

1980-2019年江淮地区夏季气温变化及其异常年环流特征

张露云 左洪超

兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘要: 利用1980-2019年ERA5月平均2m气温资料、NCEP/NCAR提供的大气环流资料以及NOAA的海表温度资料,分析了江淮地区夏季气温变化及其异常年环流特征。结果表明:江淮地区夏季气温整体呈波动上升趋势,冷暖交替出现,在2000年发生突变,空间分布上表现出整体一致性。气温变化主要受西太平洋副热带高压(简称西太副高)、东亚夏季风及西伯利亚冷空气的影响。高温年江淮地区为大范围的位势高度正距平控制,西太副高整体偏西偏强,江淮地区处于副高脊线附近,高纬度阻塞高压较强;低温年反之。高温年赤道中东太平洋及西太平洋海温分布具有拉尼娜事件的特征;低温年赤道中东太平洋及西太平洋海温分布具有厄尔尼诺事件的特征。赤道中东太平洋海温异常偏高年江淮地区气温整体偏低;偏低年反之。
关键词: 江淮地区, 夏季气温变化, 夏季极端气温, 大气环流特征

Summer Temperature Changes from 1980 to 2019 in Jianghuai Region and Its¹ Abnormal Annual Circulation Characteristics

Zhang Luyun, Zuo Hongchao

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract: Based on ERA5 monthly average temperature of 2m, NCEP/NCAR reanalysis data and NOAA SST data from 1980 to 2019, the summer temperature changes and circulation characteristics of anomalic years in Jianghuai Region were analyzed. The results show that the summer air temperature in Jianghuai Region fluctuates and rises, and the cold and warm temperatures appear alternately, and the abrupt changes occur in 2000, showing the overall consistency in spatial distribution. The temperature variation is mainly influenced by the west Pacific Subtropical High (WPSH), East Asian summer monsoon and cold air over Siberia. In the high temperature years, the Jianghuai region is controlled by a large range of positive geopotential height anomaly, and the WPSH is generally more westward and stronger. The Jianghuai region is near the ridge line of the WPSH, and the East Asian Trough is weak, and the blocking high at high latitude is strong. Low-temperature years are the opposite. The SST distribution in equatorial Middle Eastern Pacific and Western Pacific in high temperature years is characterized by La Nina events. The SST distribution in equatorial Middle Eastern Pacific and western Pacific in low temperature years is characterized by El Nino events.

Key words: Jianghuai Region, Summer temperature, Extreme summer temperature, Atmospheric circulation characteristics

¹ 投稿日期: 2022年3月5日; 修回日期: 2022年5月13日

² 第一作者: 张露云 (1996-), Email: 1369624867@qq.com

通信作者: 左洪超 (1964-), Email: zuohch@lzu.edu.cn

³ 资助信息: 国家自然科学基金项目 (41875009); 光伏出力精细预报及光伏建设对碳收支影响研究 (lzujbky-2021-sp61)

0 引 言

随着全球气候的不断变化,气候问题已成为国内外学者的研究热点,也是国家、社会、人民关注的热点。气温变化是气候变化中的一个重要体现,随着全球气候变暖越来越显著,大气环流形势也发生了很大变化,这样就会造成区域性的气温升高或降低。IPCC 第六次报告指出,相对于 1850-1900 年,2001-2020 年平均全球地表温度升高了 $0.99\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 2011-2020 年平均全球地表温度上升约 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1850 年以来的最近 40 年间,每 10 年的全球地表温度都比它前一个 10 年高^[1,2]。江淮地区是我国重要的农作物以及渔业产区,由于气温异常造成的损害不断增加,因此研究该区域的夏季气温变化状况对人民生活、农作物生产等有重要意义。20 世纪 80 年代以来,江淮地区气温表现出波动上升的趋势^[3],极端气温天气不断增多^[4]。总的来说,高温热浪事件发生频率越来越高,但是低温寒冷事件也时有发生。

高温热浪天气会对人们的生活、健康、农作物生长、能源利用、经济发展以及生态环境等造成很多不利影响^[5-8]。2010 年莫斯科的高温热浪天气^[9]、2013 年夏季韩国出现罕见的极端高温^[10]都对经济、人民生活健康、农作物生产造成巨大的影响和损失。此外,高温热浪天气在我国也频频发生。2013 年夏季我国南方出现连续多日罕见的极端高温天气^[11];2019 年我国大部分地区发生的覆盖范围广、持续时间长的高温天气造成农作物欠收、数人中暑甚至死亡、电力供应不足等,对人民生活健康和社会经济产生了严重损害^[12]。

对于我国江淮地区夏季高温热浪天气的特征及成因,已有很多学者进行了研究。其中西太副高的异常活动是影响气温异常的重要原因之一。2013 年我国南方大范围的持续高温天气就是受到了西太副高的持续控制^[13,14];2017 年夏季浙江地区平均高温日数达 52 天,高温日平均气温为 $38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端高温的持续较强与西太副高的西伸北抬、浙江地区位于西太副高极值中心附近有密切关系^[15]。太平洋海温的异常变化会影响到西太副高的异常活动。热带西太平洋海温升高、赤道中东太平洋海温异常降低会导致西太副高强度偏强且位置偏西偏北,有利于我国南方地区夏季出现异常高温天气^[16,17]。此外,西太副高的变化与东亚夏季风系统中其他成员的活动会共同导致高温的发生,例如东亚西风急流、南亚高压、热带对流加热,Wang 等^[18]指出 2003 年东亚西风急流的南移与西太副高的西南延伸增强使得长江以南出现极端高温,2013 年江淮地区的高温与热带对流加热、西太副高向西增强、南亚高压增强有密切联系。

近年来,对于夏季低温的研究相对较少。夏季低温天气对人们的日常生活影响不大,但是持续的低温天气可能会伴随着持续性的降水,降水偏多易造成洪涝灾害,从而造成农作物减产甚至威胁到人民的生命财产安全^[19]。已有研究表明,西太副高位置偏东偏南、强度偏弱时会造成南方地区夏季出现异常低温天气^[20,21];而热带西太平洋海温降低、赤道中东太平洋海温升高可能会导致西太副高强度偏弱且位置偏东偏南,东亚夏季风偏弱^[22,23]。钱卓蕾等^[24]对 2014 年夏季浙江的大尺度环流特征进行分析发现浙江地区被气旋性环流异常控制时易出现低温多雨天气。此外,降水增多也会使气温降低,有研究指出降水量增加时,大部分地区多出现湿冷天气^[25]。

近 40 年来江淮地区夏季气温表现出上升趋势,大部分对于该地区夏季气温的研究侧重于高温,但低温天气也时有发生,而研究相对较少,此外,以往对于低温研究往往使用的是江淮地区部分或某一城市的资料进行研究,且是针对某一典型年份。本文选取了江淮地区 1980-2019 年的气温进行研究,分析夏季气温的时间变化、空间变化情况,以及高、低温年的环流特征,有利于我们了解江淮地区高、低温年夏季的环流差异,从而为以后该地区夏季预防异常高、低温危害提供参考。

1 数据与方法

本文使用的气温数据为 ERA5 月平均 2m 气温资料，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ^[26,27]。大气环流资料是 NCEP/NCAR 提供的再分析资料，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。海表温度数据使用 NOAA 提供的月平均海表温度，水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。所用数据的时间为 1980 年 1 月至 2019 年 12 月。所用到的主要分析方法包括 EOF 分析、M-K 突变检验法、相关分析及检验、合成分析及检验等，相关分析和合成分析中用到的数据均进行去除线性趋势和标准化处理。

2 江淮地区夏季气温的时空变化特征

图 1 给出了江淮地区 1980-2019 年夏季平均气温的变化趋势，整体表现为波动增长，其增长速率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，通过信度为 0.01 的显著性检验，这一趋势与 20 世纪 80 年代后期以来江浙沪地区高温热浪天气变化趋势相一致^[28]，40 年夏季气温平均值为 26.49°C 。2000 年以前江淮地区夏季平均气温较低，大部分年份的夏季平均气温低于 40 年气温平均值，进入 21 世纪后夏季平均气温逐渐升高，大部分年份高于 40 年气温平均值，2013 年夏季平均气温达到最高值，为 28.09°C ，比平均值高 1.8°C ，但在 2014 和 2015 年骤降，平均气温和八九十年代相当，之后又快速升温。

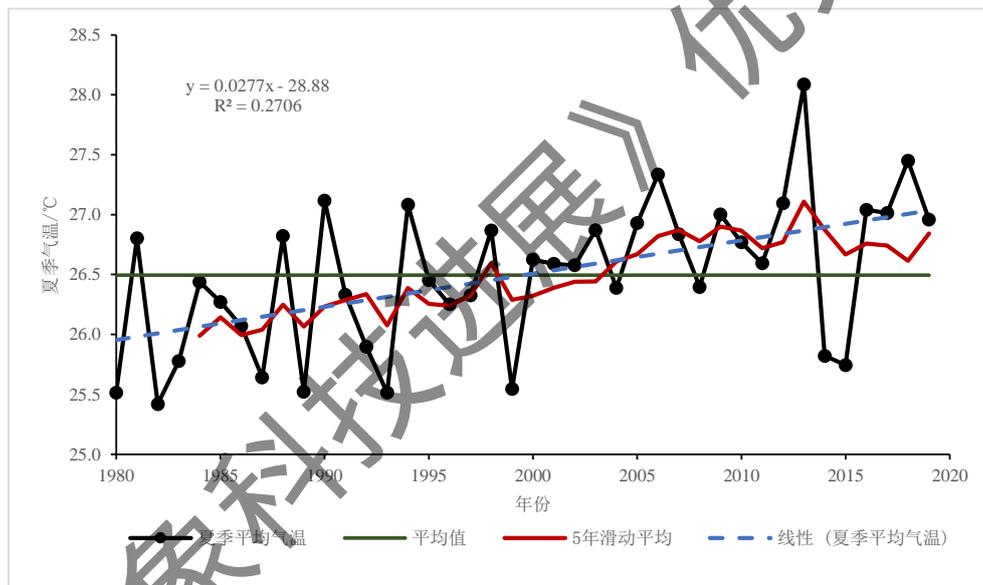


图 1 1980-2019 年江淮地区夏季平均气温的逐年变化趋势

Fig. 1 Annual variation trend of summer mean temperature in Jianghuai Region from 1980 to 2019

M-K 突变检验法可以用来判断序列中是否发生突变，如果存在，可确定出突变发生的时间，且计算简单，现在也常用在气候变化影响下气温和降水的突变分析^[29,30]。因此本文采用 M-K 突变检验法诊断江淮地区夏季平均气温是否发生突变。图 2 是近 40 年来江淮地区夏季平均气温的突变分析曲线，其中两条橙色虚线为显著性临界线，当显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时，显著性临界值为 ± 1.96 ， UF 为顺序统计量， UB 为逆序统计量。从图中可以看出，除 1982 年 $UF < 0$ 外，其他年份 UF 均大于 0，说明江淮地区夏季平均气温呈上升趋势，特别是 2004 年以后， UF 曲线在显著性临界线之上，说明这种升温趋势特别显著。此外， UF 和 UB 两条曲线出现了交点，交点出现在 2000 年，且在 ± 1.96 之间，可以确定江淮地区夏季平均气温发生了突变且突变时间从 2000 年开始。突变前江淮地区夏季平均气温为 26.18°C ，突变后为 26.81°C ，上升 0.63°C 。

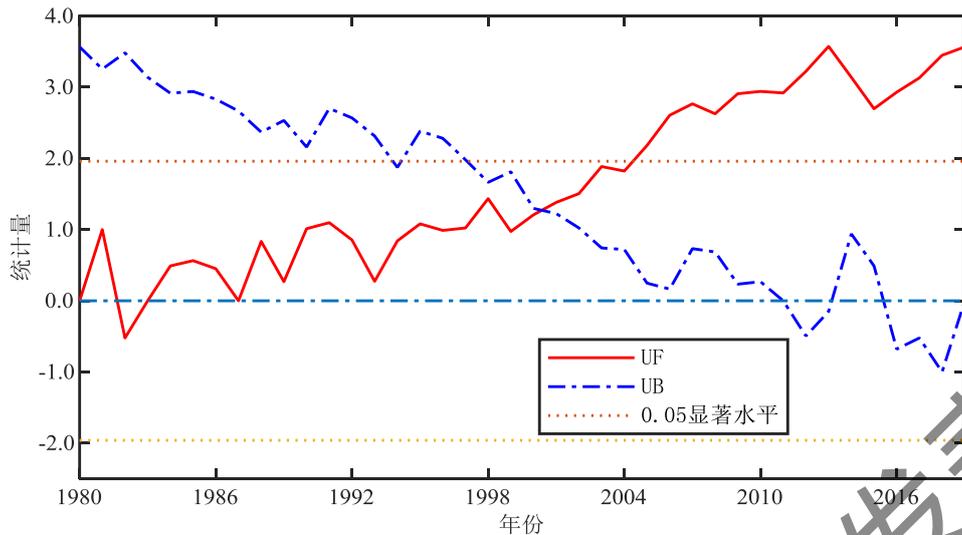


图 2 1980-2019 年江淮地区夏季平均气温突变分析

Fig.2 Abrupt change of summer mean temperature in Jianghuai Region from 1980 to 2019

经验正交函数 (EOF) 分解广泛应用于气象要素场的处理分析^[31]。本文采用 North 显著性检验^[32]来检验 EOF 分解出的各模态之间是否相互独立, 通过显著性检验的前几个特征向量能够直观地反映出气象要素场的特征。因此为更好地了解江淮地区夏季气温的时空变化情况, 对其距平场进行 EOF 分解。结果显示只有前 3 个模态通过显著性检验 (表 1), 这说明前 3 个模态之间是互相分离的, 累计方差贡献达到了 87.2%, 可较高程度地反映江淮地区夏季气温的大部分特征, 因此选取前 3 个模态进行研究。

表 1 1980-2019 年江淮地区夏季气温距平场前 6 个模态的方差贡献

Tab.1 Variance contribution of the first six modes of summer air temperature anomalies in Jianghuai Region during 1980-2019

| 模态 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 方差贡献 | 65.6% | 16.1% | 5.5% | 4.5% | 1.5% | 1.4% |
| 累计方差 | 65.6% | 81.7% | 87.2% | 91.7% | 93.2% | 94.6% |
| North 检验 | True | True | True | False | False | False |

图 3 给出了 1980-2019 年江淮地区夏季气温距平 EOF 分解前 3 个特征向量的空间分布及对应时间序列。第 1 模态的方差贡献值为 65.6%, 远远大于第 2、第 3 模态, 因此第 1 模态可以代表 1980-2019 年江淮地区夏季平均气温场的主要空间分布特征。第 1 模态空间分布在整个研究区域均为正值, 说明江淮地区夏季气温距平的空间变化呈现出整体一致性, 但存在从中间向周围递减的分布, 梯度较小, 其对应的时间序列与图 1 夏季平均气温随时间的变化趋势基本一致; 第 2 模态的方差贡献值仅为 16.1%, 从它的空间分布上可以看出, 江淮地区夏季气温呈南北反相变化, 以长江为界限, 北边为正值区, 南边为负值区, 南北梯度较大, 其时间序列存在显著的年际变化特征, 在 1997 和 2003 年分别出现极大值和极小值; 第 3 模态的空间分布呈东西反相变化且差异显著, 以安徽省的西边界为界线, 以西为正值区, 以东为负值区, 其时间序列波动变化, 2004 年之前波动较为明显。

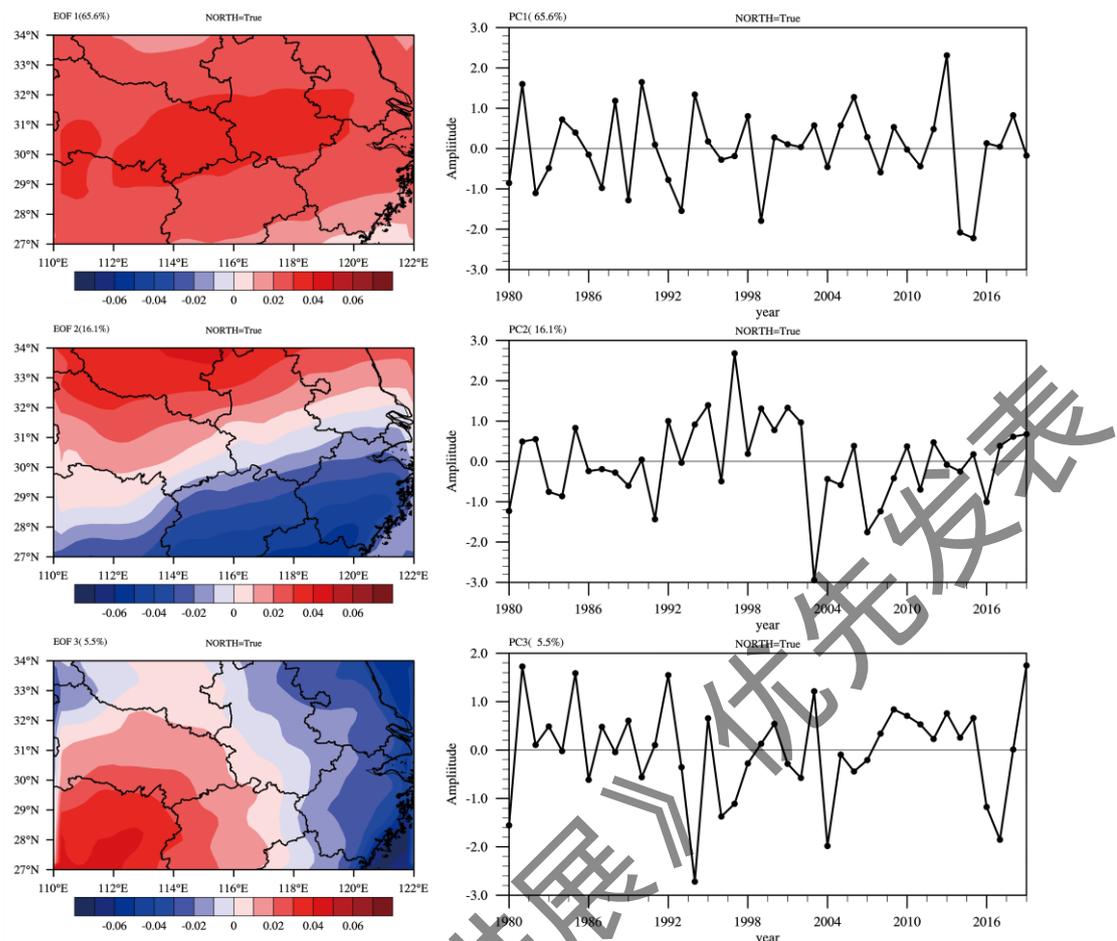


图 3 1980-2019 年江淮地区夏季气温距平场 EOF 分解前 3 个模态及其对应的时间序列

Fig.3 The first three EOF decomposition modes and their corresponding time series of summer air temperature anomalies in Jianghuai Region during 1980-2019

3 江淮地区异常高、低温年的大气环流特征

目前，国内外对于高温天气的定义多样，尚无统一的定义标准。本文将夏季平均气温距平大于 1 倍标准差的年份称为高温年，小于 1 倍标准差的年份称为低温年。图 4 是我国江淮

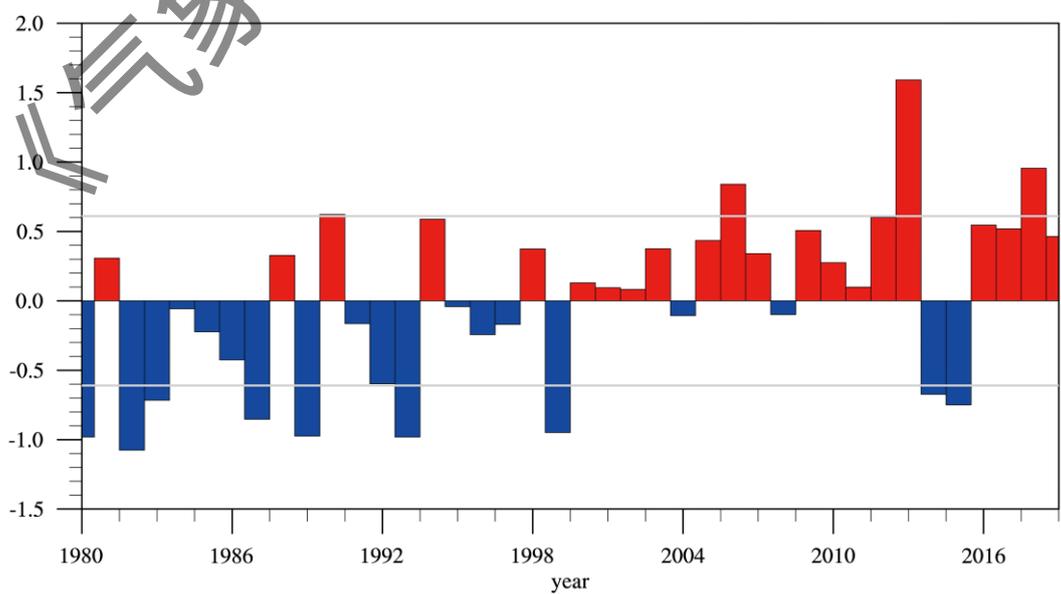


图 4 1980-2019 年江淮地区夏季平均气温距平图 (灰色实线为标准差 $\sigma = \pm 0.61$)

Fig.4 Mean summer air temperature anomaly in Jianghuai Region during 1980-2019 (standard deviation $\sigma = \pm 0.61$ in gray solid line)

地区 1980-2019 年夏季平均气温距平逐年变化图, 图中显示 1990、2006、2012、2013、2018 年的平均气温距平超过或达到 1 倍标准差, 称为偏高温年; 1980、1982、1983、1987、1989、1993、1999、2014、2015 年的平均气温负距平超过 1 倍标准差, 称为偏低温年。表 2 列出了 1980-2019 年江淮地区夏季平均气温异常高和异常低的前 5 个年份的距平值及 $|\Delta T|/\sigma$ 值, 本文选取这些年份进行研究分析。

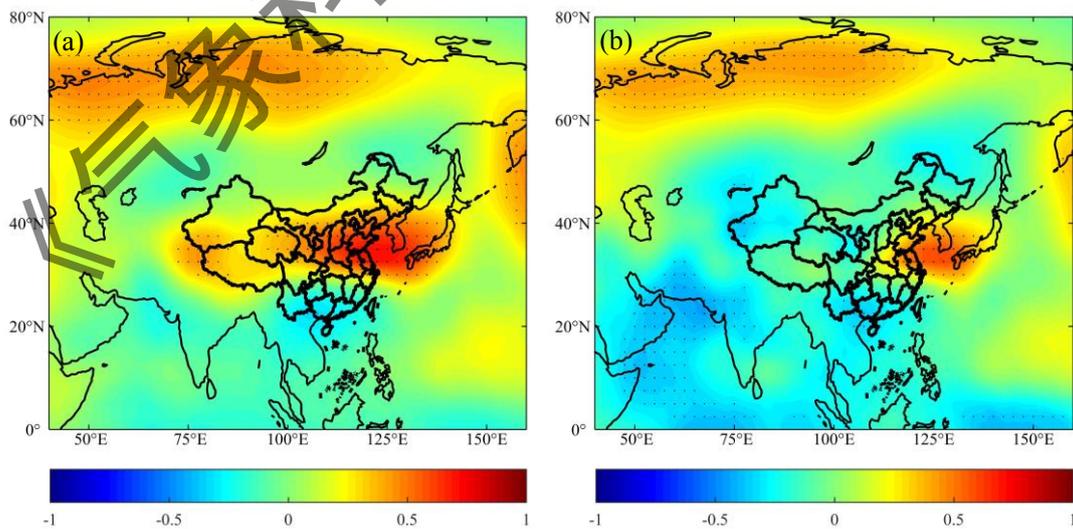
表 2 1980-2019 年江淮地区夏季气温异常年份

Tab.2 Summer temperature anomalies in Jianghuai Region during 1980-2019

| 高温年 | | | 低温年 | | |
|------|------------|-------------------|------|------------|---------------------|
| 年份 | ΔT | $\Delta T/\sigma$ | 年份 | ΔT | $ \Delta T /\sigma$ |
| 1990 | 0.62 | 1.02 | 1980 | -0.98 | 1.61 |
| 2006 | 0.84 | 1.38 | 1982 | -1.08 | 1.77 |
| 2012 | 0.61 | 1.00 | 1989 | -0.97 | 1.59 |
| 2013 | 1.59 | 2.61 | 1993 | -0.98 | 1.61 |
| 2018 | 0.96 | 1.57 | 1999 | -0.95 | 1.56 |

3.1 江淮地区夏季的大气环流分析

大气环流的形成、发展与维持对各种天气现象及气候变化有重要影响, 是影响天气气候的直接因素, 也是区域气温异常变化的重要因子之一。图 5 给出了江淮地区 1980-2019 年夏季平均气温与 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c)、925 hPa(d)位势高度场的相关系数分布。500hPa 位势高度场上, 在 $30^{\circ} - 40^{\circ}N$, $110^{\circ} - 145^{\circ}E$ 区域内有一个明显的正相关区域, 相关系数达到 0.7, 该相关区域的大小随高度降低而减小并且强度变弱, 在 850 hPa 和 925 hPa 高度上, 该相关区域几乎不明显; 在正相关区域的南北两侧为负相关区域, 相关系数随高度降低而升高, 在 850 hPa 和 925 hPa 高度上比较明显, 相关系数达到 0.6 以上。西伯利亚的北部有一个大范围的正相关区域, 相关系数为 0.5 左右, 且相关区域和相关强度随高度降低而减弱。由此可见, 我国江淮地区夏季气温变化主要受到西太副高、东亚夏季风及西伯利亚冷空气等因子的影响。



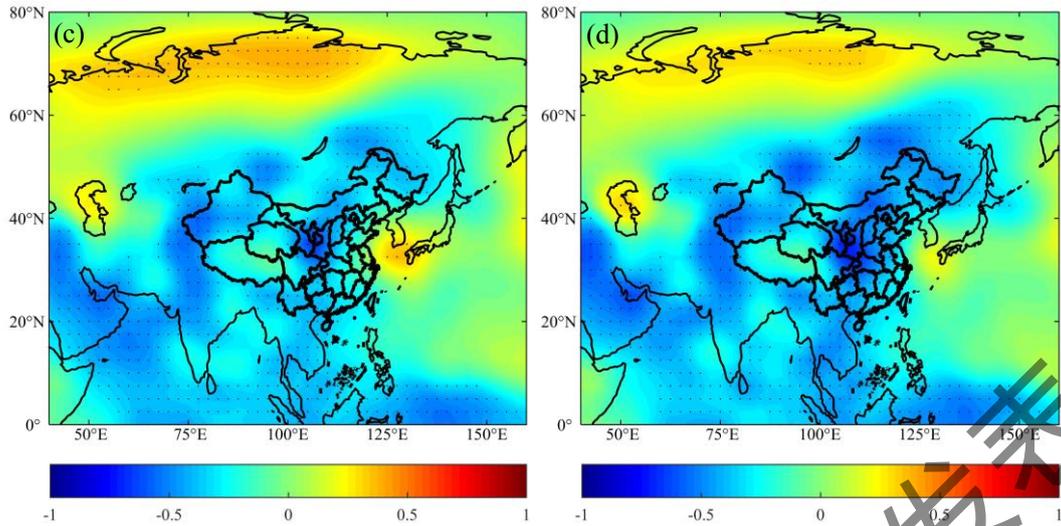
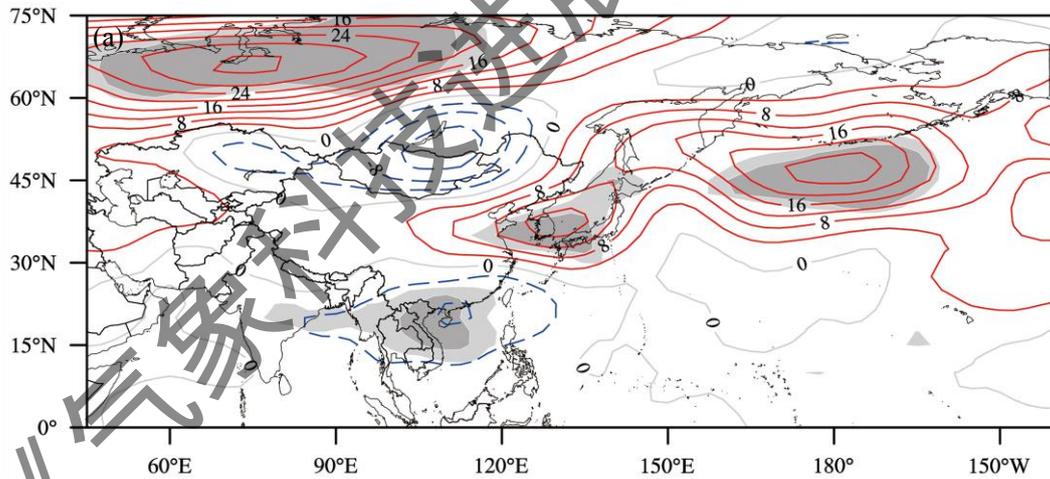


图5 江淮地区夏季平均气温与 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c)、925 hPa(d)位势高度场的相关系数(打点区域为通过 0.05 显著性检验的区域)

Fig.5 Correlation coefficients between summer mean temperature and geopotential height of 500 hPa(a),700 hPa(b),850 hPa(c),and 925 hPa(d) in Jianghuai Region (dotted area refers to the area that passed the significance test of 0.05)

3.2 夏季气温异常年 500 hPa 位势高度场特征

图 6、7 分别为高温年、低温年夏季 500 hPa 位势高度距平场和平均位势高度场的合成。从图 6a 看出，高温年我国江淮地区、朝鲜地区、日本海一直到北太平洋附近均为大范围的位势高度正距平控制，正距平中心在朝鲜半岛附近和北太平洋附近且通过 0.05 的显著性检



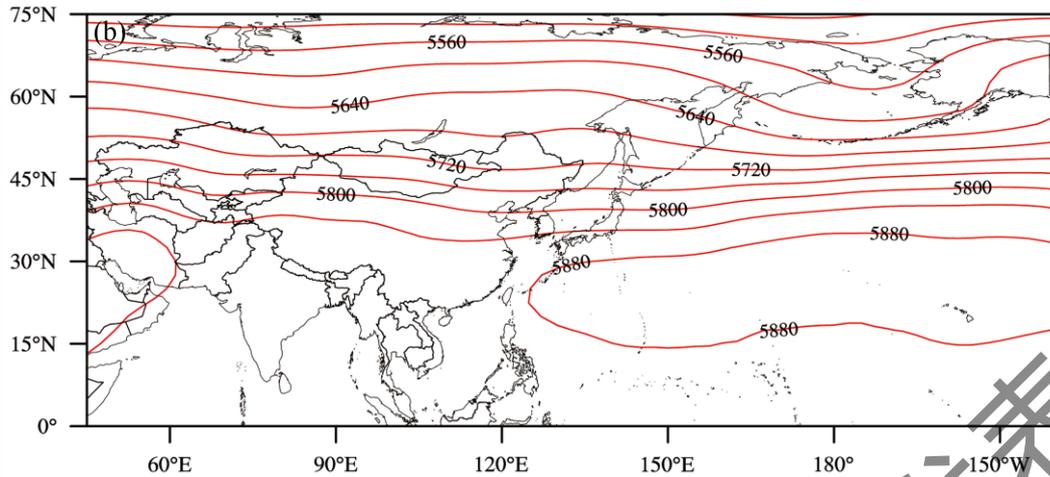


图 6 高温年夏季合成的 500 hPa 位势高度距平场(a)、平均位势高度场 (b) (深(浅)阴影通过 0.05 (0.1) 的显著性检验; 红色实线 (蓝色虚线) 表示正(负))

Fig.6 Composite 500 hPa geopotential height anomaly field (a),average geopotential height field (b) in warm summer(deep (shallow) shadow passed the significance test of 0.05 (0.1) ;solid red lines (dashed blue lines) are positive (negative))

验, 朝鲜半岛附近的正距平中心强度达到 16 gpm, 一直延伸到我国的西北地区, 这表明西太副高强度较强且位置偏西; 贝加尔湖附近有一个负距平中心并向西延伸, 而 55°N 以北为大范围的正距平区域, 正距平中心位于乌拉尔山以东, 强度达到 32 gpm, 这表明乌拉尔山阻塞高压较强。如图 7a, 低温年夏季江淮地区、朝鲜半岛及日本海区域受位势高度负距平控制, 中心位于朝鲜半岛附近, 范围较小, 强度为-12 gpm, 表明西太副高强度偏弱; 西伯利亚地区一直向东到阿留申群岛附近区域基本上为大范围的负距平控制; 鄂霍茨克海附近有一个小范围的正距平区域。

从图 6b、7b 可以看出, 500 hPa 平均位势高度场上中高纬度区域均为较平直的纬向型环流, 高温年与低温年相比, 夏季西太副高整体偏西偏强。高温年的副高范围明显比低温年大, 5880 gpm 线的西伸脊点较低温年的偏西约 4 个经度左右, 脊线位置约偏北 3 个纬度左右。高温年江淮地区处于副高脊线附近, 盛行下沉气流, 气压梯度小, 太阳辐射可以更多地到达地面, 从而使气温升高; 而低温年江淮地区处于副高脊线的北侧, 西风带携带的冷空气与副高外围的暖湿气流汇合, 容易产生气旋和锋面活动, 多出现阴雨天气, 从而使气温降低。

因此, 西太副高对我国江淮地区夏季气温的变化有着重要影响。当西太副高西伸北抬时, 我国江淮地区处于副高脊线附近, 易出现晴热少雨天气; 而当西太副高偏南偏东时, 江淮地区处于副高脊线北侧, 易出现阴雨凉爽天气。

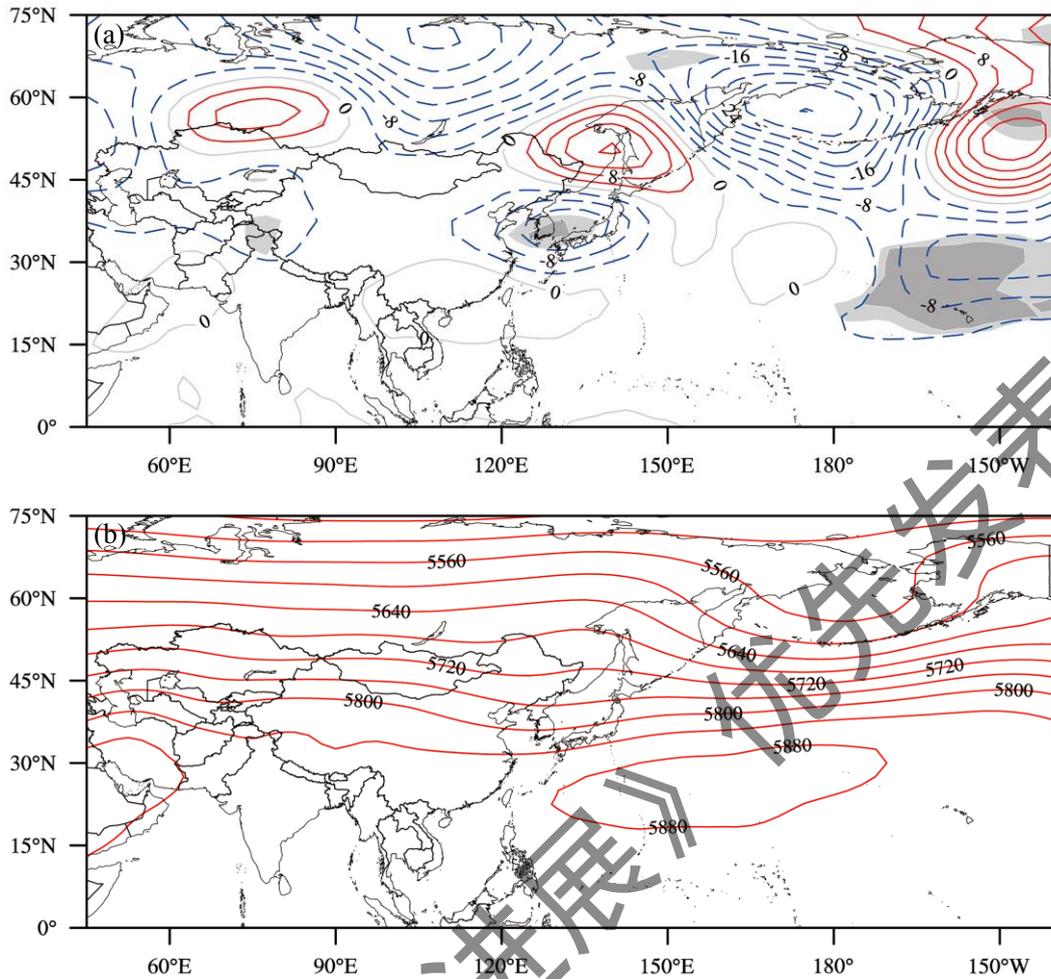


图7 低温年夏季合成的500 hPa 位势高度距平场(a)、平均位势高度场 (b) (深(浅)阴影通过0.05 (0.1) 的显著性检验; 红色实线(蓝色虚线)表示正(负))

Fig.7 Composite 500 hPa geopotential height anomaly field (a),average geopotential height field (b) in cold summer(deep (shallow) shadow passed the significance test of 0.05 (0.1) ;solid red lines (dashed blue lines) are positive (negative))

3.3 夏季气温异常年海温场特征

图8 为高温年、低温年夏季海温距平场的合成。从图8a可以看出,在高温年夏季,赤道中东太平洋区域海温呈明显的负距平特征,海温分布具有拉尼娜事件的特征,东亚夏季风增强,有利于水汽输送到北方地区,而江淮地区的大部分区域降水偏少,易出现高温干旱天气;西太平洋、日本海以及北太平洋附近有明显的海温正距平,这与500 hPa位势高度场上西太副高偏西偏北、强度偏强是相符合的。在低温年夏季,赤道中东太平洋区域被显著的海温正距平控制,此时海温分布具有厄尔尼诺事件的特征,东亚夏季风大大减弱,水汽聚集在江淮地区,导致该区域出现降水洪涝天气,使得江淮地区夏季气温降低;而西太平洋、日本海以及北太平洋附近有明显的海温负距平,这与500 hPa位势高度场上西太副高偏南偏东、强度偏弱是相符合的。

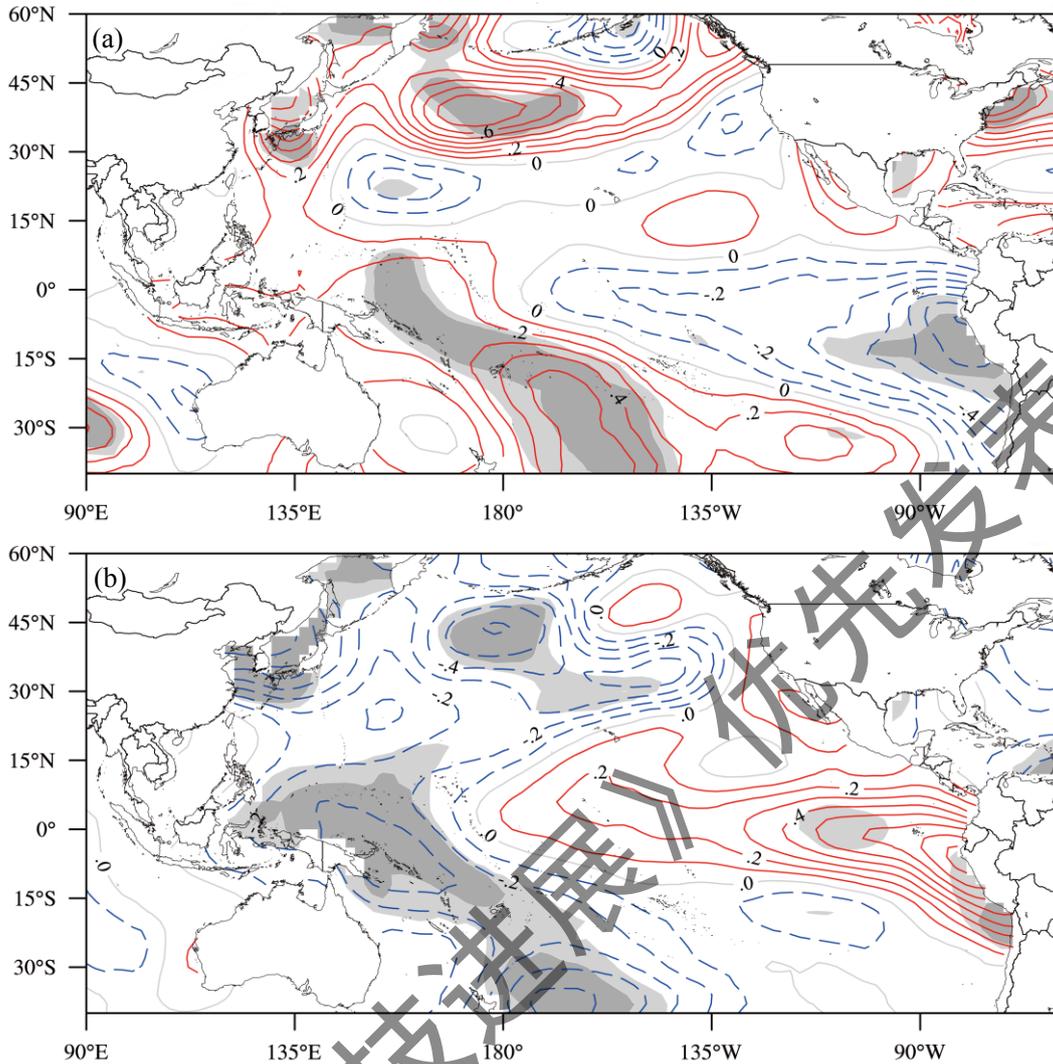


图 8 高温年(a)、低温年(b)夏季合成的海温距平场(深(浅)阴影通过 0.05 (0.1) 的显著性检验; 红色实线(蓝色虚线)表示正(负))

Fig.8 Composite SST anomaly field in warm summer (a) and cold summer (b)(deep (shallow) shadow passed the significance test of 0.05 (0.1) ;solid red lines (dashed blue lines) are positive (negative))

为了进一步分析赤道中东太平洋海温对江淮地区夏季气温的影响,现将其异常年份的气温进行合成分析。1987、1991、1997、2022、2015 年为海温异常偏高年;1985、1988、1998、2000、2010 年为海温异常偏低年。如图 9 所示,当赤道中东太平洋海温异常偏高时,江淮地区气温整体偏低;而该区域海温异常偏低时,江淮地区绝大部分区域气温偏高,只有东南小部分区域气温偏低 0 至 0.2°C 左右,这与高低温年赤道中东太平洋的海温变化情况是相同的。

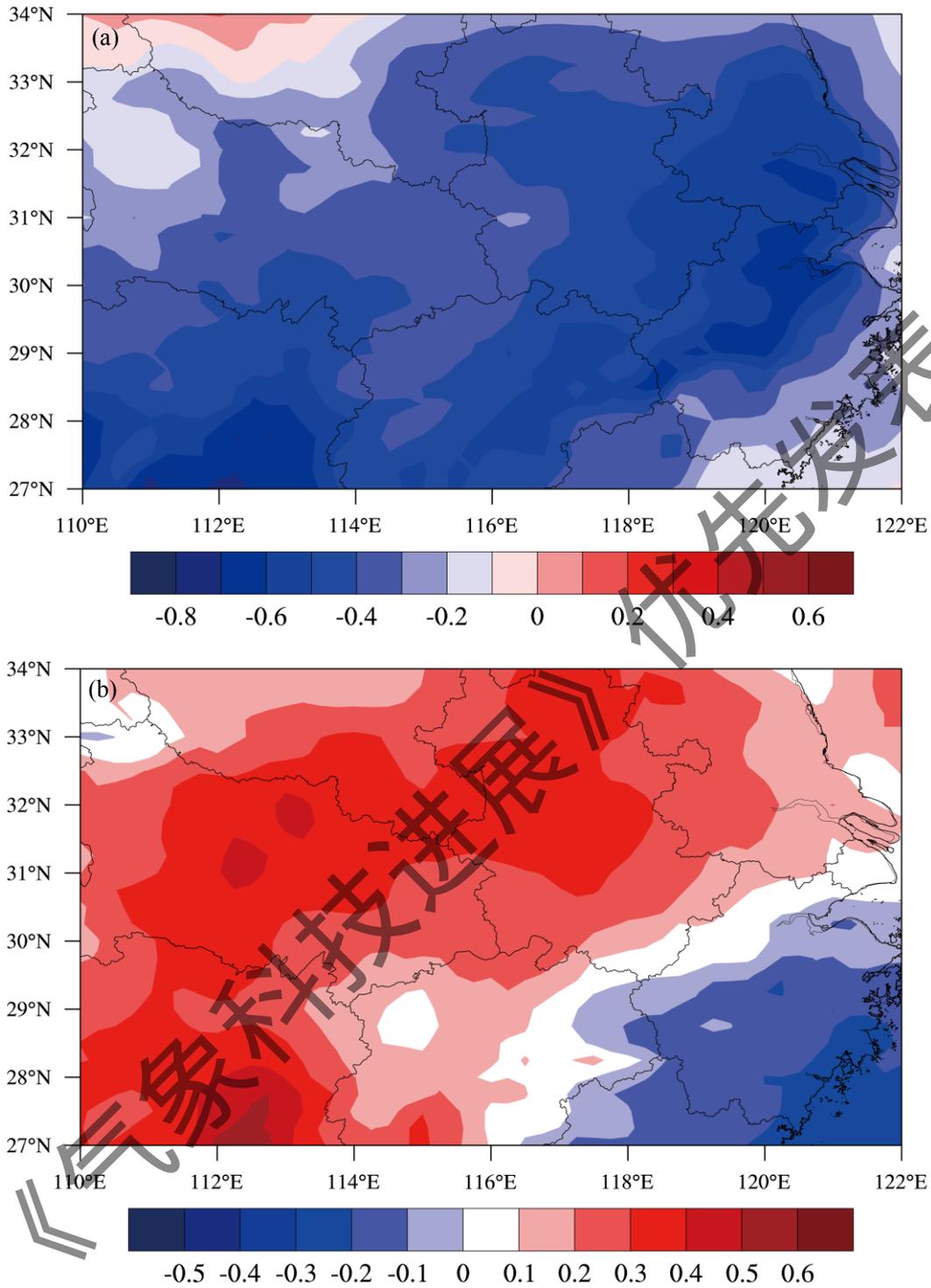


图9 海温偏高(a)、低(b)年合成的气温距平场

Fig.9 Composite air temperature anomaly field in high (a) and low (b) SST years

4 结 论

(1) 我国江淮地区夏季气温整体呈波动上升趋势，增长率为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。冷暖交替出现，在 2000 年发生突变，2000 年以前气温整体偏低，2000 年以后气温快速升高，2013 年平均气温达到最高为 $28.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；在空间分布上江淮地区夏季气温主要表现出整体一致性，存在从中间向周围递减的分布，此外还存在南北反相分布结构。

(2) 大气环流对各种天气现象及气候变化有重要影响,是影响区域气温异常变化的重要因子。江淮地区夏季气温变化主要受西太副高、东亚夏季风及西伯利亚冷空气等的影响。

(3) 500 hPa 位势高度场表现为高温年我国江淮地区附近为大范围的位势高度正距平控制,西太副高偏西偏强,江淮地区处于副高脊线附近;乌拉尔山阻塞高压较强。低温年江淮地区受位势高度负距平控制,西太副高偏弱,江淮地区处于副高脊线北侧,多出现阴雨天气。

(4) 海温场表现为高温年赤道中东太平洋及西太平洋的海温分布具有拉尼娜事件的特征;低温年赤道中东太平洋及西太平洋的海温分布具有厄尔尼诺事件的特征。

(5) 通过分析海温异常年份的气温发现,赤道中东太平洋海温异常偏高的年份江淮地区气温整体偏低;而海温异常偏低的年份江淮地区气温整体偏低。

通过分析得出,西太副高与太平洋海温对江淮地区夏季气温有一定的影响,但是影响气温变化的因子还有很多,我们还需要关注中高纬度环流系统的变化以及印度洋海温等的影响。此外,江淮地区夏季气温在 2000 年发生了突变,突变前后的环流特征是否有很大差异,还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis .
- [2] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等.气候变化科学方面的几个最新认知.气候变化研究进展,2021,17(6): 629-635.
- [3] 刘恬,高晓清,杨丽薇,等.近 36 年江淮地区浅层地温变化的多尺度分析.高原气象,2020,39(02):357-366.
- [4] 吴晶璐,朱红芳,宗培书,等.近 30 多年江淮流域极端气温指数的时空变化分析:站点观测和再分析的对比.气象科学,2018,38(04):464-476.
- [5] 韩兰英.气候变暖背景下中国农业干旱灾害致灾因子、风险性特征及其影响机制研究.兰州大学,2016.
- [6] 陈峪,黄朝迎.气候变化对能源需求的影响.地理学报, 2000,(S1):12-19.
- [7] 张璟.气候变暖对我国典型城市居民超额死亡影响研究.复旦大学,2014.
- [8] 夏建阳,鲁芮伶,朱辰,等.陆地生态系统过程对气候变暖的响应与适应.植物生态学报,2020,44(05):494-514.
- [9] Rahmstorf S, Coumou D. Increase of extreme events in a warming world. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2011,108(44):17905-9.
- [10] Min S K, Kim Y H, Kim M K, et al. Assessing human contribution to the summer 2013 Korean heat wave. Bulletin of the American Meteorological Society,2014,95(9):S48-S51.
- [11] 董晓晓,武炳义.江淮地区夏季高温事件与北极冷异常的动力联系.应用气象学报,2019,30(04):431-442.
- [12] Zeng H L, Xiao C, Chen X Y, et al. State of China's climate in 2019. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2020,13(4):356-362.
- [13] 彭京备,刘舸,孙淑清.2013 年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析.大气科学, 2016, 40 (5): 897-906.
- [14] 杨涵海,封国林.2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析.高原气象,2016,35(2):484-494.
- [15] 李琼.浙江地区夏季高温气候特征及其影响因子研究.兰州大学,2018.
- [16] 袁媛,丁婷,高辉,等.我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系. 大气科学, 2018,42 (6): 1245-1262.
- [17] 贾子康,郑志海,封国林.中国南方地区盛夏高温类型及其对应的大尺度环流和海温异常.气象学报,2020,78(6):928-944.
- [18] Wang W W, Zhou W, Li X Z, et al. Synoptic-scale Characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China. Climate Dynamics, 2016, 46:2923-2941.
- [19] 何亮,曹云,王纯枝.2017 年夏季气候对农业生产的影响.中国农业气象,2017,38(11):749-751.
- [20] 周放,孙照渤.1961-2010 年江苏省夏季气温变化及其异常时环流场特征.气象科学,2014,34(1): 96-103.
- [21] 洪国平,王苗,方思达.近 55 年湖北省凉夏气候事件及其大气环流特征.气象科技,2018,46(02):352-360.
- [22] 崔童,王东阡,李多,等.2014 年夏季我国气候异常及成因简析.气象,2015,41(01):121-125.
- [23] 司东,柳艳菊,邵颢,等.2015 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响.气象,2016,42(04):481-488.
- [24] 钱卓蕾,娄小芬,马洁华,等.2014 年夏季浙江低温多雨的大尺度环流特征及与海温异常关系.气候与环境研究,2018,23(02):199-209.

- [25] 陈隆勋,周秀骥,李维亮,等.中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制.气象学报,2004(05):634-646.
- [26] 朱景,袁慧珍.ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的适用性.气象科技,2019,47(02):289-298.
- [27] 吕润清,李响.ERA-Interim 和 ERA5 再分析数据在江苏区域的适用性对比研究.海洋预报,2021,38(04):27-37.
- [28] 李琪,苏欢,史雨涵,等.1961~2010 年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化特征.长江流域资源与环境,2016,25(03):506-513.
- [29] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法.大气科学,1992(04):482-493.
- [30] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术.北京:气象出版社,1999:43-72.
- [31] 黄嘉佑.气候统计分析与预报方法.北京:气象出版社,2004:130-139(第三版).
- [32] North G R, Bell T L, Cahalanand R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Monthly Weather Review,1982,110(7):699.

《气象科技进展》优先发表