

贵州 1960—2016 年气温时空变化特征

朱大运^{1,2}, 熊康宁^{1,2}, 董晓超^{1,2}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:气温是气候变化研究中最主要的构成要素之一,对区域生态环境有着重要的影响。运用线性倾向率、Mann-Kendall 突变检验、小波分析等方法对贵州省 19 个气象站近 57 年温度资料进行了年与季节尺度变化特征分析,结果表明:贵州近 57 年年和季节温度均呈现明显的波动上升趋势,年升温速率 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,春季、夏季、秋季、冬季升温速率分别为: $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,进入 21 世纪后升温进程加速,但在空间分布上差异性显著,气温升温区域与降温区域交替并存;年均温和秋季气温在 2001 年发生突变,春季和冬季均温分别在 2005 年、1987 年发生突变,突变前后温度变化差异较大,夏季气温未检测到突变现象;另外,贵州气温变化周期性特征并不明显,缺乏能量较大、信号稳定的全时域周期振荡;冬季温度周期性变化特征较为复杂,呈现出 5~7,10~15 a 等多个时间尺度的周期特征。

关键词:气温变化; 时空特征; 小波分析; 贵州省

中图分类号: P468

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0168-06

Spatiotemporal Change of Surface Temperature over the Last 57 Years in Guizhou Province

ZHU Dayun^{1,2}, XIONG Kangning^{1,2}, DONG Xiaochao^{1,2}

(1. School of Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation, Guiyang 550001, China)

Abstract: Temperature is one of the most important elements in climate change studies, and has an important influence on the regional ecological environment. Based on monthly temperature data from 19 stations in Guizhou Province during 1960—2016, the characteristics of temperature change were analyzed by using the linear regression, Mann-Kendall test, Wavelet analysis methods. The results are indicated as follows. (1) There was a significant climate warming trend for annual and seasonal temperatures in Guizhou Province in recent 57 years, the heating rates of annual, spring, summer, autumn and winter are $0.13^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, $0.11^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, $0.09^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, $0.18^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, $0.17^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, respectively, and the warming presented the accelerated trend since entering the 21st century. However, the spatial distribution showed a high heterogeneity, and the warming region and the cooling region coexisted. (2) An abrupt change of the annual and autumn temperature wavelike rising tendency in 2001 was detected by M-K test, with the spring and winter average temperature abrupt changing in 2005, 1987, respectively, but there was no abrupt change point of summer average temperature. (3) The characteristics of periodic oscillation in Guizhou Province were not obvious, and there was lack of full time domain oscillation. Winter temperature change was more complex, which also had oscillation periods of 5~7 years and 10~15 years.

Keywords: temperature variation; spatial and temporal characteristics; wavelet analysis; Guizhou Province

全球气候系统变暖的事实是毋庸置疑的。自 1950 年以来全球几乎所有地区都经历了升温过程,1880—2012 年全球平均温度已升高 0.85°C ;过去 30 年,每 10 a 地表温度的增暖幅度高于 1850 年以来的任何时期^[1]。以气候变暖和降雨格局转变为主要特征的全球

变化正改变着陆地生态系统的结构和功能^[2]。在全球气候变化大背景下,中国气温近几十年也经历了快速升温过程,升温速率达 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,高于全球平均水平,并且呈现显著的地域差异性和时段差异性^[3-6]。因此,基于季节及年气温变化的差异,从长时间尺度监测研究区

收稿日期:2017-09-04

修回日期:2017-10-08

资助项目:国家十三五重点研发计划项目(2016YFC0502601);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2016]1101);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2018]2777);贵州师范大学 2016 年博士科研启动基金

第一作者:朱大运(1984—),男,河南信阳人,博士,研究方向为区域气候变化、喀斯特水土保持。E-mail:zhudayun163@163.com

通信作者:熊康宁(1958—),男,贵州威宁人,教授,博士生导师,主要从事喀斯特资源与环境及石漠化研究。E-mail:xiongkn@163.com

域气候变化特征及其成因具有一定科学意义。

贵州地处云贵高原,境内以喀斯特为主的地形地貌非常复杂,水热条件垂直变化特征显著,且受西南季风和东亚季风的双重影响^[7],对气候变化的响应十分敏感。近年来,国内一些学者分别从不同的空间区域和时间尺度对贵州地区气候变化开展了相关研究。任国玉等^[8]通过对中国气温变化趋势系数研究,指出云贵高原北部年平均气温呈下降趋势,这与班军梅等^[9]对西南地区气温变化的研究结果相似;刘晓冉等^[10]对西南地区 1961—2000 年月值气温数据分析表明,涵盖贵州在内的整个西南地区年均温呈现由暖变冷,再到单调上升的波动变化趋势;唐红忠等^[11]详细分析了贵州南部 12 个气象站 51 a 观测资料得出,该地冬季气温、极端最低气温均呈上升趋势,并且体现了年际振荡和年代振荡特征。由于受季风和复杂地形等多种因素的影响,贵州气候变化有其自身独特的特点,尤其是进入 21 世纪后气温变化更加复杂,然而当前对贵州近几十年地表气温时空变化系统研究工作还相对缺乏,伴随时间尺度的推移和数据的更新开展跟进研究工作十分必要。

本文选取贵州省 1960—2016 年的气温逐月数据和年均值数据,采用线性回归分析、Mann-Kendall 突变检验以及小波分析等方法对贵州近 57 a 年与季节气温时空变化特征做详细探讨,为该区应对气候变化和气象灾害防治提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

本文使用的气象数据资料均来自中国气象局科技数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),时间分辨率以年值数据集为主,月值数据集作为重要补充。虽然该数据集经过了严格的质量控制和检查,但是各个站点观测起始时间差异较大,为了保证气象观测数据的连续性和一致性,筛选了贵州境内 19 个气象站数据资料作为本研究的主要数据源,海拔跨度 274~2 316 m,时间跨度为 1960 年 1 月 1 日—2016 年 2 月 29 日(2015 年冬季截止日期)(附图 1)。

所有气象站的气温资料依据月份和年份进行归类整理,对个别站点变更和个别缺失数据采用相邻站点线性回归方法进行插补,经过处理修正后的气象资料具有比较好的连续性。参考有关文献资料^[12],按照 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—翌年 2 月为冬季,分季度进行归类统计,用于贵州气温变化特征分析。

1.2 研究方法

线性回归是一种非常实用有效的表征序列变化趋势和变化倾向性的分析方法,在气候变化研究中运

用广泛。本文采用线性回归法来检测贵州省内各气象站 1960—2016 年气温年代际、年际和季度时间序列变化趋势,并基于 ArcGIS 平台克里格插值方法研究贵州省气温时空变化规律。

突变检测采用 Mann-Kendall 方法,M-K 法是世界气象组织推荐的一种非参数的突变检验法,具有人为干扰性少、校验范围宽的优点,可以对时间序列变化趋势的显著性和突变性进行检验,通过正序列和反序列曲线交叉点来确定突变时间节点^[6,13]。本文的气温周期性分析运用 Morlet 小波函数,小波分析在时频两域都具有局部特征表征能力,可以较好地反映气候周期变化动态的时间格局^[14-15]。

2 结果与分析

2.1 气温时间变化特征

2.1.1 气温年代际变化 贵州省 20 世纪 60 年代—80 年代年均气温相对稳定,90 年代以后持续上升,特别是进入 21 世纪升温迅速,较 60 年代升高了 0.6℃。与年均气温变化趋势不同,贵州四季均温年代际变化表现出明显的季节差异性。春季均温呈“U”型变化曲线,60 年代后春季均温逐渐下降,到 80 年代降至最低点,随后快速上升,最高升幅达 0.9℃;夏季均温整体稳定,变幅较小,60 年代—21 世纪初夏季均温在波动中缓慢抬升,仅在最近 6 a 表现出强烈升温态势;与春季均温类似,秋季均温在 70 年代以后稳步增加,而升温节点较春季均温却提前了 10 a,更为显著的是年代际最高与最低温差在该季节达到了最高值 1.1℃,反映出秋季均温剧烈的动荡变化状况;冬季均温变异性较大,尤其是 21 世纪以后与其他季节普遍升温态势相反,平均温度却表现出下降态势,2010—2016 年时段冬季均温 6.4℃甚至比多年平均值还低 0.2℃。从上述分析可知,除了个别时段温度呈现下降现象,贵州年代际温度上升趋势在过去 57 a 的时间内占据了主导地位,但是季节性差异较大,反映出高原山区气候变化的复杂性(表 1)。

表 1 贵州年、季气温年代际变化 ℃

年代际	年均气温	春季均温	夏季均温	秋季均温	冬季均温
1960s	15.3	16.0	23.2	16.1	6.2
1970s	15.3	15.6	23.2	15.7	6.6
1980s	15.3	15.4	23.5	16.2	6.4
1990s	15.5	15.7	23.4	16.3	6.9
2000s	15.8	16.2	23.4	16.6	7.1
2010—2016 年	15.9	16.3	23.7	16.8	6.4

2.1.2 气温倾向率变化 近 57 a 贵州气温呈现出明显的上升趋势,年均气温、春季均温、夏季均温、秋季均温、冬季均温的倾向率分别为 0.13℃/10 a, 0.11℃/10 a,0.09℃/10 a,0.18℃/10 a,0.17℃/10 a,但是在升温速率上存在一定差异,秋冬季节升温速率最

快,高于春、夏季和全年平均水平,春、夏季节则相对缓和。从季节温度变化曲线来看(图1),四季气温均体现出一定规律性,秋季与冬季虽然波动变化剧烈程度不同,但是在温度波动曲线趋势走向上呈现出较好的同步性,除了80年代前期气温呈反向变化外,变化方向基本一致。趋势走向一致性在升温速率相对缓慢的春、夏季节最为突出,从图1中可以看出二者温度变化趋势表现出很好的一致性。年均温在数值上由于综合了四季均温的动荡变化,升温速率与季节相比居于中等水平,但是变化曲线走势变异性更大,与季节温度曲线在走向上基本观测不到较长时间尺度的一致性。整体而言,2000年以来贵州气温升温速率明显加快,与全球和中国进入21世纪后表现出的气温主要变化特征相一致,只是秋冬季节倾向率偏高,与其他研究者得出的全球变化背景下春冬季节升温最明显的结论不一致^[16],这可能来自两方面的原因,一方面是南、北极涛动的影响,前人研究表明^[17]南极和北极涛动是我国西南区域主要影响系统,南北极涛动的持续增强是导致包括贵州在内的整个西南地区冬季气温偏高的重要原因之一;另一方面是季风与地理区位的共同作用,近几十年由于孟加拉湾季风结束偏早,我国西南及周边地区秋季降水呈偏少趋势,干旱增多,土壤湿度降低,从而通过能量与物质(水汽)交换过程,导致地表在接收太阳辐射后升温加快^[18-19]。

2.2 气温空间变化特征

采用径向基函数插值法对贵州年均温与四季均温倾向率做了空间插值(附图2—3),结果表明贵州气温空间变化特征比时间变化特征更加复杂,气温不再是时间变化特征所表现出来的单纯升温趋势,在空间上气温升温区域与降温区域呈现交替共存现象。然而,从分布范围来看,升温区域仍然占据主导态势,覆盖贵州省大部分范围。年均温与四季均温升幅最强烈的区域都发生在黔西南地区,秋季最大升温速率高达 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;其次是毕节地区,以黔西和威宁最为典型,二者在秋季均温和年均温变化上表现出一致的高升幅态势,冬、春季节黔西升温幅度高于威宁,而秋季则恰好相反。除了铜仁东部一小部分区域,包括铜仁和黔东南在的整个贵州东部地区年与季节温度空间变异性较小,保持着相对稳定的升温速率,而且春冬季节高于其他时期。与贵州升温区域空间复杂的变异性相比较,温度呈下降态势的区域无论是在空间分布还是在四季升幅趋势差异都要简单的多,以黔中贵阳和黔西盘县为中心向外围逐渐扩散,且年与季节降温区域均表现出空间一致性,中心降温倾向率分别在春季、夏季达到最高水平 $-0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $-0.19^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,上述两地温度呈降低态势很可能是受局部地形和植被变化的影响,杨毅等^[20]就曾指出生态环境改善,植被覆盖率增加,

是致使贵阳降水增加,气温降低的主要因素;并且喀斯特地区地形地貌复杂,小气候效应显著,“一山有四季,十里不同天”现象非常普遍,这进一步说明了高原地区气温变化的复杂性和特殊性。

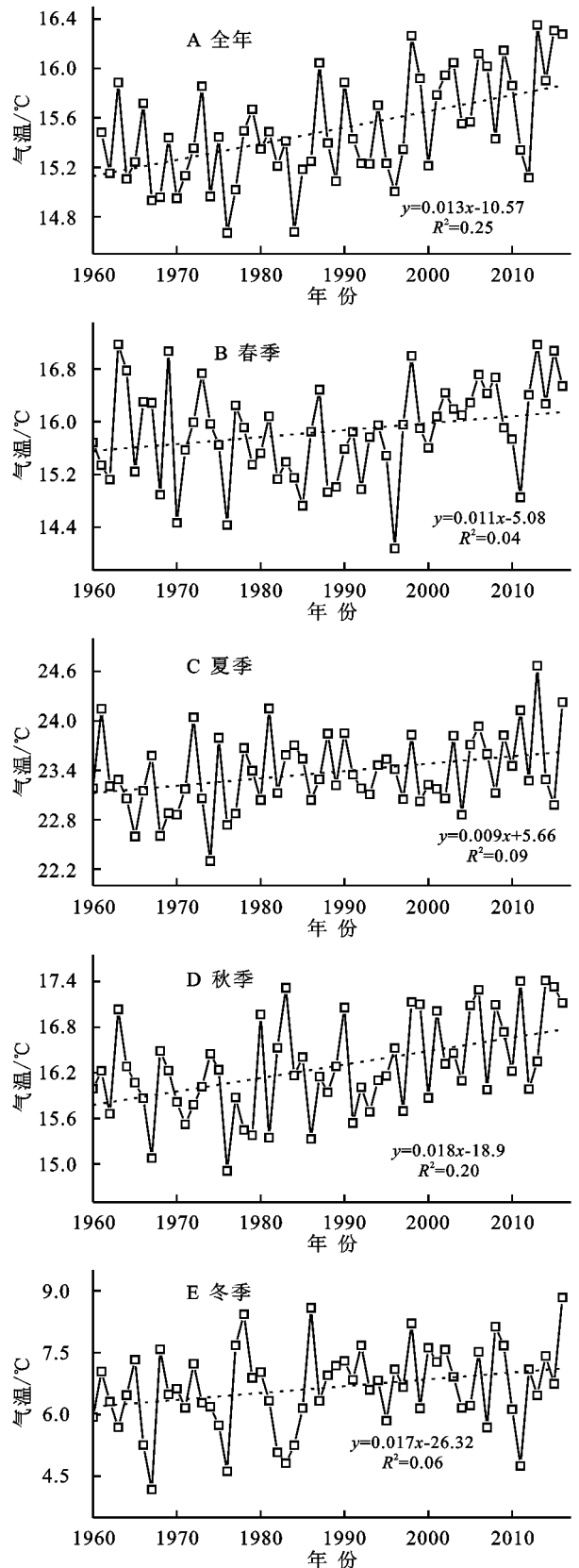


图1 贵州省气温年际变化趋势

2.3 气温突变分析

利用 Mann-Kendall 方法对贵州省年均温进行了突变检验(图 2),结果表明贵州气温突变发生在世纪之交的 2001 年,突变前后年均气温分别为 15.35℃和 15.86℃,相差 0.51℃,进入 21 世纪之后升温趋势非常显著,IPCC 报告指出的北半球 21 世纪的第一个 10 a 是最暖的 10 a 在贵州得到了明显的体现。

四季气温突变性差异大,仅秋季气温 UF 统计量与 UB 统计量曲线于 2001 年在临界线内相交,检测到突变现象,且与年均气温突变时间节点一致,2001 年突变后快速增温,在 2006 年后这种趋势达到显著性水平。春季、夏季和冬季正反序列曲线在临界线内有多个交叉点,这很可能是突变点受到干扰点的影响而产生的虚假突变现象,为了排除虚假突变点,进一步采用滑动 T 检验和 Yamamoto 指数对突变点进行交互验证,得出春季气温 2005 年、冬季气温 1987 年为可信突变点,且都通过 95%显著性检验,其余交叉点为虚假突变点。夏季气温未检测到达到可信度水平的突变点,因此认为 1960—2016 年贵州夏季气温无突变性增温或者降温趋势。

2.4 气温变化周期分析

图 3 为 1960—2016 年贵州年均温和四季均温的 Morlet 小波变换系数实部等值线与模平方时频分布图,通过两者结合来进行周期分析。从图中可以看出贵州温度震荡周期特征变化较为复杂,时间尺度与季节差异在气温变化结构上表现出截然不同的周期性特征。年均温的周期性变化特征不显著,小波分析并未体现出短时间尺度的震荡信号,仅在 15~20 a 呈现出轻微的震荡,然而由于整个数据序列只有 57 a 且信号微弱,还不能确定 15~20 a 周期。为此进一步做了小波系数的模平方时频分布图,模平方相当于小波能量谱,它可以分析出不同周期的震荡能量,从图 3A 中可以看出 15~20 a 时间尺度的能量最强,但它的周期变化表现出明显的局部性和边界效应,确系虚假震荡周期现象。从大尺度来看,四季均温同样存在着 25~30 a 的虚假震荡周期,但是在小尺度上与年均温存在着显著差异。春季和夏季温度表现出准 11 a 的振荡周期,只是高值中心与低值中心信号表现较弱,1990 年以后在 15~20 a 振荡周期内春季气温出现了 3 个明显的高值中心,反映出较强的周期性。秋季温度在 5 a 周期发生几次较为显著的震荡现象。冬季温度的周期变化最为复杂,存在着多个短时间尺度周期,10~15 a 特征尺度信号震荡最剧烈,周期性显著;5~7 a 尺度周期信号值则表现较弱。综合来看,春季、夏季、秋季、冬季气温均体现出 5 a 尺度的震荡周期,尽管各季节周期信号强度存在着差异,但

是高低值交替变化相对清晰,波动极值点的分布规律比较明显,且影响范围大,贯穿了大部分研究时间序列,并在模平方时频分布图中得到进一步的证实。

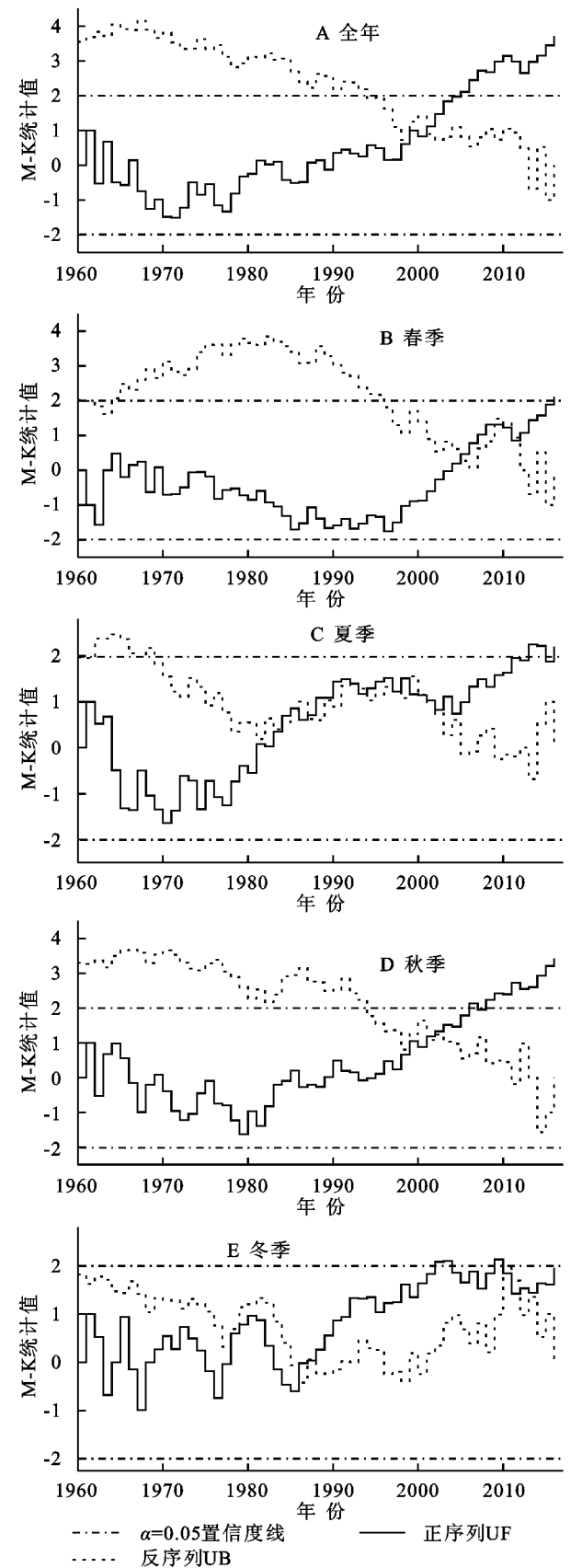


图 2 贵州省气温 Mann-Kendall 突变检验

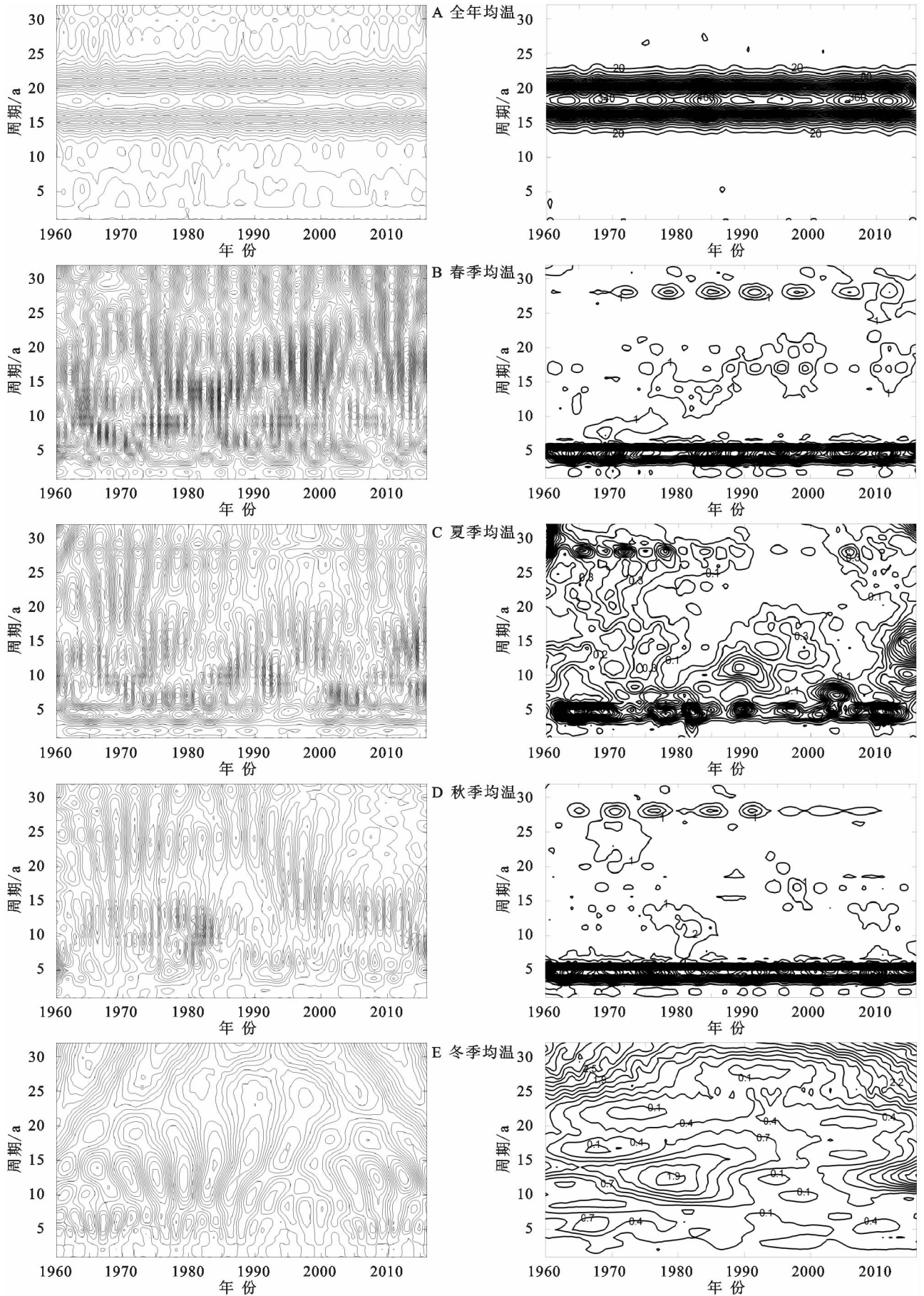


图 3 贵州温度 Morlet 小波系数实部等值线与模平方时频分布

从模平方分布形态来看,年均温与季节均温存在着显著差异,这可能是受季风、地形等因素的影响,过去几十年冬季均温的周期性变化较其他季节更为显著,从而在小波能量谱曲线上表现的过渡更加均匀,覆盖范围更加广泛,具体原因还有待后续进一步深入研究。总体而言,贵州气温周期变化较为复杂,多个季节表现出与太阳黑子相吻合的 11 a 振荡周期,只是周期带有明显的时域性特征,缺乏较为一致、能量较大、信号稳定的全时域周期振荡。

3 讨论

由于区域特征和气候变化的人为驱动力等因素差异,气候变化幅度、变化尺度以及对全球气候变化的响应敏感性带有鲜明的地域特征^[6],并且在研究中不断得到证实^[21-23]。贵州省年均气温表现出统计意义上的上升,这一趋势在进入 21 世纪之后更加明显,与全球气候变化的大趋势相吻合^[1],但在年均温升高速率上($0.13^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)高于全球和中国平均水平,后两者的平均升温速率分别是 0.07 、 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[17]。

从区域范围来看,贵州近几十年升温速率并不突出,与整个西南地区 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的平均升温速率基本相当。在区域内部,受青藏高原东侧山脉走向的影响,西南地区东西部年均温变化呈非对称状态,西部升温速率高,东部升温速率低,贵州年均升温速率明显小于西部的青藏高原边缘地区^[10]。1960 年以来贵州各季节温度均在波动中上升,且春、夏、秋季节升温速率都高于西南地区整体平均水平,仅有冬季升温速率 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 低于西南地区的 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,据前人研究成果这可能是自然因子和人类活动共同作用的结果^[24]。但是,对西南地区 and 贵州而言,由于地处低纬高原,受东亚季风和南亚季风的共同影响,是两支季风的交汇区和敏感区,自然因素的影响可能更大些^[25]。蒋兴文等^[26]研究指出西南地区气温变化主要受西伯利亚高压和东亚冬季风的影响,在年际变化上,西伯利亚高压对西南地区气温的影响更为显著,而冬季气温的变化则与东亚冬季风关系密切。

4 结论

(1) 近 57 a 贵州省年均温和季节均温均呈波动上升趋势,年平均升温速率为 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。四季温度变化差异显著,秋、冬季节气温变化倾向率明显高于春、夏季节。

(2) 空间分布上气温升温区域与降温区域交替共存,升温最强烈的区域分别是黔西南和毕节;降温范围以黔中贵阳和黔西盘县为中心向外围延展,且在分布范

围上年时间尺度与季节时间尺度表现出高度一致性。

(3) 突变检验表明贵州年均温和秋季均温气温序列在 2001 年,春季气温序列在 2005 年,冬季气温序列在 1987 年发生了突变,突变后升温加速。夏季气温序列未检测到突变点,说明其升温趋势相对稳定。

(4) 小波变换分析结果表明,贵州气温变化并不存在年与季节相一致、震荡明显的主周期,季节温度周期性变化特征复杂,尤其是冬季表现出多种时间尺度的周期振荡特征。

参考文献:

- [1] IPCC. Working Group 1 Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change [R]. Sweden: Stockholm, 2013.
- [2] 肖胜生,郑海金,杨洁,等. 土壤侵蚀/水土保持变化的耦合关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 106-113.
- [3] 张晶晶,陈爽,赵昕奕. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 1-6.
- [4] Li K. Analysis on precipitation, temperature in recent 60 years in East China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 1(4): 72-77.
- [5] Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10): 1188-1195.
- [6] 刘永婷,徐光来,尹周祥,等. 全球变化背景下安徽近 55 a 气温时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 680-691.
- [7] 彭子成,张兆峰,蔡演军,等. 贵州七星洞晚更新世晚期石笋的古气候环境记录[J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 273-282.
- [8] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 年来中国地面气候变化的基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [9] 班军梅,缪启龙,李雄. 西南地区近 50 年来气温变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 346-351.
- [10] 刘晓冉,李国平,范广洲,等. 西南地区近 40 a 气温变化的时空特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 30-36.
- [11] 唐红忠,白慧,舒兴武,等. 近 51 年贵州南部冬季气温气候特征及其变化规律[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(S2): 374-380.
- [12] 徐建新,陈学凯,黄鑫,等. 贵州省近 50 年降水量时空分布及变化特征[J]. 水电能源科学, 2015(2): 10-14.
- [13] 王志杰,苏娜. 1951—2010 年汉中市气温变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 169-174.
- [14] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 61-78.

- 结皮土壤 CO₂ 通量日动态特征及其温度敏感性[J]. 环境科学学报, 2013(9):2605-2611.
- [17] Guevara M L D, Lázaro R, Quero J L, et al. Easy-to-make portable chamber for in situ, CO₂, exchange measurements on biological soil crusts[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(1):72-84.
- [18] 辜晨, 贾晓红, 吴波, 等. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳通量对模拟降水的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(13):1-11.
- [19] 王爱国, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土丘陵区不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):659-666.
- [20] 胡春香, 刘永定. 土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子[J]. 生态学报, 2003, 23(2):284-291.
- [21] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2):128-135.
- [22] Housman D C, Powers H H, Collins A D, et al. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(4):620-634.
- [23] 童贯和. 不同供钾水平对小麦旗叶光合速率日变化的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):547-553.
- [24] 饶本强, 王文欣, 吴易雯. 库布齐沙漠蓝藻结皮早期发育过程净光合速率变化特征及其影响因素[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版, 2013, 26(2):230-235.
- [25] Lange O L, Meyer A, Zellner H. Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(2):253-264.
- [26] 韩旭, 张鹏, 赵洋, 等. 生物土壤结皮光合固碳活性对水热因子的响应[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2016, 52(4):510-515.
- [27] Grote E E, Belnap J, Housman D C, et al. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10):2763-2774.
- [28] 赵东阳, 肖波, 郭成久, 等. 藓结皮对陕北黄土高原两种质地土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5):1219-1225.
- [29] Karsten U, Holzinger A. Light, temperature, and desiccation effects on photosynthetic activity, and drought-induced ultrastructural changes in the green alga *Klebsormidium dissectum* (Streptophyta) from a high alpine soil crust [J]. *Microbial Ecology*, 2012, 63(1):51-63.
- [30] 管超, 张鹏, 李新荣. 腾格里沙漠东南缘生物结皮土壤呼吸对水热因子变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(3):301-310.

~~~~~

(上接第 173 页)

- [15] 董满宇, 吴正方. 近 50 年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. 资源科学, 2008, 30(7):1093-1099.
- [16] 任国玉, 初子堂, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4):701-716.
- [17] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1):35-42.
- [18] 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.
- [19] 周秀华. 我国西南及周边地区气候的模拟和预估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014:55-56.
- [20] 杨毅, 武伟, 刘洪斌. 贵阳市近 40 年气候变化趋势分析[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2007, 32(2):82-87.
- [21] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6):888-894.
- [22] Nan L I, Sun P L, Han X L, et al. Spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 52 years in Luxi Plain [J]. *Modern Agricultural Science & Technology*, 2015, 20:207-210.
- [23] Qin N, Wang J, Yang G, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation and temperature events for the Southwest China in 1960—2009 [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2015, 2(1):1-14.
- [24] 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.
- [25] 周秀华, 肖子牛. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析[J]. 大气科学, 2015, 39(4):653-666.
- [26] 蒋兴文, 李跃清. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子[J]. 地理学报, 2010, 65(11):1325-1335.