

文章编号: 2096-1618(2022)04-0412-10

中国西南地区百年气温的时空演变特征

曾 剑¹, 徐晴晗², 张 宇¹, 杨泽粟¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要:为深入认识中国西南地区过去百年气温变化,采用英国东英吉利大学气候研究中心(CRU) 1901–2019 年的气温数据,分析中国西南地区百年来的气温趋势和时空分布特征,并与中国其他区域的气温进行对比。结果表明:(1)过去百年西南地区年平均气温、最高和最低气温表现为上升趋势,倾向率分别为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 和 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,最低气温对气候变暖的贡献显著高于最高气温。西南地区经历了两次显著的变暖事件,两次变暖事件所能达到的年均气温极值基本一致,均表现为最低气温的上升速率最大,对气候变暖的贡献更大。但是两次变暖事件在升温速率及升温持续时间方面差异明显。(2)西南地区气温表现出 3 个明显的空间特征。首先,气温在空间上呈现出极值的空间型,中心位置与四川盆地范围重叠,这对应气温 EOF 的第一模态(方差贡献为 73.9%);其次,西部高海拔地区比东部低海拔地区的气温低,对应第二模态(方差贡献为 9.0%);最后,气温总体呈现南部高于北部,对应第三模态(方差贡献为 7.6%)。(3)西南地区的升温进程与中国其他地区存在非同步性,该地区的升温率相比于其他地区偏小。

关 键 词:西南地区;气温变化;气候变化;时空特征;CRU

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.009

0 引言

近一个世纪以来,工业革命后温室气体不断增加,地气系统能量收支不平衡,能量不断在地气系统中累积,造成全球气候在波动中增暖。IPCC 第五次评估报告指出,全球气候变暖的事实毋庸置疑,观测到的数据表明几乎所有地区都有升温现象,1983–2012 年是北半球近 1400 a 最暖的 $30\text{ a}^{[1-2]}$ 。变暖的原因有人为因素和自然因素。自然因素主要有海洋、太阳活动、自然变率、火山活动等,人为因素主要有化石燃料的使用、土地利用的变化、城市化等,人为因素导致大气中温室气体增加很可能是主要原因^[3]。全球变暖引起海冰融化海平面上升,自然界食物链逐渐断裂,极端天气事件增加等,威胁到全人类的生存。但在全球变暖被普遍关注、认可的同时,全球年平均气温上升趋于缓慢的现象增加了国际社会对全球变暖的质疑。全球变暖“停滞”现象自被提出以来就备受关注,变暖停滞主要表现在全球平均表面气温在 1998–2012 年的增温速率较小^[4]。但有研究表明变暖趋缓是由于目前太阳活动处于低相位、自然和人为原因使大气中气溶胶含量增加、拉尼娜的年代际降温及最重要的一点是海洋(尤其是 700 m 以下的深海)对热量的储存,当前的中

断是自然气候多变性的一部分。尽管将来可能发生类似的年代际中断事件,但随着温室气体的增加,多年代际变暖趋势很可能会继续^[5-7]。并且由于 2015/2016 年发生的强烈厄尔尼诺事件类似于 1997/1998 厄尔尼诺事件,因此将 2014–2016 年全球年均地表气温异常与 20 世纪最温暖的年份 1998 年进行比较,得出全球变暖中断已经消失的结论,且太平洋年代际振荡逐渐回到正值阶段,全球可能迎来新的加速变暖时期^[8-9]。因此对变暖进程的研究仍具有意义。

气候变暖是近 100 a 最显著的气候变化特征,虽然气温增幅还没有超过历史最强的气温升高,但人类活动对气候变化的影响大大超过历史时期,人类活动的影响具有非周期性,且可不断累积单调增加^[10]。通过研究 1951–1990 年中国的观测数据发现,最高和最低气温之间的周期性循环一致,最高和最低气温的变化主要与日照时间和大气水汽含量有关^[11]。班军梅等^[12]利用 1951–2000 年气温资料,发现西南地区总体呈升温趋势,冬季升温比夏季显著,冬季在 80 年代、夏季在 50 年代为暖期。马振峰等^[13]利用西南地区气象观测站常规地面观测资料年平均值,揭示了西南地区气候变化与全球变暖存在非同步性,并认为青藏高原的气候变化对西南地区东部的气候变化有指示作用。刘晓冉等^[14]利用西南地区的测站气温资料,发现该地区年均气温经历了由暖变冷再变暖的趋势,并且青藏高原对气温分布有明显影响,气温的空间分布存在异

收稿日期:2021-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42005071);干旱气象科学研究基金资助项目(IAM202101)

常敏感区。袁文德等^[15]利用西南地区 88 个站点逐日气温数据,发现西南地区极端高温事件与极端低温事件分别呈上升和降低趋势,极端气温指数存在空间分布差异。罗玉等^[16]利用西南地区 90 个气象站点的逐日气温资料分析了西南地区近 41 a 的极端气温事件,发现暖指数表现为增多的趋势,而冷指数表现为减少的趋势,均存在周期震荡。张勇等^[17]利用 20CR 再分析资料,发现夏季增暖为自西向东逐渐递减,而秋季增暖为自西向东递增;对比冬春两季,夏秋两季的变暖趋势更加明显,范围更大;并划出气温长期趋势最强和最弱区域为关键区。杜泽玉等^[18]利用 CRU 资料分析了山西百年来的气温时空演变,发现山西百年来年平均气温季节平均气温均呈波动上升趋势,其中冬季增温幅度最大、夏季增温幅度最小。目前对西南地区的气温时空变化特征的研究中,大多使用站点数据进行分析,数据的时间基本始于 20 世纪 50 年代,对西南地区更长时间尺度内的气温变化研究较少。

气候变暖已经被观测证实,但是气候变化具有复杂性,各地区的区域气温变化与全球的气温变化常常存在非同步性^[19]。对于西南地区变暖进程的研究仍旧缺乏,如升温速率是否有变化,与其他气候区相比西南地区变暖是否不一样等。过去对西南地区的分析往往使用站点数据,资料的时间尺度较短且受缺测值影响资料有不连续的年份。本文将利用 1901–2019 年的 CRU 数据,对西南地区百年来的气温趋势及时空分布特征进行研究,希望认识西南地区的变暖进程,对西南地区未来气温趋势的预测提供信息。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

西南地区地处中国的最南部,区域地理位置为 97 °E ~ 110 °E, 21 °N ~ 34 °N,主要包括四川省、贵州省、云南省、重庆,以盆地、丘陵地形为主,西有青藏高原,南有云贵高原,东有巫山、大巴山,北有黄土高原,四周被山脉包围,是中国地形最复杂的地区之一。西南地区海拔高度分布如图 1 所示。西南地区的气候与地形相对应,四川盆地为亚热带季风气候,云南南部为热带季风气候,西部青藏高原为高原高山气候。由于青藏高原的存在,西南地区的气温、降水从西北到东南都有很大差异,并且长期处于冷空气与暖湿气流交汇地带,夏季闷热潮湿,冬季阴冷多雨,春秋多云多雾,是中国日照时间最短、光照强度最差的地区。

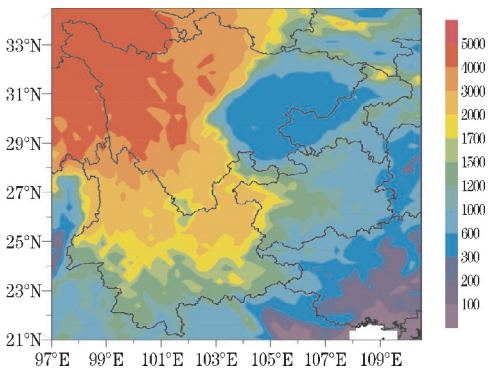


图 1 中国西南地区的海拔高度分布

1.2 资料

气温资料来自英国东英吉利大学气候研究中心 (climate research unit, CRU) 提供的高分辨率网格化多变量气候数据集,版本是 V4.05。该数据集覆盖的时间尺度为 1901–2019 年,时间分辨率为月,空间分辨率为 0.5°×0.5°,包含 2 m 平均气温、最高气温和最低气温等变量。该资料相比站点资料而言时间跨度较长且具有均匀的空间分布,便于研究西南地区近百年来气温的时空变化。

该数据集具有较高的可靠性,已经被广泛应用于干旱评估、气候变化评估及气候趋势诊断分析等研究中^[20–25]。本文进一步对其可靠性进行简单验证,使用 1961–2018 年的站点观测 (温江站、昆明站、黔西站及重庆站) 对 CRU 气温资料进行评估。如图 2 所示,CRU 资料与观测的一致性较高,相关系数在 0.7 以上,表明 CRU 气温数据有较高可靠性。此外,区域平均气温均表现出升温趋势,站点气温与 CRU 气温的倾向率分别为 0.15 °C/10 a 和 0.11 °C/10 a (图略)。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen 趋势估计

在趋势估计中,同时使用最小二乘法估计及 Theil-Sen 估计两种方法。Theil-Sen 趋势估计是为了解决有异常值出现情况下最小二乘估计量无效的问题时提出的趋势估计方法,为无参数的 Mann-Kendall 方法^[19]。与最小二乘法相似,该方法也是建立气温与时间的一元线性模型进行趋势估计,但是相比于最小二乘估计方法,Theil-Sen 估计在计算上更简单,主要原理如下:

$$y_i = x_i \beta + \varepsilon_i$$
$$\tilde{\beta}_n = \text{med} \left\{ b_{ij} \mid b_{ij} = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}, \text{若 } x_i \neq x_j, 1 \leq i, j \leq n \right\}$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$, med 表示中位数。Theil-Sen 趋势估计是先求任意两对数据的斜率,再对斜率取中位数作为斜率参数的估计值。

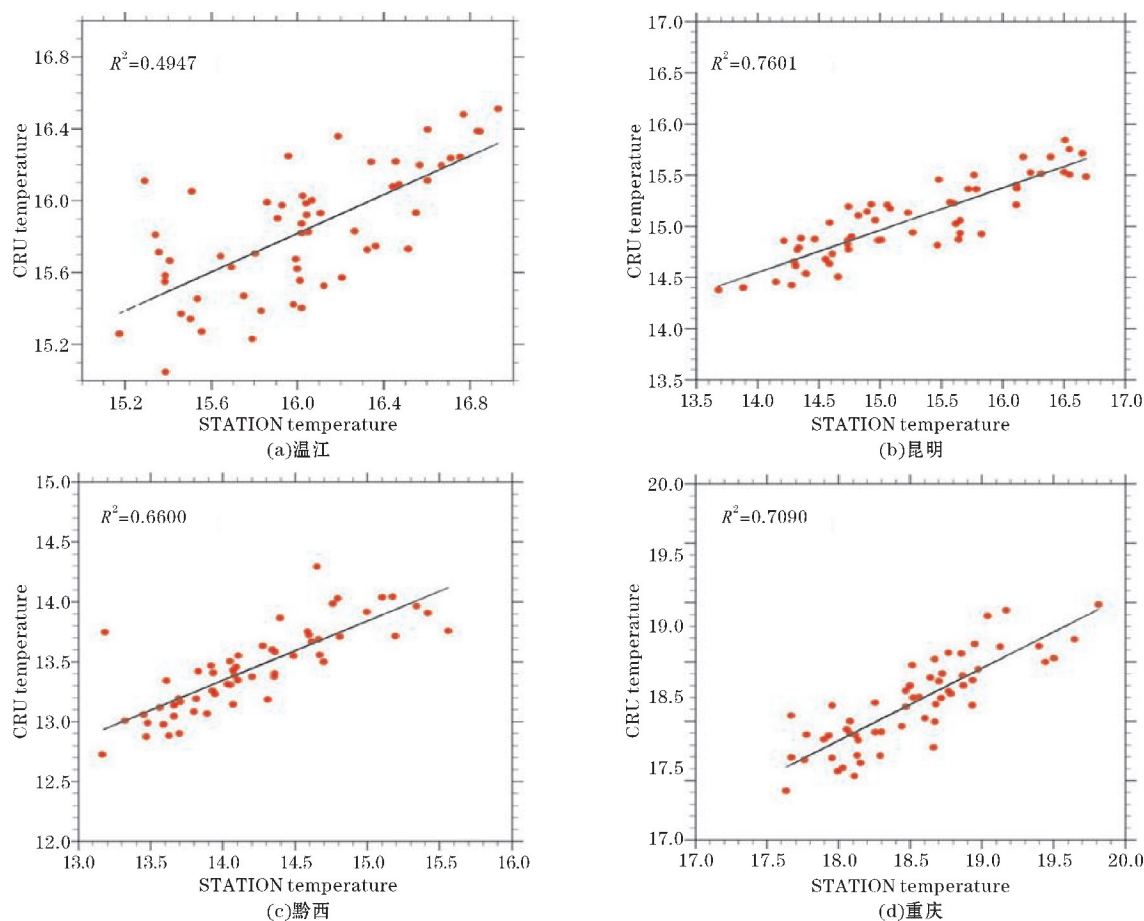


图2 西南地区 1961–2018 年站点气温与 CRU 气温数据的对比

1.3.2 M-K (Mann-Kendall) 突变检验

M-K 突变检验法是一种非参数统计检验方法,最初用于检测序列变化趋势,后发展为对气温和降水进行突变分析^[26–27],计算简单。该方法用于诊断西南地区百年来气温的突变特征,其基本数学原理如下:

首先对气温的时间序列 t_1, t_2, \dots, t_n 构造如下秩序列,

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

其中, R_i 表示 t_i 大于 t_j ($1 \leq j \leq i$) 的样本数, S_k 表示数量的累计值。

在时间序列随机独立的假设下,定义标准化距平统计量为

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

当 $k=1$ 时, $UF_1=0$ 。 $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 分别是累积数 S_k 的均值和方差,在 t_1, t_2, \dots, t_n 相互独立,且有相同连续分布时,可得到

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n+1)(2n+5)}{72}$$

按时间逆序 t_n, t_{n-1}, \dots, t_1 重复上述过程,得到

UB_k , 同时使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1$, 且当 $k=1$ 时, $UB_1=0$ 。给定显著性水平 α (通常取 $\alpha=0.05$), 在显著性区间内 UB_k 和 UF_k 若有一个交点, 则是气温突变的开始时间, 若交点在显著性区间外或者在显著性区间内有不止一个交点, 则要通过滑动 t 检验的方法来判别是否为突变点, 若滑动 t 检验结果显著则可认为是突变点。 UB_k 和 UF_k 任一条曲线的值大于零表示时间序列呈上升趋势, 小于零表示呈下降趋势。

1.3.3 正交分解法(EOF)

EOF 是一种分析矩阵数据的结构特征并提取主要的数据特征量的方法, 它能把随时间变化的变量场分解为不随时间变化的空间函数部分及只依赖时间变化的时间函数部分。通过显著性检验的前几项特征向量场最大限度地表征了某一区域气候变量场的典型分布结构, 若特征向量各分量均为同一符号的值, 则表示该区域变量变化基本一致; 时间系数则反应了对应空间模态随时间的权重变化, 系数绝对值越大则这类分布形式越典型。气象上为了消除气候上的多年变化, 常用距平场进行分析。以数据矩阵 $\mathbf{X}(m \times n)$ 为例, 以下是 EOF 的算法简介。

(1) 选定要分析的数据样本, 进行数据预处理, 通

常处理成距平的形式,得到一个数据矩阵 $X(m \times n)$ 。

(2) 计算 X 与其转置矩阵 X^T 的交叉积,得到方阵

$$C_{m \times m} = \frac{1}{n} X X^T$$

式中 $C_{m \times m}$ 称为协方差矩阵,如果 X 经过了标准化处理,则 $C_{m \times m}$ 实际代表的是相关系数矩阵。

(3) 计算 $C_{m \times m}$ 的特征根序列 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 及特征向量 $V_{m \times m}$,这两个矩阵满足:

$$C_{m \times m} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times \hat{\Lambda}_{m \times m}$$

其中 $\hat{\Lambda}_{m \times m}$ 为对角矩阵,即

$$\hat{\Lambda}_{m \times m} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_m \end{pmatrix}$$

一般特征根按从大到小顺序排列,即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ 。因为数据 X 是真实的观测值,所以 X 应该大于或者等于 0。每一个非 0 的特征根对应一列特征向量值,也称 EOF。如 λ_1 对应的特征向量值称为第一个 EOF 模态,也就是 $V_{m \times m}$ 的第一列,即 $\text{EOF1} = V_{m \times m}(:, 1)$, λ_k 对应的特征向量是第 k 个模态,即 $\text{EOF}k = V_{m \times m}(:, k)$ 。

2 西南地区气温的时间特征

2.1 年平均气温的演变

中国西南地区多年的平均气温、最低气温和最高气温分别为 13.53 °C、9.18 °C、18.64 °C。图 3 为中国西南地区 2 m 年平均气温、最低气温和最高气温的百年时间序列。在过去百年中,西南地区的气温表现出明显的波动特征。气温总体上呈现上升趋势,气温线性倾向率为 0.28 °C/100 a ($P < 0.05$),这与 Theil-Sen 趋势估计的气温倾向率 (0.30 °C/100 a) 基本一致;最低气温和最高气温的倾向率分别为 0.34 °C/100 a 和 0.18 °C/100 a。因此,过去百年西南地区的气温总体上呈现上升趋势,其中最低温度的升温速率最大,约为最高气温的 2 倍,说明西南地区气候变暖的最主要贡献来自最低温度的升高,而最高气温的贡献较小,这与已有的结论一致^[28]。

需要注意的是,西南地区气温在过去百年中经历了两次显著的变暖事件,第一次出现在 1910–1950 年,持续的时间约为 40 a,主要的升温阶段为 1910–1925 年,从 10 a 平滑的气温演变来看,最低气温升高最为明显,而最高气温升高最慢,平均气温、最低气温和最高气温的升高速率分别为 0.40 °C/10 a、0.53 °C/10 a、0.27 °C/10 a,最低气温升高对气温上升贡献要

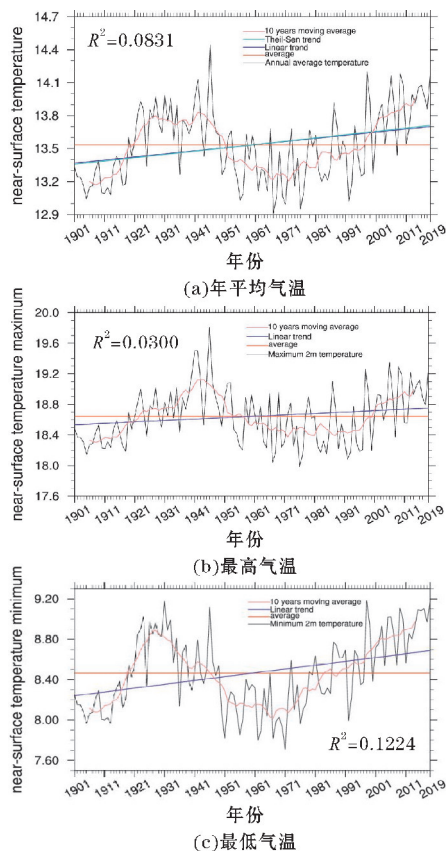


图3 西南地区 1901–2019 年年平均气温、最高气温、最低气温的时间演变和线性趋势

高于最高气温。在这次变暖事件中,平均气温和最低气温的峰值出现时间基本一致,但是最高气温的峰值出现时间明显滞后,出现在变暖事件的后期 (1942 年)。第二次变暖事件始于 1970 年代并延续至今,平均气温、最低气温和最高气温的升高速率分别为 0.16 °C/10 a、0.2 °C/10 a、0.12 °C/10 a。两次变暖事件所能达到的年均气温极值基本一致,而且都表现为最低气温的上升速率最大,对气候变暖的贡献更大。但是这两次变暖事件的升温速率及升温持续时间有明显的差异,第一次变暖事件升温更加强烈,升温时间为 15 a 左右,而第二次变暖事件已经持续升温接近半个世纪,气温增速更加平缓。这种差异表明这两次变暖事件的强迫因子和机制可能有明显的不同。

因此,从时间的演变看,气温经历了升温—降温—升温的过程。从气温距平看,百年来的年平均气温变化可分为 4 个时期,20 世纪 20 年代以前为偏冷期,20–40 年代为偏暖期,50–90 年代中期经历了较长时间的偏冷期,90 年代中期至今为偏暖期 (表 1)。90 年代年平均气温为百年来最低气温,00 年代为百年来最高气温,百年来年代际平均气温上升了 0.65 °C。90 年代气温倾向率达到最大值为 0.48 °C/10 a,40 年代气温倾向率达到最小值为 -0.52 °C/10 a。

表 1 西南地区年平均气温的年代际变化

年代	年平均气温/℃	距平/℃	倾向率/(℃/10 a)
20 世纪 00 年代	13.21	-0.29	-0.05
10 年代	13.28	-0.22	0.37
20 年代	13.75	0.25	0.04
30 年代	13.73	0.22	-0.27
40 年代	13.78	0.28	-0.52
50 年代	13.39	-0.11	0.01
60 年代	13.25	-0.25	-0.19
70 年代	13.33	-0.17	0.26
80 年代	13.46	-0.04	0.29
90 年代	13.48	-0.02	0.48
21 世纪 00 年代	13.86	0.35	0.31

气温的突变特征分析如图 4 所示。UF 曲线表示气温的顺序统计量,UB 曲线表示气温逆序统计量。在显著性水平 $\alpha=0.05$, $U_{0.05}=1.96$ 的条件下,UF 曲线与 UB 曲线的交点分别在 1919 年、1948 年及 2005–2011 年。经过滑动 t 检验,发现只有第一个交叉点(1919 年)通过了 0.01 的信度检验,可以认为 1919 年是西南地区年平均气温发生突变的开始时间。20 世纪 20–50 年代,UF 曲线在区间之外,即为突变发生的时间区间。结合前面图 3 也可以看出,在 1919 年附近出现年平均气温的突增,10 a 滑动平均气温有较大幅度的增长,而未通过滑动 t 检验的 1948 年及 2005 年后的几个时间上的降温和升温幅度相较于 1919 年都更平缓一些。

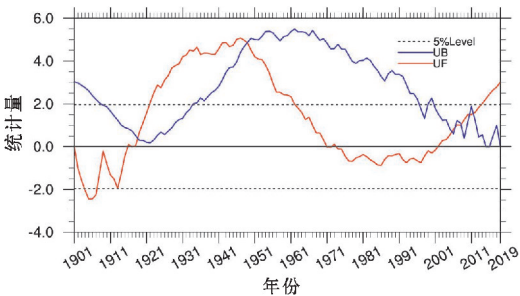


图 4 西南地区 1901–2019 年年平均气温突变分析

2.2 季节平均气温的演变

图 5 为西南地区 1901–2019 年四季年平均气温距平。总体上,四季平均气温的时间序列与年平均气温时间序列有相似之处,均呈现先升再降最后再升的规律,即在 1920 年之前为连续的冷异常,20–40 年代以暖异常为主,50–90 年代以冷异常为主,21 世纪开始转为明显的暖异常。而气温异常值的大小则有明显不同,冬季的气温异常最强烈,而夏季的气温异常最弱。这与中国平均的结果有较大差异^[29],表明西南地区的气温变化与中国平均存在非同步性。

从区域平均的演变趋势看,四季的气温均呈上升趋势,但是春冬两季气温倾向率比夏秋两季更大,并且只有春季和冬季通过了显著性检验($P<0.05$)。春季的气温倾向率为 0.40℃/100 a,冬季的气温倾向率为 0.42℃/100 a,冬季的升温贡献最大(图 6)。相比而言,夏季和秋季的气温倾向率明显要小,分别为 0.20℃/100 a、0.15℃/100 a。这与张勇等^[17]基于 20CR 再分析资料得到的结论相反。

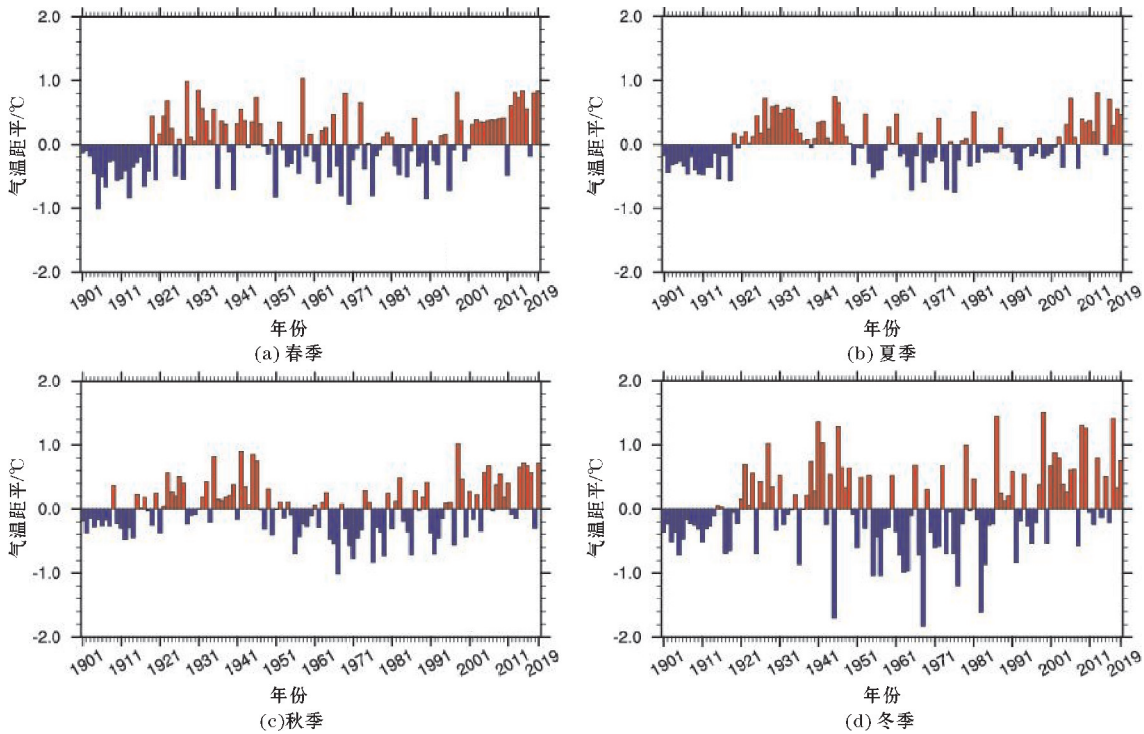
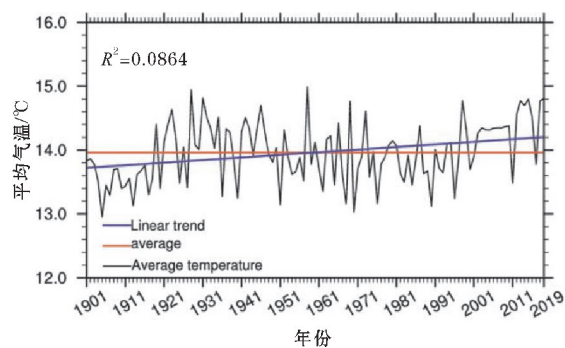
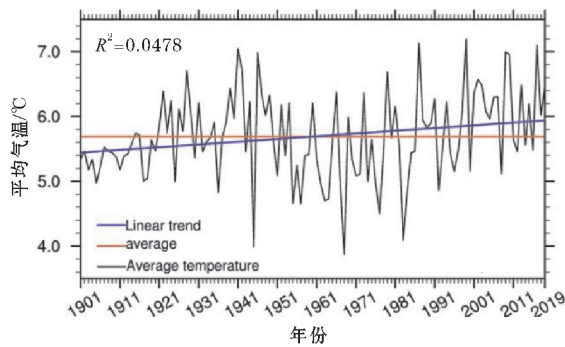


图 5 西南地区 1901–2019 年四季平均气温距平



(a) 春季



(b) 冬季

图 6 西南地区 1901–2019 年年平均气温的时间序列
(黑线)、平均值(红线)、线性趋势(蓝线)

3 西南地区气温的空间特征

3.1 平均气温的空间特征

图 7 为西南地区 1901–2019 年年平均气温空间分布图,受太阳辐射在纬度上分布不均的影响,年平均气温的空间分布呈现由南向北递减的趋势。受海拔高度西高东低的影响,年平均气温的空间分布呈现西低东高的特征。西南地区年均最低气温出现在四川的西北部,年平均气温平均值在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,这个地区为海拔较高的高原和山脉。年均最高气温出现在南部,位置约在 25°N 以南,年平均气温平均值在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,在 25°N 以北地区,气温表现出极值分布特征,中心范围与四川盆地基本重叠,极值出现在四川与重庆交界处。原因可能是盆地地形较为封闭,空气湿度较高,易形成云雾天气,大气逆辐射作用明显,气温日较差和年振幅较小,使得平均气温较高;尽管云顶会反射和吸收一部分太阳光,但是其大气逆辐射可能抵消了这部分的影响。另外一方面,盆地周围的山脉对冷空气有阻挡作用,相对于同纬度地区气温较高。此外,四季的气温空间分布特征与年平均气温的气温

空间分布特征比较相似,仍受纬度、海拔和地形影响(图略)。

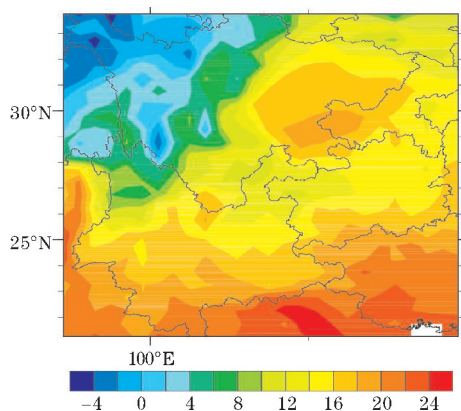


图 7 西南地区 1901–2019 年年平均气温空间分布

前面研究了西南地区多年平均气温空间分布及其主要的影响因子,但是各因子重要程度尚不清楚。为进一步研究西南地区百年来气温空间型和变化进程,本文对西南地区年平均气温距平做 EOF 分解。图 8 为西南地区 1901–2019 年年平均气温距平场的空间向量场以及对应的时间系数。第一模态的方差贡献达到 73.9%,远高于第二模态(9.0%)和第三模态(7.6%)。

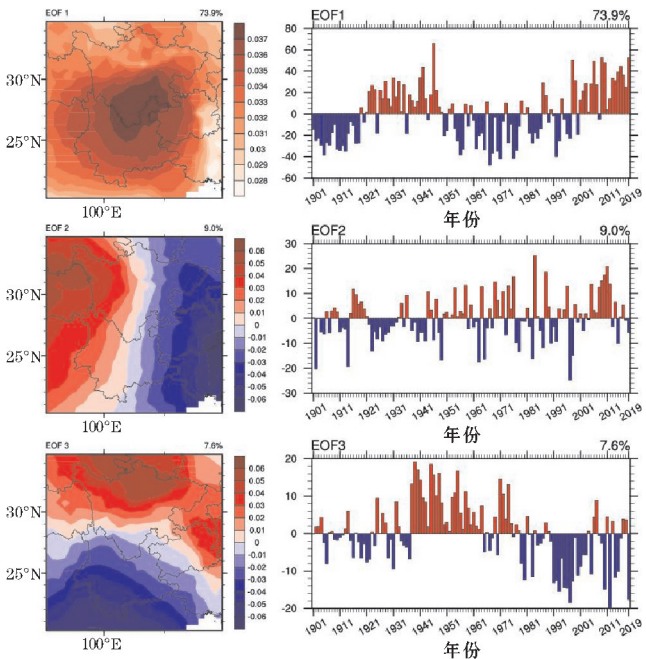


图 8 西南地区 1901–2019 年年平均气温距平场的
EOF 前三模态的空间向量场及对应的时间系数

第一模态的特征向量值呈现极值分布特征且全区的符号一致,说明西南地区 1901–2019 年年平均气温变化全区总体一致,即整个西南地区的气温一致升温或者一致降温。这与平均空间分布中的极值分布型(图 7)对应,但是特征向量值的大值区在四川南部与

云南北部的交界区,这是气温变率最大的地区。结合第一模态的时间系数序列,1920 年之前的20 a西南地区第一模态时间系数序列为负,表示西南地区这20 a气温普遍偏低;而20-40 年代气温普遍偏高;50-90 年代气温重新进入偏低时期;到 21 世纪初开始,气温转入偏高时期,这与图 3 的结论基本一致。同时,在图 4 的突变特征中,气温在 1919 年发生突变,气温突然增暖,也与图 8 的特征一致。

第二和第三模态作为第一模态补充,与第一模态的空间向量场有很大的差异,分别反映了东西方向和南北方向的温度跷跷板式空间分布。第二模态的特征向量值呈东西向带状分布,即呈东西反向的特点,正负值变化的中心线基本在102 °E。这其实反映了西南地区东西部海拔高度对气温的影响。第三模态的特征向量值呈南北向带状分布,即呈南北反向的特点,正负值变化的中心线基本在27 °N~28 °N,反映了以纬度为主要影响因素的气温分布特征。

3.2 气温变率的空间特征

图 9 为西南地区 1901-2019 年气温的长期趋势分布。在西南大部分地区年平均气温呈现出升温趋势,总体而言西部的升温幅度要比东部高。西部增暖的中

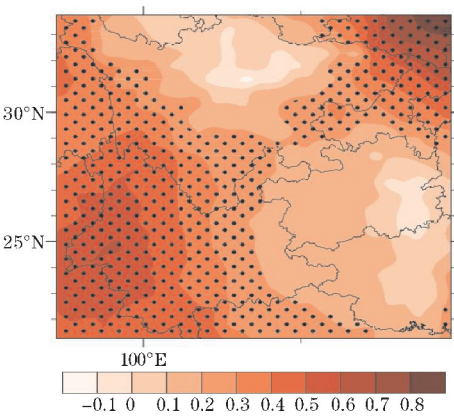


图 9 西南地区 1901-2019 年气温长期趋势分布
(打点区域为通过 95% 显著性检验的地区)

心强度达到0.5 °C/100 a,这表明高海拔地区升温更加突出和显著($P<0.05$)。另外一个显著升温的地区是东北部,升温倾向率最高可达0.8 °C/100 a。四川盆地及其北部地区及贵州地区呈现出较弱的增暖趋势,甚至中心有部分区域呈现变冷趋势,但这些区域的趋势均未通过显著性检验。

从季节尺度上看,4 个季节的气温趋势空间分布型与年平均气温基本一致,表现为西部山区升温幅度要显著高于东部平原地区,但是各个季节的升温速度有较明显的差异。如图 10 所示,夏季西南地区的西部有较强的升温,尤其在云南的德宏傣族景颇族自治州

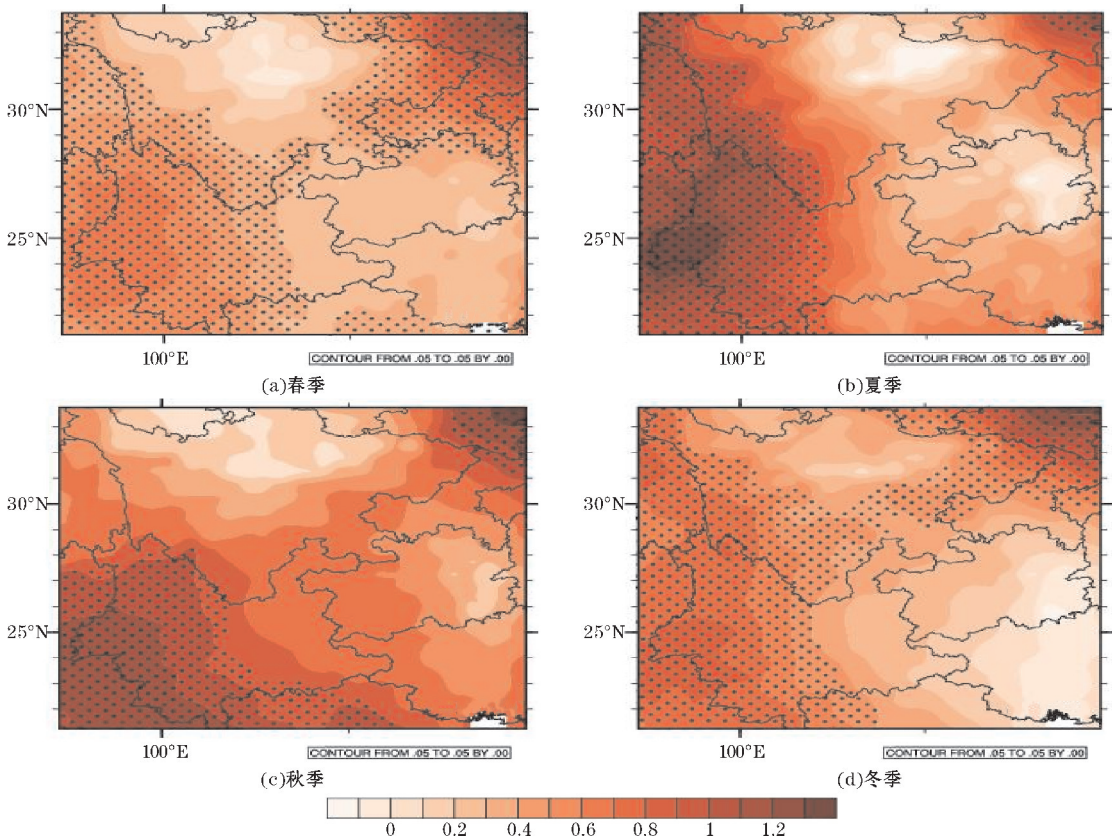


图 10 西南地区 1901-2019 年季节的气温倾向率分布

有气温倾向率的最大值,达到 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,而西南地区东部未通过显著性检验。秋季升温的中心在云南西部($1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)及四川与重庆交界区北部。总体来讲,西南地区夏秋两季西南部升温幅度较大,四季升温中心基本都在云南西部和重庆北部且均通过了显著性检验,四川北部和贵州地区升温率较小甚至为负并且均未通过显著性检验。相比而言,冬季和春季的升温速度比夏秋明显偏弱,升温中心在云南西部、四川西南部及四川与重庆交界区北部。但是冬春两季的降温速率也明显小于夏秋两季,因此从区域平均而言,冬春两季的区域气温倾向率要明显高于夏秋两季。这说明气候变暖可能会加剧气温的空间差异,而这种差异对于降水的影响是值得深入研究的。需要注意的是,4 个季节的气温趋势空间分布型及升温强度与张勇等^[17]基于 20CR 再分析资料得到的结论不同,这表明季节

尺度上的气温趋势仍存在一定的不确定性。

4 与其他地区的对比

西南大部分地区属于湿润区,只有四川西北部属于半湿润区,本文已经讨论过西南地区气温的时空变化特征,下面将与西北、东北、华北、华中、华东、华南年平均气温和气温倾向率进行对比。每个区域选取省会城市年平均气温的平均值作为该区域的年平均气温,并计算每个区域的气温倾向率(表 2)。总体上表现出北方地区升温幅度要高于南方地区,东部地区要高于中西部地区。升温最明显的地区是东北地区,升温幅度达 $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,其次华北,升温幅度接近东北地区,为 $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,接下来是华东地区、西北地区、华中地区、华南地区,而西南地区升温率最低。

表 2 1901–2019 年西南和其他地区年平均气温及气温倾向率

指标	西南	西北	东北	华北	华中	华东	华南
年平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	13.53	6.47	5.13	9.59	16.05	16.67	22.71
气温倾向率/($^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)	0.3	0.87	1.43	1.38	0.77	1.08	0.52

实际上,已有的研究表明,近百年来中国的年平均气温变化分为 4 个时期,1920 年之前为冷期,20–50 年代为暖期,20 年代时有较强升温,年均最高气温出现在 40 年代,60–80 年代为冷期,90 年代之后为暖期,中国 1881–1997 年的平均气温上升率为 $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ ^[30–32]。西南地区的气温倾向率小于中国其他地区的气温倾向率,是中国升温率最小的地区,最近一次暖期的开始时间较中国年平均气温更晚一些。同时,与中国季节升温特征一样,冬季的气温倾向率更大,气候变暖主要体现在冬季。

5 结论

利用 1901–2019 年 CRU 气温数据,通过线性回归和 Theil-Sen 趋势估计方法分析西南地区百年来的年平均气温和季节平均气温的变化趋势,利用 M-K 方法进行突变检验,基于主分量分析和该区域的气温倾向率来分析气温趋势的时空分布特征,最后与中国其他区域进行对比,得出以下结论。

(1)过去百年西南地区年平均气温和季节平均气温及最低气温和最高气温均表现为上升趋势。其中,年平均气温倾向率为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,四季中冬季的气温倾向率最大($0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)。最低气温和最高气温的倾向率分别为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 和 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,说

明最低气温的升高对西南地区气候变暖的贡献明显高于最高气温。该地区经历了两次显著的变暖事件,第一次发生在 1910–1950 年,第二次始于 1970 年且持续至今。两次变暖事件所能达到的年均气温极值基本一致,而且都表现为最低气温的上升速率最高,对气候变暖的贡献更大。但是两次变暖事件在升温速率及升温持续时间方面差异明显。因此,从年代际尺度看,气温呈现出“升—降—升”的演变特征。

(2)西南地区气温表现出 3 个明显的空间分布特征,这与影响该地区的 3 个因子密切相关。首先,气温在空间上表现呈现出极值的空间型,中心位置与四川盆地范围重叠,这对应气温 EOF 的第一模态(方差贡献为 73.9%);其次,西部高海拔区比东部低海拔地区的气温低,对应第二模态(方差贡献为 9.0%);此外,气温总体呈现南部高于北部,对应第三模态(方差贡献为 7.6%)。从变化趋势看,该区域的温度总体表现出上升趋势,并且增温速率随海拔的升高而增大。

(3)从气温变率看,西南地区西部的升温幅度要比东部高,西部高海拔地区增暖的中心强度达到 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。此外,四川盆地及贵州部分地区呈现出较弱甚至变冷趋势,但这些区域的趋势均未通过显著性检验。从季节尺度上看,4 个季节的气温趋势空间分布型与年平均气温基本一致,但是各个季节的升温速度有较明显的差异,表现为冬春两季的气温倾向

率要明显高于夏秋两季,这与最低气温对西南地区气候变暖贡献最大的结论一致。

(4)西南地区百年来的升温进程与中国存在非同步性,西南地区是中国升温速率最小的地区。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013-The Physical Science Basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2014.
- [3] 傅桦. 全球气候变暖的成因与影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2007,28(6):11-15.
- [4] 刘珊,陈幸荣,蔡怡. 全球变暖“停滞”研究综述[J]. 海洋学报,2019,41(4):1-14.
- [5] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature,2013,501(7467):403-407.
- [6] 苏京志,温敏,丁一汇,等. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学,2016,40(6):1143-1153.
- [7] Xie S P. Ocean Warming Pattern Effect On Global And Regional Climate Change [J]. AGU Advances,2020,1(1).
- [8] Su J, Zhang R, Wang H. Consecutive record-breaking high temperatures marked the handover from hiatus to accelerated warming [J]. Scientific Reports,2017,7(1):S22-S23.
- [9] Zhang C, Li S, Luo F, et al. The global warming hiatus has faded away: An analysis of 2014 - 2016 global surface air temperatures [J]. International Journal of Climatology,2019,39(12):4853-4868.
- [10] 张强,韩永翔,宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展,2005(9):990-998.
- [11] Zhai P, Ren F. On changes of China's maximum and minimum temperatures in 1951 - 1990 [J]. Acta Meteorologica Sinica,1999(3):278-290.
- [12] 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.
- [13] 马振锋,彭骏,高文良,等. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. 高原气象,2006,25(4):633-642.
- [14] 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.
- [15] 袁文德,郑江坤. 1962-2012 年西南地区极端温度事件时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(7):1246-1254.
- [16] 罗玉,范广洲,周定文,等. 近 41 年西南地区极端温度变化趋势[J]. 西南大学学报(自然科学版),2016,38(5):161-167.
- [17] 张勇,蔡宏珂. 基于 20CR 再分析资料的中国西南地区气温长期趋势评估[J]. 云南大学学报(自然科学版),2020,42(4):712-719.
- [18] 杜泽玉,曹富强,杨荣. 基于 CRU 资料的山西百年气温时空演变特征[J]. 高原气象,2021,40(1):123-132.
- [19] 杨勤勤. 非参数 Theil-Sen 处理线性混合模型[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [20] Sheffield J, Wood E, Roderick M. Little change in global drought over the past 60 years[J]. Nature,2012,491:435-438.
- [21] Schrier G, Barichivich J, Briffa K, et al. A scPD-SI-based global data set of dry and wet spells for 1901 - 2009 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2013,118:4025-4048.
- [22] Schrier G, Jones P, Briffa K. The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration [J]. J Geophys Res-Atmos,2011,116.
- [23] Lawler J, Shafer S, White D, et al. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere[J]. Ecology,2009,90:588-597.
- [24] Rowhani P, Lobell D, Linderman M, et al. Climate variability and crop production in Tanzania[J]. Agr Forest Meteorol,2011,151:449-460.
- [25] Jones P, Harpham C, Harris I, et al. Long-term trends in precipitation and temperature across the Caribbean[J]. Int J Climatol,2016,36:3314-3333.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:49-50.
- [27] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [28] Huang J, Guan X, Ji F, et al. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmos Chem Phys,2012,12:5391-5398.
- [29] 唐国利,罗勇,黄建斌,等. 气候变暖在继续[J]. 气候变化研究进展,2012,8(4):235-242.

[30] 林学椿,于淑秋,唐国利. 中国近百年温度序列[J]. 大气科学,1995,19(5):525-534.

[31] 王绍武. 近百年中国气候变化的研究[J]. 中国科学基金,1998,12(3):167-17.

[32] 屠其璞,邓自旺,周晓兰. 中国近117年年平均气温变化的区域特征研究[J]. 应用气象学报,1999,10(S1):35-43.

Temporal and Spatial Characteristics of Temperature in Southwest China during the Past Century

ZENG Jian¹, XU Qinghan², ZHANG Yu¹, YANG Zesu¹

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Nanjing University of Information Technology, 210044 Nanjing, China)

Abstract: In order to gain an in-depth understanding of temperature changes in Southwest China over the past 100 years, this paper uses the temperature data of the Climate Research Center of the University of East Anglia (CRU) from 1901 to 2019 to analyze the trend and temporal and spatial distribution of temperature in southwest China in the past hundred years, and compared with those in other regions of China. The results show that: (1) In the past 100 years, the annual average temperature, maximum and minimum temperature in Southwest China show an upward trend, and the tendency rates are 0.28 °C/100 a, 0.18 °C/100 a and 0.34 °C/100 a, respectively. The contribution of the minimum temperature to climate warming is significantly higher than that of the maximum temperature. Southwest China has experienced two significant warming events. The maximum annual average temperature reached by the two warming events are basically the same, but the two warming events have significant differences in the rate and the duration of the temperature rise. (2) The temperature in Southwest China shows three pronounced spatial distribution characteristics. Firstly, the temperature exhibits an extreme spatial pattern. Its maximum occurs at the junction of Sichuan and Chongqing, which corresponds to the first mode of EOF decomposition (73.9% variance contribution). Secondly, the temperature increases with altitude, corresponding to the second mode (with a variance contribution of 9.0%). Thirdly, the temperature is generally higher in the south than that in the north, corresponding to the third mode (with a variance contribution of 7.6%). (3) The warming process in Southwest China is not synchronous with that in other regions of China and Southwest China has the lowest temperature increase rate in China.

Keywords: Southwest China; air temperature; climate change; temporal and spatial characteristics; CRU