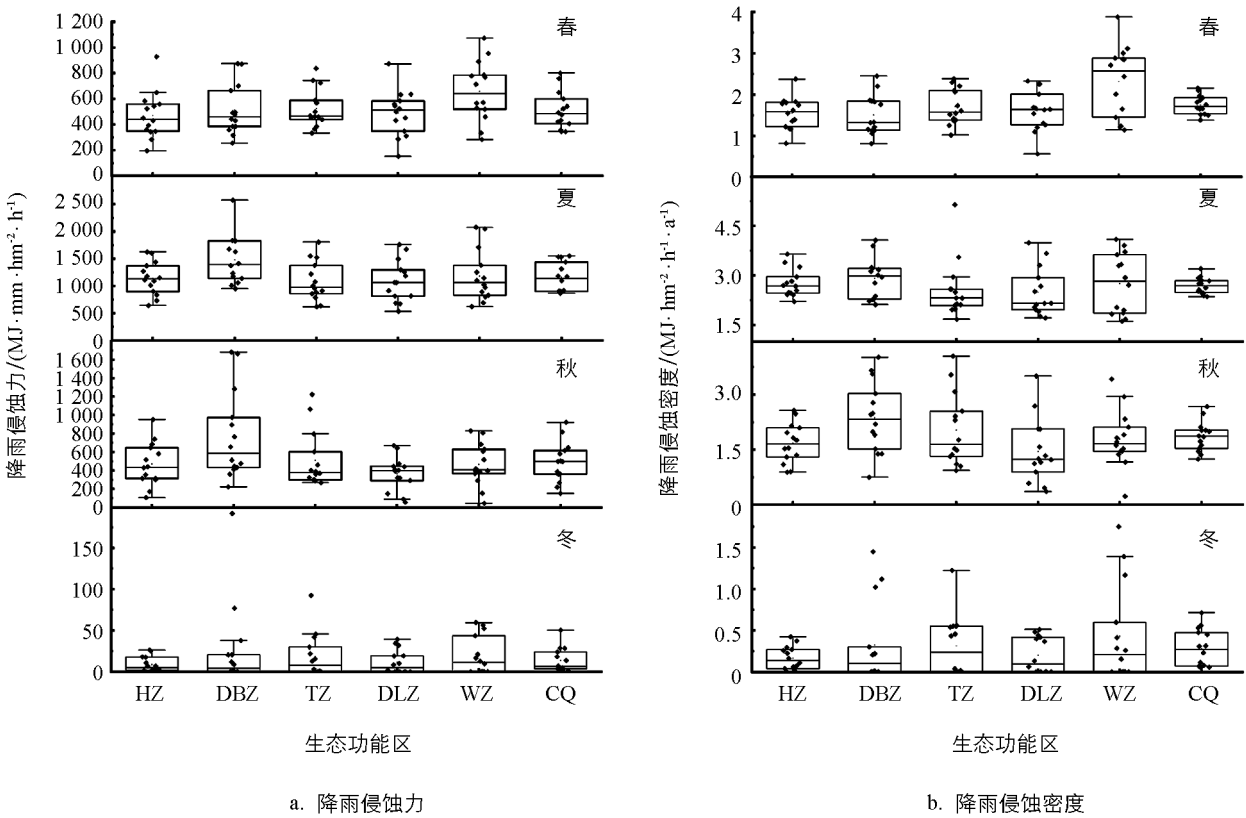


图 3 降雨侵蚀力和侵蚀密度季节特征图

从各季节内降雨侵蚀力与侵蚀密度的箱线值分布情况看, 春季武陵山生态屏障区(WZ)的降雨侵蚀力和侵蚀密度相对于其他区域变化更为剧烈; 夏季各区域的降雨侵蚀力和侵蚀密度相对发生都较为频繁, 降雨侵蚀力震荡最剧烈的是大巴山生态屏障区(DBZ), 但三峡库区核心区生态涵养区(TZ)的侵蚀密度出现异常值, 表明对应时段可能发生了显著剧烈的暴雨事件; 秋季是相对于所有季节降雨侵蚀力和侵蚀密度离散最为显著的时段, 这主要是在研究区域内, 9 月易于发生秋旱或秋汛等显著对立的气候事件, 从而导致统计时段内数据震荡显著; 冬季整体变化较弱, 但受暖湿气流影响, 研究时段内出现了雨量充沛的年份, 使得统计结果出现异常值或较明显的数据离散情况。整体上, 各生态功能区在相应季节的中位数统计结果与全重庆市平均值较为接近。

2.1.3 年内变化特征

对研究时段内降雨量、侵蚀雨量、降雨侵蚀力和侵蚀密度绘制逐月热力图, 由图 4a 和图 4b 可知, 降雨量和侵蚀雨量的高值时段表现出一致性, 均发生在 2021 年 8 月, 次高值出现在 2016 年 6 月和 2020 年 6 月; 降雨侵蚀力的高值出现在 2016 年 6 月(图 4c), 次高值在 2021 年 8 月; 降雨侵蚀密度的最高值出现在 2020 年 7 月, 次高值出现在 2014 年 9 月(图 4d)。降雨侵蚀密度的高值区出现月份尽管集中在每年的 6—9 月, 但各年间的高值出现时间并不相同, 其中降雨侵蚀密度年内最高值发生在 6—9 月的年数分别是 2 年、6 年、3 年和 3 年。比较结果可知, 月降雨侵蚀力与月侵蚀雨量、月降雨量的高低值变化有高度一致性, 降雨侵蚀密度年内变化更为显著, 且降雨侵蚀密度能够比降雨侵蚀力更易于解释年内降雨产生的侵蚀程度和侵蚀风险, 由此也可认为研究区内 6—9 月是水土保持工作的关键时期, 即在降雨集中的时段内应加强各项水土保持措施, 减少不必要的水土流失。

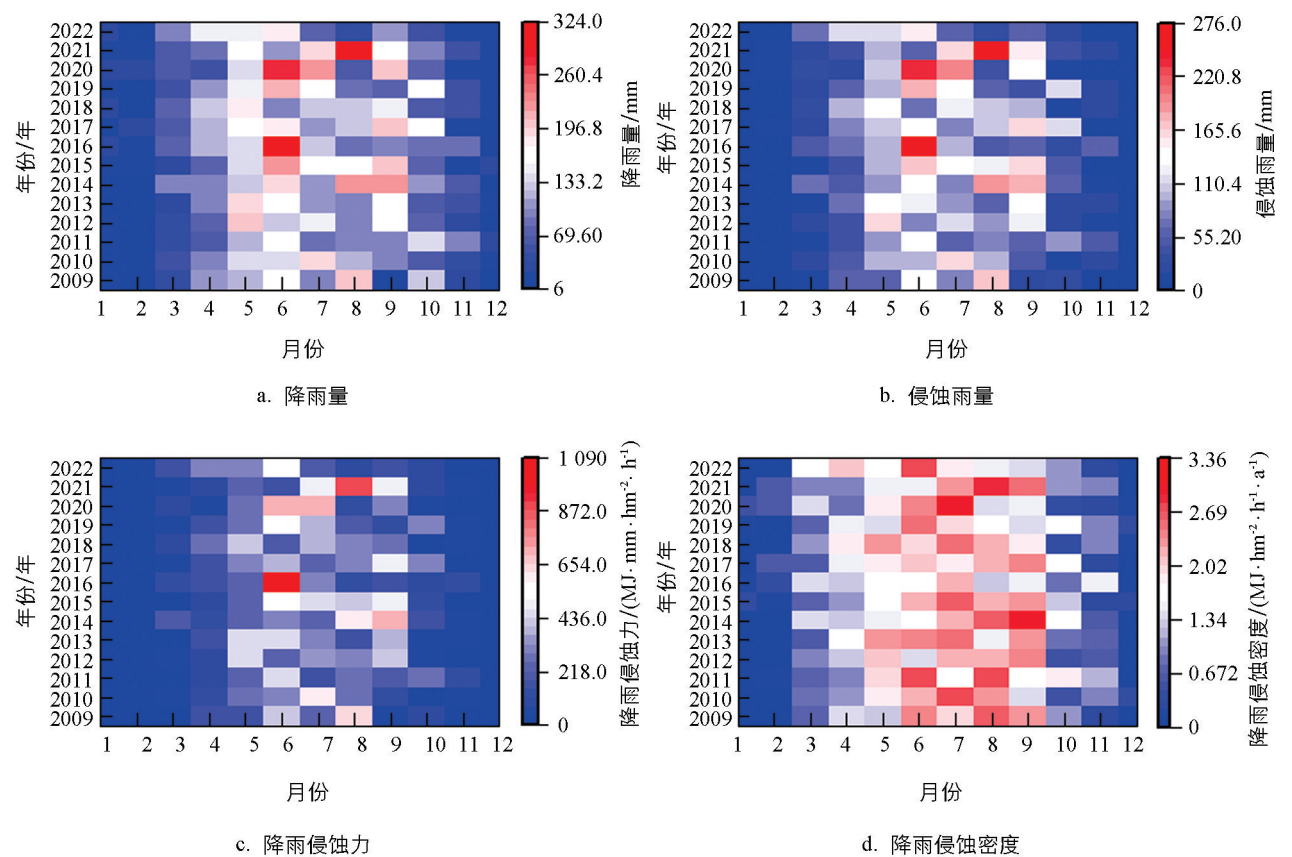


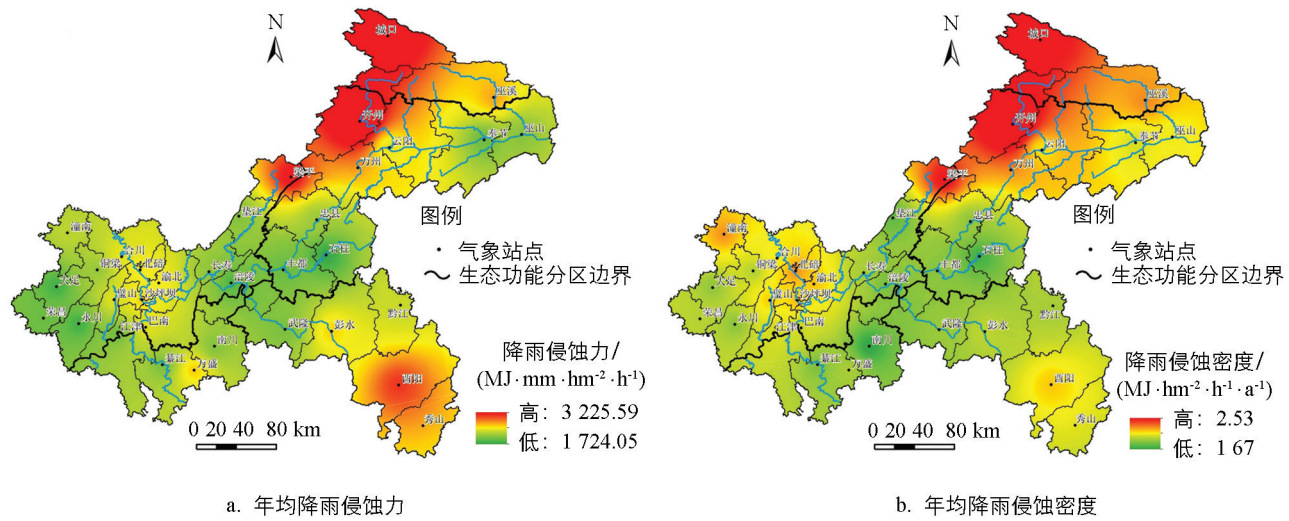
图 4 重庆市年内降雨量、侵蚀雨量、降雨侵蚀力和侵蚀密度热图

2.2 空间分布特征

2.2.1 年际分布特征

利用反距离权重法生成研究区多年平均降雨侵蚀力和侵蚀密度空间分布图,由图 5a 可知,年均降雨侵蚀力空间分布显示出异质性特征,高值区主要分布在大巴山生态屏障区和三峡库区核心区生态涵养区的部分区域,最大值出现在 2021 年大巴山生态屏障区的城口县,达 $4\,676.44\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 。该区域以山地地貌发育,坡高坡陡,以高程大于 900 m 的中山地貌为主,土壤以黄壤、黄棕壤、石灰岩土 3 种类型为主,存在较高的降雨侵蚀潜在危险,强降雨时间易于引起较高的水土流失^[37]。次高值分布在大巴山生态屏障区的开州区,2014 年达 $4\,427.17\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,该区域以景观破碎发育,山地地形在强降雨条件下也较易产生大量土壤侵蚀。低值区位于丘陵谷地生态品质提升区,最小值发生在 2011 年永川区,其降雨侵蚀力仅 $806.25\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 。年均降雨侵蚀力在丘陵谷地生态品质提升区未显示出突出的高值区域,该区域也是重庆市境内人类社会活动的最核心区域。

由图 5b 可知,年均降雨侵蚀密度空间分布也显示出异质性特征,高值区分布在大巴山生态屏障区,低值区分布在大娄山生态屏障区。



审图号: 渝 S(2024)058 号

图 5 年均降雨侵蚀力和侵蚀密度空间分布图

2.2.2 季节分布特征

降雨量年内分布不均必然会引起降雨侵蚀力年内各季节空间特征异质,在研究区域内,不同季节降雨侵蚀力的高值区分布有显著差异。由图 6a 可知,春季降雨侵蚀力高值区主要在武陵山生态屏障区,尤其是区域内的西阳县,多年春季降雨侵蚀力平均值达 $754.57\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$;次高值则主要分布在三峡库区核心区生态涵养区,以开州区至梁平县一带为代表,多年平均值为 $673.32\sim 695.67\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$;低值区则主要在重庆西部的丘陵谷地生态品质提升区,以永川区为最小,仅 $296.65\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 。夏、秋季节是年内降雨集中时段,尤其是侵蚀性降雨为主,因此,夏、秋两季降雨侵蚀力的空间分布既具有一定的共性,也有明显的区域差别(图 6b 和图 6c)。夏、秋季高值区均出现在大巴山生态屏障区和三峡库区核心区生态涵养区以中山地貌为主的区域,夏季以开州区的 $1\,717.19\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 为最高值,秋季以城口县的 $927.07\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 为最高值。值得注意的是,丘陵谷地生态品质提升区在夏季的平均降雨侵蚀力达 $1\,137.89\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,但秋季仅 $467.37\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,与其他区域相比有明显的季节差异。这主要受该区域内夏、秋季节降雨分布极为不均所影响,普遍存在夏季多暴雨、秋季少雨多伏旱的气候特征。

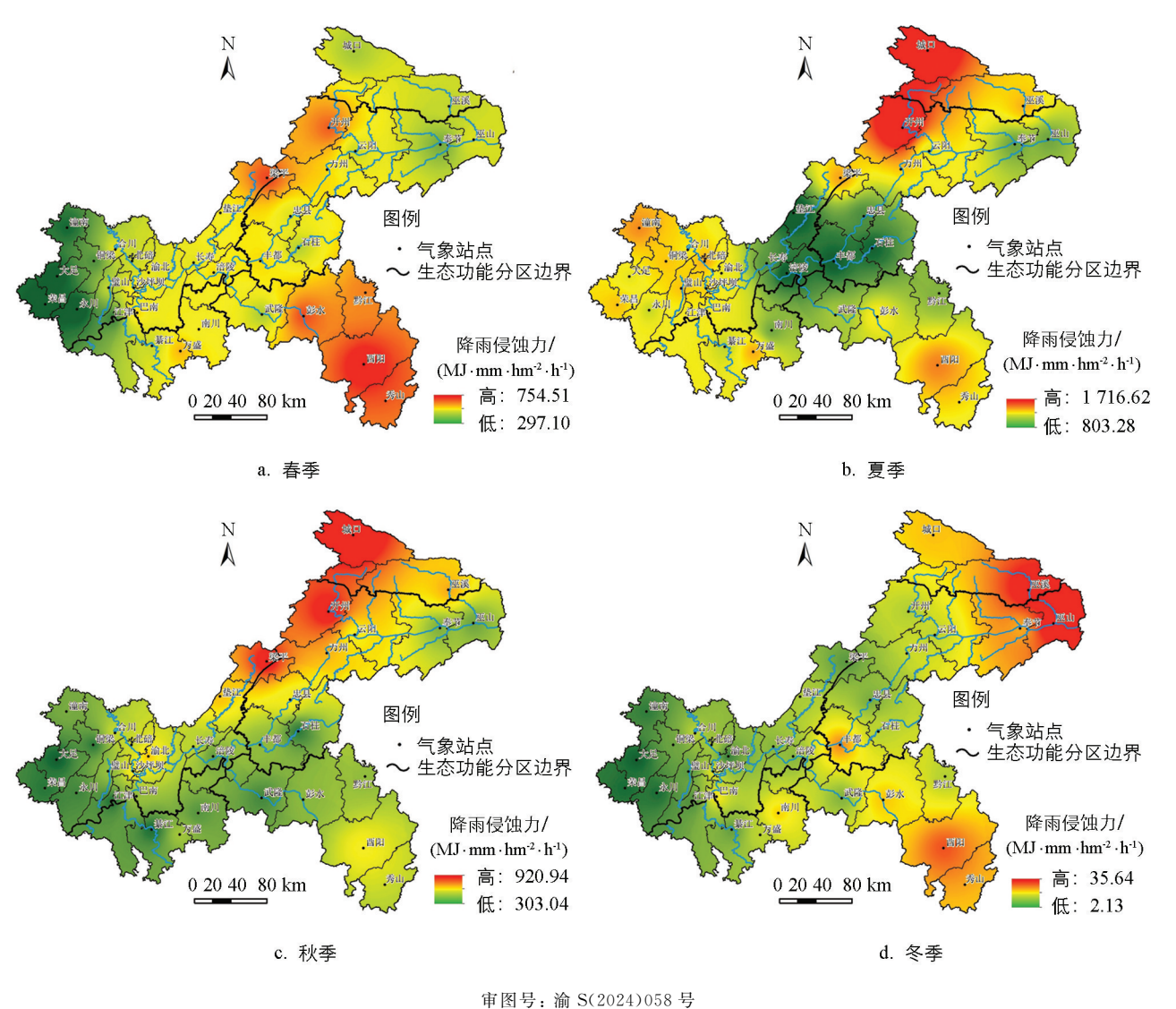
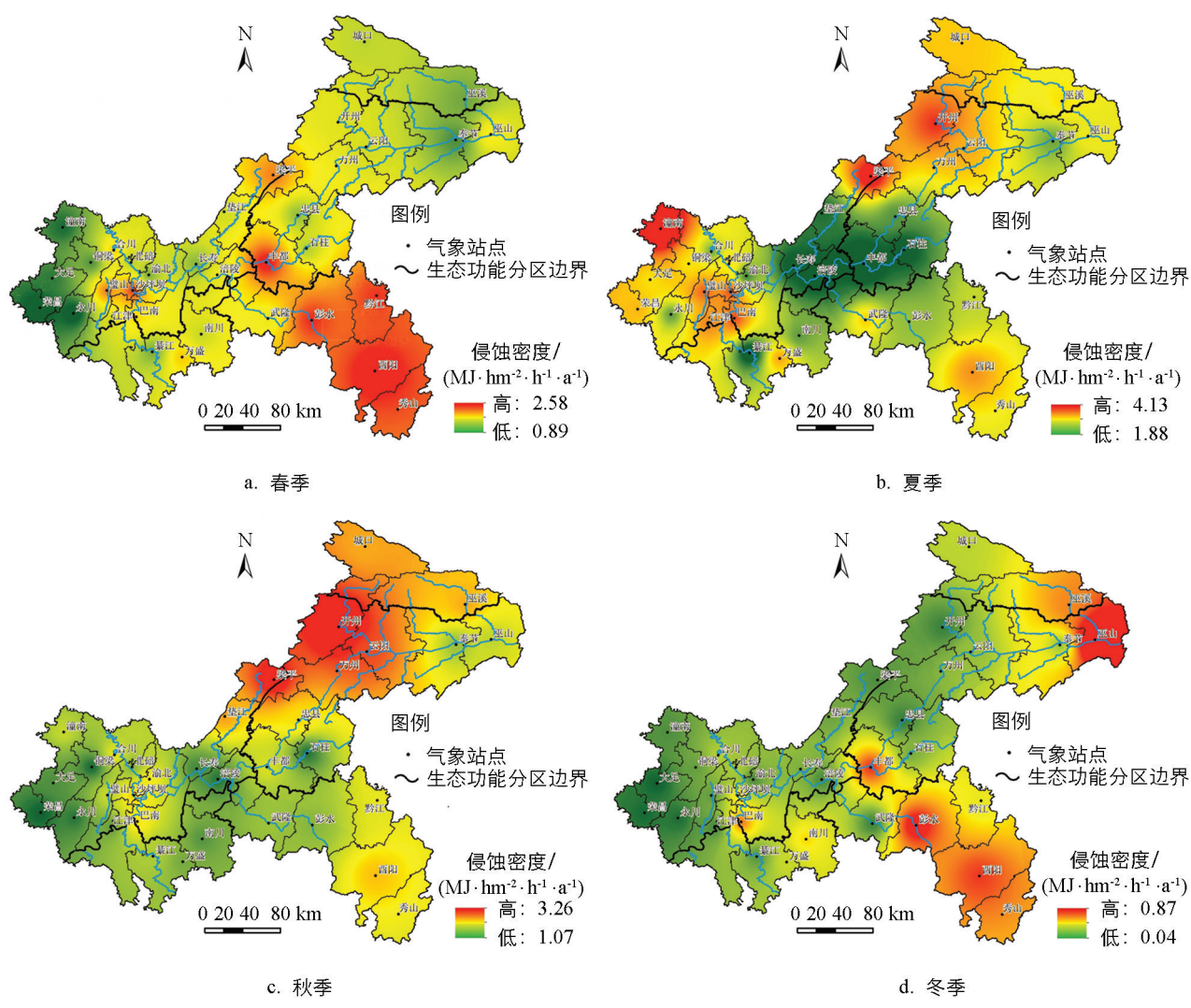


图 6 各季节降雨侵蚀力空间分布图

冬季降雨侵蚀力整体均不高,最高值仅 $35.64 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,位于大巴山生态屏障区的巫溪县。从冬季研究区内的水汽来源看,来自北方的冷空气受大巴山和巫山阻碍,在大巴山生态屏障区、三峡库区核心区生态涵养区的巫溪、巫山境内得到相对较多的雨水,从而导致这一区域的降雨侵蚀力相对其他区域要高。

由图 7 可知,不同季节的侵蚀密度空间分布特征仍表现出一定的空间异质性。春季的侵蚀密度高值区主要分布在武陵山生态屏障区的酉阳、彭水一带,平均侵蚀密度达 $2.31 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,是其他区域的 $1.36 \sim 1.50$ 倍,而最大值与最小值之间的差异达 2.89 倍。夏季因降雨集中,侵蚀密度在区域内的空间分布差异相对较弱,高值区(丘陵谷地生态品质提升区)的侵蚀密度仅为其他区域的 $1.05 \sim 1.17$ 倍。尽管区域高值区分布于大巴山生态屏障区,但丘陵谷地生态品质提升区的潼南一带为全域最高,达 $4.13 \text{ MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

秋季的侵蚀密度出现显著的空间差异,尽管高、低值的倍比仅为 $1.16 \sim 1.63$ 倍,但高值区分布的三峡库区核心区生态涵养区域中,开州区、云阳县和梁平区在统计时段内的 9 月出现了短历时强降雨,使得侵蚀密度整体拉高。冬季侵蚀雨量在年内占比最少,导致单场侵蚀性降雨对侵蚀密度高低的主导作用凸显,从而出现三峡库区核心区生态涵养区的侵蚀密度高于其他区域。这充分表明,研究区域内,自身地形地貌多样化对区域内接受外来水汽或区境内水循环过程有不同的影响。



审图号：渝 S(2024)058 号
图 7 各季节侵蚀密度空间分布

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 降雨侵蚀力和侵蚀密度的时间对应关系

重庆市年均降雨侵蚀力为 2 166.11 MJ·mm/(hm²·h)，年均侵蚀密度为 2.97 MJ/(hm²·h·a)。在年际变化尺度上，降雨侵蚀力和侵蚀密度均表现出相同的特点，最大值出现在大巴山生态屏障区，最小值出现在大娄山生态屏障区，但年内表现出空间差异。比较表 1 各指标最大值和最小值的关系，年均降雨量、年均侵蚀雨量和侵蚀密度最大值的出现具有一致性，均在同一个区域，但最小值却分布在不同的区域。降雨量与侵蚀参数呈现同步极大的特征，雨量相对小的情况下，侵蚀参数的特征则表现出异质特征，说明降雨量越丰富，累积值越大，发生降雨侵蚀越容易^[17]；降雨的随机特征又使得小雨量对应的侵蚀雨量和侵蚀密度不一定最小。另外，表 1 中的结果表明各分区年降雨侵蚀力差异较大，其中大巴山生态屏障区趋势变化最微弱，但周期波动最为明显，统计时段内，年降雨侵蚀力最大值有 8 次出现在该区域，尤其是 2011、2014、2017 和 2021 年，其降雨侵蚀力远高于其他分区。2011 年大巴山生态屏障区的降雨侵蚀力为 3 504.88 MJ·mm/(hm²·h)，是该年度最小降雨侵蚀力分区大娄山生态屏障区的 3.5 倍。年降雨侵蚀力最小值出现次数最多的是大娄山生态屏障区，共计 5 次，但其趋势变

化系数最大。

在年内尺度上,图 4 的结果表明,降雨侵蚀力与侵蚀雨量和降雨量的高值区发生时间基本同步,但降雨侵蚀力大小受计算时段内侵蚀雨量大小的影响,而侵蚀密度则更多与累积降雨量相关。尽管降雨侵蚀力累积年值较高,但分配到各个月份以后,仅会在月平均降雨量超过 200 mm 的月份出现降雨侵蚀力显著高值,侵蚀密度则在每年的 6—9 月呈现出不同程度的高值区。这说明侵蚀密度在表征侵蚀风险方面,比降雨侵蚀力更为直观,更有利于指导生产实践。

3.1.2 降雨侵蚀力和侵蚀密度的空间对应关系

图 5 中,降雨侵蚀力和侵蚀密度的空间分布特征在武陵山生态屏障区表现出空间异质性,其中酉阳县的年均降雨侵蚀力为全市第 4 高值,为 $2\,674.88\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,为全市最大值的 0.83 倍,但其值是武陵山生态屏障区站点多年平均值的 1.14~1.22 倍,因而在空间分布上表现出明显的高值区域。酉阳县的降雨量丰沛,而年均侵蚀密度在所有站点中仅排名第 9,为 $2.03\text{ MJ}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,是全市最大值的 0.80 倍,因而其高值特征不显著。

对研究区 2009—2022 年降雨侵蚀力的时间和空间变化特征进行分析,整体上降雨侵蚀力年内分布不均,年际分布大幅波动且空间分布不均。从季节分布看(图 6 和图 7),研究区内降雨侵蚀力主要集中在夏季,这与翁薛柔等^[25]、龙训建等^[27]的研究成果相一致。从研究区不同季节的降雨侵蚀力、侵蚀密度的空间分布情况可以得知,水汽来源方向、区域附近的地形地貌特征都可以成为影响因素,但雨量集中程度始终是产生区域土壤侵蚀的首要因子。

3.1.3 降雨侵蚀力和侵蚀密度与潜在影响因子

在年际间的区域分布上(图 5),降雨侵蚀力和侵蚀密度从高到低分别是大巴山生态屏障区、武陵山生态屏障区、三峡库区核心区生态涵养区、丘陵谷地生态品质提升区和大娄山生态屏障区。在年内的季节尺度上,比较图 6 和图 7 可知,各区域均符合高降雨侵蚀力、高侵蚀密度的空间分布格局。

降雨侵蚀力和侵蚀密度高值区均分布在大巴山生态屏障区,这主要受区域地形地貌差异和降雨云团移动方向等因素的影响。在地形上,大巴山生态屏障区所在的区域海拔最高为 2 796.8 m,为研究区内地形雨、对流雨等的天然屏障,导致更容易形成降雨事件和高侵蚀性降雨。在地貌特征上,大巴山生态屏障区、武陵山生态屏障区以喀斯特地貌为主^[13],其土壤层薄、岩溶钙化发育,在遭遇侵蚀性降雨时,表土更容易产生流失。丘陵谷地生态品质提升区和大娄山生态屏障区因其远离大江大河,地势以低缓山丘为主,富含水分的云团相对难以在此盛行,且该区域以红壤黏土为主,土的力学结构与特性相对于喀斯特地貌都具有相对更强的抗流失特点,因而无论是年平均降雨量还是侵蚀性降雨量都明显低于大巴山生态屏障区,从而表现出全年各时段的低值区都在该区域。

3.2 结论

通过对重庆市 2009—2022 年期间不同生态功能区的降雨侵蚀力和侵蚀密度的时空特征对比分析,得到以下结论:

① 2009—2022 年重庆市年均降雨侵蚀力为 $2\,166.11\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,年均侵蚀密度为 $2.97\text{ MJ}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,其中大巴山生态屏障区年均降雨侵蚀力和侵蚀密度均为最高,为重庆市平均值的 1.29 倍和 1.08 倍,是侵蚀性降雨高发区;相对低值区分布在大娄山生态屏障区,仅为重庆市平均值的 0.90 倍和 0.95 倍。

② 降雨侵蚀力和侵蚀密度年际间和年内季节间均存在一定差异,年内的最大值一般集中出现在夏季,低值区均发生在冬季。差异分析表明,年际间差异除受当年总降雨量影响外,次降雨量的影响也很突出。

③ 降雨侵蚀力和侵蚀密度的空间分布异质性显著。整体呈东北向西南递减的空间分布特征,其中大巴山生态屏障区在夏季降雨侵蚀力均值为 $1\,479.01\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,为研究区内降雨侵蚀力最高区域,

其值占全年的 53.11%；丘陵谷地生态品质提升区在冬季的降雨侵蚀力最小。大巴山生态屏障区在夏季的侵蚀密度为全年最高，丘陵谷地生态品质提升区在冬季则为全年最低，仅占 0.21%。

在未来的区域生态安全保护工作中，可基于本阶段的研究成果，结合各生态功能区的自然地貌特征和人类活动空间布局，进一步开展生态功能区内更小尺度的降雨侵蚀特征识别，充分结合降雨侵蚀的地域特性，推行更有针对性的水土保持措施，以更好地促进区域生态环境安全。

参考文献：

- [1] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望 [J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [2] WU X L, WEI Y J, WANG J G, et al. Effects of Erosion Degree and Rainfall Intensity on Erosion Processes for Ultisols Derived from Quaternary Red Clay [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 249: 226-236.
- [3] ZHANG Y, CHAO Y, FAN R R, et al. Spatial-temporal Trends of Rainfall Erosivity and Its Implication for Sustainable Agriculture in the Wei River Basin of China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106557.
- [4] RENDANA M, IDRIS W M R, RAHIM S A, et al. Predicting Soil Erosion Potential under CMIP6 Climate Change Scenarios in the Chini Lake Basin, Malaysia [J]. Geoscience Letters, 2023, 10(1): 254-230.
- [5] LI B Y, WANG Y C. Impact of the Grain-for-green Programme and Climate Change on the Soil Erosion Decline in the Yangtze River, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2024, 34(3): 527-542.
- [6] BRANDOLINI F, KINNAIRD T C, SRIVASTAVA A, et al. Modelling the Impact of Historic Landscape Change on Soil Erosion and Degradation [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 4949.
- [7] PAN L D, LI R, SHU D C, et al. Effects of Rainfall and Rocky Desertification on Soil Erosion in Karst Area of South-west China [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(11): 3118-3130.
- [8] 李娜, 张哲, 白伟, 等. 耕作方式下坡面土壤侵蚀对有机碳流失的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(2): 82-90.
- [9] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H. Multi-time Scale Variability of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in the Karst Region of Southern China, 1960—2017 [J]. Catena, 2021, 197: 104977.
- [10] ZHU D, XIONG K, XIAO H. Comment on Multi-time Scale Variability of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in the Karst Region of Southern China, 1960—2017 [J]. Catena, 2021, 197: 104977.
- [11] 余新晓, 贾国栋. 统筹山水林田湖草系统治理 带动水土保持新发展 [J]. 中国水土保持, 2019(1): 5-8.
- [12] YANG L A, LI Y L, JIA L J, et al. Ecological Risk Assessment and Ecological Security Pattern Optimization in the Middle Reaches of the Yellow River Based on ERI+MCR Model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(4): 823-844.
- [13] 陈勤昌, 王兆峰. 武陵山区国土空间开发对生态安全影响的时空异质性研究 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 287-298, 309.
- [14] RUAU C, NAIPAL V, GAGNAIRE N, et al. Soil Erosion Has Mixed Effects on the Environmental Impacts of Wheat Production in a Large, Semi-arid Mediterranean Agricultural Basin [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(1): 6.
- [15] ZHANG J L, SHI D M, JIN H F, et al. Characteristics of Cultivated Layer Soil Shear Strength for Sloping Farmland in Response to Soil Erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2022, 215: 106304.
- [16] YUAN L F, ZHANG X C, BUSTEED P, et al. Modeling Surface Runoff and Soil Loss Response to Climate Change under GCM Ensembles and Multiple Cropping and Tillage Systems in Oklahoma [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105296.
- [17] SUTRADHAR H. Identification of Soil Erosion-prone Areas and Annual Average Soil Loss of Siddheswari River Basin, Eastern India [J]. Journal of Sedimentary Environments, 2023, 8(4): 587-604.
- [18] SOORYAMOL K R, KUMAR S, REGINA M, et al. Modelling Climate Change Impact on Soil Erosion in a Watershed of North-western Lesser Himalayan Region [J]. Journal of Sedimentary Environments, 2022, 7(2): 125-146.

[19] CHEN D S, DUAN Y F, JIANG P H, et al. Spatial Zoning to Enhance Ecosystem Service Co-benefits for Sustainable Land-use Management in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111753.

[20] WANG Y S, TAN S, LIU B Y, et al. Estimating Rainfall Erosivity by Incorporating Seasonal Variations in Parameters into the Richardson Model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 275-296.

[21] VILAYVONG K, YASUFUKU N, ISHIKURA R. Rainfall-induced Soil Erosion and Sediment Sizes of a Residual Soil under 1D and 2D Rainfall Experiments [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2016, 218: 171-180.

[22] 江源天, 王文婷, 谢云, 等. 基于 IMERG 反演降水数据估算广东省降雨侵蚀力 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 153-164.

[23] 谭泳彬, 谢剑亮, 冉江华, 等. 基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 46-56.

[24] 刘春芳, 乌亚汗, 王川. 基于生态服务功能提升的高标准农田建设的分区方法 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 264-272, 313.

[25] 翁薛柔, 叶琰, 叶勇, 等. 基于多种算法的小安溪流域降雨侵蚀力时空演变特征 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 143-150.

[26] LU L L, GUO H D, CORBANE C, et al. Urban Sprawl in Provincial Capital Cities in China: Evidence from Multi-temporal Urban Land Products Using Landsat Data [J]. Science Bulletin, 2019, 64(14): 955-957.

[27] 龙训建, 翁薛柔, 叶琰, 等. 近 10 年重庆市降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 171-184.

[28] 龙训建, 翁薛柔, 叶琰, 等. 基于聚类分析的重庆市侵蚀性降雨特征研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 19-26.

[29] SINGH D, MISHRA A K, PATRA S, et al. Spatial Variability of Soil Hydraulic and Physical Properties in Erosive Sloping Agricultural Fields [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(1): 57-66.

[30] WANG Z K, GUO J, LING H B, et al. Function Zoning Based on Spatial and Temporal Changes in Quantity and Quality of Ecosystem Services under Enhanced Management of Water Resources in Arid Basins [J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108725.

[31] 钟旭珍, 刘馨悦, 姚坤, 等. 基于生态功能分区的沱江流域土壤侵蚀研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(12): 127-136.

[32] 付友行, 廖晓勇. 三峡库区紫色小流域侵蚀性降雨特征 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 184-188.

[33] 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, 25(1): 35-41.

[34] 史东梅, 卢喜平, 蒋光毅. 紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 116-122.

[35] 史东梅, 江东, 卢喜平, 等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-21.

[36] 梁宇靖, 沈润平, 师春香, 等. 基于 CLDAS 融合降水的中国降雨侵蚀力研究 [J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1333-1346.

[37] 王子芳, 屈双容, 李阳兵, 等. 重庆岩溶地区不同土壤类型的土地利用多样性分析 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 153-156, 196.

责任编辑 周仁惠

