

引用格式:赵志龙,罗娅,余军林,等.贵州高原1960–2016年降水变化特征及重心转移分析[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1432–1442. [ Zhao Z L, Luo Y, Yu J L, et al. Analysis of precipitation variation characteristics and barycenter shift in Guizhou Plateau during 1960–2016[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1432–1442. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180215

# 贵州高原1960–2016年降水变化特征及重心转移分析

赵志龙, 罗 娅\*, 余军林, 罗旭琴, 杨月燕

贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

## Analysis of Precipitation Variation Characteristics and Barycenter Shift in Guizhou Plateau during 1960–2016

ZHAO Zhilong, LUO Ya\*, YU Junlin, LUO Xuqin, YANG Yueyan

School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

**Abstract:** Based on the precipitation data of 34 meteorological stations in Guizhou Plateau from 1960 to 2016, the study analyzed the spatial-temporal distribution of precipitation and its barycenter shift in Guizhou Plateau at different time scales using the Co-Kriging method, Mann-Kendall trend test method, the climate tendency rate and barycenter model. The results indicate that: (1) The average annual precipitation over the Guizhou Plateau was characterized by decreasing from the south and the east to the northwest. There were three rainy centers in the south and east of Guizhou Plateau, respectively located in the northward transport path of the southwest warm and humid airflow (Xingyi-Anshun area), the windward slope of the Miaoling Mountains (Duyun-Dushan area) and the windward slope of the Wuling Mountains (Tongren- Songtao area); And the less rainy area was located in Weining and Bijie, where is the leeward slope of the Wumeng Mountains. (2) The chronological changes of precipitation from 1960 to 2016 presented volatility, the precipitation variability of 2010s was the largest, and the precipitation variability of 1990s was the smallest; the interannual variation was more dramatic, showing a not-significant decrease trend, which presented a spatial reduction in the central and western regions and increase in eastern regions. The differences in seasonal precipitation was obviously, precipitation decreased significantly in spring and autumn, and did not increase significantly in summer and winter. The change of precipitation in each month was different. The increase in precipitation was most significant in January and March, and the decline in precipitation in April was the most significant. (3) The precipitation barycenter was distributed in the southwest-northeast direction, and there had been a clear eastward shift in the past 57 years. The decrease of precipitation in Guizhou Plateau had the possibility of being associated with the weakening of the Southwest Monsoon. The above results are of great significance to the allocation of water resources and the prevention of flood disasters in Guizhou.

收稿日期:2018–04–28;修回日期:2018–07–23.

基金项目:国家十三五重点研发计划课题(2016YFC0502607);国家自然科学基金项目(41761003);贵州省社会发展科技攻关计划项目(黔科合SY字[2013]3172号);贵州师范大学2015年博士科研启动项目(0514177). [ **Foundation items:** Project of National Key Research and Development Program of China in the 13<sup>th</sup> Five-year Plan, No.2016YFC0502607; National Natural Science Foundation, No.41761003; Project of Social Development of Guizhou Province, No.[2013] 3127; Doctoral Foundation of Guizhou Normal University in 2015, No.0514177. ]

作者简介:赵志龙(1993–),男,硕士生,研究方向为生态水文遥感与水土资源保护. E-mail: zhaozhidragon@163.com

\*通讯作者:罗 娅(1979–),女,博士,教授,研究方向为生态水文遥感与水土资源保护. E-mail: luoya2002@163.com

**Key words:** Guizhou Plateau; precipitation; Co-Kriging; Mann-Kendall method; the precipitation barycenters

**\*Corresponding author:** LUO Ya, E-mail: luoya2002@163.com

**摘要:**利用贵州高原 34 个气象站 1960–2016 年共 57 a 的降水资料,基于协同克里金法、Mann-Kendall 趋势检验法、气候倾向率、重心模型等方法分析了贵州高原降水在不同时间尺度下的时空分布规律以及降水重心的转移趋势。结果表明:① 贵州高原多年平均降水量呈现南多北少特征。在南部与东部存在 3 个多雨中心,分别位于西南暖湿气流的北上通道(兴义-安顺一带)、苗岭山脉的迎风坡(都匀-独山一带)以及武陵山脉的迎风坡(铜仁-松桃一带);少雨区位于乌蒙山脉背风坡的威宁-毕节一带。② 1960–2016 年降水量年代变化呈现出波动性,2010s 的降水变异性最大,1990s 的降水变异性最小;年际变化较为剧烈,呈不显著减少的趋势,在空间上呈现中部西部减少、东部增加的趋势;降水季节差异显著,春季、秋季降水显著减少,夏季、冬季的降水不明显增加;各月降水变化情况不同,1、3 月降水增加最明显,4 月降水下降最明显。③ 降水重心呈西南-东北向分布,有明显的东移趋势。贵州高原降水量的减少可能与西南季风的减弱有关。研究结果对贵州地区水资源配置及洪涝灾害预防具有重要意义。

**关键词:** 贵州高原;降水量;协同克里金法;Mann-Kendall 法;降水重心

## 1 引言

研究区域降水变化并揭示其时空特征,对于探寻气候变化的区域特征有重要意义<sup>[1-5]</sup>。贵州高原位于中国第一与第三阶梯的过渡地带,是长江流域与珠江流域的分水岭,受到东亚季风与西南季风的共同影响<sup>[6]</sup>。由于高海拔地形和低纬度的位置特征,具有独特的天气、气候系统,其降水时空分布受气候变化引起的季风变化影响明显<sup>[7-8]</sup>。同时,作为国内喀斯特地貌分布最广的地区,其地形复杂破碎,空间异质性强,极易受到极端降水的侵害。因此,分析贵州高原的降水变化特征,有助于揭示该区域的气候变化规律,对于该地区水资源的合理配置、旱涝灾害的预防、喀斯特石漠化的针对性防治都有着重要的价值,同时也有利于该地区的农林渔业、水力发电、水上航运等行业的发展,受到众多专家学者的高度关注。

针对贵州高原的降水变化,伍红雨等<sup>[9]</sup>分析了降水气候异常的时空分布特征,结果表明夏季降水与长江、淮河流域呈同位相,而与陕、甘、宁交界处呈反位相关关系。严小冬等<sup>[10]</sup>研究了月季降水量场的时空分布变化规律,结果发现夏季降水的年际变化较其它季节大,春、夏、冬季降水的年际变化具有一定的周期性。白淑英等<sup>[11]</sup>针对近 50 年不同强度降水日数的时空变化进行了分析,结果表明不同降水强度呈先增加后减少趋势,并在 2006 年发生突变。张勇荣等<sup>[12]</sup>研究了强降水日数和强度的气候倾向率、变化率以及稳定性等方面的空间分布特征,结果显示,在年均降水量、降水日数和强度相对较小的区域,其降水日数和强度的变化率最大、稳

定性最差。可以看出,已有研究对贵州高原降水时间变化规律有较全面的分析,而对其降水重心转移情况关注较少。重心原本属于物理学中经典力学的范畴,基本含义是指物体各部分所受重力之合力的作用点。近年来,已有不少学者将重心概念引申至地理学领域:高志强等<sup>[13]</sup>将其引申为土地利用重心,分析土地利用对气候变化及人为活动的响应程度;徐建华等<sup>[14]</sup>将其引申为区域重心,以区域重心的时空变化来表示区域差异的动态演化过程;刘斌涛等<sup>[15]</sup>将其引申为降雨侵蚀力重心,以揭示西南山区降雨侵蚀力的季节变化特征和集中分布区域的动态变化情况;陈素景等<sup>[16]</sup>将其引申为降水重心,用来揭示降水在区域总体的分布情况。可见,重心模型已在地理学领域得到了广泛的应用,而降水重心是揭示降水空间分布不均衡程度的重要方面。因此,有必要针对贵州高原降水变化及其重心转移情况开展进一步研究。

综上,基于贵州高原 34 个气象站点近 57a 的日降水资料,运用协同克里金法、Mann-Kendall 趋势检验法、气候倾向率、重心模型等方法,分别从年代际、年际、季节及逐月变化的角度,分析贵州高原降水的时空分布规律,并揭示其降水重心变化趋势,以期为贵州高原水资源配置和旱涝灾害防治提供参考。

## 2 研究区概况

贵州高原地处中国地势的第二阶梯、云贵高原的东斜坡地带,位于 103°31′~109°30′ E, 24°30′~29°13′ N。其属于喀斯特高原山区,喀斯特面积占总面积

积的61.92%,山地和丘陵占全区面积的92.5%。地势西高东低,海拔高度147.8~2900.6 m,平均海拔约1100 m。气候属亚热带季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,垂直差异比较明显。

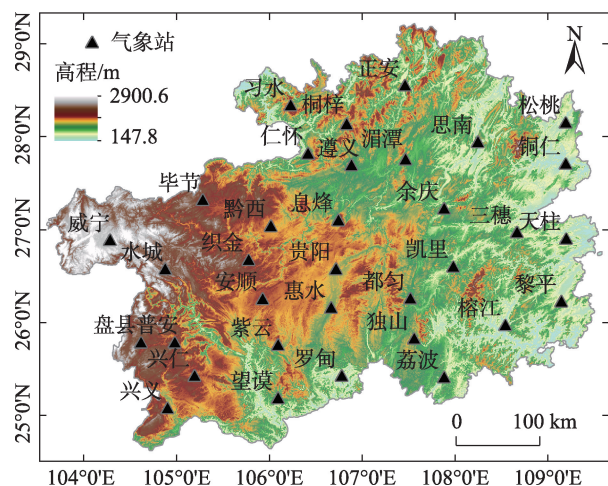


图1 研究区及34个气象站分布位置

Fig. 1 Locations of study area and 34 meteorological stations

### 3 数据源与研究方法

#### 3.1 数据源

所用降水数据为贵州高原1960–2016年34个气象站的日降水资料<sup>[17]</sup>,下载地址为中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。该数据的质量由国家气象中心控制,稳定可靠,个别站点存在少数日降水量数据缺测的情况,对此在预处理时采用临近站点观测数据进行插补<sup>[18]</sup>。所选择的34个站点中,位于黔东南州的有5个,黔南州的有5个,铜仁市的有3个,遵义市的有7个,毕节市的有4个,贵阳市的有2个,黔西南州的有4个,安顺市和六盘水市的各有2个,基本能均匀覆盖贵州各个地区。

用作降水量插值协同变量的DEM数据下载自国际热带农业研究中心(<http://srtm.csi.cgiar.org>)的SRTM3地形产品<sup>[19]</sup>,水平空间分辨率为90 m×90 m。

#### 3.2 研究方法

采用协同克里金方法分析贵州高原1960–2016年的年均降水量的空间分布后,再利用Mann-Kendall趋势检验法、气候倾向率等方法,从年代际、年际、季节变化及逐月变化角度研究贵州高原降水量时空变化规律,最后基于降水重心模型揭示贵州高原降水重心的空间变化趋势。

#### 3.2.1 运用克里金(Kriging)插值法获取面雨量

克里金(Kriging)法是以空间自相关为基础,利用原始数据和半方差函数的结构性,对区域化变量的未知采样点进行无偏估值的插值方法。它假设数据变化呈正态分布,通过对数据的空间分析获取权重值,插值的整个过程相当于在未知区域化变量Z的期望值上对样点进行加权滑动求取平均值的过程<sup>[20]</sup>。普通克里金方法的公式为:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中:  $Z_x$  为待插值点的估计值;  $Z(x_i)$  为第  $i$  个样本点的实测值;  $n$  为参与计算的观测站样本个数;  $\lambda_i$  为第  $i$  个样本点的权重系数。Goovaerts<sup>[21]</sup>和孙然好等<sup>[22]</sup>的研究表明,加入高程参数的协同克里金法(Co-Kriging)的精度要高于普通克里金法。因此,本文选用以DEM为协同变量的协同克里金法作为降水分布的插值方法。协同克里金法的公式为<sup>[23]</sup>:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \lambda [y(x) - m_y + m_z] \quad (2)$$

式中:  $y(x)$  为协同变量的值;  $m_y$ 、 $m_z$  为协同变量及降水量的全局平均值。

#### 3.2.2 运用气候倾向率指标揭示降水变化幅度

气象要素的线性趋势变化可用一次直线方程来描述<sup>[24]</sup>。用  $x_i$  表示样本量为  $n$  的某一气候变量,用  $t_i$  表示  $x_i$  所对应的时间,建立  $x_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归方程为:

$$x_i = a + bt_i \quad (3)$$

以线性回归系数  $b$  的10倍作为气候倾向率,在本文中即指降水的变化幅度。

#### 3.2.3 运用Mann-Kendall(M-K)法检验降水变化趋势

M-K法是用来评估水文气候要素时间序列趋势的检验方法,以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称<sup>[25]</sup>。其检验统计量公式为:

$$s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (4)$$

式中:  $\text{sign}()$  为符号函数,当  $x_i - x_j$  小于、等于或者大于0时,  $\text{sign}(x_i - x_j)$  分别为-1、0和1。M-K统计量公式  $s$  大于、等于、小于0时为:

$$z = \begin{cases} (s-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ (s+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & s < 0 \end{cases} \quad (5)$$



式中:  $z$  为正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 $z$  的绝对值大于等于 1.28、1.64、2.32 时分别表示通过了信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。

### 3.2.4 运用重心模型分析降水重心变化

重心这一概念原本属于物理学领域, 高志强等<sup>[13]</sup>、徐建华等<sup>[14]</sup>、刘斌涛等<sup>[15]</sup>、陈素景等<sup>[16]</sup>将重心模型分别引申为土地利用重心、区域经济重心、降水侵蚀力重心以及降水重心的概念, 使其在地理学领域得到了广泛的应用。运用重心模型开展降水重心变化分析, 其计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \\ \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中:  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  为重心坐标;  $X_i$ 、 $Y_i$  为第  $i$  个台站的经纬度坐标;  $P_i$  为第  $i$  个台站的年降水量。

## 4 结果与分析

### 4.1 多年平均降水空间分布特征

统计贵州高原近 57 a 的日降水数据, 可获取其多年平均降水空间分布特征。由图 2 可知, 在东南季风、西南季风及地形地势等因素的共同影响下, 贵州的多年平均降水量为 892~1441 mm, 约占总面积 91% 的地区的多年平均降水量集中在 1000~

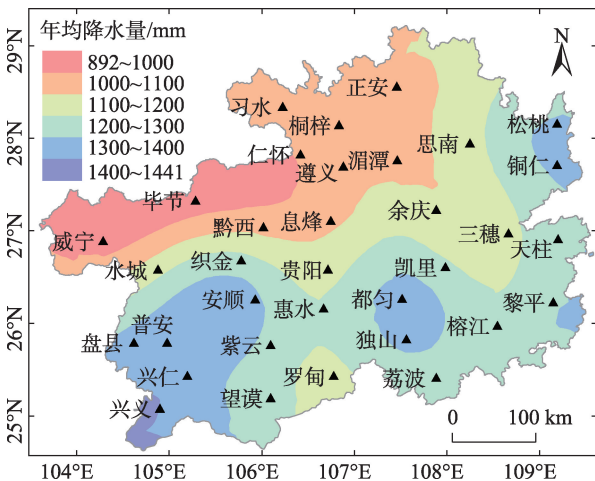


图2 贵州高原多年平均降水量分布

Fig. 2 Average annual rainfall distribution of Guizhou Plateau

1400 mm 之间。呈现由东部和南部向西部和北部逐渐递减的趋势, 存在 3 个多雨中心和一个少雨带。其中, 多雨中心分别为: ① 兴义至安顺一带, 由于地处西南暖湿气流的北上通道, 年均降水量在 1300~1400 mm 以上; ② 都匀及独山一带, 由于处于苗岭山脉的迎风坡, 降水量大于 1300 mm; ③ 铜仁及松桃一带, 由于位于武陵山脉的迎风坡, 年平均降水量也普遍超过 1300 mm。而少雨带位于威宁至毕节一带, 因其位于乌蒙山脉的背风坡, 年平均降水量少于 1000 mm。

### 4.2 不同时间尺度的降水变化

#### 4.2.1 年代际变化

分别统计 1960s、1970s、1980s、1990s、2000s 和 2010s 的年降水最大值、最小值和均值, 可分析降水的年代际变化情况。其中, 2010s 的降水数据用 2010–2016 年的数据计算获取。由图 3 和表 1 可看出, 贵州降水的年代均值总体呈波动趋势, 出现了 2 次较大的增加, 增加时期为 1960s (1210.84 mm)–1970s (1237.30 mm) 和 1980s (1152.62 mm)–1990s (1224.51 mm), 分别增加约 26 mm 和 73 mm。与 2 次增加相对应, 也出现了 2 次明显的减少, 减少时期为 1970s (1237.30 mm)–1980s (1152.62 mm) 和 1990s (1224.51 mm)–2000s (1148.54 mm), 分别减少约 85 mm 和 76 mm。从降水量年代际最大值来看, 在 2000s 以前, 年代最大值呈减少趋势, 2010s 年代最大值突然增加; 降水量年代最小值与年代平均值类似, 也呈现出 2 次波动趋势。此外, 由表 1 可看出, 贵州高原各年代际降水量变异性呈现 2010s (0.17) > 1960s (0.12) > 1980s (0.11) > 2000s (0.10) > 1970s (0.07) > 1990s (0.06) 的趋势, 表明 2010s 的降水变异

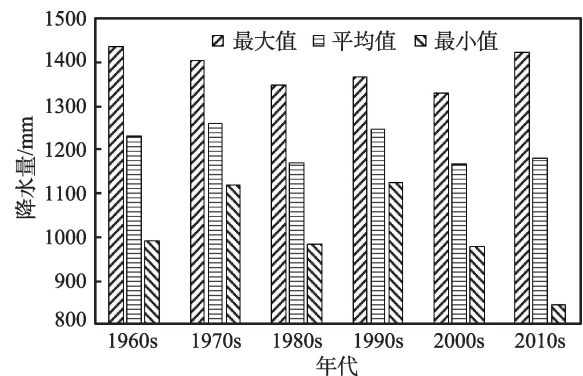


图3 1960s–2010s 年降水量年代变化统计图

Fig. 3 Statistical graph of interdecadal precipitation variation from the 1960s to 2010s



表 1 1960s-2010s 年降水量年代变化统计表

Tab. 1 Statistical table of interdecadal precipitation variation from 1960s to 2010s

	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s
平均值/mm	1210.84	1237.30	1152.62	1224.51	1148.54	1160.93
最大值/mm	1406.01	1376.85	1321.70	1341.28	1304.57	1394.44
最小值/mm	980.56	1104.37	973.90	1108.13	968.35	841.19
标准差/mm	145.59	82.31	123.78	75.73	116.19	197.01
变异系数	0.12	0.07	0.11	0.06	0.10	0.17

性最大,1990s的降水变异性最小,而其他年代变化幅度处于二者之间,变异系数为0.07~0.12。

4.2.2 年变化

统计1960-2016年历年的年降水量最大值、最小值和均值,可分析降水的年变化情况。由图4可看出,贵州近57a来年均降水量为1190.61 mm,降水量最大值出现在1967年,为1406 mm;最小值出现在2011年,为841.19 mm;最大值与最小值之间相差1.67倍,说明降水量的年变化较为剧烈。57 a间贵州高原降水的气候倾向率为-11.81 mm/10a,利用M-K趋势检验法对57 a间降水量的变化趋势进行检验,结果表明57a间贵州高原降水总体呈下降

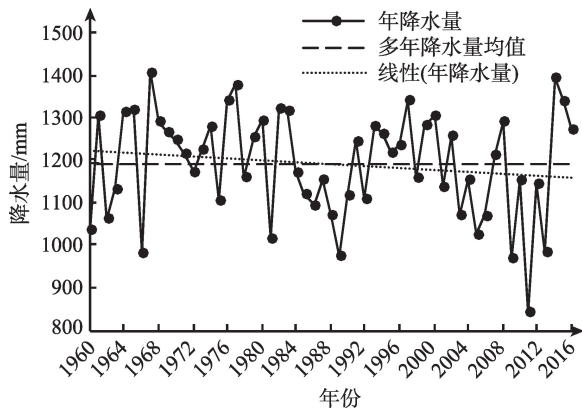


图4 1960-2016年降水量年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of precipitation from 1960 to 2016  
趋势,但未通过信度为95%的的显著性检验,说明下降趋势不显著。

由图5可看出降水气候倾向率的空间分布。结果显示,贵州高原年降水量呈中部西部减少、东部增加的趋势,有85%的区域呈减少趋势,仅有14%的区域呈现出增加趋势。气候倾向率处在-42~22 mm/10a区间,空间分布上由西向东呈现梯度变化,西部的安顺、盘县一带减少最多,气候倾向率处在到-42~-30 mm/10a之间,东部的天柱增加最多,气候倾向率达22 mm/10a。

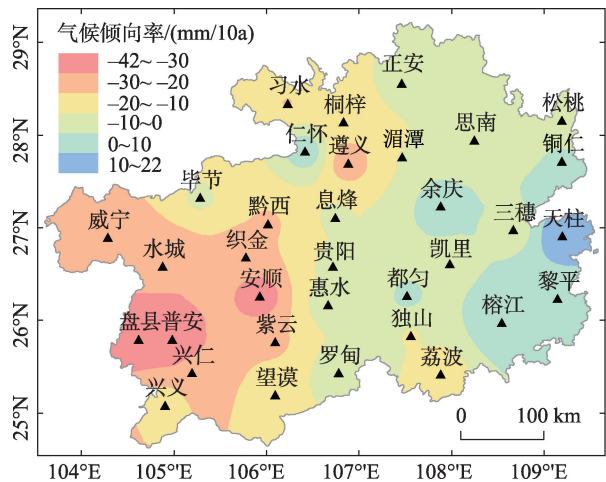


图5 1960-2016年降水气候倾向率分布

Fig. 5 Distribution of precipitation climate tendency rate from 1960 to 2016

4.2.3 季节变化

统计1960-2016年各季节的降水量均值:贵州高原春、夏、秋、冬四季的多年降水量均值分别为308.62、562.28、244.07和75.74 mm,季节差异显著。四季中,夏季是降水最集中的季节,其降水量占全年降水量的47.2%;春季降水量次之,占全年降水量的25.9%;秋季降水量第三,占全年降水量的20.5%;冬季降水量最少,仅占全年降水量的6.4%。利用M-K法对4个季节的降水进行趋势检测(图6),结果表明:贵州高原近57 a来春、秋季的降水均呈显著减少趋势,分别通过了信度为90%与95%的显著性检验;夏季、冬季的降水呈增加趋势,但未通过显著性检验。

此外,由贵州高原四季降水量的气候倾向率空间分布(图7)可看出,贵州高原春、秋两季降水呈明显减少趋势,其气候倾向率均值分别为-5.46 mm/10a和-9.23 mm/10a;夏、冬两季降水呈略微增加趋势,其气候倾向率均值分别为1.99 mm/10a和0.96 mm/10a。在降水明显减少的秋季,西部地区降水减少程度明显高于中部和东部,减少最明显的区

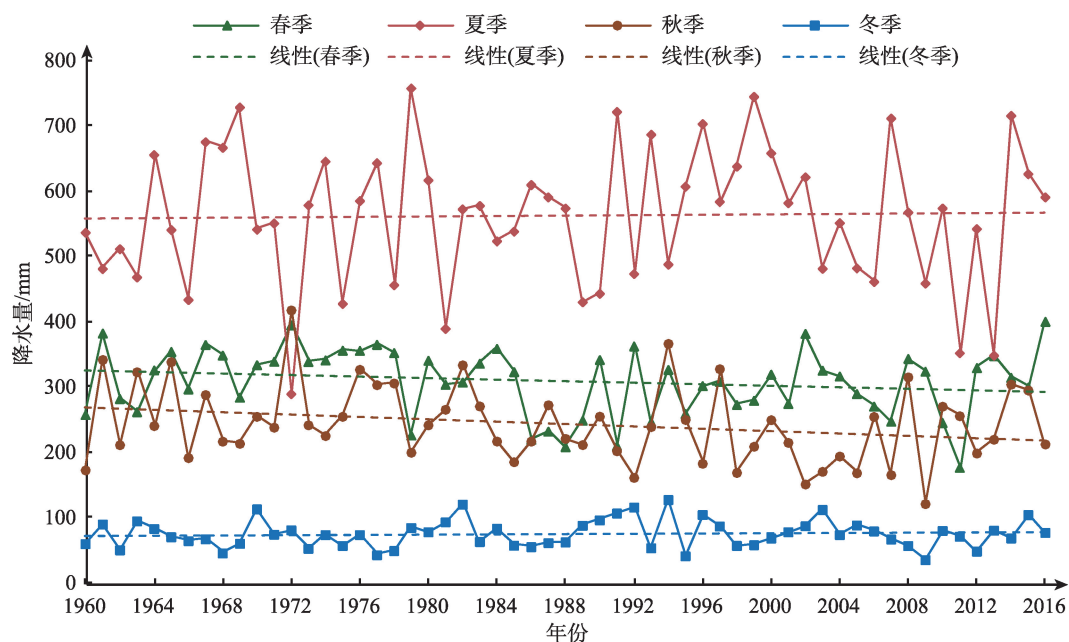


图6 1960–2016年贵州高原四季降水量变化趋势

Fig. 6 Trends of four seasons precipitation in Guizhou Plateau from 1960 to 2016

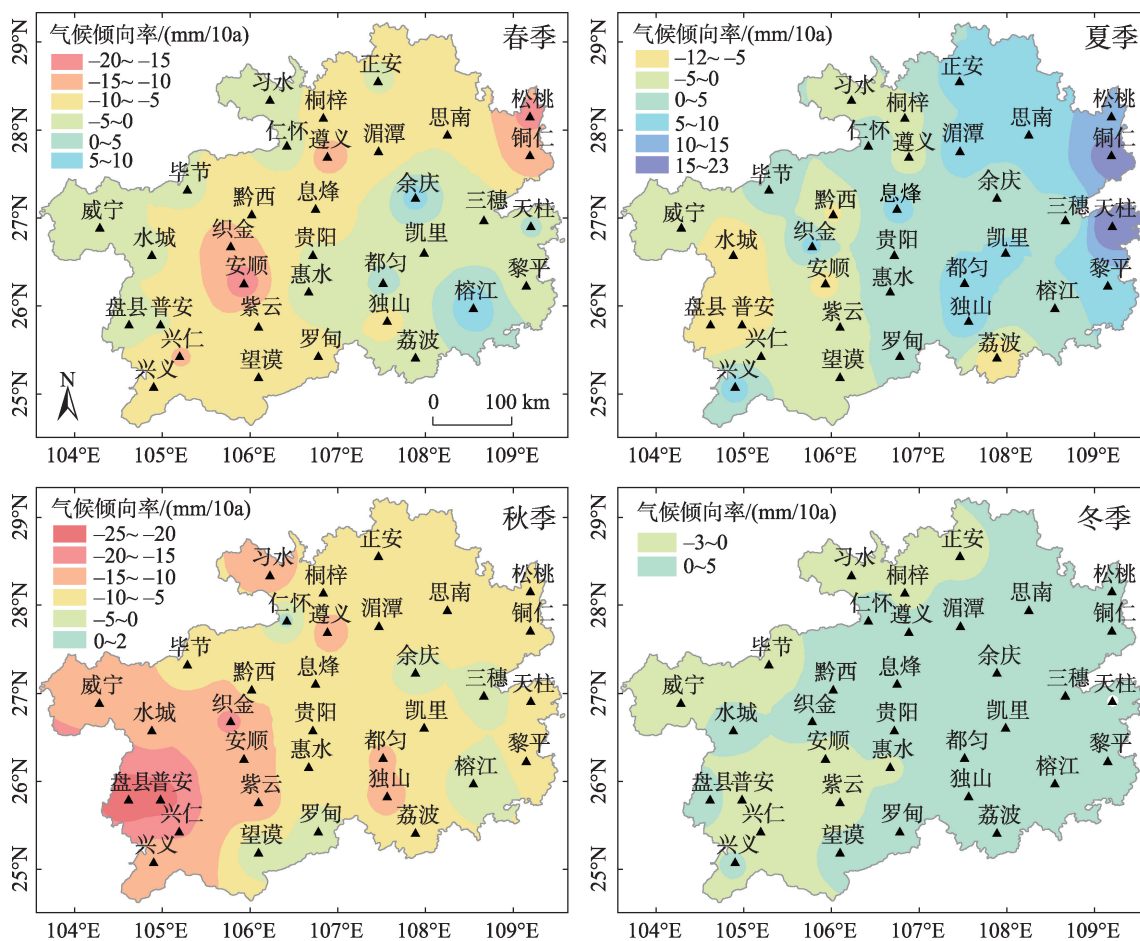


图7 1960–2016年贵州高原四季降水气候倾向率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of four seasons' precipitation tendency rate in Guizhou Plateau from 1960 to 2016

域位于西南暖湿气流通道上的安顺至盘县一带；在降水增加较明显的夏季,降水增加最明显的区域位于贵州高原东部武陵山脉迎风坡的天柱－铜仁一带。

4.2.4 月变化

统计1960–2016年贵州高原各月的降水量均值及其降水气候倾向率,可分析降水的月变化情况。

由表2可看出,一年中6月降水最多,降水量可达219.3 mm,占全年降水量的18.4%;12月降水最少,其降水量仅为23.8 mm,约占全年降水量的2%。汛期(5–9月)降水量达836.2 mm,约占全年降水量的70%。1–6月降水量呈逐渐增大的趋势,6–12月降水量呈逐渐下降趋势。分析月降水量气候倾向率可知,贵州高原1、3、6与7月降水量呈上升趋势,4、

表2 1960–2016年各月降水量及变化趋势

Tab. 2 Monthly precipitation and its tendency rate from 1960 to 2016

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均值/mm	25.0	26.8	43.9	93.8	171.0	219.3	190.7	152.2	102.9	93.0	48.1	23.8
占全年百分比/%	2.1	2.3	3.7	7.9	14.4	18.4	16.0	12.8	8.6	7.8	4.0	2.0
降水倾向率/(mm/10a)	1.19*	-0.22	2.78*	-5.01*	-3.23	3.91	1.43	-3.35	-3.41	-3.15	-2.67	-0.09

注:\*表示达到95%的信度水平

5月及9–12月的降水量呈下降趋势,其中1、3和4月的上升(下降)趋势最为明显,并通过信度为95%的显著性检验,其他月份变化趋势不显著。

4.3 降水重心变化

为分析贵州高原近57a来降水重心的分布和移动轨迹,以年降水量为权重,利用式(6),计算出1960–2016年降水重心的经纬度坐标,并分别绘制出1960–2016年降水重心位置及移动轨迹图(图8)和1960–2016年降水重心经纬度坐标变化图(图9)。由图8可知,降水重心的位置并非随机分布,而是集中在某一固定区域,近57a来贵州高原降水重心基本分布在贵阳市东部与黔南州交界的地带,处在

106°41′~107°02′ E、26°33′~26°47′ N。为进一步分析降水重心的离散与方向趋势,利用ArcGIS的标准差椭圆工具创建57个降水重心点的一级标准差椭圆。结果显示,其标准差椭圆的方向为59°(北偏东59°),说明降水重心整体呈西南–东北向分布。其标准差椭圆长轴处在西南–东北方向,长度为22 km,短轴处在西北–东南方向,长度为11 km,二者之比为2,说明降水重心点在西南–东北方向上的离散性大于西北–东南方向。基于前文中对贵州高原多年平均降水时空变化的分析,西南东北方向分别存在2个多雨中心(兴义–安顺一带、松桃–铜仁一带),且兴义–安顺一带降水量最大,所占权重最高,而西北–东南方向,只在都匀–独山一带存在一个多雨中心,杠杆效应不明显,因此导致了降水重心的西南–东北向分布。

进一步分析降水重心的经、纬度坐标在近57 a来的变化情况(图9),利用M-K趋势检验法分析降水重心经度与纬度的变化趋势,结果表明,近57 a来,降水重心经度呈明显增大趋势(通过信度为的99%显著性检验),降水重心纬度呈增大趋势,但未通过置信度检验。可看出,近57 a来贵州高原降水重心有明显的东移趋势。重心的概念决定了降水重心的分布会趋向降水偏多的区域,因此这也验证了前文中所描述的贵州高原西部降水减少、东部增多的事实。但是,57 a间个别年份的年际变化幅度仍然较大,如80年代有多个年份降水重心异常偏向西南,这可能与80年代末大气环流调整<sup>[26]</sup>,降水发生突变有关,但具体原因有待进一步探讨。

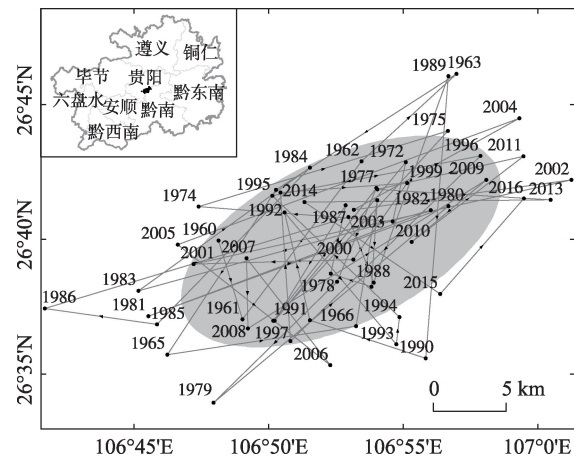


图8 1960–2016年降水重心位置及移动轨迹

Fig. 8 Location of precipitation barycenter and its movement trajectory from 1960 to 2016



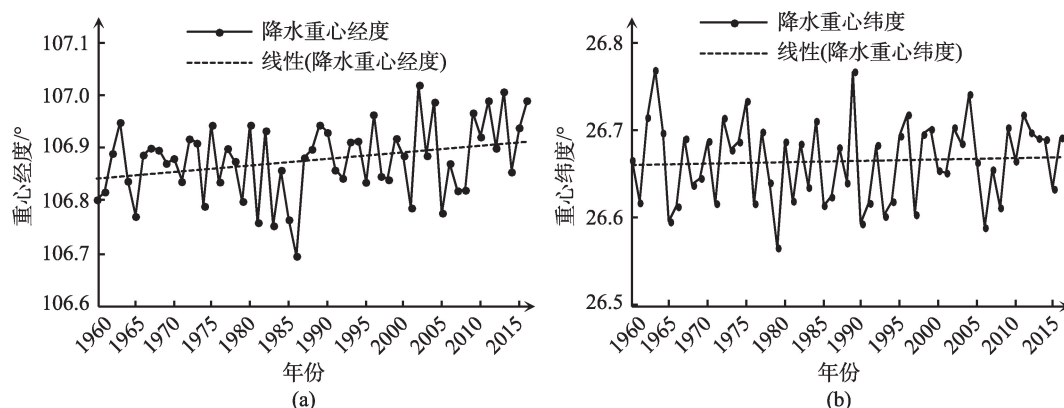


图9 1960–2016年降水重心经纬度坐标变化

Fig. 9 Variation in longitude coordinate and latitude coordinate of precipitation barycenter from 1960 to 2016

## 5 讨论

(1) 1960–2016年贵州高原降水有下降的趋势, 60年代以来经历了2次降水量增加与减少的波动, 这与西南地区的整体变化相对应, 同时极端降水的频率在增加。

根据降水气候倾向率空间分布图可以看出, 近57 a来贵州高原大部地区呈下降趋势。郭慧等<sup>[27]</sup>通过分析中国西部225个气象站的降水资料得出结论: 近50多年来, 中国西部地区大致以100°E为界, 以西降水明显增加, 以东降水减少, 这与本文的分析结果相对应。按季节来看, 降水量最多的夏季大部地区呈增加趋势, 但增加区域以研究区东部为主, 而春、秋两季的降水在大部分地区为减少的, 尤其是秋季降水在研究区99%的面积上呈减少趋势, 可见春、秋季降水的减少是贵州高原降水减少的主导因素。

贵州高原的降水在60年代和90年代, 由前期偏少转为偏多, 在80年代和21世纪初由前期偏多转为偏少, 这与王艳娇等<sup>[28]</sup>对中国西南地区1960–2010年降水年代际变化特征的研究结果相一致, 同时也符合郭慧等<sup>[27]</sup>得出的云贵高原地区近50多年来降水量少→多→少→多的变化类型。已有研究表明, 进入21世纪以来极端气候事件的频率有增加: 贺晋云等<sup>[5]</sup>研究发现, 进入21世纪以来西南地区极端干旱的发生次数有所增加; 丁文荣等<sup>[3]</sup>研究发现, 21世纪以来西南地区极端降水的贡献率有所增加, 这与本文所得出的21世纪以来降水变异性的增加相吻合, 变异性的增加表明近年来贵州高原降水不稳定性增加, 进而导致干旱、洪涝等极端降水

事件发生的可能性增大。

(2) 贵州高原降水的减少与多种因素有关, 但主导因素可能是西南季风的减弱, 而降水重心的东移可能对两大季风的变化有一定的指示作用。

唐晶晶等<sup>[29]</sup>通过对长江流域46个站点不同时间序列的分析发现, 1952–2007年海温的升高以及青藏高原热源作用的减弱使得东亚大陆与西太平洋间的经向环流减弱, 进而导致西太平洋及中国南海的水汽无法深入长江流域西部地区, 这可能是西南地区降水减少而长江中下游地区降水增加的原因; 李聪等<sup>[30]</sup>利用1951–2009年中国503站的日降水资料研究了各地区降水的年代际变化特征, 发现近60年来西南地区降水明显减少, 而原因之一可能与孟加拉湾西南季风结束偏早有关。可见, 贵州高原地区的降水变化受到青藏高原热源、西南季风、东亚季风等的共同影响。

资料表明, 贵州高原的夏季风降水从4月上旬开始, 初期受到东亚季风系统的影响; 当孟加拉湾西南季风于6月逐步建立之后, 西南季风气流开始大举入侵云贵高原<sup>[6]</sup>, 因而贵州高原地区的降水主要受西南季风的强弱控制<sup>[31]</sup>。已有研究证实, 近半个世纪尤其是自20世纪70年代以来<sup>[32–33]</sup>, 亚洲的季风环流出现了明显的减弱, 而近年来又有学者通过对石笋中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的测定, 推测西南季风的变化情况, 结果表明, 近半个世纪以来西南季风有减弱的趋势<sup>[34–35]</sup>, 因此认为西南季风的减弱可能是导致近57 a来贵州高原降水减少的主要原因。由于降水重心的分布会趋向降水偏多的区域, 近57 a来贵州高原降水重心发生了明显的东移, 因此降水重心可

能对西南季风与东亚季风的变化具有一定的指示作用,而占主导地位西南季风的强弱变化对贵州高原降水时空变化有着显著影响。

## 6 结论

本文通过对贵州高原降水变化特征进行多时间尺度的分析,主要得出以下结论:

(1)贵州高原降水量空间分布不均,呈现出南多北少的特点。多年平均降水量由东部和南部向西北部逐渐递减,在南部、东部以及西北部分别存在3个多雨中心和1个少雨带。其中,多雨中心分别位于西南暖湿气流的北上通道(兴义—安顺一带)、苗岭山脉的迎风坡(都匀—独山一带)以及武陵山脉的迎风坡(铜仁—松桃一带),少雨带位于乌蒙山脉的背风坡(威宁—毕节一带)。

(2)贵州高原降水在年代际、年、季节、月等时间尺度的变化有明显的规律性:在年代际尺度,出现2次较大的增加和两次较明显的减少,增加时期为1960s—1970s和1980s—1990s,分别增加26 mm和73 mm;2次明显的减少时期为1970s—1980s和1990s—2000s,分别减少85 mm和76 mm;各年代际降水量变异性呈现2010s (0.17) > 1960s (0.12) > 1980s (0.11) > 2000s (0.10) > 1970s (0.07) > 1990s (0.06)的趋势,表明2010s的降水变异性最大,1990s的降水变异性最小。在年尺度,降水量年变化较为剧烈,年均降水量为1190.61 mm,年降水量最大值为出现在1967年的1406 mm,最小值为出现在2011年的841.19 mm,最大值与最小值之间相差1.67倍;降水总体呈下降趋势,但下降趋势不显著,在空间上呈现中部西部减少、东部增加的趋势,有85%的区域减少,仅有14%的区域增加。在季节尺度,降水季节差异显著,降水主要发生在春季(308.62 mm)和夏季(562.28 mm),这两个季节的降水量占全年降水总量的73.14%;四季中,春季、秋季降水显著减少,夏季、冬季降水不明显增加;在降水减少最明显的秋季,西部地区降水减少程度明显高于中部和东部。在月尺度,6月降水最多,12月降水最少,6月和12月降水量分别占全年降水量的18.4%和2%;汛期(5—9月)降水量达836.2 mm,约占全年降水量的70%,且汛期降水变化程度大于非汛期;一年中1月和3月降水增加最明显,4月降水减少最明显。

(3)贵州高原降水重心分布在贵阳市与黔东南州

交界地带,降水重心整体呈西南—东北向分布,其标准差椭圆的长轴处在西南—东北方向,短轴为西北—东南方向,在西南—东北方向上的离散性大于西北—东南方向,近57 a来降水重心有明显的东移趋势。

## 参考文献(References)

- [1] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等.中国大陆降水时空变异规律—Ⅲ.趋势变化原因[J].水科学进展,2016,27(3):327-348. [ Ren G Y, Liu Y J, Sun X B, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China (Ⅲ): Causes for recent trends[J]. Advances in Water Science, 2016,27(3):327-348. ]
- [2] 吴凯,王晓琳,许怡,等.中国大陆降水时空格局演变新事实[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):30-36. [ Wu K, Wang X L, Xu Y, et al. New facts about evolution of spatial and temporal pattern of precipitation over Chinese mainland[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017,15(3):30-36. ]
- [3] 丁文荣.西南地区极端降水的时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2014,23(7):1029-1037. [ Ding W R. Spatial and temporal variability of the extreme daily precipitation in Southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(7):1071-1079. ]
- [4] 袁喆,杨志勇,郑晓东,等.近50年来淮河流域降水时空变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):98-103. [ Yuan Z, Yang Z Y, Zheng X D, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Huaihe River Basin in recent 50 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012,10(2):98-103. ]
- [5] 贺晋云,张明军,王鹏,等.近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J].地理学报,2011,66(9):1179-1190. [ He J Y, Zhang M J, Wang P, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 Years [J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(9):1179-1190. ]
- [6] 赵恕.季风与贵州的雨季[J].气象学报,1965(1):96-106. [ Zhao S. Monsoons and rainy season in Kweichow[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1965,35(1):96-106. ]
- [7] 吴端耀,罗娅,王青,等.2001-2014年贵州省林草植被覆盖度时空变化及其与气温降水变化的关系[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2017,35(1):1-7. [ Wu D Y, Luo Y, Wang Q, et al. Spatio-temporal variation of vegetation coverage in forest and grassland and its relationship with temperature and precipitation changes in Guizhou Province during 2001-2014[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017,35(1):1-7. ]
- [8] 秦剑,据建华,解明恩,等.低纬高原天气气候[M].北京:气象出版社,1997:38-50. [ Qin J. Ju J H. Xie M E. et al.

- Weather&climate over low latitude plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997:38-50. ]
- [9] 伍红雨,王谦.近49年贵州降水异常的气候特征分析[J].高原气象,2003,22(1):65-70. [ Wu H Y, Wang Q Q. Climate characteristics analysis of Guizhou precipitation anomaly in recent 49 years[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1):65-70. ]
- [10] 严小冬,金建德,雷云.近50年贵州降水时空分布分析[J].贵州气象,2004,28(s1):3-7. [ Yan X D, Jin J D, Lei Y. Spatial and temporal distribution of precipitation in Guizhou in recent 50 years[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2004,28(s1):3-7 ]
- [11] 白淑英,莫婷,史建桥,等.近50年贵州不同强度降水日数时空变化分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):220-224. [ Bai S Y, Mo T, Shi J Q, et al. Spatial and temporal variations of rainfall days with different intensities in Guizhou in recent 50 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015,13(2):220-224. ]
- [12] 张勇荣,马士彬,闫利会.贵州省近55年降水事件变化特征[J].长江科学院院报,2017,34(1):40-44. [ Zhang Y R, Ma S B, Yan L H, et al. Variation characteristics of precipitation events in Guizhou Province in recent 55 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017,34(1):40-44. ]
- [13] 高志强,刘纪远.1980-2000年中国LUCC对气候变化的响应[J].地理学报,2006,61(8):865-872. [ Gao Z Q, Liu J Y. The LUCC responses to climatic changes in China from 1980 to 2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(8): 865-872. ]
- [14] 徐建华,岳文泽.近20年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析[J].地理科学,2001,21(5):385-389. [ Xu J H, Yue W Y. Evolvement and comparative analysis of the population center gravity and the economy gravity center in recent twenty years in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001,21(5):385-389. ]
- [15] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.基于重心模型的西南山区降水侵蚀力年内变化分析[J].农业工程学报,2012,28(21): 113-120. [ Liu B T, Tao H P, Song C F, et al. Study on annual variation of rainfall erosivity in southwest China using gravity center model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012,28(21):113-120. ]
- [16] 陈素景,李丽娟,李九一,等.近55年来澜沧江流域降水时空变化特征分析[J].地球信息科学学报,2017,19(3):365-373. [ Chen S J, Li L J, Li J Y, et al. Analysis of the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Lancang River Basin over the past 55 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(3):365-373. ]
- [17] 国家气象信息中心.中国地面气候资料日值数据集(V3.0) [DB/OL].[http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY\\_V3.0.html](http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html). 2017-06-23. [ National Meteorological Information Center. Dataset of Daily Climate Data from Chinese Surface Stations (V3.0) [DB/OL]. [http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY\\_V3.0.html](http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html). 2017-06-23. ]
- [18] 黄蓉,胡泽勇,关婷,等.藏北高原气温资料插补及其变化的初步分析[J].高原气象,2014,33(3):637-646. [ Huang R, Hu Z Y, Guan T, et al. Interpolation of temperature data in Northern Qinghai-Xizang Plateau and preliminary analysis on its recent variation[J]. Plateau Meteorology, 2014,33(3):637-646. ]
- [19] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT) [EB/OL]. <http://srtm.csi.cgiar.org/>, 2008-08-19.
- [20] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2012:448-469. [ Tang G A, Yang X. ArcGIS: Spatial analysis experiment course of geographical information system [M]. Beijing: Science Press, 2012:448-469. ]
- [21] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2000,228(1-2):113-129.
- [22] 孙然好,刘清丽,陈利顶.基于地统计学方法的降水空间插值研究[J].水文,2010,30(1):14-17. [ Sun R H, Liu Q L, Chen L D. Study on precipitation interpolation based on the geostatistical analyst method[J]. Journal of China Hydrology, 2010,30(1):14-17. ]
- [23] 刘爱利,王培法,丁园圆.地统计学概论[M].北京:科学出版社,2012. [ Liu A L, Wang P F, Ding Y Y. Introduction to Geostatistics [M]. Beijing: Science Press, 2012. ]
- [24] 施能,陈家其.中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J].气象学报,1995(4):431-439. [ Shi N, Chen J Q. 4-Phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995(4):431-439. ]
- [25] 孙鹏,张强,陈晓宏,等.鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J].地理学报,2010,65(7):828-840. [ Sun P, Zhang Q, Chen X H, et al. Spatio-temporal patterns of sediment and runoff changes in the Poyang Lake Basin and underlying causes[J]. Acta Geographica Sinica, 2010,65(7):828-840. ]
- [26] 贾蕾,曾彪,杨太保,等.近半个世纪以来中国季风区气温与降水变化及其时空差异[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(2):186-192. [ Jia L, Zeng B, Yang T B, et al. Temperature and precipitation changes in the Chinese monsoon region during the recent half century and the spatio-temporal differences thereof[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015,51(2):186-192. ]



- [27] 郭慧,李栋梁,林纾,等.近50多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J].冰川冻土,2013,35(5):1165-1175. [ Guo H, Li D L, Lin S, et al. Temporal and spatial variation of precipitation over western China during 1954-2006[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(5):1165-1175. ]
- [28] 王艳姣,闫峰.1960-2010年中国降水区域分异及年代际变化特征[J].地理科学进展,2014,33(10):1354-1363. [ Wang Y J, Yan F. Regional differentiation and decadal change of precipitation in China in 1960-2010[J]. Progress in Geography, 2014,33(10):1354-1363. ]
- [29] 唐晶晶.1952-2007年间长江流域降水时空分布变化—全球变暖降水重新分配实例分析[D].上海:华东师范大学,2010. [ Tang J J. The temporal and spatial distribution of precipitation over Yangtze River Catchment from 1952 to 2007: Case study of precipitation redistribution under global warming[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010. ]
- [30] 李聪,肖子牛,张晓玲.近60年中国不同区域降水的气候变化特征[J].气象,2012,38(4):419-424. [ Li C, Xiao Z N, Zhang X L. Climatic characteristics of precipitation in various regions of China for the past 60 years[J]. Meteorological Monthly, 2012,38(4):419-424. ]
- [31] Cai Y J, Zhang M L, Peng Z C, et al. The  $\delta^{18}\text{O}$  variation of a stalagmite from Qixing Cave, Guizhou Province and indicated climate change during the Holocene[J]. Science Bulletin, 2001,46(22):1904-1908.
- [32] Wang B, Ding Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years[J]. Geophysical Research Letters, 2006,33(6):272-288.
- [33] Wang H. The Weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001,18(3):376-386.
- [34] Yang X L, Zhang P Z, Chen F H, et al. Modern stalagmite oxygen isotopic composition and its implications of climatic change from a high-elevation cave in the eastern Qinghai-Tibet Plateau over the past 50 years[J]. Science Bulletin, 2007,52(9):1238-1247.
- [35] 宗保云,李向磊,KATHAYAT Gayatri,等.亚洲季风的多尺度变化规律及其与全球气候变化的关系[J].地球环境学报,2017,8(3):185-193. [ Zong B Y, Li X L, KATHAYAT G et al. Asian monsoon variability on multiple timescales in the context of global climate changes[J]. Journal of Earth Environment, 2017,8(3):185-193. ]