

# 1998—2017 年滇黔桂岩溶区降水时空动态特征

靖娟利<sup>1,2</sup>, 罗福林<sup>1</sup>, 王永锋<sup>1,2</sup>, 王安娜<sup>1</sup>

(1.桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004; 2.广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**为了研究滇黔桂岩溶区近 20 a 降水时空变化特征,基于 1998—2017 年 TRMM 3B43 降水数据和 72 个气象站点实测数据,运用相关系数、相对偏差对 TRMM 3B43 降水数据在月尺度上进行了验证,并借助 Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 Hurst 指数等数理统计方法对研究区降水时空动态特征进行了定量分析。结果表明:(1) TRMM 3B43 降水数据与气象站点实测数据具有较高的相关性,月尺度相关系数为 0.92 ( $p < 0.01$ );(2) 1998—2017 年研究区降水量呈不显著波动上升趋势,上升速率为 0.716 mm/a ( $p > 0.05$ );春、夏两季降水量以减少趋势为主,秋、冬两季降水量以增加趋势占主导;(3) 降水量年、季节均值空间分布差异显著,年降水量呈增加趋势的区域(47.71%)略高于呈减少趋势的区域(41.71%);春、夏两季降水量以减少趋势为主,秋、冬两季以增加趋势为主;(4) 年降水量持续增加的区域占 38.45%,集中分布在广西、贵州东南部、云南与贵州北部接壤地带;持续减少的区域占 46.21%,主要分布在云南和贵州大部分地区。研究结果对研究区水资源管理、灾害监测具有重要意义。

**关键词:** TRMM; 滇黔桂岩溶区; 趋势分析; Mann-Kendall 检验; Hurst 指数

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0158-08

## Spatial and Temporal Dynamics of Precipitation in Dian-Qian-Gui Karst Area from 1998 to 2017

JING Juanli<sup>1,2</sup>, LUO Fulin<sup>1</sup>, WANG Yongfeng<sup>1,2</sup>, WANG Anna<sup>1</sup>

(1.College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** In order to study the spatial and temporal variation of precipitation in Dian-Qian-Gui Karst Area of China, TRMM 3B43 precipitation data from 1998 to 2017 and 72 rain gauge station data from 1998 to 2012 were used to verify the TRMM 3B43 data on monthly scale by correlation coefficient and relative deviation. The spatial and temporal dynamics of precipitation were quantitatively analyzed by using Sen-Median method, Mann-Kendall test and Hurst index. The results showed that: (1) there was a high correlation ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.01$ ) between TRMM 3B43 precipitation data and gauge data on monthly scale; (2) the precipitation in the study area showed an insignificant fluctuation and an increasing trend from 1998 to 2017, with an increasing rate of 0.716 mm/year ( $p > 0.05$ ); the changing trend of precipitation in spring and summer mainly decreased, while that in autumn and winter mainly increased; (3) the spatial distribution of mean precipitation was significantly different on annual and seasonal scale; and the annual precipitation with a trend of increasing accounted for 47.71%, which was slightly higher than decreasing areas accounting for 41.71%; in spring and summer, the precipitation had a dominant trend of decreasing, while in autumn and winter, it was mainly increasing; (4) areas with annual precipitation continuous increasing accounted for 38.45%, mainly distributed in Guangxi, southeastern Guizhou, and the border of Yunnan and northern Guizhou. However, areas with annual precipitation decreasing occupied 46.21%, mainly distributed in Yunnan and Guizhou. The research results are of great significance to the management of water resources and disaster monitoring in the study area.

收稿日期:2018-12-03

修回日期:2018-12-18

资助项目:国家自然科学基金(41461085);广西中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB192);广西空间信息与测绘重点实验室项目(15-140-07-10)

第一作者:靖娟利(1977—),女,陕西长安人,副教授,硕士,主要研究方向为遥感与 GIS 应用。E-mail:jjlgut2008@163.com

**Keywords:** TRMM; Dian-Qian-Gui Karst Area; trend analysis; Mann-Kendall test; Hurst index

降水是全球水循环的重要环节,也是大气中最活跃的要素之一,在时空上具有显著的差异性。降水是诱发各种地质灾害的重要影响因素,对水资源利用、社会经济可持续发展都具有重要影响<sup>[1]</sup>。传统降水变化研究主要基于地面气象站点实测降水数据,气象站点观测值具有较高精度,但存在站点稀少,空间插值结果误差大,难以反映降水空间变化细节信息等问题。随着遥感技术的发展,基于卫星的降水反演产品,包括 TRMM、GPM 等,具有受地形、气候等环境因素的影响小、覆盖范围广、时效性强等特点,已成为监测降水变化的重要数据来源。其中,由美国和日本联合研制,于 1997 年发射的热带降水测量(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星数据能够提供长时间序列且覆盖南北纬 50 度范围的降水速率数据,广泛应用于与降水相关的研究中。

目前,国内外学者对 TRMM 卫星降水产品在不同地区的精度验证和降水分析等方面已有大量研究。例如 Almazroui<sup>[2]</sup>利用实测站点数据验证了 TRMM 3B42 数据在沙特阿拉伯的精度,结果表明月尺度相关系数达到 0.9,并在此基础上分析了沙特阿拉伯地区 1998—2009 年降水时空特征。Islam 等<sup>[3]</sup>基于 1998—2002 年孟加拉国 31 个雨量站点监测资料验证了 TRMM 3B42 降水精度,结果表明该数据对暴雨监测值偏小。Huffman 等<sup>[4]</sup>对澳大利亚 TRMM 3B42 RT 降水数据与气象观测及雷达观测资料在日尺度和月尺度的一致性进行检验,发现 TRMM 数据与观测数据之间具有较高的线性相关关系。李景刚等<sup>[5]</sup>对洞庭湖流域 TRMM 3B43 数据进行验证,发现月尺度 TRMM 3B43 数据与实测数据相关系数达到 0.9。曾红伟等<sup>[6]</sup>对澜沧江流域及其周边 TRMM 3B43 数据进行精度检验,发现 TRMM 3B43 数据与观测数据相关系数达到 0.83。常远勇等<sup>[7]</sup>基于 1998—2010 年 TRMM 3B43 数据,运用 Mann-Kendall 非参数检验、Hurst 指数在像元尺度分析了全球中低纬度降水时空特征。朱国锋等<sup>[8]</sup>利用相关系数法和散点斜率法对横断山区 1998—2011 年之间月尺度的 TRMM 3B43 降水数据精度进行了检验,研究表明 TRMM 3B43 降水数据与实测数据相关性很强。齐文文等<sup>[9]</sup>根据青藏高原 114 个气象站点实测数据对 TRMM 3B43 数据进行了修正,并分析了 1998—2011 年多年平均降水的空间格局与季节分布特征。嵇涛等<sup>[10]</sup>利用 72 个气象站点的实测降水数据对川渝地区 TRMM 卫星降水数据年、季和月尺度

上的精度进行验证,结果显示月尺度 TRMM 数据精度最高。李威等<sup>[11]</sup>基于 1998—2012 年 26 个气象站点实测降水资料,分析了同期 TRMM 3B43 数据在喀斯特山区不同时间尺度的适用性和分布规律,结果表明月尺度 TRMM 3B43 数据与站点实测值相关系数最高。周李磊等<sup>[12]</sup>基于 1998—2014 年 21 个实测站点数据,对同期 TRMM 3B43 数据进行精度评价,发现两者具有较高的相关性,并采用非参数 Mann-Kendall 趋势检验、Sen-Median 趋势分析、变异系数和 Hurst 指数对西南地区年降水进行了分析研究。秦福莹等<sup>[13]</sup>采用蒙古高原 134 个气象站点资料对 TRMM 3B43 数据进行精度评估,发现两者相关系数达到 0.93,并分析了蒙古高原近 19 a 降水空间和季节分布特征。一系列研究结果表明,TRMM 3B43 降水数据与观测数据之间具有较高的线性相关特征,可以满足月尺度及以上区域降水时空变化研究。

滇黔桂岩溶区属于我国西南岩溶区的核心地带,生态环境脆弱,石漠化问题突出,对气候变化的响应非常敏感。现有研究成果中,基于 TRMM 3B43 数据研究滇黔桂岩溶区降水变化规律的研究不多。因此,本文采用研究区实测数据对 TRMM 3B43 进行精度评价,并基于 Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 Hurst 指数等数理统计方法对研究区近 20 a 降水的时空动态特征进行定量分析,以期对研究区水资源管理、水文预报、灾害预测等方面提供参考依据。

## 1 研究区概况

滇黔桂岩溶区集中分布在我国云南、贵州、广西 3 省(区)(图 1),分布面积达  $3.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占全国岩溶分布面积的 23.4%,占三省(区)总面积的 39.7%<sup>[14]</sup>。地势西高东低,岩溶地貌类型复杂多样,主要分布峰丛洼地、峰林平原、丛丘洼地、高中山峡谷、峰丛峡谷等。属于热带、亚热带季风气候区,降水量季节和区域差异明显。多年平均气温和降水量大致都是由东南向西北递减。研究区内碳酸盐岩大面积出露,土壤瘠薄,水土流失严重。区域内水资源丰富,河流纵横,峡谷广布,地表地下具有双层水文地质结构。生态环境脆弱,人口—资源—环境矛盾突出,属于全球变化的敏感地带。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及预处理

热带降水测量(Tropical Rainfall Measuring

Mission, TRMM) 卫星数据, 于 1997 年 11 月 27 日发射成功, 由美国 NASA (National Aeronautical and Space Administration) 和日本 NASDA (National Space Development Agency) 共同研制, 专门用于定量测量热带、亚热带降雨的气象卫星。TRMM 3B43 数据为 TRMM 卫星第 7 版 3 级产品 TRMM 3B43 V7 月降水资料, 数据覆盖范围为南北纬  $50^{\circ}$  之间, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本文使用的降水数据由 NASA 网站 (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>) 免费获取, 时间范围为 1998—2017 年逐月 TRMM 3B43 数据。基于 ArcGIS 软件, 从 HDF 文件中提取 TRMM 3B43 降水速率 (mm/h), 然后分别乘以各月时间, 生成月降水量栅格数据。经过矢量裁剪得到滇黔桂岩溶区 1998—2017 年逐月降水量栅格数据。

为了验证 TRMM 3B43 数据在研究区的适用性, 从中国气象科学数据共享服务中心 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 获取滇黔桂岩溶区内 72 个气象站点 1998—2012 年的月降水观测资料, 其中广西、贵州和云南 3 省 (区) 的气象站点数分别为 23 个、20 个和 29 个 (图 1)。

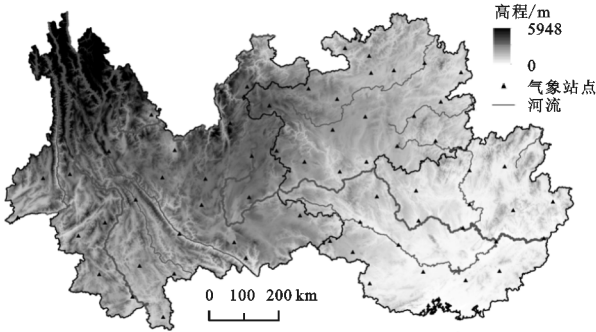


图 1 研究区地理位置和气象站点分布

## 2.2 研究方法

**2.2.1 精度评估方法** 使用相关系数 ( $r$ ) 和相对偏差 (BIAS) 2 个指标对 TRMM 3B43 降水数据的精度进行验证。其中,  $r$  反映 TRMM 3B43 降水数据与站点实测数据之间的相关程度, 取值越接近 1, 数据一致性越好; BIAS 反映 TRMM 3B43 降水数据与站点实测数据之间的偏离程度, 取值越接近 0, 数据越精确。指标计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

式中:  $x_i, y_i$  分别为气象站点实测数据和 TRMM 3B43 降水数据;  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $n$  为数据记录总个数。

### 2.2.2 Sen-Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法相结合, 已成为长时间序列数据趋势分析的重要方法<sup>[15-16]</sup>。两种方法用于 TRMM 3B43 降水时间序列分析中, 可以解释降水量长期变化趋势的显著性。

Sen-Median 趋势度 ( $\beta$ ) 计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (j > i) \quad (3)$$

式中:  $1 < i < j < n$ ;  $x_i, y_i$  为 TRMM 3B43 降水时间序列;  $i, j$  为年份。

当  $\beta > 0$  时, 表示时间序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势, 变化趋势的显著性用 Mann-Kendall 方法进行检验。

Mann-Kendall 检验 (MK 检验) 是一种非参数检验方法, 变量可以不具有正态分布特征。MK 法是气象学和水文学中比较常用的时间序列趋势检验方法之一。计算公式如下:

假定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为时间序列变量,  $n$  为时间序列长度, 则检验统计量  $Z$  定义为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

式中:  $Z$  为正态分布统计量;  $\text{var}(S)$  为方差。在给定  $\alpha$  置信水平上, 如果  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ , 表示研究序列在  $\alpha$  水平上存在显著变化。本文判断  $\alpha = 0.05$  置信水平上 TRMM 3B43 降水时间序列变化趋势的显著性。

**2.2.3 Hurst 指数** Hurst 指数是定量描述时间序列信息长程依赖性的有效方法。Hurst 指数的估算方法有多种, 其中重标极差 (Rescaled Range Analysis Method, R/S) 分析法和小波分析法的估算结果比其他方法更为可靠<sup>[17]</sup>。R/S 分析方法最早由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水文问题时提出, 后 Mandelbrot 在理论上对该方法进行了补充和完善。本文采用重标极差 (R/S) 分析方法计算 Hurst 指数, 计算原理参考文献<sup>[18-19]</sup>。

Hurst 指数取值范围为  $0 < H < 1$ , 当  $H = 0.5$  时, 表明序列是随机序列, 不具有持续性, 对过去的趋



势没有依赖性;当  $H > 0.5$  时,意味着未来的变化情况与过去一致,即持续性, $H$  越大持续性越强;当  $0 < H < 0.5$  时,意味着未来的变化情况与过去相反,即反持续性, $H$  越小,反持续性越强。

### 3 结果与分析

#### 3.1 数据准确度检验

运用 1998—2012 年研究区 72 个气象站点的实测月降水数据对相同时段的 TRMM 3B43 降水数据进行精度评估。结果如图 2 所示,在月尺度上 TRMM 3B43 降水数据与气象站点实测数据之间呈显著正相关( $r=0.92, p<0.01$ ),说明 TRMM 3B43 降水数据与气象站点实测数据之间具有很好的一致性。相对偏差(BIAS)计算结果为负的 0.058,表明 TRMM 3B43 降水量略高于实测降水量。

由图 3A 可以看出,站点相关系数  $r$  值介于 0.35~0.99,均值为 0.91。贵州咸宁站的  $r$  值最小,为 0.35,广西桂林站的  $r$  值最大,为 0.98。 $r$  值大于 0.9 的站点有 57 个,占 79%。表明在研究区内 TRMM 3B43 降水数据与实测站点数据具有较好的相关性。相关系数空间分布具有区域差异性,广西区、贵州省的  $r$  值

较高,95%以上站点  $r$  值大于 0.9;云南省相关系数相对较低,其中 57%的站点  $r$  值大于 0.9,90%的站点  $r$  值大于 0.8。

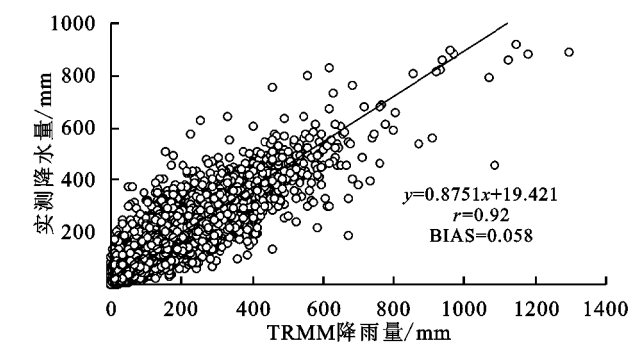


图 2 TRMM 3B43 月降水量与实测月降水量散点图

由图 3B 可知,BIAS 绝对值介于 0~10 mm 的站点有 48 个,占 67%;BIAS 绝对值介于 10~20 mm 的站点有 14 个,主要分布在云南省、广西区及广西与贵州省接壤地带。BIAS 绝对值大于 20 mm 的站点共有 10 个,主要分布在云南省、广西区西南部。

总体而言,TRMM 3B43 降水数据在滇黔桂岩溶区具有良好的适用性,能够满足月尺度及以上的区域降水变化特征研究。

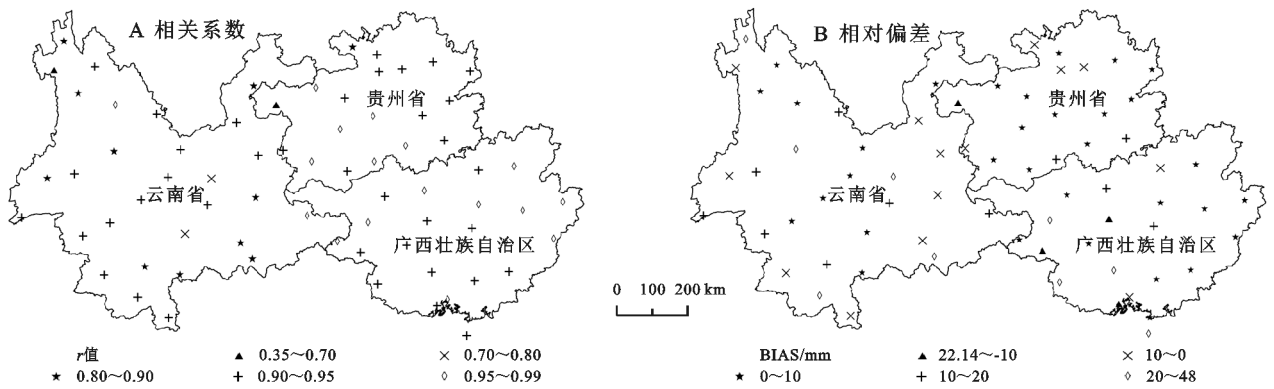


图 3 TRMM 3B43 月降水量与实测月降水量相关系数及相对偏差空间分布

#### 3.2 降水量时间变化特征

从图 4 可知,1998—2017 年滇黔桂岩溶区年均降水量呈不显著波动上升趋势,上升速率为 0.716 mm/a ( $p>0.05$ )。近 20 a 降水量年际波动明显,多年平均降水量在 592.16~2 302.66 mm 波动,波峰出现在 1999 年、2002 年、2008 年、2015 年,降水量均大于 1 400 mm,波谷出现在 2003 年、2009 年、2011 年。降水量年际变化表现出明显的阶段性特征,1998—2011 年整体呈下降趋势,2011 年后呈持续增加趋势。

研究区处于热带、亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季干燥少雨,降雨季节分配不均。将四季时间划分为,春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—次年 2 月),然后对季节降水量进行分析。从图 4 可知,四季降水量均值最大值出现在夏季,最小值出现在冬季。夏季降水量均值曲线变化

趋势与年际变化基本一致;春、秋、冬三季降水量均值变化趋势不明显,波动不大。夏季多年降水量均值为 662.61 mm,占年降水量的 51.23%,而冬季多年降水量均值为 84.31 mm,仅占 6.51%。四季降水量年际波动最大的季节为冬季,春季波动最小。春、夏两季降水量呈不显著减少趋势( $p>0.05$ ),下降速率分别为 2.41 mm/a、2.85 mm/a;秋、冬两季降水量呈增加趋势,但增加趋势不显著。

#### 3.3 降水量空间分布格局

从图 5A 可知,研究区多年平均降水量空间分布差异显著。受地形和大气环流的影响,年均降水量空间分布总体呈现随着距离水汽源地越远及地形的抬升而减少的总体趋势。降水量低值区集中分布在哀牢山以东的云南高原和贵州高原西北部的毕节市、云南北部的横断山地区,这些地区大部分位于岩溶峡

谷、岩溶高原断陷盆地地区。降水量高值区主要分布在广西东部、东南部丘陵和平原地区及东北部岩溶地区,云南南部及西部地区。

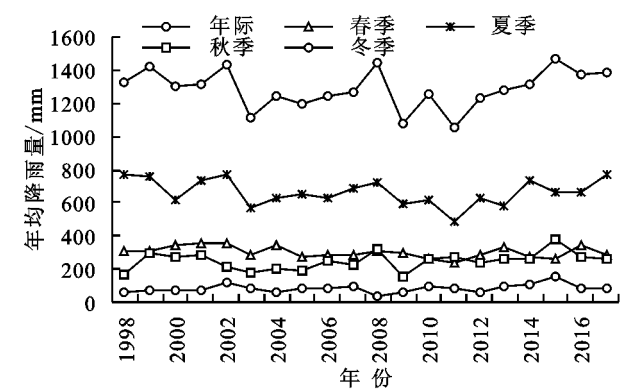


图 4 降水量年际及季节变化趋势

从图 5B—E 可以看出,研究区降水量季节分配不均,夏季是降水量最多的季节,降水量在 400~1 200 mm。夏季研究区主要受东南季风和西南季风的影响。东南季风携带来自太平洋的暖湿气流在推进过程中受广西东部及东北部山脉阻挡,以及西部云贵高原南缘地形的抬升影响,在广西东部及中部平原区以及云南东南部形成降水高值区,降水量均值达到 1 600 mm 以上。随着地形继续抬升,在云贵高原南缘降水量均值继续减少到 1 000~1 200 mm,降水量低值区主要出现在贵州高原,降水量均值在 800~1 000 mm。西南季风携带来自印度洋的暖湿气流在推进过程中受到山脉的阻挡,使得降水高值区主要分布在横断山脉以西地区,随着地形进一步抬升,在云南北部横断山地区以及贵州高原形成降水量低值区。冬季是全年降水量最少的季节,降水量<400 mm,其中云南北部横断山岩溶峡谷区、东部岩溶峰丛峡谷区、云南西部潞西市和保山市以及北部楚雄市降水量<50 mm。这是由于冬季在西北季风的影响下,空气寒冷干燥,云贵高原西北部地区降雨量稀少,达到全年降水量最小值;而在云贵高原的东南部地区,受西北季风的影响减弱,降水量为 100~200 mm。

### 3.4 降水量空间变化趋势及其显著性检验

将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结果进行叠加,可以从像元尺度反映研究区近 20 a 降水量变化趋势的空间分布格局。具体研究过程中,将  $\beta < 0$  划分为降水量减少区域,用代码 1 表示; $\beta > 0$  划分为降水量增加区域,用代码 2 表示;将  $\alpha = 0.05$  置信水平上 Mann-Kendall 检验结果划分为显著变化( $Z < -1.96$  或  $Z \geq 1.96$ )分别用代码 1,3 表示,不显著变化( $-1.96 \leq Z < 1.96$ )用代码 2 表示; $\beta$  和  $Z$  可以组合为 4 种类型(表 1)。

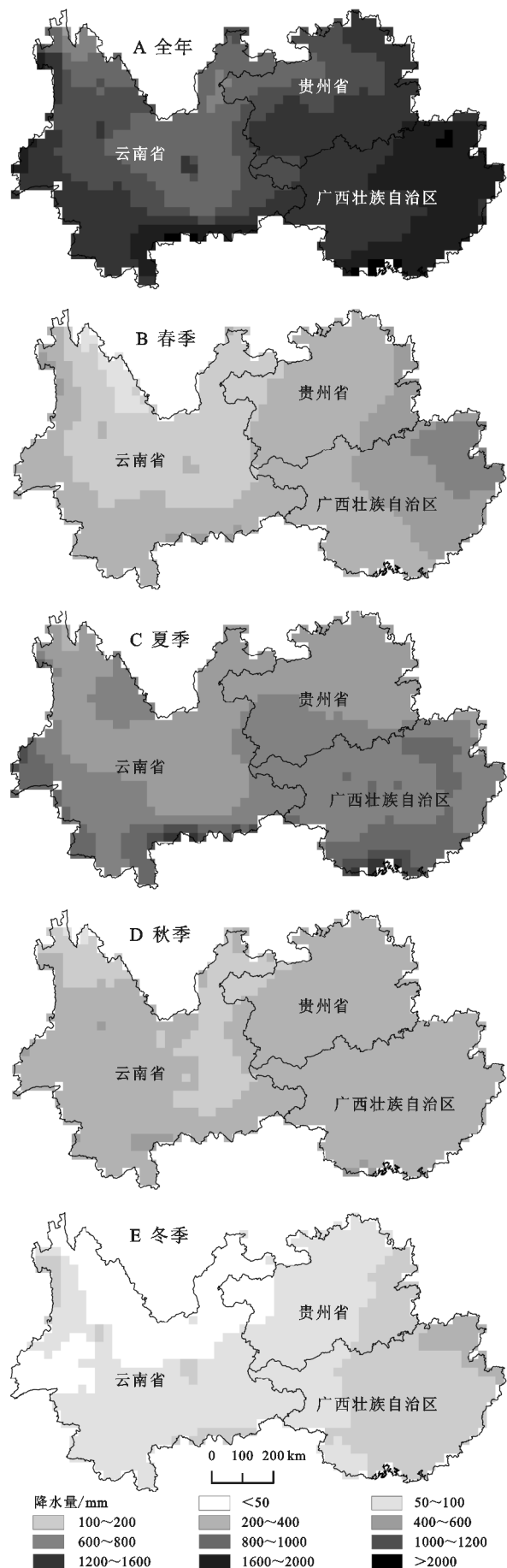


图 5 多年及季节降水量均值空间分布

从表 1 可知,降水量年际变化呈增加趋势的面积(46.29%)略小于呈减少趋势的面积(53.71%)。从图 6A 空间分布来看,降水量年际变化呈增加趋势的地区主要分布在广西的岩溶峰林平原、峰丛洼地区和非岩溶区,贵州高原东南部凯里市非岩溶区和西北部的毕节市岩溶山原峰丛洼地区、云南北部的昭通市和南部思茅市岩溶峡谷区及非岩溶区;其中,显著增加的区域占 5.73%,集中分布在广西东南部梧州、玉林、钦州、贵港、马山等丘陵地区。降水量年际变化呈减少趋势的区域主要分布在贵州高原东北部铜仁市—云南南部个旧市连线以北的岩溶区和非岩溶区;显著减少的区域集中分布在云南北部横断山岩溶峡谷区及非岩溶区。

从四季降水量变化趋势表 1 和图 6B—E 可知,春季降水量呈减少趋势的面积占 78.92%,广泛分布在广西盆地和西部山地岩溶区、贵州南部和北部岩溶区以及云南绝大部分地区;显著减少的区域占 20.28%,集中

分布在哀牢山以西的景洪市、思茅市,横断山地区的怒江傈僳族自治州等地区、云龙市、楚雄市,广西百色、南宁市、凭祥市等地区也有零星分布。夏季降水量仍以减少趋势为主,占 79.01%,空间分布与春季基本一致;显著减少的区域所占比例下降到 4.41%,集中分布在云南北部横断山地区的丽江纳西族自治县和云龙县的岩溶峡谷区。秋季,降水量变化趋势转变为以增加为主,占 80.84%,广泛分布在广西、贵州、云南高原及其西南部地区;显著增加的区域占 15.53%,集中分布在广西东南部梧州市、玉林市、贵港市、钦州市,广西北部河池市岩溶区和贵州西南部岩溶区也有分布。冬季降水量仍以增加趋势为主,占 78.84%,广泛分布在广西、贵州高原南部、云南高原以南和以西地区。降水量呈减少趋势的面积占 21.16%,集中分布在贵州铜仁市—云南曲靖市连线以北云南高原岩溶区,云南北部横断山岩溶峡谷区。

表 1 降水量变化趋势统计

类别	$\beta$	$Z$	变化趋势	百分比/%				
				全年	春季	夏季	秋季	冬季
11	$<0$	$<-1.96$	显著减少	8.82	20.28	4.41	3.44	0.00
12	$<0$	$-1.96\sim1.96$	不显著减少	44.89	58.64	74.60	15.71	21.16
22	$>0$	$-1.96\sim1.96$	不显著增加	40.56	20.81	20.99	65.31	77.78
23	$>0$	$\geq1.96$	显著增加	5.73	0.26	0.00	15.53	1.06

3.5 降水量空间演化态势

根据研究区近 20 a 的 TRMM 3B43 降雨数据,参考文献<sup>[18-19]</sup>中的 R/S 理论方法,逐像元计算 Hurst 指数。从图 7 可以看出,研究区 Hurst 指数值域范围为 0.269~0.966,均值为 0.703。降水量呈反持续性变化( $H<0.5$ )、弱持续性变化( $0.5<H<0.75$ )和强持续性变化( $H>0.75$ )的区域分别占 4.94%,58.99%和 36.07%。从降水量 Hurst 指数空间分布情况看,强持续性区域集中分布在贵州高原东北部岩溶区、广西东北部、云南高原中部岩溶断陷盆地区和横断山岩溶峡谷区及楚雄市、云龙市等非岩溶区;反持续性区域仅在云南西部的潞西市和临沧县、广西百色市、凭祥市和南宁市地区散布。

为了进一步研究滇黔桂岩溶区降水量变化趋势及其可持续性,将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-

Kendall 检验结果与 Hurst 指数分类结果进行空间叠加分析,得到表 3 中共计 11 种耦合结果。从表 2 和图 8 可知,降水量持续减少的区域(类别 112,113,122,123)占 46.21%,高于持续增加的区域(类别 222,223,232,233)38.45%。

从图 8 降水量空间演化态势来看,显著减少—强持续区域(类别 113)占 8.11%,主要分布在云南北部横断山脉地区的岩溶峡谷区及非岩溶区,在贵州高原北部岩溶区也有零星分布;显著增加—强持续区域(类别 233)仅占 0.26%,集中分布云南高原中部地区;未来趋势无法确定的区域(类别 121,221)占 4.94%,主要散布在广西西部百色市、凭祥市、南宁市,东部贺州市,以及云南西部边界潞西市和临沧县。以上 3 类地区是重点监测区域,以防止旱灾及洪涝灾害发生。

表 2 降水量变化趋势及 Hurst 指数统计

类别	$\beta$	$Z$	$H$	类型	面积百分比/%
112	$<0$	$<-1.96$	$0.5<H\leq0.75$	显著减少—弱持续	0.71
113	$<0$	$<-1.96$	$H>0.75$	显著减少—强持续	8.11
122	$<0$	$-1.96\sim1.96$	$0.5<H\leq0.75$	不显著减少—弱持续	23.81
123	$<0$	$-1.96\sim1.96$	$H>0.75$	不显著减少—强持续	19.40
222	$>0$	$-1.96\sim1.96$	$0.5<H\leq0.75$	不显著增加—弱持续	29.01
223	$>0$	$-1.96\sim1.96$	$H>0.75$	不显著增加—强持续	8.29
232	$>0$	$\geq1.96$	$0.5<H\leq0.75$	显著增加—弱持续	5.47
233	$>0$	$\geq1.96$	$H>0.75$	显著增加—强持续	0.26
121,221			$H\leq0.5$	未来变化无法确定	4.94

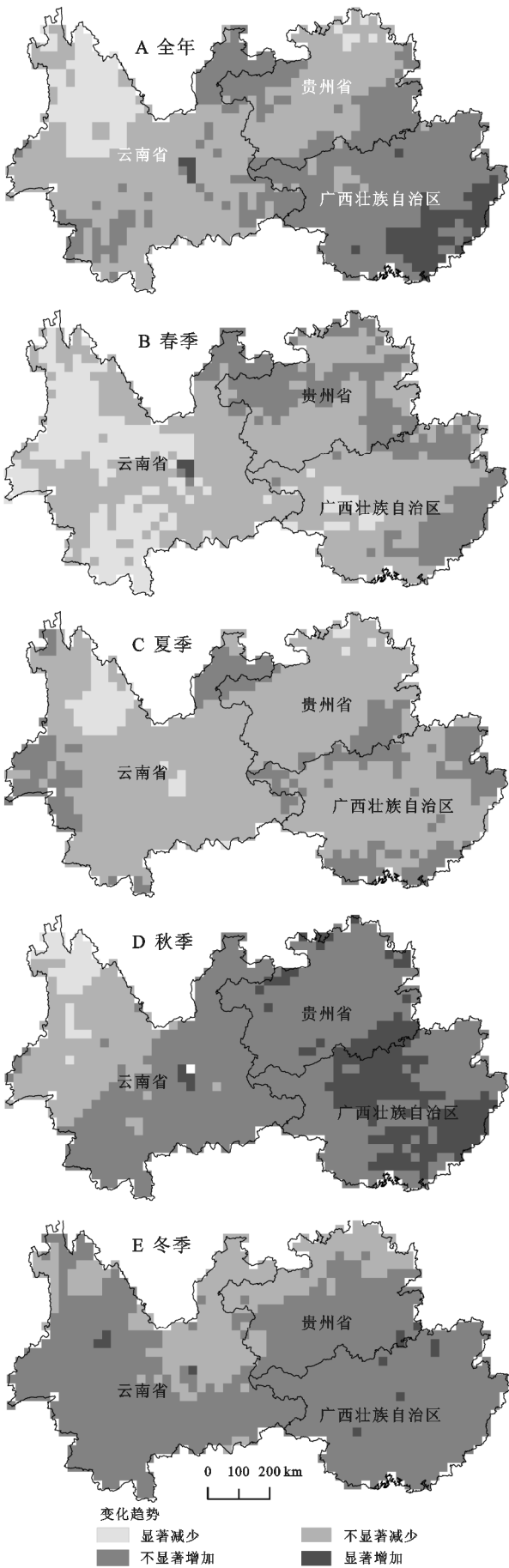


图 6 降水量年际及季节变化趋势统计

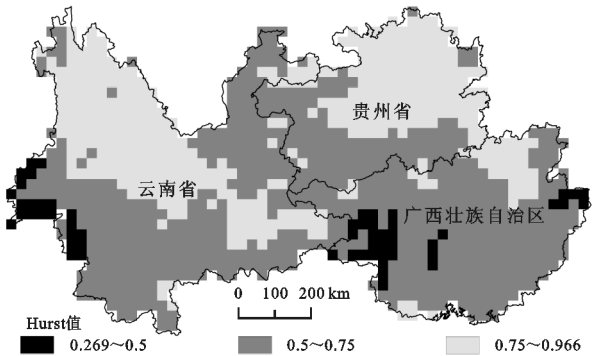


图 7 Hurst 指数空间分布

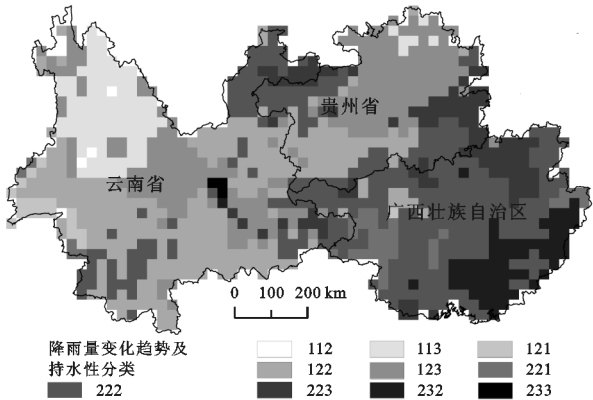


图 8 降水量空间演化态势

4 结论与讨论

(1) 在月尺度上,TRMM 3B43 降水数据与气象站点实测降水数据之间具有良好的一致性。

(2) 1998—2017 年滇黔桂地区年均降水量呈不显著波动上升趋势,上升速率为 0.716 mm/a( $p>0.05$ )。夏季降水量占年降水总量的 51.23%,其均值曲线变化趋势与年际变化基本一致。春、夏两季降水量呈不显著减少趋势( $p>0.05$ ),而秋、冬两季降水量呈不显著增加趋势。

(3) 从降水量空间分布来看,多年平均降水量空间分布差异显著,降水量季节分配不均。降水量年际变化呈增加趋势的面积略小于呈减少趋势的面积(53.71%)。从四季降水量变化趋势来看,春、夏两季降水量变化趋势以减少为主,而秋、冬两季降水量变化趋势以增加为主。

(4) 从降水量空间演化态势来看,降水量呈持续变化( $H>0.5$ )的区域占 95.06%。Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结果与 Hurst 指数耦合结果显示,降水量显著减少—强持续区域占 8.11%,主要分布在云南北部横断山脉地区,在贵州高原北部也有零星分布;而显著增加—强持续的区域仅占 0.26%。

本文从像元尺度初步揭示了研究区近 20 a 降水时空动态特征,分析结果与周李磊等<sup>[12]</sup>的研究结论



基本一致。TRMM 3B43 降水产品精度能满足月尺度及以上区域降水变化研究,与基于站点插值的降水空间特征相比<sup>[20-21]</sup>,TRMM 3B43 降水数据表示的年降水和季节降水空间分布与站点插值结果基本一致,而且能更好地表达降水空间分布的细节信息。另外,在站点尺度上,TRMM 3B43 降水数据存在高估或低估等问题,部分站点的偏差较大。因此,后续在研究过程中可以对 TRMM 3B43 降水数据进行精度校正,以提高数据的准确度。另外,也可以结合地表高程、坡度、坡向、植被等环境因素对 TRMM 3B43 降水数据进行降尺度研究来提高其精度,为后续相关研究提供高质量数据。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓冉,李国平,范广洲,等.我国西南地区 1960—2000 年降水资源变化的时空特征[J].自然资源学报,2007,22(5):783-792.
- [2] Almazroui M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998—2009[J]. Atmospheric Research, 2011,99(3):400-414.
- [3] Islam N, Uyeda H. Comparison of TRMM 3B42 products with surface rainfall over bangladesh[C]// Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Ieee, 2005:4112-4115.
- [4] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(1):38-55.
- [5] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J].资源科学,2010,32(6):1103-1110.
- [6] 曾红伟,李丽娟.澜沧江及周边流域 TRMM3B43 数据精度检验[J].地理学报,2011,66(7):994-1004.
- [7] 常远勇,侯西勇,毋亭,等.1998—2010 年全球中低纬度降水时空特征分析[J].水科学进展,2012,23(4):475-484.
- [8] 朱国锋,蒲焘,张涛,等. TRMM 降水数据在横断山区的精度[J].地理科学,2013,33(9):1125-1131.
- [9] 齐文文,张百平,庞宇,等.基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J].地理科学,2013,33(8):999-1005.
- [10] 嵇涛,杨华,刘睿,等.TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J].地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.
- [11] 李威,蒋平,赵卫权,等.TRMM 卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析:以贵州省为例[J].水土保持研究,2016,23(1):97-102.
- [12] 周李磊,杨华,刘睿,等.基于 TRMM 数据的西南地区年降水时空特征研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2017,34(1):114-122,142.
- [13] 秦福莹,贾根锁,杨劫,等.基于 TRMM 卫星数据的蒙古高原降水精度评估与季节分布特征[J].干旱区研究,2018,35(2):395-403.
- [14] 王钧,蒙古军.西南喀斯特地区近 45 年来气候变化特征及趋势[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(2):223-229.
- [15] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002,255(1):107-122.
- [16] Abdul Aziz O I, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,319(1):282-294.
- [17] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J].地理科学,2004,24(2):177-182.
- [18] 王桂钢,周可法,孙莉,等.近 10 a 新疆地区植被动态与 R/S 分析[J].遥感技术与应用,2010,25(1):84-90.
- [19] Mandelbrot B. Statistical methodology for nonperiodic cycles;from the covariance to R/S analysis[J]. Annals of Economic and Social Measurement, 1972,1(3):259-290.
- [20] 张琪,李跃清.近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(2):372-383.
- [21] 芦佳玉,延军平,曹永旺.1961—2015 年西南地区降水及洪涝指数空间分布特征[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1711-1720.