

基于 M-K 检验和地统计分析的沂蒙山区 降雨侵蚀力时空变化趋势研究

齐斐¹, 张春强², 刘霞¹, 于海鹏¹, 赵传普², 吴傲¹, 贾敏¹

(1.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复

重点实验室, 江苏 南京 210037; 2.淮河水利委员会 淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: [目的] 分析降雨侵蚀力的时空变化特征, 为区域土壤流失监测和水土保持工作提供数据支撑。[方法] 利用沂蒙山国家级水土流失重点治理区及其周边 71 个雨量站 1980—2018 年逐日雨量资料, 综合运用冷暖气日雨量公式、M-K 检验、地统计插值等方法, 对降雨侵蚀力的时空变化趋势进行分析。[结果] ①降雨量和侵蚀性降雨量成中度月集中性($FI > 53, CI > 0.17$), 降雨侵蚀力具有高度月度集中性($FI = 399.88, CI = 0.24$), 年内变化曲线呈单峰形, 峰顶位于 7—8 月; ②研究区多年平均降雨量 743.52 mm, 多年平均降雨侵蚀力 3 656.87 MJ·mm/(hm²·h·a), 空间上呈现北低南高, 西低东高的分布趋势; ③降雨侵蚀力年际波动属中等变异, 总体呈不显著增长趋势。空间上在西北部上升趋势显著($z > 1.96$), 在南部少量区域呈不显著的下降趋势($z < 0$)。[结论] 降雨侵蚀力增加会导致区域水土流失风险提升, 因此, 应针对区域降雨侵蚀力增加区域, 加强水土流失防治工作, 实现生态环境与经济社会的可持续发展。

关键词: M-K 检验; 地统计; 降雨侵蚀力; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0146-08

中图分类号: S157

文献参数: 齐斐, 张春强, 刘霞, 等. 基于 M-K 检验和地统计分析的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 146-153. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.020; Qi Fei, Zhang Chunqiang, Liu Xia, et al. Spatiotemporal variation trend analysis of rainfall erosivity in Yimeng Mountain region based on M-K test and geostatistical analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 146-153.

Spatiotemporal Variation Trend Analysis of Rainfall Erosivity in Yimeng Mountain Region Based on M-K Test and Geostatistical Analysis

Qi Fei¹, Zhang Chunqiang², Liu Xia¹, Yu Haipeng¹, Zhao Chuanpu², Wu Ao¹, Jia Min¹

(1. Jiangsu Provincial Key Lab of Soil Erosion and Ecological Restoration, Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Monitoring Center Station of Soil and Water Conservation, Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233001, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity were analyzed in order to provide data support for regional soil loss monitoring and soil and water conservation. [Methods] Based on daily rainfall data from 71 rainfall stations in Yimeng Mountain region and its surrounding areas from 1980 to 2018, the temporal and spatial variation trend of rainfall erosivity was analyzed using the daily rainfall formula, M-K test, geostatistical analysis, and so on. [Results] ① Rainfall and erosive rainfall had a moderate monthly concentration ($FI > 53, CI > 0.17$), rainfall erosivity had a high monthly concentration ($FI = 399.88, CI = 0.24$), and the annual variation curve was unimodal, with the peak occurring from July to August. ② The annual average rainfall in the study area was 744 mm, and the annual average rainfall erosivity was 3 657 MJ·mm/(hm²·h·a), showing a spatial distribution trend of low in the north and high in the

收稿日期: 2021-07-09

修回日期: 2021-07-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“坡式经济林土壤水分运移动态及内在机理”(32071840), (31070627); 水利部重点项目“基于遥感和 CSLE 模型的淮河流域重点区域水土流失监测与评价”(SBJ2018010); 江苏省“333 工程”科研项目(BRA2019069)

第一作者: 齐斐(1989—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 博士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。Email: qiyuyao@163.com。

通信作者: 刘霞(1971—), 女(蒙古族), 山东省菏泽市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持监测与评价方面的研究。Email: liuxia@njfu.edu.cn。

south, low in the west and high in the east. ③ The interannual variation of rainfall erosivity was moderate, and the overall trend was not significant. Spatially, there was a significant upward trend in the northwest ($z > 1.96$) and an insignificant downward trend in the south ($z < 0.05$). [Conclusion] The increase in rainfall erosivity will increase the risk of regional soil and water loss. Therefore, comprehensive prevention and control of soil and water loss should be strengthened so as to realize the sustainable development of the ecological environment and economic society.

Keywords: M-K test; geostatistical analysis; rainfall erosivity; spatiotemporal variation

土壤侵蚀是世界范围的生态问题,而降雨是土壤侵蚀的重要驱动因子^[1]。降雨侵蚀力不仅可定量反映降雨引发土壤侵蚀的潜在能力,也是通用土壤流失方程(USLE)、中国土壤流失方程(CSLE)等土壤流失计算模型的重要因子之一^[2-3]。其最早由 Wischmeier^[4]提出,之后英国、前苏联、日本等国家开始了相关研究^[5];从 20 世纪 80 年代起,中国在全国各地对 EI_{30} 经典算法^[4]进行验证,并提出区域降雨侵蚀力计算模型。由于经典算法以次雨量数据为基础,获取难度大,处理繁琐,基于日降雨、月降雨、年降雨等降雨侵蚀力简易算法的研究逐渐成为 R 值研究的重心^[6]。众多学者在国内外不同区域开展了丰富的研究^[7-16]。其中,国内以章文波等^[15]的日雨量模型应用较为广泛,后来又根据冷暖季雨型的变化,对参数进行调整^[17]。受气候变化影响,降雨量的时空演变会对降雨侵蚀力产生影响,进而影响区域土壤流失风险^[18]。国内外学者采用 M-K 检验、小波分析、回归分析等方法,针对降雨侵蚀力的年际变化趋势做了诸多研究^[16, 19-21]。肖蓓等^[22]采用山东省 34 个气象站点研究发现 1961—2015 年年降雨量和降雨侵蚀力总体呈波动下降趋势,但未进行空间上年际变化分析;冯若昂等^[23]采用山东省 23 个气象站资料研究发现 1966—2015 年降雨侵蚀力总体呈不明显增加趋势,局部上升或下降趋势明显。因此,不同的降雨数据站点数量和空间位置、不同的降雨数据年限可能会对区域降雨侵蚀力时空分析产生重要影响。

沂蒙山国家级水土流失重点治理区位于山东省中南部,地形破碎,土壤松散,是淮河流域易发生土壤侵蚀的区域之一。因此,本研究以沂蒙山国家级水土流失重点治理区为研究区,基于 71 个雨量站点数据,采用冷暖季日雨量公式计算降雨侵蚀力,分析其年内、年际变化特征,并采用经验贝叶斯克里金和径向基函数插值探索空间分异特征及其变化方向,从而为区域土壤流失监测和水土保持工作提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区沂蒙山国家级水土流失重点治理区位于山

东省中部和南部(116.74°—119.66°E, 36.76°—34.90°N), 面积 $2.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区域地貌以低山丘陵为主,占 81.24%,地形破碎,易发生水土流失。气候属半湿润温暖温带季风气候,四季分明,雨热同期,年平均气温在 12~14 °C 之间,年均降水量 743.52 mm。河流主要有沂河、沭河、泗河等,建有田庄、跋山、岸堤、唐村、日照等大型水库。主要土壤类型有潮土、粗骨土、褐土、棕壤、红黏土等;地带性植被属暖温带阔叶林带,主要为次生林。

1.2 数据来源与处理

现有相关研究中,多采用气象站点进行降雨侵蚀力的研究,气象站点时间序列长,但数量少;而水文雨量站点数量多,但部分站点仅汛期进行降雨量观测。本研究搜集研究区及其周边雨量站点 101 个 1980—2018 年逐日雨量数据,经统计筛选,剔除汛期雨量站点和观测年限不足站点,选用 71 个雨量站点进行降雨侵蚀力研究,统计各站点年/月降雨量、年/月侵蚀性雨量(日雨量 $\geq 10 \text{ mm}$)、汛期降雨量(6—9 月)等降雨特征数据。雨量站点空间位置见图 1。

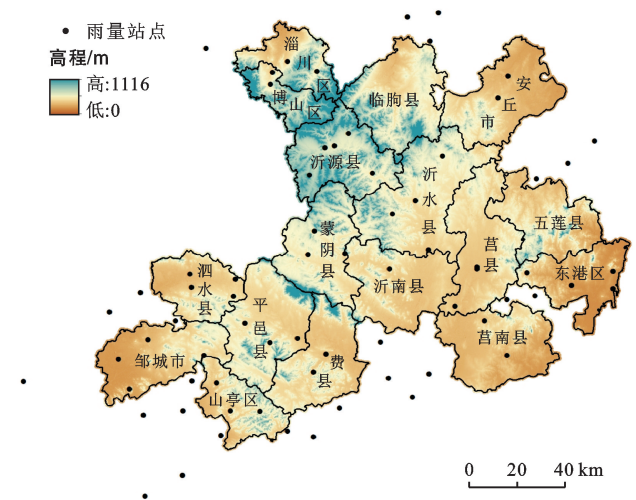


图 1 沂蒙山区雨量站点分布

1.3 降雨侵蚀力计算方法

采用冷暖季日降雨量公式^[17]进行降雨侵蚀力因子估算,该模型基于全国 16 个气象站逐分钟和逐日降雨资料建立,并针对暖季和冷季的雨型差异采用不同参数,公式如下:

$$R_{\text{半月}k} = \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (1)$$

$$R_{\text{年}} = \sum_{k=1}^{24} R_{\text{半月}k} \quad (2)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{\text{半月}k} \quad (3)$$

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (4)$$

式中： \bar{R} 为多年平均年降雨侵蚀力 [MJ · mm / (hm² · h · a)]； k 为将一年划分为 24 个半月的数，即 $k=1, 2, \dots, 24$ ； $R_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 [MJ · mm / (hm² · h)]； i 为所用降雨资料年份序列的编号，即 $i=1, 2, \dots, n$ ； j 为第 i 年第 k 个半月内侵蚀性降雨日的编号（侵蚀性日雨量指日雨量 ≥ 10 mm 的降雨），即 $j=0, \dots, m$ ； $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量 (mm)，如果某年某个半月内没有侵蚀性降雨，即 $j=0$ ，则令 $P_{i,j,k}=0$ ； α 为参数，暖季（5—9 月）取 0.393 7，冷季（10—12 月，1—4 月）取 0.310 1。

1.4 降雨侵蚀力和降雨量统计分析方法

1.4.1 年内变化集中性分析 采用 FI (fourier index) 和 CI (concentration index) 指数^[24] 进行降雨侵蚀力和降雨量的集中性分析。其中，当 $FI < 50\%$ 时，月份集中度低； $50\% \sim 100\%$ ，月份集中度较高； 200% 以上，月份集中度高。当 $CI < 15\%$ 时，轻微月度集中性； $15\% \sim 20\%$ 时，中度月度集中性； $20\% \sim 50\%$ 时，高度月度集中性； 50% 以上时，月度集中性非常高。

$$FI = M_{\text{max}}^2 / \sum_{i=1}^{12} M_i \quad (5)$$

$$CI = \sum_{i=1}^{12} M_i^2 / (\sum_{i=1}^{12} M_i)^2 \quad (6)$$

式中： M_{max} 为全年最大月降雨侵蚀力或最大月降雨量； M_i 为第 i 月降雨侵蚀力或降雨量， $i=1, 2, \dots, 12$ 。

1.4.2 年际变化趋势及突变分析 采用 5 a 滑动曲线、累积距平曲线和 Mann-Kendall (M-K) 检验进行降雨侵蚀力年际变化趋势分析^[21]。其中，M-K 趋势检验^[21, 25] 可能有效区分数据自然波动或确定的变化趋势，常用于降水、干旱频次检查。本研究将其用于降雨侵蚀力的年际变化趋势定量分析，其检验统计量 z 值为正则表示成增加趋势，反之，则降低，若 $|z| \geq 1.96$ 则表示在 95% 的区间内有显著性变化。M-K 突变检验^[26] 则通过计算每个样本的秩，计算统计量 UF_k 和 UB_k ，若 UF_k 和 UB_k 曲线出现交点，且交点在临界直线 (± 1.96) 之间，那么交点对应的时刻就是突变点。

1.5 基于地统计分析的空间差异性

采用 ArcGIS 地统计分析中经验贝叶斯克里金

和径向基函数插值进行空间差异性分析。其中，经验贝叶斯克里金法用于降雨侵蚀力和降雨量的空间插值，径向基函数用于 M-K 检验 z 值和变异系数的空间插值，并采用交叉验证精度为标准选取最优的函数模型。

经验贝叶斯克里金法^[27] (empirical Bayesian Kriging) 可通过构造子集和模拟的过程，自行构建克里金模型参数的地统计插值方法，标准误差优于其他克里金方法，且参数设置方便、效果较好。径向基函数法 (radial basis function)^[28] 是用一个通过所有属性样点的曲面来推算待插值点，可推算大于最大测量值和小于最小测量值的确定性插值方法，方法灵活、精度较高。

2 结果与分析

2.1 降雨时空变化特征

2.1.1 降雨年际、年内变化分析 根据 1980—2018 年研究区降雨量年际变化特征值统计表 (表 1) 和年际变化曲线 (图 2a)，多年平均降雨量为 743.52 mm，其中多年平均侵蚀性降雨量为 598.84 mm，占降雨量的 80.54%。年降雨量和侵蚀性雨量变异系数均高于 0.2，表示年度差异较大，结合图 2a 和 z 值，虽年际降雨量上下波动较大，但仍有上升趋势，尤其是年降雨量和侵蚀性雨量 z 值高于 1.65，表示在 90% 区间显著性上升。多年平均侵蚀性降雨频次为 21.07 d， z 值 2.01，在 95% 区间呈显著性上涨趋势，而多年平均降雨频次为 72.87 d， z 值仅 0.4，上升趋势不明显。由此可知，1980—2018 年降雨频次没有明显增加，但侵蚀性降雨频次出现显著性增长，单场次降雨量增加。

表 1 沂蒙山区降雨量年际变化特征值统计

项目	年降雨量/mm	侵蚀性雨量/mm	年降雨频次/日	年侵蚀性降雨频次/日
z 值	1.77	1.69	0.40	2.01
变异系数	0.21	0.25	0.12	0.20
最大值	1 087.51	904.68	94.39	28.83
最小值	454.78	328.74	56.96	13.37
中位数	746.49	613.43	72.83	20.97
平均值	743.52	598.84	72.87	21.07

根据多年平均降雨量和侵蚀性降雨量年内变化曲线 (图 2)，降雨量和侵蚀性降雨量呈明显“几”字形分布。其中，1 月降雨量最低为 9.22 mm，7 月降雨最高 199.88 mm，汛期 (6—9 月) 降雨量占 72.56%；多年侵蚀性降雨量均值 598.84 mm，占年降雨量的

80.54%,1月最低(3.33 mm),7月最高(199.88 mm),在24个半月中占各统计时段降雨量的14.08%~89.44%,其中在5月上旬至10月上旬,侵蚀性雨量

占比均在75%以上,6月下旬至8月下旬均在85%以上。根据降雨量和侵蚀性降雨量FI指数(53.73,53.01)和CI指数(0.17,0.19),均具有中度月集中性。

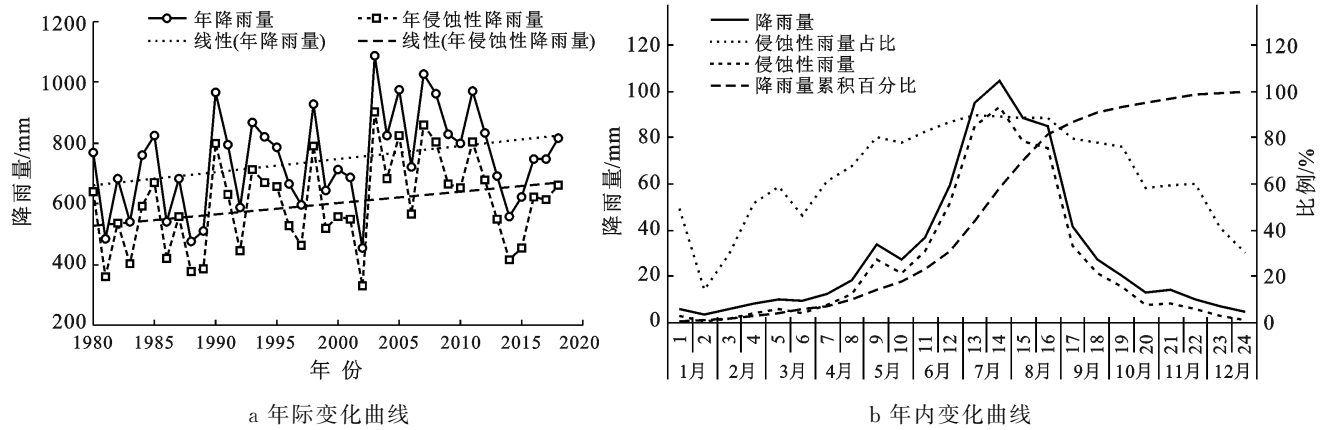


图2 沂蒙山区降雨量年际、年内变化特征曲线

2.1.2 降雨空间分布特征 采用经验贝叶斯法对多年平均降雨量和侵蚀性降雨量进行空间插值(图3)。由图3可知,区域内多年平均降雨量介于581.70~852.63 mm,最高值位于淄川中部,最低值位于泗水北部;主要集中于700~800 mm,占区域总面积的77.90%;800 mm以上的区域占7.75%。多年侵蚀性降雨量介于490.58~676.43 mm,最高值位于东港西部,最低值位于泗水北部;主要集中在550~650 mm,

占区域总面积的82.93%;650 mm以上占9.44%。二者均呈现北低南高,西低东高的空间分布趋势,在西北角出现高值旋涡。

根据多年平均侵蚀性降雨量占多年平均降雨量的比例(图4),研究区侵蚀性降雨量比例介于77.21%~85.24%,呈现出北低南高,西低东高的趋势,与降雨量空间分布趋势接近,但西北区域未出现高值旋涡。

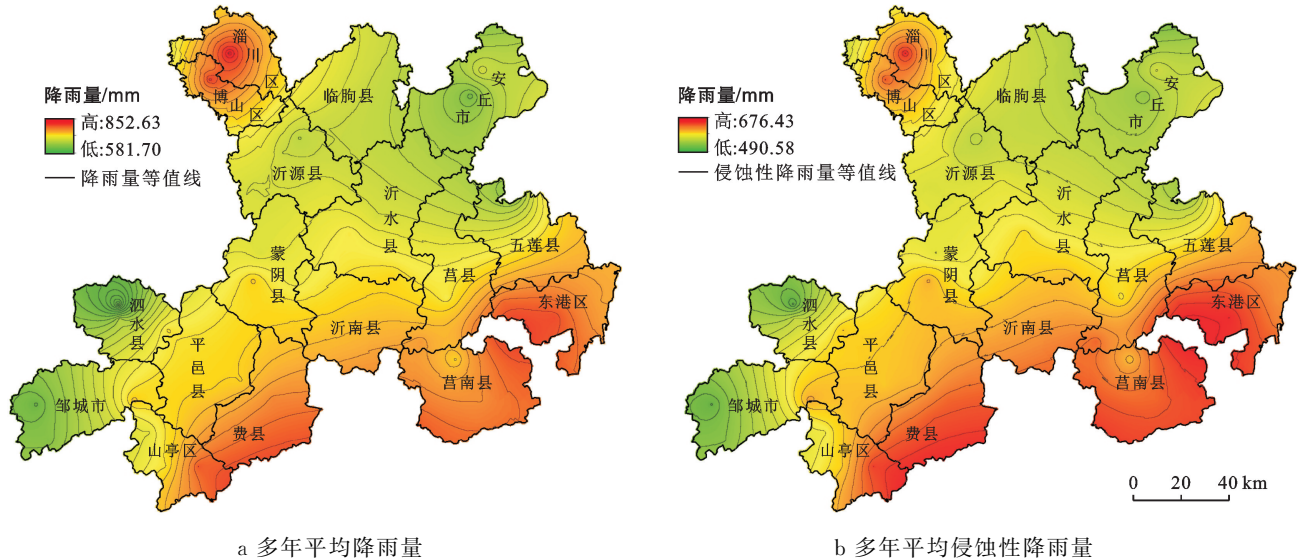


图3 沂蒙山区多年平均降雨量和多年平均侵蚀性降雨量空间分布

2.2 降雨侵蚀力时间变化趋势

2.2.1 年际变化趋势及突变分析 降雨侵蚀力和降雨量变化趋势存在一致性,年降雨侵蚀力与年降雨量、侵蚀性雨量相关系数分别为0.86,0.93($p < 0.01$)。由图5可知,年降雨侵蚀力介于1 662.45~5 850.45 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均为3 656.87 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/$

$(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,呈波动上升趋势,平均每年增长26.15 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均涨幅0.72%;汛期降雨侵蚀力介于1 058.57~5 084.07 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均3 220.68 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,年际变化规律与年降雨侵蚀力基本一致,平均每年增长21.70 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均涨幅0.67%。因此,年降

雨侵蚀力的上升主要由汛期降雨侵蚀力的增长组成,非汛期降雨侵蚀力增长量较少,但平均涨幅达 1.01%。

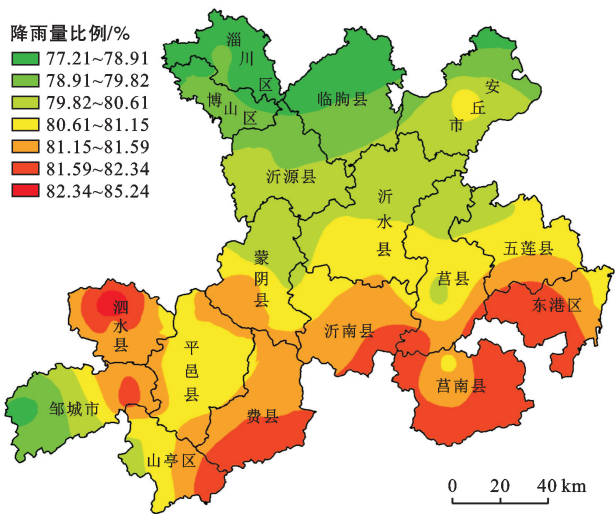


图 4 沂蒙山区多年平均侵蚀性降雨量占多年平均降雨量比例空间分布

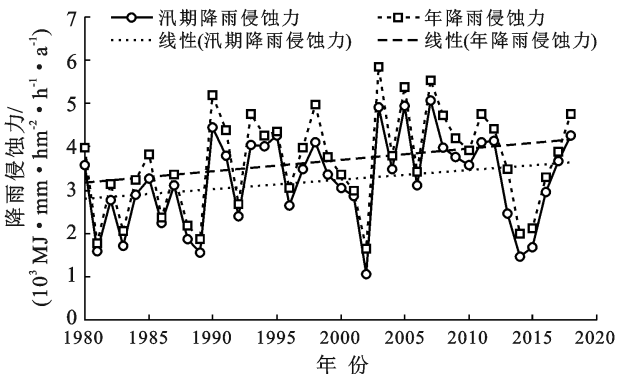


图 5 沂蒙山区 1980—2018 年降雨侵蚀力年际变化特征

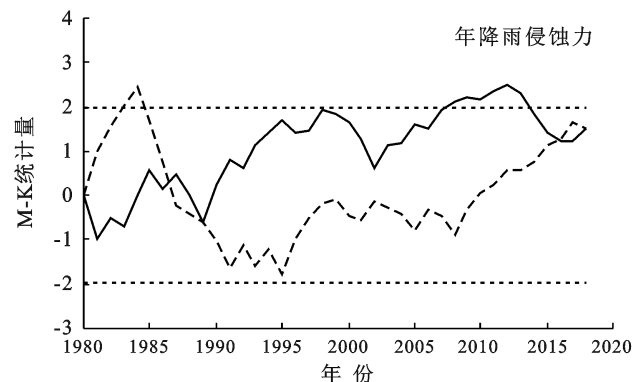


图 7 沂蒙山区降雨侵蚀力 M-K 突变检验曲线

根据累积距平曲线和 5 a 滑动平均曲线(图 6),沂蒙山区的降雨侵蚀力年际变化趋势可分为 6 个阶段:波动下降阶段 1980—1989,1995—2002,2012—2016,波动上升阶段 1989—1995,2002—2012,2016—2018 年。因此,突变点可能位于 1989,1995,2012,2016 年。

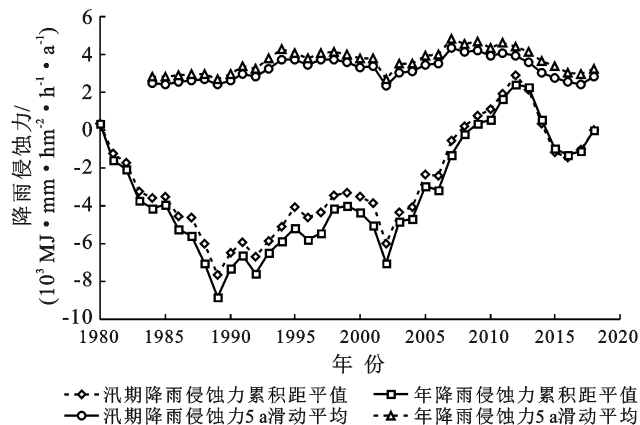


图 6 沂蒙山区 1980—2018 年降雨侵蚀力累积距平曲线和 5 a 滑动平均值变化特征

利用 M-K 突变检验法对突变点做进一步检验(见图 7)。沂蒙山区的降雨侵蚀力的 UB_k 和 UF_k 在 1995 年和 2012 年均没有交点,在 1989 年和 2016 年存在突变点。由于 UF_k 在 1990 年之后普遍高于 0,呈上涨趋势,且在 2008—2013 年超过临界值 1.96,存在显著性上涨。因此,年降雨侵蚀力和汛期降雨侵蚀力由 1989 年发生突变,开始上升,且存在 5 a 的显著性上涨,将会增加区域水土流失风险,易形成山洪、泥石流等水土流失灾害。

2.2.2 年内变化特征及集中度分析 根据研究区 24 个半月多年平均降雨侵蚀力统计(图 8),降雨侵蚀力主要集中在汛期(占全年 85.92%),其中 7,8 月降雨侵蚀力各占 33.05%和 30.21%;1—4 月和 11—12 月降雨侵

蚀力占比极少,仅占全年降雨侵蚀力的 4.54%,其中 1 月份降雨侵蚀力最低,仅 8.05 $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。根据 FI 指数(399.88)和 CI 指数(0.24)降雨侵蚀力具有高度月集中性特征。

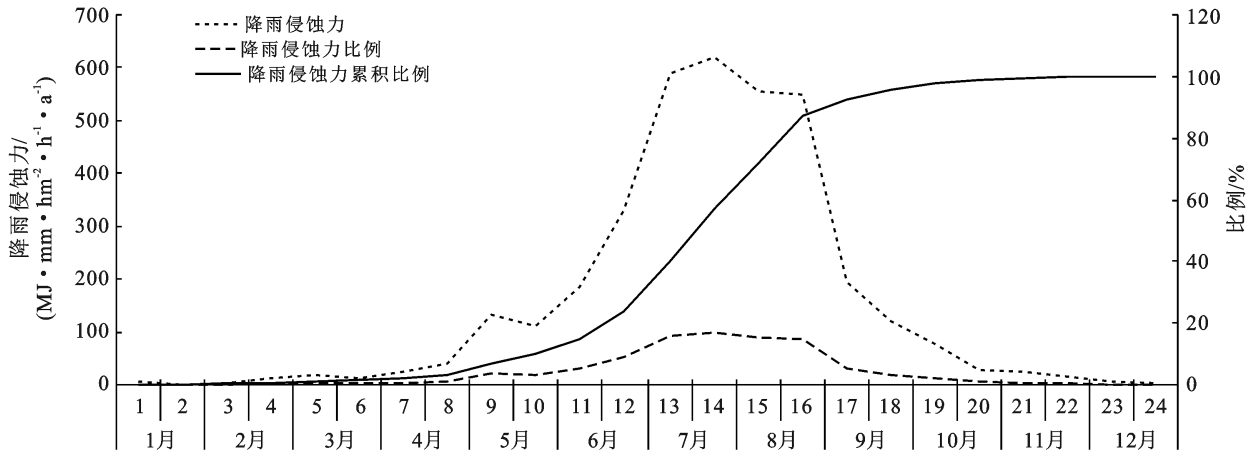


图 8 沂蒙山区降雨侵蚀力年内变化特征

2.3 降雨侵蚀力空间变异性

2.3.1 多年平均降雨侵蚀力空间分布特征 采用经验贝叶斯对多年平均降雨侵蚀力进行插值(图 9),并统计不同梯度降雨侵蚀力面积(表 2)。研究区多年平均降雨侵蚀力介于 2 983.39~4 377.48 MJ·mm/(hm²·h·a),总体呈现北低南高、西低东高的空间分布趋势,最低值出现在安丘北部,最高值出现在山亭东南部。根据降雨侵蚀力梯度数据统计(表 2),降雨侵蚀力主要集中在 3 250~4 000 MJ·mm/(hm²·h·a),占区域总面积的 79.40%;4 250 MJ·mm/(hm²·h·a)以上的区域仅占 1.62%。

表 2 沂蒙山区降雨侵蚀力面积统计

降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	面积/km ²	面积 比例/%
2 750~3 000	3.73	0.01
3 000~3 250	1 585.84	6.04
3 250~3 500	7 517.05	28.61
3 500~3 750	7 083.81	26.96
3 750~4 000	6 259.38	23.83
4 000~4 250	3 423.48	13.03
4 250~4 500	398.71	1.52

系数均较高,说明该区域年际降雨侵蚀力波动性较高,且上涨趋势比较明显。

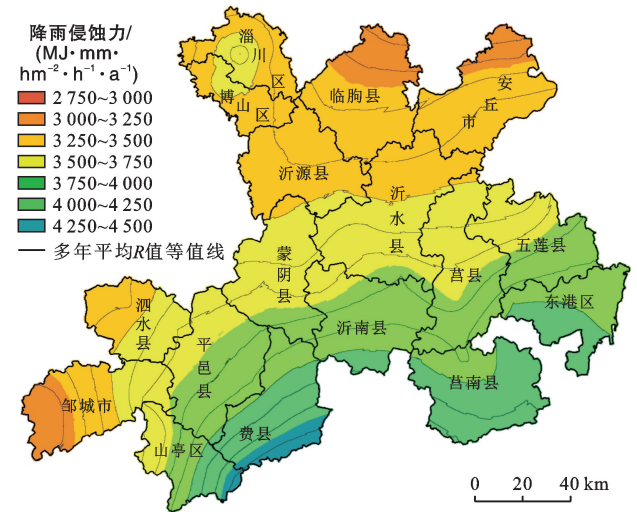


图 9 沂蒙山区多年平均降雨侵蚀力空间分布

3 讨论与结论

3.1 讨论

在本研究中,降雨侵蚀力总体呈不显著上涨趋势,局部呈现显著性增长,与刘正佳等^[29]、冯若昂等^[23]、马良等^[28]降雨侵蚀力变化趋势相似,但与肖蓓等^[22]结果相反。肖蓓等^[22]采用山东省 34 个气象站点研究发现 1961—2015 年年降雨量和降雨侵蚀力总体呈波动下降趋势,其中,鲁中南山地丘陵区 13 个站点降雨量和降雨侵蚀力年际波动大,但总体降低趋势轻微,平均每年降低 0.43 mm 和 6.17 MJ·mm/(hm²·h·a);刘正佳等^[29]采用沂蒙山区及其周边 38 个气象站点 1971—2008 年数据,发现降雨侵蚀力最低的 10 a 出现在 1980—1989 年,而后 10 a 降雨侵蚀力最高;冯若昂等^[23]采用山东省 23 个气象站研究发现 1966—2015 年降雨侵蚀力总体呈不明显增加趋

2.3.2 降雨侵蚀力空间变化趋势 采用径向基函数插值对 71 个站点 M-K 检验值 z 值和变异系数进行插值(图 10)。研究区 z 值介于 -0.91~2.6,整体以 >0 为主,尤其是在西北的博山、淄川、临朐存在明显的上升趋势(z 值 >1.96),仅在费县中部、沂南中部、东港西部等少量区域 z 值小于 0,存在不显著的下降趋势(图 10a)。

根据图 10b 可知,研究区年降雨侵蚀力变异系数介于 0.35~0.79,均为中等变异,说明该区域降雨侵蚀力年际差异较大。其中,莒南整体变化相对较小,而东北部淄川—临朐—安丘一带变异系数较高。综合考虑 z 值和变异系数,在西北部和北部 z 值和变异

势,根据其降雨侵蚀力增长分布图,发现在研究区内,淄川区周边降雨侵蚀力增量较高,在临沂市周边呈下降趋势,与本研究变化趋势空间分布比较一致;马良等^[28]采用山东省 22 个气象站点 1951—2008 年降雨数据发现,全省降雨侵蚀力总体未有显著增减,但在鲁中南山区有明显升高趋势。综合几位学者研究与本研究结果来看,本研究区范围内降雨侵蚀力高值

年份出现在 1964,1991,2003 年,而 2014 年后降雨侵蚀力呈上升趋势,但高值尚未出现,可能是肖蓓等^[22]研究中出现轻微下降的原因。综上所述,除了降雨数据站点的数量和空间分布位置,降雨的周期性变化也会对降雨侵蚀力的变化趋势造成影响,可进一步延长降雨时间年限,分析降雨周期,并以此为单元进行降雨侵蚀力的变化趋势分析。

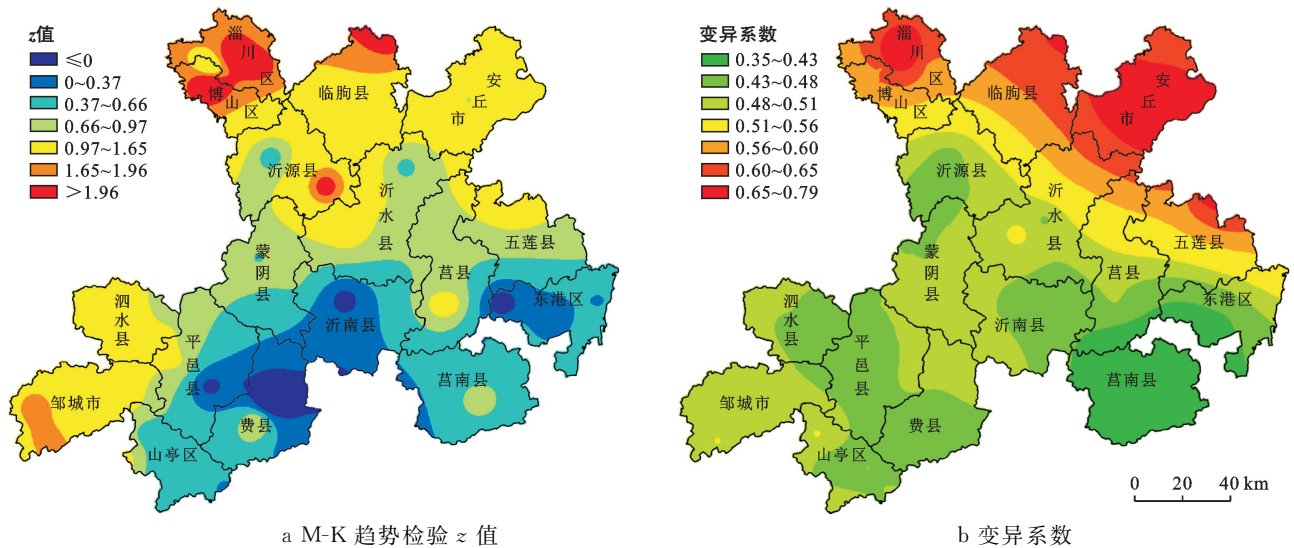


图 10 沂蒙山区降雨侵蚀力 M-K 趋势检验 z 值和变异系数空间分布

3.2 结论

(1) 降雨量和侵蚀性降雨量成中度月集中性,降雨侵蚀力具有高度月度集中性,均主要集中于 7—8 月份,呈单峰形。

(2) 区域多年平均降雨侵蚀力介于 $2\ 983.39 \sim 4\ 377.48 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 平均 $3\ 656.87 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 以 $3\ 250 \sim 4\ 000 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 分布范围最广,占 79.40%;多年平均降雨量介于 $581.70 \sim 852.63 \text{ mm}$, 平均 743.52 mm , 以 $700 \sim 800 \text{ mm}$ 分布范围最广,占 77.90%;总体上呈现南高北低、东高西低的趋势。

(3) 降雨侵蚀力和降雨量、侵蚀性雨量 1980—2018 年的年际波动规律相似,呈极显著相关($p < 0.01$)。研究区总体年降雨侵蚀力、汛期降雨侵蚀力年际变化属中度变异,具有不显著的增长趋势;年降雨量和侵蚀性降雨量年际变化为中度变异,且在 90% 区间显著性增长。在空间分布上,降雨侵蚀力在西北的博山、淄川、临朐存在明显的波动上升趋势($z > 1.96$),仅在南部少量区域存在不显著的下降趋势($z < 0$)。

[参 考 文 献]

[1] Liu Baoyuan, Xie Yun, Li Zhiguang, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8

(4):430-439.

- [2] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[C]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, 2002.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning [M]. Agriculture Handbook, 1978. No.537. USDA.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions American Geophysical Union, 1958,39(2):285-291.
- [5] 杨轩.降雨侵蚀力计算方法研究进展[J].安徽农业科学, 2019,47(16):5-8.
- [6] 李维杰.太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征[D].重庆:西南大学,2019.
- [7] Arnoldus H M J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco[EB/OL]. FAO Soils Bulletin, 1977(34):39-51.
- [8] Foster G R, Lane L J, Nowlin J D, et al. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas [J]. Transactions of the ASAE, 1981,24(5): 1253-1262.
- [9] Bonilla C A, Vidal K L. Rainfall erosivity in central Chile [J]. Journal of Hydrology, 2011,410(1/2):126-133.
- [10] 谢云,章文波,刘宝元.用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J].水土保持通报,2001,21(6):53-56.

- [11] 郭新波,王兆骞,张如良.浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究[J].水土保持学报,2001,15(3):35-37.
- [12] 史志华,郭国先,曾之俊,等.武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J].中国水土保持,2006(1):22-24.
- [13] 吴素业.安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J].中国水土保持,1994(4):12-13.
- [14] 杨轩,梁音,方继青,等.基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型[J].土壤学报,2010,47(2):216-222.
- [15] 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.
- [16] Zhu Dayun, Xiong Kangning, Xiao Hua. Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of Southern China, 1960—2017 [J]. Catena, 2021,197: 104977.
- [17] 殷水清,章文波,谢云,等.基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J].中国水土保持,2013(10):45-51.
- [18] 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.
- [19] 温天福,张范平,胡建民,等.1958—2014年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征[J].水土保持研究,2020,27(1):7-14,20.
- [20] 唐亦汉,陈晓宏.近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J].地理科学,2015,35(4):476-482.
- [21] 马良,姜广辉,左长清,等.江西省50余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J].农业工程学报,2009,25(10):61-68.
- [22] 肖蓓,崔步礼,姜宝福,等.山东省不同地形区降雨侵蚀力时空变化特征[J].地球环境学报,2019,10(3):267-280.
- [23] 冯若昂,刘加珍,陈永金,等.山东省多年降雨侵蚀力及其增长率变化分析[J].自然灾害学报,2017,26(5):83-92.
- [24] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: A comparative index [J]. The Professional Geographer, 1980,32(3): 300-309.
- [25] 王朋辉,张陶,于小磊.近65年桂林市降雨侵蚀力变化特征与周期演化[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2019,37(2):23-28.
- [26] 鲁向晖,张海娜,白桦,等.赣江流域1986—2015年降雨侵蚀力时空变化特征[J].长江科学院院报,2020,37(10):51-58.
- [27] 张优,王娟,张杰,等. GIS与地统计学的土壤水分空间插值方法[J].四川师范大学学报(自然科学版),2019,42(5):703-710.
- [28] 马良,左长清,孙勤,等.山东省降雨侵蚀力空间分布特征及简易方程的研究[J].水土保持研究,2010,17(2):28-31.
- [29] 刘正佳,刘占仁,王丝丝,等.基于日降雨的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化研究[J].水土保持研究,2012,19(2):34-37.

(上接第136页)

- [12] 付婧,王云琦,马超,等.植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J].水土保持学报,2019,33(2):1-8.
- [13] 张培培,李琼,阚红涛,等.基于SWAT模型的植草河道对非点源污染控制效果的模拟研究[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1204-1209.
- [14] 王民浩,周晓平,焦梦,等.流域水环境综合治理技术体系研究:以兆河流域为例[J].环境工程,2019,37(10):16-22,28.
- [15] 张青梅,韩峰,刘湛,等.基于SWAT模型的湘江株洲段汞面源污染负荷测算[J].四川环境,2018,37(2):32-37.
- [16] 郑思远,王飞儿,俞洁,等.水文响应单元划分对SWAT模型总氮模拟效果的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1305-1311.
- [17] 王中根,夏军,刘昌明,等.分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22(4):649-655.
- [18] 孟现勇,王浩,雷晓辉,等.基于CMDAS驱动SWAT模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J].生态学报,2017,37(21):7114-7127.
- [19] 胡德秀,李立,张艳,等.渭河干流陕西段综合治理前后的水质变化与趋势[J].水土保持通报,2018,38(5):97-102.
- [20] Giri S, Nejadhashemi A P, Woznicki S A, et al. Evaluation of targeting methods for implementation of best management practices in the Saginaw River watershed [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 103:24-40.
- [21] 李卉,苏保林.平原河网地区农业非点源污染负荷估算方法综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(5):662-666.
- [22] 李振炜,于兴修,姚孝友,等.农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J].生态学杂志,2011,38(12):251-258.
- [23] 周慧平,高超.巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J].环境科学,2008,29(10):10-16.
- [24] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M, et al. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales [J]. Journal of Environmental Management, 2011,92(10):2823-2835.
- [25] 梁菊,叶春,李春华,等.太湖竺山湾缓冲带两种人工草林土壤反硝化作用比较[J].环境科学研究,2017,30(5):744-754.