

昆明气温1990s中期后年代际增暖特征及其季节性变化

郑春怡^{1,2}, 黄昊³, 黎成超², 黄菲^{3,4*}

¹云南省陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明

²云南省气象局, 云南 昆明

³中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

⁴中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

摘要

云南省昆明市作为中国的春城, 气候特征显示出明显的冬暖夏凉的特征。随着近些年来全球变暖, 四季如春的昆明也呈现出明显的升温特征。1961~2020年昆明市日平均气温的升温速率约为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 远远高于全球变暖的升温速率。其中, 冬季的升温最快, 达 $5.2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 其次为春季($4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)、秋季($3.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)和夏季($3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)。日最高气温和日最低气温均存在显著的升温特征, 但日最低气温的贡献更大, 其升温速率远高于日最高气温的升温速率。昆明气温的增暖并不是简单的线性升高, 而是在1990s中期出现显著的年代际转型特征, 从1993年之前的异常偏冷转变为1994年之后的异常偏暖位相。不同季节的年代际增温幅度不同, 日平均气温的年代际平均增温幅度依次从冬(1.9°C)、春(1.5°C)、秋(1.4°C)、夏(1.0°C)递减; 日最低气温随季节的年代际增温规律类似, 但增温幅度更大, 冬、春、秋、夏的年代际增温分别为 2.6°C 、 2.5°C 、 1.5°C 和 1.0°C ; 日最高气温的年代际增温季节变化表现出从春、夏、秋、冬依次增加的特征, 但增温幅度最小, 分别为 0.91°C 、 1.18°C 、 1.27°C 和 1.34°C 。气温日较差冬春季大夏秋季小, 且在冬春季节年代际减小显著。昆明气温的季节变化呈现出较为“秃顶”的单峰结构, 暖季持续时间较长。1990s中期年代际突变之后气温的季节变化都表现出暖季提前、冷季推迟的特征, 且日最低气温和日平均气温暖季提前的日数明显多于冷季推迟的日数。昆明气温这种年代际的升温特征与全球变暖下西太平洋副热带高压的西伸北进, 以及昆明北部东亚异常暖高压东侧的暖平流输送有关。

关键词

昆明, 日平均气温, 日最高气温, 日最低气温, 年代际增暖, 季节变化

Decadal Warming of Air Temperature of Kunming after Mid-1990s and Its Seasonality Changes

*通讯作者。

文章引用: 郑春怡, 黄昊, 黎成超, 黄菲. 昆明气温1990s中期后年代际增暖特征及其季节性变化[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(3): 395-405. DOI: 10.12677/ccr.2022.113040

Chunyi Zheng^{1,2}, Hao Huang³, Chengchao Li², Fei Huang^{3,4*}¹National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Kunming Yunnan²Yunnan Meteorological Bureau, Kunming Yunnan³College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong⁴Key Laboratory of Physical Oceanography of MOE, Ocean University of China, Qingdao ShandongReceived: Apr. 26th, 2022; accepted: May 24th, 2022; published: May 31st, 2022**Abstract**

Kunming, Yunnan Province, as the spring city of China, has an obvious climate characteristic of warm winter and cool summer. With the global warming in recent years, Kunming also presents obvious warming characteristics. During 1961~2020, the daily mean air temperature (DMAT) of Kunming increased at a rate of 4°C/100 a, which was much higher than that of global warming. Among them, the temperature rise in winter is the fastest, reaching 5.2°C/100 a, followed by spring (4.2°C/100 a), autumn (3.7°C/100 a) and summer (3.0°C/100 a). Both daily highest air temperature (DHAT) and daily lowest air temperature (DLAT) have significant warming characteristics, but the contribution of DLAT is greater, and its warming rate is much higher than that of DHAT. The warming of temperature in Kunming is not a simple linear increase, but a significant interdecadal shift in the mid-1990s, from an abnormally cold phase before 1993 to an abnormally warm phase after 1994. The amplitudes of decadal warming are not the same in different season. The interdecadal warming of DMAT decreased from winter (1.9°C), spring (1.5°C), autumn (1.4°C) and summer (1.0°C). The interdecadal warming of DLAT with seasons was similar, but the warming amplitude was larger, and the interdecadal warming in winter, spring, autumn and summer were 2.6°C, 2.5°C, 1.5°C and 1.0°C, respectively. The interdecadal seasonal variation of DHAT showed an increasing trend from spring, summer, autumn and winter, but the warming range was the smallest, which was 0.91°C, 1.18°C, 1.27°C and 1.34°C, respectively. The diurnal temperature range is larger in winter and spring, smaller in summer and autumn, and decreases significantly in winter and spring after the decadal shift. The seasonal cycle of temperature in Kunming presents a relatively “bald” single-peak structure, and the warm season lasts a long time. After the decadal shift in the mid-1990s, the seasonal temperature changes showed that the warm season was advanced and the cold season was delayed, and the number of days in the warm season was significantly earlier than that in the cold season. The interdecadal warming characteristics of Kunming temperature are related to the westward and northward extension of the Western Pacific subtropical high and the warm advection transport along the east side of the anomalous warm high in the north of Kunming.

Keywords**Kunming, Daily Mean Air Temperature, Daily Highest Air Temperature, Daily Lowest Air Temperature, Interdecadal Warming, Seasonality**

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

云南省昆明市一直以其冬暖夏凉的舒适气候而被誉为四季如春的“春城” [1]，然而，近年来随着全球变暖，全球极端高温事件频发，云南的春夏季也不可避免地出现极端高温现象[2]-[7]。研究表明，越极

端的极端高温在未来发生的风险越大,并且极端高温日数增加的风险要大于极端高温强度增加的风险[8]。不用等到未来,在刚刚过去的2019年4~6月,云南省就出现了破纪录的持续性极端高温天气[7],导致严重的极端干旱天气,对当地农业和花卉市场造成极大的影响。特别是四季如春的昆明市,其日最高气温在2019年5月11~21日期间连续11天超过30℃,打破了最长连续30℃以上的历史纪录,使得四季如春的“春城”变成了名副其实的“烤城”。

最新发布的《中国气候变化蓝皮书2021》指出[9],全球变暖是近百年来全球气温变化的主旋律,特别是从1970s年代末开始全球变暖进入加速变暖的阶段,在1990s中后期进入一段全球变暖减缓停滞期后,2010s中期以后全球气温屡创新高,恢复了加速增温的趋势。在这种全球变暖的大背景下,中国极端高温事件在1990s中后期呈现出显著的年代际增多的特征[10]。地处独特地理位置的昆明,其气温变化,特别是极端高温的变化是否是全国气温的年代际突变特征一致,是本文首要关注的科学问题之一。另外,全球变暖不仅使得极端事件频发,还显著地改变了物候特征和气候的季节循环,使得中高纬度的春季提前到来而秋季推迟,暖季时间延长。昆明及周边地区是全国最主要的花卉种植区域,其物候的季节变化对花卉种植和生产有重要的影响,了解昆明气温在全球变暖和年代际转折的背景下其气温季节性的变化特征有重要价值,因此,系统地分析近几十年来昆明日平均气温、最高、最低气温以及气温日较差等的季节变化及其年代际差异,也是本文重点分析的内容之一。

2. 数据与方法

本文使用的气温数据来自于昆明气象站建国以来的气象观测数据,时间长度选取1961~2020年逐日的日平均气温、日最高气温和日最低气温数据。大尺度环流场的分析数据主要使用美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析数据集中同时段的全球网格点数据,数据下载网址为<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>,主要使用了等压面上的位势高度场、气温场和风场几个气象要素,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

本文主要采用了趋势分析、距平分析、方差分析和合成分析等统计分析方法。文中春、夏、秋、冬四个季节分别指3~5月、6~8月、9~11月和12~次年2月的平均,为了数据处理方便,将闰年的2月29日数据舍去未使用。

3. 昆明气温的年代际增温特征

3.1. 日平均气温

随着全球气候变暖,中国的气温总体上表现出比全球更快的增暖趋势[9]。地处西南地区的云南昆明,其气温变化也呈现出显著的增温趋势(图1)。从年平均的日均气温变化(图1(a))可以发现昆明的气温在近60a里呈现出显著的升温趋势,升温速率约为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,远远高于全球变暖的平均升温速率。其中,冬季(图1(b))的升温速率最快,达 $5.2^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,其次为春季(图1(c)),其升温速率为 $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,冬、春季的升温速率均高于年平均的升温速率。昆明日均气温在夏、秋季(图1(d),图1(e))的升温速率较小,低于年平均气温的升温速率,秋季的升温速率约为 $3.7^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,夏季的升温速率最慢,只有 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,但也远远高于全球平均的增暖速率,且在四个季节中夏季的线性趋势最显著,线性复相关系数为0.69,高于其他三个季节,但略低于年平均气温的0.71,表明年平均序列的线性趋势变化中夏季的贡献最大。

从图1中还可以发现,昆明日平均气温的变化不仅有显著的线性上升趋势,更多地表现出年代际变暖的特征。无论是年平均的气温曲线,还是各个季节的气温曲线,都一致地表现出在1990s中期之后的显著暖异常增多的特征。在1993年之前,昆明的日平均气温多以负异常为主,表明昆明的气温处于相对较冷的年代际位相阶段;而在1994年以后除了个别年份,气温距平值基本上多为正异常,表明昆明的气温进

入了明显的增暖期。这种从 1990s 中期之前的冷异常期转为其后的暖异常期，其年代际转折的振幅变化最大发生在冬季，1961~2020 年这 60 a 中，最暖的冬季发生在 2009 年，日均气温距平值为 2.4℃，最低日均温度出现在 1982 年的-2.6℃ (图 1(b))。注意到各个季节的日平均气温的最大值和最小值并不一致，表明不同季节最高气温和最低气温的可能贡献不同，特别是 2019 年夏季(图 1(d))是近 60 a 里最暖的夏季，可能与昆明 2019 年春季极端高温的出现有关[7]，年平均气温异常的最大值也出现在 2019 年(图 1(a))，应该也是由春、夏季席卷昆明的极端高温天气的贡献为主。

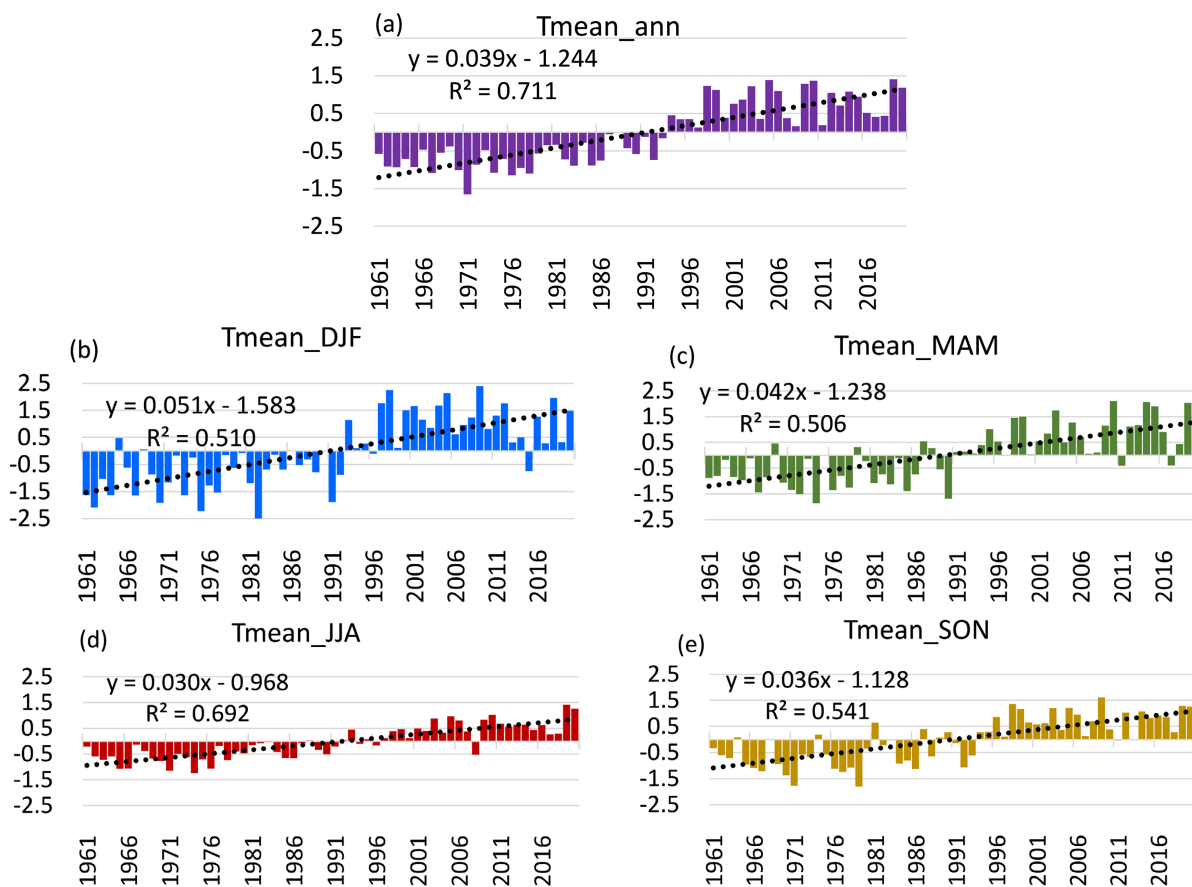


Figure 1. Time series of daily mean air temperature of Kunming from 1979 to 2019. (a) Annual mean; (b) Winter (December to February); (c) Spring (March to May); (d) Summer (June to August); (e) Autumn (September to November). The dotted line in each panel denotes linear trend of the timeseries, and the fitted equation and multiple correlation coefficient are located at the top left corner of each panel

图 1. 1961~2020 年昆明日平均气温异常的时间序列。(a) 年平均；(b) 冬季；(c) 春季；(d) 夏季；(e) 秋季。图中虚线为线性趋势，拟合方程和复相关系数在图中的左上角

3.2. 日最高气温

昆明的日最高气温(图 2)与日平均气温的变化特征类似，无论是年平均距平序列还是四个季节的变化也都显示出显著的线性趋势和年代际增温特征，且年代际变化的转折时间也基本上 1990s 中期前后。但日最高气温的增温速率均小于日平均气温的线性增长趋势，年平均和冬、春、夏、秋四个季节的增温趋势分别为 3.5℃/100 a、3.7℃/100 a、2.5℃/100 a、3.8℃/100 a 和 3.4℃/100 a，与日平均气温冬季增温速率最大所不同的是，日最高气温的增温速率最大出现在夏季，其次才是冬季和秋季，春季的最高气温增长速率最慢。另外注意到日最高气温距平序列与线性趋势的复相关系数均明显低于日平均气温的各时间序列，表明日最

高气温的变化中, 线性趋势的贡献较小, 而年际变化的贡献可能增大, 这在后面均方差的分析中可以得到进一步验证。同时我们也可以发现, 2019 年春季昆明的持续性极端高温事件显然与春、夏季(图 2(c), 图 2(d))中近 60 a 里最高温度都是达到历史最高值的结果相一致, 该结果还说明 2019 年不仅在春季昆明出现罕见的极端高温天气[7], 夏季同样出现破纪录的极端高温天气, 容易引发春夏连旱的灾害性气候事件。

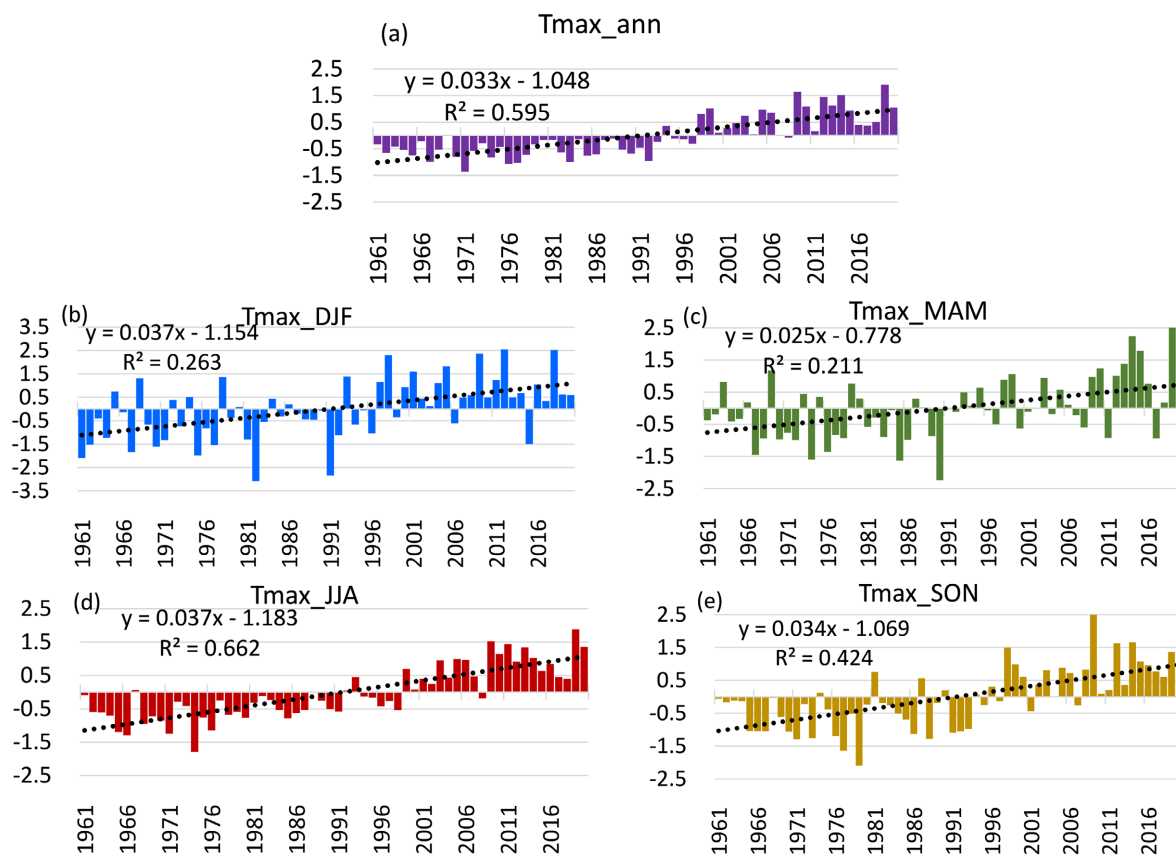


Figure 2. Same as in Figure 1, but for daily highest air temperature

图 2. 同图 1, 但为日最高气温距平序列

3.3. 日最低气温

日最低气温(图 3)也存在显著的升温特征, 与日平均气温和日最高气温相似, 都具有显著的升温趋势和 1990s 中期的年代际转折, 但日最低气温对日平均气温变化的贡献更大, 其升温速率远高于日最高气温的升温速率。日最低气温随季节的年代际增温规律与日平均气温的变化特征类似, 但升温速率更大, 年平均和冬、春、夏、秋季的增温速率分别为 $5.1^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $6.9^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $6.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $2.9^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 和 $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。另外可以发现, 日最低气温除了在秋季线性趋势的贡献相对较小以外, 其余三个季节的线性趋势对年平均最低气温的变化贡献都较大。值得注意的是, 昆明最低气温升温最快的时间段是 1998~2010 年这一段全球变暖减缓停滞阶段[11], 与最高气温在近些年的显著升温有所不同, 二者的共同作用使得昆明日平均气温在 1990s 中期以后一直呈现出显著的升温阶段。

3.4. 昆明气温气候平均的年代际差异

从多年气候平均的日平均气温(图 4(a))、日最高气温(图 4(b))和日最低气温(图 4(c))在 1993/1994 年代际突变前后的气候平均态对比可以发现, 无论是昆明的日平均气温, 还是最高或最低气温, 在 1993 年以

年几乎所有的点(除日最高气温的个别点)都在多年气候平均态之下,而在 1994 年之后则绝大多数的点都在气候平均态之上,表明 1993 年之前昆明的气温几乎都低于气候平均值,1994 年以后则几乎均高于气候平均值,几乎全年都具有明显的升温特征。另外,温度越低,蓝色和橙色的点离散度越大,表明一年四季中,温度越低的冷季,气温的年代际差异越大,特别是日最低气温低于 15℃时,年代际差异最大,最大差异甚至可达 5℃左右(图 4(c))。

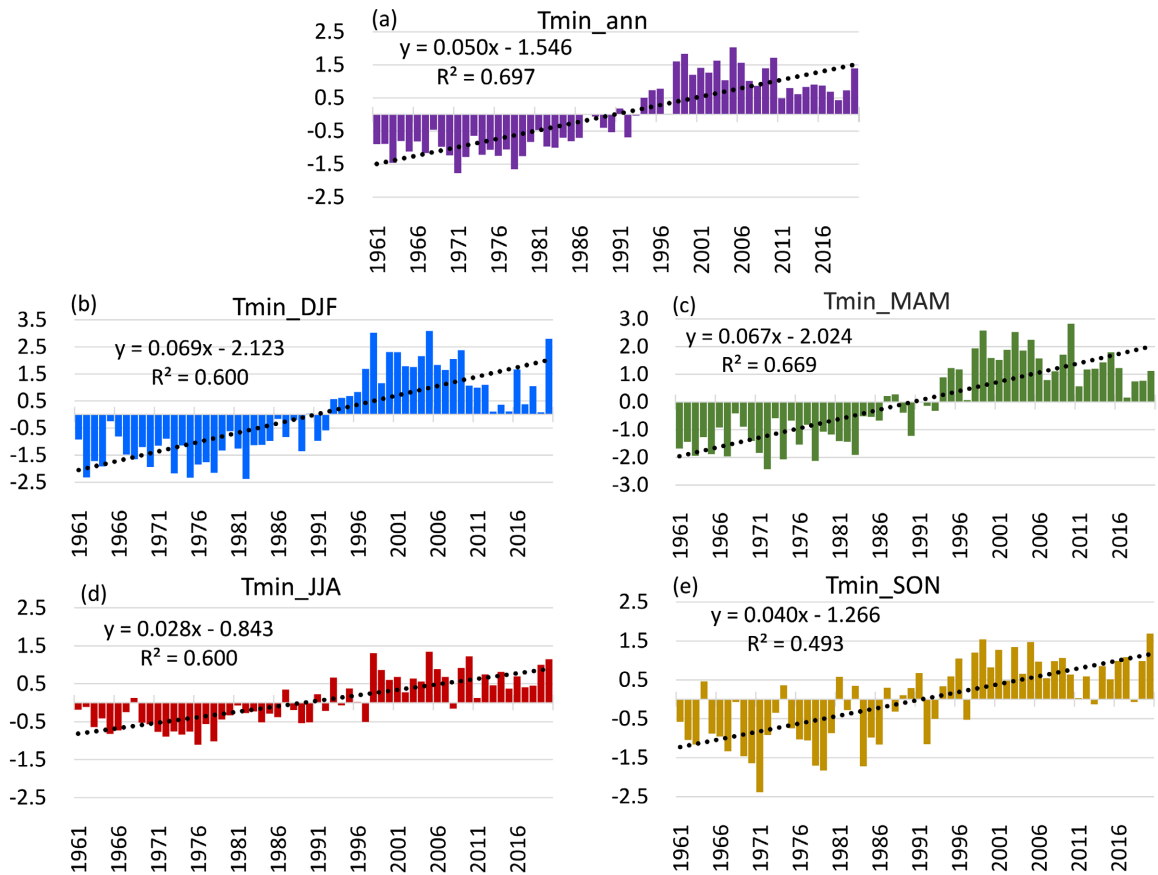


Figure 3. Same as in Figure 1, but for daily lowest air temperature
图 3. 同图 1, 但为日最低气温距平序列

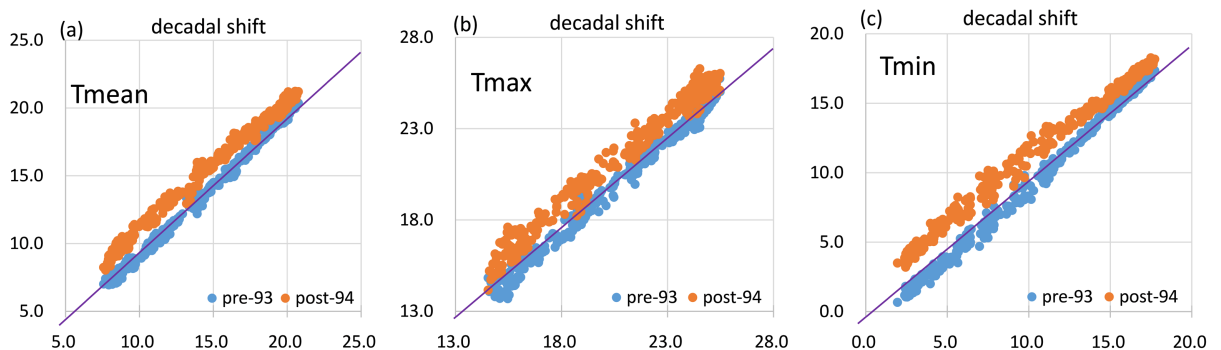


Figure 4. Scatter plots between 60a climatological mean of Kunming's daily mean air temperature (a), daily highest air temperature (b), and daily lowest air temperature (c) and pre-93 (1961~1993 climatological mean, blue dots) or post-94 (1994~2020 climatological mean, orange dots), respectively

图 4. 昆明日平均气温(a)、日最高气温(b)和日最低气温(c)的 60 年平均气候态分别与 1961~1993 年(pre-93, 蓝点)和 1994~2020 年(post-94, 橙点)多年平均的散点图分布

不同季节昆明气温的年代际差异不同,日平均气温(图 5(a))的年代际增温在冬季最强,平均增温 1.9℃,其次为春季 1.5℃,秋季 1.5℃,增温幅度最小的是夏季 1.0℃。日最低气温(图 5(c))的年代际增温幅度随四个季节的变化类似,但增温幅度更大,冬、春、秋、夏的年代际增温分别为 2.6℃、2.5℃、1.5℃和 1.0℃;日最高气温(图 5(b))的年代际增温季节变化表现出从春、夏、秋、冬依次增加的特征,但增温幅度最小,分别为 0.91℃、1.18℃、1.27℃和 1.34℃。可见,昆明日平均气温年代际升温的季节变化主要由最低气温的贡献为主。

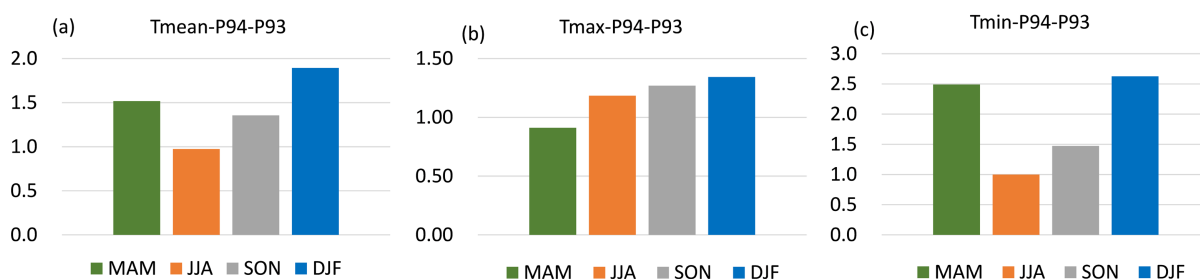


Figure 5. Decadal differences of Kunming's daily mean air temperature (a), daily highest air temperature (b), and daily lowest air temperature (c) between 1961-1993 (p93) and 1994-2020 (p94) in different seasons (MAM spring; JJA summer; SON autumn; DJF winter)

图 5. 不同季节(MAM 春季; JJA 夏季; SON 秋季; DJF 冬季)昆明日平均气温(a)、日最高气温(b)和日最低气温(c)在 1961~1993 年(p93)和 1994~2020 年(p94)的年代际差异

4. 昆明气温的季节循环特征及其年代际差异

4.1. 气温多年气候平均的季节变化及其年代际差异

昆明气温的季节变化(图 6(a))均呈现出典型的单峰结构,12~1 月气温最低,5~6 月气温最高,比通常中纬度最高温度出现的 7 月要提前 1~2 个月。通常昆明的气温在 4 月份开始快速升高,5~6 月达到最高温度,日最高温度甚至在 4 月末就达到一年中的最高温度,之后这种相对高的温度一直小幅度振荡,维持到 9 月份才开始快速降低,形成了较为“秃顶”的单峰型季节循环特征。

前面的分析表明,昆明的气温在 1990s 中期存在显著的年代际突变,无论是日平均气温(图 6(b)),还是日最高气温(图 6(c))或日最低气温(图 6(d)),1994 年年代际增暖之后的气温都表现出在几乎在所有季节中气温均上升的特征,与图 4 中的结果相一致。同时不同季节的增温幅度不同,日平均气温(图 6(b))和日最低气温(图 6(d))都表现出冬春季增温多、夏秋季增温少的特征,最大增温出现在 3 月份。而日最高气温(图 6(c))的年代际增温没有明显的冬春强夏秋弱的特征,最大增温出现在 12 月,但 6 月也出现了一次年代际增温的极大值。另外昆明气温的季节变化在 1994 年年代际增暖之后都表现出暖季提前、冷季推迟的特征,这种特征在日最低气温和日平均气温的变化反映得更清楚,且暖季提前的日数明显多于冷季推迟的日数,日最低气温暖季提前了一个月左右,体现出在春、秋过渡季节气温季节循环的不对称发展特征,这种气温季节性的年代际变化可能对花卉生产和物候生长等产生重要影响。

4.2. 气温日较差的季节变化

昆明气温日较差的季节变化(图 7)也呈现出典型的单峰结构,与气温的季节变化不同的是,日较差的季节变化在春季出现最大值,夏季为最小值,这与日最高气温极大值出现在 4~5 月和日最低气温极大值出现在 6 月(图 6)的二者时间不同步有关。冬春季的气温日较差明显大于夏秋季节的日较差变化。一年中气温的日较差在 7℃~15℃之间,反映了昆明气温的日较差随季节的变化不大,气候较为温和的特征。结合图 6(c),图 6(d)昆明日最高气温和日最低气温在 1990s 中期年代际增暖前后的变化可以明显看出,昆明

的气温日较差在年代际增暖后有明显的减小，且冬春季减小更甚(图略)。

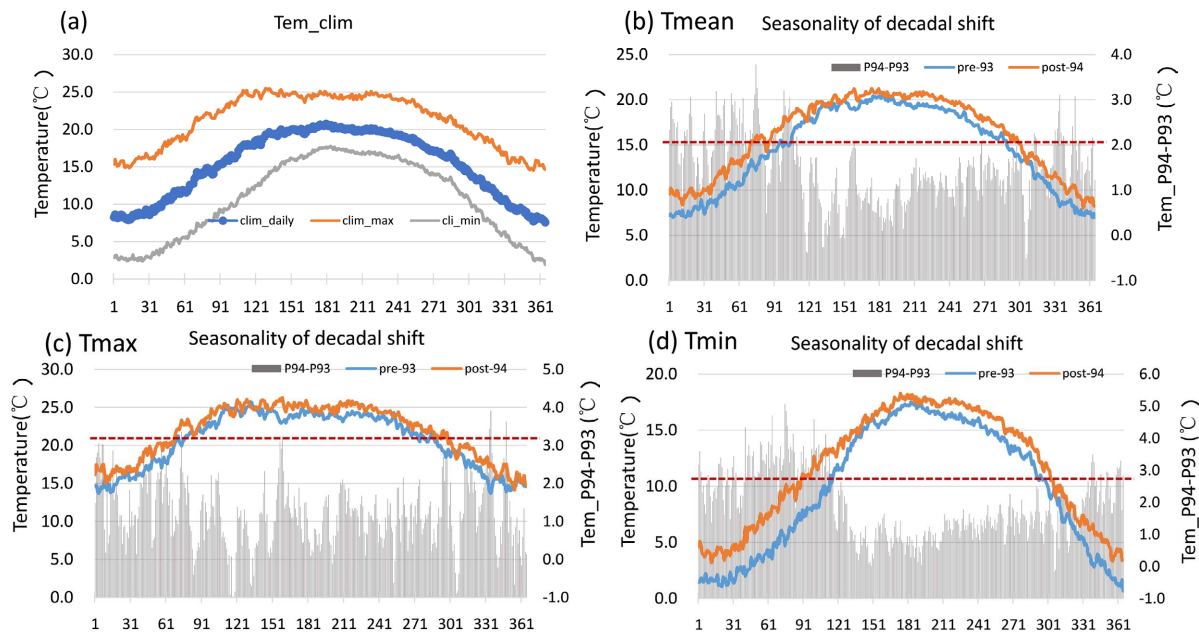


Figure 6. (a) Seasonal cycle of Kunming’s climatological daily mean air temperature (blue line), daily highest air temperature (orange line), and daily lowest air temperature (gray line). Seasonal cycle of Kunming’s daily mean air temperature (b), daily highest air temperature (c), and daily lowest air temperature (d) during 1961~1993 (pre-93) and 1994~2020 (post-94) periods and their decadal difference between the two periods (P94~P93)

图 6. (a) 昆明日平均气温(兰线)、日最高气温(橙线)和日最低气温(灰线)60 年气候平均的季节变化；昆明日平均气温(b)、日最高气温(c)和日最低气温(d)在 1961~1993 年(pre-93)和 1994~2020 年(post-94)年代际突变前后的季节变化及其差值的季节变化(P94~P93)。图中横坐标代表一年中的第几天，图(b)~(d)中的红色虚线分别代表昆明日平均气温、日最高气温和日最低气温的 60 年气候平均值

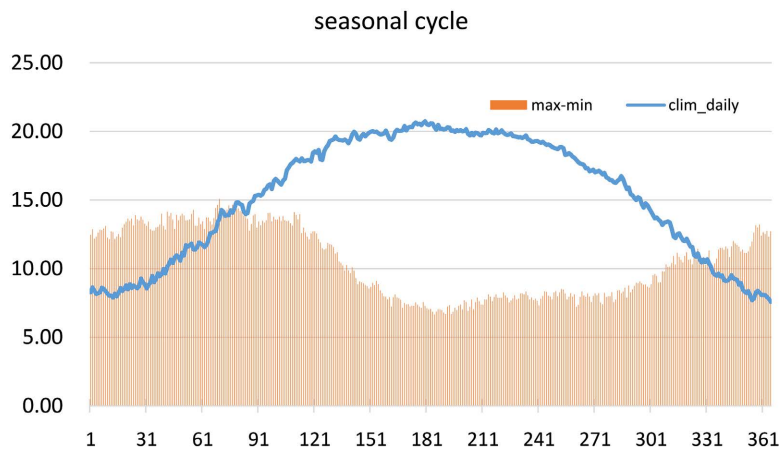


Figure 7. Seasonal cycle of Kunming’s climatological diurnal range of air temperature (daily highest air temperature minus daily lowest air temperature)

图 7. 昆明气温日较差(日最高气温减去日最低气温)的季节变化

4.3. 气温均方差的季节变化及其年代际差异

某一天或某个季节多年气温均方差或标准差的大小，可以表征该日或该季节气温年际年代际振荡的强弱变化特征。我们分别计算了昆明日平均气温、日最高气温和日最低气温均方差的季节变化曲线(图

8(a)), 可以发现, 整体来看, 三者的均方差变化曲线都以单峰变化为主, 夏秋季均方差较小而冬春季均方差较大, 与前面分析的昆明气温年代际增温幅度的季节变化特征较为一致。另外气温的均方差变化还存在显著的较高频的季节内振荡特征, 这可能反映了在某些时段气温的年内振荡信号较强。昆明日平均气温的均方差(蓝色柱)与日最低气温(绿线)的均方差曲线变化较为一致, 二者之间相关系数达 0.82, 日平均气温与日最高气温的均方差曲线(红线)之间的相关为 0.76, 日最高气温和最低气温均方差变化曲线之间的相关性最低, 只有 0.58, 表明二者之间的年际年代际振荡的强度特征随季节变化不同。可以明显发现, 日最高气温的年内振荡信号最强, 且最强信号主要发生在 2 月末 3 月初, 在一年中的多数时间段, 日最高气温的均方差都高于日平均气温和日最低气温的均方差, 这表明昆明日最高气温的年内振荡信号更强, 而日平均气温和日最低气温则在线性趋势和年代际振荡尺度上信号更强, 这与图 1~3 所反映出来的气温变化特征相一致。昆明日平均气温均方差的季节变化在 1990s 中期年代际突变前后没有显著的变化, 都是在冬春季振幅变化大, 夏秋季变化小, 但从冬末到夏初的 2~5 月年代际增暖后的气温年际变率明显增大(图 8(b))。

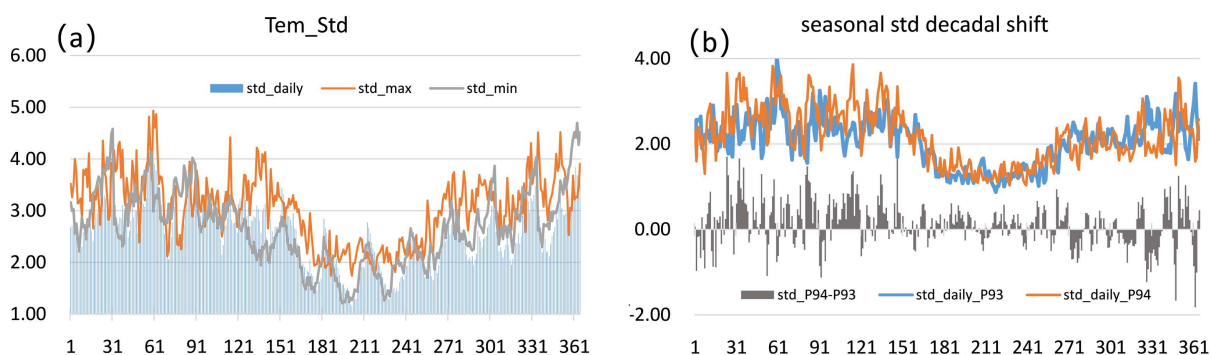


Figure 8. Seasonal cycle of standard deviation for Kunming's daily mean air temperature, daily highest air temperature and daily lowest air temperature (a) and decadal difference (P94-P93) of daily mean air temperature's standard deviation between the two periods (b)

图 8. 昆明日平均气温、日最高气温和日最低气温均方差(a)及日平均气温均方差在这两个年代的差异(P94~P93) (b)的季节变化

5. 昆明气温 1990s 中期年代际增温的大尺度环境背景

根据昆明气温在 1993/1994 年前后存在显著的年代际增温特征, 为了分析造成昆明这种年代际增暖的大尺度大气环流背景场的差异, 我们分析了不同季节近地面气温、500 hPa 位势高度场和对流层低层 850 hPa 的风场特征(图 9)。结果表明, 昆明气温在 1990s 中期以后的年代际增暖, 与全球变暖背景下北半球中高纬度的异常增暖特征是一致的, 特别是除了夏季(图 9(c))以外北极地区最强增暖异常(即北极放大)在其它三个季节均非常明显, 与北极放大的季节变化特征相一致[12]。但处于中纬度的昆明其年代际增温幅度与北极或高纬度地区相比则小得多。

从大气环流场来看, 昆明所处的位置, 不论在哪个季节均位于中纬度东亚地区异常反气旋环流的南侧或东南侧, 与暖性高压异常环流相伴随, 容易产生下沉气流和晴好天气。同时在四个季节中昆明受 850 hPa 北风异常的影响, 将北侧更暖的暖空气通过暖平流输送, 到达昆明附近辐合, 加强了气温的年代际增温。另外用 586 dagpm 等位势高度线代表的副热带高压在 1993 年以前和 1994 年之后的对比, 可以发现, 1993 年之前, 西太平洋副热带高压相对偏东偏南, 而 1994 年之后不仅西太平洋副热带高压向西向北加强, 中东-伊朗高压也加强东伸, 甚至在冬春季节打通了整个副热带高压带, 因而加剧了昆明受副热带高压异常长期持续稳定的控制而导致异常升温。

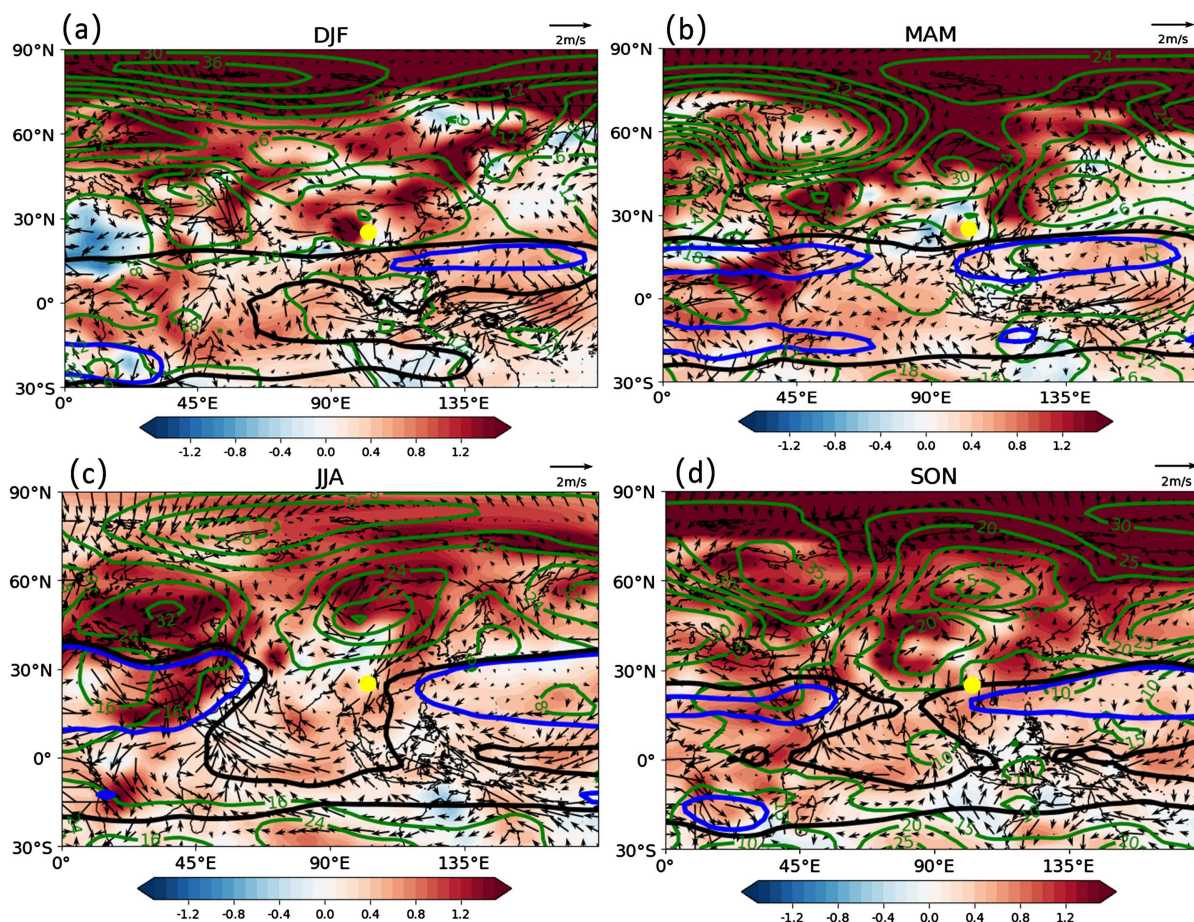


Figure 9. Decadal difference fields of the atmospheric circulation over Euro-Asian region (P94~P93) in (a) Winter; (b) Spring; (c) Summer; (d) Autumn seasons. The shaded contours denote air temperature at 1000 hPa, green contours are 500 hPa geopotential height, blue (black) heavy solid lines denote 586 dagpm contour during 1961~1993 (P93) and 1994~2020 (P4) period, respectively. The vectors are wind field at 850 hPa and the big yellow dot is the position of Kunming in each panel

图 9. 不同季节(a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季欧亚区域大气环流的年代际差值场(P94~P93)。图中填色等值线代表 1000 hPa 气温的年代际差值场, 绿色细等值线为 500 hPa 位势高度场的年代际差值场, 蓝色(黑色)粗实线代表 1961~1993 (1994~2020)年平均的 586 dagpm 等高线, 矢量代表 850 hPa 风场的年代际差值场, 图中的黄点代表昆明站的位置

6. 总结

本文通过 1961~2020 年昆明气象站日平均气温、日最高气温和日最低气温的观测资料, 系统地分析了昆明气温的变化趋势、年际年代际变化以及季节变化特征, 特别分析了昆明气温在 1990s 中期之后的年代际增暖特征及其可能的形成原因, 得到的主要结论如下:

近 60 a 中昆明气温的变化存在多时间尺度的变化特征, 线性趋势和年代际升温特征最显著。1961~2020 年昆明日平均气温的升温速率约为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。其中, 冬季的升温最快, 达 $5.2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 其次为春季($4.2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)、秋季($3.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)和夏季($3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)。日最高气温和日最低气温均存在显著的升温特征, 日最高气温的年平均和冬、春、夏、秋四个季节的增温趋势分别为 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $3.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $3.8^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 和 $3.4^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 日最低气温的年平均和冬、春、夏、秋季的增温速率分别为 $5.1^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $6.9^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $6.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 、 $2.9^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 和 $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。日最低气温对日平均气温变化的贡献更大, 其升温速率远高于日最高气温的升温速率, 且都远远高于全球变暖的升温速率。

昆明气温的增暖最显著的特征是在 1990s 中期出现显著的年代际转型特征, 从 1993 年之前的异常偏冷转变为 1994 年之后的异常偏暖位相。不同季节的年代际增温幅度不同, 日平均气温的年代际平均增温幅度依次从冬(1.9℃)、春(1.5℃)、秋(1.4℃)、夏(1.0℃)递减; 日最低气温随季节的年代际增温规律类似, 但增温幅度更大, 冬、春、秋、夏的年代际增温分别为 2.6℃、2.5℃、1.5℃和 1.0℃; 日最高气温的年代际增温季节变化表现出从春、夏、秋、冬依次增加的特征, 但增温幅度最小, 分别为 0.91℃、1.18℃、1.27℃和 1.34℃。

昆明气温的季节变化呈现出较为“秃顶”的单峰结构, 暖季持续时间较长, 体现了冬暖夏凉的春城气候特征。但 1990s 中期年代际突变之后, 昆明的日平均气温、日最高气温和日最低气温都显著升温, 日最低气温在冬春季的升温幅度最大而日最高气温升温幅度最小, 因而冬春季较大的气温日较差年代际减小。气温的季节变化都表现出暖季提前、冷季推迟的特征, 且日最低气温和日平均气温暖季提前的日数明显多于冷季推迟的日数, 春季提前的日数最多可达一个月左右。

昆明气温这种年代际的升温特征, 与全球变暖北极放大的大背景影响有关。从年代际差值大气环流场上来看, 西太平洋副热带高压的西伸北进, 以及昆明北部东亚异常暖高压东侧的暖平流输送, 都可能导致昆明地区年代际的异常升温。

基金项目

本文受国家自然科学基金项目(42075024, 41906194)的资助。

参考文献

- [1] 毛政旦. 云南的“四季如春”[J]. 气象, 1977, 3(2): 30-32.
- [2] 解明恩, 程建刚, 范菠, 等. 2003 年云南夏季罕见高温干旱的诊断研究[J]. 气象, 2005, 31(7): 32-37.
- [3] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 2005 年初夏云南严重干旱的诊断分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 35-40.
- [4] Yang, J., Gong, D.Y., Wang, W.S., et al. (2012) Extreme Drought Event of 2009/2010 over Southwestern China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **115**, 173-184. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0172-6>
- [5] 周晓, 黄菲, 楚合涛, 等. 1961-2000 年中国极端高温事件的时空特征[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(sup.): 38-45.
- [6] 罗燕, 田永丽, 戴敏, 陈新梅. 云南近 50 年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 870-877.
- [7] 马双梅, 祝从文, 刘伯奇. 2019 年 4-6 月云南持续性高温天气的大气环流异常成因[J]. 大气科学, 2021, 45(1): 165-180.
- [8] 江晓菲, 江志红, 李伟. 全球增温 1.5 和 2℃ 下中国东部极端高温风险预估[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1056-1064.
- [9] 中国气象局气候变化中心, 编著. 中国气候变化蓝皮书(2021) [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [10] 周晓, 黄菲. 中国极端高温事件的年代际突变及其与海温的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(5): 19-27.
- [11] Yu, K. and Xie, S.-P. (2013) Recent Global-Warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling. *Nature*, **501**, 403-407. <https://doi.org/10.1038/nature12534>
- [12] Wang, Y.S., Huang, F. and Fan, T.T. (2017) Spatial-Temporal Variations of Arctic Amplification and Their Linkage with the Arctic Oscillation. *Acta Oceanologica Sinica*, **36**, 43-52. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1025-z>