

我国南方地区夏季低温变化特征及其成因

蔡佳熙^{1,2}, 管兆勇^{1,2}

(南京信息工程大学 1. 大气科学学院; 2 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 采用中国气象局整编的日平均气温资料、NCEP/NCAR 再分析日平均资料, 分析了 1960—2004 年我国南方地区尤其是长江中下游地区夏季低温的变化特征及成因。结果表明: 我国南方地区夏季气温在 20 世纪 70 年代末出现一个转折, 在此之前气温普遍偏低, 在此之后气温普遍升高; 江南地区是夏季低温频发且强度较大的区域; 各个层次高度场环流形势的变化以及降水和总云量的变化都对夏季低温的形成有一定作用。

关键词: 南方地区; 夏季低温; 环流变化

中图分类号: P423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007) 06-0799-08

Characteristics of Cold Summer Events in Southern China and Their Relations with Variations of Asian Summer Monsoon

CAI Jia-xi^{1,2}, GUAN Zhao-yong^{1,2}

(1. School of Atmospheric Sciences 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044 China)

Abstract Using the daily average temperature data from China Meteorological Administration and the NCEP/NCAR reanalysis data, we have analyzed the features of summertime low temperature events in the southern part of China especially in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the related circulation changes from 1960 to 2004. Our results show that summer temperature trend change its sign in the late 1970s; the temperature was lower than normal before the late 1970s and higher after that time. The low temperature events occurred more frequently over the south of the Yangtze River. Both the general circulation changes at different levels and variations of the precipitation along with the total cloud cover were responsible for the formation of low temperature events during boreal summer season.

Key words southern China; summer low temperature events; circulation changes

0 引言

众所周知, 气温变化直接影响着工农业生产和能源供给。长时间的低温阴雨寡照对作物育种、作物产量的形成和品质可造成非常不利的影响: 田间内涝和渍害普遍发生, 病虫害流行, 粮棉减产^[1-3]。低温若连续出现多天, 对温敏作物将产生严重影响^[4]。研究^[5]表明, 若我国东北地区夏季气温偏低 1℃, 可使水稻产量下降 10%, 全国粮食产量可能减少 5%, 足见低温的危害性。此外, 能源的需求随着气候变化而变化, 气候变化对能源系统有着广泛的影响^[6]。因此, 研究夏季低温变化规律并认识

其成因, 将有助于优化工农业生产以及能源供求关系, 为政府决策提供依据。

根据 IPCC 第 3 次评估报告^[7], 20 世纪全球平均地表温度增加了 0.6℃。在此气候背景下, 一些研究^[8-10]指出, 在 20 世纪 80 年代全球气候异常变暖的过程中, 中国气候变化有“冬暖夏凉”和“北暖南凉”的特点。西北和江淮 7 月日最高气温自 70 年代以来呈下降趋势, 近期略有回升。夏季汉渭流域、江淮、长江中下游及江南表现为明显的降温趋势, 这说明我国的气温变化存在着明显的时空差异。

从海温异常、大气环流异常、降水、云量等方面可寻求低温现象的物理解释。刘永强等^[11]提出

收稿日期: 2006-12-01; 改回日期: 2007-04-03
基金项目: 江苏省“六大人才高峰”项目; 江苏省气象灾害重点实验室资助项目 (KLME060101)
作者简介: 蔡佳熙 (1982—), 女, 江苏南通人, 硕士, 研究方向: 气候动力学, caijx96@163.com; 管兆勇 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, guanzy@nuist.edu.cn

ENSO 当年夏季以全国大范围低温为主要特征, EN-SO 次年夏季低温区南移, 我国东部地区以低温为主, 其中长江中下游和黄河中上游为显著降温区。黄嘉佑^[12]指出, 除辽东半岛及黄河上游局部地区外, 我国大部分地区夏季气温与降水量反相关。杨辉等^[13]发现, 西太平洋副热带高压的极度偏强和西伸是 2003 年夏季中国江南异常高温的直接原因, 而西太平洋副热带高压形势的持续异常是多系统综合作用的结果。

综上所述, 对于夏季气温的研究已经取得了一些成果, 但是, 由于气候变化机制极其复杂, 目前的研究结果尚不足以全面刻画低温现象的变化规律。本文选取我国南方地区夏季气温作为研究对象, 试图找出其变化规律及形成机制, 为防灾减灾提供参考依据。

1 资料和方法

使用 1960—2004 年夏季中国 725 站日平均气温资料及 NCEP/NCAR 再分析日平均资料, 其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。变量包括全球范围的 17 层位势高度和风场资料、海平面气压、降水以及总云量资料(高斯格点分布)^[14]。本文夏季指 6—8 月平均。

文中运用了 *t* 检验方法对高度距平等变量场合成平均进行显著性检验, 结果表明大部分区域都通过了 0.05 的显著性检验。

2 南方地区夏季气温分布特征

传统意义上将秦岭—淮河一线作为划分我国北方地区和南方地区的界线。本文结合这一标准并参照行政区划, 在剔除缺测站的基础上, 选取我国南方地区 (34°N 以南) 广东、广西、福建、湖南、湖北、浙江、江西、上海以及江苏、安徽两省淮河以南地区共 129 站, 所选站点的分布较为均匀, 图 1 给出了 129 站的站点分布。

为反映我国南方地区 1960—2004 年夏季气温序列的长期演变特征, 给出了我国南方地区夏季气温的逐年变化(图 2a)。参考文献[15], 定义夏季温度距平与其标准差的比值 *I* 为温度等级指数, 规定 $I \leq -1.0$ ($I \geq 1.0$) 为低(高)温年, 可以看出在 45 a 中有 7 个典型低温年, 分别为 1965、1968、1974、1976、1982、1987、1999 年。对 129 站夏季平均气温进行滑动 *t* 检验显示(图略), 我国南方地区 70 年代中后期出现了一次明显的突变, 这与 1976 年为北半

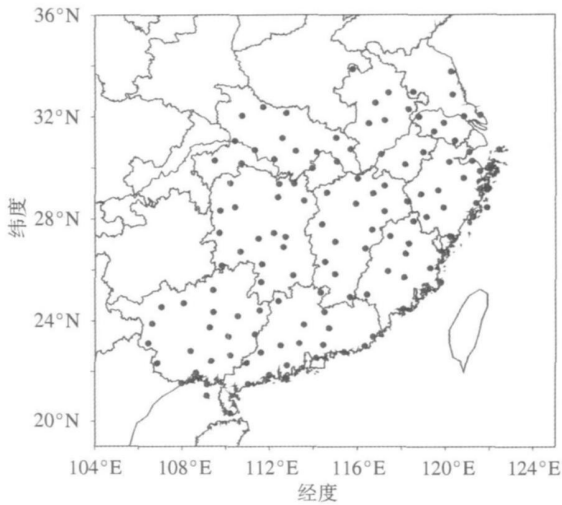


图 1 我国南方地区 129 站站点分布

Fig 1 The distribution of 129 stations in southern China

球大气环流和气候年代际变化转折年这一结论颇为一致^[16]。发生于 20 世纪 70 年代末的气温的年代际转折比较明显, 在此之前我国南方地区气温普遍偏低, 大多数年份气温在平均值以下。从温度变化的趋势可以看出, 1980 年以前温度变化呈下降趋势。近年 Gong 等^[17]也得出结论, 我国南方地区夏季平均气温在 1976 年左右发生突变。

南方地区夏季气温变化基本情况可由气温标准差的空间分布表示(图 2b), 其中气温平均值取 45 a 夏季逐日平均。长江中下游地区的标准差比华南地区大, 且在长江入海口存在高值中心。该空间分布型与文献[18]得到的结论是一致的, 这些日际变化高值区从一个侧面反映出长江中下游地区出现极端气温的可能比华南地区大。

为刻画低温事件, 定义低温日标准: 以 1960—2004 年 129 站夏季日平均气温的均值作为气候平均值, 若某日温度距平与其标准差的比值 $L \leq -1.0$ 则该日定义为低温日, 以此为标准可以分别得到各个站点 45 a 夏季累计低温日数(图 3a)。可以看出, 长江中下游地区及西南一小片区域 45 a 来出现低温的日数最多。45 a 来平均每年夏季出现低温的天数在某些地区达到了 16 d(图 3b)。这与文献[19-20]中提出的一年四季中降温幅度最大的为夏季, 主要集中在长江流域的结论是一致的。与文献[21]指出的自 1964 年以来, 长江三角洲地区以暖冬、凉夏为主要变化特征也是一致的。Zhao 等^[22]最近的研究指出, 在过去的 25 a 内尤其是夏季, 长江流域降温。

依据上述对低温日的定义, 将各个站点低温日

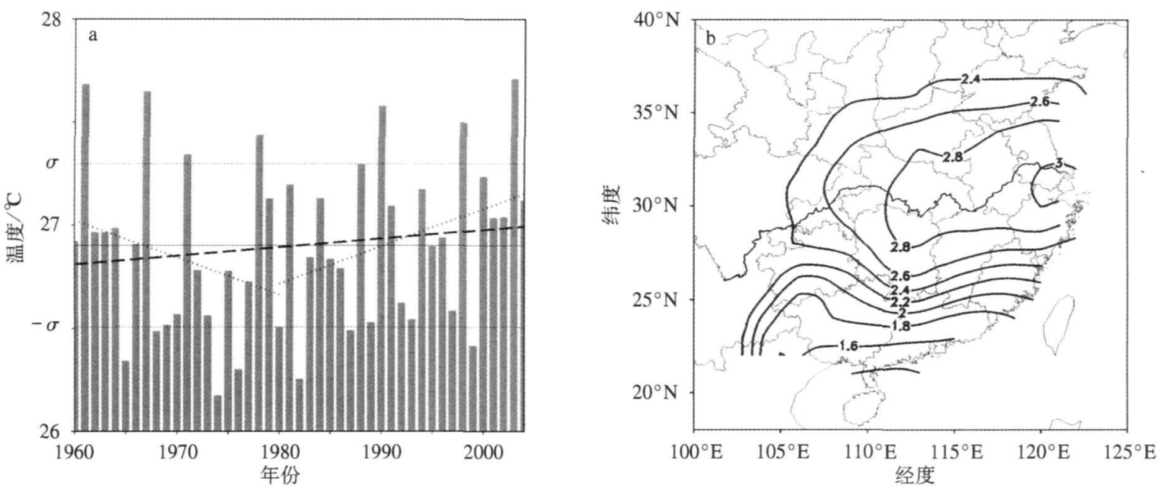


图 2 1960—2004 年我国南方地区夏季温度逐年变化 (a) 及标准差分布 (b) (单位: $^{\circ}\text{C}$)

(图 2a 中实线为多年平均, 横点线分别表示 $\pm\sigma$ 标准差,

长虚线为变化趋势, 斜点线分别为 1960—1980 年及 1980—2004 年变化趋势)

Fig 2 (a) Interannual variations and (b) standard deviations of summer temperature ($^{\circ}\text{C}$) in southern China in 1960—2004
(Solid line stands for long-term mean summer temperature, horizontal dotted lines for $\pm\sigma$ standard deviation, dashed line for the linear tendency, and tilted dotted lines for the linear tendency of summer temperature in 1960—1980 and 1980—2004, respectively in a)

的温度求平均, 得到我国南方地区夏季低温的空间分布 (图 3c)。我国南方地区夏季低温日气温主要呈现南高北低的分布型。出现这样的南北差异, 可能是由于我国南方地区南部太阳辐射的差异以及夏季风影响的程度和范围不同造成的。在长江中游和下游分别出现一个冷中心, 中心气温为 21.5°C , 以这两处为中心, 温度向四周递增。这两个冷中心的形成可能与四川盆地的地形作用以及沿海地区海洋调节作用有关。

为得到夏季极端低温的分布情况, 将我国南方地区 129 站 1960—2004 年间夏季共 92 d 的各站逐日气温共 45 个值按升序排列, 得到该站该日气温的第 5 个百分位值, 该站共可得到 92 个第 5 个百分位值, 然后将这 92 个值中的最小值作为该站 45 a 夏季极端最低气温值 (图 3d)。由图可见, 在长江中游和下游分别出现一个冷中心, 而且这两个冷中心与图 3c 由低温日平均气温确定的冷中心位置基本一致, 中心气温为 18°C 。

3 长江中下游地区低温频繁的成因

在长江中下游地区及西南一小片区域出现低温日数最多有其物理原因。取累计低温日数超过 700 d 的站进行研究, 发现除个别站分布在西南地区, 其余共 47 站均分布在长江流域。图 4a 给出了

这 47 站的分布。为了方便研究, 将 47 站按低温日数从大到小排列, 分别取 47 站中的前 5 站、中间 5 站和最后 5 站。可以看到前 5 站分布在江浙沿海, 而中间及后 5 站则在长江流域其他地区, 表明低温日最多也最易发生在沿海地区。与低温日的定义类似, 以 1960—2004 年 47 站夏季日平均气温的均值作为气候平均值, 若某日温度距平与其标准差的比值 $L \geq 1.0$ 则该日定义为高温日。

高低温日的形成通常与非绝热加热有关。研究指出^[23], 夏季全国热源场为不对称的大鞍型场, 两个高值区分别位于内蒙高原和淮河以南的整个东南和华南沿海地区。全国范围内地表潜热贡献分布的总趋势是由华南向西北内陆递减, 沿黄河、秦岭、川西山再折向滇西北横断山区, 大体上把全国划分为两大区域, 此线以东以潜热贡献为主。可以得到长江中下游地区夏季是以潜热贡献为主的。用 H_{al} 表示地表净能量通量, 则

$$H_{al} = R_s - R_l - H_s - H_e - H_{mo}$$

式中: R_s 为地表净短波辐射通量, R_l 为净长波辐射通量 (地面有效辐射), H_s 为地表感热通量, H_e 为地表潜热通量, H_m 为流进土壤深层的热量。当 H_{al} 为正时, 地表获得能量, 地表温度上升; 为负时, 地表失去能量, 地表温度下降。地面辐射可以近似地看成灰体辐射, 根据基尔霍夫定律和斯蒂芬—玻耳兹曼

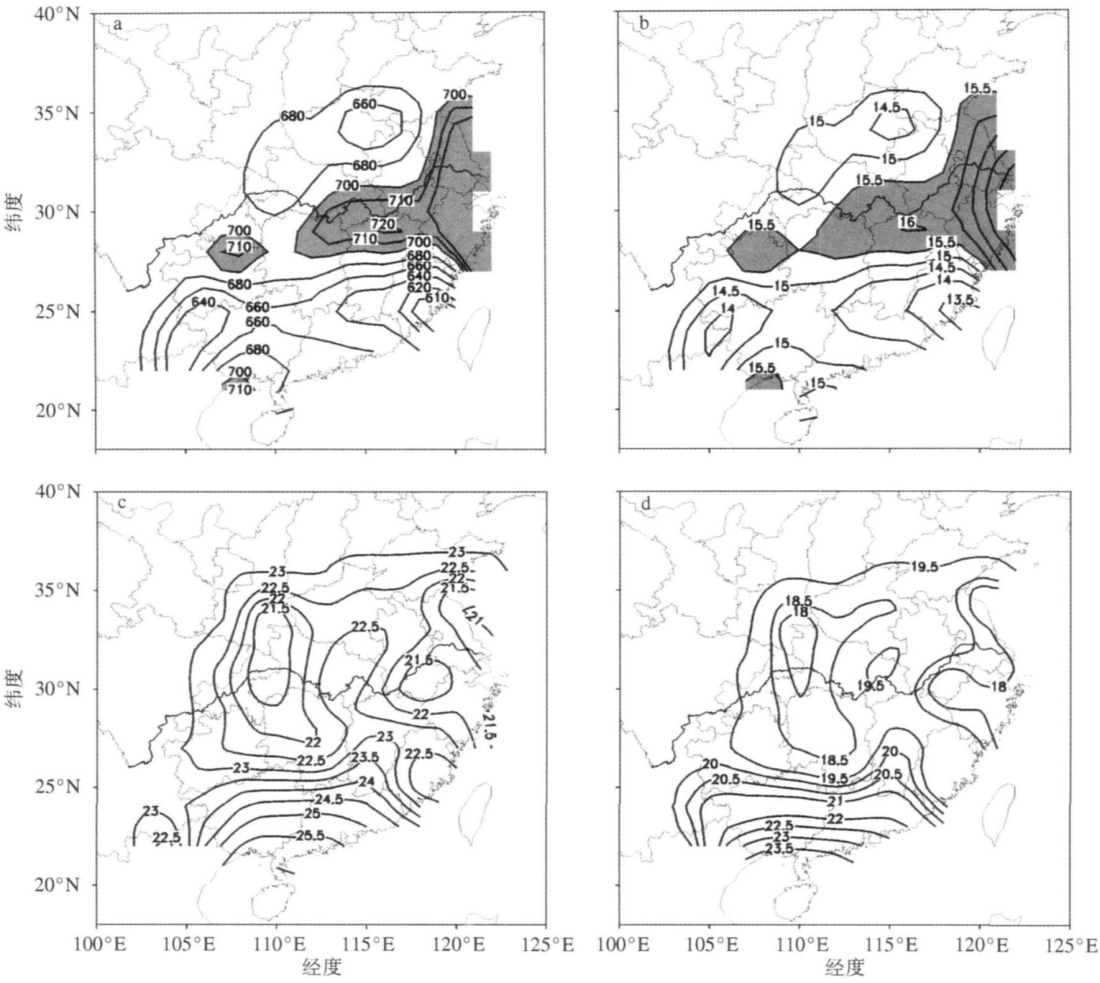


图 3 1960—2004 年我国南方地区夏季累计低温日数分布 (a 单位: d 阴影区代表累计低温日数超过 700 d), 年平均夏季低温日数分布 (b 单位: d 阴影区代表平均低温日数超过 15 d), 夏季低温空间分布 (c 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及由第 5 个百分点值确定的夏季极端最低日平均气温的空间分布 (d 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig 3 Distributions of (a) accumulated summer cold days(shadings > 700 d d), (b) long-term average yearly summer cold days(shadings > 15 d d), (c) summer low temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (d) extrremely summer low temperature(the 5th percentile, $^{\circ}\text{C}$) in southern China during 1960—2004

定律, 地面辐射通量密度主要取决于地面温度, 随着温度的升高, 辐射通量密度增大^[24]。若地面温度降低, 地面对外的红外辐射也减小, 从而靠地面红外辐射作为其热量来源的对流层大气温降低。

3 1 降水影响

降水导致的地表湿润及蒸发带来的热量损失使地表温度降低, 气温也相应降低。图 5 给出了合成的高、低温日降水距平场。从低温日对应的合成图可看出, 约三分之二的站点对应的区域出现降水正距平, 未出现正距平的站点集中在长江沿岸。相比较而言, 除江北个别站点外, 高温日时有更多的站点所对应的区域出现降水负距平。这说明夏季降水与气温存在着密切关系, 当降水增加时, 气温相应降

低; 当降水减少时, 气温相应升高。上述分析与陈隆勋等^[25]指出的 1951—1990 年大部分地区气温和降水呈负相关相符合, 也与李如琦等^[26]指出的江淮梅雨期 (6—7 月) 最高气温呈下降趋势可能与近年来江淮降水增多有关是一致的, 也与唐国利等^[27]给出的南京近几十年来夏季温度的下降趋势伴随着雨水天气的增多的结论是一致的。

3 2 云量状况

气温变化除与降水有关外, 还受云量显著影响。云对太阳辐射的作用主要是散射和反射, 而对对流层大气的热量来源主要是地面红外辐射^[24]。Robert 等^[28]指出云通过短波辐射起到使气候系统变冷的作用。图 6 给出了合成的高、低温日总云量距平场,

图 4 长江中下游地区 47 站站点分布 (a) 和 15 站站点分布 (b)
(图 4b 中实心圆圈代表前 5 站, “十”字线代表中间 5 站, 空心圆圈代表最后 5 站)

Fig 4 Distributions of (a) 47 stations (> 700 d), and (b) 15 stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River
(The solid circles denote the first 5-station of the 47 stations, the crosses the middle 5-station
and the open circles the last 5-station)

图 5 47 站 (实心圆) 低温日 (a)、高温日 (b) 对应的降水率距平合成平均 (单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig 5 Composites of the precipitation rate anomalies ($10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) for (a) cold summer days
and (b) hot summer days at the 47 stations (the solid circles) over 1960—2004

从低温日对应的合成图可以看出, 47 站所处的区域几乎都对应总云量正距平, 这说明云量增多, 使到达地面的短波辐射减少, 地面红外辐射减少, 从而使气温偏低。而另一方面, 高温日对应的合成图上, 47 站所处的区域几乎都对应总云量负距平, 表明云量减少, 到达地面的短波辐射增多, 地面红外辐射增多, 气温偏高。这些结果说明总云量和气温存在很好的相关关系, 当云量增加时, 气温降低; 当云量减少时, 气温升高。

3 3 环流特征

北半球夏季气候异常与亚洲副热带地区的两个持久稳定的反气旋即南亚高压和西太平洋副热带高压的时空变化有关^[29]。
图 7 给出了高、低温日所对应的海平面气压距平场合成平均。可以看出, 低温日除在西太平洋上出现一个正距平中心外, 在长江中下游存在正距平中心, 而在西伯利亚东部有一个负距平中心, 该区域向东延伸至鄂霍次克海以东。在长江中下游存在正距平中心, 与偏低气温存在对应, 表明东亚季风环

图 6 47 站 (实心圆) 低温日 (a)、高温日 (b) 对应的总云量距平合成平均 (单位: %)

Fig 6 Composites of total cloud cover anomalies(%) for (a) cold summer days and (b) hot summer days at the 47 stations(the solid circles) over 1960—2004

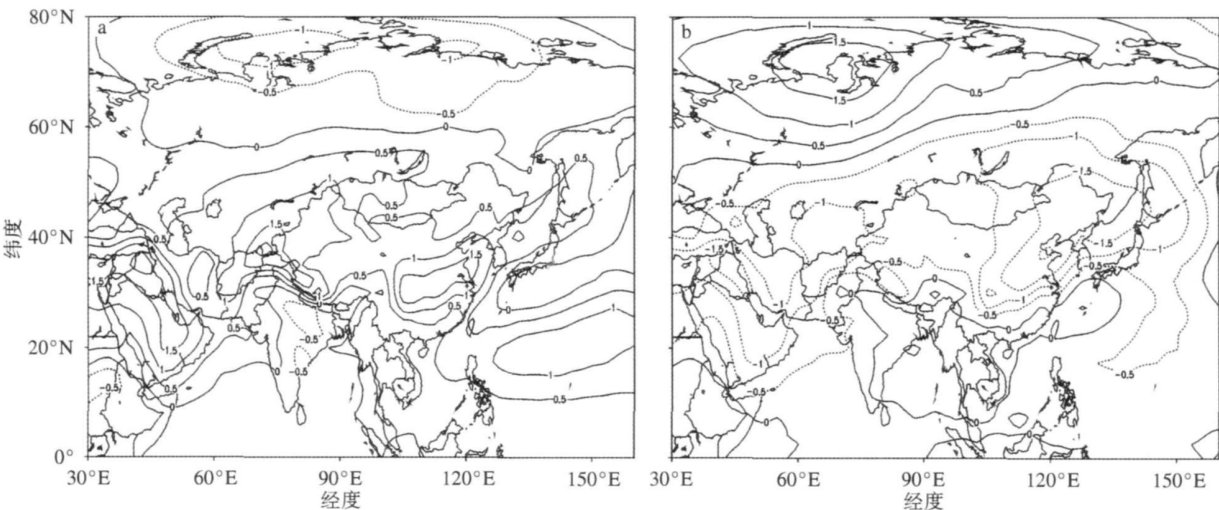


图 7 47 站低温日 (a)、高温日 (b) 对应的海平面气压距平合成平均 (单位: hPa)

Fig 7 Composites of sea level pressure anomalies(hPa) for (a) cold summer days and (b) hot summer days at the 47 stations over 1960—2004

流减弱,雨带偏南^[30]。与此对照,高温日在长江中下游地区和西太平洋上出现一大片负距平区,而在喀拉海附近则是一片正距平区,且只有一个正距平中心。说明在长江中下游区域海平面气压减弱,有利于东亚季风环流的增强。要说明的是低温日数与海平面气压异常之间的关系并不明显。对比前 5 站、中间 5 站和最后 5 站低温日的情况,发现随着低温日数的增加,海平面气压异常的强度变化和位置变化都不是很明显(图略)。

图 8 给出了合成的高、低温日 850 hPa 矢量风距平合成流场。当处于低温日时,低纬西太平洋地

区矢量风距平呈反气旋性环流,中纬地区矢量风距平呈气旋性环流。西太平洋低纬地区的矢量风距平呈反气旋性环流,同样说明东亚热带季风环流减弱,中纬地区的矢量风距平呈气旋性环流,梅雨锋加强。这与海平面气压距平场所反映出来低温日的环流特征一致。与此相对应,当处于高温日时,低纬西太平洋地区矢量风距平呈气旋性环流,东亚热带季风环流加强,中纬地区的矢量风距平呈反气旋性环流,说明梅雨锋减弱。这与文献[31]得到的东亚热带季风槽和梅雨锋的强度呈跷跷板变化是一致的。

合成的高、低温日 500 hPa 高度距平场及高度

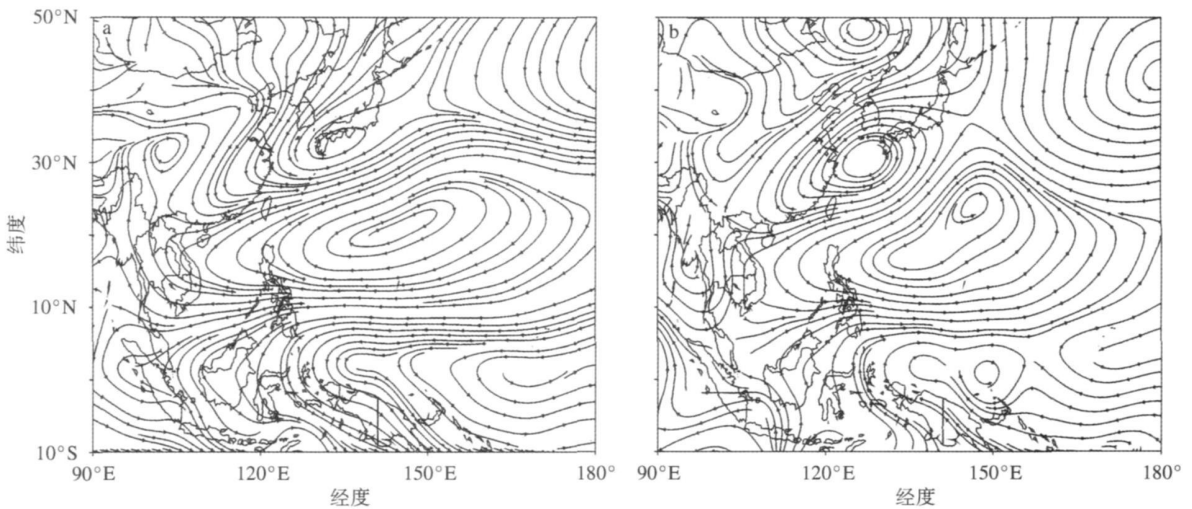


图 8 47 站低温日 (a)、高温日 (b) 对应的 850 hPa 矢量风距平台合成平均流场

Fig 8 Composited stream lines of 850 hPa wind vector anomalies for (a) cold summer days and (b) hot summer days at the 47 stations over 1960–2004

场显示 (图略): 低温日, 在西太平洋地区及喀拉海附近分别出现负距平中心, 并且长江中下游地区也为负距平区, 表明长江中下游地区 500 hPa 等压面下降, 空气柱厚度减小, 低层存在冷平流, 有利于在长江中下游地区出现低温而且西太平洋副高势力较弱, 亚洲大陆高纬地区阻塞高压不明显。而在高温日在上述区域则出现大片的正距平区, 且在长江中下游地区出现一正距平区。陈烈庭等^[32]得到, 当西太平洋副热带高压位置明显偏南偏西时, 有利于长江型雨带的形成。由合成的高、低温日 500 hPa 高度场可以直观地看出, 高、低温日 500 hPa 中高纬度气流平直, 无明显的闭合单体。低温日情况下, 副高位置偏南, 偏弱, 主体处于大洋上, 长江中下游地区处于副高的北侧。与西风带副热带锋区相邻, 处于较弱的北风控制之下, 多气旋和锋面活动, 上升运动强, 多阴雨天气。

位于对流层上层的南亚高压是天气气候变化的强信号^[33], 陶诗言等^[34]早在 1964 年就提出青藏高原东西振荡的概念。钱永甫等^[35]研究南亚高压与我国盛夏气候异常时发现, 盛夏南亚高压的两个平衡态青藏高原和伊朗高压又各可分为东西部型。西部型青藏高原时, 西南至华北等大片地区为多雨带, 而西北地区为干旱高温天气; 伊朗高压东部型时, 中国东部沿海地区多雨, 大部分地区气温偏低。高、低温日 100 hPa 合成位势高度场显示 (图略) 低温日对应的高压中心位置在 66°E 以东, 为伊朗高压东部型; 与此相对照, 高温日对应的高压中心位置在 82.5°E 以西, 为青藏高原西部型。这与文献^[35]得

到的结论吻合。

4 结语

(1) 在 1960—2004 年间, 夏季地表气温年际变率最大的地区位于长江流域。我国南方地区的气温在 20 世纪 70 年代末有一个转折, 在转折之前我国南方地区气温普遍偏低, 大多数年份气温在平均值以下。80 年代以后, 气温普遍升高。

(2) 夏季低温日数最多的地区主要位于江南, 平均每年可达 16 d 占夏季 92 d 的 17% 左右。日平均气温总体达到 21℃, 日平均极端低温可低于 18℃。

(3) 降水以及云量与长江中下游夏季气温存在密切联系。当降水增加、云量增多时易出现夏季低温。高、低温日海平面气压场, 500 hPa、100 hPa 高度场的环流差异显著, 斜压特征明显。西太平洋副热带高压及南亚高压的异常是导致长江中下游地区出现夏季低温的重要原因。

本文从局地大气环流特征出发考虑夏季低温的成因, 未考虑 ENSO、海冰等外部强迫因子的影响。至于这些因子的影响, 有待进一步研究。

致谢: 南京信息工程大学大气科学资料服务中心提供 1961—2000 年的逐日平均温度资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 中国气象局气象信息中心提供 2000 年以后的逐日平均温度资料, NOAA-CRIS Climate Diagnostics Center (<http://www.cdc.noaa.gov>) 提供 NCEP/NCAR 再分析资料, 谨致谢忱!

参考文献:

[1] 陈峪, 王凌, 祝昌汉, 等. 2003 年我国十大极端天气气候事件 [J]. 灾害学, 2004, 19(3): 76-80.

[2] 金志凤, 苏高利, 简根梅. 1999 年浙江省凉爽及其对农作物生长的影响 [J]. 科技通报, 2001, 17(4): 20-24.

[3] 黄毓华, 张旭晖, 吴炳娟. 江苏省 1999 年旱涝、低温寡照及其危害 [J]. 浙江气象科技, 2000, 21(1): 19-27.

[4] 姚克敏, 吴春刚, 马文静, 等. 两优培九关键期的气象指标与气候适应性分析 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 8-18.

[5] 王绍武, 赵宗慈. 中国夏季低温冷害 [J]. 自然资源, 1985, 1: 54-59.

[6] 陈峪, 黄朝迎. 气候变化对能源需求的影响 [J]. 地理学报, 2000, 55(增刊): 11-19.

[7] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J et al Climate Change 2001: The Scientific Basis [R]. // IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001: 107.

[8] 章基嘉, 徐祥德, 苗俊峰. 四十年来我国的气候变化及其对农业生产的可能影响 [J]. 大气科学研究与应用, 1992, 2: 39-43.

[9] 丁裕国, 江志红. 中国近 50 年严冬和冷夏演变趋势与区划 [J]. 应用气象学报, 1999, 10(增刊): 88-96.

[10] 秦爱民, 钱维宏, 蔡亲波. 1960—2000 年中国不同季节的气温分区及趋势 [J]. 气象科学, 2005, 25(4): 338-345.

[11] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. 大气科学, 1995, 19(2): 200-208.

[12] 黄嘉佑. 我国夏季气温、降水场的时空特征分析 [J]. 大气科学, 1991, 15(3): 124-132.

[13] 杨辉, 李崇银. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(1): 80-85.

[14] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 1996, 77(3): 437-471.

[15] 炎利军, 黄先香. 华南 7 月异常温度气候变化研究 [J]. 气象, 2005, 31(6): 64-67.

[16] Kevin E T. Recent observed interdecadal climate change in the northern hemisphere [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 1990, 71(7): 988-992.

[17] Gong D Y, Pan Y Z, Wang J A. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China during 1955—2000 [J]. Theor Appl Climatol, 2004, 77(1/2): 25-37.

[18] 吴胜安, 江志红, 屠其璞. 近 44 a 中国冬夏气温变率及其对区域变暖性的影响 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 830-836.

[19] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度的变化 [J]. 气象学报, 1997, 55(4): 418-429.

[20] 屠其璞, 邓自旺, 周晓兰. 中国气温异常的区域特征研究 [J]. 气象学报, 2000, 58(3): 288-296.

[21] 金龙, 刘雅芳, 陶玫, 等. 长江三角洲近百年的温度变化及未来趋势预测研究 [J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(增刊): 553-557.

[22] Zhao Zongci, Ding Yihui, Luo Yong et al Recent studies on attributions of climate change in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19(4): 389-400.

[23] 高庆先, 翁笃鸣. 中国地表热源的气候学特征 [J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(4): 543-547.

[24] 徐玉貌, 刘红年, 徐桂玉. 大气科学概论 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2000: 29-54.

[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 [J]. 气象学报, 2004, 62(5): 634-646.

[26] 李如琦, 王谦谦. 江淮梅雨期 (6—7 月) 最高气温的区域特征 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 308-315.

[27] 唐国利, 丁一汇. 近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. 大气科学, 2006, 30(1): 56-68.

[28] Robert D C, Zhang Minghua, Wilecki B A, et al The influence of the 1998 El Niño upon cloud-radiative forcing over the Pacific warm pool [J]. J Climate, 2001, 14(9): 2129-2137.

[29] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹民, 等. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[30] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 1996, 20(5): 575-583.

[31] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 17-23.

[32] 陈烈庭, 吴仁广. 太平洋各海区海温异常对中国东部夏季雨带类型的共同影响 [J]. 大气科学, 1998, 22(5): 718-726.

[33] 张琼, 钱永甫, 张学洪. 南亚高压的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 2000, 24(1): 67-78.

[34] 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. 气象学报, 1964, 34(4): 385-395.

[35] 钱永甫, 张琼, 张学洪. 南亚高压与我国盛夏气候异常 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 295-307.