

李纵横, 李崇银, 宋洁, 等. 2015. 1960~2011 年江淮地区夏季极端高温日数的特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 511–522. Li Zongheng, Li Chongyin, Song Jie, et al. 2015. An analysis of the characteristics and causes of extremely high temperature days in the Yangtze–Huaihe River basins in summer 1960–2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 511–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14157.

1960~2011 年江淮地区夏季极端高温日数的特征及成因分析

李纵横¹ 李崇银^{1,2} 宋洁² 谭言科¹ 黎鑫¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 基于江淮地区气象站 1960~2011 年逐日最高气温资料, 分析了江淮地区在北半球夏季极端高温日数的年际变化及其与大气环流场和海温的关系。结果表明在江淮流域极端高温日偏多(少)时, 其上空对流层中上层出现了具有正压结构的异常反气旋(气旋)环流, 以及热成风涡度平流导致的下沉(上升)运动; 亚洲西风急流的位置偏北(南), 并且 200 hPa 经向风场有明显的类似丝绸之路遥相关型的波列结构。在江淮地区极端高温日数偏多(少)的年份, 前期的赤道太平洋中部, 中国南海、孟加拉湾以及阿拉伯海海温呈现显著的正(负)异常, 同期的中国东部海区、南日本海的海温呈现显著的正(负)异常。

利用耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)中的 8 个模式的结果, 评估了 CMIP5 模式对中国江淮地区夏季年平均极端高温的模拟效果, 在此基础上, 对未来极端高温的变化进行了预估。模式结果表明, 在 RCP(Representative Concentration Pathway) 2.6 情景下, 21 世纪末江淮地区夏季极端高温日数将可能达 20 d 左右; 在 RCP4.5 情景下, 21 世纪末极端高温日数可能达 40 d 左右; 在 RCP8.5 情景下, 21 世纪末极端高温日数将可能达约 70 d。

关键词 江淮地区 极端高温事件 遥相关 海温 预估

文章编号 1006-9585 (2015) 05-0511-12

中图分类号 P429

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14157

An Analysis of the Characteristics and Causes of Extremely High Temperature Days in the Yangtze–Huaihe River Basins in Summer 1960–2011

LI Zongheng¹, LI Chongyin^{1,2}, SONG Jie², TAN Yanke¹, and LI Xin¹

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the highest daily temperature records of boreal summers from 1960 to 2011, this study analyzes interannual variations of the extremely high temperature days (EHTDs) in the Yangtze–Huaihe River basins of East China and their associated anomalous atmospheric circulations and sea surface temperature anomalies (SSTAs). Composite results of the summers in which the occurrence frequencies of EHTDs are higher (lower) than normal show that: (1) There is anomalous quasi-barotropic anticyclonic (cyclonic) circulation over the Yangtze–Huaihe River basins accompanied with anomalous descending (ascending) motion due to middle and upper troposphere thermal wind vorticity advection; (2) the position of the westerly jet has a northward (southward) displacement and a Silk Road Teleconnection—like wave

收稿日期 2014-07-26; 网络预出版日期 2015-03-12

资助项目 国家自然科学基金项目 41275086

作者简介 李纵横, 男, 1989 年出生, 硕士, 主要研究极端天气气候、气候动力学与数值模拟。E-mail: lizongheng1989@foxmail.com

train is found embedded in the upper troposphere; (3) prior summer, the central equatorial Pacific Ocean, South China Sea, Bay of Bengal, and Arabian Sea feature significantly positive (negative) SSTAs, while at the same time the SSTAs of the East China Sea and South Sea of Japan are significantly positive (negative). This study also evaluates the abilities of eight models involved in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) in simulating the EHTDs of the Yangtze–Huaihe River basins of East China, and the trend of EHTDs under different future emissions scenarios. The results suggest that the boreal summer EHTDs of the Yangtze–Huaihe River basins could reach about 20 d by the end of the 21st century under the 2.6 W m⁻² representative concentration pathway (RCP2.6), and 40 d and 70 d under RCP4.5 and RCP8.5, respectively.

Keywords Yangtze–Huaihe River basins, Extremely high temperature days, Teleconnection, SST, Forecast

1 引言

极端天气气候事件是指天气状态严重偏离其平均态时所发生的事件，故可以认为是异常或很少发生的事件，在统计意义上称为极端事件。极端高温事件是对人类社会有严重影响的极端天气气候事件之一。极端高温在数学上定义为超过某个阈值指标的事件，如果使用累积分布函数表示日最高温度，一般认为其阈值是小于第 10（或大于第 90）百分位数。例如，高温热浪持续指数（Heat Wave Duration Index, HWDI）、暖期持续指标（Warm Spell Duration Indicator, WSDI）和暖日指数（warm days, TX90p），这些指标采用了百分位阈值，详细算法可参见文献（Jones et al., 1999; Yan et al., 2002; Zhang et al., 2005）。除此之外，还有学者使用绝对日最高温度作为阈值，例如高温日数为日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的天数（史军等，2009; Ding et al., 2010）。在指数定义的基础上，Alexander et al. (2006) 利用历史观测资料，综合分析了全球范围的极端气温和降水事件的变化趋势，发现极端天气、气候事件发生区域的不均一性非常明显。史军等（2009）研究了中国华东地区极端高温的时间变化和空间差异，结果表明华东每年高温日数和高温日平均最高气温也表现出较大的时间动态变化和空间地域差异。可见，极端高温的时间变化具有明显的区域性特征。

区域性极端天气、气候事件的发生往往不是孤立的，与区域大气环流场的异常有着密切的关系，有些事件是多种气候因素形成组合性异常的结果（李崇银和顾薇，2010）。不少学者对我国极端高温发生与大气环流的关系进行了分析。比如，杨辉和李崇银（2005）认为 2003 年的江南持续异常高温是由于多因素导致的西太平洋副热带高压持续偏西偏强的结果，这些因素包括太平洋—印度洋呈

准静止态，越赤道气流减弱等。孙建奇等（2011）认为对北方地区而言，极端高温的影响因子主要是对流层中高层的位势高度异常；而影响我国中部和南部地区的因子，除了其上空中高层的位势高度异常外，低层冷暖平流输送的作用也非常重要，这两个因子的共同作用造成该地极端高温事件的出现。除此之外，中国东部极端气候事件及其变化还与东亚夏季风及季风环流密切相关。李娟等（2012）发现减弱的夏季风有利于东部极端高温与降水事件频率的协同变化。同时，全球变暖和城市化进程加快，热岛效应日趋显著，也是区域性极端高温越来越突出的原因之一（史军等，2009）。

江淮地区指湖北宜昌以东（ $28^\circ\text{N}\sim 34^\circ\text{N}$ ）区域的范围，夏季受季风影响显著。当梅雨期过后，江淮地区被西太平洋副热带高压控制，容易发生干旱高温天气。依据封国林等（2012）使用的极端高温事件综合指标等级的空间分布，我国极端高温事件强度分布具有明显的区域型特征，江淮流域属于综合指标较高的区域（A 区），即很容易出现高温天气，高温天气的高温度数通常也较高。Ding et al. (2010) 根据全国 512 站的日最高气温资料计算了中国每年高温日数平均值的分布，发现华东地区是我国极端高温多发区之一。其中，江淮地区是高温日数相对较多，方差相对较大的地区。另外，江淮流域人口众多，经济发达，高温天气对人们生产生活有重要影响。同时，江淮地区纬度较高，和长江以南地区相比可能受控于不同的环流系统。Hong and Liu (2012) 就曾指出 6 月淮河流域和长江流域汛期之间大气环流场存在显著差异。因此，本文关注于研究江淮地区出现极端高温日数的年际和年代际变化规律及其初步成因，这具有重要的科学意义和应用价值。同时，本研究也利用多个耦合模式的结果对在未来不同排放情景下江淮地区夏季极端高温日数的变化进行了预估，有助于了解极端高

温未来的变化趋势。本文的其他部分主要包括如下内容：第二部分介绍了研究数据和方法；第三部分是对江淮地区极端高温日数历史情况分析结果；第四部是未来情形江淮地区极端高温日数多模式预估结果；最后，第五部分是结果与讨论。

2 资料与方法

2.1 资料

在本研究中，选取的资料为 Li and Yan (2009) 整编的 1960 年 1 月至 2011 年 9 月共 52 年的中国均一化的历史气温资料集中的日最高气温资料。这套资料是在对我国台站日平均、日最高、日最低气温资料进行严格质量控制的基础上完成的。其中，共包括全国 545 个资料齐全的台站。本文选取的站点是位于江淮地区的 9 个气象站点，分别是安庆、蚌埠、东台、合肥、南京、武汉、巢湖、黄石、上海。它们的位置如图 1 所示。选用的大气资料还有 NCEP/NCAR 再分析资料中的月平均数据集，包括位势高度场、垂直速度、风场，该资料的经纬网格为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度) 垂直分辨率为 17 层。本文的研究时段为 1960~2011 年共 52 年的北半球夏季 (6、7、8 月)。同时，本研究也使用了英国气象局的 Hadley 研究中心的 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 的海表面温度 (SST) 月平均资料。本文还选取了 8 个参与 CMIP5 计划的耦合模式的历史试验和 RCP 未来情景试验 (RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6，即在 2100 年辐射强迫分别达到 8.5、4.5 和 2.6 $W m^{-2}$)。其中历史试验的模拟积分时间段是 1960~2005 年，未来情景试验的时间段为 2006~2100 年。所选 8 个模式包括了当前国际上的主要气候模式

表 1 8 个 CMIP5 的气候模式概况

Fig. 1 Overview of eight CMIP5 climate models

模式名称	单位及所属国家	大气模式分辨率 (纬向 \times 经向)
CanESM2	加拿大气候模式与分析中心, 加拿大	64 \times 128
CCSM4	国家大气研究中心, 美国	192 \times 288
CESM1-CAM5	耦合地球系统模式贡献者, 美国	192 \times 288
FGOALS-g2	中国科学院大气物理研究所, 中国	60 \times 128
HadGEM2-ES	英国气象局哈德雷研究中心, 英国	192 \times 144
IPSL-CM5A-LR	皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所, 法国	96 \times 96
MIROC5	大气和海洋研究所 (东京大学), 国家环境研究所和日本海洋地球科技机构, 日本	128 \times 256
MIROC-ESM-CHEM	日本海洋地球科技机构、大气和海洋研究所 (东京大学) 和国家环境研究所, 日本	128 \times 256

(表 1)，所选数量也满足了集合的要求。

2.2 方法

我国气象部门一般把日最高气温达到或超过 $35^\circ C$ 时称为高温，连续 3 d 以上的高温天气过程称为高温酷暑 (高温热浪)。从概率的角度考虑，极端天气事件为同类事件的 10%，在此基础上，李庆祥和黄嘉佑 (2011) 讨论了我国极端高温事件绝对阈值设定，认为对中国江南地区 $35^\circ C$ 作为极端高温阈值是合理的。因此，本文依据我国气象部门定义的极端高温日标准，将日最高气温大于或等于 $35^\circ C$ 即定为极端高温日，每年夏季极端高温日出现的天数定义为当年的极端高温日数。为了便于寻找极端高温与大气环流场和海温异常场的联系，区域性极端高温的强度定义为 9 个气象站 (图 1) 极端高温频数的平均值。本文使用夏季江淮地区极端高温日数标准化后的时间序列作为参考，将标准化的值大于 1 的年份视为强高温年；小于 1 的年份视为弱高温年。根据江淮地区年极端高温日数标准化

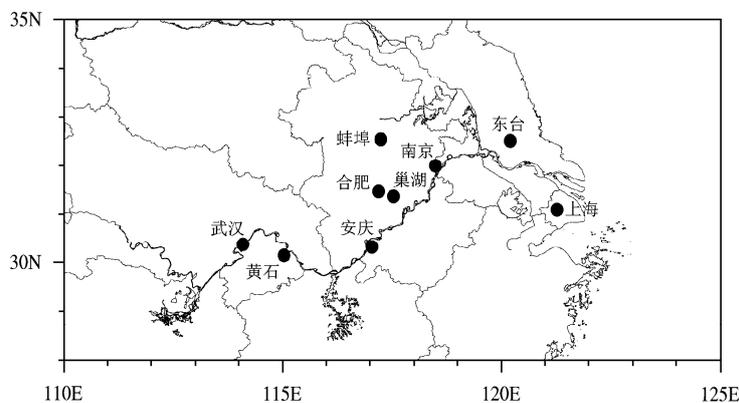


图 1 江淮地区选取的气象站点位置分布

Fig. 1 Distribution of nine selected meteorological stations in the Yangtze-Huaihe River basins

时间序列 (图略), 可以选择出江淮地区夏季极端高温偏强的年份有 1961、1966、1967、1971、1978、1988、1994、2001 和 2003 年; 夏季极端高温偏弱的年份有 1963、1973、1975、1980、1982、1987、1993、1997 和 1999 年。

3 极端高温与大气环流异常的联系

为了对近 50 年来中国江淮地区夏季极端高温事件对应的大气环流背景有全面的了解, 并对极端高温有影响的不同气象要素场之间的联系进行分析, 将标准化后的夏季极端高温指数分别与位势高度场、垂直速度场和风场等进行回归分析。之前的一些研究指出: 对流层中上层的位势高度异常和低

层温度平流是影响地表气温两个重要的环流因子 (Sun et al., 2008)。因此本文首先选择对流层中高层位势高度场和 850 hPa 风场进行分析。考虑到极端高温发生日数和强度的变化的一致性, 为方便起见, 这里使用前述的江淮地区极端高温日数的标准化指数为基础, 考察区域性极端高温的气候变化特征与大气环流的关系。此外, 我国江淮地区极端高温日 ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) 大都发生在 6、7、8 月, 因此本文后面的环流分析将主要针对夏季 (JJA) 平均的情景。因为结果表明, 850 hPa 风场与极端高温并没有明显的相关关系, 故而图略。

3.1 位势高度异常

图 2 给出了江淮地区极端高温发生日数标准化指数所回归的位势高度异常场分布。从图 2a 可见,

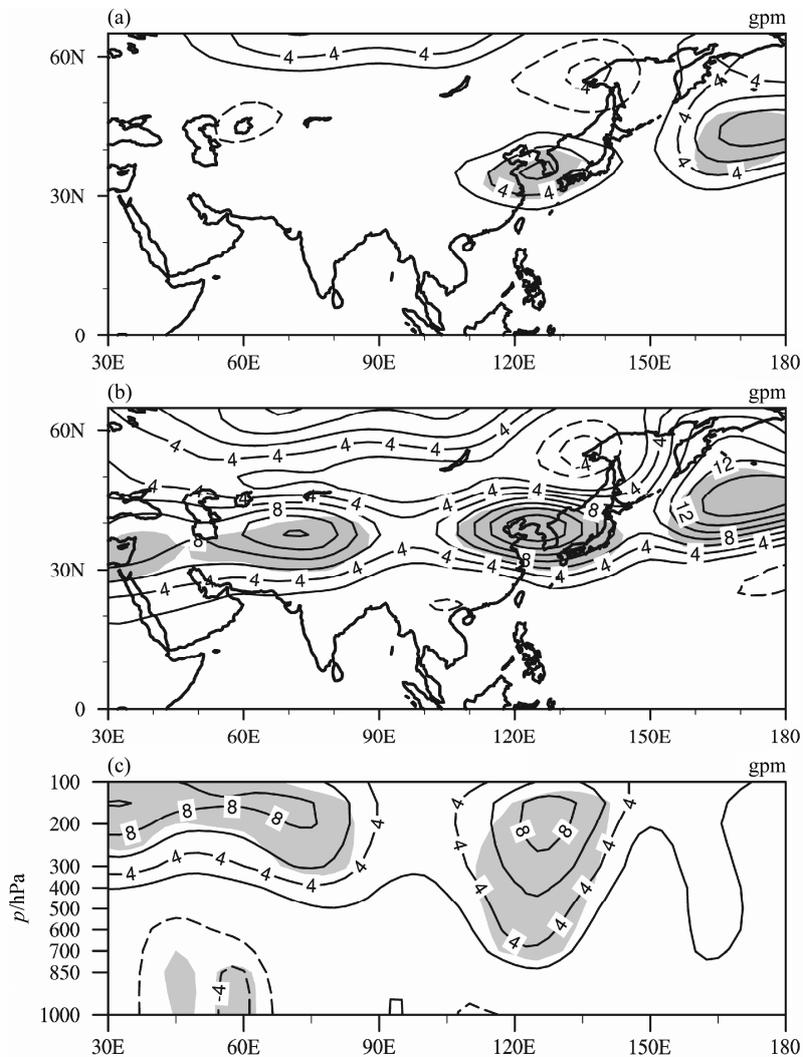


图 2 1960~2011 年江淮地区平均极端高温频数回归的北半球夏季平均位势高度异常场 (阴影: 通过 95% 信度检验, 单位: gpm): (a) 500 hPa; (b) 200 hPa; (c) 沿着 32.5°N 的 1000~100 hPa 垂直剖面

Fig. 2 Anomalous summer geopotential height (the regressed results above the 95% confidence level are shaded, units: gpm) regressed on the normalized EHTDs (Extremely High Temperature Days) over the Yangtze-Huaihe River basins for the period 1960-2011: (a) 500 hPa; (b) 200 hPa; (c) along 32.5°N

江淮地区的极端高温日数与其上空的 500 hPa 高度场呈现显著的正相关关系, 正异常位势高度有利于一个地区维持良好的天气条件, 晴朗的天气有利于太阳辐射到达地面, 从而易于该地高温天气的形成。陶诗言和徐淑英 (1962)、吴国雄等 (2002) 指出夏季江淮流域的旱、涝和短期天气与西太平洋副热带高压 (简称副高) 有一定的关系。对 2003 年江南地区夏季异常高温的研究 (杨辉和李崇银, 2005; 张瑞萍等, 2005) 指出, 在西太平洋副高异常偏强偏西, 且长时间持续维持下, 副高控制下的空气下沉增温和晴空条件下辐射加热使得气温持续异常偏高。因此, 中国华东地区区域性极端高温事件的出现, 往往直接原因就是西太平洋副高的强度和位置异常。图 2a 揭示的关系说明位势高度正异常是江淮地区极端高温偏多的重要环流因子。而在图 2b 所示的 200 hPa 位势高度场上, 显著相关区域扩大, 北太平洋、青藏高原西侧也都出现了与极端高温显著正相关的区域, 并且这 3 个显著正异常区域沿着 30°N~40°N 呈现出波列结构, 另外乌拉尔山上空位势高度也与极端高温频数呈正相关。南亚高压是夏季对流层上部除了极地涡旋以外全球最强大、最稳定和范围最大的高压 (Mason and Anderson, 1963), 这个高压是由于青藏高原的加热激发作用引起的, 以及南亚季风的潜热加热形成的 (Flohn, 1960; Duan and Wu, 2005)。陶诗言和朱福康 (1964) 很早就注意到其变化与西太平洋副高的西进东退有密切的关系。南亚高压位置可以用 100 hPa 上 16800 gpm 等值线来确定 (张琼等, 2000), 当江淮地区极端高温频数较多年, 南亚高压的平均位置明显东伸, 而且范围较大; 当江淮地区极端高温频数较少年, 南亚高压的平均位置明显偏西, 而且范围较小 (图略)。南亚高压对我国夏季降水有着重要影响。张琼和吴国雄 (2001) 指出, 南亚高压强度指数与长江流域降水有显著的正相关, 尤其与长江中游地区降水关系更为密切。Wei et al. (2014) 提出南亚高压的强度中心的東西位置变动会影响到江淮流域降水的多少。图 2c 是回归的位势高度异常的垂直剖面图, 可以看出, 在江淮流域极端高温频发年, 对流层中高层位势高度呈现正压性正异常, 在对流层上层这种异常更加显著。

3.2 垂直速度异常与诊断方程

图 3a 是对江淮地区年平均极端高温频数回归的 500 hPa 到 200 hPa 夏季平均垂直速度异常场的

分布图。从图 3a 上可以看出, 在东亚中纬度地区, 对流层中高层大气的垂直速度异常形成类似南北向偶极子分布的结构, 其中江淮地区上空有以垂直速度正异常 (即下沉运动)。这种垂直速度特征与江淮地区的极端高温事件相符合。同时也可以发现在青藏高原的西南侧的印度次大陆及其西北部地区上空的大气存在显著的上升运动。 Ω 方程可以很好地诊断热带地区大尺度的大气垂直运动 (Holton, 2004):

$$\omega \propto \begin{cases} \left[-\partial V_g / \partial p \cdot \nabla (\zeta_g + f) \right] < 0 & \text{500 hPa脊的东侧} \\ \left[-\partial V_g / \partial p \cdot \nabla (\zeta_g + f) \right] > 0 & \text{500 hPa槽的东侧} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 表示垂直速度, V_g 表示地转风, ζ_g 表示相对涡度, f 表示地转科氏参数, p 表示气压。根据 ω 方程, 热成风造成的异常正 (负) 涡度平流对应着大气异常的上升 (下沉) 运动。这是因为, 为了保证位势守恒, 异常热成风正 (负) 涡度平流必然伴随着大气冷却 (加热)。在绝热假设的情形下, 大气的冷却 (加热) 只能由大气的垂直上升 (下沉) 来完成。图 3b 是对江淮地区年平均极端高温频数回归的 500 hPa 到 200 hPa 夏季平均的热成风涡度平流异常分布图。对比图 3a 和图 3b 可以发现, 在东亚的中纬度地区, 热成风涡度平流也形成南北向的偶极子结构。对应于江淮地区, 热成风造成了显著的负涡度平流, 很好地对应着该地区的异常垂直下沉运动。这一结果表明, 江淮地区的下沉运动是由该地区大尺度环流异常导致的异常热成风涡度平流造成的。

3.3 风场异常

上述的结果表明, 位于东亚上空的异常反气旋是造成江淮地区出现极端高温的重要原因。为了分析异常反气旋的出现原因并进一步说明夏季江淮流域极端高温与同期大气环流的关系, 图 4 给出了利用夏季极端高温频数回归得到的 200 hPa 异常纬向风和经向风的情况。从图 4a 上清楚看到, 江淮流域极端高温日数与亚洲西风急流的南北位置有关, 偏多年急流位置偏北; 偏少年急流位置偏南。同时在图 4b 中, 异常经向风场上有明显的纬向波列结构, 从中东地区沿亚洲急流一路向下游传播到东太平洋。前人的研究表明亚洲西风急流是亚洲—太平洋地区最重要的大气环流系统之一, 东亚天气、气候变化与亚洲急流位置和强度变化密切相关。Ambrizzi et al. (1995) 认为西风急流是北半

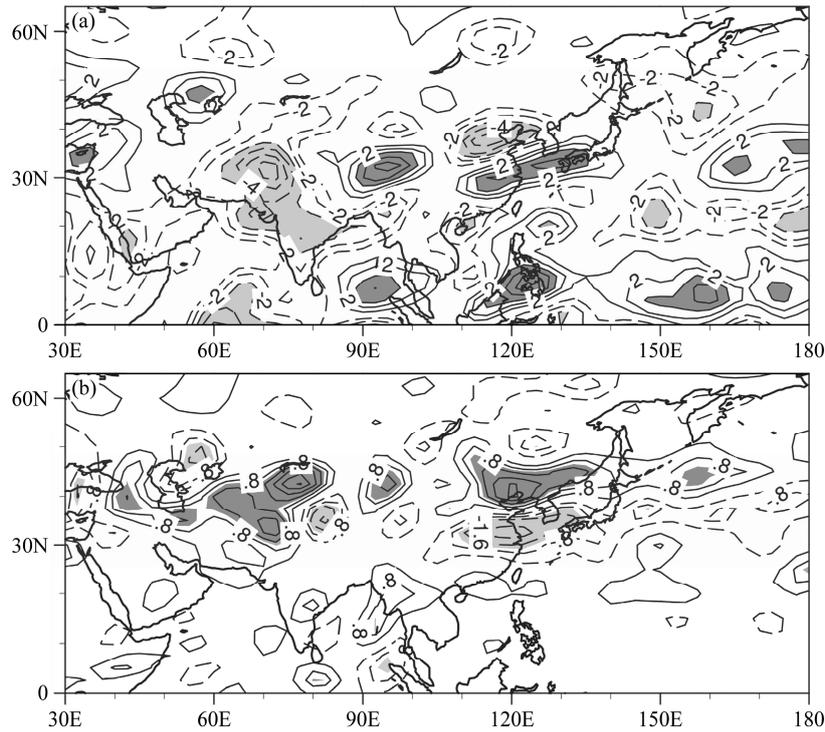


图3 1960~2011年江淮地区平均极端高温频数回归的北半球500~200 hPa平均的夏季(a)垂直速度场和(b)通过热成风输送的涡度平流。深(浅)阴影区分别表示值大于(小于)(a) 0.003 Pa s^{-1} (-0.003 Pa s^{-1})和(b) $1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ($-1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2}$)的区域

Fig. 3 Anomalous summer (a) vertical velocity and (b) advection of vorticity by thermal wind regressed on the normalized EHTDs over the Yangtze-Huaihe River basins for the period 1960–2011. Regions above (below) 0.003 Pa s^{-1} (-0.003 Pa s^{-1}) in (a) and $1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ($-1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2}$) in (b) are represented by dark (light) shading

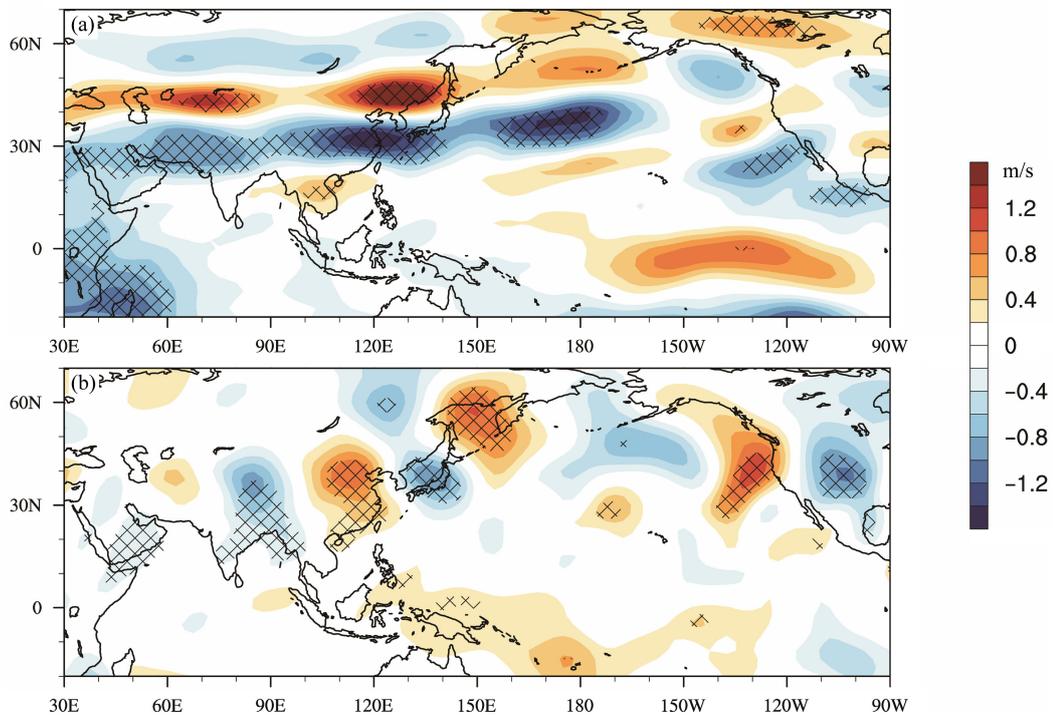


图4 1960~2011年江淮地区平均夏季极端高温频数所回归的200 hPa (a)纬向风场和(b)经向风场(黑叉线: 通过95%信度检验)

Fig. 4 Anomalous 200-hPa (a) zonal wind and (b) meridional wind regressed onto the normalized EHTDs over the Yangtze-Huaihe River basins for the period 1960–2011 (the regressed results at the 95% confidence level are covered with black crosses; units: m s^{-1})

球夏季的一个波导。而 Lu et al. (2002) 较早通过 200 hPa 经向风场点相关分析提出西风急流中存在一个遥相关波列, 并指出此遥相关(即丝绸之路遥相关)是东亚夏季风和印度夏季风的一个可能联系。Enomoto et al. (2006) 认为夏季孟加拉湾加热可以通过影响亚洲西风急流中的准静止 Rossby 波的活动从而远距离导致小笠原群岛高压(Bonin high)的形成。Kosaka et al. (2009) 对丝绸之路遥相关型进行了动力学分析发现, 在斜压性西风急流中从有效位能获取能量的方式对遥相关型的维持非常有效。Chen and Huang (2012) 指出丝绸之路遥相关型会影响到中国西北部 6 月份的降水。图 4b 的结果表明与江淮地区极端高温联系紧密的异常反气旋与位于亚洲西风急流带的丝绸之路遥相关型可能有密切的关系。已有的一些模式试验证明印度季风区的非绝热加热可以激发出类似于丝绸之路遥相关型的波列结构(Lin, 2009; Liu and Wang, 2013)。需要指出的是, 在图 3a 的异常垂直速度上, 我们注意到印度半岛地区存在显著的异常上升运动。这一结果表明印度季风区的非绝热加热的异常可能会通过丝绸之路遥相关影响江淮地区的极端高温发生情况。

3.4 海温异常

近年来, 关于印度洋海温异常对亚洲气候, 特别是对亚洲季风影响的研究越来越多。吴国雄等(2000) 提出在北印度洋出现的海温正异常可以通过凝结潜热加热的作用, 使青藏高原加强, 同时使对流层中低层副热带高压加强西伸。Yang et al. (2007) 年也指出, 印度洋海温变暖会导致该地区降水增加, 同时在对流层高层激发出 Matsuno-Gill 型, 也就是使南亚高压加强。Li and Mu (2001) 指出印度洋海温偶极子(IOD) 对南亚和东亚的大气环流和气候都有明显影响。Yuan et al. (2008) 的研究也表明, 全印度洋海表面温度异常(SSTA) 的全海盆模态同样对南海夏季风的爆发有一定的影响。Zhou et al. (2009) 提出, 从 1970 年开始, 西太平洋副热带高压西伸就不断加强, 印度洋—西太平洋增暖和赤道中东太平洋对流减弱是导致西太平洋副高不断向西的原因之一。图 5 给出了不同季节的 SSTA 与江淮地区年极端高温日数的回归分布。从图 5a 可以看出, 在前期冬季, 南海、孟加拉湾和阿拉伯海及中太平洋呈现出显著的正相关关系。在同期春季(图 5b), 中国东部临海与江淮地区的极端高温的正相关关系逐渐显著。而在夏季同期(图

5c) 太平洋西北部、日本海以及中国东海、渤海都与极端高温呈现显著的正相关, 赤道东太平洋呈现显著的负相关。江淮极端高温与夏季同期印度洋海温异常的相关关系并不好, 说明同期印度洋海温异常不是引起江淮地区极端高温异常的主要原因。关于前期海表面温度异常与江淮地区极端高温的关系, 本文只得到了初步的结果, 它们之间的确切关系以及具体的联系机制还有待进一步研究。

4 8 个气候模式对极端高温频数的预估

为了考察江淮地区极端高温在全球变暖背景下未来的变化情况, 根据参与政府间气候变化委员会(IPCC) 第五次评估报告的 8 个新一代全球模式(见表 1) 即多模式集合的模拟资料, 对中国江淮区域未来不同排放情景下极端高温事件的变化趋势进行了预估。

考虑到不同模式的分辨率不同, 将中国江淮地区设定为(28°N~34°N, 114°E~120°E), 并选择这个区域范围内各点的夏季日最高温度的平均值作为变量来计算本文采用的极端高温指数。首先利用模拟的历史数据分别计算了 1960~2005 年 8 个模式的结果, 夏季极端高温天数平均为 9.3 d, 略低于观测的结果 12.6 d, 说明模式集合对极端高温发生频数的模拟有一定的可信度。对未来江淮夏季极端高温演变趋势的模拟结果如图 6a 所示, 从图 6a 可以看到在 2100 年辐射强迫达到约 2.6 W m^{-2} 的情景下, 21 世纪末江淮地区极端高温日数将可能达到 20 d; 而在辐射强迫达到约 4.5 W m^{-2} 的情景下(图 6b), 21 世纪末江淮地区极端高温日数可能达到 40 d; 最可怕的是在辐射强迫达到约 8.5 W m^{-2} 的情景下(图 6c), 21 世纪末江淮地区极端高温日数将可能达到 70 d。因此, 在全球增暖的背景下, 江淮地区夏季的极端高温将会越来越严重; 如果模式预测准确的话, 到 21 世纪末江淮地区夏季将有 1/2~2/3 的时间会出现极端高温。图 6a 所示结果还有一点值得注意, 就是在极端高温日数持续增加的趋势中还明显存在年代际变化的信号。也就是说, 在人为强迫不是很强的情况下, 气候系统的年代际变化特征需要很好考虑。

尽管全球气候模式过去已经有了较程度的发展, 但仍存在不确定性, 在模拟局部区域气候极值时不确定性更大。同时, 基于未来辐射强迫变化

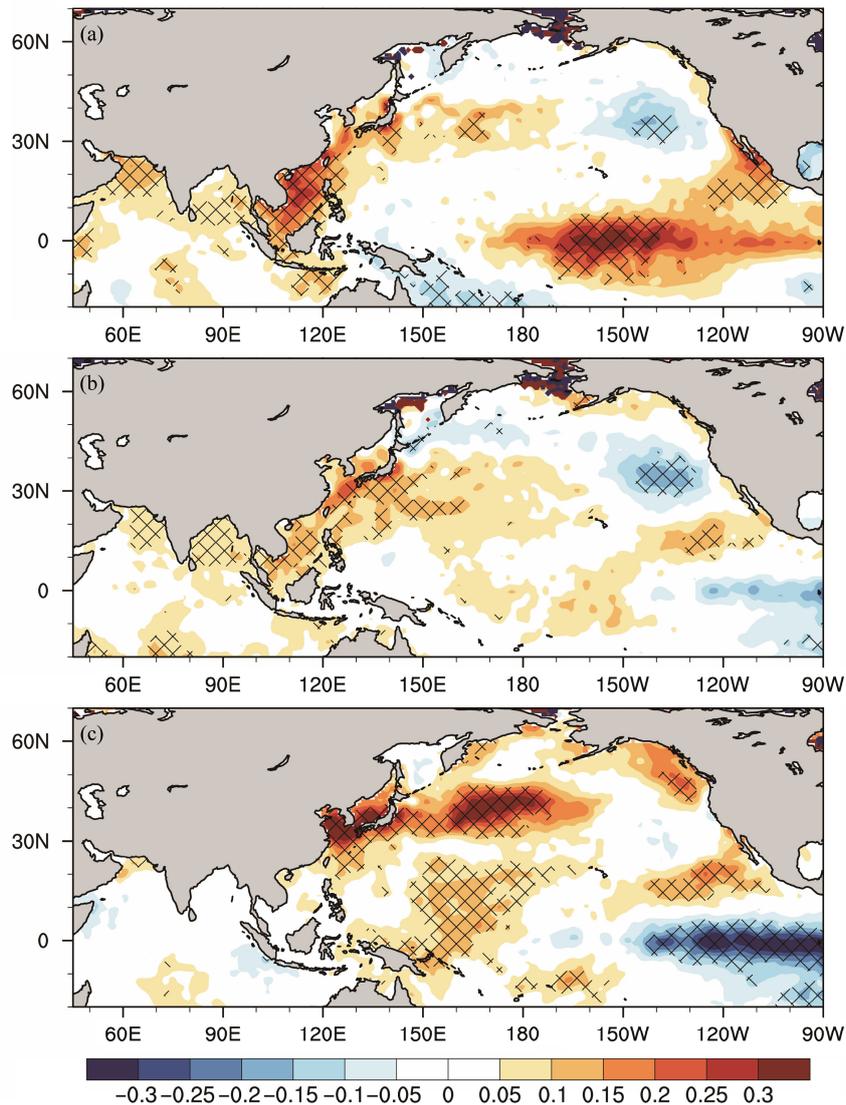


图5 1960~2011年江淮地区夏季极端高温日数与不同季节海温异常的回归系数分布(黑叉线:通过90%显著性水平;单位:K):(a)前期冬季;(b)同年春季;(c)同年夏季。

Fig. 5 Sea surface temperature anomalies wind regressed on the normalized EHTDs over the Yangtze-Huaihe River basins for the period 1960-2011 (regressed results at the 90% confidence level are covered with black crosses; units: K): (a) Winter (December-January-February, DJF) in the previous year; (b) spring (March-April-May, MAM) in the same year; (c) summer (June-July-August, JJA) in the same year

来进行预估,有关火山气溶胶的变化等因素尚未很好考虑,在很大程度上也会带来不确定性。尽管如此,模式的结果并不是毫无意义,它揭示了在 CO_2 含量不断增加的背景下,未来江淮地区极端高温年平均天数可能增加,温室气体排放量越大,极端高温天数增加越多。

5 结果与讨论

本文通过对过去52年大气和海洋资料的分析,

讨论了江淮地区极端高温频数的气候变化特征和成因。图7a给出了江淮地区夏季极端高温频数柱状。从图7a可以看出,在1960~2011年,江淮地区多年平均高温日数为12.6d,其中1967年最多,为29.7d,其次为1966年29.3d,再其次为1978年27.4d,相差无几。而1982、1993、1999年高温日数较少分别为1.6d、3.3d和3.1d。根据图7a大体可以将江淮地区年极端高温频数年代际变化划分成3段:1971年前,多数年份极端高温日数为正距平;1972~1998年多数年份为负距平;1999年以

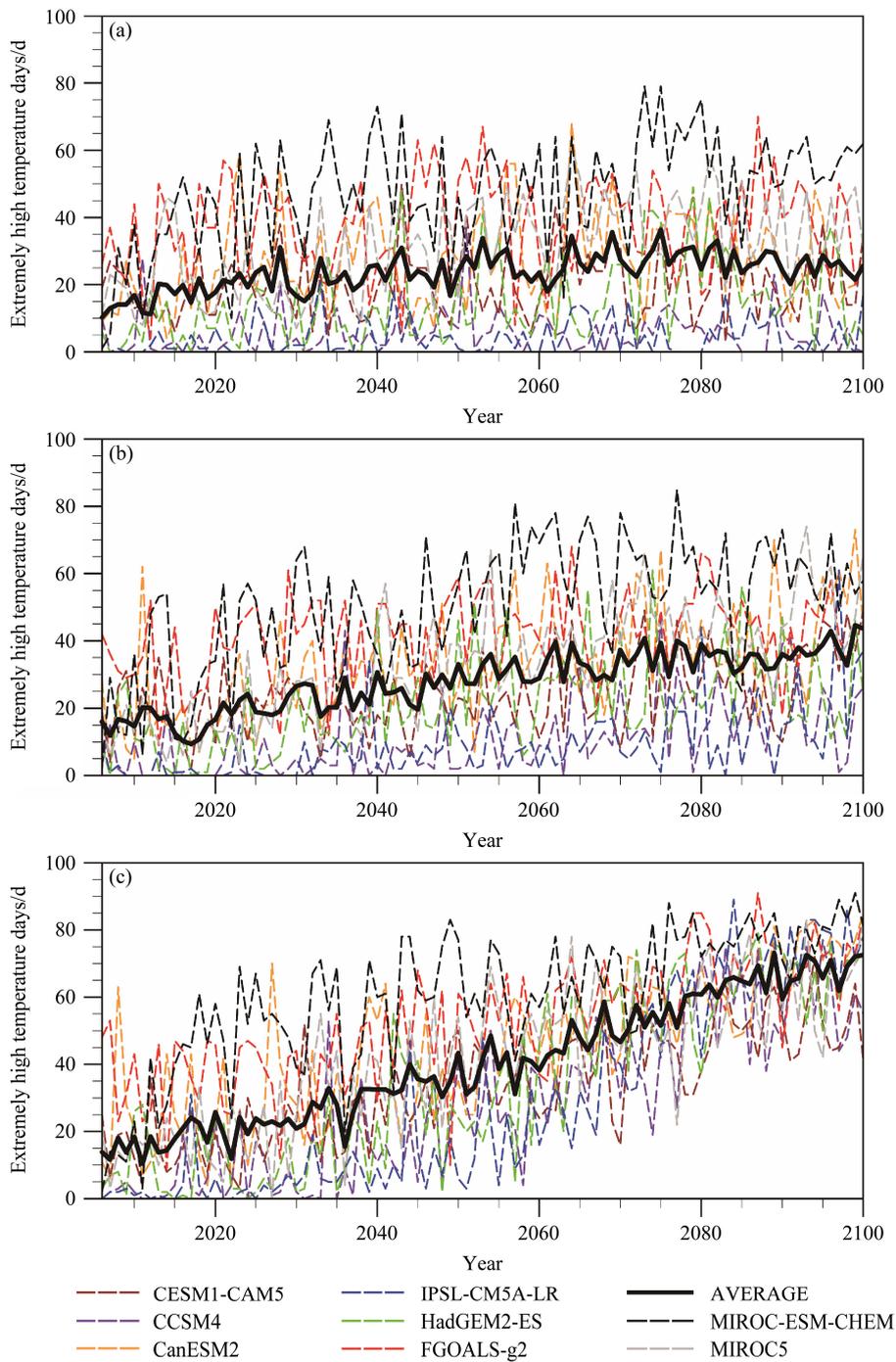


图 6 2006~2100 年江淮地区夏季极端高温频数的多模式预估 (粗黑线表示多模式集合的平均值): (a) RCP2.6 情景下; (b) RCP4.5 情景下; (c) RCP8.5 情景下

Fig. 6 Multimodal estimates of summer EHTDs in the Yangtze-Huaihe River basins from 2006 to 2100 under the (a) RCP2.6, (b) RCP4.5 and (c) RCP8.5 scenarios (bold black lines represent the average of the models)

来, 多数年份为正距平。为了检验是否存在气候的年代际突变, 对江淮地区极端高温日数进行 Mann-Kendall 突变检测图, 如图 7b 所示, 结果表明, 江淮地区的极端高温频数发生了一次显著的由少到多的跃变, 突变时间为 2001~2002 年。图 7c

的小波分析结果表明, 除了 1960~1975 年间有比较显著的 4~6 年周期外, 极端高温的变化并没有特别显著地周期性。

在江淮流域极端高温日偏多时, 其上空对流层中上层出现位势高度正异常和异常的反气旋环流。

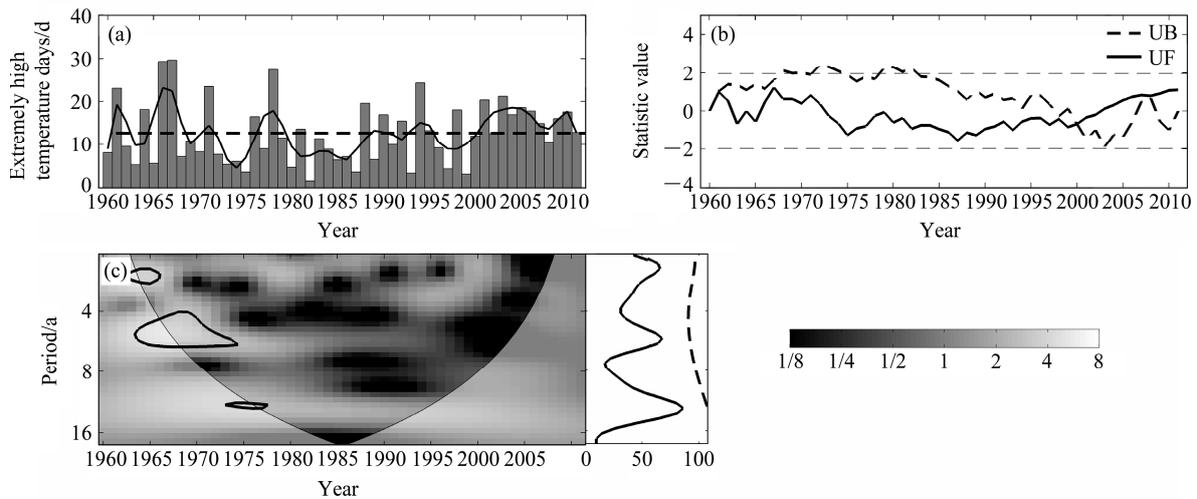


图 7 1960~2011 年江淮地区夏季平均极端高温频数的 (a) 极端高温频数柱状图 (黑线为 5 年滑动平均, 虚直线为平均值)、(b) Mann-Kendall 突变检验曲线 (虚直线为 95% 显著性水平) 及 (c) 频数的小波分析结果 (右侧黑线为全局小波谱, 虚线为 95% 显著性水平)

Fig. 7 (a) Number of EHTDs in the Yangtze-Huaihe River basins for the period 1960-2011 and its 5-year running mean (solid line) and average (dashed line); (b) Mann-Kendall test curve of EHTDs; (c) wavelet analysis result of the index and its global wavelet spectrum (black line on the right-hand side; dashed line represents the 95% confidence level)

西太平洋副高位置偏西; 南亚高压东西两侧加强, 范围扩大。正位势高度异常和反气旋环流异常所形成的下沉气流, 有利于极端高温的发生。夏季西风急流中的丝绸之路遥相关型, 可能对江淮地区极端高温的发生有影响。在前期冬季和春季, 阿拉伯海、孟加拉湾和南海 SSTa 都与江淮地区极端高温呈现显著的正相关关系; 而同期北太平洋中纬度海区的 SSTa 与江淮地区的极端高温有较好的关系。海温异常形势可以作为预测极端高温情况的前期信号。Hu et al. (2011, 2012) 研究了赤道印度洋海温异常与我国东部, 尤其是长江流域南部地区夏季高温日数的联系机制。他们认为夏季 (JJA) 赤道印度洋海温异常引起的暖性开尔文波可以在副热带西北太平洋和中国南部上空低层激发出反气旋环流, 从而引起极端高温的异常。本文讨论的江淮地区与同年夏季赤道印度洋海温异常的相关关系并不显著, 这表明我们需要影响我国不同区域夏季高温的机制进行更细致的研究。

我们还利用耦合气候模式资料分析预估了未来百年江淮地区极端高温的变化趋势。利用模拟的历史数据分别计算了 1960~2005 年 8 个模式结果, 其夏季极端高温天数平均为 9.3 d, 略低于观测的结果 12.6 d, 说明模式集合对极端高温发生频数的模拟有一定的可信度。而对气候模式 RCP 模拟数据的分析表明, 在 2100 年辐射强迫达到约 2.6 W m^{-2} 的

情景下, 21 世纪末江淮地区极端高温日数将可能达到 20 d 左右, 而在辐射强迫达到约 4.5 W m^{-2} 的情景下, 21 世纪末江淮地区极端高温日数可能达到 40 d 左右, 在辐射强迫达到约 8.5 W m^{-2} 的情景下, 21 世纪末江淮地区极端高温日数将可能达到 70 d 左右。需要指出的是, 在全球变暖的气候背景下, 极端高温这种天气气候气候灾害的发生在未来有增多的趋势, 也需要进一步研究和提出具体应对措施。

参考文献 (References)

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984-2012), 111 (D5), doi: 10.1029/2005JD006290.

Ambrizzi T, Hoskins B J, Hsu H H. 1995. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the austral winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (21): 3661-3672, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<3661:RWPATP>2.0.CO;2.

Chen G S, Huang R H. 2012. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China [J]. *J. Climate*, 25 (22): 7834-7851, doi:10.1175/JCLI-D-11-00684.1.

Ding T, Qian W H, Yan Z W. 2010. Changes in hot days and heat waves in China during 1961-2007 [J]. *International Journal of Climatology*, 30 (10): 1452-1462, doi: 10.1002/joc.1989.

Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7-8): 793-807, doi: 10.1007/s00382-004-0488-8.

- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2006. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129 (587): 157–178.
- 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 2012. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究 [M]. 北京: 科学出版社, 90–100. Feng Guolin, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2012. Detection, Diagnosis and Predictability Research of Extreme Climate Events (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 90–100.
- Flohn H. 1960. Recent investigations on the mechanism of the “summer monsoon” of southern and eastern Asia [M]// *Monsoons of the World*. New Delhi: Hind Union Press, 75–88.
- Holton J R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th ed. [M]. New York: Academic Press, 167pp.
- Hong J L, Liu Y M. 2012. Contrasts of atmospheric circulation and associated tropical convection between Huaihe River valley and Yangtze River valley meiyu flooding [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (4): 755–768, doi: 10.1007/s00376-012-1217-6.
- Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *J. Climate*, 24 (20): 5365–5377, doi: 10.1175/2011JCLI4152.1.
- Hu K M, Huang G, Qu X, et al. 2012. The Impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across south of Yangtze River valley in late summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (1): 91–100, doi: 10.1007/s00376-011-0209-2.
- Huang G, Qu X, Hu K M. 2011. The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 421–432, doi: 10.1007/s00376-010-9224-y.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 131–149, doi: 10.1023/A:1005468316392.
- Kosaka Y, Nakamura H, Watanabe M, et al. 2009. Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87 (3): 561–580, doi: 10.2151/jmsj.87.561.
- Li C Y, Mu M Q. 2001. The influence of the Indian Ocean dipole on atmospheric circulation and climate [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (5): 831–843.
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. *大气科学*, 34 (5): 865–874. Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural mountains in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 865–874.
- 李娟, 董文杰, 严中伟. 2012. 中国东部 1960~2008 年夏季极端温度与极端降水的变化及其环流背景 [J]. *科学通报*, 57 (8): 641–646. Li Juan, Dong Wenjie, Yan Zhongwei. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960–2008 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (15): 1856–1861, doi: 10.1007/s11434-012-4989-2.
- 李庆祥, 黄嘉佑. 2011. 对我国极端高温事件阈值的探讨 [J]. *应用气象学报*, 22 (2): 138–144. Li Qingxiang, Huang Jiayou. 2011. Threshold values on extreme high temperature events in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 22 (2): 138–144.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized China daily mean/maximum/minimum temperature series 1960–2008 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (4): 237–243.
- Lin H. 2009. Global extratropical response to diabatic heating variability of the Asian summer monsoon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66 (9): 2697–2713, doi: 10.1175/2009JAS3008.1.
- Liu F, Wang B. 2013. Mechanisms of global teleconnections associated with the Asian summer monsoon: An intermediate model analysis [J]. *J. Climate*, 26 (5): 1791–1806, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00243.1.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 54 (1): 44–55, doi: 10.1034/j.1600-0870.2002.00248.x.
- Mason R B, Anderson C E. The development and decay of the 100-mb summertime anticyclone over southern Asia [J]. *Mon. wea. rev.*, 1963, 91 (1).
- 史军, 丁一汇, 崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 347–358.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2008. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D15), doi: 10.1029/2007JD009626.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (2): 199–208. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (2): 199–208.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. *气象学报*, 32 (1): 1–20. Tao Shiyang, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Huaihe valleys in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 32 (1): 1–10, doi: 10.11676/qxxb1962.001.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 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*, 34 (4): 385–395. Dao Shih-Yen, Chu Fu-Kang. 1964. The 100-mb flow Patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34 (4): 385–395.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2014. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian high and its influence on summer rainfall over China [J]. *Climate Dyn.*, 43 (5–6): 1257–1269, doi: 10.1007/s00382-013-1938-y.
- 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应 [J]. *气象学报*, 58 (5): 513–522. Wu Guoxiong, Liu Ping, Liu Yimin, et al. 2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—two-stage thermal adaptation in the atmosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (5): 513–522.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1–100. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of

- Subtropical Anticyclones (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–100.
- Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations [J]. *Climatic Change*, 53 (1–3): 355–392, doi: 10.1023/A:1014939413284.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 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*, 10 (1): 80–85. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (1): 80–85.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (2), doi: 10.1029/2006GL028571.
- Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al. 2008. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (12): 1579–1587, doi: 10.1002/joc.1671.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 59 (5): 569–577. Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the south Asia high [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (5): 569–577, doi: 10.11676/qxxb2001.061.
- 张琼, 钱永甫, 张学洪. 2000. 南亚高压的年际和年代际变化 [J]. *大气科学*, 24 (1): 67–78. Zhang Qiong, Qian Yongfu, Zhang Xuehong. 2000. Interannual and interdecadal variations of the South Asia high [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (1): 67–78.
- 张瑞萍, 周叶芳, 郭可义. 2005. 2003 年夏季我国南方持续高温和极涡位置的关系 [J]. *气象科学*, 25 (5): 528–533. Zhang Ruiping, Zhou Yefang, Guo Keyi. 2005. The relation between the persistent high temperature in south of China in the summer of 2003 and the vortex's position [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 25 (5): 528–533.
- Zhang X B, Hegerl G, Zwiers F W, et al. 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes [J]. *J. Climate*, 18 (11): 1642–1651, doi: 10.1175/JCLI3366.1.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 22 (8): 2199–2215, doi: 10.1175/2008JCLI2527.1.