

DOI: 10.5846/stxb201805241142

操玥,王世杰,白晓永,李汇文,王明明,吴路华.近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变过程.生态学报,2018,38(24): - .  
Cao Y, Wang S J, Bai X Y, Li H W, Wang M M, Wu L H. Inversion calculation and spatial-temporal pattern of rainfall erosivity in southwestern China over one hundred years. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

# 近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变过程

操 玥<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1,3</sup>, 白晓永<sup>1,3,\*</sup>, 李汇文<sup>1,2</sup>, 王明明<sup>1,2</sup>, 吴路华<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺 562100

**摘要:**降雨侵蚀力(R)是评价降雨对土壤剥离、搬运侵蚀的重要指标,反映了降雨对土壤侵蚀的潜在能力,分析降雨侵蚀力百年尺度的演变过程对于探究区域生态安全格局具有十分重要的意义。基于 CRU\_TS4.01 数据集中的逐月降雨数据,计算中国西南地区 1901—2016 年的降雨侵蚀力,分析其时空格局演变过程并基于像元进行了趋势分析。结果表明:(1)西南地区百年以来降雨侵蚀力空间分布与降雨量的分布基本一致,呈现出自西北向东南逐渐增加的空间分布格局;(2)中国西南有 34.11% 的地区百年平均降雨侵蚀力在 4500—5500 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> 之间;(3)西南地区降雨侵蚀力在年内的集中度较高,各个地区在夏季(6—8月)和秋季(9—11月)的累计降雨侵蚀力占到了全年的 75.84%—96.09%,其中季节最大降雨侵蚀力出现在西藏林芝地区的夏季,其贡献率达到了 74.2%;(4)西南地区降雨侵蚀力在百年尺度上的年均值为 4092.84 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最高值(1915年)为 4667.75 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最低值(1992年)仅 3639.63 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;(5)西南地区降雨侵蚀力年际变化存在明显的空间差异性,有 47.59% 的区域降雨侵蚀力呈现不同程度的减少趋势,32.91% 的区域则呈现不同程度的增加趋势。为中国西南地区土壤侵蚀的防治、生态安全格局的形成及演化机制提供了理论和数据方面的参考。

**关键词:**降雨侵蚀力;百年;时空格局;趋势分析;中国西南

## Inversion calculation and spatial – temporal pattern of rainfall erosivity in southwestern China over one hundred years

CAO Yue<sup>1,2</sup>, WANG Shijie<sup>1,3</sup>, BAI Xiaoyong<sup>1,3,\*</sup>, LI Huiwen<sup>1,2</sup>, WANG Mingming<sup>1,2</sup>, WU Luhua<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, China

**Abstract:** Rainfall erosivity (R) is an important index for evaluating soil detachment and transport erosion, reflecting the potential ability of rainfall to erode soil. It is important to explore the evolution of R at the centennial scale to determine regional ecological security patterns. Based on the monthly rainfall data from the CRU\_TS4.01 dataset, R in southwestern China from 1901 to 2016 was calculated in this paper and we further analyzed the evolution of the spatiotemporal pattern and pixel-based trend dynamics. Major findings are as follows: 1) The spatial distribution of R in the southwestern China has

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0502300, 2016YFC0502102),“西部之光”人才培养计划(A类),中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-036)和国际合作局国际伙伴计划(132852KYSB20170029, 2014-3),贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648),喀斯特科学研究中心联合基金(U1612441),国家自然科学基金(41571130074, 41571130042),贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期:2018-05-24; 修订日期:2018-09-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@126.com

been consistent with the distribution of rainfall, showing a spatial pattern that gradually increased from northwest to southeast. 2) In southwestern China, 34.11% of the region has a mean annual R of 4500 to 5500 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. 3) R in southwestern China is highly concentrated during the year. The accumulated R in summer (June to August) and autumn (September to November) in each region accounted for 75.84% to 96.09% during the year. The seasonal maximum rainfall erosivity occurred in summer in the Nyingchi region of Tibet, with a contribution rate of 74.2%. 4) The mean value of R in southwestern China is 4098.84 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, the highest level (appeared in 1915) was 4667.75 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, and the lowest level (appeared in 1992) was only 3936.63 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. 5) Spatial heterogeneity in R was found in southwestern China for 47.59% of the regions presenting a decreasing pattern and 32.91% that showed an increasing dynamic. This study provides theoretical and statistical references for the prevention and control of soil erosion, as well as the formation and evolution of ecological security patterns in southwestern China.

**Key Words:** rainfall erosivity; over one hundred years; spatial-temporal pattern; trend analysis; southwestern China

西南地区是我国生态系统复杂多样,生物多样性和水资源等自然资源丰富,是我国重要的生态屏障区。然而该地区地貌类型复杂、分布着高原、高山峡谷、喀斯特地貌等,也是我国生态极为敏感和脆弱的区域。区域内是我国少数民族和贫困人口集中分布的区域,长期而强烈的人类活动对原生生态系统破坏严重,土壤侵蚀十分严重<sup>[1]</sup>。降雨侵蚀力是降雨的潜在能力,是反映区域资源环境承载能力的重要指标<sup>[2]</sup>,是导致土壤侵蚀产生和发展的直接原因,当渗透能力饱和时就会形成地表径流而引起土壤侵蚀。降雨侵蚀力是控制土壤侵蚀最重要的因子之一,其时空分布在一定程度上决定了土壤侵蚀的空间分布规律,因而在长时间尺度上准确估算降雨侵蚀力及对其空间分布及演变有清晰的掌握对于估算区域土壤侵蚀十分必要,更对长时间尺度上明确区域生态安全格局及其演化具有重要意义。目前,采用次降雨总动能 E 和最大 30 min 降雨强度(I<sub>30</sub>)的乘积(EI<sub>30</sub>)表示降雨侵蚀力的算法被国内外学者认为是 R 的经典算法<sup>[3]</sup>。但是,由于次降雨过程指标计算繁琐以及资料获取困难, EI 算法在实际应用推广中受到极大限制。因此,国内外学者根据日、月、年降雨量资料提出了多种计算降雨侵蚀力的简易模型,如基于日降雨量资料的 CREAMS 模型<sup>[4]</sup>、Richardson 模型<sup>[5]</sup>、章文波等提出的简易算法模型<sup>[3]</sup>,基于月降雨量的 Silva 等<sup>[6]</sup>、Wischmeier<sup>[7]</sup>等、周伏建等<sup>[8]</sup>提出的模型,为计算流域尺度乃至区域尺度的降雨侵蚀力提供了参考。然而,西南地区地跨多种地貌类型和气候类型,对气候变化非常敏感,在研究降雨侵蚀力的过程中必须要关注气候变化对降雨侵蚀力的影响<sup>[9]</sup>。当前的研究多是基于气象站点的观测数据而进行的,难以反演出百年尺度降雨侵蚀力的演变情况。有鉴于此,本文通过全球百年尺度 CRU\_TS4.01 逐月降雨数据,反演计算近百年中国西南降雨侵蚀力,并分析其时空格局演变过程,对于西南地区的土壤侵蚀研究与防治及生态恢复与重建具有重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究的中国西南地区是指 21°08′—36°29′N、87°22′—112°03′E 的范围,它包括了我国西南地区的云南省、贵州省、广西省、四川省、重庆市及西藏、青海的部分地区。地处我国一二级阶梯上,地貌复杂,横跨青藏高原东南、四川盆地、云贵高原、广西丘陵等地<sup>[10]</sup>,是我国水土流失最严重的区域之一。作为西南山区土壤侵蚀的主要动力因素,降雨侵蚀力在西南山区土壤侵蚀研究和水土流失监测、预报和防治中起着至关重要的作用<sup>[9]</sup>。

### 1.2 数据来源

研究采用的数据由英国东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)提供的 CRU\_TS4.01 数据库<sup>[11]</sup>。该数据库通过整合已有的若干个数据库,重建了一套覆盖完整且无缺测的月平均地表气候要素数据集,时间范围为 1901—2016 年,覆盖全球 0.5°经纬网格的所有陆地(除南极洲),该数据集已经被广泛应

用于全球气候变化研究中,其精度和适用性也在多项研究中得到了验证,精度可靠<sup>[12-13]</sup>。本研究使用了该数据库中的降雨数据,包括了从 1901 年 1 月至 2016 年 12 月的逐月降雨数据。

### 1.3 降雨侵蚀力的计算

本研究基于月降雨数据采用下式计算降雨侵蚀力<sup>[6]</sup>:

$$EI_{30i} = 73.989 \times \left( \frac{P_i^2}{Pa} \right)^{0.7387} \tag{1}$$

式中, $EI_{30i}$ 表示月均降雨侵蚀力( $MJ\ mm\ hm^{-2}h^{-1}$ ); $P_i$ 为第*i*个月的降雨量; $Pa$ 为年平均降雨量。年均降雨侵蚀力为一年中月降雨侵蚀力的总和。研究表明<sup>[14]</sup>,该方法在地形复杂地区精度较高。

### 1.4 降雨侵蚀力的年际变化趋势

降雨侵蚀力的年际变化趋势的年际变化趋势,以各栅格多年数值最小次方线性回归方程的斜率表示<sup>[15]</sup>,具体公式如下:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times M_{R,i}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n M_{R,i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \tag{2}$$

式中, $n$ 为 116, $i$ 为年序号, $M_{R,i}$ 为第*i*年的降雨侵蚀力。其中,当 $k>0$ 时,说明降雨侵蚀力在 116 年间的变化趋势是增加的;反之,则减少。

## 2 结果与分析

### 2.1 百年平均降雨侵蚀力的空间分布特征

由图 1b 西南地区百年平均降雨侵蚀力的空间分布图可见,整个西南地区降雨侵蚀力的地域差异十分明

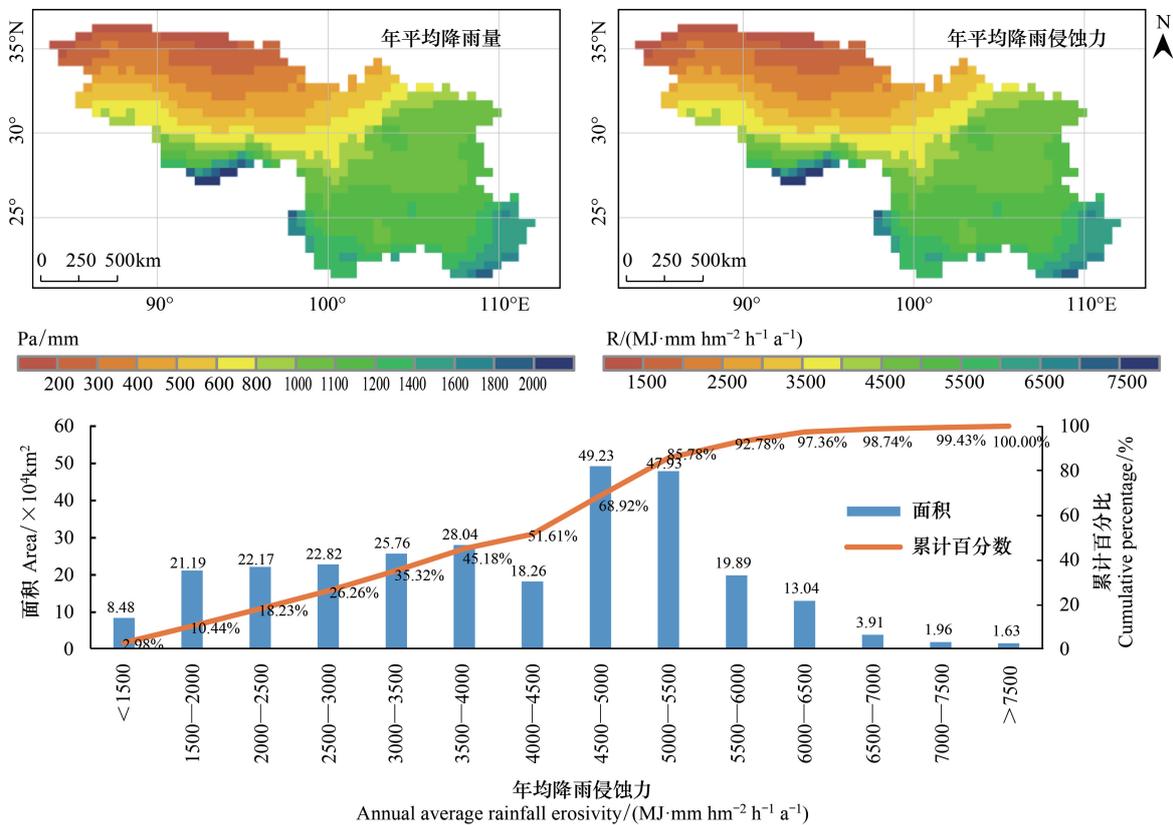


图 1 年平均降雨侵蚀力的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of annual average rainfall erosivity (1901—2016)

显,总体表现为:形成青藏高原—四川盆地以及云贵高原—广西丘陵两条样带,由西北向东南逐级增加的空间分布格局。青海省、西藏自治区大部及四川的西北部分地区百年平均降雨侵蚀力在  $4000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  以下,广西、云南、贵州、重庆、四川省及西藏自治区东南部降雨侵蚀力在  $4000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  以上,其中,西藏自治区北部的那曲地区及青海省西南部的玉树藏族自治州最小,为  $1500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  以下,广西省东南部的及西藏自治区东南部的林芝地区最大,为  $7500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  以上。降雨侵蚀力的空间分布与降雨量的分布(图 1a)基本一致,年降水丰富的地区一般情况下降雨侵蚀力要相应高一些。从高原到盆地、丘陵降水量明显增加,降雨侵蚀力也随之增加,从高原年降水量低于  $200 \text{ mm}$  的区域增加到  $2000 \text{ mm}$  以上,而降雨侵蚀力增加的量要比降水大得多,由小于  $1500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  增加到  $7500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  以上,出现两者增加的量不一致的原因是降雨强度起了关键的作用<sup>[16]</sup>。由图 1c 可以看出,西南地区降雨侵蚀力等级自  $1500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  开始由低到高呈缓慢增加趋势,自  $4000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  减少后又迅速增加,自  $5000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  后各个侵蚀力等级的面积逐步减少。西南地区的降雨侵蚀力多分布于  $4500\text{--}5500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  这一区间,其分布面积达到了  $97.16$  万平方千米,约占到了西南地区总面积的  $34.11\%$ 。

## 2.2 降雨侵蚀力年内分配的空间分异

西南地区百年尺度年内月平均降雨侵蚀力空间分布如图 2 所示。由图 2 可知,12 月、1 月、2 月及 3 月降雨侵蚀力呈现东南、西北部高、中间低的空间分布格局,其余月份的空间分布与全年空间分布基本一致。全年 1—12 月整体呈现出月降雨侵蚀力高值区从东南/西北部向中部移动再转回东南/西北部的变化趋势。广西壮族自治区因其受冬夏季风交替和地理环境影响显著<sup>[17]</sup>,全年雨量丰富,因此成为月降雨侵蚀力的相对高值区。而 12 月、1 月、2 月、3 月、4 月、5 月及 9 月份的降雨侵蚀力最小值都出现了 0,除 4 月和 5 月的 0 值出现

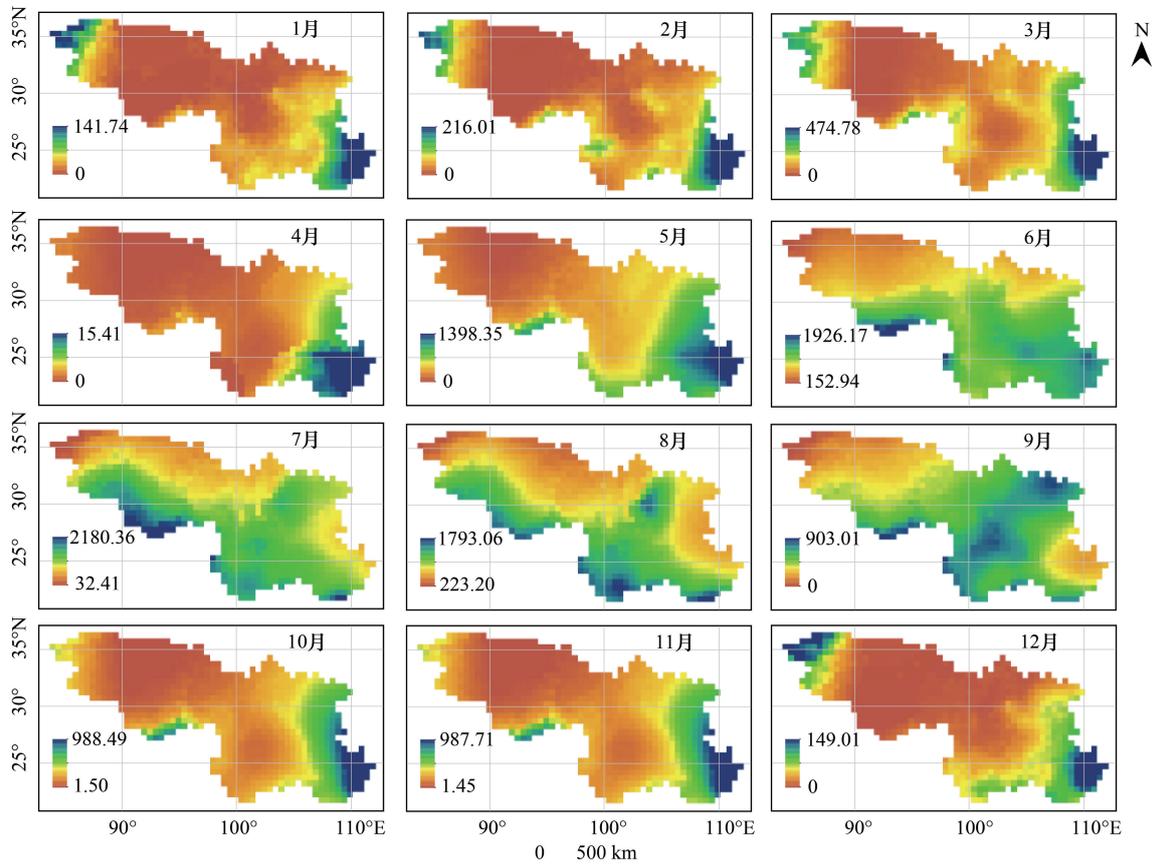


图 2 月平均降雨侵蚀力的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average monthly rainfall erosivity (1901—2016)

在青海省西南部外,其余的 0 值都多出现在西藏自治区,这是因为该地区在冬季和春季降水十分稀少,局部地区甚至整月无降雨,因此也不会产生降雨侵蚀力。全年中,5—11 月的月降雨侵蚀力最大值都达到了  $900 \text{ MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$  以上,而这个时间段正是农作物大面积收获的季节,地表裸露的时间较长,因此在这些月份有必要加强该地区水土流失治理工程的建设,保护植被,重点防范侵蚀性降雨带来的各种灾害。

按照春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—1 月)对西南地区各个区域进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 西南地区百年降雨侵蚀力的季节变化

Table 1 Seasonal variation of rainfall erosivity in the southwest of China (1901—2016)

区域 Region	季节 Season	最大值 Maximum/ ( $\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	最小值 Minimum/ ( $\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	平均值 Average/ ( $\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	R 全距 Range/ ( $\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	标准差 Standard deviation/ ( $\text{MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	占该区域全年 总量比例 Proportion/%
广西	春季	1848.83	726.35	1220.16	1122.48	301.75	19.91
	夏季	4804.81	2193.17	3189.66	2611.64	469.89	52.06
	秋季	2228.04	930.22	1457.18	1297.82	405.80	23.78
	冬季	492.42	92.41	259.86	400.02	116.41	4.24
贵州	春季	1354.99	460.18	889.32	894.81	196.13	17.95
	夏季	3396.03	2309.71	2742.54	1086.33	297.64	55.36
	秋季	1605.53	966.73	1194.29	638.81	181.69	24.11
	冬季	297.21	44.53	127.66	252.67	46.15	2.58
青海	春季	220.64	1.79	77.04	218.84	69.15	3.63
	夏季	2124.11	1051.54	1519.85	1072.57	246.13	71.60
	秋季	519.78	126.56	519.78	393.22	96.71	24.49
	冬季	19.44	2.85	5.88	16.59	2.78	0.28
四川	春季	731.11	208.69	422.76	522.42	101.53	10.73
	夏季	3643.36	1503.77	2518.13	2139.59	531.71	63.90
	秋季	1502.00	443.46	966.80	1058.54	236.56	24.53
	冬季	110.42	5.44	32.83	104.98	26.32	0.83
西藏	春季	985.61	11.94	231.38	973.67	174.07	6.73
	夏季	5601.57	408.55	2551.96	5193.02	1004.06	74.22
	秋季	1986.60	156.11	598.11	1830.49	319.41	17.39
	冬季	350.19	0.00	56.97	350.19	81.26	1.66
云南	春季	837.88	327.04	502.50	510.84	120.60	10.11
	夏季	4975.83	2649.02	3433.45	2326.81	338.07	69.08
	秋季	1364.42	794.60	953.39	569.82	96.01	19.18
	冬季	164.98	18.79	80.90	146.20	28.01	1.63
重庆	春季	1016.67	574.99	782.37	441.68	111.43	16.51
	夏季	2745.49	2219.46	2412.46	526.03	133.98	50.92
	秋季	1555.85	1247.14	1435.84	308.70	84.52	30.31
	冬季	168.07	41.80	106.84	126.28	23.71	2.26
西南	春季	1848.83	1.79	461.64	1847.04	365.35	11.44
	夏季	5601.57	408.55	2643.82	5193.02	841.33	65.49
	秋季	2228.04	126.56	854.46	2101.48	426.91	21.17
	冬季	492.42	0.00	76.92	492.42	91.85	1.91

由表 1 可以看出,西南地区的年内降雨侵蚀力最大值出现在西藏自治区的夏季,3 个月累计为  $5601.57 \text{ MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ,最小值出现在西藏自治区的冬季,为 0。在降雨侵蚀力的季节变幅方面,西藏自治区夏季最大,为  $5193.02 \text{ MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ,青海省的冬季最小,为  $16.59 \text{ MJ mm hm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。整个西南地区四个季节的降雨

侵蚀力大小依次为夏季>秋季>春季>冬季。西南地区的气候条件使得该地区的降雨多分布于夏秋两季,使得各个地区在夏季和秋季的累计降雨侵蚀力占到了全年降雨侵蚀力的 75.84%—96.09%,其中季节最大降雨侵蚀力出现在西藏自治区的夏季,比例达到了 74.2%,对于整个西南地区而言,夏秋两季对于全年降雨侵蚀力的贡献率达到了 86.66%,青海省以及西藏自治区甚至超过了 90%。因此,在降雨侵蚀力较强的这两个季节应该更加重视滑坡、泥石流的防治并采取相应的预警预报措施。

### 2.3 降雨侵蚀力年际变化的空间分异及趋势分析

按照行政区划分区统计了西南地区各个省份百年来的年均降雨侵蚀力(图 3),其中,广西省年均降雨侵蚀力的最小值出现在 1989 年,为 4408.79 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1994 年,为 7454.60 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 5885.84 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;贵州省年均降雨侵蚀力的最小值出现在 2011 年,为 4011.37 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1954 年,为 6394.25 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 5036.77 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;重庆市最小值出现在 1902 年,为 3608.22 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1915 年,为 6733.71 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 4855.55 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;云南省最小值出现在 1906 年,为 3943.17 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1918 年,为 6558.52 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 5310.42 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;四川省最小值出现在 2006 年,为 3354.68 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1915 年,为 5211.50 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 4044.44 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;西藏自治区最小值出现在 1994 年,为 2643.99 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 1962 年,为 4058.11 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 3406.51 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;青海省最小值出现在 1956 年,为 1328.71 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,最大值出现在 2014 年,为 2431.21 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,百年平均值为 1917.62 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>;西南地区最小值出现在 1992 年,为 3639.63 MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>。

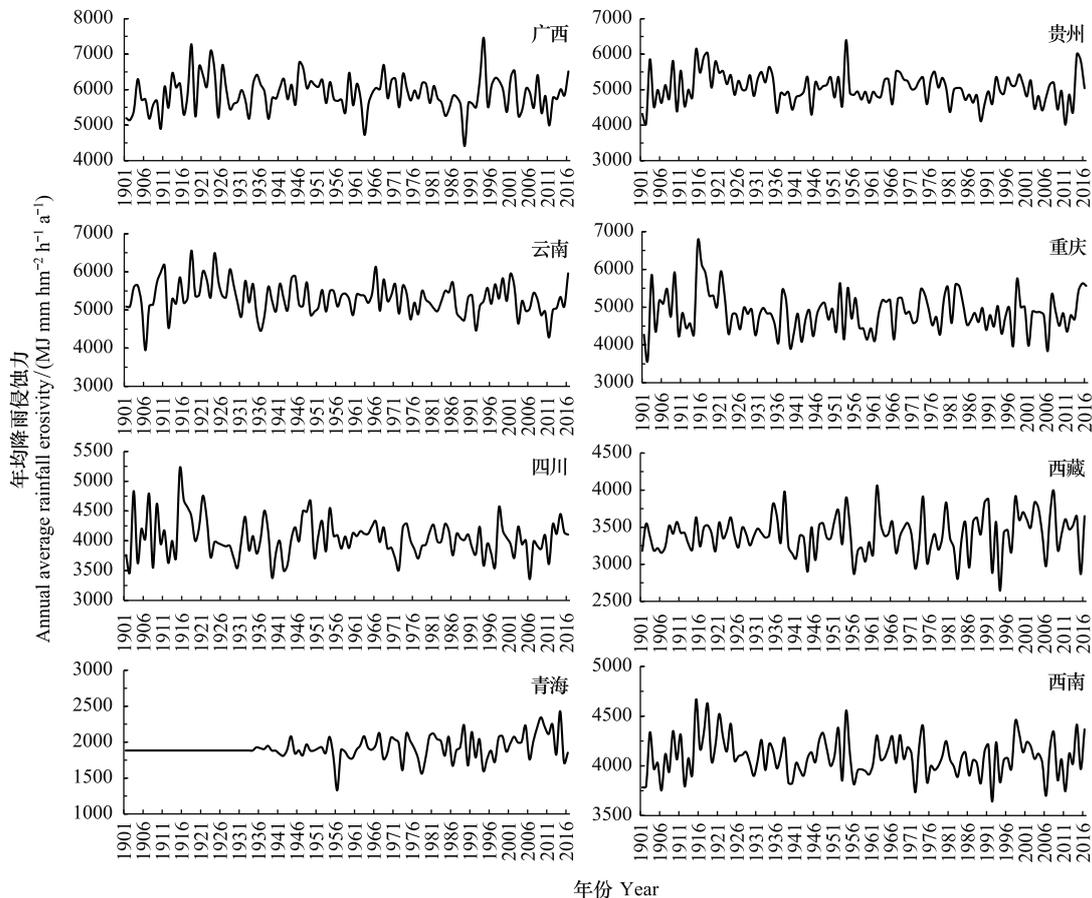


图 3 降雨侵蚀力的年际变化特征

Fig. 3 Inter-annual variation characteristics of rainfall erosivity (1901—2016)

$a^{-1}$ ,最大值出现在 1915 年,为  $4667.75 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,百年平均值为  $4092.84 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。除青海 1901—1935 年外,西南各地区年均降雨侵蚀力呈现有增有减的波动分布。

为了进一步探究西南地区百年以来降雨侵蚀力的变化特征,我们基于像元进行了趋势分析。当前,年际变化趋势  $k$  值的划分并没有统一标准<sup>[18]</sup>,考虑到研究区中降雨侵蚀力的整体分布情况,通过计算  $k$  值的变化,研究发现  $k$  值基本符合正态分布,故利用自然间断点分级法并向向下取整,将降雨侵蚀力变化划分为 9 个等级,分别为剧烈减少( $k \leq -4$ )、重度减少( $-4 < k \leq -3$ )、中度减少( $-3 < k \leq -2$ )、轻度减少( $-2 < k \leq -0.5$ )、稳定( $-0.5 < k \leq 0.5$ )、轻度增加( $0.5 < k \leq 2$ )、中度增加( $2 < k \leq 3$ )、重度增加( $3 < k \leq 4$ )和剧烈增加( $k \geq 4$ )。由图 4a 可以看出,广西省东部、青海省西南部以及西藏自治区西部降雨侵蚀力呈现不同程度的增加趋势,云南省大部、贵州省大部、四川省中部、广西省西北部及西藏自治区东南部呈现不同程度的减少趋势,其余地区则保持稳定,西南地区降雨侵蚀力年际变化存在明显的空间差异性。根据图 4b,西南地区有近 20% 的区域降雨侵蚀力百年来保持稳定,近 35% 的区域有轻度波动,有 32.91% 的区域降雨侵蚀力呈现不同程度的增加情况,47.59% 的区域呈现不同程度的减少情况。

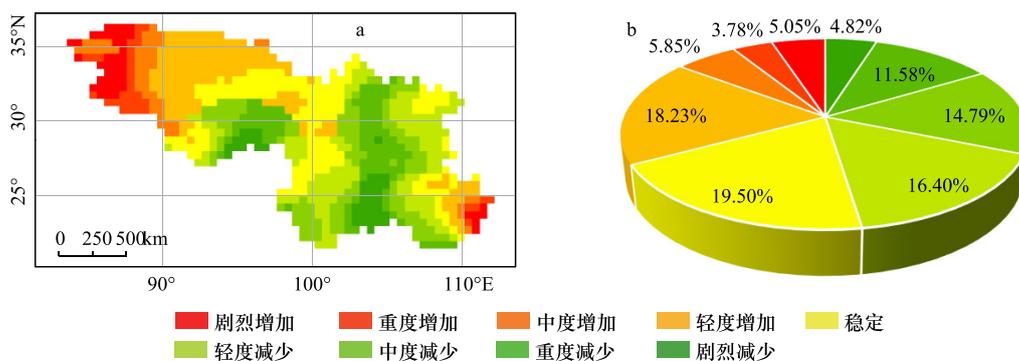


图 4 降雨侵蚀力的变化特征空间分布及分区统计

Fig.4 Spatial distribution (a) and zoning statistics (b) of rainfall erosivity variation characteristics

### 3 讨论

降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,它是评价这种潜在能力的一个动力指标。降雨侵蚀力的计算及其栅格数据的获取,是基于土壤侵蚀模型预报土壤流失量的关键所在<sup>[19]</sup>。本研究基于 CRU\_TS4.01 数据集,弥补了中国西部地区 20 世纪前半期缺少观测数据的空缺<sup>[13]</sup>,反演计算了 1901 到 2016 中国西南逐月降雨侵蚀力,并累加到全年。在此基础上,分析了整个西南地区降雨侵蚀力的时空分布格局,探讨了其年内的分布状况,研究了百年尺度降雨侵蚀力的年际变化并进行了趋势分析,本研究的结果对于未来进一步分析我国西南地区土壤侵蚀的时空演变格局以及生态安全格局的形成和演化机制具有十分重要的参考价值。

然而,本研究在取得一些认识的同时,也存在一些不足。图 3 中,青海省 1901—1935 年的年降雨侵蚀力无明显变化,这就意味着这三十多年青海省的年总降雨量基本不变,显然不符合客观认识。这是因为 CRU 数据首先选择 1961—1990 年的气候平均值计算整个时间段各站点的异常值,通过薄板样条插值法插值异常值到格点,再叠加上气候平均值最终得到格点资料,处理数据使用的数学方法相对简单,使得较大的山脉附近与站点实测降水的有所差异<sup>[20]</sup>,但是,仔细观察可以发现,1901—1935 年的值几乎是 1961—1990 年降雨侵蚀力的平均值。因此,CRU 数据对于 20 世纪初期的气候研究依然具有一定的参考价值。

### 4 结论

中国西南地区百年以来降雨侵蚀力空间分布的地域差异十分明显,呈现出自西北向东南逐渐增加的空间分布格局,且其空间分布与降雨量的分布基本一致;西南地区的降雨侵蚀力集中于  $4500—5500 \text{ MJ mm hm}^{-2}$

$\text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ 这一区间,其分布面积近  $100 \times 10^4 \text{km}^2$ ,占到了西南地区总面积的 34.11%;西南地区降雨侵蚀力在年内的集中度较高,全年中,5—11 月的月降雨侵蚀力最大值都达到了  $900 \text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$  以上,各个地区在夏季(6—8 月)和秋季(9—11 月)的累计降雨侵蚀力占到了全年的 75.84%—96.09%,其中季节最大降雨侵蚀力出现在西藏自治区的夏季,其对全年的贡献率达到了 74.2%;西南地区降雨侵蚀力在百年尺度上的平均值为  $4092.84 \text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ,最高值出现在 1915 年,为  $4667.75 \text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ,最低值出现在 1992 年,仅  $3639.63 \text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ;西南地区降雨侵蚀力年际变化存在明显的空间差异性,总体表现为:有 47.59% 的区域呈现不同程度的减少趋势,32.91% 的区域降雨侵蚀力呈现不同程度的增加趋势。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. 生态学报, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [ 2 ] 彭洁, 李爱农, 雷光斌, 南希, 边金虎, 赵伟. 基于 TRMM 数据的巴基斯坦降雨侵蚀力估算及空间降尺度模拟. 水土保持学报, 2017, 31(3): 10-15.
- [ 3 ] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [ 4 ] Knisel W G. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Washington, DC: USDA Conservation Research Report, 1980.
- [ 5 ] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 153-156.
- [ 6 ] Da Silva A M. Rainfall erosivity map for Brazil. CATENA, 2004, 57(3): 251-259.
- [ 7 ] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.
- [ 8 ] 周伏建, 黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18.
- [ 9 ] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 郭兵, 史展. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究. 地球科学进展, 2012, 27(5): 499-509.
- [ 10 ] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 高文文, 赵旦, 吴炳方. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [ 11 ] University of East Anglia Climatic Research Unit, Harris I C, Jones P D. CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis. (2017-12-04). <http://dx.doi.org/10.5285/58a8802721c94c66ae45c3baa4d814d0>.
- [ 12 ] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high - resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [ 13 ] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, Viner D. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. 大气科学, 2006, 30(5): 894-904.
- [ 14 ] De Almeida A Q, Souza R M S, Loureiro D C, Pereira D D R, Cruz M A S, Vieira J S. Modelling the spatial dependence of the rainfall erosivity index in the Brazilian semiarid region. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2017, 52(6): 371-379.
- [ 15 ] 刘世梁, 赵海迪, 董世魁, 苏旭坤, 刘琦, 邓丽, 张翔. 基于 SPOT NDVI 的阿尔金山自然保护区植被动态变化研究. 干旱区研究, 2014, 31(5): 832-837.
- [ 16 ] 陈东东, 程路, 栗晓玮, 李金建. 基于地统计学的四川省降雨侵蚀力时空分布特征. 生态学杂志, 2014, 33(1): 206-213.
- [ 17 ] 胡甲秋, 杨云川, 廖丽萍, 邓思敏, 陈立华. 基于多源降雨的广西季节性干湿演变特征与未来趋势. 山地学报, 2018, 36(2): 218-259.
- [ 18 ] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): 788-797.
- [ 19 ] 殷兵, 吴健平, 章文波. 基于 GIS 的降雨侵蚀力计算器实现研究. 水土保持研究, 2014, 21(4): 123-126, 132-132.
- [ 20 ] 王丹, 王爱慧. 1901—2013 年 GPCP 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估. 气候与环境研究, 2017, 22(4): 446-462.