

# 近 61 年四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势

周琳<sup>1</sup>, 许武成<sup>1</sup>, 尹义星<sup>2</sup>

(1. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637009; 2. 南京信息工程大学 水文气象学院, 南京 210044)

**摘要:**降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因子,估算降雨侵蚀力是进行水土流失定量评价的基础工作之一。利用 1955—2015 年四川省及其相邻 5 省(市)共 22 个气象站点的逐日降雨量数据,基于章文波的日雨量侵蚀力模型,通过普通 Kriging 空间插值以及变异系数、距平百分率、趋势系数和气候倾向率等分析方法,全面综合地分析了四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势。结果表明:四川省降雨侵蚀力总体上从东南向西北呈阶梯状逐渐降低并与降雨量、侵蚀性降雨空间分布规律较为一致,其高低值空间分布表现出四川盆地>川西南山地>川西高原;四川省降雨侵蚀力与降雨量年际变化规律几乎一致,近 61 年来  $R$  值呈显著增加趋势,每年增值  $53.64 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,地域上  $R$  值的年际变化呈北高南低的特点,属于中等变异( $0.278 < C_v < 0.686$ );降雨侵蚀力年内变化是以 7 月为峰值的单峰型分布,主要集中在 6—9 月份,季节上降雨侵蚀力危害夏高冬低,春秋较平稳;四川省大部分区域  $R$  值变化趋势呈不显著上升趋势,主要集中在川西高原和盆东地区,但在盆西区域形成一个降雨侵蚀力的下降中心。

**关键词:**降雨侵蚀力;  $R$  值; 日雨量; 四川省

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0008-07

## Temporal and Spatial Variations of Rainfall Erosivity in Sichuan Province in Recent 61 Years

ZHOU Lin<sup>1</sup>, XU Wucheng<sup>1</sup>, YIN Yixing<sup>2</sup>

(1. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China;

2. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on the daily rainfall data of 22 meteorological stations in Sichuan Province and its neighboring provinces from 1955 to 2015, using Zhang Wenbo's half-month erosivity model of daily rainfall, ordinary Kriging spatial interpolation and analysis methods which include coefficient of variation, anomaly percentage, trend coefficient and climate tendency, we comprehensively analyzed the spatial and temporal variation trend of rainfall erosivity in Sichuan Province. It turned out that the rainfall erosivity of Sichuan Province was gradually decreasing from southeast to northwest. The spatial distribution of average annual rainfall erosivity was nearly the same as that of annual rainfall and erosive rainfall, but the spatial distribution characteristics of  $R$  values were closer to the erosive rainfall. The  $R$  value in Sichuan Basin was larger compared with that in the Mountains Area of Southwest Sichuan and the West Sichuan Plateau. The interannual variation of rainfall erosivity and the interannual change law of rainfall were almost the same. Over the last 61 years,  $R$  values showed an obvious increasing trend and the annual increase rate was  $53.64 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ . The interannual variability of  $R$  value in this region was increasing from south to north, Sichuan Province belonged to medium variation degree ( $0.278 < C_v < 0.686$ ). The rainfall erosivity changed significantly in a unimodal distribution within the year and  $R$  values mainly concentrated in the period from June to September, with the peak appearing in July. From the aspect of season, the risk of rainfall erosivity was high in summer, low in winter, and relatively smooth in spring and autumn. The variation trend of  $R$  value in most areas of Sichuan Province was not significant, mainly concentrated in the western Sichuan Plateau and western Sichuan Basin region, on the contrary, the east Sichuan Basin formed a center area with rainfall erosivity decending in Sichuan Province.

收稿日期: 2017-07-10

修回日期: 2017-09-26

资助项目: 国家自然科学基金“江淮流域极值降水发生时间的特征及其与区域水分循环变异的关系”(41671022); 西华师范大学 2017 年度英才科研基金“丘陵河谷城市热岛效应及其变化的遥感监测——以扩张中的南充为例”(17YC130)

第一作者: 周琳(1989—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与环境保护。E-mail: 372137378@qq.com

通信作者: 许武成(1966—), 男, 四川广安人, 教授, 主要从事水文气象和自然灾害研究。E-mail: wucxu@126.com

**Keywords:** rainfall erosivity;  $R$  values; daily rainfall; Sichuan Province

降雨侵蚀力(简称  $R$  值)是降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,它是通用土壤流失方程(USLE)及其修正模型(RUSLE)中 6 大基本因子之一。自 Wischmeier 等<sup>[1]</sup>1958 年首次明确提出降雨侵蚀力  $R$  指标  $EI_{30}$  后,该指标在研究领域被广泛运用且其他新形式的  $R$  指标又被其他学者提出来。我国是从 20 世纪 80 年代开始对降雨侵蚀力进行研究,借鉴于国外  $R$  指标  $EI$  的结构形式,结合我国实际情况,提出了适合各个地区的  $R$  指标,如  $E_{60} I_{10}$ <sup>[2]</sup>、 $E_{60} I_{30}$ <sup>[3]</sup>、 $EI_{60}$ <sup>[4]</sup> 等。但以上  $R$  指标的计算都需要以连续长期的降雨过程资料为基础,但在许多国家和地区这类资料实难获得,并且资料整理异常繁琐,因此国内外学者开始探寻一种更为简易的算法,如 Yu<sup>[5]</sup>、Mikhailova<sup>[6]</sup>、Renard<sup>[7]</sup>、黄炎和<sup>[8]</sup>、马良<sup>[9]</sup> 等先后建立了基于年、月、日降雨资料的  $R$  值计算模型。但月或年降雨资料比较粗略,用来估算  $R$  值的精度明显会受到一定的限制,章文波等<sup>[10]</sup> 利用不同类型的降雨量资料进行降雨侵蚀力分析,得出的结果是日降雨量计算  $R$  值的精度最高,随后章文波的日降雨量模型被广泛运用于各地  $R$  值的估算研究<sup>[11-14]</sup>。

四川省是我国土壤侵蚀较为严重的区域之一,目前关于四川省降雨侵蚀力的研究已有不少报道<sup>[11-15]</sup>,但以往研究对于四川省降雨侵蚀力的时空分布特征和变化趋势都没有一个综合性的研究和评述。因此本研究基于软件 ArcGIS 10.3 和收集到的四川省及其相邻省份近 61 a 的日雨量数据,全面综合地对四川省降雨侵蚀力的增减趋势及时空分布特征进行分析探讨,以期对四川省的水土保持规划和防治工作提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

四川省地理位置处在东经  $97^{\circ}21' - 108^{\circ}33'$  和北纬  $26^{\circ}03' - 34^{\circ}19'$ ,东邻重庆,北连青海、甘肃、陕西,南接云南、贵州,西衔西藏,辖区面积 48.4 万  $\text{km}^2$ 。地势西高东低,西部为高原、山地,东部为盆地、丘陵,由于地貌和地理纬度的原因,气候地带性和垂直方向变化明显,高原山地气候和亚热带季风气候并存,因此四川省降雨时空分布极其不均,四川盆地年降雨量 1 000~1 200 mm,川西南山地年降水量 900~1 200 mm,川西高原年降水量 500~900 mm,年内降雨主要集中在夏季,冬季最少。

### 1.2 数据来源

本研究所采用的降雨数据均来源于中国气象数据网中国 194 个基本、基准地面气象站 20 时—20 时

逐日降雨量,为了使研究区域数据有效性更高,进行对站点的筛选,最终收集了四川及其相邻省份云南、青海、陕西、甘肃、重庆 5 省(市)共 22 个有效气象站的 20 时—20 时逐日降雨资料(图 1)。因有 4 个站点的数据时长并没有 61 a,且各个站点存在局部数据缺测的现象,故本文遵循欧洲气候评估采用的标准<sup>[16]</sup>:(1) 数据大于 40 a;(2) 数据总缺失率不高于 10%;(3) 每年数据缺失不超过 20%或连续超过 3 个月。对于缺测数据,取缺测前后两天均值进行插补。

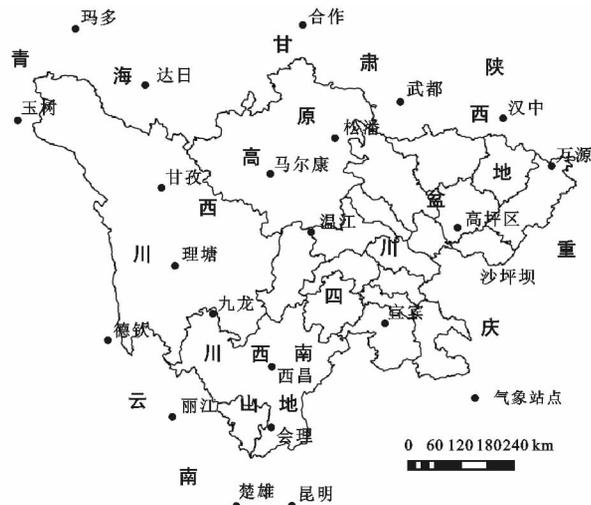


图 1 研究区域气象站点分布

### 1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力模型的计算方法 本研究采用的是章文波等<sup>[17]</sup>的日雨量估算半月降雨侵蚀力简易模型。该模型定义如下:

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

式中: $R_i$  是第  $i$  个半月时段的侵蚀力值 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ],半月时段以每月前 15 d 为一个半月时段,月剩余天数为另一个半月时段,全年划分为 24 个时段; $k$  表示半月时段内的天数; $P_j$  表示半月时段内第  $j$  天的侵蚀性日雨量,要求日雨量  $\geq 12$  mm,否则以 0 计算,阈值 12 mm 与中国侵蚀性降雨标准一致<sup>[18]</sup>,即取日雨量  $\geq 12$  mm 作为侵蚀性降雨。

公式(1)中的  $\alpha, \beta$  为待定模型参数,通过对研究内的每一个气象站点的日雨量数据进行估算,从而得其参数值,不同气象站点参数取值不同,具体计算如下:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

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

式中: $P_{d12}$  和  $P_{y12}$  分别为日雨量  $\geq 12$  mm 的日平均雨量和年平均雨量。

利用公式(1)~(3)便可计算出逐年各半月的降雨侵蚀力,经汇总、平均得到年降雨侵蚀力和多年平

均降雨侵蚀力。然后采用 Kriging 插值法进行空间插值。据陈东东等<sup>[11]</sup>研究表明,四川省地区利用普通 Kriging 插值方法,选取球状模型,得到的年  $R$  值结果最优。

1.3.2 分析方法 本文对降雨侵蚀力的时空分析主要采取变异系数  $C_v$ <sup>[19]</sup>、距平百分率和滑动平均<sup>[20]</sup>,对降雨侵蚀力的变化趋势分析主要采取趋势系数<sup>[21]</sup>和气候倾向率<sup>[22]</sup>等分析方法。

## 2 $R$ 值估算精度验证

针对  $R$  值估算精度的验证,本研究借鉴于文献<sup>[12]</sup>中的对比方法来进行验证。因为本研究选取的是章文波的日降雨量简易模型,故选取的对比研究结果也是基于该模型计算出的  $R$  值,具体详见表 1。从表 1 中可看出,共选出四川省研究区域内 5 个气象站来进行验证,每个站点的本文  $R$  值与前人  $R$  值相差不大,甚至西昌<sup>[23]</sup>、九龙<sup>[23]</sup>和万源<sup>[24]</sup> 3 个气象站的对

比值结果异常接近。可见本研究计算出的  $R$  值结果是可靠的。

## 3 结果与分析

### 3.1 年均降雨侵蚀力空间分布分析

图 2 分别展示了四川省近 61 a 来的平均  $R$  值、平均降雨量、平均侵蚀性降雨量的空间分布特征,值变化范围  $R$  值主要在 201~8 650 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),侵蚀性降雨量主要在 86~951 mm,降雨量主要在 344~1 235 mm。表 2 统计了四川省内研究站点降雨信息及  $R$  值,通过线性回归拟合  $R$  值与降雨天数、侵蚀性降雨日数以及降雨强度(总降水量/总降雨天数)的相关性,得出降雨天数( $r=0.503$ )<侵蚀性降雨天数( $r=0.751$ )<降雨强度( $r=0.886$ ),足见  $R$  值与降雨强度和侵蚀性降雨天数呈显著相关,与降雨天数相关性并不强。因此对  $R$  值空间分布特征主要通过降雨强度和侵蚀性降雨天数来分析。

表 1 四川省  $R$  值估算精度对比

气象站	本文 $R$ 值/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	前人 $R$ 值/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	资料年代
万源	8666.45	8949.8 <sup>[23]</sup> ,8647 <sup>[24]</sup>	1971—2000 年、1960—2009 年
高坪	5452.72	5261 <sup>[24]</sup> ,5214.2 <sup>[25]</sup>	1960—2009 年、1951—2006 年
宜宾	5564.43	5480.6 <sup>[23]</sup> ,5836 <sup>[25]</sup>	1971—2000 年、1951—2006 年
西昌	4251.73	4297.8 <sup>[23]</sup>	1971—2003 年
九龙	1691.19	1641.7 <sup>[23]</sup>	1971—2004 年

从图 2 可以看出,三者的空间分布特征总体上都是从东南向西北呈阶梯状逐渐降低,三者的高、低值区分布也大致相似,不难发现三者的空间值分布特征呈现出四川盆地>川西南山地>川西高原,同时在表 2 中,侵蚀性降雨日数区域站点均值也呈四川盆地(23 d)>川西南山地(20 d)>川西高原(16.7 d),降雨强度区域站点均值同样呈四川盆地(7.3 mm/d)>川西南山地(5.8 mm/d)>川西高原(4.7 mm/d),足见四川盆地和川西南山地是  $R$  值高值区,低值区主要在川西高原,尤其是川西高原西北区域。图 2 中三者空间分布范围呈现出明显的差异特征,这从表 2 中可得出解释,降雨天数多的站点,其侵蚀性降雨天数和降雨强度值并不高,例如松潘降雨天数高达 167.4 d,但其侵蚀性降雨天数仅 14.9 d,降雨强度 4.28 mm/d, $R$  值 778.67 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a);侵蚀性降雨天数和降雨强度值最高站点,其  $R$  值也不一定是最高值,例如,站点中侵蚀性降雨天数、降雨强度均为最大值的会理(29.2 d,9.38 mm/d), $R$  值 6 249.93 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),对比  $R$  值最高的万源站点[8 666.45 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)],其侵蚀性降雨天数(27.9 d)、降雨强度(9.31 mm/d)均次于会理。以上说明降雨侵蚀力不仅受降雨量、侵蚀性降雨天数、降雨强度等的影响,还受其他因素制约,例如

地理位置、地表形态、地表植被覆盖、土壤状况、土地利用以及当地的水土保持措施等。

### 3.2 降雨侵蚀力时间变化分析

3.2.1 降雨侵蚀力年际变化特征 图 3 分析了四川省 1955—2015 年  $R$  值和降雨量的年际变化。采用线性回归法对  $R$  值和降雨量进行相关性分析,结果表明二者呈极显著正相关( $r=0.893$ , $p<0.01$ )。从图 3 可看出,四川省的年  $R$  值和年降雨量整体变化规律几乎一致且年际波动幅度都较大,其中 1974 年的  $R$  值高至 5 087.88 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),降雨量高至 1 097.09 mm,是研究期内年降雨侵蚀力和年降雨量最高的年份,而降雨侵蚀力和降雨最低年值并不在同一年,分别在 1977 年[2 470.53 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]和 1972 年(760.09 mm),但也有异常年份,从图 3 中可看出:(1) 在 1970 年、1988 年、2004 年、2014 年,降雨量呈上升趋势,其降雨侵蚀力却呈下降趋势;(2) 在 1991 年、2002 年、2013 年出现降雨量减少,降雨侵蚀力增加的现象。以上异常其原因可归结于不同时期的降雨特性和降雨侵蚀力动能构成因素<sup>[25]</sup>。通过绘制  $R$  值 5 a 滑动平均曲线,发现近 61 a 来  $R$  值变化呈显著性增加趋势( $r=0.337$ , $p<0.01$ ),每年增值为 53.64 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

表 2 省内研究站点降雨信息及 R 值统计

区域	站点	降雨 天数/d	侵蚀性 降雨天数/d	降雨强度/ (mm · d <sup>-1</sup> )	R 值/ (MJ · mm · hm <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> )
川西高原	甘孜	147.7	14.6	4.38	680.83
	松潘	167.4	14.9	4.28	778.67
	马尔康	154.0	18.5	5.04	1166.49
	理塘	142.0	19.0	5.17	1221.23
川西南山地	九龙	162.8	24.0	5.58	1691.19
	西昌	123.2	26.9	8.17	4251.73
	会理	121.3	29.2	9.38	6249.93
	温江	147.2	19.2	6.24	5426.39
四川盆地	宜宾	168.2	22.3	6.39	5564.43
	高坪区	137.8	22.7	7.30	5452.72
	万源	132.1	27.9	9.31	8666.45

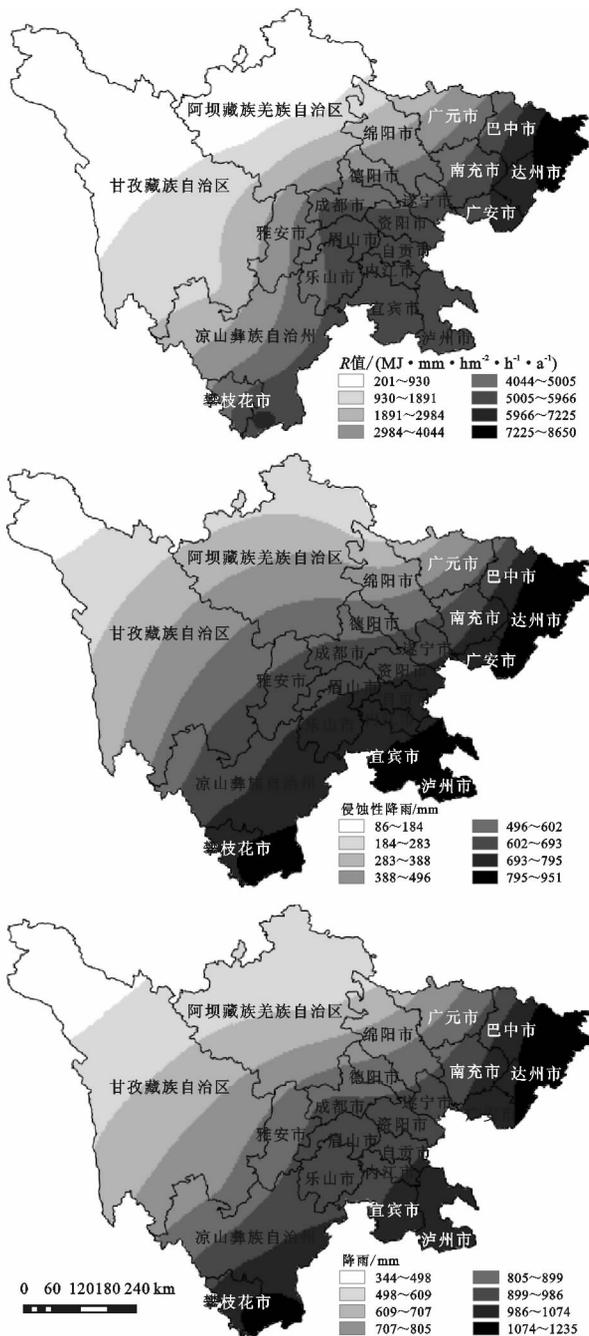


图 2 四川省 R 值、降雨量、侵蚀性降雨量分布

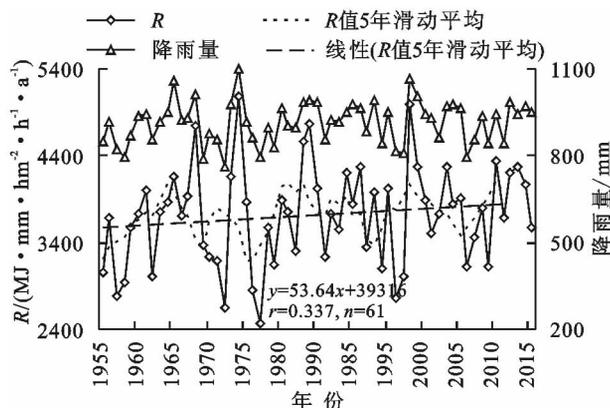


图 3 四川省 1955—2015 年降雨侵蚀力和降雨量年际变化

为了进一步分析四川省降雨侵蚀力地域性的年际变化特征,采用变异系数通过 Kriging 插值成图来展示分析。从图 4 中可看出,四川省 R 值变异系数变化范围主要在 0.278~0.686,均值为 0.34,属于中等变异,与刘斌涛<sup>[12]</sup>、段文明<sup>[24]</sup>等研究结论具有较好的一致性;其分布特征总体上从北向南逐渐降低;甘孜州西北部的石渠县是变异系数高达 0.6 以上的高值区,说明该地降雨侵蚀力年际波动幅度大,需要注意该地区的土壤侵蚀防护工作;川西南山地是变异系数 0.3 以下的低值区,同理该区域降雨侵蚀力年际变化小,年际波动平稳。变异系数南北地域差异如此明显,这可能与地形和气候相关,前者地处川西高原,地势高,降雨量少,后者处于山地,地势起伏小,降雨量充沛。

3.2.2 降雨侵蚀力年内分布特征 由图 5 可看出,四川省月 R 值、月降雨量和月侵蚀性降雨量的年内分布规律较相似,呈单峰型,主峰均集中在 6—9 月份,最大值也都出现在 7 月,并以 7 月为峰顶向两侧逐渐降低。其中 6—9 月的 R 值、侵蚀性降雨、降雨量分别占全年值的 81.7%,79%,68.9%,最大 7 月 R 值、侵蚀性降雨量、降雨量分别占全年的 27.7%,24.7%,20.4%。降雨侵蚀力是由侵蚀性降雨标准以

上的降雨引起的<sup>[26]</sup>,因此出现了 6—9 月降雨侵蚀力占比高于相应月降雨量占比,而其对应月的侵蚀性降雨占比也明显高于降雨量占比。反观其余月份,降雨量占比>侵蚀性降雨占比>R 值占比。有研究指出<sup>[27]</sup>,各月内侵蚀性降雨量及雨强不同,造成月 R 值差异较大,且与降雨量之间的差异不一致。四川省夏季多暴雨天气,次降雨的雨强大,雨滴动能也相应的增大,故所产生的侵蚀力在全年来说明显偏高。

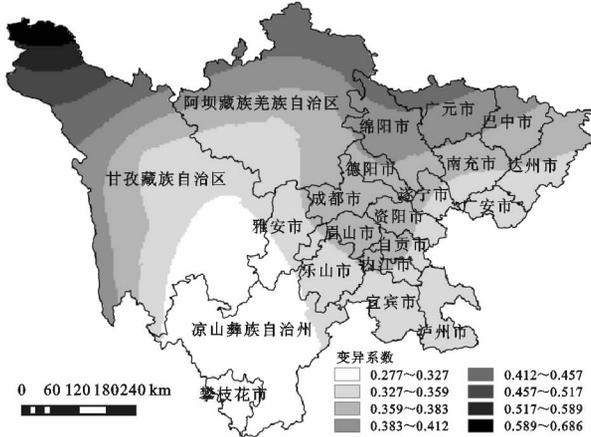


图 4 降雨侵蚀力变异系数分布

通过距平百分率来反映年内 R 值的稳定性和可靠性(表 3)。从表 3 统计结果可得出,R 月均值为 308.74 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h),R 值距平百分率主要集

中在±1%以内稳定变化,春、秋、冬三季的距平率几乎都为负,距平率值呈“大(秋)—小(冬)—大(春)”逐渐变化,冬季距平率值达到最低,R 月均值和(12 月—翌年 2 月)仅为 8.8 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h);整个夏季距平率超过年内±1%的稳定变化,6 月距平率值(1.15%)突然增大,比上月 5 月距平率值(-0.05%)多 20 倍余,7 月距平率值(2.32%)达到最大,其 R 月均值为 1 039.15 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h),是冬季 R 月均值和的近 118 倍;8 月距平率值(1.53%)开始变小,到秋季 9 月距平率值(0.92%)进入稳定期。足见,四川省年内土壤侵蚀危害夏季偏高,冬季偏低,春秋两季较为稳定,这与年内降雨分布特征极相似<sup>[28]</sup>。

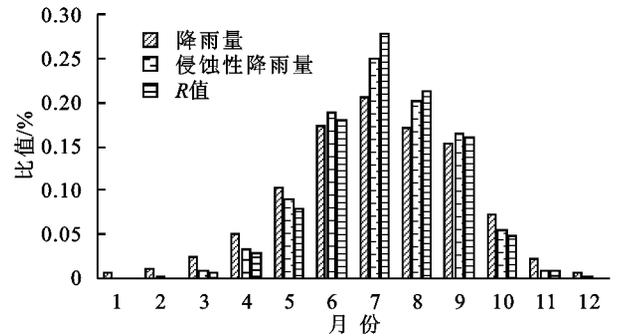


图 5 月降雨量、月侵蚀性降雨量、月 R 值占其年值之比

表 3 四川省年内各月 R 均值、R 值距平百分率

项目	冬季			春季			夏季			秋季		
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R 值月平均/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	3.36	1.98	3.46	22.58	103.17	294.35	668.73	1039.15	793.31	597.85	182.06	30.91
R 距平百分率/%	-0.99	-0.99	-0.99	-0.93	-0.67	-0.05	1.15	2.32	1.53	0.92	-0.41	-0.90

### 3.3 降雨侵蚀力变化趋势分析

通过趋势系数和气候倾向率来进一步分析四川省降雨侵蚀力的变化趋势(图 6—7)。如图 6 所示,四川大部分地域降雨侵蚀力的年际变化趋势是呈正趋势,即由降雨引起的土壤侵蚀在增长,且其大致走势是由东西两侧向中南部降低,其中盆东和川西高原是趋势系数高值区,而盆南和盆西地区是趋势系数小于 0 的低值区,尤其是宜宾、乐山、自贡地区,其趋势系数低至-0.109。如图 7 所示,四川省气候倾向率从东往西整体呈“高一低一高”的变化趋势,其中盆东是 10 a 气候倾向率大于 100 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)的高值区,而整个省中部从北向南是气候倾向率小于 0 的低值区,尤其是盆地西、南大部分区域 10 a 气候倾向率低至-46 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)。结合图 6—7 可看出:(1)川西高原地区气候倾向率虽不高,但其趋势系数却是高值区,说明该地区的降雨侵蚀力

上升趋势较为明显,土壤侵蚀风险在增加;(2)达州市处在趋势系数和气候倾向率的高值区,说明其上升趋势尤为明显,需高度重视该地区的水土保持工作;(3)盆地西、南大部分区域,趋势系数低于-0.004,10 a 气候倾向率低于-11 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),该区域成为四川省降雨侵蚀力下降的中心区,并向其东西两侧逐渐增加。四川相关降雨研究结论显示<sup>[29-31]</sup>,川西高原、盆地东部降雨量呈增加趋势,盆地西部降雨量呈减少趋势。

表 4 是对四川省内 11 个研究站点近 61 a 的 R 值进行相关系数统计检验的结果,以此来分析每个站点 R 值的变化趋势。从表 4 可看出,四川省内 11 个站点有 8 个其降雨侵蚀力是呈上升趋势,但仅万源气象站通过了 95%的信度水平检验(印证了图 6—7 对达州市的分析结果),说明四川省大部分区域 R 值变化趋势主要呈不显著上升趋势,剩余 3 个降雨侵蚀力

呈下降趋势的站点中,宜宾气象站通过了 95% 的信度水平检验,表明该区域降雨侵蚀力下降趋势显著,

这与趋势系数和气候倾向率最低值区域的分析结果有了很好的印证。

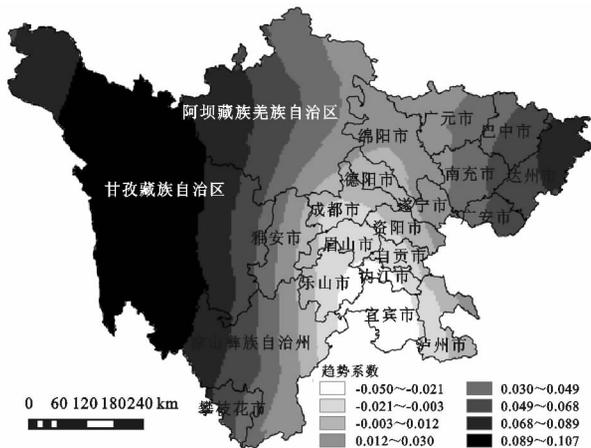


图 6 年降雨侵蚀力趋势系数空间分布

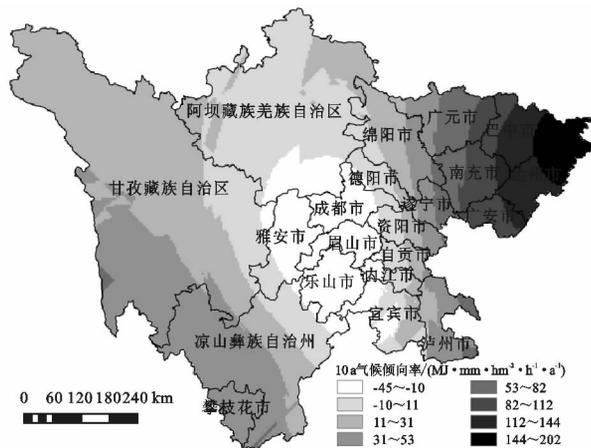


图 7 年降雨侵蚀力气候倾向率空间分布

表 4 四川省内研究站点年降雨侵蚀力变化趋势统计特征

项目	甘孜	马尔康	松潘	温江	理塘	九龙	宜宾*	西昌	会理	万源*	高坪区
相关系数	0.201	0.160	0.192	-0.213	0.205	0.231	-0.322	0.211	-0.028	0.273	0.133
变化趋势	上升	上升	上升	下降	上升	上升	下降	上升	下降	上升	上升

注: \* 为通过 95% 的信度水平检验。

## 4 讨论与结论

(1) 四川省降雨侵蚀力的变化范围主要在 202~8 650 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),其总体变化规律是从东南向西北呈阶梯状逐渐降低,这与章文波<sup>[32]</sup>、陈学兄<sup>[19]</sup>、刘斌涛<sup>[12,22]</sup>、陈东东<sup>[11]</sup>等研究较相似,但在雅安—乐山一带稍有差异,文中研究结论在该区并未出现 R 值高值区,仅在盆西区域出现一个明显的突值区,这可能与选取站点、数据年限不同有关,但相关降雨研究表明盆地西部降水日数呈加快减少趋势<sup>[33]</sup>,降水量也呈减少趋势<sup>[29-31]</sup>,那么降雨侵蚀力也随之降低也是合理的。R 值与降雨量、侵蚀性降雨量的空间分布较为一致,但 R 值更接近侵蚀性降雨量的空间分布特征,并其高低值空间分布表现出四川盆地>川西南山地>川西高原的特征。

(2) 1955—2015 年整个研究期内,四川省降雨侵蚀力与降雨量年际变化波动规律几乎一致,二者呈极显著相关( $r=0.893, p<0.01$ ),并且近 61 年来 R 值呈显著增加趋势,每年增值 53.64 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a);在地域性年际变化中,四川省属于中等变异( $0.278 < C_v < 0.686$ ),降雨侵蚀力地域年际变化特征明显,有北高南低的特点,需要加强四川北部区域的水土流失防治工作。

(3) 降雨侵蚀力年内分布与降雨量、侵蚀性降雨量的年内分布规律较相似,呈单峰型,年内分布极不均匀,主要集中在 6—9 月份,且最大月 R 值出现在

夏季的 7 月[1 039.15 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)];R 月均值为 311.74 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h),且年内季节动态变化明显,夏季降雨侵蚀力危害严重,冬季危害偏低,春、秋两季较平稳。因此,在夏季应加强对降雨量大区域的水土保持综合治理措施,尤其是四川盆地东部和川西南山地南部地区,夏季频发暴雨洪灾,易造成农作物受损、道路瘫痪、城市水涝等现象,并对生命财产安全、社会秩序稳定等产生极大的连锁灾害反应,故而进行水利工程措施改革和维护,加强生物措施实施和监管以及耕作治理和改良措施等是政府相关部门需高度重视的。

(4) 四川省最大趋势系数和 10 a 倾向率分别高至 0.125,202 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a),其大部分区域 R 值变化趋势呈不显著上升趋势,主要集中在川西高原和川东北地区,但存在一个明显的上升区域(达州万源,  $r=0.237, p<0.05$ );成都平原是四川省降雨侵蚀力的下降中心区域,且宜宾区域呈显著下降趋势(宜宾,  $r=-0.322, p<0.05$ )。针对四川省未来大部分区域土壤侵蚀危害增加的风险,相关研究学者和政府相关部门应更细致化地进行重点区域重点研究、重点防治,避免因由于监护、防治不当,给当地人们带来人身安全危害和生态、经济损失,尤其是川西地区,由于其地理位置,地势陡峭、地表植被覆盖度少,再加上地广人稀,水土保持监管措施等难以全面覆盖,近年来该区域常发生大型泥石流、滑坡等自然灾害。

(5) 此外,有相关研究表明, $R$  值的变化趋势也受海拔高度和地理纬度的影响,在文中 3.1 空间分布特征分析中, $R$  值的变化也明显表示出与地理海拔具有相关性,后续还需再做相关研究来进行验证。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力  $R$  指标的研究[J]. 中国水土保持,1987(12):34-38.
- [3] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报,1992,12(4):1-10.
- [4] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力指标研究[J]. 中国水土保持,1992(2):32-33.
- [5] Yu B, Rosewell C J, Yu B, et al. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996,34(1):139-152.
- [6] Mikhailova E A, Bryant R B, Schwager S J, et al. Predicting rainfall erosivity in Honduras[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(1):273-279.
- [7] 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.
- [8] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力  $R$  值的研究[J]. 水土保持学报,1992(4):1-5.
- [9] 马良,姜光辉,左长清. 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):61-69.
- [10] 章文波,付金生. 不同类型降雨资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.
- [11] 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.
- [12] 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]. 地理科学进展,2017,27(5):499-509.
- [13] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 基于重心模型的西南山区降雨侵蚀力年内变化分析[J]. 农业工程学报,2012,28(21):113-120.
- [14] 李林育. 四川盆地丘陵区降雨侵蚀与输沙特征[D]. 北京:中国科学院大学,2009.
- [15] 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.
- [16] 付金霞,张鹏,郑粉莉,等. 河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J]. 农业机械学报,2016,47(2):185-192.
- [17] 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.
- [18] 谢云,刘宝,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [19] 陈学兄. 基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [20] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [21] 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(22):245-256.
- [22] 孙佳. 47 年来石羊河流域气候变化趋势及突变分析[D]. 兰州:兰州大学,2008.
- [23] 王超. 四川省降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. 地理空间信息,2017,15(2):111-114.
- [24] 段文明,穆兴明,王飞,等. 嘉陵江流域降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 水土保持通报,2012,32(5):182-185.
- [25] 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.
- [26] 李玉泉,徐学军,曾致远,等. 基于日雨量的降雨侵蚀力模型研究[J]. 水利建筑工程学报,2007,5(2):12-34.
- [27] 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.
- [28] 文博. 四川省干旱时空分布特征研究[D]. 成都:四川师范大学,2014.
- [29] 李川,陈静,朱燕君. 川西高原近五十年气候变化的初步研究[J]. 高原气象,2003,22(S1):138-144.
- [30] 杜华明,延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J]. 资源科学,2013,35(12):2491-2500.
- [31] 齐冬梅,李跃清,陈永仁,等. 近 50 年四川地区干旱时空变化特征研究[J]. 高原气象,2011,30(5):1170-1179.
- [32] 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.
- [33] 任小玲,董治宝,周正朝. 近 50 年来四川盆地降水日数的时空变化特征[J]. 水土保持通报,2012,32(4):65-70.