

1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化

吴洁玲^{1,2}, 查轩^{1,2}, 陈世发³, 毛兰花^{1,2}, 黄博文^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建省亚热带资源与环境重点实验室,
福州 350007;3.韶关学院旅游与地理学院,广东 韶关 512005)

摘要: 降雨是引起土壤水蚀的主要动力因子之一,为探讨韶关市不同量级降雨对土壤水蚀特征造成的影响,选取 1951—2018 年韶关市逐日降雨量数据,采用日降雨侵蚀力模型计算降雨侵蚀力,利用变异系数、趋势系数分析不同时间尺度各量级降雨侵蚀力的变化。结果表明:(1)68 年来韶关市年均降雨侵蚀力为 $9\ 314(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,变异系数为 0.29,属于中等变异;(2)年降雨量、降雨日数、侵蚀性降雨量和降雨日数均呈上升趋势,而非侵蚀性降雨量和降雨日数则呈下降趋势,且暴雨量和暴雨侵蚀力呈较明显上升趋势,说明韶关市降雨更为集中,降雨侵蚀力增加;(3)大雨以上量级的降雨日数和降雨量占总降雨日数和总降雨量的比例分别为 43.91%,51.15%,而其引起的降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力比例却高达 77.05%。研究结果为韶关市的土壤侵蚀的监测和水土保持工作提供参考。

关键词: 不同量级降雨侵蚀力;韶关;变异系数;Mann-Kendall

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0021-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.004

Variations of Rainfall Erosivity of Different Magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018

WU Jieling^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, CHEN Shifa³, MAO Lanhua^{1,2}, HUANG Bowen^{1,2}

(1.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.Fujian Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Fuzhou 350007;

3.College of Tourism and Geography, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005)

Abstract: Rainfall is one of the main dynamic factors that cause soil water erosion. In order to explore the effects of different levels of rainfall on the characteristics of soil water erosion in Shaoguan City, the daily rainfall data of Shaoguan City from 1951 to 2018 were selected, the daily rainfall erosivity model was used to calculate the rainfall erosivity, and the variation coefficient and trend coefficient were used to analyze the changes of rainfall erosivity in different time scales. The results indicated that: (1) The average annual rainfall erosivity of Shaoguan City in 68 years was $9\ 314(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, and the variation coefficient was 0.29, which was a medium variation. (2) The annual rainfall, rainfall days, erosive rainfall and rainfall days showed an upward trend, while the non-erosive rainfall and rainfall days showed a downward trend, and heavy rainfall volume and rainstorm erosivity showed an obvious upward trend, indicating that rainfall was more concentrated and rainfall erosivity increased in Shaoguan City. (3) The proportion of rainfall days and rainfall over heavy rain to total rainfall days and total rainfall was 43.91% and 51.15%, respectively, while the proportion of rainfall erosivity caused by heavy rain to total rainfall erosivity was 77.05%. The results could provide reference for soil erosion monitoring and soil and water conservation in Shaoguan City.

Keywords: rainfall erosivity of different magnitude; Shaoguan; coefficient of variation; Mann-Kendall

严重的水土流失会对农业的生产条件造成破坏,威胁粮食安全。根据 2019 年全国水土流失动态监测,全国水土流失面积 271.08 万 km^2 ,其中水力侵蚀面积 113.47

万 km^2 ,占水土流失总面积的 41.86%^[1],中国水土保持工作形势严峻。

降雨侵蚀力是指由降雨所引起土壤侵蚀的潜在

收稿日期:2021-03-02

资助项目:国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC0505400);国家科技支撑计划项目“福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成和示范”(2014BAD15B02)

第一作者:吴洁玲(1998—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:jieling2020@163.com

通信作者:查轩(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:zxha@fjnu.edu.cn

能力,降雨侵蚀力 R 值是评估土壤潜在侵蚀能力的一个动力指标^[2],研究降雨侵蚀力的特征对区域的水土保持和防治工作具有重要的现实意义。目前,降雨侵蚀力的研究主要基于气象降雨数据资料进行计算,降雨量作为重要气象因子之一,是水土流失发生时不可或缺的主要影响因子^[3],基于不同时间尺度降雨侵蚀力计算模型均得到普遍的运用^[4-5]。其中章文波等^[4]提出的用日雨量计算降雨侵蚀力的方法在南方地区的降雨侵蚀力研究中得到很好的运用,如珠江流域^[6]、闽西地区^[7]、赣江流域^[8]、怒江^[9]、四川省^[10]、南流江流域^[11];赖成光等^[6]对珠江流域降雨侵蚀力研究发现,珠江流域仅在春秋季节降雨侵蚀力呈下降趋势,年降雨侵蚀力、冬夏季降雨侵蚀力呈上升趋势;阮欧等^[12]对贵州省的降雨侵蚀力时空特征进行分析发现,该区的降雨侵蚀力呈现南部大东部小,夏季大冬季小的趋势;姬志军等^[13]对鄱阳湖的降雨侵蚀力分析发现,年内的降雨侵蚀力变化主要呈现单峰型变化;芦鑫等^[14]对秦岭南北地区的降雨侵蚀力进行分析发现,秦岭以北的各量级降雨侵蚀力呈现下降趋势,秦岭以南的各量级降雨侵蚀力呈上升趋势。降雨侵蚀力已经成为土壤侵蚀、产沙和水环境建模的主要参数之一。

不同量级降雨的时空差异对土壤水蚀特征造成不同程度的影响^[15]。已有研究^[16]表明,土壤的水力侵蚀往往与降雨日数相对较少、降雨量和降雨强度相对较大的降雨事件有关,因此对不同量级降雨侵蚀力进行研究是有必要的。本文利用降雨侵蚀力模型计算韶关市不同量级的降雨侵蚀力,深入研究该区域降雨侵蚀力的形成机制和演化趋势,以期对农业生产和水土保持工作提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

韶关市位于广东省北部,北接湖南,东邻江西,分别与广东省河源、惠州、广州及清远等市接壤。位于南岭山脉南麓,地形以山地、丘陵为主,地势北高南低,属中亚热带湿润型季风气候区,雨热同期,降水丰富。年平均气温约 21℃,年平均降水量为 1 700 mm,全年无霜冻期约为 310 天。植被多为亚热带常绿阔叶林,但受人类活动的不合理利用,地表裸露易遭雨水冲刷,且土壤多为可侵蚀性强的红壤,易形成较为严重的土壤侵蚀区。

1.2 数据来源与处理

降雨资料主要来源于中国气象数据共享网(<http://data.com.cn/>)提供的韶关市 1951—2018 年的逐日降雨资料,以日降雨数据为基础计算韶关市半月降雨侵蚀力,并以此统计韶关市年降雨侵蚀力和各量

级降雨侵蚀力。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法 本研究采用章文波等^[17-18]提出的基于日降雨数据计算降雨侵蚀力 R 值的方法,对韶关市 1951—2018 年的降雨侵蚀力进行计算。降雨侵蚀力的计算方法为:

$$R_j = \alpha \sum_{k=1}^n (p_k)^\beta \quad (1)$$

式中: R_j 为第 k 个半月的降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h)); p_k 为第 k 个半月内的日降雨量(≥ 12 mm 的降雨量)(mm); n 为第 k 个半月内的日降雨量 ≥ 12 mm 的降雨日数(d); α 与 β 为模型的计算参数,具体计算方法为

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

式中: P_{d12} 表示 ≥ 12.0 mm 日降雨量(mm); P_{y12} 表示日降雨量 ≥ 12.0 mm 的年平均降雨量(mm)。

本文参考我国第一次全国水利普查水土保持专项普查的标准,将 12.0 mm 作为本文侵蚀性降雨量的标准。将日降雨划分为非侵蚀性降雨(< 12.0 mm)和侵蚀性降雨,其中侵蚀性降雨划分为不同量级:中雨(12.0~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)、暴雨(≥ 50.0 mm)。根据公式(1)计算每半个月不同量级的降雨侵蚀力,逐年汇总后得到多年平均降雨侵蚀力以及不同量级的多年平均降雨侵蚀力,由此算出各雨量级的降雨侵蚀力,并分别命名为中雨侵蚀力、大雨侵蚀力和暴雨侵蚀力。

1.3.2 Mann-Kendall 突变检测 Mann 和 Kendall^[19-20]提出的 Mann-Kendall 检验法普遍用于检测气候变化趋势,且有较好的实际应用效果^[21-22]。本文用其检测降雨侵蚀力的变化趋势以及时间突变。

1.3.3 气候倾向率 以时间为自变量,气象要素为因变量建立一元线性方程,其中斜率的 10 倍称为气候倾向率。当气候倾向率为正值时,表明气象要素随时间的变化呈上升趋势,当气候倾向率为负值时,表明气象要素随时间的变化呈下降趋势。

1.3.4 变异系数(CV) 本文使用 SPSS 软件进行变异系数分析,其大小在一定程度上可以反映要素的离散程度。变异系数 $CV \leq 0.1$ 时为弱变异, $0.1 < CV < 1$ 时为中等变异, $CV \geq 1$ 为强变异。

2 结果与分析

2.1 年降雨量、年降雨侵蚀力特征分析

韶关市 1951—2018 年间平均降水量为 1 614.13 mm,多年降雨侵蚀力值的变化范围为 3 929~16 473 (MJ·mm)/(hm²·h·a),平均值为 9 314(MJ·

mm)/(hm²·h·a)。从图 1 可以看出,韶关市年均降雨侵蚀力与年均降雨量 68 年间变化趋势略有不同,两者最大值出现的年份均为 2016 年,分别为 16 473.80 (MJ·mm)/(hm²·h·a),2 419.1 mm,而最小值出现的年份则不相同,年均降雨侵蚀力最小值出现在 1979 年,仅为 3 929.64 (MJ·mm)/(hm²·h·a),

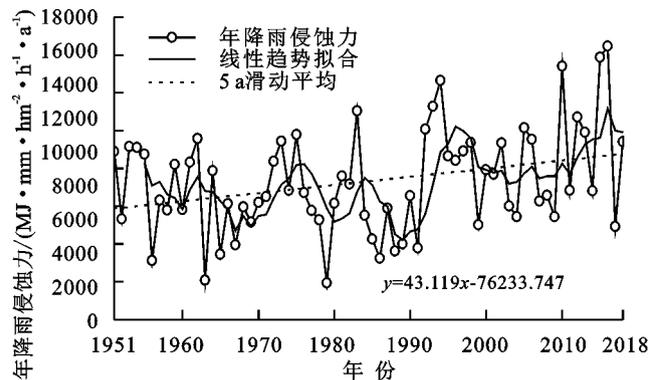
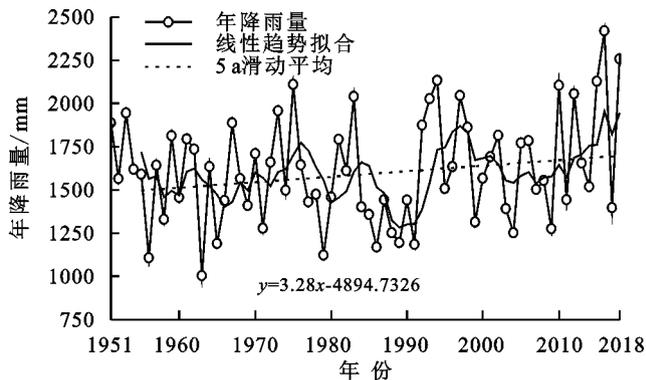


图 1 多年年均降雨侵蚀力与年均降雨量特征分析

年均降雨量最小值出现在 1963 年,只有 1 003.6 mm,年均降雨侵蚀力与年均降雨量的极值比分别为 1:4.192,1:2.41,表明年均降雨侵蚀力变化幅度相对较大;年均降雨量与年均降雨侵蚀力的变异系数分别为 0.18,0.29,均属于中等变异,进一步验证年均降雨侵蚀力年际变化相对剧烈^[23]。



2.2 不同量级降雨侵蚀力

将不同量级年均降雨日数、降雨量以及降雨侵蚀力的特征进行分析(图 2)可知,韶关市年均降雨日数呈现随着降雨量级的增大而逐渐减小,年均降雨侵蚀力则呈现随着降雨量级的增大而逐渐增大的趋势。年均中雨日、大雨日、暴雨日占总降雨日数的比例分别为 56.07%,32.25%,11.66%,年均中雨量、大雨量、暴雨量占总降雨量的比例分别为 25.26%,28.79%,22.36%,年均中雨侵蚀力、大雨侵蚀力、暴雨侵蚀力占年均降雨侵蚀力的比例分别为 22.94%,36.04%,41.01%。分析发现,大雨以上量级的降雨日数和降雨量占总降雨日数和总降雨量的比例分别为 43.91%,51.15%,而其引起的降雨侵蚀力占总降雨侵蚀力比例却高达 77.05%,因此降雨日数少、雨量级别较大的降雨事件对韶关市的降雨侵蚀力的产生以及变化做出较大贡献。

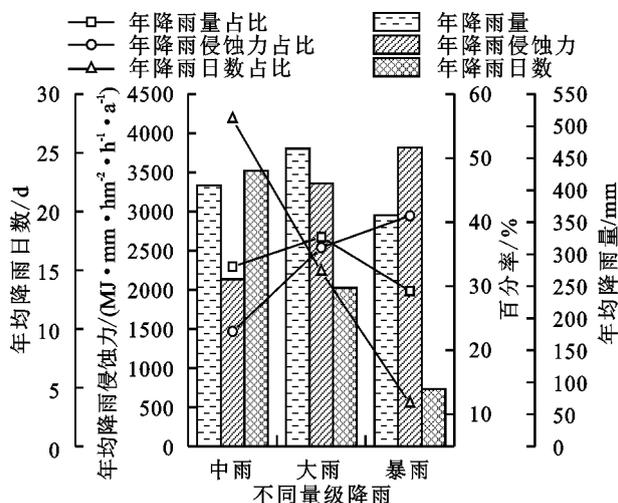


图 2 不同量级降雨日数、降雨量、降雨侵蚀力比例及其特征分析

2.3 不同量级降雨侵蚀力年内特征

本研究的季节划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至翌年2月)。由表 1 可知,韶关市的降雨侵蚀力主要集中在春季,占全年的 42.73%,接近全年的 1/2,其次是夏季,占全年的 35.90%,而冬季最小,仅占全年的 8.73%。春季的暴雨侵蚀力最大,平均值为 1 636.02 (MJ·mm)/(hm²·h·a),为最小值(冬季暴雨侵蚀力)的近 11 倍,这说明降雨侵蚀力在季节上分布不均。通过倾向率比较发现,不同量级降雨侵蚀力季节变化趋势存在一定差异,春、夏、秋季节,除春季的中雨侵蚀力和秋季的大雨侵蚀力外,其余各量级的侵蚀力均呈现不同程度的上升趋势,其中暴雨侵蚀力上升幅度最大,10 年间分别上升 17.84,5.62,8.43 (MJ·mm)/(hm²·h·a);冬季的各量级降雨侵蚀力均呈下降趋势,下降幅度相对较大,且均通过 99% 的显著性检验表明,韶关市降雨侵蚀力呈上升趋势主要是由春、夏、秋季节的侵蚀力造成,其中暴雨侵蚀力占主导。同时通过变异系数比较发现,春、夏季的变异系数均属于中等变异,而秋、冬季的变异,除秋季的大雨侵蚀力和冬季的中雨侵蚀力,均为强变异,呈现随着降雨量级和雨强的增大,变异系数也逐渐增大的趋势,相关部门应加强对强降雨所引发的土壤侵蚀的监测力度。

2.4 降雨侵蚀力 10 年尺度变化特征

通过分析 1951—2018 年韶关市降雨侵蚀力 10 年尺度变化,可以深入了解不同时期降雨侵蚀力的变化特征。从图 3 可以看出,90 年代之前的年均降雨侵蚀力低于多年均值,90 年代之后的年均降雨侵蚀力高于多年均值。其变化趋势表现为在 1951—1990 年期间呈波动下降趋势,60 年代达到最低值,年均降雨侵蚀力 7 829.47

(MJ·mm)/(hm²·h·a), 下降幅度较为缓慢, 相对下降 17.24%, 低于均值 18.96%, 可推知韶关市 60 年代属于相对干旱时期。而 1990—2018 年期间则成波动上升趋势, 上升幅度较大, 相对上升 53.45%, 土壤侵蚀的风险相对增加。不同年代降雨侵蚀力的变化趋势主要受大

尺度环流因素的影响^[24], 60 年代处于 ENSO 事件高发时期, ENSO 冷暖事件时期夏季风偏弱, 在一定程度上使韶关市降雨量偏少^[25], 减弱韶关市夏、秋季的降雨侵蚀力。在 10 年尺度上, 韶关市的降雨侵蚀力呈现较明显的波动增加趋势。

表 1 不同量级降雨侵蚀力在不同季节所占比例

季节	降雨类型	降雨侵蚀力均值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	占年均降雨 侵蚀力比例/%	倾向率/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·10 a ⁻¹)	变异 系数
春	中雨	850.75	9.13	-3.36	0.35
	大雨	1493.29	16.03	1.39	0.45
	暴雨	1636.02	17.57	17.84	0.93
夏	中雨	683.01	7.33	0.71	0.43
	大雨	1068.02	11.47	1.67	0.54
	暴雨	1593.27	17.10	5.62	0.87
秋	中雨	260.83	2.80	1.80	1.05
	大雨	474.28	5.09	-0.58	0.74
	暴雨	441.49	4.74	8.43*	1.48
冬	中雨	342.64	3.68	-6.04**	0.72
	大雨	321.77	3.45	-12.37**	1.12
	暴雨	149.25	1.60	-10.93**	2.08

注: * 表示通过 0.05 显著性检验; ** 表示通过 0.01 显著性检验。下同。

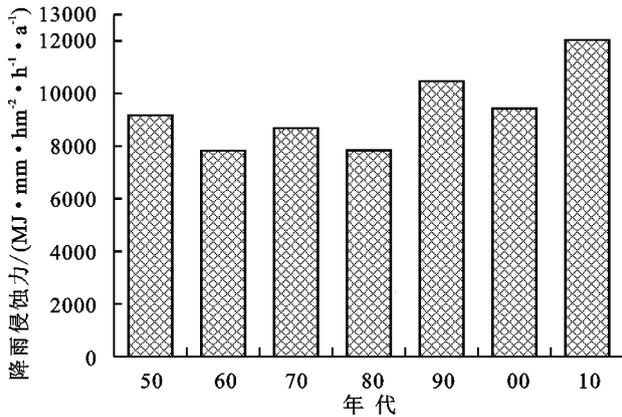


图 3 年均降雨侵蚀力年代变化特征

2.5 各量级降雨趋势分析

从表 2 可以看出, 对于各量级降雨量而言, 非侵蚀性降雨呈现下降趋势, 其他各量级侵蚀性降雨均呈现不同程度的上升趋势, 其中暴雨和年侵蚀性降雨上升趋势相对明显, 分别为 29.64, 41.18 mm/10 a, 均通过 95% 显著性检验。有研究^[26]表明, 中国近 50 年来的极端降水事件的强度和频率均有增加趋势, 由表 2 可知, 韶关市的年降雨日数呈上升趋势, 平均每 10 年上升 0.27 天, 侵蚀性降雨日数则每 10 年上升 0.82 天。就各量级降雨而言, 非侵蚀性降雨日数呈下降趋势, 平均每 10 年下降 0.55 天, 而中雨日数、大雨日数、暴雨日数则呈现不同程度的上升趋势, 表明年降雨日数的上升主要是由侵蚀性降雨日数的增加造成。各量级降雨侵蚀力的倾向率均为正值, 表明各量级降雨侵蚀力均呈现不同

程度上上升趋势, 暴雨和年侵蚀性降雨上升趋势相对明显, 均通过 99% 显著性检验。其中年侵蚀性降雨倾向率为 431.19(MJ·mm)/(hm²·h·a), 高于广东省均值 293.1(MJ·mm)/(hm²·h·a)^[27], 表明存在由降雨引起的土壤侵蚀风险显著增加的可能性较大, 应该引起有关部门重视。

综合 68 年以来不同量级降雨变化趋势来看, 韶关市呈现年降雨量、降雨日数和侵蚀性降雨量、降雨日数上升而非侵蚀性降雨量和降雨日数下降的趋势, 其中暴雨量和暴雨侵蚀力均呈相对明显的上升趋势, 表明韶关市降雨更为集中, 降雨强度增加, 这也论证了区域性强降雨时间发生频次在增加^[26]。

2.6 突变分析

68 年来各量级降雨侵蚀力的 Mann-Kendall 突变检验见图 4。当 $UF > 0$ 时, 表明时间序列呈上升趋势, 当 $UF < 0$ 则呈下降趋势。若上升或下降趋势超过 0.05 显著性检验边界线, 则表明存在显著的变化趋势。当 UF 和 UB 2 条时间序列存在交点且处于显著性检验边界线内, 则这个交点为突变点, 其对应的时间节点为统计序列发生突变的时间。由图 4 可知, 韶关市的降雨侵蚀力在 1951—1991 年主要以下降趋势为主, 从 1992 年开始呈现上升趋势, 且在 2015 年通过 $P=0.05$ 显著性检验, 上升趋势达到显著。各量级降雨侵蚀力的年际变化波动强烈, 中雨侵蚀力在 1951—1972 年以波动下降趋势为主, 1973 年

后主要以上升趋势为主,且存在多个交点,在 2002 年通过显著性检验,考虑到交点起初时刻不确定性较大以及变化趋势的延续性,所以中雨侵蚀力的突变点为 2003 年;大雨侵蚀力波动相对比较,在 2010 年出

现突变点,但未通过显著性检验,2012 年后主要以波动上升趋势为主;暴雨侵蚀力在 1951—1990 年主要以波动下降趋势为主,在 1997 年出现突变点,1998 年后主要以上升趋势为主,且上升趋势显著。

表 2 各量级降雨量、降雨日数和降雨侵蚀力的倾向率

项目	年降雨量	非侵蚀性降雨量	中雨	大雨	暴雨	年侵蚀性降雨量
雨量倾向率/(mm · 10 a ⁻¹)	32.80	-8.38	5.25	6.29	29.64*	41.18*
雨日数倾向率/(d · 10 a ⁻¹)	0.27	-0.55	0.59	0.36	0.34	0.82
降雨侵蚀力倾向率/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹ · a ⁻¹ · 10 a ⁻¹)	—	—	26.77	43.86	360.55**	431.19**

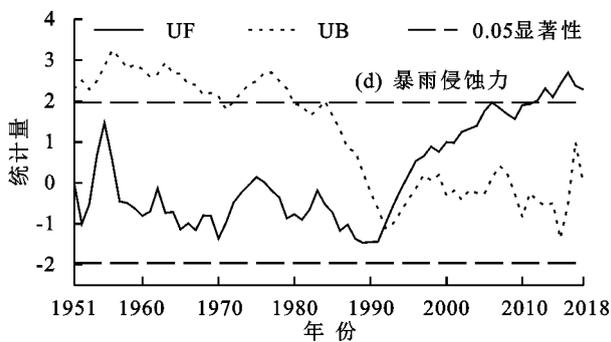
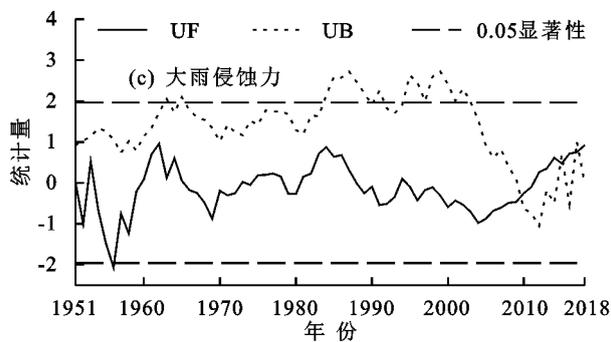
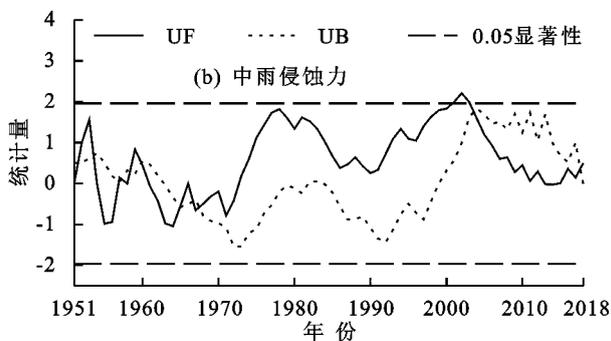
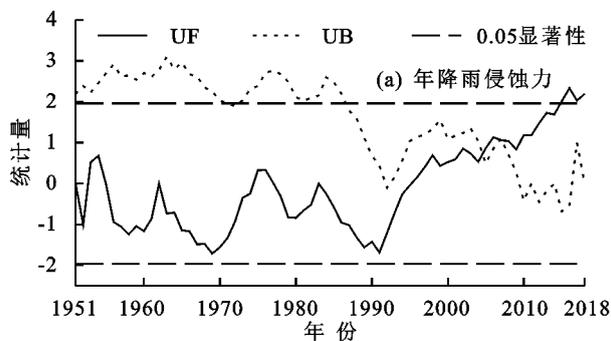


图 4 不同量级降雨侵蚀力 Mann-Kendall 突变分析

3 讨论

降雨侵蚀力主要受侵蚀性降雨影响,韶关市多年平均降雨侵蚀力为 9 314(MJ · mm)/(hm² · h · a),高于珠江流域的多年平均降雨侵蚀力^[6],这与所处的不同气候条件、地理位置有着密切联系。年降雨量、降雨日数和年侵蚀性降雨量、侵蚀性降雨日数呈上升趋势,且降雨侵蚀力上升趋势通过显著性检验,而非侵蚀性降雨量和降雨日数则呈下降趋势,这主要是在全球变暖的大背景下,我国东南沿海地区强降雨时间频率增多,而非侵蚀性降雨事件减少,由此造成侵蚀性降雨事件增多,降雨侵蚀力也有所上升。年降雨侵蚀力上升趋势显著,降雨侵蚀力和降雨量的变化并不完全一致,主要是因为降雨侵蚀力是由降雨量和降雨强度 2 个因素决定。韶关市降雨主要集中在春、夏季,在春夏之交时进入梅雨季节,降雨量大,且在 7,8 月受台风影响,降水丰富,所以全年近 7 成的降雨侵蚀力集中在春、夏季,且主要以大雨和暴雨侵蚀力为主,这对韶关市的水土保持工作带来一定挑战。因

此,在今后工作中应加强对春、夏季的降雨侵蚀力的监测、模拟和预估。

4 结论

(1)韶关市降雨以侵蚀性降雨为主,且较为集中,降雨侵蚀力产生以及变化主要与降雨日数少、雨量级别较大的降雨事件有关。

(2)韶关市 77.05%的降雨侵蚀力由占年降雨日数 43.91%的大雨和暴雨量级降雨所产生,其中暴雨侵蚀力占全年降雨侵蚀力的 41.01%,起主导作用。

(3)春、夏季各量级降雨侵蚀力的变异系数均属于中等变异,而秋、冬季各量级的变异系数,除秋季的大雨侵蚀力和冬季的中雨侵蚀力,均为强变异,呈现出随着降雨量级和雨强的增大,变异系数也在逐渐增大。

(4)年降雨量和降雨日数及侵蚀性降雨量和降雨日数均呈上升趋势,而非侵蚀性降雨量和降雨日数则呈下降趋势,且暴雨量和暴雨侵蚀力呈现较明显上升趋势,说明韶关市降雨更为集中,降雨强度增加。

(5)各量级降雨侵蚀力变化波动较大,70 年代之

前主要以波动下降趋势为主,之后总体以上升趋势为主。年降雨侵蚀力在 2015 年发生突变,并超过显著性水平 0.05 临界线,上升趋势达到显著。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.2019 年中国水土保持公报[R].北京:中华人民共和国水利部,2020-09-24.
- [2] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [3] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J].Journal of Hydrology,2007,335(3/4):247-258.
- [4] 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.
- [5] Richardson C W, Forster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J].Transaction of the ASAE,1983,26(1):153-156.
- [6] 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.
- [7] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.1980—2013 年闽西地区降雨侵蚀力时空变化特征[J].中国水土保持科学,2017,15(4):1-7.
- [8] 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.
- [9] 郑哲,邹进,潘锋,等.1961—2010 年怒江流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J].中国水土保持科学,2018,16(5):16-22.
- [10] 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.
- [11] 陈国清,赵银军,莫德丽,等.广西南流江流域降雨侵蚀力时空变化特征[J].广西科学,2020,27(3):303-310.
- [12] 阮欧,刘绥华,杨广斌,等.1966—2017 年贵州省降雨侵蚀力的时空分布特征[J].水土保持通报,2020,40(3):35-42.
- [13] 姬志军,张连明.鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征[J].人民黄河,2019,41(6):81-84.
- [14] 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.
- [15] 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的[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2142.
- [16] 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):1306-1312.
- [17] 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.
- [18] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [19] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):35-37,40.
- [20] 简虹,骆云中,谢德体.基于 Mann-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究:以重庆市沙坪坝区为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):217-222.
- [21] 雷璐,孙春敏.Mann-Kendall 检验方法在增江径流趋势分析中的应用[J].中国科技信息,2012(19):39,73.
- [22] 李春晖,郑小康,杨志峰,等.黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(1):80-85.
- [23] 殷兵,吴健平,章文波.基于 GIS 的降雨侵蚀力计算器实现研究[J].水土保持研究,2014,21(4):123-126.
- [24] 冯若昂,刘加珍,陈永金,等.山东省多年均降雨侵蚀力及其增长率变化分析[J].自然灾害学报,2017,26(5):83-93.
- [25] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年均降雨侵蚀力影响研究[J].地理科学,2016,36(10):1573-1581.
- [26] 高涛,谢立安.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):577-589.
- [27] 何绍浪,郭小君,李凤英,等.中国南方地区近 60 a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1406-1416.
- [28] 壤抗冲性的影响[J].土壤通报,2014,45(3):711-715.
- [26] Knapen A, Poesen J, Galindo-Morales P, et al. Effects of microbiotic crusts under cropland in temperate environments on soil erodibility during concentrated flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(12):1884-1901.
- [27] Seitz S, Nebel M, Goebes P, et al. Bryophyte-dominated biological soil crusts mitigate soil erosion in an early successional Chinese subtropical forest [J]. Biogeosciences, 2017, 14(24):5775-5788.

(上接第 20 页)

- [23] Wang Y, Chen J, Gu W, et al. Earthworm activities increase the leaching of salt and water from salt-affected agricultural soil during the wet-dry process under simulated rainfall conditions[J].Biology and Fertility of Soils,2016,52(3):323-330.
- [24] 郭明明,王文龙,史倩华,等.黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].农业工程学报,2016,32(10):129-136.
- [25] 吕刚,刘红民,高英旭,等.排土场边坡根系分布及其对土