

基于均一化序列的贵州高原 1960 – 2018 年 气温时空变化特征分析

赵志龙^{1,2}, 罗 娅¹, 杨胜天^{3,4}, 余军林⁵, 刘 洋¹, 石春茂¹, 徐 雪¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 山东省菏泽第一中学, 山东 菏泽 274000;

3. 贵州师范大学 生态文明学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 北京师范大学 水科学研究院,

北京 100875; 5. 贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 基于均一化处理后的 1960 – 2018 年贵州高原 34 个气象站的日均气温资料, 利用 Mann – Kendall 检验、启发式分割算法、极点对称模态分解方法(ESMD)等方法对贵州高原不同时空尺度下的气温变化规律进行研究。结果表明: 1960 – 2018 年贵州高原气温显著升高, 呈现“非线性、非平稳、跳跃式”的上升特征, 气温倾向率为 0.171 0 °C/10a, 并在 1997 年发生突变; 1998 – 2012 年出现与全球增温“停滞”相一致的升温减缓现象; 春夏秋冬四季气温均检测到突变, 秋冬季气温对全年升温的贡献最大, 夏季最小; 空间上呈现全域升温的态势, 其中第 II 阶梯对整个区域的贡献率最大; 四季气温变化的分布与全年类似, 除春季外的季节均呈自西向东 3 级阶梯升温倾向率减小的格局。研究结果对于贵州高原提高应对全球气候变暖的能力具有现实意义, 可为该地区合理利用水热资源、制定可持续发展战略提供决策支持。

关键词: 气温; 时空变化; 均一性; 启发式分割算法; 极点对称模态分解方法(ESMD); 贵州高原

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0081-09

Characteristics of temperature spatiotemporal variations in Guizhou Plateau from 1960 to 2018 based on homogenized sequence

ZHAO Zhilong^{1,2}, LUO Ya¹, YANG Shengtian^{3,4}, YU Junlin⁵, LIU Yang¹, SHI Chunmao¹, XU Xue¹

(1. School of Geographical and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. No. 1 Middle School of Heze Shandong, Heze 274000, China; 3. Academy of Ecological Civilization, Guizhou

Normal University, Guiyang 550025, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing

100875, China; 5. Guizhou Provincial Water Conservancy Research Institute, Guiyang 550001, China)

Abstract: Based on the homogenized average daily temperature observations of 34 meteorological stations in Guizhou Plateau from 1960 to 2018, the characteristics of temperature variations in Guizhou Plateau at different spatiotemporal scales was studied using the Mann – Kendall (M – K) test, Bernaola – Galavan (B – G) algorithm, extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD) and other methods. The results show that in the past 59 years, the temperature in Guizhou Plateau has significantly increased, with an inclination rate of 0.171 0 °C/10a. Temperature abrupt changes occurred in 1997, and showed a rising trend of “non-linear – non-stationary – jumping”. From 1998 to 2012, the phenomenon of warming mitigation was consistent with the “stagnation” of global warming. Abrupt changes were detected in all of the four seasons. Temperatures of autumn and winter contributed the most to the annual temperature increase, whereas that of summer contributed the least. The temperature showed a rising trend in all regions spatially, among which the second step area contributed the most to the warming of the entire region. The

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-12-10

基金项目: 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划项目(黔教合 KY 字[2018]042); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y016 号); 贵州省 2019 年度哲学社会科学规划重点课题(19GZZD07); 贵州省水利科技项目(2020ZC01)

作者简介: 赵志龙(1993-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文遥感与水土资源保护。

通讯作者: 罗 娅(1979-), 女, 贵州毕节人, 博士, 教授, 研究方向为生态水文遥感与水土资源保护。

distribution of temperature variation of four seasons was similar to that of the annual temperature variation, the temperature inclination rate all decreased from west to east in the third step area except in spring. The research results are of practical significance for the Guizhou Plateau to improve its ability in response to global warming, and can provide decision support for the rational use of hydrothermal resources and the formulation of sustainable development strategies in the region.

Key words: temperature; spatiotemporal variation; homogeneity; Bernaola - Galavan (B - G) algorithm; extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD); Guizhou Plateau

1 研究背景

气候变化问题是 21 世纪人类生存和发展面临的严峻挑战^[1], 气温变化作为衡量气候变化的重要指标之一, 一直是广大专家学者密切关注的热点^[2-5]。IPCC 第五次评估报告指出, 过去百年来 (1880 - 2012 年) 全球平均温度已升高 0.85 °C, 过去 30 年中每 10 年地表温度的增暖幅度均高于 1850 年以来的任何时期^[6]。然而中国区域的气候增暖更甚于全球平均状况, 最近发表的首套均一化的百年器测气温序列 (1909 - 2011 年) 显示区域平均气温升高约 1.5 °C^[7]。我国幅员辽阔, 不同区域对于全球气候变化的响应亦有不同。深入分析区域性的气候变化特征, 有利于准确认识及评估该区域在全球变暖背景下的气候变化规律及特点。贵州高原地处我国长江流域与珠江流域的分水岭, 受到西南季风与东亚季风的共同影响, 属典型的低纬高原亚热带喀斯特湿润区, 地形复杂破碎, 生态系统脆弱, 区域小气候多样, 气候敏感性较强, 近年来极端高温干旱事件的频繁发生给该地区的农业生产及人民生活造成了巨大影响^[8-9]。研究贵州高原地区的气温变化特征及其规律, 对提高该地区应对全球气候变暖的能力具有重要的现实意义。

针对贵州高原气温变化, 朱大运等^[10]分析了 1960 - 2016 年的年与季节尺度变化特征, 结果表明升温区域与降温区域交替并存, 年均气温在 2001 年发生突变, 整体周期性特征不明显; 蒋啸等^[11]通过分析大于等于 10 °C 积温的时空变化, 发现积温突变发生于 1997 年, 积温变化主周期约为 3 ~ 5 和 8 a; 严小冬等^[12]分析了贵州冬季气温的特征, 得出贵州冬季气温整体上升并与秋季东北太平洋、赤道东太平洋和东印度洋区域的海温有显著相关性的结论。可以看出, 目前有关贵州地区气温变化的研究已较为深入, 但仍旧存在些许不足: 首先, 在对贵州高原气温变化的研究中极少注重数据的均一性问题。资料显示, 贵州高原属于气象台站环境破坏较为严重的地区, 大多数气象站点存在迁站、仪器更换等非气

候因素的影响^[13-14], 可能导致气候序列出现非均一性断点, 直接影响数据的分析结果。目前以均一化的数据集分析气候变化的工作已在国内外许多地区展开^[15-18], 然而迄今未见基于均一化数据集分析贵州高原气温特征的研究。其次, 已有研究多针对贵州地区的整体气温变化特征, 忽略了其在全球气候变化背景下的区域响应, 也缺少对贵州高原长时间序列下气温变化趋势、变化幅度、空间差异等的深入研究。因此, 本研究基于贵州高原 34 个气象站点 1960 - 2018 年均一化调整后的气温序列, 针对贵州高原不同地区、不同季节的气温变化趋势的时空特征进行深入分析, 探讨全球变暖背景下贵州高原气温变化的原因及其可能的影响机制, 结果可为贵州地区顺应气候变化规律, 制定区域可持续发展战略提供科学的理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

贵州高原位于我国西南地区腹地, 地理位置处于 103°31'E ~ 109°30'E、24°30'N ~ 29°13'N, 海拔高度 147.8 ~ 2 900.6 m, 平均海拔约 1 100 m, 西接云贵高原, 北邻四川盆地, 地势呈西北高、东南低的倾斜分布。其地形复杂破碎, 喀斯特地貌广泛分布, 承灾能力较低。受低纬度高原及复杂地貌的共同影响, 贵州高原年平均气温较低, 但水热条件的垂直变化特征明显, 对区域气候变化的响应显著。

2.2 数据来源

原始的气温资料来源于中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)^[19], 该数据集下载自中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>)。由于贵州地区 1960 年之前的气象数据存在较严重的缺测问题, 为保证数据质量, 选取 1960 年 1 月 1 日至 2019 年 2 月 28 日 34 个国家级气象台站的日均气温数据。对于少数数据缺测的时间段, 利用周边气象站点数据以多元回归方法进行插补, 以保证气温序列的连续性与完整性。基于 PMFT、PMTT 方法^[20-22]对插补后的气温序列进行均一性检验, 其中选取了

周边省份12个台站的气温数据辅助构建参考序列,利用RHtests V4软件^[23]并参考《贵州省基层气象台站简史》进行了均一性订正,获得了贵州1960–2018年的均一化气温序列,均一性订正后的数据通过了显著性检验。

在分析四季变化时,春季为3–5月,夏季为6–8月,秋季为9–11月,冬季为12月至次年2月。根据34个气象台站所在的海拔高程并结合贵州高原实际海拔高差,分别以海拔高程1500和800 m为界限将贵州高原大致分为3级阶梯,第Ⅰ阶梯(海拔高程大于1500 m)位于贵州高原西北部,与滇西北高原相连;第Ⅱ阶梯(海拔高程为800~1500 m)位于贵州高原中部,为贵州高原的主体部分;第Ⅲ阶梯(海拔高程小于800 m)处在高原东部及南部,与湘西及桂北山地丘陵相连,同时也是我国地势第二阶梯东部边缘地带。研究区气象台站分布以及3级阶梯划分见图1。

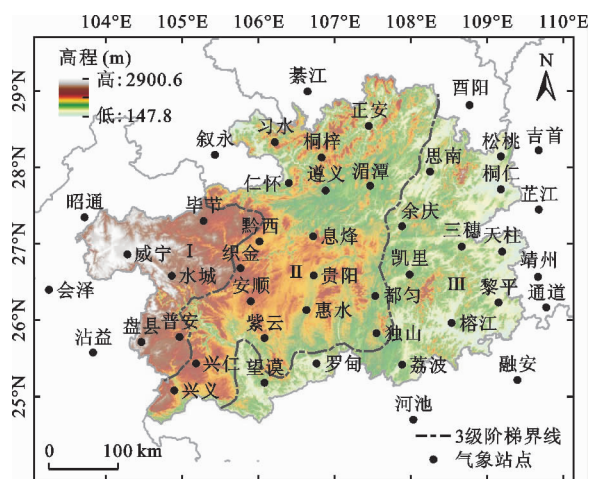


图1 研究区气象台站分布及3级阶梯划分示意图

2.3 研究方法

2.3.1 M–K趋势检验 Mann–Kendall (M–K) 趋势检验是世界气象组织推荐的一种非参数统计方法,常被用来分析气温、降水、径流等气象水文要素时间序列的趋势变化,以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称,计算方法参见参考文献[24]。

2.3.2 启发式分割算法(B–G分割算法) 传统的时间序列突变点诊断方法有M–K秩检验法、滑动t/F检验法、有序聚类分析法等,它们在实际应用中各有优势,但是在处理非线性、非平稳的时间序列时均存在不同程度的缺陷^[25]。B–G分割算法最早在2001年由Bernaola–Galavan等在研究心电图序列时提出,该方法将突变检测视为分割问题,可以将

非平稳序列分割为不同均值的平稳子序列,通过找出各子序列最大均值差是否满足不同统计显著性来判断突变点^[26]。各子序列表征了不同的物理背景,分解得到的各均值段的尺度具有可变性,且该方法分割时采用多次迭代、一分为二的方法,计算效率大大提高,实用性较好^[27]。

2.3.3 极点对称模态分解方法(ESMD) 极点对称模态分解方法(extreme-point symmetric mode decomposition, ESMD)是海洋学家黄锬提出的希尔伯特–黄变换(Hilbert–Huang transform, HHT)方法的最新发展^[28]。经验模态分解EMD(empirical mode decomposition)方法可以直接将时间序列分解为若干个本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)以及趋势项R,与基于谐波基和小波基函数的傅里叶分析和小波分析不同,EMD无需指定所分析离散时间序列的基函数,剥离出的IMF分量体现了基于不同时间尺度的原时间序列的局部特征。HHT方法以EMD方法为基础,其分解模态不但频率可变,振幅也可变,非常适用于非线性、非平稳的时间序列,是一种数据自适应的分析方法。ESMD方法在HHT方法的基础上借鉴了EMD的思想,在观测数据的趋势分离、异常诊断等方面具有独到优势^[29]。近年来,ESMD方法已被广泛用于检测气候、水文等时间序列的尺度变化特征^[30–32]。本文利用ESMD方法将气温序列分解出若干个IMF分量及趋势项R,并利用R来分析时间序列的非线性变化趋势。

2.3.4 贡献率的计算方法 除上述几种方法,文中还用到了两个贡献率:一是ESMD的趋势项R对原始气温序列的方差贡献率,公式见文献[33];二是不同分区对整个地区或不同季节对全年的气温变化速率的贡献率,公式见文献[34]。

3 结果与分析

3.1 年均及季均气温时间变化特征

1960–2018年贵州高原年均气温随时间变化趋势见图2。由图2可知:(1)1960–2018年贵州高原年均气温呈显著上升趋势(通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验),线性气温倾向率为 $0.1710\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,略高于中国区域1909–2011年平均增温速率。(2)从年际角度看,1960–2018年贵州高原年均气温为 $15.38\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温呈现出先下降后上升的趋势。年均气温最高值出现在2015年,为 $16.36\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低值出现在1984年,为 $14.47\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低值与最高值之间相差 $1.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(3)从年代际角度看,贵州高原气温在

20 世纪 60 年代年均气温相对稳定,有略微下降的趋势;70-80 年代气温变化幅度较大,整个气温序列的最小值以及 20 世纪的次大值均在此年代出现;90 年代以来气温持续上升,尤其是 2013 年以来,年均气温上升到了新的高位。(4)年均气温线性拟合与实际的变化趋势并不十分贴切,其随时间的变化呈现出较强的非线性变化特征。

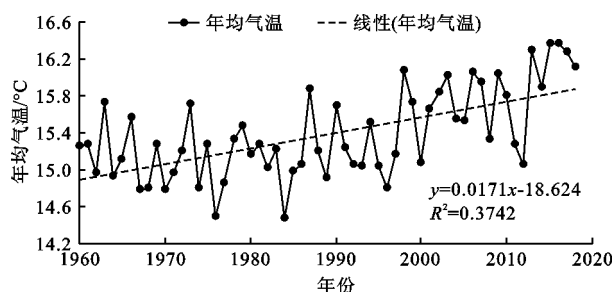


图2 1960-2018 年贵州高原年均气温随时间变化趋势

ESMD 方法本身具有自适应性及时间上的局部性特点,适用于非线性、非平稳序列的时频分析,相比其他方法能更好地提取趋势信息。同样,B-G 分割算法也适用于对非线性、非平稳序列突变信息的提取。因此,利用 ESMD 方法对贵州高原 3 级阶梯以及四季平均气温进行分解,在滤除年际的波动变化后,获取其趋势项 R ;利用 B-G 分割算法对气温序列进行分割(最小分割尺度设为 15 a),获取子序列间显著性最强的突变点。

图 3 展现了 1960-2018 年贵州高原及 3 级阶梯区域的年均气温变化趋势以及突变点信息。由图 3 可以看出,贵州高原整体以及 3 级阶梯区域均呈显著的升温趋势,且均检测到统一的突变点为 1997 年。以突变点为界,年均气温变化可分为两个阶段:第 1 阶段(1960-1997 年)为低位波动期。该阶段气温年际变化幅度较大,但总体上升并不明显,贵州高原整体及 3 级阶梯区域的年均气温倾向率分别为 0.001 7、-0.009 8、0.006 1、0.000 4 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,可见变化程度非常小,第 I 阶梯区域的年均气温甚至出现了略微的下降趋势;第 2 阶段(1998-2018 年)为快速上升期。1997 年之后,贵州高原年均气温在波动中快速上升,高原整体及 3 级阶梯区域的年均气温倾向率分别为 0.244 9、0.222 6、0.239 2、0.262 1 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。值得注意的是,第 III 阶梯区域年均气温在 2013 年又检测到了新的突变点,即 2013 年之后气温出现跃升。同时,贵州高原整体年均气温在 2013 年之后也上升到了新的高位,但突变未通过显著性检验。1998-2012 年,即 IPCC 第五次评

估报告中所提到的全球变暖“停滞”阶段,贵州高原气温变化在波动中几乎停滞,与全球变化状况相吻合,气温倾向率为 -0.208 3 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。但从气候变化的角度看,该阶段十分短暂,之后 2013-2018 年气温的突增又将其拉至变暖的主线。因此,笔者认为所谓的停滞只是气温跃升至新高度后的“平台期”,属于长期气候变化中的小波动,并未影响突变后的 1998-2018 年气温大幅跃升的事实,在这一阶段贵州高原整体上仍呈现出显著的上升趋势。由图 3 中 ESMD 趋势项 R 对气温变化的贡献率来看,高原整体及各阶梯区域的方差贡献率均小于 50%,说明贵州高原气温变化仍以年际波动为主导,线性增暖趋势不明显。综上所述,从长期变化的趋势来看,贵州高原气温变化呈现出“非线性、非平稳、跳跃式”的上升特征。

1960-2018 年 3 级阶梯区域的气温倾向率分别为 0.180 7、0.172 2、0.165 0 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,升温速率依次减小,而三者和时间变化上呈现出较为一致的同步性,说明贵州高原气温变化的区域差异不大。

表 1 为 1960-2018 各阶段 3 级阶梯区域气温变化速率的贡献率,由表 1 可见,1960-2018 年对贵州高原增温贡献率最大的为第 II 阶梯,其次为第 III 阶梯,最小为第 I 阶梯;突变前,升温贡献最大的为第 II 阶梯,第 I 阶梯贡献率为负值,对应其 1960-1997 年年均气温的负增长;1998-2012 年的“停滞期”,对气温停滞起到抑制作用贡献最大的也是第 II 阶梯,其次为第 III 阶梯;突变后,升温贡献率最高的仍为第 II 阶梯,但相较于整个时段,贡献率所占比例有所下降,与此同时第 III 阶梯贡献率占比上升,应与突变后该区域升温速率最大有关。

表 1 1960-2018 各阶段 3 级阶梯区域气温变化速率的贡献率

时间阶段	区域对总体的贡献率/%		
	第 I 阶梯	第 II 阶梯	第 III 阶梯
1960-2018 年	16.80	50.13	33.07
1960-1997 年(突变前)	-95.43	186.60	8.83
1998-2012 年(“停滞期”)	7.61	57.21	35.18
1998-2018 年(突变后)	14.48	48.74	36.78

图 4 为 1960-2018 年贵州高原四季气温随时间变化趋势及趋势项 R 曲线。由图 4 可看出,四个季节的气温虽然均呈上升的变化趋势且均检测到了突变点,但具体细节不尽相同。春季气温序列的整体倾向率为 0.162 3 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其突变点与全年相同,

出现在1997年,突变前呈现出显著的降温趋势,倾向率为 $-0.1889\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。突变后气温倾向率为 $0.3878\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其年际起伏较大,在1998-2012年经历了短暂的“停滞期”,并在2011年降至突变后最低值,但2012年后快速跃升,并在2018年创造历史新高。夏季气温序列的倾向率为 $0.1306\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其突变发生在2005年,突变前的气温倾向率为 $-0.0613\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中20世纪60年代下降趋势显著,70年代至突变前,变化趋于平稳,突变后在波动中显著升温,倾向率为 $0.3348\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。秋季

气温的突变点与春季类似,为1998年,在突变前的1960-1998年表现出先降后升再降的变化趋势,突变之后持续升温,气温倾向率为 $0.1847\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冬季的气温倾向率为 $0.2069\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其线性变化趋势在四季中最大,且其年际差异也最大,变异系数达0.17,冬季突变时间为1985年,但其突变的显著性水平小于其他3个季节,可能的原因是其在气温“停滞期”存在较大的降温幅度。四季中夏季气温上升速率最小,冬季气温的上升速率最大,这与我国西南地区的升温模式基本相同^[35]。

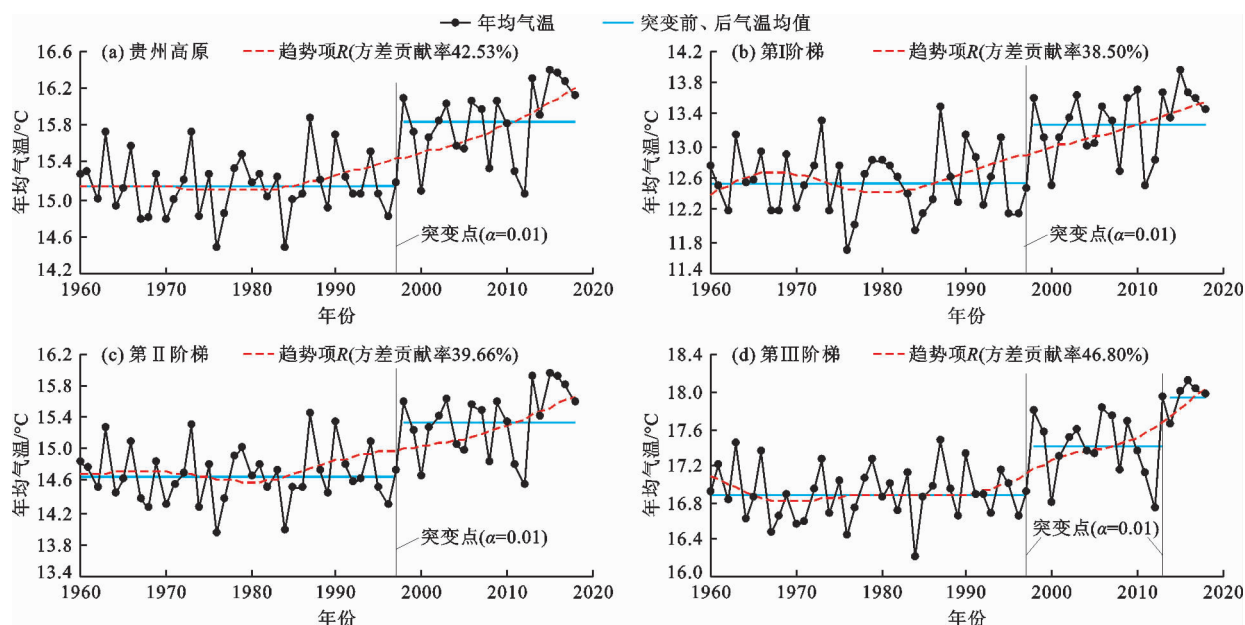


图3 1960-2018年贵州高原及3级阶梯区域的年均气温随时间变化趋势及趋势项R曲线

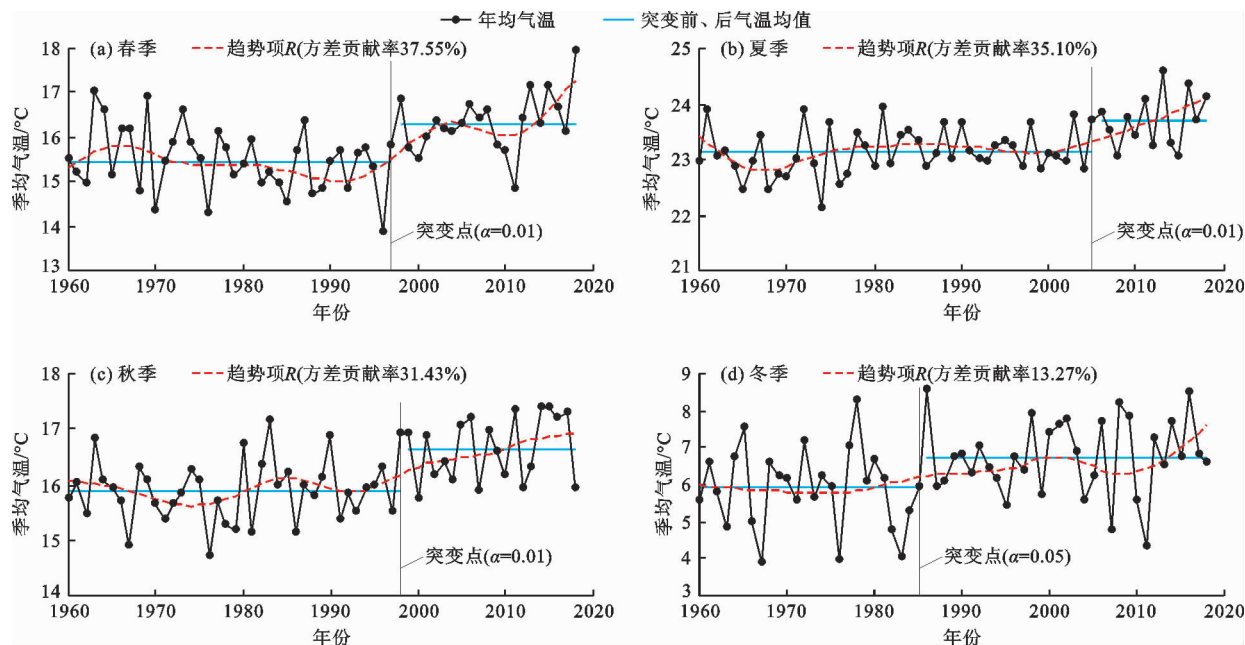


图4 1960-2018年贵州高原四季气温随时间变化趋势及趋势项R曲线

表 2 1960 - 2018 年贵州高原四季均温统计值

季节	多年均 温/℃	最高均 温/℃	最低均 温/℃	极差/ ℃	标准差/ ℃	变异 系数	倾向率/ (℃ · (10a) ⁻¹)	倾向率对全年 贡献率/%	倾向率与高程 相关系数 R ²
春季	15.76	17.92	13.88	4.04	0.80	0.05	0.1623	23.10	0.1261
夏季	23.26	24.60	22.14	2.46	0.49	0.02	0.1306	18.59	0.2155
秋季	16.14	17.40	14.72	2.68	0.67	0.04	0.2026	28.85	0.2666
冬季	6.36	8.54	3.84	4.70	1.11	0.17	0.2069	29.46	0.1701

3.2 年均及季均气温空间变化特征

对贵州高原 34 个气象台站不同时期的年平均气温线性倾向率进行空间插值,分析 1960 - 2018 年气温变化的空间分布特征,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,1960 - 2018 年贵州高原气温倾向率分布处在 0.10 ~ 0.25 ℃/10a 之间(图 5(a)),34 个气象站点均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,呈现出全域显著升温的态势,从分布来看大体呈东高西低的规律,区域差异并不明显;气温突变前的倾向率分布处在 -0.07 ~ 0.08 ℃/10a 的低位之间(图 5(b)),基本上呈升温与降温交错分布,34 个气象站点中只有 3 个站点出现显著升温或降温,说明整体变化不

明显;大部分地区在气温变化“停滞期”的倾向率为负值(图 5(c)),说明该时期贵州高原气温变化的主导方向为降温,升温的区域仅零散分布于第 I 阶梯的东部、第 III 阶梯的东北及西南部,降温最大的区域位于第 II 阶梯的东部地带,因此该时期第 II 阶梯对整体升温的贡献率为负值。34 个气象站点中只有 1 个通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,说明“停滞期”气温变化的主导方向虽然为降温,但是大部地区降温并不显著;与突变之前相比,突变后贵州高原整体均呈现出明显的升温态势(图 5(d)),倾向率分布处在 0 ~ 0.50 ℃/10a 之间,34 个站点有 14 个通过了显著性检验,占全部站点数量的 41%。

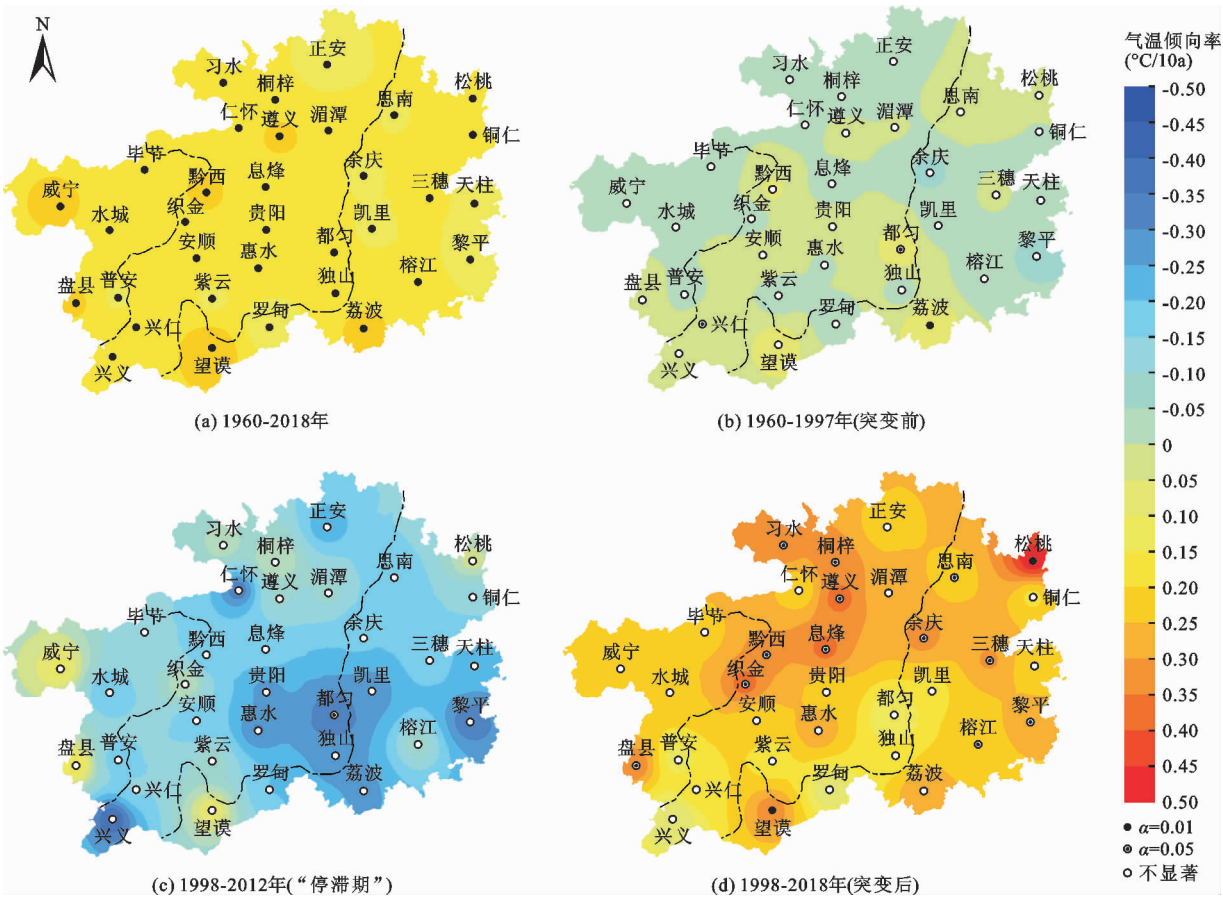


图 5 1960 - 2018 年贵州高原不同时期平均气温倾向率及其显著性空间分布

在全球气候变暖的大背景下,贵州高原整体升温的事实是毋庸置疑的,出现升温区域差异的原因,除了贵州高原复杂地形造成的局地小气候外,也可能存在人为因素。例如突变前升温最低的榕江县,其森林覆盖率在34个站点中最高;突变后大部地区的快速升温,则可能与近年来贵州众多县市的快速城市化建设有关。气温对城市化进程中的高耗能产业、人口集聚、城市热岛效应等较为敏感,因此可以通过合理规划工业区、增加市区植被覆盖、建设海绵城市等方式来应对气候变暖。

进一步对贵州高原1960-2018年四季平均气温的线性倾向率进行插值可得到图6。由图6中气温倾向率空间分布来看,贵州高原四季均表现出不同程度的升温趋势。春季倾向率(图6(a))处在 $0.0679 \sim 0.2647$ $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间,总体呈现西南低东

北高的分布态势,升温最大的区域位于东北部的铜仁、松桃一带;夏季倾向率(图6(b))处在 $0.0178 \sim 0.2374$ $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间,总体呈西高东低的分布态势,3级阶梯的平均倾向率自西向东依次减小,34个气象站点中有31个呈显著升高趋势,不显著的站点位于高原的东北部;秋季倾向率(图6(c))处在 $0.1245 \sim 0.3048$ $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间,其空间分布规律与夏季类似,但数值要高于夏季,且34个气象站点中有33个通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,说明秋季绝大部分地区均为极显著升温,结合表2来看该季节对全年的升温贡献率是除冬季外最大的;冬季倾向率(图6(d))处在 $0.1476 \sim 0.3152$ $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为四季中升温幅度最大的季节,有32个气象站点呈现出显著升温的趋势,结合表2可知该季节对全年气温倾向率的贡献率最大。

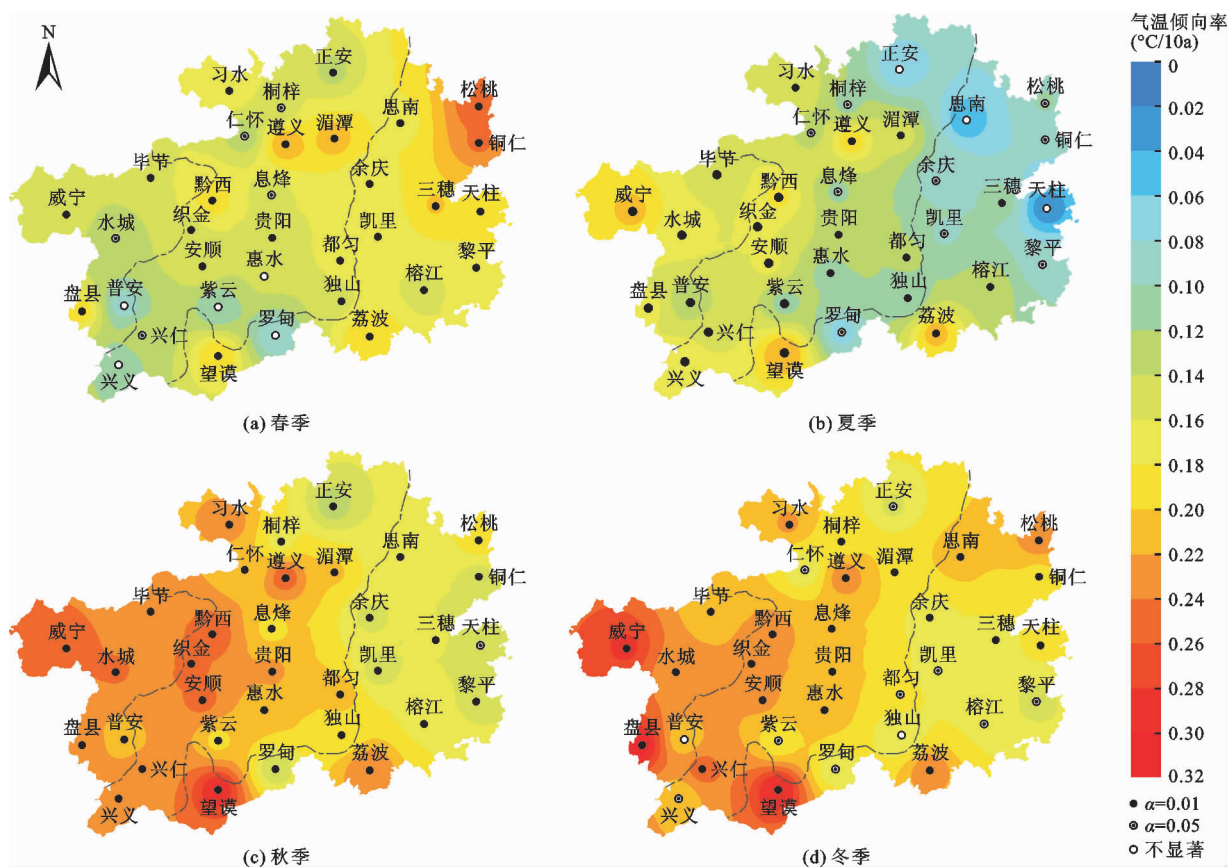


图6 1960-2018年贵州高原四季平均气温倾向率及其显著性空间分布

纵观四季分布,除春季外,夏、秋、冬3季的气温倾向率均呈现出自西向东3级阶梯依次减小的趋势,大体表现为海拔越高则气温升高越快,分别计算四季倾向率与海拔高度的相关性(表2)后发现,除春季外,另外3季的气温倾向率均与海拔高度存在一定的正相关关系,其中秋季的相关性达到显著

(通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)。以上结果与尹文等有等^[36]对西南地区的相关研究相吻合,同时这一分布特征也与已有研究^[24]得出的该地区降水量增加的气候倾向率由西向东减少的结果相对应。降水量减少意味着降水日数减少,同时气温随之增加。例如,在夏季气温增加最少的铜仁、天柱一带,其夏季

降水量增加也最多;而在秋季的第 I 阶梯区域气温增加较多,与之对应区域秋季降水量也出现大幅度减少。史培军等^[37]针对我国 1960–2010 年的气候区划显示,贵州高原处在西南–华南暖干趋势带,这印证了贵州高原气温增加、降水量减少的事实;同时,第 III 阶梯位于西南–华南暖干趋势带与华东–华中暖湿趋势带的交界区域,这也符合贵州高原 3 级阶梯气温倾向率自西北向东南递减的变化特征。

4 讨论

研究表明区域的气候变暖可能与厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)^[38]、太平洋年代际震荡(PDO)以及太阳黑子^[34]等存在一定的遥相关关系,在此以太阳黑子为例尝试探讨其与贵州高原气温变化的关系。图 7 展示了 1900–2018 年太阳黑子标准化指数与 ESMD 分解出的 1960–2018 年气温序列年代际分量 IMF3 的年际变化。由图 7 可知,太阳黑子数存在 11 a 左右的变化周期,而 IMF3 同样存在准 11 a 的变化周期,说明气温变化的年代际周期与太阳黑子变化周期类似。同时,二者存在一定的负相关关系,但未通过显著性检验。虽然太阳黑子与贵州高原气温年代际变化存在类似的周期,但二者间的相关性并不明显,太阳黑子是人类对太阳变化记录时间最长的要素之一,而本文对气温变化规律的研究跨度只有 59 a,若需探究气温与太阳黑子变化的深入联系,则需要更长时间跨度的气温序列作为数据支撑。除此之外,贵州高原气温变化与 ENSO、PDO 之间的海气联系还需在未来工作中进一步研究。

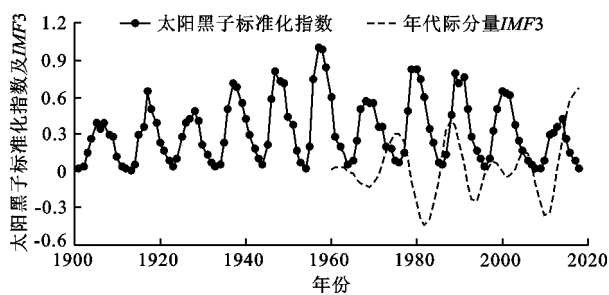


图 7 太阳黑子标准化指数及年代际分量 IMF3 变化对比

5 结论

本文基于贵州高原 34 个气象站点均一化订正后的气温数据,分析了该区域 1960–2018 年的气温时空变化特征,得到以下结论:

(1) 1960–2018 年贵州高原气温显著上升并呈现出“非线性、非平稳、跳跃式”的上升特征。年均

气温在 1997 年发生突变,突变前贵州高原整体及 3 级阶梯区域的气温倾向率分别为 0.001 7、-0.009 8、0.006 1、0.000 4 °C/10a,突变后气温倾向率分别为 0.244 9、0.222 6、0.239 2、0.262 1 °C/10a,突变后升温速率明显加快;1998–2012 年出现了与全球气温变化对应的短暂升温“停滞期”,但该时期的出现未影响突变后整体升温加快的趋势;春、夏、秋、冬四季表现出与全年类似的非线性上升特征且均检测到了气温跃升的突变点,时间分别为 1997、2005、1998、1985 年,四季的气温倾向率分别为 0.162 3、0.130 6、0.202 6、0.206 9 °C/10a,其中秋、冬季节气温倾向率对全年升温的贡献率最大。

(2) 1960–2018 年贵州高原 34 个气象站点的气温倾向率为 0.10~0.25 °C/10a,呈现出全域升温的态势,其中第 II 阶梯区域对贵州高原整体升温的贡献最大。贵州高原年均气温突变前(1960–1997 年)的气温倾向率为 -0.07~0.08 °C/10a,88% 的气象站点未出现明显的升温或降温趋势;在气温变化“停滞期”(1998–2012 年),大部分气象站点出现降温趋势;突变后(1998–2018 年)的气温倾向率为 0~0.50 °C/10a,41% 的气象站点气温显著上升。四季气温变化与全年类似,均表现出全域升温的态势,除春季以外,夏、秋、冬 3 个季节均呈自西向东升温倾向率减小的格局,且秋季气温倾向率与海拔高度存在显著的正相关关系。

参考文献:

- [1] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [2] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报,2016,61(10):1029–1041.
- [3] 周梦子,周广胜,吕晓敏,等. 1.5 和 2℃ 升温阈值下中国温度和降水变化的预估[J]. 气象学报,2019,77(4):728–744.
- [4] 胡婷,孙颖,张学斌. 全球 1.5 和 2℃ 升温时的气温和降水变化预估[J]. 科学通报,2017,62(26):3098–3111.
- [5] 黄建平,陈文,温之平,等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究:气候与气候变化篇[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(10):1607–1640.
- [6] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis – working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [7] CAO Lijuan, ZHAO Ping, YAN Zhongwei, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the 19th century[J]. Journal of Geophysical Research At-

- mospheres, 2013, 118(15): 8197–8207.
- [8] 朱大运,熊康宁,肖华. 贵州省极端气温时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1672–1683.
- [9] 郭纯青,周蕊,潘林艳. 中国西南岩溶区1900–2012年旱涝灾害分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 12–15.
- [10] 朱大运,熊康宁,董晓超. 贵州1960–2016年气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 168–173+180.
- [11] 蒋啸,周旭,张继,等. 1961–2015年贵州高原 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温时空变化特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(2): 121–130.
- [12] 严小冬,宋燕,黄晨然,等. 贵州省冬季气温的时空特征及其与海气的关系[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1336–1345.
- [13] 李庆祥. 我国气候资料均一性研究现状与展望[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 67–74.
- [14] 贵州省气象局. 贵州省基层气象台站简史[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [15] 高文兰,李双双,段克勤,等. 基于均一化资料的西安极端气温变化特征研究[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 464–473.
- [16] PENG Jiadong, LIAO Yufang, JIANG Yuanhua, et al. Construction of the homogenized temperature series during 1910–2014 and its changes in Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 297–310.
- [17] TSINKO Y, BAKHSHAI A, JOHNSON E A, et al. Comparisons of fire weather indices using Canadian raw and homogenized weather data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 110–119.
- [18] KRUGER A C, NXUMALO M. Surface temperature trends from homogenized time series in South Africa: 1931–2015[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(5): 2364–2377.
- [19] 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]. (2019–05–30)[2019.12.01]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.
- [20] WANG Xiaolan, WEN Qiuzihan, WU Yuehua. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(6): 916–931.
- [21] WANG Xiaolan. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(9): 2423–2444.
- [22] WANG Xiaolan. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(3): 368–384.
- [23] WANG Xiaolan, FENG Yang. RHtest V4 user manual [EB/OL]. (2013-07-20)[2019-12-01]. <http://ccc-ma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>.
- [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] 李海彬,张小峰,胡春宏,等. 基于B–G分割算法的河川年输沙量突变分析[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1387–1392.
- [26] 刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等. 1960–2015年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1803–1820.
- [27] 封国林,龚志强,董文杰,等. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J]. 物理学报, 2005, 54(11): 5494–5499.
- [28] WANG Jinliang, LI Zongjun. Extreme-point symmetric mode decomposition method for data analysis[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2013, 5(3): 1137–1137.
- [29] 王金良,李宗军. 极点对称模态分解方法: 数据分析与科学探索的新途径[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [30] 赵直,徐晗. 极点对称模态分解下中国新疆温度变化趋势的区域特征[J]. 地理研究, 2014, 33(12): 2358–2366.
- [31] 王飞,王宗敏,杨海波,等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1169–1183.
- [32] 李双双,芦佳玉,延军平,等. 1970–2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 13–24.
- [33] 张恒璟,齐昕,文汉江. 基于K均值聚类EEMD的CORS高程时间序列信号分析方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1053–1057.
- [34] 杜勤勤,张明军,王圣杰,等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1748–1764.
- [35] 伍清,蒋兴文,谢洁,等. 基于CMIP5资料的西南地区2020–2050年气温多模式集合预估[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 971–978.
- [36] 尹文有,田文寿,据建华. 西南地区不同地形台阶气温时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 429–435.
- [37] 史培军,孙劭,汪明,等. 中国气候变化区划(1961~2010年)[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294–2306.
- [38] 贾艳青,张勃,张耀宗,等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与ENSO的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6402–6414.