

# 基于贵州高原地貌分区的降水时空异质性特征

朱 孟<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,2,3</sup>, 蒋 翼<sup>1,2</sup>, 黄登红<sup>1,2,3</sup>

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境  
国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘 要:**为探究贵州省高原山区不同地貌类型单元的降水时空异质性特征及其规律,利用贵州省 19 个气象站点 1951—2018 年共 68 a 的降水量、气温、湿度等数据,充分考虑不同海拔、经度与纬度对降水的影响,采用 Mann-Kendall 非参数突变检测、滑动平均与距平累积、反距离权重插值法等方法分析不同地貌类型区的降水及各影响因子的时空分布特征。结果表明:(1) 贵州省降水总体呈下降态势,长时间序列下气温升温趋势较明显,相对湿度下降速率大于降水下降速率,降水与气温呈正相关;(2) 非喀斯特地区降水呈微弱的上升趋势,其他 5 种地貌区降水均呈下降趋势,下降速率大小为:岩溶断陷盆地>岩溶高原>岩溶峡谷>岩溶槽谷>峰丛洼地;(3) 岩溶峡谷区多年间降水量整体处于平均值以上,降水较丰沛,没有明显的枯水期;其余 5 种地貌总体上有 1967—1980 年与 1993—2000 年两个丰水期,1951—1960 年、1985—1992 年和 2005—2018 年 3 个枯水期;(4) 除峰丛洼地无明显突变点外,非喀斯特(2013 年)、岩溶槽谷(1984 年)、岩溶断陷盆地(1986 年)、岩溶高原(1980 年)、岩溶峡谷(1986 年)发生显著突变;(5) 降水在空间特征上与经度呈正相关,与纬度和海拔呈负相关,不同地貌单元上降水空间分布特征为:岩溶高原<岩溶峡谷<岩溶槽谷<非喀<峰丛洼地<岩溶断陷盆地。掌握不同地貌区降水时空特征及其变化规律,可为降水引起的自然灾害预警提供科学依据。

**关键词:**降水; 地貌分区; 时空异质性; 贵州省

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0181-09

## Spatial and Temporal Heterogeneity of Precipitation Based on the Landforms of Guizhou Plateau

ZHU Meng<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhongfa<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yi<sup>1,2</sup>, HUANG Denghong<sup>1,2,3</sup>

(1. Karst Research Institute/Department Geography And Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to explore the spatial and temporal heterogeneity of precipitation and the influencing factors in areas with different geomorphic types, the 68-year data of the precipitation, temperature and humidity in 19 meteorological stations in Guizhou Province were taken as data sources. Taking into account different elevations, longitudes and latitudes for the influence of precipitation, we used Mann-Kendall nonparametric mutation detection, sliding average and anomaly cumulative analysis trend, and inverse distance weight interpolation method to express the precipitation of different geomorphological types and the spatial distribution characteristics of each impact factor. The results show that: (1) the precipitation in Guizhou Province has been generally declining, the temperature has been rising in the long time series, the relative humidity decline rate is greater than the precipitation decline rate; (2) the precipitation is positively correlated with the temperature, and the precipitation in the non-karst landform shows a slight upward trend, the a downward trend for the peak cluster depressions, karst troughs, karst fault basins, karst plateaus and karst gorges, and the rates of decline are different. The rates decrease in the order: karst fault basin>karst plateau>karst canyon>karst trough>peak cluster depression; (3) in non-karst, peak cluster depression, karst trough, karst fault basin and karst plateau, two wet periods were found in the periods of 1967—1980 and 1993—

收稿日期:2019-09-17

修回日期:2019-10-31

资助项目:国家自然科学基金地区项目“喀斯特石漠化地区生态资产与区域贫困耦合机制研究”(41661088);国家重点研发计划;项目(2018YFB0505400);贵州省高层次创新型人才培养计划“百”层次人才(黔科合平台人才(20165674))

第一作者:朱孟(1994—),男,贵州赫章人,在读硕士,主要研究方向为地理信息系统与生态水文遥感。E-mail:1769978063@qq.com

通信作者:周忠发(1969—),男,贵州遵义人,教授,博导,主要研究方向为喀斯特生态环境 GIS 与遥感。E-mail:fa6897@163.com

2000, three dry seasons occurred in the periods of 1951—1960, 1985—1992 and 2005—2018, while the precipitation in the karst gorge area is greater than the average, the precipitation is abundant, there is no obvious dry period; (4) except peak cluster depression, the mutation points in non-karst, karst troughs, karst fault basins, karst plateaus, and karst gorges occurred in 2013, 1984, 1986, 1980, and 1986, respectively, there is a significant mutation in annual precipitation; (5) precipitation is positively correlated with longitude in terms of the spatial characteristics, and negatively correlated with latitude and altitude; with respect to the spatial distribution characteristics of precipitation on different geomorphic units, the volumes of precipitation increase in the order: karst plateau < karst gorge < karst trough < non-K < peak cluster depression < karst fault basin. Understanding the temporal and spatial characteristics of precipitation in different geomorphological areas and their changing patterns can provide the scientific basis for natural disaster warning caused by precipitation.

**Keywords:** precipitation; landform zoning; temporal and spatial heterogeneity; Guizhou Province

贵州地处中国西南喀斯特地区的腹地,是我国喀斯特发育最典型复杂的高原山区,独特的自然地理与气候环境,形成了典型的以二元结构为基本特征的喀斯特山区,该区具有土壤贫瘠且分布不连续、地表水渗漏、表层土壤侵蚀退化严重,生态环境脆弱等特点<sup>[1-3]</sup>,降水及其频率是导致山体崩塌等地质灾害现象频发的两个重要影响因子<sup>[4-6]</sup>,分析并掌握贵州的降水时空特征与演变规律对于各地貌区域地质灾害的预警尤为重要。

目前,国内外学者针对降水特征从时间和空间两个维度都做了大量研究工作,其中部分学者利用多年降水数据研究了降水趋势、突变特征,并分析了年、季、月和日尺度上的降水特征<sup>[7-12]</sup>,学者们对不同地貌单元的研究主要集中在生境退化程度的评估<sup>[13]</sup>、土壤侵蚀定量归因<sup>[14]</sup>,耕地时空特征变化分析<sup>[15]</sup>,而较少有结合地貌类型分区与降水特征的研究进展。气温与湿度是调整水资源时空重分配的两个重要指标,气温直接关系着水体温度,间接对水汽交换、水生生物生长、沉积物的吸附释放、水解反应、光解反应及氧化还原反应等产生影响<sup>[16]</sup>,目前关于气温与降水特征的研究主要集中在小尺度区域,并取得了一定的研究成果<sup>[17-20]</sup>,总体而言年平均气温升高,极端降水发生的频次将增大,易引发洪涝灾害<sup>[21]</sup>。毛列尼·阿依提看等从降水湿度层结及大气能量结构特征分析了新疆近 10 a 的短时强降水特征,并论证了其过程与湿度层的机理<sup>[22]</sup>,曾波等分析了我国南方 50 a 冬季降水和相对湿度特征,得出两者呈明显正相关的结论<sup>[23]</sup>。现有文献针对降水空间特征的研究大多以行政区为单元进行阐述,然而极端降水引起的地质灾害与政区并没有内在的机理关联,更多的影响来源于不同地质地貌背景与降水的双重作用,不同地貌类型受降水侵蚀影响程度差异显著,打破行政界线分析不同地貌类型区的降水时空特征具有客观参考意义。

降水不仅受地貌、气温、湿度的影响,一定程度上

还与经度、纬度、海拔<sup>[24]</sup>等空间位置存在关系,因此本文基于贵州不同地貌分区<sup>[25]</sup>,以各地貌区接近均匀分布的 19 个站点气象数据,采用 Mann-Kendall 非参数突变检验,滑动平均与距平累积,反距离权重插值等方法,综合分析降水与影响因子在岩溶高原、岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶断陷盆地、峰丛洼地和非喀斯特等 6 种基本地貌类型上的时空异质性,以期对贵州省不同地貌区降水引起的洪涝、滑坡和泥石流等地质灾害的监测与预警提供参考。

## 1 研究区概况

贵州省地处我国西南地区的云贵高原隆起地带,位于 103°36′00″—109°35′00″E, 24°37′00″—29°13′00″N,南北长约 509 km,东西宽约 595 km,政区面积 17.62 万 km<sup>2</sup>。全省辖贵阳市、六盘水市、毕节市、安顺市、遵义市、铜仁市、黔东南州、黔西南州和黔南州 9 个市(州),88 个县(区)。地势西高东低,平均海拔约 1 100 m,由于特殊的地质构造与多云雨天气,山区地块破碎,省域喀斯特地貌广发育,占全省国土总面积的 61.9%,是我国喀斯特地貌发育最为典型的地区之一,地貌分为岩溶高原、岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶断陷盆地、峰丛洼地和非喀斯特等 6 种基本类型,其中 92.5% 的面积为山地和丘陵。气候类型为亚热带湿润季风气候,年降水量在 800~1 600 mm,多年平均气温为 15.5℃,多年平均湿度为 79.1%,受大气环流与不同地貌的影响,气候不稳定,降水分布不均匀。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

研究使用的地貌类型分区数据参考 Tong X 等<sup>[25]</sup>划分,其矢量数据经 ArcGIS 10.2 软件地理配准与空间校正矢量化获取。气象数据为 19 个站点 1951—2018 年共 68 a 数据,较均匀分布在贵州省 6 个地貌类型区(图 1),气象数据来源于中国气象局国

家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn>), 中国地面气候资料月值数据集, 包含月值降水 (mm)、气温 (°C)、相对湿度、经度、纬度、海拔 (m), 对于个别缺测数据, 采用多年同月平均值进行插补。

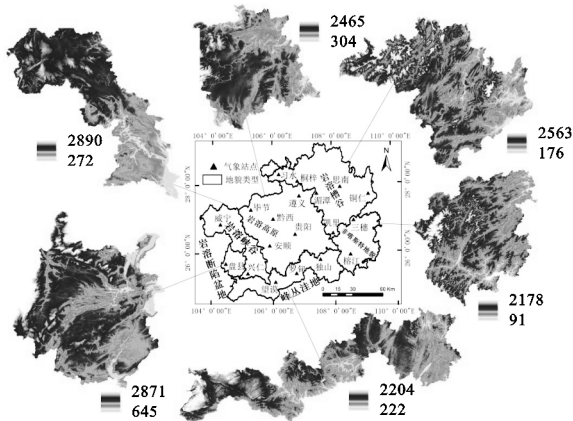


图 1 研究区地貌分区及站点分布

## 2.2 研究方法

(1) Mann-Kendall 检验。Mann-Kendall (M-K)<sup>[26-27]</sup> 突变检验法是一种非参数统计检验方法, 常用来分析降水时间序列的突变检验, 假设数据序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  为平稳的时间序列, 样本相对独立, 其中当  $x_i > x_j$  时,  $r_i = 1$ , 总累计数为  $F_K$ , 并定义统计量  $UF_K$ , 否则  $r_i = 0$  ( $j = 1, 2, \dots, i$ )。

$$UF_K = \frac{P_K - E(P_K)}{\sqrt{\text{var}(P_K)}} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

$$P_K = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$E(P_K) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{var}(P_K) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (4)$$

式中:  $P_K$  表示第  $i$  个时刻的数值大于  $j$  时刻数值的个数的累计值;  $E(P_K)$  和  $\text{var}(P_K)$  分别表示累计数  $P_K$  的均值和方差; 原假设为序列无趋势变化, 采用双向趋势检  $UB_K = -UF_K$ , 给定显著水平  $\alpha$ , 若  $|UF_K| < U_{\alpha/2}$ , 接受原假设, 序列存在变化趋势; 若  $|UF_K| \geq U_{\alpha/2}$ , 拒绝原假设, 序列无变化趋势。

(2) 滑动平均与距平累积。①滑动平均法也称为移动平均法, 它的基本思想是: 根据时间序列资料、逐项推移, 依次计算包含一定项数的序时平均值, 以反映长期趋势的方法。因此, 当时间序列的数值由于受周期变动和随机波动的影响, 起伏较大, 不易显示出事件的发展趋势时, 使用移动平均法可以消除这些因素的影响, 显示出事件的发展方向与趋势 (即趋势线), 然后依趋势线分析预测序列的长期趋势。计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$F_t = \frac{(A_t - 1 + A_t - 2 + A_t - 3 + \dots + A_t - n)}{n} \quad (6)$$

式中:  $F_t$  表示下一期的预测值;  $n$  表示移动平均的时期个数;  $A_t - 1$  表示前期实际值;  $A_t - 2, A_t - 3$  和  $A_t - n$  分别表示前两期、前三期直至前  $n$  期的实际值。

②距平累积指先计算每年的降水量、气温和相对湿度距平, 然后按年序累加, 得到距平累积序列, 计算公式<sup>[29]</sup>如下:

$$LP_i = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}) \quad (7)$$

式中:  $LP_i$  为第  $i$  年的距平累积值;  $R_i$  为第  $i$  年的降水量、气温值、相对湿度值;  $\bar{R}$  为降水量、气温、相对湿度的多年平均值。

(3) 反距离权重插值。反距离权重插值 (Inverse Distance Weighted, IDW)<sup>[30]</sup> 以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大。设平面上分布一系列离散点, 已知其坐标和值为  $X_i, Y_i, Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 根据周围离散点的值, 通过距离加权值求  $Z$  点值。

$$Z = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2} \right] / \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right] \quad (8)$$

式中:  $d_i^2 = (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2$ ; IDW 通过对邻近区域的每个采样点值平均运算获得内插单元值, 它是一个均分过程, 这一方法要求离散点均匀分布, 并且密集程度足以满足在分析中反映局部表面变化。

## 3 结果与分析

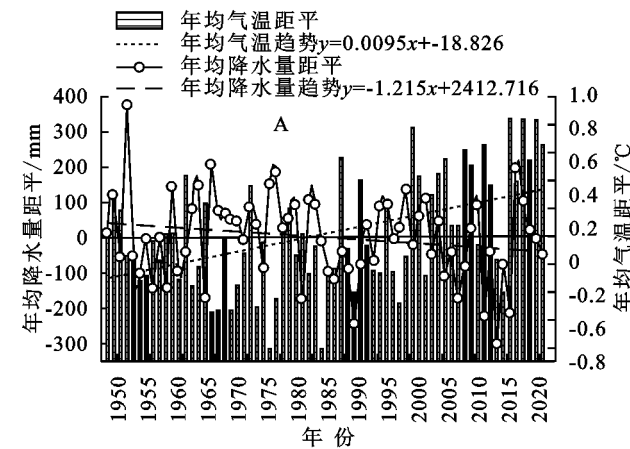
### 3.1 总体年际降水特征

通过对 19 个气象站点 68 a 的降水、气温、湿度月值实测数据进行处理, 首先计算各气象站点的气象因子年均值, 再计算出多年降水均值为 1 139.50 mm、多年气温均值为 15.50°C、多年湿度均值为 79.32%, 分别得到降水、气温、湿度年均值与多年均值的差与线性拟合函数及趋势, 见图 2。

从 1951—2018 年的 68 a 实测数据线性拟合函数反映出, 气温整体特征处于一个上升趋势, 与全球气候变暖趋势一致, 总体降水量与湿度均有不显著的下降趋势, 其中降水量的斜率 -1.215 小于湿度的斜率 -0.026, 表明年均降水量的整体下降趋势比年均湿度缓慢, 从降水量累积距平可知, 贵州省 68 a 来的降水变化特征可分为 6 个阶段, 3 个丰水期分别为 1951—1954 年、1961—1983 年和 1993—2000 年, 累积距平值分别为 460.06 mm, 1 132.52 mm, 508.82 mm, 其中 1954 年降水发生突变, 距平 374.16 mm, 达到了丰水期的最大值。3 个枯水期分别为 1955—



1960 年、1984—1992 年和 2001—2018 年,累积距平分别为-428.48 mm,-681.05 mm 和-840.08 mm,其中 1989 年与 2011 年降水量急剧下降,年距平值分



别为-242.23 mm,-301.49 mm,达到枯水期历史最低值。从图 2A 与 B 可得,气温长时间序列上升,湿度长时间序列下降,降水处于一个整体下降态势。

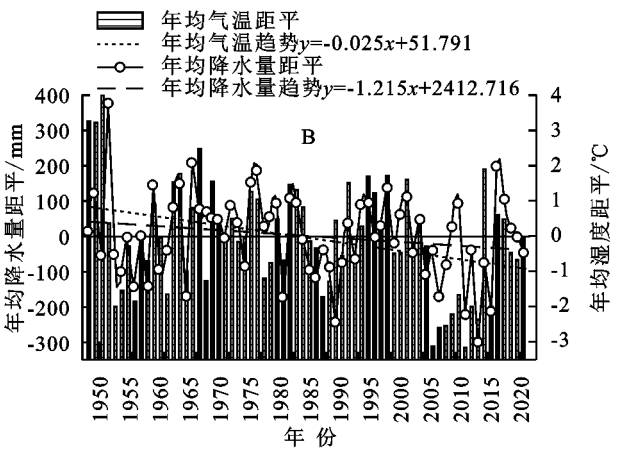


图 2 不同气象点气温、湿度与降水的关系

3.2 不同地貌类型降水时间特征

首先从整体上描述降水与气温、湿度在不同地貌背景下的关系,将 19 个站点归并到相应的地貌单元,并计算出每一种地貌单元的多年降水平均值、多年湿度平均值与多年湿度平均值,见图 3。显然,不同地貌类型分区的降水、气温与湿度都有显著差异,相比较 6 种不同地貌区的 3 个气候因子得到,降水量大小

为:岩溶高原<岩溶峡谷<岩溶槽谷<非喀<峰丛洼地<岩溶断陷盆地;气温高低为:岩溶峡谷<岩溶高原<岩溶断陷盆地<岩溶槽谷<非喀<峰丛洼地;相对湿度大小为:岩溶断陷盆地<峰丛洼地<岩溶槽谷<岩溶峡谷<岩溶高原<非喀,由图 3A 与 B 可知,降水与气温呈正相关,而湿度与降水在该 6 种不同地貌背景下无明显的线性关系。

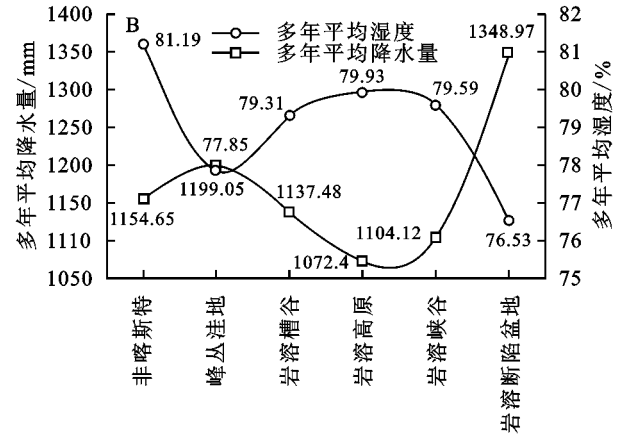
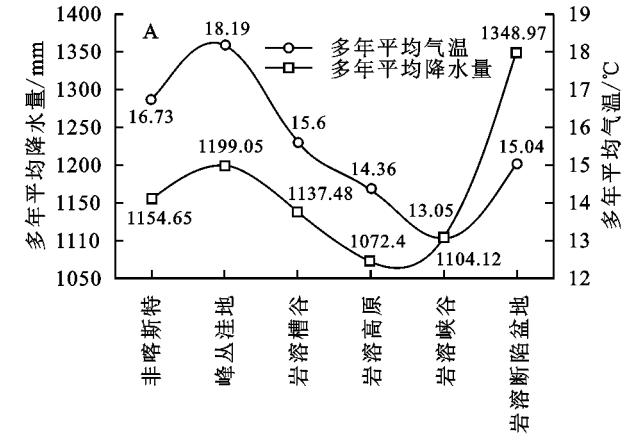


图 3 不同地貌类型的降水与气温、湿度的关系

为了更为准确地探究降水、气温与湿度在不同地貌分区的时间特征,以 68 a 时长序列数据为横坐标,各气象因子与多年平均值的差值为纵坐标,得到多年间不同地貌背景的降水距平、气温距平、湿度距平,以及趋势,见图 4—6。不同地貌单元背景下的降水长时间序列特征(图 4)得出,非喀斯特地貌的降水量有微弱的上升趋势,峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷都呈下降趋势,从 5 种地貌的多年降水线性拟合函数斜率可得,多年间的降水下降速率为,岩溶断陷盆地>岩溶高原>岩溶峡谷>岩溶槽谷>峰丛洼地,在 68 a 年的降水序列中,不同地貌的丰水期与枯水期见表 1。

由图 5 可以看出,68 a 长时间序列数据反映出气

温在不同地貌背景下均有上升,和全球变暖与贵州整体气温上升趋势一致,但增温速率有所差异,由线性拟合函数的斜率得,岩溶峡谷(0.015)>峰丛洼地(0.009)>岩溶高原(0.008)=岩溶断陷盆地(0.008)>岩溶槽谷(0.002)>非喀(0.001),表明在 6 种地貌类型中,岩溶峡谷多年间的升温最快,峰丛洼地、岩溶高原与岩溶断陷盆地 3 种地貌类型基本持平,而岩溶槽谷与非喀斯特区域增温较缓。由图 6,湿度在岩溶峡谷、岩溶高原、岩溶断陷盆地、岩溶槽谷、非喀斯特等 5 种地貌类型中总体均呈下降趋势,且下降速率岩溶槽谷>岩溶峡谷>岩溶断陷盆地>岩溶高原>非喀斯特,而峰丛洼地年均湿度呈微弱上升趋势。

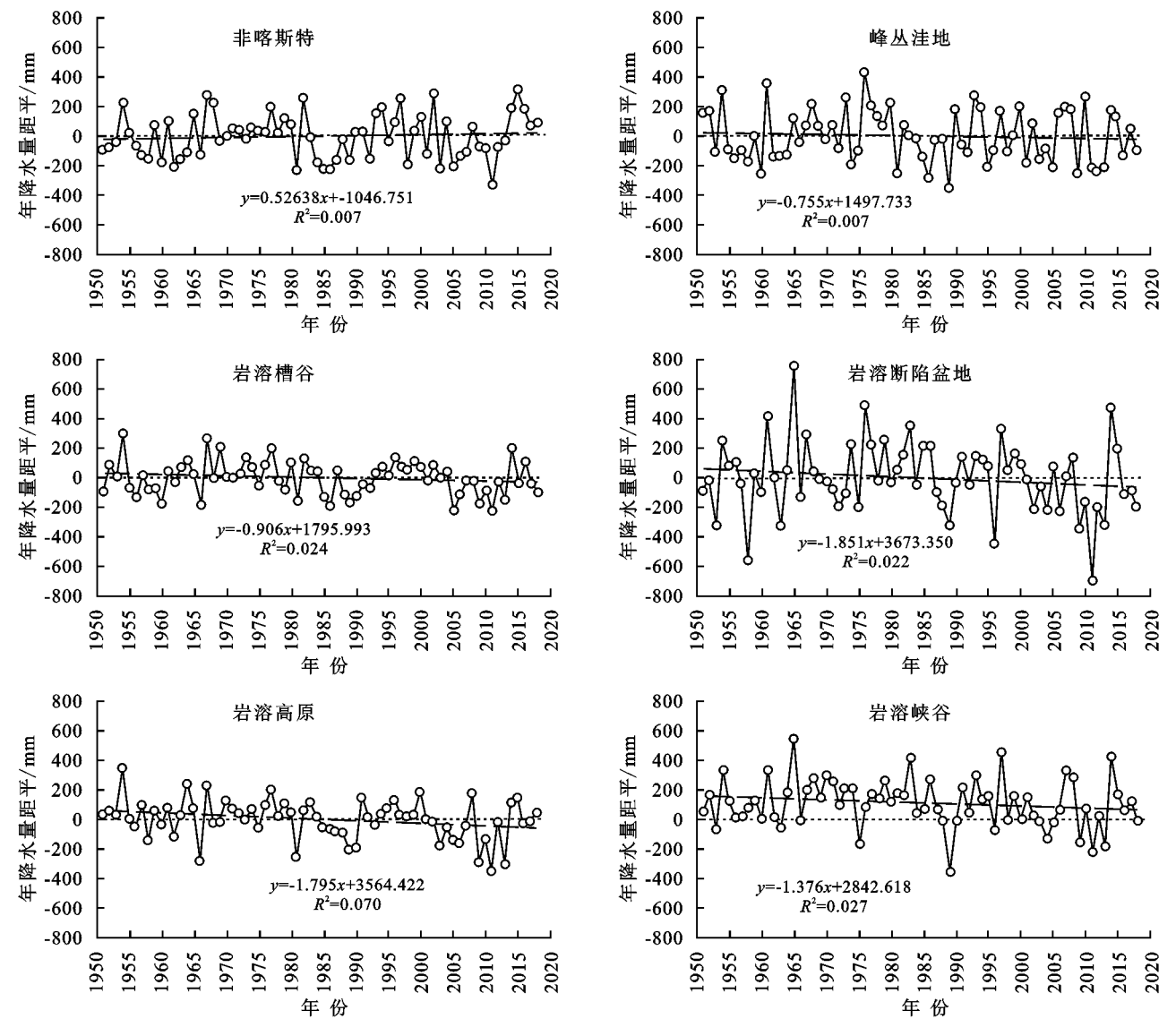


图 4 1951—2018 年不同地貌降水距平及趋势

表 1 不同地貌类型区降水变化

地貌 类型	丰水期/ 次	时间	降水量累积 距平/mm	枯水期/ 次	时间	降水量累积 距平/mm
喀斯特	3	1967—1982	1126.20	3	1951—1966	—753.95
		1993—2002	797.00		1983—1992	—1075.15
		2014—2018	842.55		2003—2013	—1082.40
峰丛洼地	2	1965—1980	1430.58	3	1951—1964	—306.52
		1993—2010	437.65		1981—1992	—1013.02
		—	—		2011—2018	—548.69
岩溶槽谷	2	1967—1984	1048.84	3	1951—1966	—159.56
		1993—2004	707.66		1985—1922	—788.11
		—	—		2005—2018	—880.39
岩溶断陷盆地	2	1961—1968	1094.65	3	1951—1960	—666.49
		1976—2000	1892.27		1969—1975	—384.18
		—	—		2001—2018	—1936.24
岩溶高原	2	1951—1980	1407.85	2	1981—1990	—677.40
		1991—2000	654.44		2001—2018	—1209.09
岩溶峡谷		无明显丰水期与枯水期,降水量累积距平为 7594.27 mm,总体呈下降趋势				

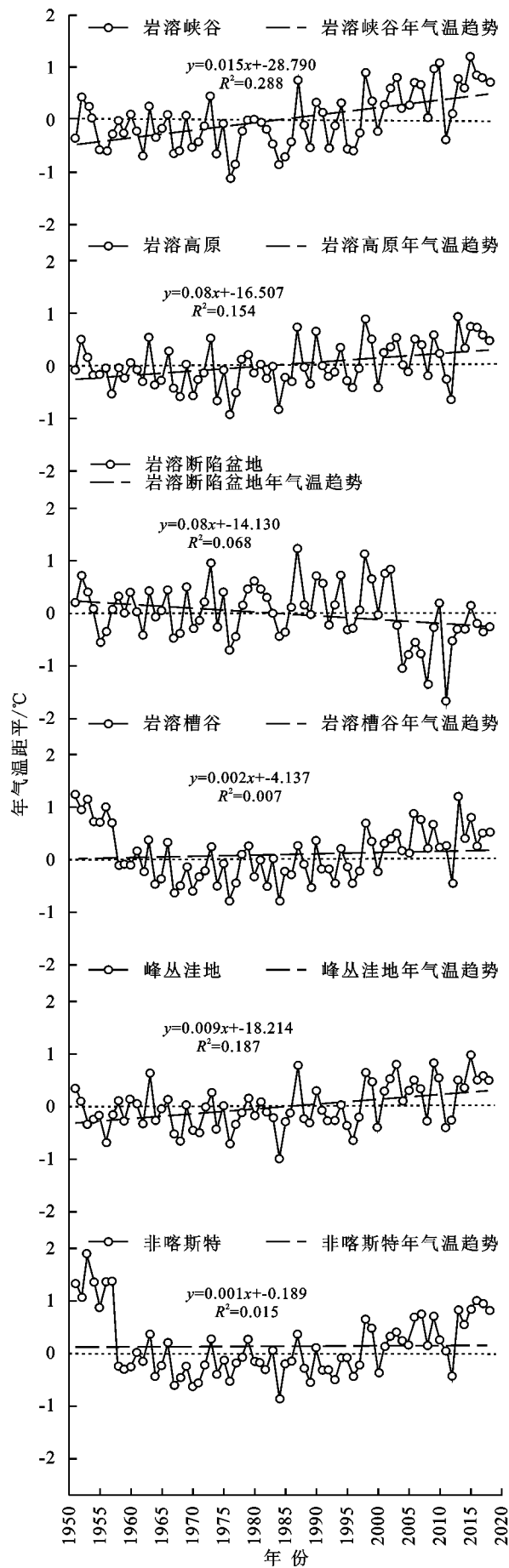


图 5 1951—2018 年不同地貌气温距平及趋势

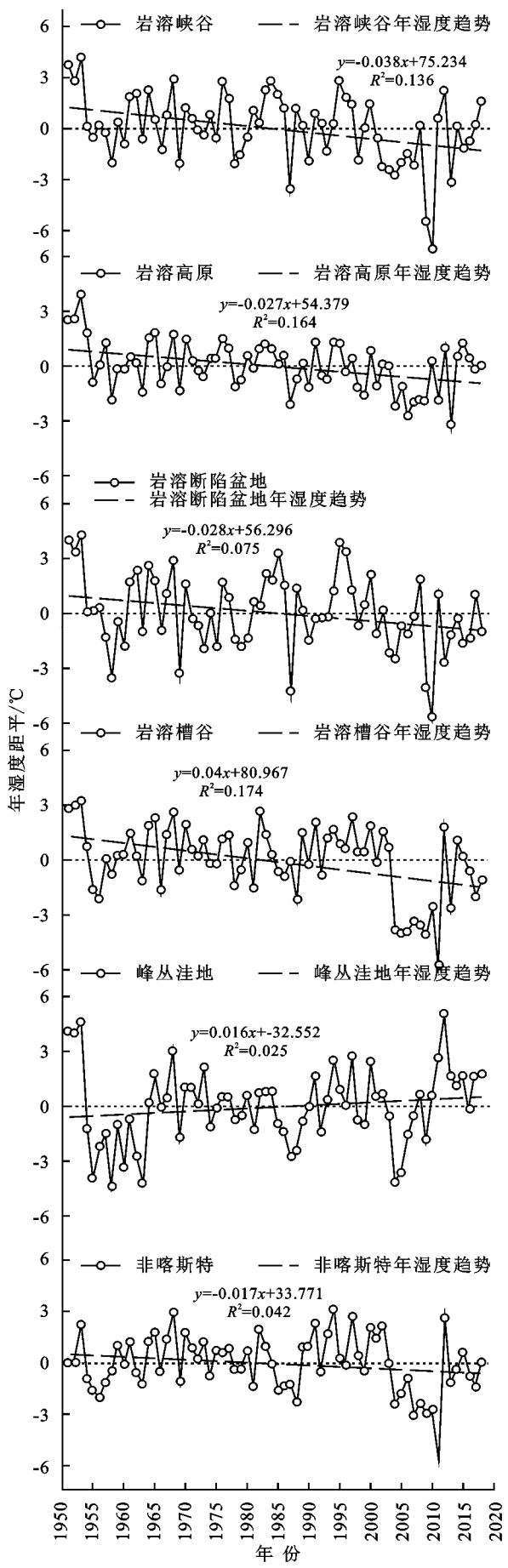


图 6 1951—2018 年不同地貌湿度距平及趋势

3.3 降水的 M-K 突变分析

利用 M-K 突变检验对贵州省 68 a 不同地貌单元逐年平均降水进行分析(图 7),显著性水平  $\alpha=0.05$ (临界值为 $\pm 1.96$ ),信度区间内 UF 与 UB 交叉点即为降水突变点,观察降水 UF 曲线,非喀斯特、峰丛洼地、岩溶槽谷和岩溶断陷盆地都围绕统计值 0 上下波动,且统计值未超过 95%置信度水平临界线,表明变化趋势不显著,6 种地貌降水在置信区间内 UF 与 UB 相交次数 $\geq 2$ 次,出现了多个突变点,经滑动 T/F 0.05 信度检验,非喀斯特地貌降水在 2013 年发生显著跳跃,峰丛洼地降水无显著突变点,岩溶槽谷降水在 1984 年前后突变显著,岩溶断陷盆地降水在相交点无明显变化,在 1986 年突变显著,岩溶高原降水在 1980 年发生明显突变,在 2009 年 UF 曲线超过了 95%置信度水平临界线,表明降水下降趋势显著,岩溶峡谷降水在 1986 年发生突变,统计值在 1998 年以前在 0 附近波动,表明降水变化趋势不明显,降水增加与下降趋势也不显著,1998—2018 年,降水一直呈下降趋势,UF 统计值未超过 95%信度线,下降趋势不显著。

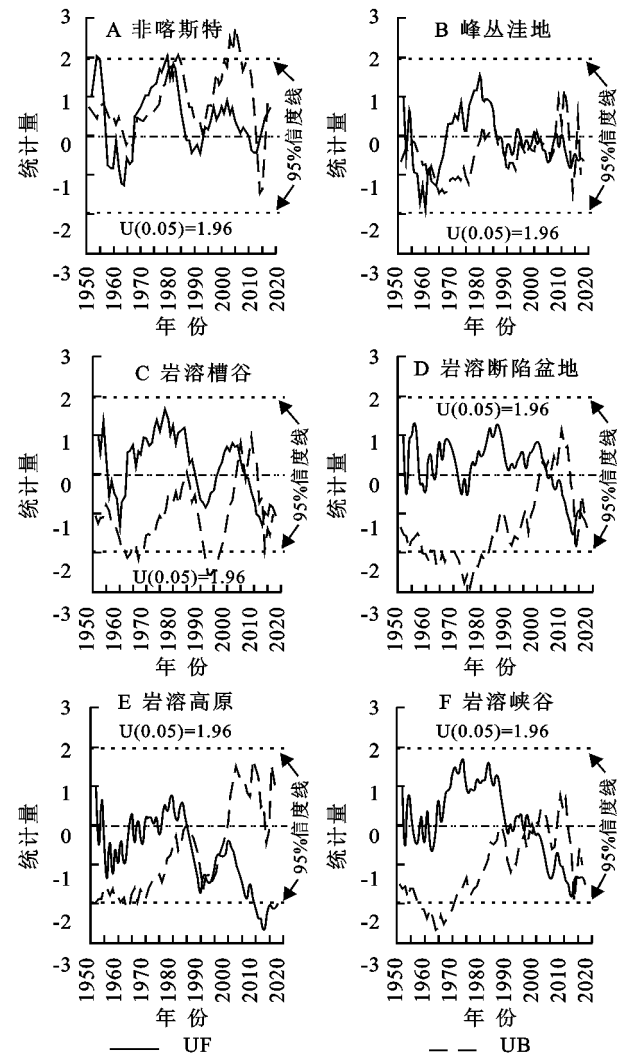


图 7 不同地貌类型区降水 M-K 突变检验

3.4 不同地貌类型降水空间特征

降水除了受气温与湿度影响较大,一定程度上还与地貌单元所处的经度、纬度和海拔相关,见图 8,分别控制变量经度、纬度和海拔在不同地貌背景下由小到大排序,观察降水随其变化的趋势与规律,显然,不同地貌单元下降水随各因子都在波动变化,但整体又有规可循。其中,降水与经度呈正相关,与纬度和海拔呈负相关,降水随经度的上升斜率为 4.312 8,降水随经度变化的相关性  $R^2$  为 0.034。降水较海拔与纬度有较明显的相关性,降水—纬度  $R^2(0.25) >$  降水—海拔  $R^2(0.035)$ ,由降水—纬度斜率  $|-11.685| >$  降水—海拔  $|-4.386|$ ,可知降水随纬度增加的下降速率大于海拔。

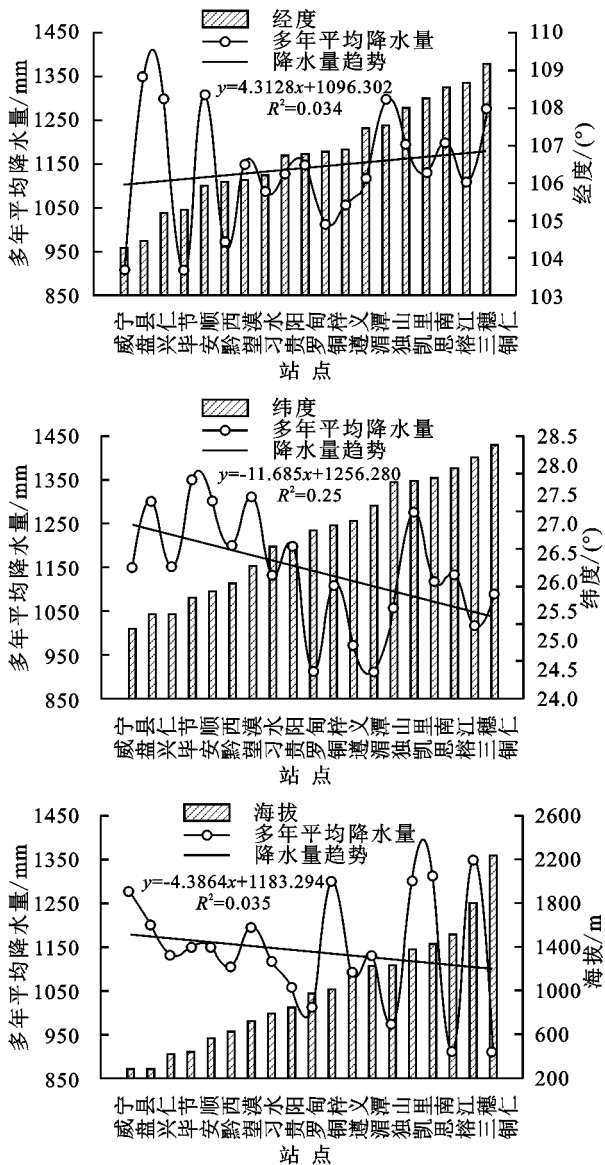


图 8 经度、纬度和海拔与降水量的关系

如图 9 所示,以较均匀分布贵州省的 19 个气象站点数据为中心,采用反距离权重插值方法分别获得不同地貌与降水、气温、湿度、海拔、经度、纬度的空间分布特征。整体上贵州省西南部、南部与东部



降水大于西北部、北部与西部,大体呈三带分布,威宁—黔西—桐梓一带降水较少,水城—安顺—贵阳—思南一带持中,盘县—兴仁—独山—榕江一带降水较为丰沛。气温与降水的空间分布特征相似性极高,形成以望谟、罗甸与榕江为中心逐渐向中部、北部及西北部递减的态势。湿度全省分布不均,其中七星关区、黔西、独山、三穗、湄潭和习水一带较为突出,西南部与东北部次之。从不同地貌与各气象因子的空间分布特征来看,降水:岩溶高原<岩溶峡谷<岩

溶槽谷<非喀<峰丛洼地<岩溶断陷盆地;气温:岩溶峡谷<岩溶高原<岩溶断陷盆地<岩溶槽谷<非喀<峰丛洼地;湿度:岩溶断陷盆地<峰丛洼地<岩溶槽谷<岩溶峡谷<岩溶高原<非喀;海拔:非喀<岩溶槽谷<峰丛洼地<岩溶高原<岩溶断陷盆地<岩溶峡谷;经度:岩溶断陷盆地<岩溶峡谷<岩溶高原<峰丛洼地<岩溶槽谷<非喀;纬度:峰丛洼地<岩溶断陷盆地<非喀<岩溶峡谷<岩溶高原<岩溶槽谷。

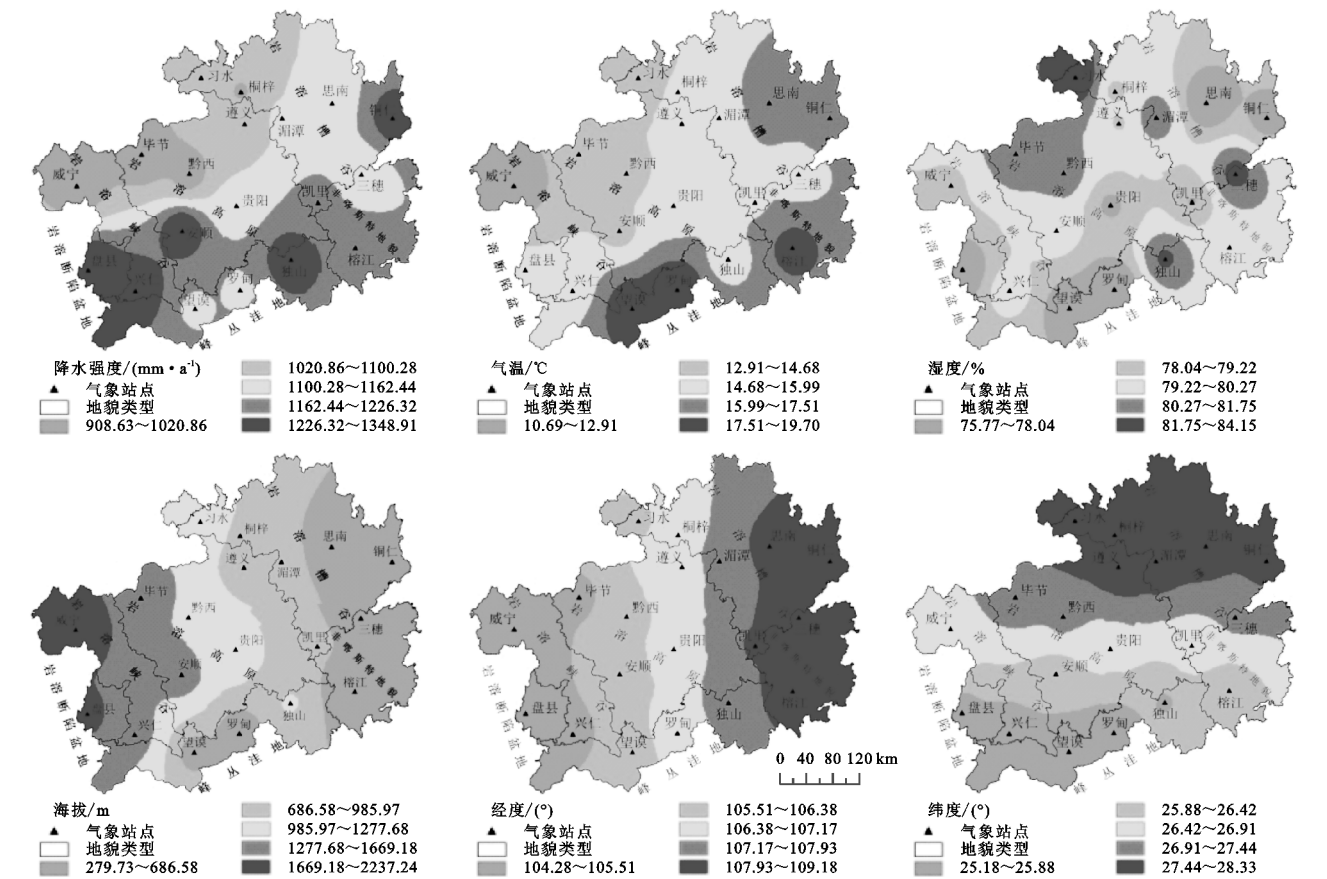


图 9 不同地貌类型区气温、湿度、降水强度空间分布

## 4 结论

(1) 从 68 a 长时序的降水、气温与相对湿度距平线性拟合函数可得,贵州省降水总体呈下降态势,气温和相对湿度作为影响降水的两个重要因子,气温长时序时间下升温趋势较明显,相对湿度下降速率大于降水下降速率。

(2) 降水、气温与相对湿度在不同地貌单元的时间特征异质性显著,降水与气温呈正相关,从 6 种地貌背景的降水长时序距平趋势线得,只有非喀斯特地貌的降水呈微弱的上升趋势,其余 5 种地貌(峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原与岩溶峡谷)均呈下降趋势,下降速率有所差异,岩溶断陷盆地>岩溶高原>岩溶峡谷>岩溶槽谷>峰丛洼地。

(3) 岩溶峡谷区多年间降水充沛,整体处于平均值以上,其余 5 种地貌(非喀、峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶断陷盆地与岩溶高原)均有丰水期与枯水期,总体平均划分为 2 个丰水期与 3 个枯水期,其中 1967—1980 年与 1993—2000 年降水丰沛,1951—1960 年、1985—1992 年和 2005—2018 年降水相对较少。经降水 M-K 突变分析与滑动 T/F 检验,除峰丛洼地无明显突变点外,其余 5 种地貌(非喀斯特、岩溶槽谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷)均有显著突变点,其突变时间分别为:2013 年、1984 年、1986 年、1980 年和 1986 年。

(4) 不同地貌单元上降水空间分布差异显著,降水与经度呈正相关,与纬度和海拔呈负相关,岩溶高原<岩溶峡谷<岩溶槽谷<非喀<峰丛洼地<岩溶断陷盆地。



基于 1951—2018 年 68 a 时长序列的降水、气温和相对湿度数据,结合经、纬度和海拔的地域差异特征,分析了其整体时间序列特征及不同地貌(非喀斯特、峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原与岩溶峡谷)单元下的时空演变。通过 68 a 的气象数据在现有研究基础上增加了时长序列,提高了置信度,并增加了气温、湿度、经、纬度和海拔的耦合分析。一方面,降水还受大气环流等其他诸多因素的影响,另一方面,受现有地貌划分精度和气象数据的局限性,虽在一定程度上能分析各地貌背景下的时空演变规律,但对于更精准的推演需要更充分和细致的数据,下一步拟布设各地貌单元下的样点实测气象数据,结合更细化的地貌类型划分数据,进一步揭示地貌分区单元下降水时空演变规律。

#### 参考文献:

- [1] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21):6353-6362.
- [2] 侯文娟,高江波,彭韬,等.结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J].地理科学进展,2016,35(3):320-330.
- [3] 杨江州,周旭,程东亚,等.贵州省不同地貌类型区的 MOD16 蒸散发变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):216-222.
- [4] 时光训,刘建,马力,等.1970—2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J].水文,2017,37(4):7-85.
- [5] 刘占明,陈子燊.韶关市极端降水变化趋势分析[J].人民珠江,2017,38(6):6-10.
- [6] 闫星光,吴琳娜,宋具兰,等.1951—2013 年贵州省降水时空分布研究[J].科技通报,2019,35(2):20-25.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 洪美玲,何士华.1961—2010 年怒江流域降雨时空变化[J].水土保持研究,2019,45(7):7-25210,54.
- [10] 宗天韵,周玮莹,周平.南岭山地 1968 到 2015 年降雨的时空变化特征研究[J].生态科学,2019,38(2):182-190.
- [11] 覃平阳,吴国灿.1951—2015 年潍坊市降水特征分析[J].现代农业科技,2019(10):158-161[2019-06-14].
- [12] 张雪琴,刘树林,冯坤,等.毛乌素沙区 1961—2016 年降水特征[J].中国沙漠,2019(6):1-10[2019-06-14].
- [13] 郜红娟,蔡广鹏,张朝琼,等.基于 InVEST 模型的贵州山区不同地貌区生境退化程度评估[J].西部林业科学,2016,45(4):90-94,106.
- [14] Wang Huan, Gao Jiangbo, Hou Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion indifferent geomorphological types in karst areas;Based on the geodetector method[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(2):271-286.
- [15] Gao Xiaoyu, Cheng Weiming, Ma Ting, et al. Spatial-temporal distribution of cropland in China based on geomorphologic regionalization during 1990—2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(2):180-196.
- [16] 于越男,谢在刚,汪天祥,等.碧流河水库近 30 年气温与降水变化特征分析[J].东北水利水电,2019,37(3):38-41.
- [17] 苗运玲,秦榕,张云惠,等.东天山北坡气温与降水时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(3):219-223,231.
- [18] 刘卫林,刘丽娜,朱圣男,等.基于 SDSM 的赣江流域未来降水与气温的时空变化分析[J].水力发电,2019,45(7):7-10,54.
- [19] 陆福志,鹿化煜.秦岭—大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示[J].地理学报,2019,74(5):875-888.
- [20] 周德宏,王英,赵奕兵,等.羊毛湾水库流域气温和降水变化特征分析[J].中国农学通报,2019(17):81-89.
- [21] 刘濛濛,隆永兰.巴音布鲁克近 58 年气候变化特征分析[J].干旱区地理,2019,42(4):715-723.
- [22] 毛列尼·阿依提看,玉素甫·木沙,郭品文.近 10 a 新疆短时强降水湿度层结及大气能量结构特征分析[J].沙漠与绿洲象,2017,11(2):43-49.
- [23] 曾波,王钦.我国南方地区 50 a 冬季降水和相对湿度特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):828-839.
- [24] 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.
- [25] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projectsOn longtenn vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China [J]. International Journal of Applied Earth Observation&Geoinformation.2017.54.105-113.
- [26] Mannhb. Non-parametric Test Against Trend[J]. Econom-rica, 1945,13:245-259.
- [27] Kendallmg, Mauriceg. Rank correlation methods[M]. London, Griffin, 1948.
- [28] 刘吉余,张靖.应用加权滑动平均法定量预测砂体[J].石油地质与工程,1997(4):6-7.
- [29] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003(2):1-5.
- [30] 朱求安,张万昌,余钧辉.基于 GIS 的空间插值方法研究[J].江西师范大学学报:自然科学版,2004,28(2):183-188.