# 1966－2017 年贵州省降雨侵蚀力的时空分布特征

阮 欧[1,2], 刘绥华[1,2], 杨广斌[1,2], 谢 波[1,2]

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州师范大学 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘 要**: [目的] 分析贵州省 1966—2017 年降雨侵蚀力 $R$ 值的时空演变规律,为评估该地区降雨对土壤侵蚀的防治、制定水土保持措施及农业生产规划提供参考。[方法] 基于贵州省 33 个气象站点 1966—2017 年的日降雨资料,利用克里金插值法、经验正交函数(EOF)方法、Mann-Kendall 检验、Morlet 小波分析法等,对贵州省 52 a 的降雨侵蚀力 $R$ 值的时空特征进行了分析。[结果] ①EOF 分析方法可以较好地解释降水侵蚀力的时空分布特征,其前两个特征向量累计贡献率达 52%,揭示了贵州省降雨侵蚀力全局型和东西反向型两种典型的分布模态。分析特征向量所对应的时间系数可得,贵州省的降水侵蚀力主要表现为全省全年偏大、全省全年偏小、东大西小、东小西大 4 种类型; ②贵州省降雨侵蚀力 $R$ 值年内主要受汛期降雨影响,全省各县市汛期降雨侵蚀力 $R$ 值均占全年总量的 60%以上; ③在年际变化上,降雨侵蚀力 $R$ 值存在多突变的现象,1971—1981 年突变频率最为频繁。通过周期检验发现其变化主周期为 28 a,次周期分别为 12 a 和 6 a。[结论] 贵州省降雨侵蚀力的时空分布与降雨量的时空分布趋势近似,整体呈现南部大北部小,夏季大冬季小的趋势,在未来几年内降雨侵蚀力 $R$ 值有上升的趋势。

**关键词**: 降雨侵蚀力; 贵州省; 时空分布; EOF 分析; Mann-Kendall 检验; 小波分析

**文献标识码**: A **文章编号**: 1000-288X(2020)03-0035-08 **中图分类号**: S157.1

**文献参数**: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.006; Ruan Ou, Liu Suihua, Yang Guangbin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province during 1966—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):35-42.

# Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Rainfall Erosivity in Guizhou Province During 1966－2017

Ruan Ou[1,2], Liu Suihua[1,2], Yang Guangbin[1,2], Xie Bo[1,2]

(1. *School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*; 2. *Provincial Key Laboratory of Mountain Resources and Environmental Remote Sensing Application, Guizou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*)

**Abstract**: [Objective] The spatial and temporal distribution of the rainfall erosivity, represented as $R$ value, in Guizhou Province from 1966 to 2017 was analyzed to provide reference for evaluating the prevention and control of soil erosion due to rainfall. The goal was to formulate soil and water conservation and agricultural production development measures in the study area. [Methods] Based on the daily rainfall data from 33 meteorological stations in Guizhou Province during 1966—2017, Kriging, empirical orthogonal function (EOF), Mann-Kendall examination, and Morlet wavelet analysis were utilized to analyze the $R$ value characteristics in Guizhou Province over 52 years. [Results] ① EOF analysis well-explained the spatial temporal distribution characteristics of rainfall erosivity. The cumulative contribution rate of the first two eigenvectors reached 52%, revealing two typical distribution modes of rainfall erosivity in Guizhou Province: the whole region pattern and the east-west reverse pattern. According to the analysis of the time coefficient corresponding to

**收稿日期**:2019-11-04 **修回日期**:2020-01-17

**资助项目**:国家自然科学基金项目"喀斯特环境下的地物光谱与典型地物识别研究"(61540072); 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2014]2127 号)

**第一作者**:阮欧(1995—),男(汉族),贵州省遵义市人,硕士,研究方向为地理信息与遥感应用。Email:RUANOU1995@163.com。

**通讯作者**:刘绥华(1977—),男(汉族),湖南省邵阳市人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地理信息系统与遥感研究。Email:lsh23h@163.com。

the feature vector, the erosive force of rainfall in Guizhou Province was mainly manifested in four ways: the erosive force of rainfall was relatively large during the entire year, it was relatively small during the entire year, it was relatively large in the east and and small in the west, and relatively small in the east and large in the west. ② From the perspective of the entire year, the $R$ value in Guizhou Province was mainly affected by the rainfall in flood season, and the $R$ value in all counties and cities in the province accounted for more than 60% of the entire year. ③ The $R$ value had multiple mutations in its interannual variation. The mutation frequency was the maximum during 1971—1981. Through the cycle test, it was observed that the main cycle of the change was 28 years, and the subcycles were 12 years and 6 years. [Conclusion] The spatial distribution of rainfall and rainfall erosivity was similar in Guizhou Province. Rainfall erosion was generally small in the south and large in the north, and small in summer and large in winter. The rainfall erosivity should increase in the next few years.

**Keywords: rainfall erosion; Guizhou Province; spatial and temporal distribution; empirical orthogonal function (EOF) analysis; Mann-Kendall test; wavelet analysis**

水力侵蚀是引起土壤侵蚀的主要因素,水力侵蚀分为径流侵蚀和降雨侵蚀两种类型,其中降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,降雨侵蚀力 $R$ 值是评估土壤侵蚀潜在能力的一个动力指标[1]。研究降雨侵蚀力 $R$ 值的时空分布特征对区域的水土保持和防治具有重要的现实意义。目前,降雨侵蚀力的研究主要基于 USLE 模型,以研究区的小区实测数据及该研究区现状对 USLE 模型进行改进,分析降雨侵蚀力 $R$ 值的时空分布规律[2]。在降雨侵蚀力 $R$ 值的计算方法上,对其较早进行研究的是外国学者 Wischmeier,他通过大量数据的分析后发现降雨的总动能($\sum=E$)及其 30 min 最大雨强($I_{30}$)的乘积与土壤流失量的关系是最为紧密,得出 $R=\sum E \cdot I_{30}$ 的降雨侵蚀力表达式[3]。随后世界上很多国家都利用该表达式计算 $R$ 值。然而该公式是基于美国的观测数据求得的,在具体运用到其他国家和地区时,由于地质地貌、土壤类型等因素存在较大差异其降雨特征也存在很大的不同,该表达式很难满足实际需要。对此,不少的学者针对研究区的地形、地貌、土壤等自然特征,制定出适合该研究区降雨侵蚀力的最佳算法。例如:日本学者种田行男等[4]通过对各地区进行试验分析研究,最终选择以 $E \cdot I_{10}$ 和 $E \cdot I_{60}$ 作为降雨侵蚀力 $R$ 值的指标,即 $R=\sum E \cdot I_{10}$ 和 $R=\sum E \cdot I_{60}$。中国学者针对西北黄土地区提出的降雨侵蚀力 $R$ 值的计算方法 $R=\sum E_{60} \cdot I_{10}$ 或 $R=\sum E \cdot I_{30}$[5],$R=\sum E \cdot I_{10}$[6],$R=P \cdot I_{30}$[7],这些方法运用到相应地区都有较好的精度。但是一般情况下很难获得某一地区的长时间的降雨强度、最大雨量、持续时间、降雨动能等详细资料,且由于站点多,时间顺序长,使得整理过程十分繁琐,基于对以上情况的考虑,在计算降雨侵蚀力时一般都会建立降雨侵蚀力的简易算法,从而省去常规计算中难以获取的因子。例如:周伏健等[8]提出的适宜福建地区的降雨侵蚀力 $R$ 值计算的方法 $R=\sum_{i=1}^{12}(-2.639\ 8+0.304\ 6P_i)$;吴素业等[9],针对大别山地区提出的年降雨侵蚀力 $R$ 值的估算公式 $R=\sum_{i=1}^{12}(0.012\ 5P_i^{1.629\ 5})$,章文波等[10-11],伍育鹏等[12]提出的利用不同降雨资料对降雨侵蚀力进行计算的简易方法等。通过实际检验都有较高的精度,能够满足对土壤侵蚀计算的要求。

贵州省以喀斯特地貌为主,山高谷深,石灰岩发育使得多数地区土层普遍较薄,加上长时间大规模的破坏性拓荒,使得地表植被、土壤的覆盖遭到破坏,导致水土流失和石漠化成为贵州省生态环境最突出的问题[13]。遥感调查数据显示,水土流失面积占贵州省总面积的 41.62%[14]。因此,对贵州省的降雨侵蚀力 $R$ 值进行估算及时空特征进行分析显得尤为重要。本文通过贵州省 33 个气象站实测逐日降雨数据,反演计算近 52 a 贵州省降雨侵蚀力,并分析其时空变化特征,以期为贵州省评估降雨对土壤侵蚀的潜在作用、防治、制定水土保持措施及农业生产规划提供参考。

# 1 资料与方法

## 1.1 资料准备及选用数据来源

降雨资料主要来源于中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/)提供的贵州省内 33 个气象监测站 1966—2017 年的日降雨数据,部分地区年降雨侵蚀力数据来源于贵州省水土保持监测站。各站点分布状况见封 2 附图 1,基本信息如表 1 所示。

**表 1　贵州省各气象监测站点基本信息**

| 台站名称 | 海拔高度/m | 东经/(°) | 北纬/(°) | 台站名称 | 海拔高度/m | 东经/(°) | 北纬/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 威宁 | 2 237.50 | 104.28 | 26.89 | 安顺 | 1 431.10 | 105.93 | 26.26 |
| 水城 | 1 817.00 | 104.88 | 26.58 | 贵阳 | 1 223.80 | 106.72 | 26.58 |
| 盘县 | 1 800.00 | 104.62 | 25.79 | 凯里 | 720.30 | 107.98 | 26.61 |
| 桐梓 | 972.00 | 106.83 | 28.14 | 都匀 | 969.10 | 107.52 | 26.27 |
| 习水 | 1 180.20 | 106.23 | 28.34 | 三穗 | 626.90 | 108.67 | 26.98 |
| 正安 | 679.70 | 107.46 | 28.56 | 黎平 | 568.80 | 109.15 | 26.23 |
| 松桃 | 406.10 | 109.19 | 28.16 | 天柱 | 401.40 | 109.20 | 26.91 |
| 毕节 | 1 510.60 | 105.28 | 27.33 | 兴仁 | 1 378.50 | 105.19 | 25.43 |
| 仁怀 | 890.30 | 106.42 | 27.83 | 望谟 | 566.80 | 106.09 | 25.19 |
| 息烽 | 1 112.10 | 106.74 | 27.11 | 兴义 | 1 299.60 | 104.90 | 25.08 |
| 湄潭 | 792.20 | 107.47 | 27.77 | 紫云 | 1 197.60 | 106.09 | 25.77 |
| 余庆 | 622.10 | 107.88 | 27.23 | 惠水 | 990.90 | 106.67 | 26.17 |
| 思南 | 416.30 | 108.25 | 27.95 | 罗甸 | 440.30 | 106.78 | 25.43 |
| 铜仁 | 279.70 | 109.19 | 27.72 | 独山 | 1 013.30 | 107.56 | 25.83 |
| 黔西 | 1 231.40 | 106.02 | 27.04 | 荔波 | 428.70 | 107.88 | 25.42 |
| 织金 | 1 319.30 | 105.78 | 26.68 | 榕江 | 285.70 | 108.54 | 25.98 |

### 1.2　研究方法

1.2.1　*降雨侵蚀力 $R$ 值的计算方法*　由于数据资料的局限性，本研究选用章文波等[11]提出的利用日降雨量计算降雨侵蚀力 $R$ 值的方法对贵州省 1966—2017 年的降雨侵蚀力 $R$ 值进行计算，然后再对求得的数据进行时空特征分析，其中降雨侵蚀力 $R$ 值的计算方法为：

$$M=\alpha\sum_{i=1}^{k}(P_j)^{\beta} \tag{1}$$

式中：$M$ 为某个半月时段的降雨侵蚀力值 MJ·mm/(hm²·h)；$k$ 为半月时段内侵蚀性降雨的天数(d)；$P_j$ 为某个半月时段内第 $j$ 天的日降雨量(mm)，要求其日降雨量必须大于 12 mm(12 mm 是降雨量是否为侵蚀性降雨的阈值)，否则以 0 计算，$\alpha$ 与 $\beta$ 为待定参数，这里 $\alpha$ 与 $\beta$ 选取基于章文波等人提出的日雨量的最优参数进行计算，$\alpha=1.219\ 7$，$\beta=1.631\ 5$[10]。

1.2.2　*EOF 分析法*　经验正交函数(empirical orthogonal function，EOF)分析法，又称主成分分析法，是气候气象特征研究中较为常用的方法，它可以对某一区域内观测站点的值进行时空分析，能准确的反映相应的空间模态随时间的权重变化，即反映其空间分布特征。

1.2.3　*突变检测及周期检验方法*　突变检测和周期检验是分析长时间序列事物变化发展的重要内容之一，可以通过突变检测和周期变化清晰直观的了解事物的发展过程及其变化规律。当前检测突变的方法有许多，通过研究各种检验方法发现，H. B. Mann 和 M. G. Kendall 提出的 Mann-Kendall 检验法有较好的理论基础和实际应用效果，目前该方法已经在气温，降雨等方面有了广泛的使用[15-16]。其计算过程如下：

设气候序列为，$x_1,x_2,\cdots,x_n$，$S_k$ 表示第 $i$ 个样本，定义统计量：

$$S_k=\sum_{i=1}^{n}r_i,\quad r_i=\begin{cases}1 & (x_i>x_j)\\ 0 & (x_i=x_j)\\ 0 & (x_i<x_j)\end{cases}$$

(其中 $i<j,j=1,2,3,\cdots,n,k=1,2,3,\cdots,n$)　(2)

在时间序列随机独立的假定下，$S_k$ 的均值和方差为：

$$E[S_k]=\frac{k(k-1)}{4},$$

$$\mathrm{var}[S_k]=\frac{k(k-1)(2k+5)}{72}\quad(1\leqslant k\leqslant n)\tag{3}$$

将 $S_k$ 标准化：$\mathrm{UF}_k=\dfrac{(S_k-E[S_k])}{\sqrt{\mathrm{var}[S_k]}}$，$\mathrm{UF}_1=0$ 反序列 $\mathrm{UB}_k=-\mathrm{UF}_k$，$k=n,n-1,\cdots,1$，$UB_1=0$

当 $\mathrm{UF}_k$ 或者 $\mathrm{UB}_k$ 大于 0 时呈上升趋势，反之则呈下降趋势。给定显著性水平 $\alpha$，若 $|\mathrm{UF}_k|>U_\alpha$ 则存在明显的变化趋势，反之变化不明显。如果 $\mathrm{UF}_k$ 和 $\mathrm{UB}_k$ 出现相交情况，并且在两条显著性水平线之间，则交点即是存在突变的开始时间[15-17]。

在周期变化检验上主要采用在水文分析方面有着显著成效的小波分析法，小波分析法是在傅里叶变

化的基础上发展而来的，其对获取一个复杂时间序列的调整规律，分辨时间序列在不同尺度上的演变特征非常有效. 小波分析方法用于检验信号突变可以较准确的检验出信号突变时间点[17]。本文选用水文研究中常用的复 Morlet 小波分析方法对贵州省的降雨侵蚀力 $R$ 值进行研究，其表达为：

$$\varphi(t)=e^{i\omega_0 t}e^{-t^2/2} \tag{4}$$

式中：$\varphi(t)$为高斯包络下的复指数函数；$i$ 表示虚数；$\omega_0$ 为常数[15,18]；$t$ 为时间。

### 1.3 降雨侵蚀力 $R$ 值计算精度评估

由于本研究所获得的降雨数据资料没有详细的降雨细节记录。通过对比最终选择了基于日降雨量数据计算降雨侵蚀力 $R$ 值的简易算法对本研究区进行计算，经过前人的多次验证之后发现，该方法在降雨较丰富的地区有较好的精度，而在降雨量较小的地区该方法计算的降雨侵蚀力相对误差较大。为了检验此方法在贵州地区的适用程度，抽取 4 个不同地区前人所做的结果与本次计算降雨侵蚀力的数据进行验证，验证结果如表 2 所示，通过对比可以看出毕节、贵阳、兴义、织金 4 个站均与前人通过经典算法或简易算法计算的值非常相近，相对误差均小于 5.3%。因此，章文波等[10]提出的利用日降雨量计算 $R$ 值的算法和其他经典算法以及简易算法在计算贵州地区降雨侵蚀力时有较好的契合度。

**表 2 贵州省降雨侵蚀力 $R$ 值估算精度**

| 站点 | 前人值 | 本文值 | 相对误差/% | 年 份 | 计算方法 |
|---|---|---|---|---|---|
| 毕节 | 2 900 | 2 920 | 0.7 | 1956—1984 | $EI_{30}$[19] |
| 贵阳 | 4 271 | 4 487 | 5.1 | 1971—1973 | $EI_{30}=aR$[20] |
| 兴义 | 6 300 | 6 628 | 5.2 | 1956—2000 | $R=2.035\ 4P^{1.215\ 9}+45.564\ 9$[21] |
| 织金 | 6 650 | 6 333 | 4.8 | | |

由于贵州省属于喀斯特地区，地理环境与其他地区有所不同，因此需对本文所用的简易方法进行进一步验证，以证明该方法在贵州的适用性。为了验证该方法的适用性，本文收集了 2012 年至 2017 年期间六盘水（龙贵地）、安顺（三股水）、贵阳（修文）、黔南（贵定）、以及遵义（浒洋水）等各水土保持监测站点计算的年降雨侵蚀力值作为精度评估样本。各水土保持监测站计算的年降雨侵蚀力值是由次降雨过程计算出的值具有一定的精确性以及真实性。利用基于日降雨侵蚀力的方法估算的降雨侵蚀力 $R$ 值与水土保持监测站点计算的年降雨侵蚀力 $R$ 值进行拟合分析，从图 1 可知，水土保持站计算值与本文估算值总体趋势保持一致，大部分时间点两者值相差不大。从图 2 中也可以看出两者总体拟合情况较好，$R^2$ 值达到了 0.668 8。因此利用基于日降雨数据估算贵州省的降雨侵蚀力具有一定的科学性和合理性。

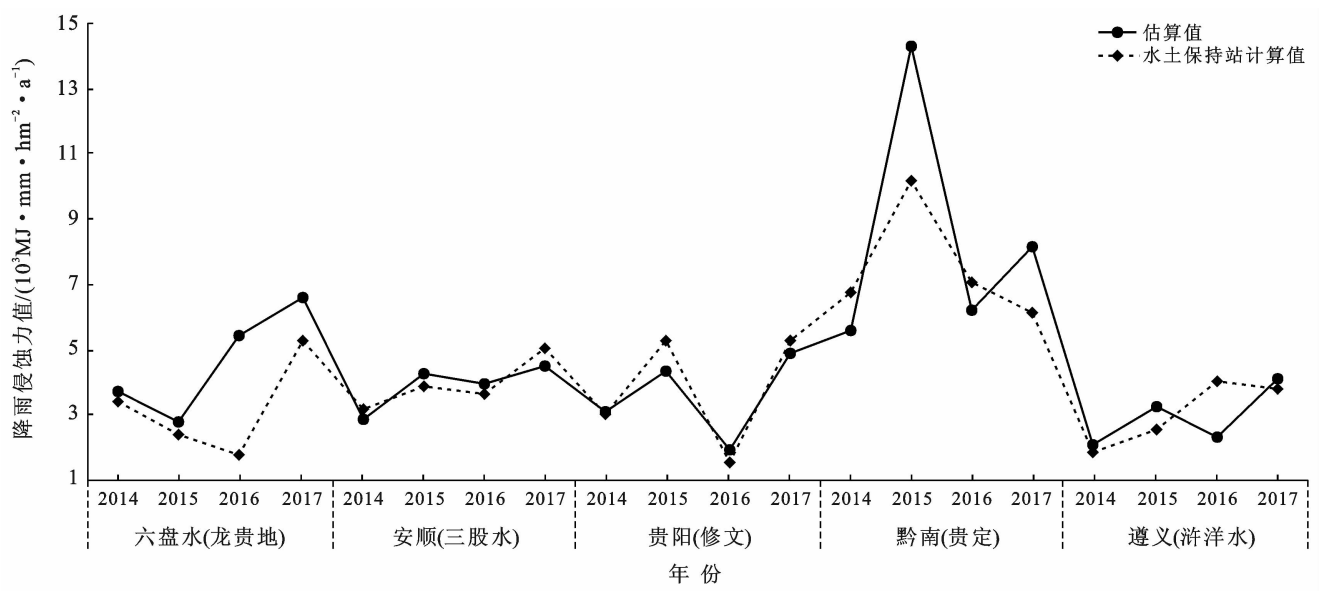



**图 1 贵州省部分站点估算值与水土保持站点计算值对比**

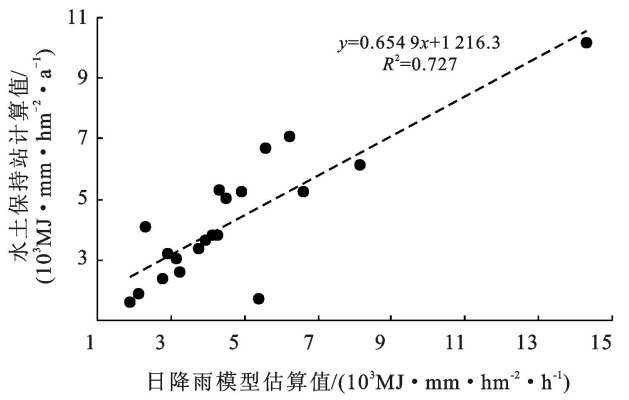



**图 2　贵州省部分站点估算值与水土保持站点计算值回归分析**

## 2　结果与分析

### 2.1　贵州省降雨侵蚀力 *R* 值分布特征

通过公式(1)对贵州省 33 个气象检测站点 52 a 的日降雨数据进行计算，得到全省各气象检测站的多年平均降雨侵蚀力 *R* 值，通过 ArcGIS 软件的克里金插值方法对贵州全省进行插值得到贵州省年平均降雨侵蚀力 *R* 值空间分布图、汛期年平均分布图以及枯水期年平均分布图。

从附图 2(见封 2)可知贵州地区降雨侵蚀力 *R* 值分布的地域差异较明显的，贵州省各地区的多年平均降雨侵蚀力 *R* 值介于 2 767.46～6 921.73 MJ·mm/(hm²·h)之间，平均 *R* 值为 4 994.22 MJ·mm/(hm²·h)；贵州省降雨力 *R* 值地域分布总体上呈由北向南递增的趋势，在西南部、南部、东部边缘多年平均降雨侵蚀力 *R* 值较大，而西北部、北部多年平均降雨侵蚀力 *R* 值偏低。其中，在兴义、望谟、安顺、织金以及都匀地区一带形成了降雨侵蚀力 *R* 值的高值中心，*R* 值均高于 6 000 MJ·mm/(hm²·h)，相反在威宁以及毕节地区一带形成降雨侵蚀力 *R* 值的低值中心，其值均低于 3 000 MJ·mm/(hm²·h)；形成这种分布特征的原因主要是由于贵州省的地形地貌造成的，从附图 1(见封 2)中可以看出中西部、西北部地势较高，而兴义、安顺、都匀地区恰好处在夏季风迎风坡一带容易形成降雨，反之在毕节一带地势较高，最高海拔达 2 800 m 左右，当湿热水汽从南方北上时，大部分水汽已在迎风坡上升遇冷形成地形雨，因此到达西北高海拔地区的水汽较少，降雨也较少。

### 2.2　经验正交函数 EOF 分析

2.2.1　*贵州省降雨侵蚀力空间分布特征*　为了进一步分析贵州省降雨侵蚀力 *R* 值的空间分布特征，利用 Matlab2017 软件对贵州省内 33 个气象监测站点测得的降雨资料计算的 1966—2017 年的降雨侵蚀力 *R* 值进行 EOF 分析。经检验，KOM 值约为 0.665，Bartlett 球形检验发现，近似卡方值为 2 036.261，自由度 36，$p=0.000$，说明适合做 EOF 分析。从表 3 中可以看出，前 5 个特征向量贡献值的累计贡献率达 69%，但是只有前两个特征根误差范围没有重叠通过了 North 显著性检验，累计贡献率达 52%，基本上能解释贵州省降雨侵蚀力 *R* 值的两种空间分布特征。

**表 3　降雨侵蚀力特征向量贡献率**

| 模态 | 特征值 | 方差贡献率% | 累计方差贡献率% | 特征根误差范围 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 51 775 841 | 36.552 | 0.366 | 39 029 510～64 522 172 |
| 2 | 21 470 085 | 15.157 | 0.517 | 16 184 516～26 755 655 |
| 3 | 10 502 891 | 7.415 | 0.591 | 7 917 258～13 088 524 |
| 4 | 7 766 270 | 5.483 | 0.646 | 5 854 347～9 678 194 |
| 5 | 6 374 937 | 4.501 | 0.691 | 4 805 536～7 944 338 |

由表 3 可以看出，第一特征向量的方差贡献率为 37%，远高于其他模态贡献率，是贵州省降雨侵蚀力 *R* 值的主要空间分布形式。由图 3 可知，第一模态的特征值均为正值，这表明了贵州省 1966—2017 年间，贵州省的降雨侵蚀力 *R* 值变化趋势具有一致性，导致这一现象的主要原因是由于贵州省较大的降雨受西太平洋副热带高压的影响，其与该气压的面积指数与强度呈正相关，由此导致贵州省的降雨侵蚀力在大尺度范围上的变化有明显的一致性。高值区位于安顺市、都匀市等中部偏南地区，反映了该地区年降雨侵蚀力 *R* 值变化幅度较大。低值区主要在东北部，降雨侵蚀力 *R* 值变化幅度较小。现有研究表明在中部偏南地区多极端降雨，对枯丰都比较敏感，而东北部年降雨量较为稳定变化不大[22]。

第二特征向量方差贡献率为 15%，其表现出降雨侵蚀力 *R* 值东西呈现相反的分布模式，零值先出现在 105°E 左右，这体现了贵州省东部降雨侵蚀力 *R* 值较大时，西部就较小，而西部较大时，东部则较小。正值中心在西南部，负值中心出现在都匀附近。造成这种现象的主要原因主要是地形所致，以 105°E 分为东、西两部分，东部海拔较低，最低处仅有 287.4 m，而西部的平均海拔高度在 1 600 m 左右，高度差异较大，所受得天气系统影响不同，造成降水差异，进而导致降雨侵蚀力差异。

2.2.2　*降雨侵蚀力 R 值 EOF 时间系数分析*　通过对 EOF 时间系数进行分析，贵州省的降雨侵蚀力 *R* 值主要有 4 种表现类型，第一模态决定了全年全省降雨侵蚀力 *R* 值较大或者全年全省降雨侵蚀力 *R* 值较小两种类型；第二模态决定了全年贵州省东部降雨侵蚀力 *R* 值偏大还是东部偏小，或者西部偏大东部

偏小两种类型。EOF 时间系数代表了对应特征向量空间分布模态的时间变化特征，系数的正负决定了模态的方向，正好表示与模态同向，负号表示与模态方向相反，并且系数的绝对值越大越能决定这一时刻的对应模态越典型。对贵州 52 a 的降雨侵蚀力 $R$ 值的 4 种空间模态分布类型进行统计分析，取每年 EOF 时间系数绝对值最大值对应的特征向量作为对应年的降雨侵蚀力空间分布模态，结果如图 4 所示，得出贵州省降雨侵蚀力 $R$ 值偏大年为 19 a，全省降雨侵蚀力 $R$ 值偏小年为 18 a，东部降雨侵蚀力 $R$ 值偏大年为 7 a，西部降雨侵蚀力偏大年为 8 a。由此可看出贵州省 52 a 降雨侵蚀力 $R$ 值，以第一向量的空间分布为主，达到了 37 a，占总年数的 71.15%，全省全年降雨侵蚀力偏大和偏小年相当。东部和西部差异型的降雨侵蚀力年数共 15 a，占总年数的 28.85%。这也与一、二模态贡献率反映的典型程度基本表现一致。

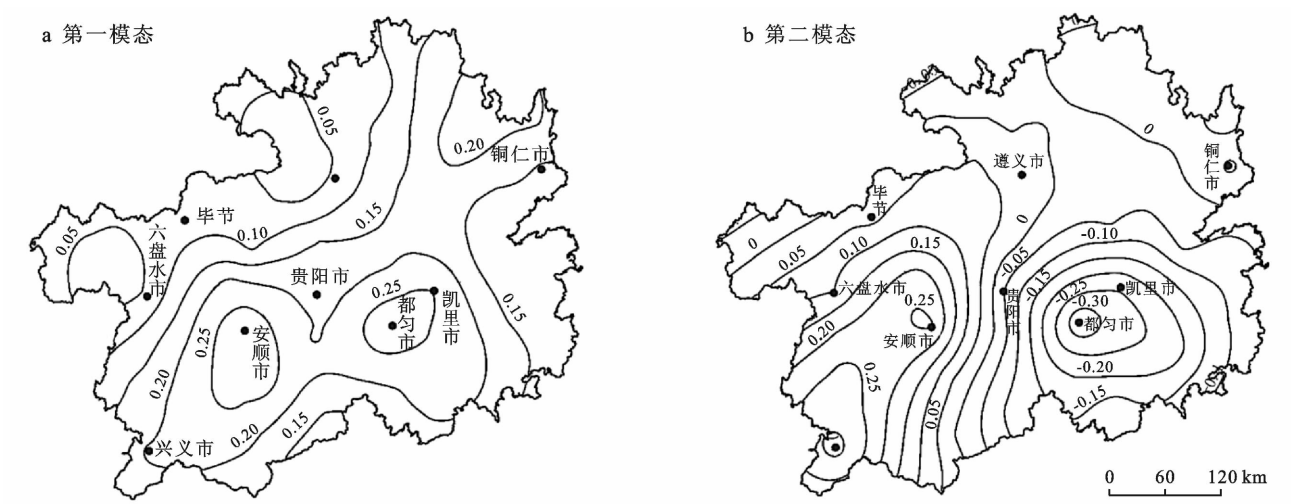



**图 3 1966－2017 年贵州省降雨侵蚀力 EOF 前 2 个特征向量分布**

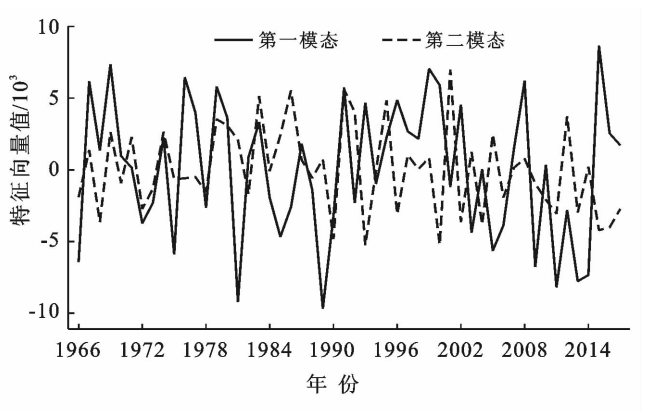



**图 4 EOF 分析中前 2 个特征向量的时间系数**

## 2.3 降雨侵蚀力 $R$ 值年内变化趋势

通过对贵州省 1966—2017 年各月降雨量比例(见图 5)进行分析确定贵州省的汛期为 5—8 月，枯水期为 8 月至翌年 5 月。通过计算贵州地区汛期和枯水期降雨侵蚀力 $R$ 值并对其空间插值后分析发现，贵州各地区的降雨侵蚀力 $R$ 值在年内的变化十分显著。从附图 3(见封 2)中可以看出贵州省的汛期降雨侵蚀力 $R$ 值分布与多年平均降雨侵蚀力 $R$ 值在空间分布上十分相似，最小值依然出现在西北部降雨侵蚀力 $R$ 值为2 145 MJ·mm/(hm²·h)，最大值也同样出现在西南部的兴义附近其值为 5 195 MJ·mm/(hm²·h)。从附图 4(见封 2)可以看出，贵州省各地区多年平均枯水期降雨侵蚀力 $R$ 值在 582～1 833 MJ·mm/(hm²·h)之间，空间特征整体呈现由西向东递增的变化趋势，最小值出现在毕节一带，最大值出现在松桃、天柱、黎平一带。

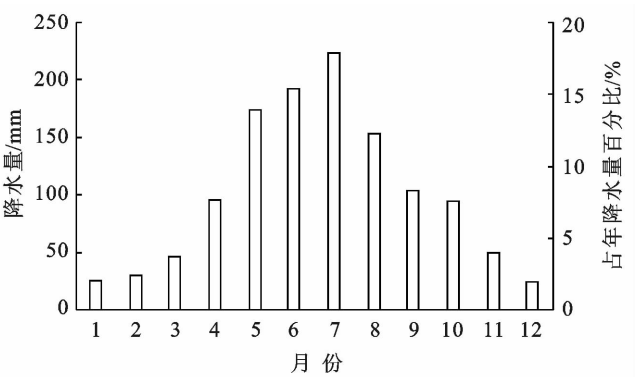



**图 5 1966－2017 年贵州省月降雨量比例**

从图 6 可以看出大雨和中雨造的降雨侵蚀力占比达到了 33.09%和 44.36%，通过对贵州地区多年平均降雨进行分析发现，贵州省的大雨和暴雨主要集中在汛期，因此可以得出汛期降雨是导致降雨侵蚀力 $R$ 值变化的主要原因。

贵州省属于亚热带季风气候，夏季高温多雨，冬季温和少雨。夏季贵州省的东部处于湿润的东南季风区内，西部则处于无明显的干湿季之分的东南季风

向干湿明显的西南季风区的过渡地带，加之地形西高东低，整体呈中部向北、东、南 3 面倾斜，易在东南季风的迎风坡形成地形雨，由此导致了夏季西南部及东部降雨侵蚀力 $R$ 值较大，西部和西北部则相对较低。而在冬半年由于受北方秦巴山系阻挡，南下冷空气多半绕道两湖盆地由偏东北方向入侵，在贵阳昆明一带形成准静止锋，西部六盘水、毕节一带经常处于锋前位置，故冬季多晴朗天气，在中部、东部正好处于锋后，因此多阴雨天气。

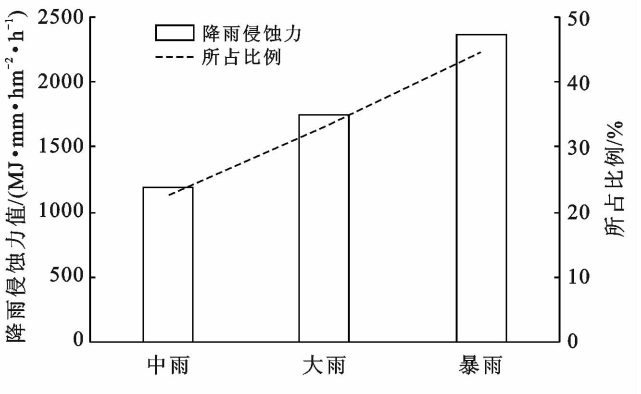



**图 6　贵州省不同量级降雨造成的降雨侵蚀力比例及特征**

尽管冬季东部降雨天数较多，但是整体的降雨强度较低，达侵蚀性降雨的标准天数较少，因此造成了降雨侵蚀力 $R$ 值冬春季节整体偏低。

### 2.4　降雨侵蚀力 $R$ 值年际变化趋势

通过 Mann-Kendall 检验法对贵州省的多年年均降雨侵蚀力 $R$ 值与汛期多年年均 $R$ 值进行突变检测，检测结果如图 7a，7b 所示，分析发现贵州省降雨侵蚀力 $R$ 值在 0.05 置信度线区间内 UF 与 UB 两条统计量曲线存在多个交点，分别是 1971，1974，1975，1978，1981，1991，1992，2003，2014，2016 年，这说明贵州省的降雨侵蚀力多突变，震荡频繁，尤其是在 1971 年到 1981 年之间突变频率最为频繁。

从 UF 统计量曲线来看，除了少数年份外贵州省的降雨侵蚀力年际 $R$ 值多处于负值，但均没有通过 0.05 显著性水平线，这也进一步证明了其降雨侵蚀力变化趋势总体呈现下降趋势，但趋势不明显。从汛期年际降雨侵蚀力 $R$ 值与年际降雨侵蚀力 $R$ 值图的对比中可以发现两者的变化趋势基本保持一致，这体现了多年年均降雨侵蚀力 $R$ 值主要受汛期降雨侵蚀力 $R$ 值的影响。

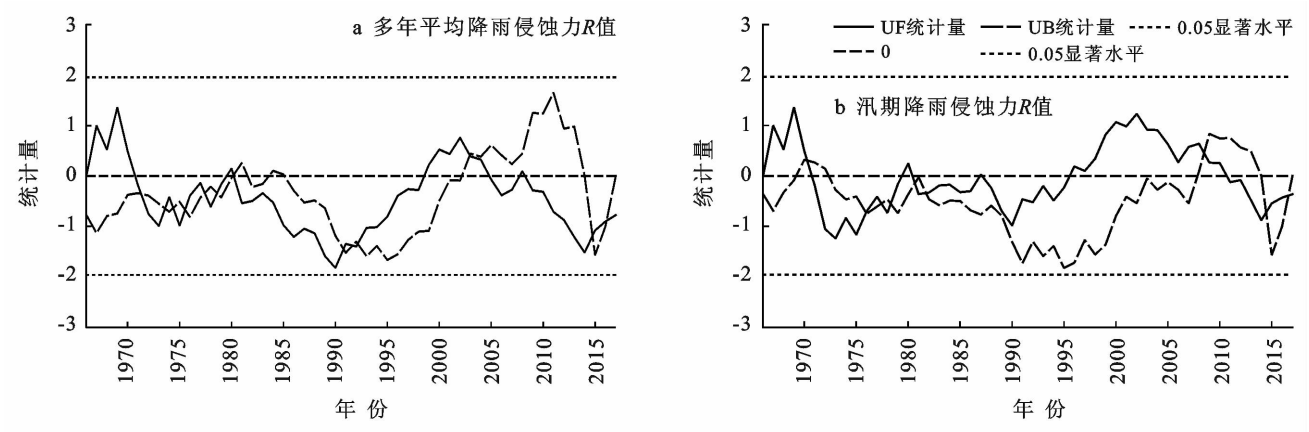



**图 7　1966－2017 年贵州省多年平均、汛期降雨侵蚀力 $R$ 值 M-K 统计特征**

从图 8 贵州省年降水量小波实部时频分布特征可以清晰的看出贵州省降雨侵蚀力 $R$ 值的变化过程中存在多时间尺度特点，在降雨侵蚀力的演变过程中存在 3～8，8～21，21～32 a 共 3 类时间尺度的周期变化规律。其中在 3～8 a 时间尺度上出现了升—降交替的准11.5 次震荡；在 8～21 a 时间尺度经历了升—降交替的准 6 次震荡；在 22～32 a 时间尺度上存在准 2.5 次震荡。经图 9 小波方差分析可以看出存在 3 个较为明显的波峰，依次对应的是 6，12，28 a 的时间尺度，其中 28 a 的峰值最大为其震荡主周期，其次是 12 a 和 6 a 的时间尺度 ，从主周期来看，贵州省的降雨侵蚀力 $R$ 值正处于升高的范围内，并未达到峰值阶段，因此，未来几年内贵州省的降雨侵蚀力 $R$ 值仍有升高趋势。

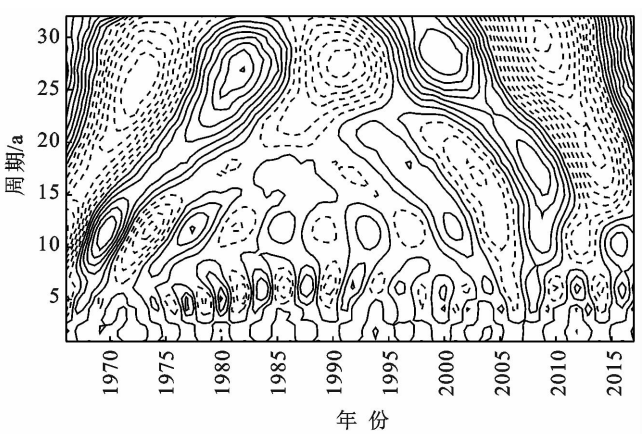



**图 8　贵州省年降水量小波实部时频分布特征**

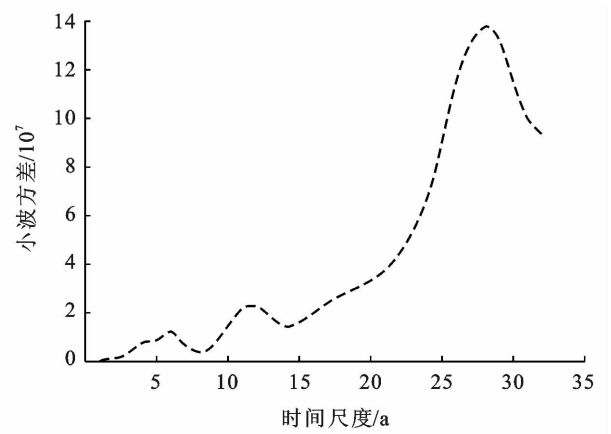



**图9 贵州省年降水量小波方差特征**

## 3 结论

本文基于贵州省内33个气象站监测站48 a的逐日降雨数据,运用降雨侵蚀力$R$值的相关计算方法,计算贵州省的多年平均降雨侵蚀力$R$值并对其时空特征进行研究分析,主要结论有:

(1) 贵州省的多年平均降雨侵蚀力$R$值在2 767.46～6 921.73 MJ·mm/(hm$^2$·h)之间,地域分布较为明显,$R$值总体上呈由北向南递增的趋势,最低值出现在威宁以及毕节一带,导致其分布的主要原因是地势所造成的。

(2) EOF分析表明,贵州省多年年均降雨侵蚀力空间是主要分为两种类型,全局型以及东西相反型,这两种空间分布类型的累计方差贡献率达到了52%,基本上可以反映贵州省降雨侵蚀力的空间分布特征。贵州省降雨侵蚀力EOF时间系数分析表明,贵州省降雨侵蚀力偏大年份数量与降雨侵蚀力偏小年份量相当,分别是19 a和18 a。

(3) 通过分析得出贵州省的降雨侵蚀力$R$值主要受汛期降雨$R$值影响,侵蚀性降雨主要集中在汛期(5—9月),全省各地汛期多年平均降雨$R$值均占多年平均降雨侵蚀力$R$值的60%以上,最大占比达到了80%左右。

(4) 运用Mann-Kendall检验法对贵州省的年降雨侵蚀力$R$值和汛期多年平均$R$值进行突变检测,发现年际降雨侵蚀力$R$值存在贵州省的降雨侵蚀力多突变,震荡频繁现象,变化趋势总体呈现下降趋势,但下降趋势不明显。

(5) 贵州省降雨侵蚀力$R$值变化的主周期为28 a左右,目前降雨侵蚀力$R$值正处于逐渐升高的范围内,并未达到峰值阶段,因此,未来几年内贵州省的降雨侵蚀力$R$值仍有升高趋势。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 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(Ⅰ)[J].水土保持学报,1995,1(4):7-18.

[2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning [M]. USDA: Washington, Agricultuer Handbook 537,1987.

[3] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1958,39(2):285.

[4] 小高和则,远藤治郎,洪双旌.关于林地内外雨滴侵蚀的研究[J].中国水土保持,1986(4):58-61.

[5] 王万中.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.

[6] 贾志军,王小平,李俊义.晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标$R$值的确定[J].中国水土保持,1987(6):18-20.

[7] 贾志伟,江忠善,刘志.降雨特征与水土流失关系的研究[J].水土保持研究,1990(2):9-15.

[8] 周伏建,黄炎和.福建省天然降雨雨滴特征的研究[J].水土保持学报,1995,9(1):8-12.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 伍育鹏,谢云,章文波.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.

[13] 彭琴,林昌虎,何腾兵.贵州喀斯特山区水土流失特征与水土保持研究进展[J].贵州科学,2006,24(3):66-70.

[14] 周忠发,安裕伦.贵州省水土流失遥感现状调查及空间变化分析[J].水土保持通报,2000,20(6):23-25.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 胡昌华.基于MATLAB的系统分析与设计:小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999:210-217.

[18] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

[19] 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].水土保持学报,1996,2(1):29-39.

[20] 宁丽丹,石辉.利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力[J].水土保持研究,2003,10(4):183-186.

[21] 戴海伦,苑爽,张科利,等.贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J].水土保持研究,2013, 20(1):37-41.

[22] 韩会庆,张娇艳,苏志华,等.2011-2050年贵州省极端气候指数时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(2):341-346.