

秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征

邵祎婷^{1,2}, 何毅^{3,4*}, 穆兴民^{1,5}, 高鹏^{1,5}, 赵广举^{1,5}, 孙文义^{1,5}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;
4. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 5. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 降雨侵蚀力时空变化特征的研究对区域土壤侵蚀风险评估及水土保持规划具有重要的意义。利用秦巴山区及周边地区共 63 个气象站 1961~2016 年的逐日降雨量数据计算各站的降雨侵蚀力, 借助 Kriging 空间插值法、Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变检验等方法分析了秦巴山区降雨侵蚀力的时空变化特征。结果表明: 秦巴山区年均降雨侵蚀力为 $3\ 696\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 年内变化呈单峰型, 7 月最大, 占全年的 26.6%; 四季中, 夏季最大, 冬季最小。代际间, 20 世纪 80 年代的降雨侵蚀力最大, 90 年代最小。年际间, 年降雨侵蚀力存在明显的阶段性, 但未表现出显著的趋势性和突变性特征。秦巴山区多年平均降雨侵蚀力呈南高北低的分布格局, 不同地区年均降雨侵蚀力变化于 $787 \sim 8\ 858\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 之间; 整体而言, 年降雨侵蚀力随纬度增加而减小, 随海拔升高而减小。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空变化; 日降雨量; 秦巴山区

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2019)02-0416-10

DOI: 10.11870/cjlyzyhj201902018

秦巴山区是我国重要的南北方地理分界带和“南水北调”中线工程水源区。区内地形及地质构造复杂, 泥石流、滑坡频发^[1], 水土流失问题日益严峻, 引起各界人士的高度重视。水土流失导致养分流失、水资源污染、环境恶化, 制约区域经济社会的发展^[2,3], 是目前秦巴山区亟需解决的问题。

降雨是造成水土流失的主要动力因素, 但因降雨强度、降雨量和降雨历时的不同组合作用, 水土流失特征表现各异。Wischmeier 等^[4]首次提出用降雨动能(E)和最大 30 min 降雨强度(I_{30})的乘积表征降雨侵蚀力, 以综合反映降雨特征对土壤侵蚀的影响。因此分析降雨侵蚀力对定量评估和预报水土流失具有重要意义。而 E 和 I_{30} 获取不易且记录过程繁琐耗时, 各国学者探求更为简易的方法建立估算降雨侵蚀力的模型^[5,6]。目前国内关于降雨侵蚀力的计算方法日益改进与完善,

对降雨侵蚀力的研究也较为丰富^[7-9]。孙泉忠等^[10]对中国近 30 年在降雨侵蚀力方面的研究进行总结, 认为章文波等^[11]提出的基于日降雨量计算降雨侵蚀力的模型不仅资料易获取, 精度也较高。利用章文波模型, 不同学者研究了我国松花江流域^[12]、陕北黄土高原^[13]、南方地区^[14]等的降雨侵蚀力时空变化特征。

作为一个自然地理单元, 秦巴山区涉及陕西、四川、甘肃、河南、湖北及重庆等省(市), 是水土流失重点治理区, 其降雨侵蚀力的研究显得尤为重要。吴明作等^[15]计算河南省的降雨侵蚀力, 结果表明河南省降雨侵蚀力主要集中于 7~9 月, 空间上由北向南递增。陈东东等^[16]的研究表明, 近 52 年来川西高原的降雨侵蚀力较低而盆地和攀西地区相对较高, 大致从东向西逐渐降低。张家其等^[17]分析湖北省 1957~2008 年的降雨侵蚀力时空分布规律指出, 湖北省降雨侵蚀力

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-07-04

基金项目: 中国南北过渡带综合科学考察(2017FY100904)

作者简介: 邵祎婷(1994~), 女, 博士研究生, 主要从事生态水文研究. E-mail: 15167060545@163.com

* 通讯作者 E-mail: yihe@nwu.edu.cn

总体自东南向西北递减, 最大月降雨侵蚀力在 7 月。已有工作多以行政区域单元开展研究, 但关于秦巴山区整个区域的全貌研究鲜有报道。在全球气候变化的背景下, 极端降雨事件频发, 降雨强度、降雨量及历时发生变化^[18,19], 降雨侵蚀力的年内、年际分布也势必发生变化。因此, 本文基于秦巴山区及周边地区共 63 个气象站 56 年的日降雨资料, 分析秦巴山区降雨侵蚀力的时间变化及空间分布特征, 以期为秦巴山区的水土流失防治提供参考, 并促进水土保持工作的开展及区域生态环境与社会经济的共同发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦巴山区位于 102°21'E~113°40'E, 30°43'N~35°29'N, 东西狭长, 地跨甘肃省、陕西省、河南

省、四川省、湖北省和重庆市(图 1)。地貌类型包括秦岭山地、汉江河谷盆地和大巴山山地, 地形结构复杂, 海拔高度差异显著。该地区属暖温带和北亚热带过渡区, 南北气候并存且南北部气候差异较大, 区内年均降水 450~1 300 mm, 生物区系复杂多样。众多领域学者对秦巴山区进行研究, 划定的研究范围略有差异, 但主体区域基本一致^[20,21]。

1.2 资料来源

本研究采用的日降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn>)。由于存在数据缺测、建站时间不一致等情况, 为保证资料的统一性和完整性, 对站点进行了筛选, 最终选择秦巴山区及周边地区共 63 个气象站点从 1961 至 2016 年计 56 年的逐日降雨量数据。其中, 研究区内的站点 30 个, 周边地区的站点 33 个(用于降雨侵蚀力空间插值分析)。

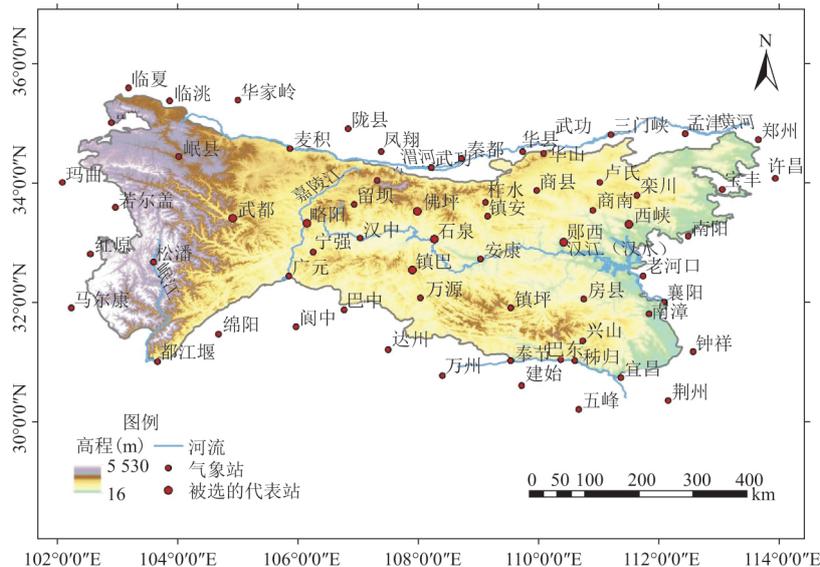


图 1 秦巴山区及周边地区气象站分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the Qin-Ba mountains region and neighboring area

秦巴山区整体东西狭长。为更好地说明区内降雨侵蚀力年内、年代及年际变化特征, 从西到东, 在同一纬度带内选择武都、略阳、石泉、郧西及西峡共 5 个站; 从北到南, 选择经度基本接近的佛坪、石泉及镇巴 3 个站。各站基本情况如表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算方法

采用章文波等^[11]提出的基于日降雨资料估算降雨侵蚀力的简易模型, 该模型可以估算多年平均降雨侵蚀力及季节变化, 精度高且具有稳定性。

表 1 秦巴山区代表性站点的基本资料

Tab. 1 Basic information of typical stations in Qin-Ba mountains region

站名	经度(E)	纬度(N)	观测场海拔高度(m)
石泉	108°16′	33°03′	484.9
武都	104°55′	33°24′	1 079.1
略阳	106°09′	33°19′	794.2
郧西	110°25′	33°00′	249.1
西峡	111°30′	33°18′	250.3
佛坪	107°59′	33°31′	827.2
镇巴	107°54′	32°32′	693.9

其具体计算公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_j^\beta \quad (1)$$

式中: R_i 表示第 i 个半月的降雨侵蚀力值, $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; 半月时段的划分以每月第 15 日为界, 全年共 24 个时段; k 表示该半月时段内的降雨天数; d ; P_j 表示该半月时段内第 j 天的侵蚀性日降雨量, mm 。根据谢云等^[22]的研究, 将日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 作为侵蚀性日降雨量的标准, 否则以 0 计算; α 、 β 为模型参数, 计算公式分别为:

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

$$\beta = 0.8363 + 18.144/P_{d_{12}} + 24.455/P_{y_{12}} \quad (3)$$

式中: $P_{d_{12}}$ 表示降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均降雨量, mm ; $P_{y_{12}}$ 表示日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均降雨量, mm 。

利用上述公式, 计算逐年各半月时段的降雨侵蚀力, 汇总得到月降雨侵蚀力、季降雨侵蚀力及年降雨侵蚀力, $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

1.3.2 降雨侵蚀力时空变化分析方法

取秦巴山区内 30 个站点的降雨侵蚀力算术平均值作为区域平均值。降雨侵蚀力的年际变化具有阶段性、趋势性和突变性等特点。其阶段性是指长时间的降雨侵蚀力具有连续一段时间的增大、不变、减小变化特征, 分别对应强、平、弱

阶段, 采用距平累积法^[23]确定; 运用 Mann-Kendall 非参数检验^[24, 25]进行趋势分析; 采用 Pettitt 检验^[26]进行突变年检验。利用研究区内 30 个站点及周边 33 个站点所计算出的降雨侵蚀力值并基于 ArcGIS10.2.2 平台的 Kriging 插值方法绘制秦巴山区的降雨侵蚀力空间分布图。

2 结果与分析

2.1 年降雨量及侵蚀性降雨量特征

秦巴山区的日均侵蚀性降雨量、年均侵蚀性降雨量及年均降雨量总体上均具有“南高北低”的特点(表 2)。各站点的日均侵蚀性降雨量在 17.6(松潘)~34.1 mm(万源)范围内, 大部分站介于 20~30 mm 之间。区域内年均降雨量为 846.5 mm, 南部的万源、镇巴等站均大于 1 000 mm, 北部的武都、麦积等站则在 500 mm 左右。区域多年平均侵蚀性降雨量为 558 mm, 变化于 212.2(武都)~981.0 mm(镇巴)之间。侵蚀性降雨量占年降雨量的比例变化于 36.4%(松潘)~76.3%(万源)之间。

2.2 降雨侵蚀力年内分配

秦巴山区平均降雨侵蚀力年内分布高度集中, 随月份变化呈单峰型(图 2)。7 月为最大值, 降雨侵蚀力达 981 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, 占全年的 26.6%, 1 月最小, 仅占 0.09%。

表 2 秦巴山区各站侵蚀性降雨特征

Table 2 Erosive rainfall characteristics of various stations in Qin-Ba mountains region

站点	$P_{d_{12}}$ (mm)	$P_{y_{12}}$ (mm)	\bar{P}_y (mm)	$P_{y_{12}}$ 占 \bar{P}_y (%)	站点	$P_{d_{12}}$ (mm)	$P_{y_{12}}$ (mm)	\bar{P}_y (mm)	$P_{y_{12}}$ 占 \bar{P}_y (%)
万源	34.1±5.6	961.8±276.6	1 243.3±273.4	76.3±6.3	商南	26.8±4.7	545.0±168.3	828.5±171.1	64.7±8.9
镇巴	33.4±5.9	981.0±286.7	1 282.9±280.9	75.3±6.5	郿西	26.0±5.0	510.1±142.8	777.0±150.2	64.7±8.3
广元	32.4±6.1	689.9±219.9	946.5±226.4	71.7±7.0	华山	25.8±3.1	526.2±148.9	811.9±162.2	63.8±7.5
柘归	27.4±3.6	776.4±230.1	1 092.7±236.4	70.0±6.8	柞水	24.8±3.5	499.7±149.9	778.7±153.8	63.5±10.6
西峡	28.1±4.5	595.7±170.7	849.3±180.6	69.3±7.0	房县	24.3±2.6	531.6±138.4	829.6±147.1	63.2±7.4
宁强	28.7±4.5	773.1±248.9	1 105.6±252.7	68.7±7.3	镇安	24.7±3.2	500.9±158.1	784.1±159.3	63.0±9.4
南漳	27.4±4.0	633.5±168.4	910.7±177.1	68.7±6.4	留坝	26.1±4.2	538.3±191.4	849.2±198.7	62.1±7.8
石泉	27.9±4.8	618.2±190.8	892.6±195.2	68.0±7.7	略阳	26.3±4.6	498.1±171.9	789.3±171.8	61.9±9.8
兴山	26.5±3.4	683.0±178.0	984.9±182.7	68.5±6.5	商县	23.7±3.5	435.7±132.1	691.2±149.4	62.2±7.5
襄阳	27.3±4.4	583.0±165.3	841.5±171.4	68.3±7.2	太白	24.7±3.3	454.8±146.5	739.4±155.2	60.4±8.0
安康	26.5±4.0	555.3±152.3	816.5±156.9	67.0±7.0	卢氏	23.8±3.2	387.7±109.2	633.2±130.3	60.4±6.9
汉中	26.8±3.8	580.2±189.6	854.8±192.2	66.6±7.9	麦积	22.1±3.6	279.4±108.0	516.2±119.4	53.2±9.4
栾川	27.0±4.0	564.4±165.1	834.8±173.9	66.6±7.3	武都	20.2±3.2	212.2±76.3	468.2±84.2	44.2±9.6
佛坪	26.9±4.3	618.8±170.1	918.8±179.6	66.5±6.8	岷县	19.2±2.3	254.5±84.8	578.5±95.1	43.1±9.6
镇坪	26.6±4.1	681.9±187.8	1 026.8±194.7	65.3±7.0	松潘	17.6±1.5	265.6±85.6	718.7±83.1	36.4±9.5

注: 数值以算术平均值±标准差的形式表示; $P_{d_{12}}$ 表示日均侵蚀性降雨量, 即降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均降雨量; $P_{y_{12}}$ 表示年均侵蚀性降雨量; \bar{P}_y 表示年均降雨量。

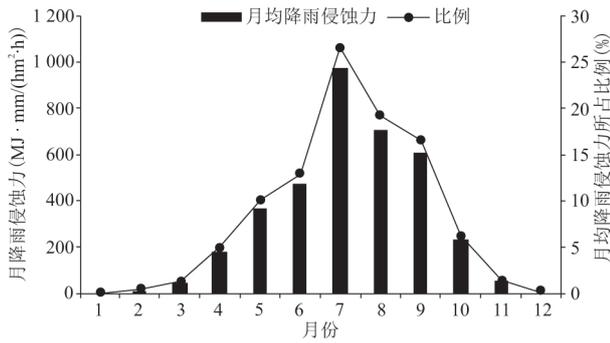


图 2 秦巴山区降雨侵蚀力年内分布

Fig. 2 Annual distribution of rainfall erosivity in Qin-Ba mountains region

秦巴山区降雨侵蚀力随季节变化较为明显(表 3)。结果表明,秦巴山区夏季降雨侵蚀力占全年的 58.7%,春、夏和秋三季的降雨侵蚀力之和占全年的 99.4%。选择的站点中,夏季降雨侵蚀力占全年的比例变化于 54.4(镇巴)~68.5%(武都);除郧西站外,冬季降雨侵蚀力所占全年比例均小于 1.0%。

表 3 秦巴山区季节降雨侵蚀力分布特征

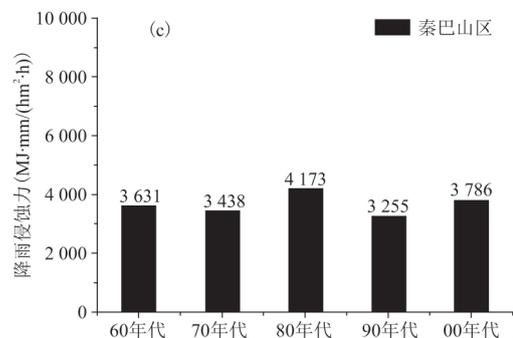
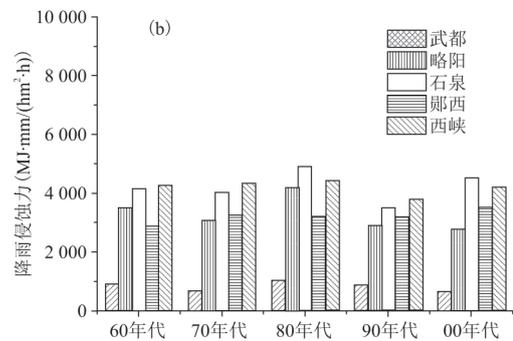
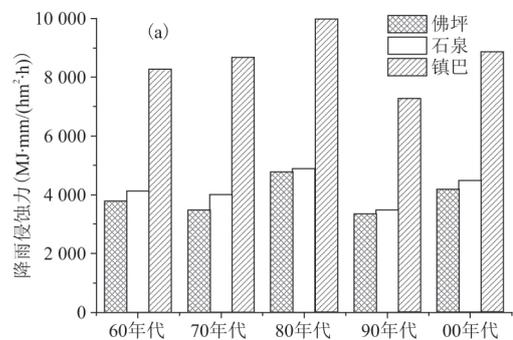
Table 3 Seasonal distribution characteristics of rainfall erosivity in Qin-Ba mountains region

站点	春季占比 (%)	夏季占比 (%)	秋季占比 (%)	冬季占比 (%)
石泉	14.7	58.7	26.2	0.4
佛坪	14.1	61.6	24.1	0.2
镇巴	15.0	54.4	30.2	0.4
武都	14.1	68.5	17.4	0.0
略阳	13.3	65.1	21.5	0.1
郧西	17.2	59.2	22.4	1.2
西峡	15.6	64.3	19.2	0.9
秦巴山区	16.3	58.7	24.4	0.6

2.3 降雨侵蚀力代际特征

秦巴山区年代降雨侵蚀力由北向南增加,且不同年代的大小各不相同(图 3)。对于由北向南选择的 3 个站,其降雨侵蚀力的各年代均表现为:南部的镇巴站最大,中部的石泉站次之,北部的佛坪站最小(图 3a)。佛坪和石泉站的不同年代降雨侵蚀力大小顺序均为:20 世纪 80 年代>21 世纪 00 年代>20 世纪 60 年代>20 世纪 70 年代>20 世纪 90 年代,镇巴站 70 年代大于 60 年代,其余年代的大小顺序与佛坪站相同。分析图 3b 可得,由西向东,最西部的武都站各年代降雨侵

蚀力在 5 个站中均最小;最东部的西峡站,其各年代降雨侵蚀力除 20 世纪 80 年代和 21 世纪 00 年代外,均较其他站大;郧西站位于石泉站的东部,但其各年代降雨侵蚀力均小于石泉站。这与两地的地理位置和季风的影响有关,郧西位于湖北西北部的边缘地带,受夏季东南季风影响但较小^[17];而李英杰等^[27]的研究表明,石泉是秦岭以南的一大气候湿润中心。从西到东,不同年代降雨侵蚀力大小分布情况差异较大:武都站表现为 20 世纪 80 年代>20 世纪 60 年代>20 世纪 90 年代>20 世纪 70 年代>21 世纪 00 年代;略阳站



注: (a) 从北到南(佛坪-石泉-镇巴)3 站的降雨侵蚀力年代分布 (b) 从西到东(武都-略阳-石泉-郧西-西峡)5 站的降雨侵蚀力年代分布 (c) 秦巴山区总体的降雨侵蚀力年代分布

图 3 秦巴山区降雨侵蚀力年代分布

Fig. 3 Distribution of rainfall erosivity in successive

decades over the Qin-Ba mountains region <http://www.cnki.net>

1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

60 年代的降雨侵蚀力大于 70 年代，其余年代的大小顺序与武都站相同；郧西站则表现为 21 世纪 00 年代最大，20 世纪 70、80、90 年代次之，60 年代最小；西峡站最小值在 20 世纪 90 年代，最大值在 80 年代。秦巴山区总体降雨侵蚀力年代最大值在 80 年代，为 $4\ 173\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，各年代表现为 20 世纪 80 年代 > 21 世纪 00 年代 > 20 世纪 60 年代 > 20 世纪 70 年代 > 20 世纪 90 年代(图 3c)。

2.4 降雨侵蚀力年际变化

秦巴山区降雨侵蚀力与降雨量的年际变化规律总体一致，分析图 4 可得出二者大致呈现“同增同减”趋势。二者相关系数为 $0.917 > r(54, 0.001) = 0.426$ ，表明降雨侵蚀力与降雨量的相关性达极显著水平。秦巴山区 1961~2016 年平均降雨侵蚀力为 $3\ 696\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ，1983 年达到最大值 $6\ 231\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，降雨量亦达到峰值 $1\ 186\ \text{mm}$ ；降雨侵蚀力最低 ($2\ 266\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$) 的年份为 1966 年，降雨量最低值 ($602\ \text{mm}$) 出现在 1997 年。钟科元和郑粉莉^[12]在松花江流域对降雨侵蚀力的研究也得出降雨侵蚀力与降雨量最小值年份不吻合的结果。有研究指出，出现这一现象的最主要原因为各时

期降雨特性及降雨侵蚀力动力构成因子不同，尤其是雨强和雨滴动能的差异^[17-28]。

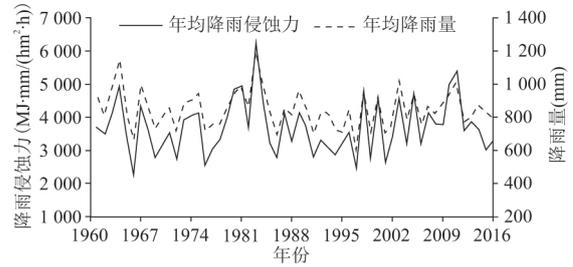


图 4 秦巴山区年降雨侵蚀力与降雨量年际变化过程

Fig. 4 Interannual change process of rainfall erosivity and rainfall in Qin-Ba mountains region

2.4.1 降雨侵蚀力年际变化特征

秦巴山区各站降雨侵蚀力年际变化分布特征见图 5。区内共有 10 个站的降雨侵蚀力最小值出现在 1961~1969 年，8 个站出现在 20 世纪 90 年代(图 5a，各占总数的约 33.3%和 26.7%)；13 个站的降雨侵蚀力最大值在 20 世纪 80 年代(图 5b，约占总数的 43.3%)。区域降雨侵蚀力的年际变异系数为 0.217，变化于 0.325(房县)~0.563(麦积)之间，平均极值比为 6.33，在 4.03(秭归)~12.73(麦积)范围内变化，整体上变异系数与极值比均表现为北部大于南部(图 5c)。

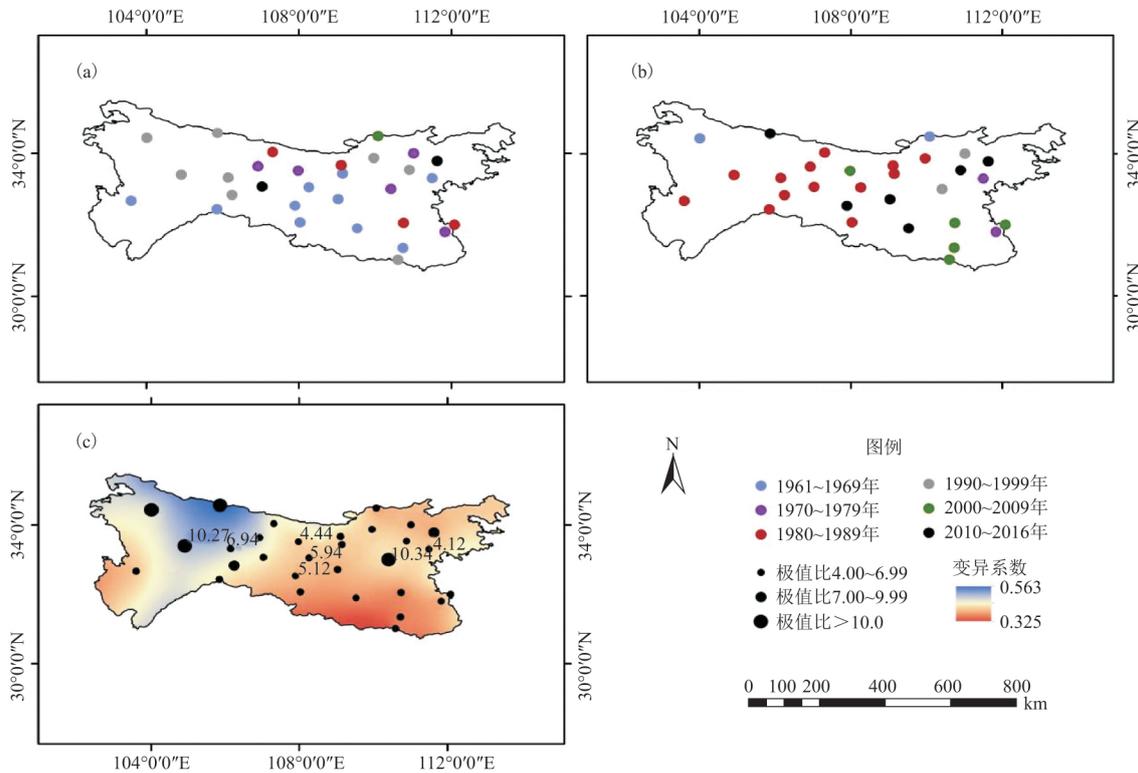


图 5 秦巴山区各站降雨侵蚀力年际变化特征分布图

选择的站点中,从北到南极值比无明显差异,平均极值比为 5.17,平均变异系数为 0.376;从西到东,极值比介于 4.12(西峡)~10.34(郧西),武都和郧西的极值比均大于 10,年际变异系数变化于 0.382(西峡)~0.501(武都)。

2.4.2 降雨侵蚀力年际变化的阶段特征

秦巴山区降雨侵蚀力年际变化具有明显的阶段性(表 4)。秦巴山区年降雨侵蚀力序列可分为如下几个阶段(持续期 5 年以上):1961~1977 年、1978~1984 年、1985~1997 年 1998~2006 年和 2007~2014 年,对应弱、强、弱、平和强的阶段特征。

选择的站点中,从北到南,佛坪站降雨侵蚀力阶段特征与秦巴山区基本一致;石泉站第一阶段特征为平,其与镇巴站第 5 阶段均开始于 2011 年并表现为弱,其余各阶段特征均与区域整体基本一致。从西到东,武都站降雨侵蚀力年序列呈现 2 个弱阶段(1961~1977 年和 1994~2007 年)和 2 个强阶段(1978~1993 年和 2008~2014 年);略阳站降雨侵蚀力变化也呈 4

个阶段,其第 4 阶段(2005~2015 年)为平阶段;郧西和西峡站前 3 个阶段特征基本一致,第 4 阶段郧西站降雨侵蚀力于 1996~2005 年表现为强,而西峡站则于 1995~2009 年表现为平,第 5 阶段均表现为弱但年份区间不同。总体而言,秦巴山区的降雨侵蚀力于 20 世纪 60 年代至 70 年代中后期及 20 世纪 80 年代中期至 90 年代后期为弱阶段,20 世纪 70 年代中后期至 80 年代中期表现为强阶段。

2.4.3 降雨侵蚀力年际变化的趋势及突变特征

秦巴山区降雨侵蚀力年际变化呈上升趋势但不显著(表 5)。Mann-Kendall 检验结果表明,从北到南的 3 站均呈上升趋势,从西到东的 5 站除石泉站外,其余站均呈下降趋势,但均未通过显著性检验,即上升或下降变化趋势均不明显。

采用 Pettitt 突变检验确定 1961~2016 年秦巴山区降雨侵蚀力年序列突变时间,结果显示,秦巴山区及选择的站点降雨侵蚀力均未达到 0.01 或 0.05 显著水平,即均未检验出显著趋势性突变(图略)。

表 4 秦巴山区及被选站点的年降雨侵蚀力阶段性特征

Tab. 4 Stage characteristics of annual rainfall erosivity in the chosen stations and Qin-Ba mountains region

站点	项目	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段	第 5 阶段
武都	阶段	1961~1977	1978~1993	1994~2007	2008~2014	/
	阶段特征	弱	强	弱	强	/
略阳	阶段	1961~1976	1977~1984	1985~2004	2005~2015	/
	阶段特征	弱	强	弱	平	/
石泉	阶段	1961~1981	1982~1987	1988~1997	1998~2007	2011~2015
	阶段特征	平	强	弱	平	弱
郧西	阶段	1961~1977	1978~1984	1985~1995	1996~2005	2006~2016
	阶段特征	平	强	弱	强	弱
西峡	阶段	1961~1977	1978~1983	1984~1994	1995~2009	2011~2016
	阶段特征	平	强	弱	平	弱
佛坪	阶段	1961~1978	1979~1984	1985~1996	1997~2006	2007~2015
	阶段特征	弱	强	弱	平	强
镇巴	阶段	1961~1973	1974~1984	1985~1997	1998~2009	2011~2016
	阶段特征	弱	强	弱	平	弱
秦巴山区	阶段	1961~1977	1978~1984	1985~1997	1998~2006	2007~2014
	阶段特征	弱	强	弱	平	强

表 5 秦巴山区降雨侵蚀力年际变化趋势的 Mann-Kendall 检验

Tab. 5 Mann-Kendall test of inter-annual variability of rainfall erosivity in Qin-Ba mountains region

站点	佛坪	石泉	镇巴	武都	略阳	郧西	西峡	秦巴山区
MK 检验值	0.93 ^{NS}	0.61 ^{NS}	0.26 ^{NS}	-0.66 ^{NS}	-1.07 ^{NS}	-0.3 ^{NS}	-0.26 ^{NS}	0.33 ^{NS}
变化趋势	上升	上升	上升	下降	下降	下降	下降	上升

注: NS 表示不显著。 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5 降雨侵蚀力空间分布特征

秦巴山区多年平均降雨侵蚀力空间分布见图 6。结果显示，多年平均降雨侵蚀力从北向南递增，这与其年降雨量及侵蚀性降雨量二者分布一致，均表现为南高北低。西北角的松潘、武都和岷县一带为低值区，年降雨侵蚀力均在 $800 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 左右，镇巴、万源一带为高值区，其年降雨侵蚀力达 $8800 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 以上，是低值区的 10 倍之多。以万源、镇巴

纵线为界，以西表现为从西北到东南递增，以东整体表现为从北到南递增。从秦巴山区包含的省份分析，甘肃、河南、四川及湖北省的年均降雨侵蚀力均表现为自西北向东南递增的空间变化趋势。其中秦巴山区各有 10% 的站点分别位于甘肃、河南及四川省，甘肃省的降雨侵蚀力普遍较低，在 $950 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 左右；河南省的降雨侵蚀力均值为 $3300 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ；四川省西部的松潘年均降雨侵蚀力仅为 $787 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ，而东部的万源年均降雨侵蚀力高达 $8858 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ；17% 的站点位于湖北省，降雨侵蚀力介于 $2946 \sim 5256 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 之间；50% 的站点位于陕西省，其降雨侵蚀力由北向南递增，年均降雨侵蚀力在 $2282 \sim 8804 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 范围内；重庆市因涉及区域较小且分布站点较少，其降雨侵蚀力变化趋势不明显。总体而言，秦巴山区多年平均降雨侵蚀力从北到南递增。

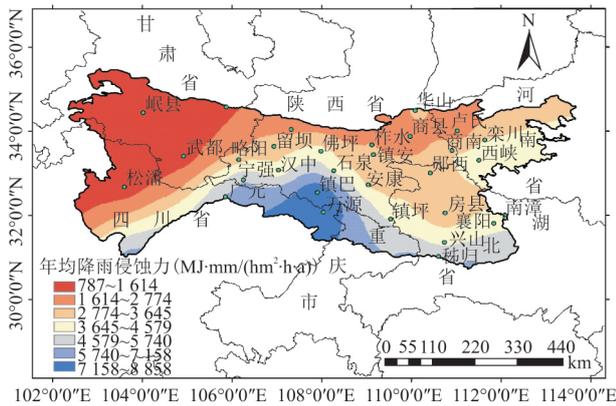


图 6 秦巴山区降雨侵蚀力空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of rainfall erosivity in the Qin-Ba mountains region

图 7 为秦巴山区的季节降雨侵蚀力分布图。可以看出，秦巴山区西北角四季的降雨侵蚀力均处于低值中心；春、夏、秋三季的降雨侵蚀力空间分布图与年分布图一致，均表现为由北到南递

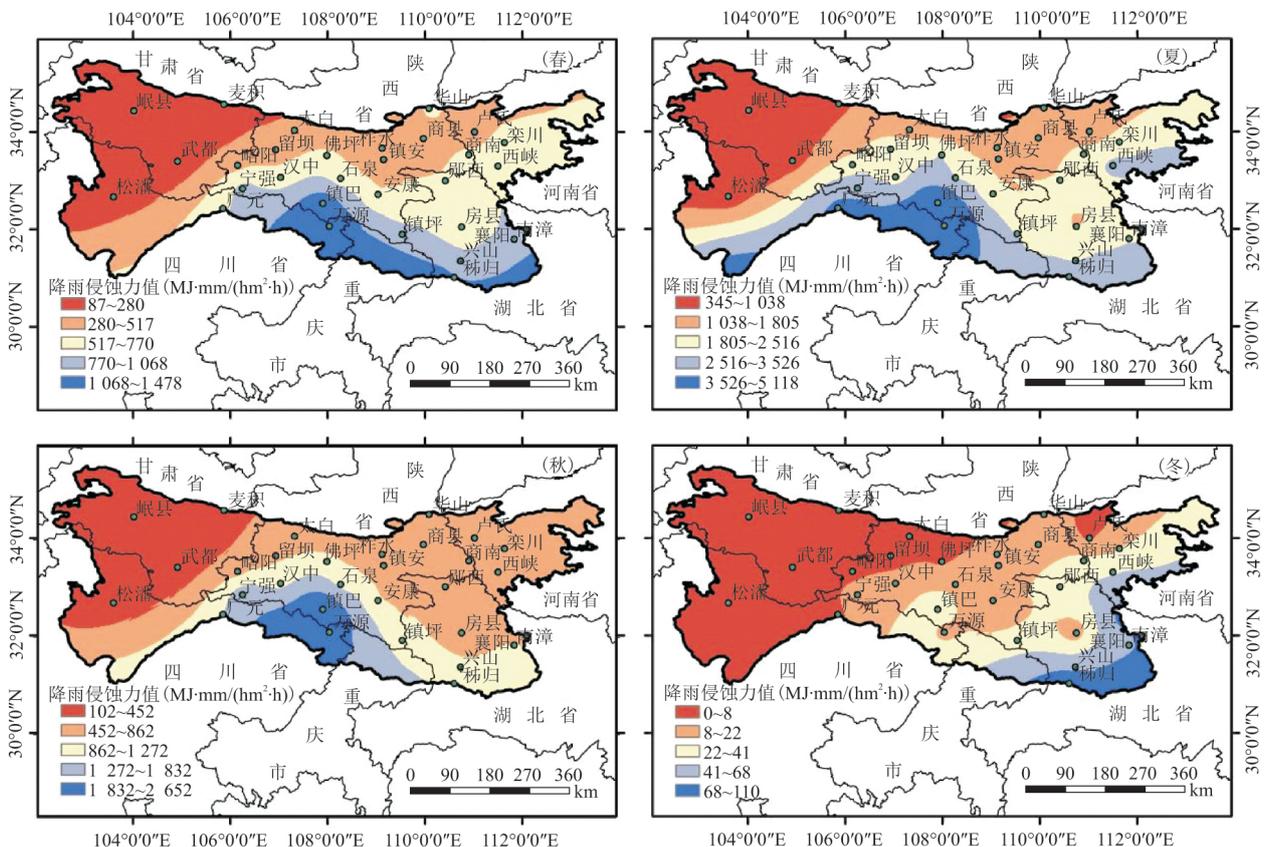


图 7 秦巴山区四季降雨侵蚀力空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal rainfall erosivity in the Qin-Ba mountains region

增,并在镇巴、万源一带形成高值区,其中镇巴的夏季降雨侵蚀力达 $5\,128\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$; 冬季的降雨侵蚀力远远低于其他三季,呈现出由西北到东南递增的趋势,低值区依然是松潘、武都一带,降雨侵蚀力为 0,而高值区出现在秦巴山区东南角的秭归、南漳一带,仅在 $100\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 左右。秦巴山区季节降雨侵蚀力的分布在整体上依然遵循从北到南递增的规律。

降雨侵蚀力受地理位置影响较大^[16],本文对经度(λ)、纬度(ψ)及海拔(h)3个地理要素与四季及年降雨侵蚀力分别进行相关分析,采用逐步回归筛选出最优因子并建立回归方程(表6)。结果表明,各因素作用大小次序总体为纬度>海拔>经度;秦巴山区春季降雨侵蚀力随着纬度增加而

减小,但随经度增加而增加;夏季和秋季降雨侵蚀力均表现为随纬度和海拔的升高(降低)而减小(增大);冬季降雨侵蚀力与经度、纬度和海拔均显著相关($P<0.01$),随着纬度增加而减小,但随经度和海拔的增加而增加;年降雨侵蚀力具有较好的纬度地带性和海拔地带性,即随着纬度的增加而减小,随海拔升高而减小。结合图6、7及表6可以看出,经度和纬度对秦巴山区降雨侵蚀力的影响在春冬季更明显,而夏秋季及全年的降雨侵蚀力则受纬度和海拔影响更显著。这是区域地形、海陆位置及大气环流,特别是地形和季风环流造成的降水分布变化^[17-27]从而导致的降雨侵蚀力的变化,而不同因素如何共同作用影响降水及降雨侵蚀力有待于进一步研究。

表 6 秦巴山区降雨侵蚀力与地理因素的相关分析及回归方程

Table 6 Correlative analyses and regression equations between rainfall erosivity and geographic factors in the Qin-Ba mountains region

参数	经度(λ)	纬度(ψ)	海拔(h)	回归方程	方程决定系数
春季降雨侵蚀力	0.443**	0.801**	0.544**	$R_{\text{spring}} = 3405.68 - 235.16\psi + 46.17\lambda$	0.751
夏季降雨侵蚀力	0.297*	0.709**	0.549**	$R_{\text{summer}} = 19649.59 - 515.58\psi - 0.48h$	0.612
秋季降雨侵蚀力	0.229	0.627**	0.495**	$R_{\text{autumn}} = 7417.74 - 193.79\psi - 0.19h$	0.485
冬季降雨侵蚀力	0.550**	0.674**	0.449**	$R_{\text{winter}} = -273.94 - 18.37\psi + 8.29\lambda + 0.01h$	0.698
年降雨侵蚀力	0.329**	0.741**	0.559**	$R_{\text{year}} = 35593.28 - 942.78\psi - 0.83h$	0.658

注: **表示达 0.01 信度水平, * 表示达 0.05 信度水平, 回归方程中 R 表示降雨侵蚀力。

3 结论

(1) 秦巴山区年均降雨侵蚀力为 $3\,696\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, 最大值在 7 月, 为 $981\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$, 占全年的 26.6%, 1 月最小, 仅占 0.09%; 四季中主要集中于夏季, 占全年的 58.7%, 冬季最小, 所占比例不足 1%, 春秋两季居中。不同年代降雨侵蚀力表现为 20 世纪 80 年代>21 世纪 00 年代>20 世纪 60 年代>20 世纪 70 年代>20 世纪 90 年代。1978~1984 年为秦巴山区降雨侵蚀力强阶段, 最大值出现在 20 世纪 80 年代的站点有 13 个, 占总数的 43.3%。降雨侵蚀力年际变化趋势不显著且不存在突变点。

(2) 秦巴山区年降雨侵蚀力整体表现为由北向南递增, 最低值在西北角的四川松潘, 年均降雨侵蚀力仅为 $787\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, 最高值为 $8\,858\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, 位于南部的四川万源。春、夏、秋三季的空间分布特征与年值基本一致, 而冬季的高值区发生偏移, 出现在秦巴山区东南角的秭归、南漳一带, 表现为从西

北到东南递增的趋势。此外, 秦巴山区夏秋季及年降雨侵蚀力随纬度和海拔的升高(降低)而减小(增大), 春冬季则受经纬度影响显著。

参考文献:

[1] 熊 炜, 范 文. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 228-233.
XIONG W, FAN W. Disaster law of shallow landslide in Qin-ba Mountain Region[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 228-233.

[2] RAMOS M C, MARTINEZ-CASASNOVAS J A. Nutrient losses from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event[J]. Catena, 2004, 55(1): 79-90.

[3] WANG X, ZHAO X, ZHANG Z, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010[J]. Catena, 2016, 137: 256-268.

[4] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.

[5] ANGULO-MARTINEZ M, BEGUERIA S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. Jour-

- nal of Hydrology, 2009, 379(1-2): 111-121.
- [6] BONILLA C A, VIDAL K L. Rainfall erosivity in Central Chile [J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(1-2): 126-133.
- [7] 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(II) [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 29-39.
- WANG W Z, JIAO J Y, HAO X P, et al. Distribution of rainfall erosivity R value in China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 29-39.
- [8] 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 B T, TAO H P, SONG C F, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009 [J]. Geographical Research, 2013, 32(2): 245-256.
- [9] 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.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(1): 33-40.
- [10] 孙泉忠, 王朝军, 赵佳, 等. 中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 1-5.
- SUN Q Z, WANG C J, ZHAO J, et al. Research evolution of rainfall erosivity(R) in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 1-5.
- [11] 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 W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.
- [12] 钟科元, 郑粉莉. 1960-2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 278-291.
- ZHONG K Y, ZHENG F L. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River basin from 1960-2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 278-291.
- [13] 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 X M, DAI H L, GAO P, et al. Spatial-temporal characteristics of rainfall erosivity in northern Shaanxi region in the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land and Resources and Environment, 2010, 24(3): 37-43.
- [14] 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.
- HE S L, GUO X J, LI F Y, et al. Spatiotemporal variation of rainfall and rainfall erosivity in Southern China in recent 60 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1406-1416.
- [15] 吴明作, 何瑞珍, 安树青, 等. 河南省降雨侵蚀力时空变异特征 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 22-28.
- WU M Z, HE R Z, AN S Q, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in Henan Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(3): 22-28.
- [16] 陈东东, 程路, 栗晓玮, 等. 基于地统计学的四川省降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 206-213.
- CHEN D D, CHENG L, LI X W, et al. Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in Sichuan Province based on geostatistics [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 206-213.
- [17] 张家其, 龚箭, 吴宜进. 基于日降雨数据的湖北省降雨侵蚀力初步分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 274-280.
- ZHANG J Q, GONG J, WU Y J. A preliminary study on rainfall erosion force in Hubei based on the data of daily rainfall [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(2): 274-280.
- [18] ZHAI P, ZHANG X, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. Journal of Climate, 2005, 18(18): 1096-1108.
- [19] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮河北极端降水时空变化特征及其影响因素 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363.
- LI S S, YANG S N, LIU X F. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qingling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2013 [J]. Progress in Geography, 2015, 34(3): 354-363.
- [20] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因 [J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.
- LIU X F, PAN Y Z, ZHU X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qingling-Daba Mountains in relation to environmental factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 705-716.
- [21] 杨波, 张勃, 安美玲, 等. 1961-2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 110-116.
- YANG B, ZHANG B, AN M L, et al. Spatiotemporal characteristics of precipitation extremes in the Qinba Mountains Region during 1961-2011 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 110-116.
- [22] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study on standard of erosive rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 6-11.
- [23] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 黄河天然径流量年际变化过程分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 1-5.
- MU X M, LI J, WANG F, et al. Analysis on the annual natural runoff variety process of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land and Resources and Environment, 2003, 17(2): 1-5.
- [24] MANN H B. Nonparametric Tests Against Trend [J]. Economet-

- rica, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] KENDALL M G. Rank Correlation Measures [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [26] PETTITT A N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126-135.
- [27] 李英杰, 延军平, 刘永林. 秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 619-627.
- LI Y J, YAN J P, LIU Y L. Relationship between dryness/wetness and precipitation heterogeneity in the north and south of the Qinling Mountains [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 619-627.
- [28] 孔祥东, 刘武林, 邓玉林, 等. 基于日降雨量计算川北深丘低山区降雨侵蚀力初步研究 [J]. 中国水土保持, 2007(5): 29-31.
- KONG X D, LIU W L, DENG Y L, et al. Preliminary study on rainfall erosivity force in low hill regions of the northern Sichuan based on daily rainfall calculation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(5): 29-31.

Spatiotemporal Variation of Rainfall Erosivity in Qin-Ba Mountains Region

SHAO Yi-ting^{1,2}, HE Yi^{3,4}, MU Xing-min^{1,5}, GAO Peng^{1,5}, ZHAO Guang-ju^{1,5}, SUN Wen-yi^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 4. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 5. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The investigation of the spatiotemporal heterogeneity of rainfall erosivity is significant in regional soil erosion risk assessment as well as water and soil conservation planning. Based on long-period(1961-2016) daily rainfall data from 63 meteorological stations located in Qin-Ba mountains region and its surrounding area, this study calculated values of rainfall erosivity and analyzed the spatial and temporal variation of rainfall erosivity using Kriging spatial interpolation method, Mann-kendall trend test, Pettitt test and other methods. Results showed that the regional average annual rainfall erosivity was $3\ 696\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$. The rainfall erosivity showed a unimodal intra-annual variation with a maximum value in July accounting for 26.6% of the total year and also had a strong seasonal pattern with maximum rainfall erosivity in summer and minimum in winter. The rainfall erosivity reached its maximum in the 1980s and minimum in the 1990s. The annual rainfall erosivity had distinct phases, whereas had no significant trends and mutations. It turned out that the spatial distribution of the average annual rainfall erosivity in the region increased from north to south varying from 787 to $8\ 858\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$. Furthermore, the average annual rainfall erosivity of Qin-Ba mountains region generally decreased with the increasing of latitude ($P < 0.01$) and altitude ($P < 0.01$).

Key words: rainfall erosivity; spatiotemporal variation; daily rainfall; Qin-Ba Mountains Region