

重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度对土壤侵蚀风险的评估

魏兴萍^{1,2}, 肖成芳¹, 张爱国¹

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室,重庆 401331)

摘要: 研究重庆降雨侵蚀力(RE)和侵蚀力密度(ED)的时空变化,有利于开展土壤侵蚀防治和水土流失风险评估。利用 1961—2020 年重庆 34 个气象站的逐日降雨数据、TM 遥感影像资料,采用日降雨侵蚀力模型、Mann-Kendall 非参数检验、变异系数、克里金插值、叠加分析等方法,对降雨侵蚀力和侵蚀力密度进行时空分析,对重庆土壤侵蚀强度进行空间分析。结果表明:(1)重庆年平均降雨侵蚀力为 $5\ 672.32$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,年平均侵蚀力密度为 4.94 $\text{MJ} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,各季节平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度的变化趋势基本一致;(2)年降雨侵蚀力和侵蚀力密度值均呈现渝东北最大,渝东南次之,渝西最小的规律。季节降雨侵蚀力和侵蚀力密度集中在夏季,表现为降雨侵蚀力渝东北最高,侵蚀力密度渝东最高;(3)重庆 2020 年土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主,其次为轻度、中度、强度、极强度和剧烈侵蚀;(4)降雨侵蚀力、侵蚀力密度的侵蚀风险等级空间分布和土壤侵蚀强度等级空间分布相似,高值均出现在渝东北和渝东南地区。研究结果有助于管理者制定水土保持措施,有效防治重庆地区的水土流失。

关键词: 降雨侵蚀力; 侵蚀力密度; 时空分布; 土壤侵蚀风险; 重庆

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0128-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.06.017

Assessment of Rainfall Erosivity and Erosivity Density on the Risk of Soil Erosion in Chongqing

WEI Xingping^{1,2}, XIAO Chengfang¹, ZHANG Aiguo¹

(1.College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;2.Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research in the Upper Reaches of the Yangtze River, Chongqing 401331)

Abstract: Studying the temporal and spatial changes of rainfall erosivity (RE) and erosivity density (ED) in Chongqing is conducive to soil erosion control and soil erosion risk assessment. Using the daily rainfall data and TM remote sensing image data of 34 meteorological stations in Chongqing from 1961 to 2020, the daily rainfall erosion force model, Mann-Kendall nonparametric test, coefficient of variation, Kriging interpolation, superposition analysis and other methods were used to analyze RE and ED . The spatial and temporal analysis of soil erosion intensity in Chongqing was carried out. The results showed that: (1) Chongqing's annual average rainfall erosivity was $5\ 672.32$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, the annual average erosive force density was 4.94 $\text{MJ} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, and the variation trend of average rainfall erosivity and erosivity density in each season were basically the same. (2) The annual RE and ED were the largest in northeast Chongqing, the second in southeast Chongqing, and the smallest in western Chongqing. Seasonal rainfall erosivity and erosivity density were concentrated in summer, and the rainfall erosivity was the highest in northeast Chongqing, and the erosivity density was highest in eastern Chongqing. (3) The soil erosion intensity in Chongqing in 2020 was dominated by slight erosion, followed by mild, moderate, intensity, extreme intensity and severe erosion. (4) The spatial distribution of the erosion risk level of rainfall erosivity and erosivity density was similar to the spatial distribution of soil erosion intensity level, and the highest values were both in northeast and southeast Chongqing. The research results could help managers to formulate soil and water conservation measures to effectively prevent and control soil erosion in Chongqing.

Keywords: rainfall erosivity; erosivity density; temporal and spatial distribution; soil erosion risk; Chongqing

收稿日期: 2021-12-15

资助项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0616, cstc2016jcyjA0150); 国家自然科学基金项目(42107355, 41202135)

第一作者: 魏兴萍(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: xingpingwei@126.com

全世界约有 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的农田因土壤侵蚀而消失,严重影响农业生产和农民生计^[1],增加环境恶化风险^[2]。根据《中国水土保持公报(2020年)》^[3],我国水力侵蚀面积为 $1.12 \times 10^6 \text{ km}^2$,占水土流失总面积的 41.59%;重庆水力侵蚀面积为 $2.51 \times 10^4 \text{ km}^2$,占其土地总面积的 30.52%。防治土壤侵蚀、保护粮食安全和生态安全是人类社会的迫切需要。

通用土壤流失方程(USLE)的第 2 个修订版 RUSLE2 引入了侵蚀力密度(ED),表示每单位降雨的降雨侵蚀力^[4]。有研究^[5]表明,在反映土壤侵蚀潜力方面,降雨侵蚀力比降雨本身更可靠。目前,有关降雨侵蚀力计算的简单模型主要包括日降雨模型^[6-8]、月降雨模型^[9]、季节降雨模型^[10]和年降雨模型^[11-12]。在中国,最常用的模型是章文波等^[8]提出的日雨量估算半月降雨侵蚀力的简易算法模型。国内外针对降雨侵蚀力和侵蚀力密度时空分布的研究表明,Suketi River 流域的年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度总体呈下降趋势^[13],中国南方喀斯特地区、赣江流域的年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度值均呈增加趋势^[5,14],South Korea 的年平均降雨侵蚀力呈显著增加趋势,侵蚀力密度的变化趋势不明显^[15]。Europe 和中国淮河流域的降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布相似^[2,16];而 Urmodi River 流域的降雨侵蚀力自东向西递增,侵蚀力密度则完全相反^[17]。Greece 的降雨侵蚀力和侵蚀力密度均是 7 月较高^[18],而中国赣江流域是 6 月最高^[14]。Singh 等^[13]通过分析降雨侵蚀力和侵蚀力密度,得到 Suketi River 流域的土壤侵蚀风险区。以上研究表明,不同地区的降雨侵蚀力和侵蚀力密度均呈现不同的空间分布格局和时间变化趋势。目前,国内有关降雨侵蚀力的研究较多,而针对侵蚀力密度及其对土壤侵蚀风险评估的研究较少。“十四五”期间,重庆将着力构建水土流失预防监管高效实时体系、水土流失综合治理协同推进体系和水土保持高质量基础支撑体系。研究重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度的时空变化,是开展土壤侵蚀防治和水土流失风险评估的重要前提,研究

结果可为重庆地区土壤侵蚀风险提供数据支撑,有助于防治水土流失。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆($105^{\circ}11' - 110^{\circ}11' \text{ E}$, $28^{\circ}10' - 32^{\circ}13' \text{ N}$)位于西南地区,面积约 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中 36.49%为岩溶地区^[19]。地势起伏大,地形复杂,以丘陵和山地为主。气候以亚热带季风性湿润气候为主,多年平均气温为 $18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量 $862.3 \sim 1\,434.1 \text{ mm}$,主要集中在夏季,占年降水量的 69%以上,而侵蚀性降水占年降水量的 56%左右。通过解译 2020 年重庆 TM 遥感影像得出,林地是重庆主要的土地利用类型,占重庆总面积的 62.15%,其次是耕地、建设用地、草地和园地等。重庆土壤类型多样,以黄壤、紫色土、水稻土和石灰岩土为主^[19]。

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 气象数据 利用重庆市气象局(<http://cq.cma.gov.cn/sqxj/qxqx/>)提供的重庆 34 个气象站 1961—2020 年逐日降雨资料,基于章文波等^[8]日雨量估算半月降雨侵蚀力的简易算法模型,估算重庆 60 年来的月、季节和年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度,绘制降雨侵蚀力和侵蚀力密度时空分布图,并分析其时空分布格局。

1.2.2 TM 影像、DEM 数据 在地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取 8 幅重庆 2020 年云层覆盖度 $< 10\%$ 的 TM 遥感影像,并利用 ENVI 5.3 和 Arc Map10.6 分别对影像进行大气校正、辐射定标、镶嵌和裁剪,得到重庆遥感影像图。重庆 1:5 万数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云,利用 Arc Map10.6 的栅格分析模块生成坡度图。运用重庆遥感影像数据、DEM 数据,并参考土地利用类型图、地层岩性图等相关图件及资料,分析重庆的土壤侵蚀类型、坡度大小、植被覆盖度等分布规律,结合《土壤侵蚀分类分级标准》^[20],将重庆的土壤侵蚀强度划分为 6 种(表 1)。

表 1 重庆土壤侵蚀分类标准

侵蚀等级	分类标准
微度侵蚀	坡度 $< 5^{\circ}$ 的平地 and 植被覆盖度 $> 75\%$ 成片的林、灌、草地,水域、水田、平原区旱地、城镇居民用地等
轻度侵蚀	坡度介于 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 的坡耕地;坡度介于 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $60\% \sim 75\%$ 的坡地;坡度介于 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $45\% \sim 60\%$ 的坡地;坡度介于 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 且覆盖度在 $30\% \sim 50\%$ 的坡地
中度侵蚀	坡度介于 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的坡耕地;坡度介于 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 且植被覆盖度 $< 30\%$ 的坡地;坡度介于 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $45\% \sim 60\%$ 的坡地;坡度 $> 25^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $70\% \sim 73\%$ 的坡地
强度侵蚀	坡度介于 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡耕地;坡度 $> 35^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $45\% \sim 60\%$ 的坡地;坡度介于 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $30\% \sim 45\%$ 的坡地;坡度介于 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 且植被覆盖度 $< 30\%$ 的坡地
极强度侵蚀	坡度 $> 35^{\circ}$ 且植被覆盖度在 $30\% \sim 45\%$ 的坡地;坡度介于 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 且植被覆盖度 $< 30\%$ 的坡地
剧烈度侵蚀	植被稀疏,坡度 $> 35^{\circ}$ 且植被覆盖 $< 10\%$ 的地区,包括裸土、裸岩等

1.2.3 降雨侵蚀力(RE) 利用章文波等^[8]日雨量估算半月降雨侵蚀力的简易算法模型来计算重庆月、季节和年降雨侵蚀力。

$$M = \alpha \sum_{i=1}^k (P_i)^\beta \quad (1)$$

式中: M 为某半月时段的降雨侵蚀力($MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$); P_i 为半月时段内第*i*日侵蚀性降雨(降雨量 ≥ 12 mm); k 为半月时段内侵蚀性降雨的天数; α 、 β 为简易模型参数,参数计算公式为

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中: P_{d12} 为日平均侵蚀性降雨量(mm); P_{y12} 为年平均侵蚀性降雨量(mm)。月、季节和年降雨侵蚀力值均由半月降雨侵蚀力累加,取 34 个气象站同一年份的降雨侵蚀力平均值,定义为重庆这 1 年的年降雨侵蚀力。

1.2.4 侵蚀力密度(ED) 侵蚀力密度是降雨侵蚀力与降雨量的比值。通过计算和分析重庆的侵蚀力密度来研究降雨对重庆土壤侵蚀的影响。

$$ED = RE / P \quad (4)$$

式中: RE 为月/季节/年降雨侵蚀力($MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$); P 为月/季节/年降雨量(mm); ED 为月/季节/年侵蚀力密度($MJ / (hm^2 \cdot h \cdot a)$)。月降雨侵蚀力密度是月降雨侵蚀力与月降雨量之比;季节降雨侵蚀力密度是季节降雨侵蚀力与季节降雨量之比;年降雨侵蚀力密度是年降雨侵蚀力与年降雨量之比。

1.2.5 热图与克里金法 热图是描述数据的二维图形,用不同颜色来表示数字的差异。如果大量的数据以数字形式呈现,分析起来会比热图更加复杂^[17]。因此,利用热图来表示降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度,可以有效地反映降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的时间分布。GIS 是绘制区域降雨侵蚀力和侵蚀力密度图的重要技术^[2,21]。本研究利用地统计学

分析工具 Arc Map10.6,采用克里金法分析并绘制降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布图。

1.2.6 变异系数(CV)与 Mann—Kendall ($M-K$)非参数检验 使用 Excel 软件对重庆 60 年平均降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度进行变异系数分析,其大小在一定程度上可以反映要素的离散程度。变异系数 $CV \leq 0.5$ 时为低等程度变异, $0.5 < CV < 1$ 时为中等程度变异, $CV \geq 1$ 为高等程度变异。

非参数 Mann—Kendall ($M-K$)突变检测被广泛应用于气候和水文时间序列的趋势检测,不仅可以判断降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度时间序列的变化趋势,还可以定位突变开始的时间。本文运用 Excel 软件建立 $M-K$ 检测模型,对重庆 1961—2020 年间降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度值进行趋势检验和突变分析。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的时间变化

2.1.1 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年内变化 研究降雨侵蚀力和侵蚀力密度的时间变化是了解侵蚀过程的基础^[13]。重庆 60 年来月平均降雨侵蚀力范围区为 $8.57 \sim 1150.21 (MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h \cdot a)$,月平均侵蚀力密度为 $0.46 \sim 6.75 MJ / (hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。将重庆 60 年来每个月的降雨侵蚀力和侵蚀力密度值运用热图的形式进行表示,得到降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年内变化(图 1)。由图 1 可知,降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年内变化较大,但集中在 5—9 月,9 月后,重庆旱季开始并持续到 12 月,降雨侵蚀力和侵蚀力密度逐渐变小。年内降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的最大值均集中在 7 月,且主要分布在 1982 年、2002 年、2007 年、1989 年、2020 年,年内降雨侵蚀力和侵蚀力密度的分布规律与降雨量基本一致。出现这种分布情况表明降雨侵蚀力和侵蚀力密度的大小和降雨量有关。

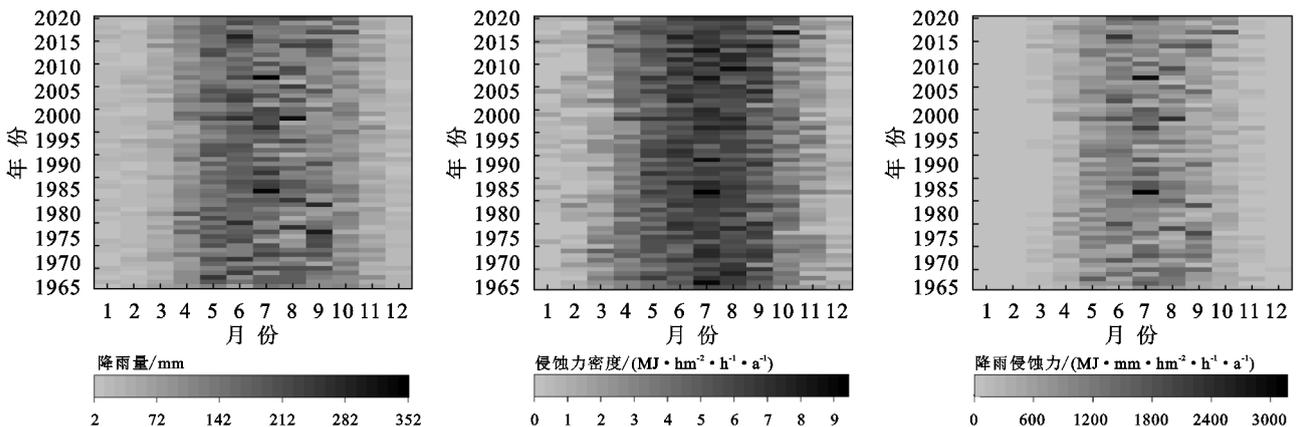


图 1 重庆近 60 年年内降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度值热图

2.1.2 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年际变化 由图 2 可知,1961—2020 年,重庆平均降雨侵蚀力和侵蚀力密

度分别为 $5672.32 (MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h \cdot a)$ 和 $4.94 MJ / (hm^2 \cdot h \cdot a)$;最大值均出现在 1998 年,分别为 8856.59

(MJ·mm)/(hm²·h·a)和 6.18 MJ/(hm²·h·a);最小值均出现在 2001 年,分别为 3 179.98 (MJ·mm)/(hm²·h·a)和 3.69 MJ/(hm²·h·a)。1982 年、1998 年和 2020 年降雨侵蚀力较高(图 2c),1982 年、1998 年和 2017 年侵蚀力密度较高(图 2e),降雨侵蚀力和侵蚀力密度低值均集中在 1966 年、1997 年和 2004 年。利用 M—K 非参数检验法分析重庆 60 年降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度年际序列的变化趋势和突变情况,得到 Z 值分别为-0.30,0.20 和 1.05,表明降雨侵蚀力和侵蚀力密度呈上升趋势,降雨量呈下降趋势,均不显著。这与线性回归趋势分析结果一致。降雨量在 1961—1984 年以上升趋势为主,从 1985 年开始呈现下降趋势并持续到

2020 年,突变点集中在 1981—1983 年,未通过显著性检验;降雨侵蚀力在 1961—1987 年以上升趋势为主,且存在多个突变点,说明这一时间段重庆的降雨侵蚀力变化趋势不稳定,震荡频繁,从 1988 年开始呈现下降趋势,持续到 2015 年呈上升趋势并出现突变点,未通过显著性检验;侵蚀力密度在 1961—1991 年以上升趋势为主,1992 年开始呈现下降趋势并持续到 2007 年,在 2008 年出现突变点,未通过显著性检验。重庆年降雨量和降雨侵蚀力的时间序列在整个研究期间呈现长期下降趋势,且变化趋势相似,表明降雨侵蚀力受降雨量的影响。1961—2020 年侵蚀力密度以上升趋势为主,表明重庆近 60 年多强降雨。

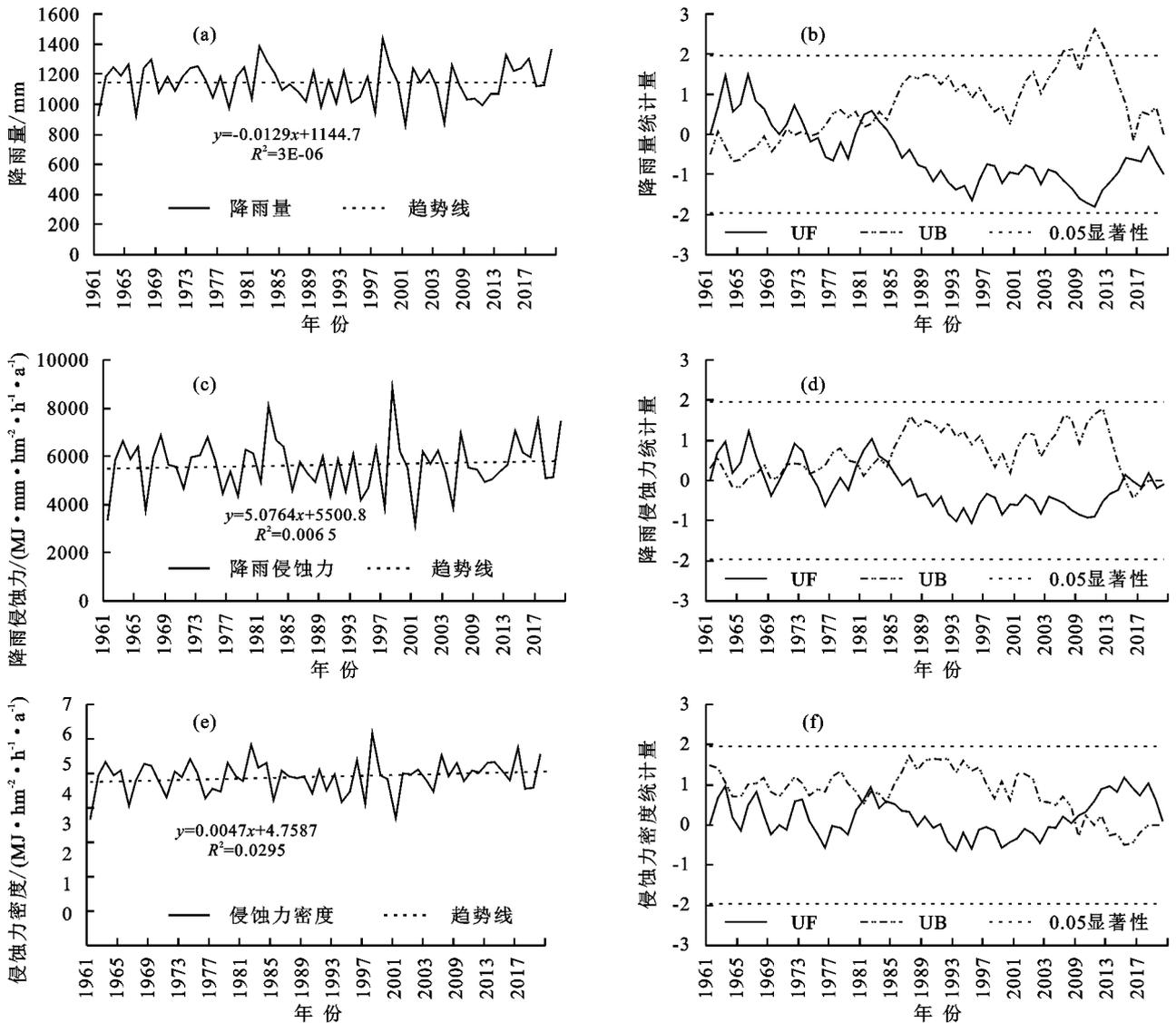


图 2 重庆平均降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度突变分析

由分析可知,重庆年内降雨量、降雨侵蚀力、侵蚀力密度主要集中在 5—9 月。因此计算重庆年内降雨量、降雨侵蚀力、侵蚀力密度的变异系数,代表这些因子每个月的年际变化。由表 2 可知,5—9 月降雨量和侵蚀力密度的变异系数均小于 0.5,属于低等程度变异;降雨侵蚀力的变异系数多在 0.5~1,属于中等程度变异。其中,

9 月份的降雨侵蚀力和侵蚀力密度的变异系数均大于其他月份,表明每年极端降水事件最可能发生在 9 月。重庆近 60 年年均降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的变异系数分别为 0.11,0.19 和 0.10,均为低等程度变异。2020 年之后,重庆将继续之前的上升趋势,由降雨引起的土壤流失风险可能会增加。

表 2 重庆典型月降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度变异性分析

月份	降雨量/mm			降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)			侵蚀力密度/(MJ·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
5	155.4	40.84	0.26	787.46	301.93	0.38	4.96	0.89	0.18
6	176.1	50.35	0.29	1046.43	408.86	0.39	5.81	0.95	0.16
7	167.8	66.37	0.40	1131.46	586.99	0.52	6.51	1.00	0.15
8	140.4	62.73	0.45	881.98	473.62	0.54	6.11	0.88	0.14
9	132.9	57.94	0.44	732.12	442.86	0.60	5.24	1.36	0.26

2.1.3 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年代变化 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年代尺度变化特征见图 3。降雨量和降雨侵蚀力的年代变化差异主要集中在 6—9 月，而侵蚀力密度的年代变化差异不大。降雨量差异最大的是 9 月，从 90 年代的 100.54(MJ·mm)/(hm²·h·a) 增加到 70 年代的 175.95(MJ·mm)/(hm²·h·a)；降雨侵蚀力差异最大的是 7 月，从 70 年代的 911.95

(MJ·mm)/(hm²·h·a) 增加到 80 年代的 1 533.05 (MJ·mm)/(hm²·h·a)；侵蚀力密度的年代月变化相对较小。

降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年代月变化趋势基本一致，均是从 1 月开始逐渐增加，到 7 月达到峰值，然后开始逐渐减少。表明降雨侵蚀力、侵蚀力密度的大小和降雨量息息相关。

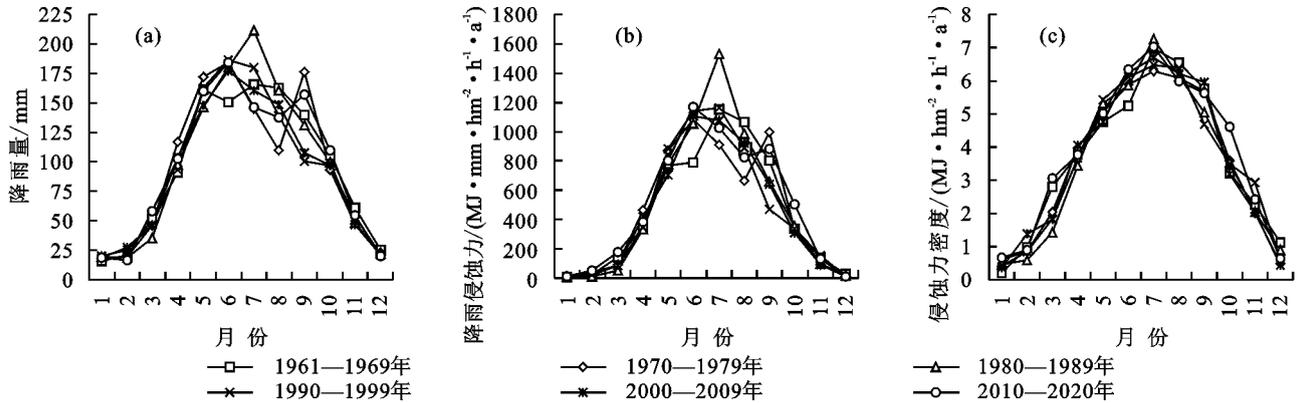


图 3 重庆降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年代分布

以重庆 1961—2020 年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度值为基准数据计算变化率(表 3)。降雨量的年代变化率在 20 世纪 60 年代开始增加，到 90 年代开始减小，直到 21 世纪又开始增加，其中 80 年代变化率最大，达到 2.40%；降雨侵蚀力的年代变化率在 20 世纪 60 年代开始减小，到 80 年代开始增加，90 年代又开始减小，其中

20 世纪变化率最大，达到 5.28%。降雨量的变化率基本为正值，绝大部分相对基准值增加；降雨侵蚀力和侵蚀力密度的变化率基本为负值，绝大部分相对基准值减小。当部分年代降雨量的变化率为正值，侵蚀力密度和降雨侵蚀力的变化率为负值时，表明这些年代降雨量虽然增多，但侵蚀性降雨量减少，非侵蚀性降雨量增多。

表 3 1961—2020 重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度的年代变化率

年代	降雨量/mm	降雨量 变化率/%	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	降雨侵蚀力 变化率/%	侵蚀力密度/ (MJ·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	侵蚀力密度 变化率/%
1961—1969	1149.56	0.54	5594.25	-0.98	4.87	-1.51
1970—1979	1148.74	0.47	5546.57	-1.83	4.83	-2.28
1980—1989	1170.82	2.40	5891.68	4.28	5.03	1.80
1990—1999	1124.36	-1.66	5509.69	-2.87	4.90	-0.83
2000—2009	1101.37	-3.67	5408.17	-4.28	4.91	-0.63
2010—2020	1183.61	1.93	5948.16	5.28	5.10	3.29

2.1.4 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的季节变化 重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度季节变化特征明显(图 4、图 5)，超过 70% 的年降雨侵蚀力和侵蚀力密度集中在夏季和秋季。除春季的降雨侵蚀力呈线性减小的趋势外，其他 3 季的降雨侵蚀力均呈线性增加趋

势；而重庆四季的侵蚀力密度均呈线性增加趋势。降雨侵蚀力集中在夏季，占总降雨侵蚀力的 34.43%~66.36%，变化范围为 1 340.60(2006 年)~5 626.45 (MJ·mm)/(hm²·h·a)(1998 年)；侵蚀力密度也集中在夏季，占总侵蚀力密度的 30.69%~48.49%，

变化范围为 4.97(2001 年)~7.94 MJ/(hm²·h·a) (2020 年)。降雨侵蚀力和侵蚀力密度均集中在夏季

是由于暴雨多发生在这个季节。除此之外,冬季降雨侵蚀力和侵蚀力密度值较小,和冬季降雨量少有关。

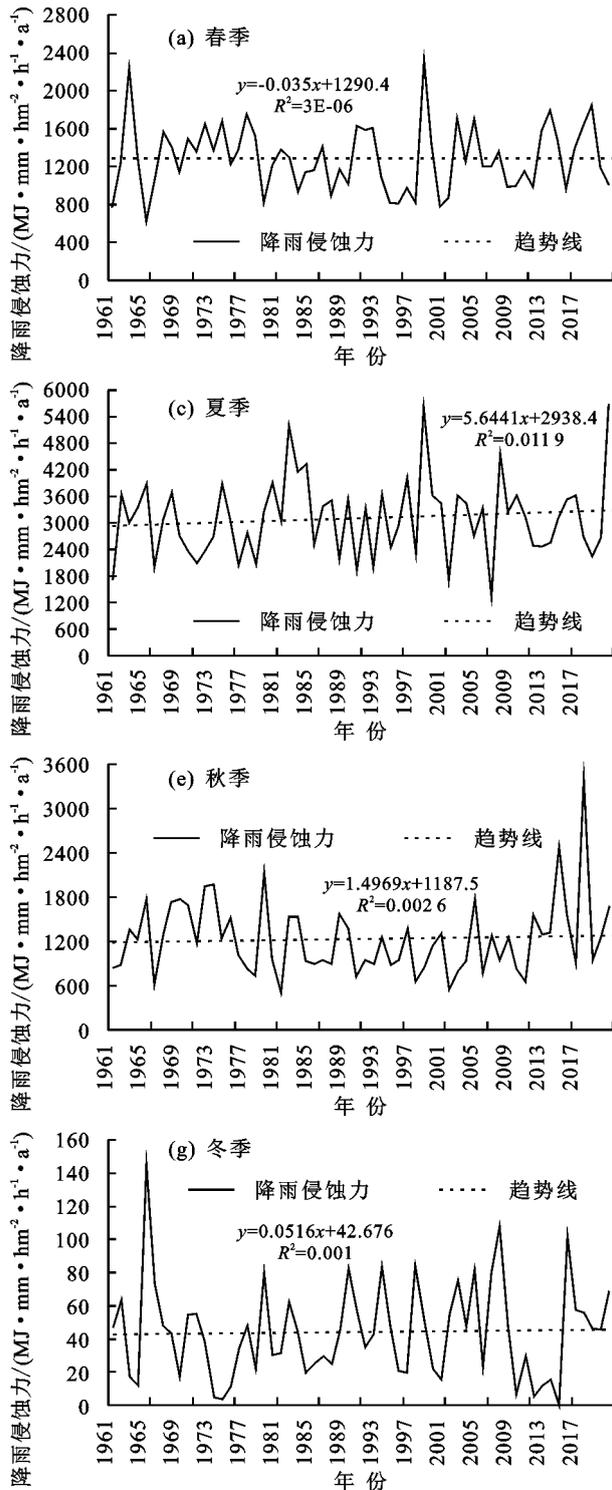


图 4 重庆季节降雨侵蚀力突变分析

重庆 1961—2020 年季节降雨侵蚀力的趋势变化与突变结果显示,春季降雨侵蚀力在 1961—1982 年以上升趋势为主,1983 年开始呈现下降趋势,1963 年开始出现突变点,未通过显著性检验。夏季降雨侵蚀力在 1961—1967 呈上升趋势,1968—1977 年以下降趋势为主,1978 年开始呈现上升趋势,存在多个突变点,且集中在 1960s 和 2010s,未通过显著性检验。秋

季降雨侵蚀力在 1961—1981 年呈上升趋势,1971 年达到显著,随后呈现下降趋势,2000s 显著增大,1974 年出现突变点。冬季降雨侵蚀力在 1961—1990 年以下降趋势为主,1962 年下降趋势显著,1987 年出现突变点,1991—2020 年以上升趋势为主且存在多个突变点。季节侵蚀力密度的趋势变化与突变结果显示,春季侵蚀力密度在 1961—1993 年以上升趋势为主,

1994—2020 年以下降趋势为主, 突变点主要集中在 1985—1992 年、2012—2020 年 2 个时间段, 未通过显著性检验。夏季侵蚀力密度在 1961—1979 呈下降趋势, 1980—2020 年以上升趋势为主, 突变点出现在 1980 年、1985 年和 1995 年, 未通过显著性检验。秋季侵蚀力密度在 1979—2011 年呈下降趋势, 其余年份均呈上升趋势, 并出现多个突变点, 未通过显著性检验。冬季侵蚀力密度在 1961—1987 年以下降趋势

为主, 1988—2020 年以上升趋势为主, 出现多个突变点, 主要集中在 1988—1998 近 10 年间。春季、夏季降雨侵蚀力和侵蚀力密度均未超过显著性检验, 说明春季、夏季降雨侵蚀力和侵蚀力密度未出现显著变化。春季和秋季降雨侵蚀力的时间序列在整个研究期间呈现出长期的下降趋势, 夏季呈现出长期的增加趋势。春季、夏季和冬季侵蚀力密度的时间序列在整个研究期间均呈现出长期上升的趋势。

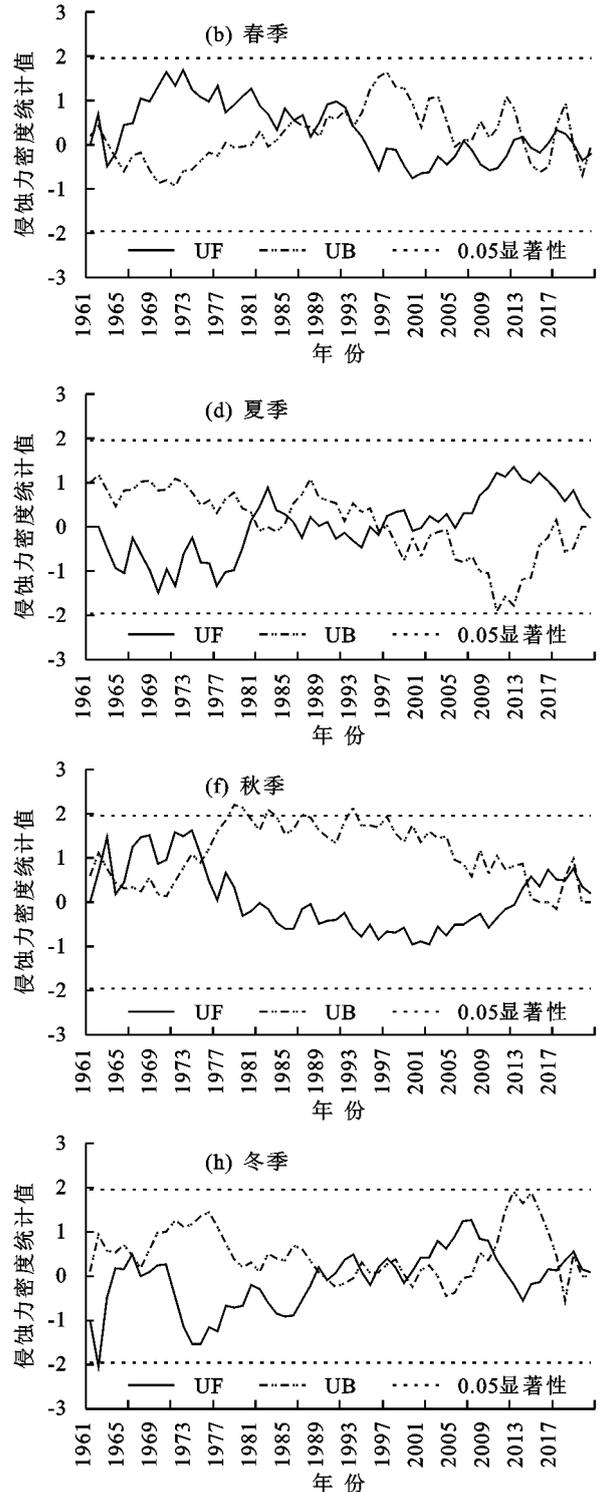
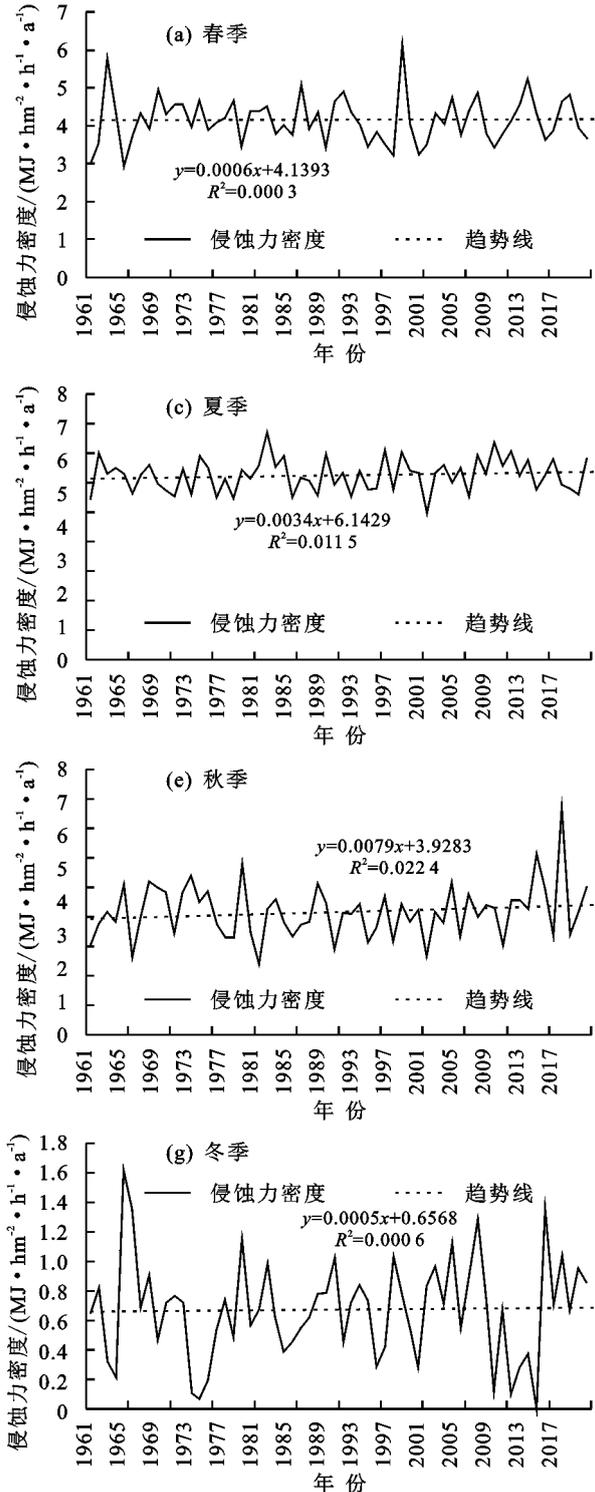


图 5 重庆季节侵蚀力密度突变分析

重庆近 60 年不同季节降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度变异系数数值见表 4。变异系数多小于 0.5,

为低等程度变异。冬季降雨侵蚀力和侵蚀力密度的变异系数均大于 0.5,为中等程度变异。总体来说,

季节降雨量越稳定,降雨侵蚀力和侵蚀力密度年际变化波动越小,变异系数越低。

表 4 重庆季节降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度变异性分析

季节	降雨量			降雨侵蚀力			侵蚀力密度		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
春	306.27	50.51	0.16	1289.38	353.49	0.27	4.16	0.62	0.15
夏	491.90	111.68	0.23	3110.53	903.20	0.29	6.25	0.56	0.09
秋	286.73	57.06	0.20	1233.17	511.12	0.41	4.17	0.92	0.22
冬	62.07	15.42	0.25	44.25	28.94	0.65	0.67	0.34	0.51

注:降雨量单位为 mm;降雨侵蚀力单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$;侵蚀力密度单位为 $MJ/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。

2.2 降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布

2.2.1 年降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布 重庆各站点多年平均降雨量、侵蚀降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布情况见图 6。降雨量和侵蚀降雨量的空间分布一致,均以渝东南最高,渝东北次之,渝西最小;降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布一致,均以渝东北最高,渝东南次之,渝西最小。有研究^[22]表明,侵蚀力密度值高且降雨量少的地区更

容易发生水土流失。重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度的分布规律与降雨量和侵蚀降雨量表现出不同,表明渝东南的降水频次大于渝东北,但渝东北更易出现极端降水事件。降雨量和侵蚀降雨量主要集中在渝东北和渝东南,可能是因为地形存在差异,渝东北、渝东南地势较高,海拔最高可达 2 796.8 m,当水汽从沿海向内陆流动时,遇到山峰形成地形雨,大部分在渝东北和渝东南高海拔地区降落。

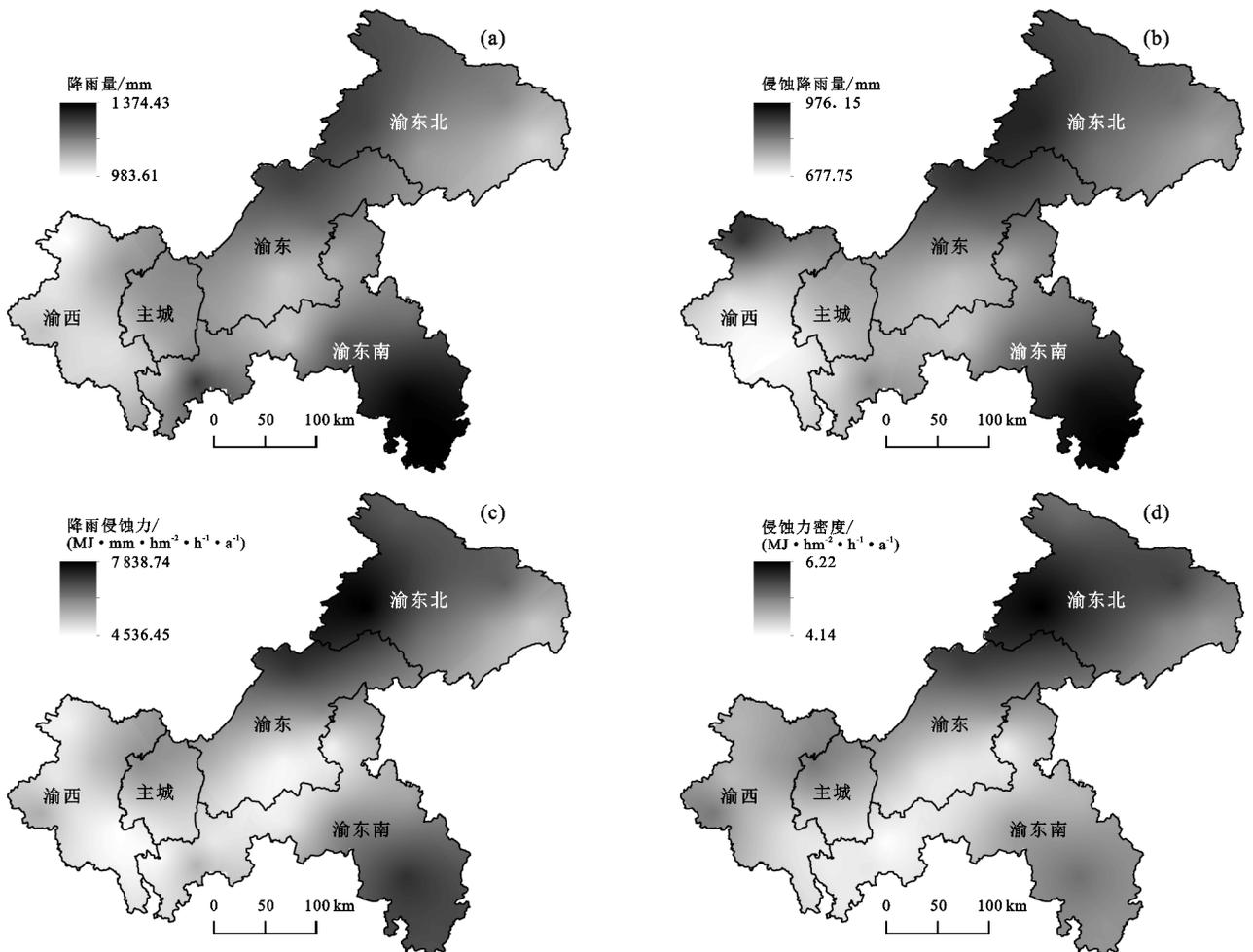


图 6 重庆多年平均降雨量、侵蚀降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度空间分布

2.2.2 季节降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布 重庆降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度在不同季节呈现出不同的空间分布格局(图 7)。降雨量和降雨侵

蚀力在四季的分布规律基本一致,而侵蚀力密度呈现出不同的分布特征。春季降雨量和降雨侵蚀力以渝东南最高,自东南向西北逐渐减小,渝西最小;侵蚀力

密度则集中分布在渝东北,自东北向西南逐渐减小。表明春季渝东南多侵蚀性降雨,而渝东北有强降雨发生。夏季降雨量以渝东南最高,降雨侵蚀力以渝东北最高,最小值均出现在渝东;侵蚀力密度则以渝东最高,其次为渝东北。表明夏季降雨多集中在渝东南,但强降雨易发生在渝东北^[23-24]。秋季降雨量和降雨侵蚀力以渝东南最高,自东北向西南逐渐减小,渝西最小;侵蚀力密度则集中分布在渝西和渝东。表明秋季降雨多集中在

渝东北,但强降雨较少,渝西和渝东强降雨居多。冬季降雨量和降雨侵蚀力集中分布在渝东南,但数值均比较小。表明重庆冬季降雨少,强降雨更少。受地形地貌及亚热带季风性湿润气候的影响,重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度主要集中在夏季。夏季四川盆地受东南风控制,季风从东南向西北推进时遇到高山受阻,使降雨集中在重庆渝东北和渝东南一带。因此,夏季是侵蚀最严重的季节,其次是秋季、春季和冬季。

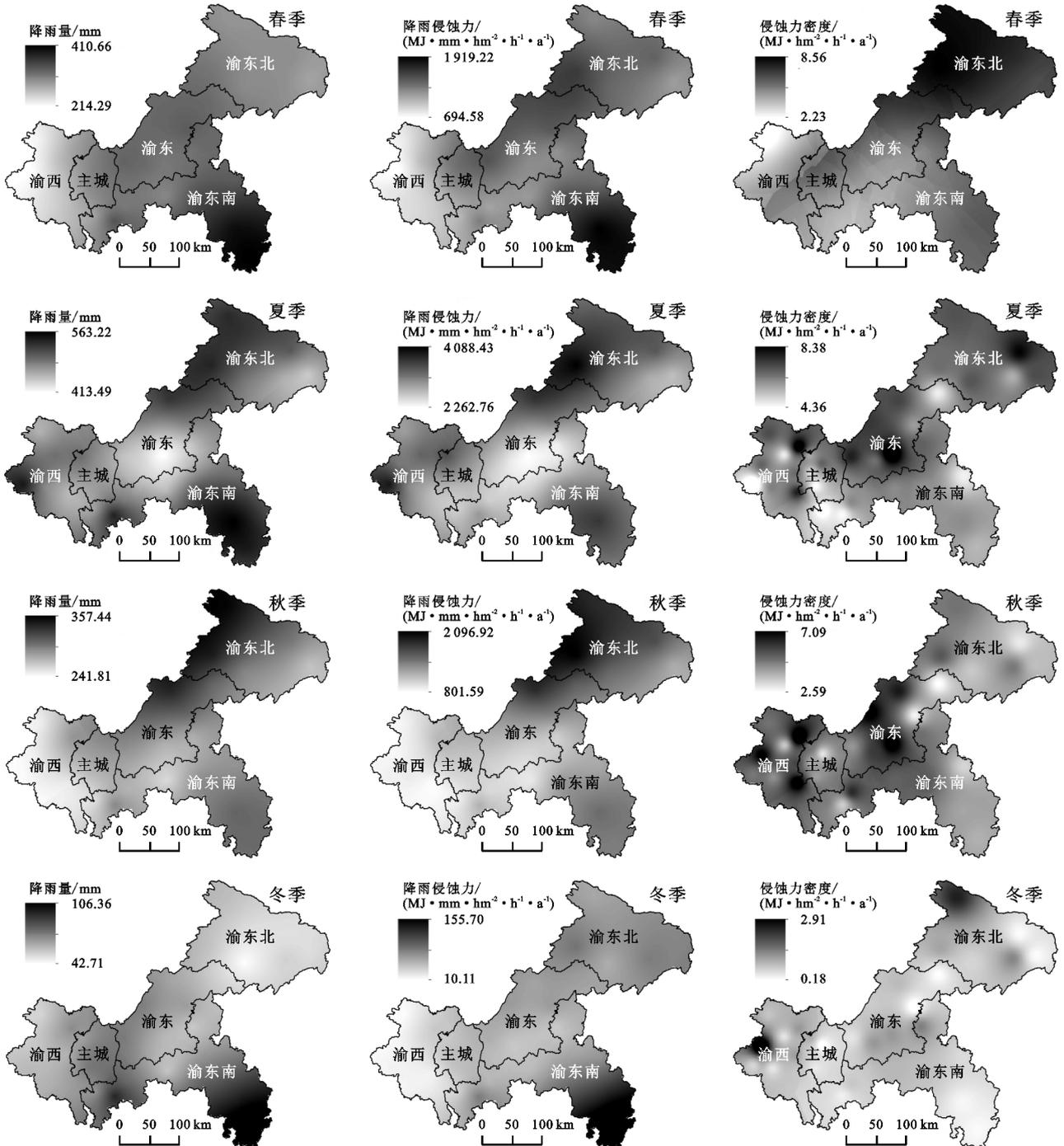


图7 重庆季节降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度的空间分布

2.3 土壤侵蚀强度空间分布

2020年重庆土壤侵蚀强度分布见图8。土壤侵蚀强度存在较明显的区域差异,各分区均是微度侵蚀

面积最大,轻度侵蚀次之;中度侵蚀主要分布在渝东北,其次为渝东南;强度侵蚀主要分布在渝东北和渝东南;极强度和剧烈侵蚀集中分布在渝东北,其次是

渝东南,渝东仅零星分布。各侵蚀强度等级在重庆所占面积及占比结果见表 5,其中微度侵蚀面积为 57 227.14 km²,占土地总面积的 69.45%;其次为轻度侵蚀,面积为 18 874.35 km²,占土地总面积的 22.91%;剧烈度侵蚀面积最小,为 74.12 km²,仅占土地总面积的 0.09%。随着侵蚀强度等级的增加,土壤侵蚀面积呈现出逐渐减少的趋势。

2.4 降雨侵蚀力和侵蚀力密度对土壤侵蚀等级的响应关系

利用 Jenks 的“自然断点法”对重庆各站点的年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度进行分类,将重庆的侵蚀风险等级划分为极低、低、中、高和极高 5 个区域。由图 9 可知,重庆降雨侵蚀力极高风险区主要集中在开州、城口、巫溪、云阳、万州、梁平、酉阳和秀山,侵蚀力密度极高风险区主要集中在开州、城口、巫溪、云阳、万州、梁平,土壤

侵蚀强度分布规律和风险区分布规律较为相似,其高值均分布在渝东北和渝东南地区且开州最为突出。因此,需多关注开州降雨对地表的影响。

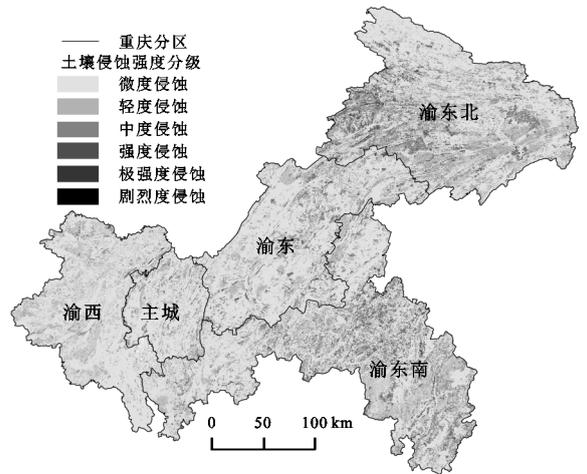


图 8 2020 年重庆土壤侵蚀强度分级

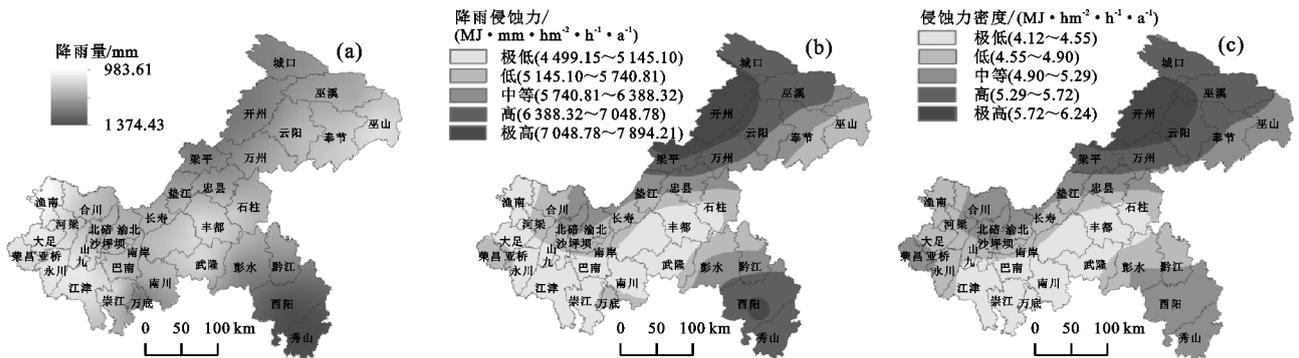


图 9 重庆多年平均降雨量分布及基于降雨侵蚀力和侵蚀力密度的土壤侵蚀风险区分布

利用 Arcmap10.6 将降雨侵蚀力和侵蚀力密度的侵蚀风险数据分别与重庆土壤侵蚀强度数据进行叠加分析,得到不同侵蚀风险等级下不同土壤侵蚀强度的面积。由表 5 可知,降雨侵蚀力的高和极高风险区面积分别为 12 210.48,10 034.38 km²,分别占重庆总面积的 14.82%,12.18%;侵蚀力密度的高和极高风险区面积分别为 13 864.78,10 106.65 km²,分别占重庆总面积的 16.83%,12.27%。降雨侵蚀力和侵蚀力密度的各风险等级面积占比均呈现从极低到极高逐渐减少的趋势。强度、极强度和剧烈侵蚀主要分布在高和极高风险区,占比为 24.58%~54.47%;微度、轻度侵蚀主要分布在极低和低风险区,占比约 25%;中度侵蚀集中分布在中等风险区,占比约 34%。重庆强度、极强度侵蚀和剧烈侵蚀面积占降雨侵蚀力和侵蚀力密度高、极高风险区面积的 25%左右。因此,应当加强这些区域的水土保持工作。

3 讨论

重庆多年平均降雨侵蚀力为 5 672.32(MJ·mm)/(hm²·h·a),以渝东北和渝东南最高,数值多大于 6 000 (MJ·mm)/(hm²·h·a),渝西降雨侵蚀力数

值多小于 5 000(MJ·mm)/(hm²·h·a)。季节降雨侵蚀力的空间分布特征与年平均降雨侵蚀力类似,春季和冬季降雨侵蚀力集中在渝东南,其次为渝东北,渝西最小;夏季、秋季降雨侵蚀力集中在渝东北,其次为渝东南,渝西最小,这与汪言在等^[25]的研究结果一致。与重庆其他地方相比,年平均降雨侵蚀力略高于三峡库区(重庆段)^[26],这可能与研究时间段和研究区不同有关;与重庆周边相比,年降雨侵蚀力变化范围与周琳等^[27]、刘斌涛等^[28]、Zhu 等^[5]的研究结果基本一致。与中国其他地方相比,年平均降雨侵蚀力低于中国东南部^[12,29],高于西北部^[30-31],与降雨量的分布趋势一致,均从东南向西北逐渐减小。重庆年平均侵蚀力密度为 4.94 MJ/(hm²·h·a),年平均侵蚀力密度和季节侵蚀力密度均大于 Zhu 等^[5]的研究结果,这可能是因为基准数据不同,得到的模型参数不同,侵蚀力密度值存在差异。年平均侵蚀力密度的空间分布与降雨侵蚀力基本一致,季节侵蚀力密度则呈现出不一样的空间分布特征。这种差异是由于侵蚀力密度是降雨侵蚀力与降雨量的比值在一定条件下,日降雨量>12 mm 时,如果降雨量越大,降雨侵

蚀力越大,侵蚀力密度可能会变小。与国内其他地方相比,年平均侵蚀力密度低于淮河流域和赣江流域^[14,16],这可能是由于淮河流域和赣江流域属于近沿海地区,多强降雨。区域对比结果表明,全国的年平均降雨侵蚀力、侵蚀力密度均由东南沿海到西北内陆逐渐变小。存在这种差异可能是由于中国幅员辽阔,地形和气候类型复杂,温度和降水组合的多样性

直接导致的,也可能与计算模式不同相关。将降雨侵蚀力、侵蚀力密度的侵蚀风险等级图和土壤侵蚀强度分级图相结合,可为识别土壤侵蚀风险最高的地点和时段提供数据支撑,为采取及时、适宜的水土保持措施提供科学依据。此外,土壤流失并不仅仅依赖于降水,还受到植被、土壤类型和结构、地形地貌、人类活动等因素的影响^[32-33]。

表 5 不同风险区下的各级土壤侵蚀强度面积及占比

风险等级	指标	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀		剧烈侵蚀		总计	
		面积/km ²	占比/%												
极低	ED	15013.6	26.24	5106.76	27.06	227.84	6.29	184.61	8.86	59.74	11.51	2.17	2.93	20594.74	24.99
	RE	17394.26	30.40	5577.47	29.55	301.83	8.33	201.22	9.66	64.54	12.43	1.77	2.39	23541.09	28.57
低	ED	14300.65	24.99	4238.84	22.46	599.53	16.55	248.34	11.92	78.84	15.19	4.23	5.71	19470.43	23.63
	RE	14113.17	24.66	4175.52	22.12	561.21	15.49	242.26	11.63	66.67	12.84	4.43	5.98	19163.27	23.26
中等	ED	13113.92	22.92	3395.15	17.99	1257.77	34.71	470.54	22.58	115.03	22.16	12.64	17.06	18365.06	22.29
	RE	12509.67	21.86	3234.99	17.14	1201.49	33.16	396.86	19.05	102.62	19.77	6.80	9.18	17452.43	21.18
高	ED	9193.46	16.06	3214.65	17.03	734.80	20.28	569.56	27.34	127.63	24.58	24.69	33.31	13864.78	16.83
	RE	7663.97	13.39	3167.34	16.78	729.21	20.12	493.49	23.69	135.73	26.14	20.74	27.98	12210.48	14.82
极高	ED	5605.48	9.80	2918.95	15.47	803.51	22.18	610.38	29.30	137.93	26.57	30.39	41.00	10106.65	12.27
	RE	5546.07	9.69	2719.02	14.41	829.71	22.90	749.60	35.98	149.61	28.82	40.36	54.47	10034.38	12.18
总计		57227.14	69.45	18874.35	22.91	3623.44	4.40	2083.43	2.53	519.18	0.63	74.12	0.09	82401.66	100.00

重庆年平均降雨侵蚀力和侵蚀力密度集中在渝东北和渝东南,且均呈上升趋势。重庆岩溶区主要分布在渝东北和渝东南,土壤较浅且易受侵蚀,再加上持续时间较短的强降雨,容易导致土壤侵蚀。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2013 年指出,许多中纬度地区在近几十年来发生暴雨的可能性呈上升趋势。2021 年 7 月河南郑州遭遇极端强降雨,造成严重的人员伤亡、经济损失和水土流失。重庆整个区域的年降雨侵蚀力和侵蚀力密度均呈上升趋势,说明未来重庆强降雨的次数可能会增加。因此,需要更多关注并做好渝东北和渝东南的土壤侵蚀防治工作。针对重庆特殊的地貌和地质条件,建议在水土流失严重的地区采取种植金银花和花椒等具有固土护坡作用的经济作物,可以有效地提升生态效益和经济效益。

4 结论

(1)1961—2020 年重庆年降雨侵蚀力和侵蚀力密度均为低等程度变异,且上升趋势不显著。季节变化上,降雨侵蚀力和侵蚀力密度集中在夏季,春季、夏季降雨侵蚀力和侵蚀力密度均未出现显著变化。

(2)重庆多年平均降雨量、降雨侵蚀力和侵蚀力密度以渝东北和渝东南最高,渝西最小。降雨量和降雨侵蚀力在四季分布趋势基本一致,而侵蚀力密度则表现出不一样的空间分布格局。

(3)重庆侵蚀强度等级以微度侵蚀面积最大,占土地总面积的 69.45%,其次为轻度、中度、强度、极强度和剧烈度侵蚀。其中,剧烈度侵蚀面积仅占土地总面积的 0.09%。土壤侵蚀强度等级的分布存在明显的区域差异,但各分区均以微度侵蚀为主,其次为轻度侵蚀。

(4)降雨侵蚀力和侵蚀力密度的侵蚀风险等级分布和侵蚀强度等级的分布较为相似,均呈现出渝东北和渝东南高侵蚀强度和高风险区的现象。

参考文献:

- [1] Borrelli P, Diodato N, Panagos P. Rainfall erosivity in Italy: A national scale spatio-temporal assessment[J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(9): 835-850.
- [2] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity in Europe[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 801-814.
- [3] 中华人民共和国水利部. 2020 年中国水土保持公报[R/OL]. (2021-09-30)[2021-12-10]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930_1545971.html.
- [4] Usda. Science documentation-Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2)[M]. Washington D C: USDA-AS, 2008.
- [5] 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(10):e104977.
- [6] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J].*Transactions of the ASAE*,1983,26(1):153-156.
- [7] Yu B F, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales RID G-5184-2010 [J].*Australian Journal of Soil Research*,1996,34(1):139-152.
- [8] 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.
- [9] 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(1/4):287-306.
- [10] Kaviani A, Nejad F, Habibnejad, et al. Modeling seasonal rainfall erosivity on a regional scale: A case study from Northeastern Iran[J].*International Journal of Environmental Research*,2011,5(4):939-950.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Singh J, Singh O. Assessing rainfall erosivity and erosivity density over a western Himalayan catchment, India[J].*Journal of Earth System Science*,2020,129(B2):111-121.
- [14] Li X H, Ye X C. Variability of rainfall erosivity and erosivity density in the Ganjiang River catchment, China: Characteristics and influences of climate change [J].*Atmosphere*,2018,9(2):e48.
- [15] Shin J Y, Kim T, Heo J H, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea[J].*Catena*,2019,176:125-144.
- [16] Xu Z H, Pan B, Han M, et al. Spatial-temporal distribution of rainfall erosivity, erosivity density and correlation with El Niño-Southern Oscillation in the Huaihe River Basin, China [J].*Ecological Informatics*,2019,52:14-25.
- [17] Bagwan W A. An assessment of rainfall-induced land degradation condition using Erosivity Density (ED) and heatmap method for Urmodi River watershed of Maharashtra, India[J].*Journal of Sedimentary Environments*,2020,5(3):279-292.
- [18] Vantas K, Sidiropoulos E, Loukas A. Robustness spatio-temporal clustering and trend detection of rainfall erosivity density in Greece[J].*Water*,2019,11(5):e1050.
- [19] 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇.基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价[J].*生态学报*,2014,34(3):589-596.
- [20] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]北京:中国水利水电出版社,2008.
- [21] 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.
- [22] Tadić M P. Rainfall erosivity in Europe[J].*Science of the Total Environment*,2015,511:801-814.
- [23] Bhardwaj P, Singh O. Spatial and temporal analysis of thunderstorm and rainfall activity over India [J].*Atmosfera*,2018,31(3):255-284.
- [24] Singh O, Bhardwaj P. Spatial and temporal variations in the frequency of thunderstorm days over India[J].*Weather*,2019,74(4):138-144.
- [25] 汪言在,苟诗薇.重庆市降雨侵蚀力空间格局及其变化 [J].*地理科学*,2013,33(1):116-122.
- [26] 汪言在,苟诗薇,张述林.三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力变化趋势及突变分析[J].*水土保持研究*,2012,19(3):1-6.
- [27] 周琳,许武成,尹义星.近 61 年四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].*水土保持研究*,2018,25(4):8-14.
- [28] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J].*地球科学进展*,2012,27(5):499-509.
- [29] 陈晓瑜,孙晓航,黄奇晓,等.1970—2017年福建省降雨侵蚀力的时空变化特征[J].*福建农林大学学报(自然科学版)*,2021,50(1):125-133.
- [30] 伊力哈木·伊马木.新疆维吾尔自治区 1981—2018 年降雨侵蚀力的空间变化特征[J].*水土保持通报*,2020,40(4):1-9.
- [31] 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.
- [32] Nearing M A, Yin S Q, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity: An historical review[J].*Catena*,2017,157:357-362.
- [33] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications[J].*Catena*,2018,166:279-289.