

马双梅, 祝从文, 刘伯奇. 2021. 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, 45(1): 165–180. MA Shuangmei, ZHU Congwen, LIU Boqi. 2021. Possible Causes of Persistently Extreme-Hot-Days-Related Circulation Anomalies in Yunnan from April to June 2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 165–180. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19226

2019 年 4~6 月云南持续性高温天气的大气环流异常成因

马双梅 祝从文 刘伯奇

中国气象科学研究院气候与气候变化研究所, 北京 100081

摘 要 2019 年 4~6 月云南省发生了历史罕见的持续性极端高温天气, 并引发了严重气象干旱。本文利用 1961~2019 年逐日温度和大气再分析等资料以及 CESM-LE 计划 (Community Earth System Model Large Ensemble Project) 模式模拟结果, 分析了历史同期云南极端高温天气发生的环流特征, 探讨了 2019 年云南破纪录持续性高温的成因。历史极端高温日的合成分析表明, 云南地区对流层上层显著异常反气旋伴随的强下沉异常和到达地表太阳辐射增加, 是引发该区域极端高温天气的主要成因。该异常反气旋的形成主要源自北大西洋经东欧平原、西西伯利亚平原向东亚传播的高纬度罗斯贝波和经北非、黑海、伊朗高原向东亚传播的中纬度罗斯贝波之间的相互作用。2019 年极端高温的强度和与之相应异常反气旋出现自 1961 年以来的最强。外强迫导致的增暖对 2019 年极端暖异常强度的贡献约为 37.51%, 同时对类似 2019 年以及更强极端暖事件发生概率的贡献为 56.32%, 内部变率对该事件也具有重要贡献。2019 年 4~6 月北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 和 ENSO 事件分别处于历史极端负位相和暖位相。一方面, 在 AO 强负位相影响下, 极地上空深厚的位势高度正异常向南伸至东欧平原, 有利于高纬度波列和云南上空的反气旋异常增强。另一方面, ENSO 事件暖位相加强了西北太平洋异常反气旋环流, 令西北太平洋副热带高压增强西伸至我国内陆地区, 维持了云南上空反气旋异常。两者的共同作用, 造成了 2019 年 4~6 月云南上空持续的深厚异常反气旋, 云南地区继而出现持续性极端高温事件。

关键词 极端高温 反气旋异常 罗斯贝波列 北极涛动 ENSO

文章编号 1006-9895(2021)01-0165-16

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19226

Possible Causes of Persistently Extreme-Hot-Days-Related Circulation Anomalies in Yunnan from April to June 2019

MA Shuangmei, ZHU Congwen, and LIU Boqi

Institute of Climate System, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract A series of persistently extreme hot days, which broke the historical record for length, was experienced by Yunnan province from April to June 2019 and induced a severe local drought. Based on the daily in-situ surface air temperature in China, JRA-55 reanalysis datasets, and outputs from the Community Earth System Model Large Ensemble

收稿日期 2019-10-14; 网络预出版日期 2020-05-14

作者简介 马双梅, 女, 1988 年出生, 副研究员, 主要从事极端天气事件研究。E-mail: masm@cma.gov.cn

通讯作者 祝从文, E-mail: zhucw@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1505904, 国家自然科学基金项目 41830969、41705052, 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目 2018Z006

Funded by National Key R&D Program (Grant 2018YFC1505904), National Natural Science Foundation of China (Grants 41830969, 41705052), Basic Scientific Research and Operation Foundation of CAMS (Grant 2018Z006)

(CESM-LE) Project, we investigate the general circulation regime related to the hot weather in Yunnan and discuss the possible causes of these persistently hot days in 2019. Our results indicate that lower- and upper-level strong anticyclonic circulation anomalies directly result in the local hot weather, which induces adiabatic warming in a descending motion and enhances solar radiation heating at the surface. The anticyclonic anomaly is a node of high and mid-latitude eastward-propagating wave trains originating from the North Atlantic. The 2019 April–June mean temperature and associated anticyclonic anomalies were the highest recorded since 1961. The anthropogenic contribution to the magnitude of this 2019 temperature anomaly was approximately 37.51% and the occurrence probability of extreme-high-temperature events analogous to or higher than those of 2019 is 56.32%, with an important impact of internal variability. The negative phase of the Arctic Oscillation (AO) and warm phase of El Niño and the Southern Oscillation (ENSO) are important external forcing factors responsible for the persistent anticyclonic anomalies over Yunnan from April to June 2019. The negative phase of the AO causes a southward shift of the positive geopotential height anomalies over the Arctic at the longitudes of Eastern Europe, and favors a high-latitude wave train and an anticyclonic anomaly over Yunnan. The warm phase of ENSO enhances the western North Pacific anticyclone and favors its westward shift, which leads to the persistence of the anomalous anticyclonic circulation over Yunnan. Under the recent global warming conditions, the negative phase of the AO and the warm phase of ENSO jointly reinforce the intensity and duration of the anomalous anticyclonic circulation over Yunnan, which result in frequent and persistent occurrences of the record-breaking extremely high temperatures and the severe drought event in 2019.

Keywords Extreme hot days, Anticyclonic anomaly, Rossby wave trains, Arctic Oscillation, ENSO

1 引言

云南地处青藏高原主体向东南延伸的云贵高原地区,受到特殊的地理位置和地形的影响,气候冬暖夏凉,有“四季如春”的美誉(毛政旦, 1977)。然而,伴随全球变暖,近些年云南在春夏季节频繁发生极端高温事件(刘瑜等, 2007; 程建刚和解明恩, 2008)。例如, 2014 年 5 月中下旬, 云南大部地区出现罕见高温天气, 其中昆明、元阳等 12 气象站的日最高气温达到或超过历史极值; 元阳有 4 天日最高气温破云南省历史最高气温纪录(43.2°C), 极端最高气温达 44.5°C; 昆明有两天日最高气温破了当地历史极端最高气温纪录(31.5°C); 元江、元阳两站均有 18 天日最高气温突破 40°C(中国气象局, 2015)。

2019 年 4~6 月云南省再一次发生了持续性高温天气, 导致部分地区出现了极端气象干旱灾害, 对当地农业造成了严重影响。4 月 20 日至 6 月 23 日, 云南省气象台发布高温预警 40 天; 昆明市的日最高温度在 5 月 11~21 日期间连续 11 天超过 30°C, 打破了最长连续 30°C 以上的历史纪录, “春城”变“烤城”。4~6 月云南大部分台站日最高气温超过极端阈值, 多站日最高气温突破历史极值(图 1a)。大部分地区 4~6 月平均的日最高气温较常年偏高 2°C 以上(图 1b)。自 4 月 6 日开始, 全省平均日最高气温基本维持在较常年偏高

的状态(图 1c)。

极端高温事件严重威胁人体健康, 引发森林火灾, 破坏农业生产, 造成严重的社会经济损失。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出(IPCC, 2013), 伴随全球的变暖地球大多数地区的极端高温事件的频率、持续时间和强度将显著增加。认识全球变暖对极端高温事件的影响以及区域高温气候事件发生的机理对于防灾减灾具有重要的科学意义(Ma et al., 2017a; Liu et al., 2019; Xu et al., 2019)。持续性高温是云南春夏季节干旱事件发生的主要成因(韩兰英等, 2014), 针对 2003 年夏季干旱, 2005 年春末夏初和 2006 年春旱, 以及降水持续性偏少导致的 2009~2010 年秋冬春连旱, 人们分别从西南季风和西北太平洋副热带高压异常(解明恩等, 2005), 大气环流季节进程和冷空气活动(刘瑜等, 2007; Li et al., 2011), 中纬度大气环流和 MJO 异常的影响(杨辉等, 2010; 吕俊梅等, 2012), 热带西太平洋和热带印度洋热力异常和中高纬度大气波动异常(黄荣辉等, 2012), 以及气候变化(Ma et al., 2017b)等多个角度剖析了成因。统计研究发现, 伴随全球的变暖, 云南降水减少, 高温干旱事件发生的强度和频率有增强趋势(谢应齐等, 1994; 程建刚和解明恩, 2008)。然而以往的研究多集中个例分析, 关于云南区域性极端高温事件的普遍环流成因以及人为导致的增暖和内部变率对其贡献的研究相对较少。为此, 本文首先从云南

历史区域性极端高温天气事件出发, 通过分析大气关键环流的热动力影响, 揭示云南高温天气的形成机制。在此基础上, 通过与历史极端个例比较, 探讨在全球变暖背景下 2019 年 4~6 月发生在云南的持续性极端高温的可能原因。

2 资料和方法

本文的资料有中国气象局国家气象信息中心提供的 2474 站逐日气温观测资料, 该数据在发布前已经过严格的质量控制, 时间跨度为 1951~

2019 年。由于台站观测年缺失三天或更多连续天数的情况大多集中发生在 1960 年之前, 考虑到资料的连续性, 本文分析时段选取为 1961~2019 年。大气环流要素和到达地面的向下的总的太阳辐射通量取自日本气象厅 JRA-55 的每日 4 次再分析资料 (Kobayashi et al., 2015; Harada et al., 2016)。此外, 本文的资料还包括美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 发布的 ERSST_v5 海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 逐月资料 (Huang et al., 2017), 以及北极涛动 (AO) 监测指数 (<https://www.cpc>).

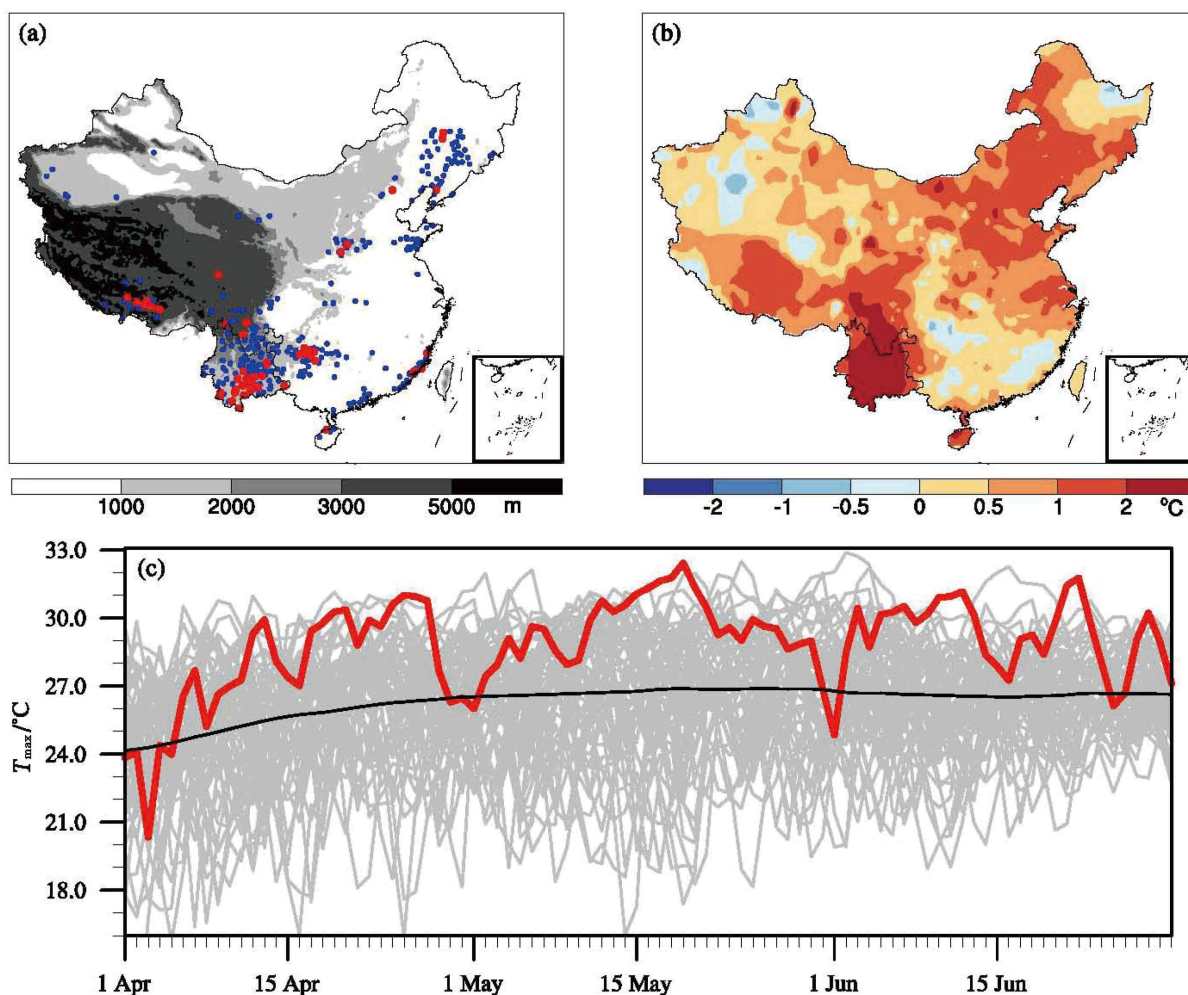


图1 (a) 2019 年 4~6 月全国极端高温事件站点分布, 红点表示日最高气温超历史极值, 蓝点表示日最高气温达极端阈值 (参考期日最高气温的 95% 分位数), 填色为海拔高度 (单位: m)。 (b) 2019 年 4~6 月平均日最高气温异常分布 (单位: °C)。 (c) 4 月 1 日至 6 月 30 日云南省平均日最高气温逐日演变序列, 红线表示 2019 年, 灰线代表 1961~2018 年逐年时间序列变化, 黑线代表气候平均时间序列演变。

Fig. 1 (a) Stations with a daily maximum surface air temperature (SAT) from April to June 2019 that broke historical records (red dots) and exceeded the threshold of extreme temperature (blue dots) over China. The threshold of extreme temperature is defined as the 95th percentile of the daily maximum SATs for the base period. Shadings indicate altitude (units: m). (b) April-June mean daily maximum SAT anomalies (units: °C) for 2019. (c) Daily maximum SAT averaged for Yunnan from April 1 to June 30. The red curve corresponds to 2019, gray curves show results for 1961-2018, and black curve is the daily climatology

ncep.noaa.gov)。

虽然云南地处云贵高原的低纬度地区,但是特殊的地理位置和海拔高度落差导致该地区发生高温的地理分布差异十分明显。例如,高海拔台站观测的日最高气温历史记录均低于 30°C,但是在低海拔台站观测的日最高气温达高温标准(达到或超过 35°C),甚至出现 40°C 以上的高温。历史日最高气温低于 35°C 的台站占台站总数的 51%,而历史日最高气温大于 35°C 的台站占总台站数为 49%。在 1961~2019 年期间,云南大部分高海拔地区未出现过高温天气(图 2a),高温事件主要集中在较低海拔地区。37% 的台站的平均高温日数低于 7 天,只有 12% 的台站平均高温日数高于 7 天

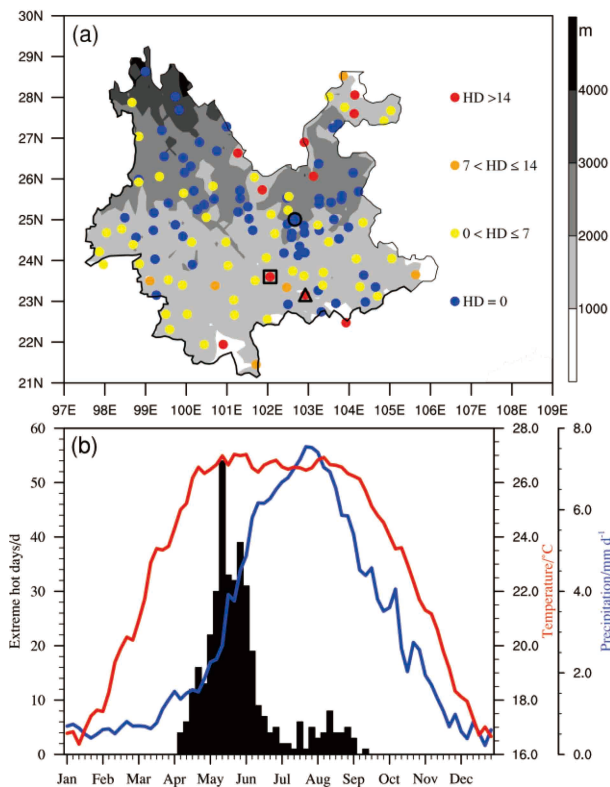


图2 (a) 云南省 1961~2019 年平均的高温发生天数分布(彩色实心点,单位: d a^{-1}), 填色为海拔高度(单位: m), 黑色圆圈、正方形、三角形分别代表昆明、元江和元阳站。(b) 云南省 1961~2019 年区域性总极端高温日数的逐候分布。红线和蓝线分别代表全省日最高气温和降水的气候平均的逐候分布

Fig. 2 (a) Mean frequency of hot days (color dots; units: d a^{-1}) over Yunnan during 1961–2019. Shadings indicate altitude (units: m), the black circle, square, and triangle denote the Kunming, Yuanjiang, and Yuanyang stations, respectively. (b) Pentad frequency of accumulated occurrence of regionally extreme hot days during 1961–2019 in Yunnan. Red and blue lines indicate the pentad climatology of daily maximum SAT and precipitation averaged in Yunnan

(图 2a)。由于元江地处低纬度和低海拔地区,该站观测的平均高温日数高达 90 天。

鉴于云南省高温地理分布的特殊性,并结合云南省气象台高温灾害性天气预警发布标准(云南省气象局, 2017),我们将云南至少 8% 的台站的日最高气温达到 35°C 或超过 35°C 的天数定义为区域性极端高温日,其中 35°C 是中国气象局定义高温日的标准。连续或只有 1 天间断的区域性极端高温日定义为一次区域性极端高温事件。根据定义,云南区域性极端高温日主要出现在 4~6 月份,该时段恰好是干季向湿季转换的时期(图 2b),在雨季开始后,区域性极端高温日减少。统计结果显示,在 1961~2019 年 4~6 月期间,云南共有 345 个区域性极端高温日,占总天数(59 年×91 天)的 6.4%,共发生了 108 次区域性极端高温事件。其中,2019 年云南出现了 39 个区域性极端高温日和 7 次区域性极端高温事件,均突破了历史同期记录。为了避免前一次极端高温事件对后一次极端高温事件的影响,我们挑选出上一次极端高温事件的最后一天与下一次极端高温事件的第一天之间的间隔时间超过 7 天的 81 个事件(包括 2019 年的 4 个事件),分析前期大气环流的异常信号。

本文的逐日观测异常值定义为相对于 1961~2018 年多年逐日平均气候值的偏差。为尽可能消除 2~3 周以内天气波动对气候平均值的影响(龚道溢等, 2004),在计算多年气候平均参考值时,某一天的气候平均值是由该天和其前后各 10 天(58 年×21 天)的原始数据获得。本文采用合成方法分析云南区域性极端高温日和前期的环流异常,并用 Student-*t* 统计检验方法检验异常的显著性。

在对波活动通量(WAF)和 Rossby 波能量的传播的分析中,本文采用的是 Takaya and Nakamura (2001)提出的计算方案,等压面上的波活动通量的表达式为

$$W = \frac{p_0}{2|\bar{V}|} \left[\bar{u}(\psi'^2_x - \psi'\psi'_{xx}) + \bar{v}(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) \right. \\ \left. + \bar{u}(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) + \bar{v}(\psi'^2_y - \psi'\psi'_{yy}) \right], \quad (1)$$

其中, p_0 为等压面标准气压与 1000 hPa 的比值, $|\bar{V}|$ 为基本气流水平风速, $\bar{u}$ 为其纬向风分量, $\bar{v}$ 为其经向风分量, ψ' 为准地转扰动流函数。由于文中分析的区域性极端高温事件主要集中在 4~6 月,

因此基本气流定义为 4~6 月的气候平均值。

为了检查人类活动导致的增暖对云南北端高温事件的贡献,我们从长期气候变化趋势的角度,将观测中云南省 4~6 月平均地表气温的变化特征与 CESM-LE 计划 [Community Earth System Model Large Ensemble (CESM-LE) projection] 历史气候模拟试验和工业革命前控制试验的模拟结果进行了比较。CESM-LE 计划模拟旨在研究存在内部变率的情况下的气候变化 (Kay et al., 2015)。CESM-LE 计划提供了 40 个集成员在 1920~2100 年的气候模拟; 40 个成员基于同一个模式和相同的外强迫,其中 1920~2005 年的历史气候模拟试验由历史自然强迫因子(太阳辐射和火山气溶胶)和人为强迫因子(主要包括温室气体、人为气溶胶、臭氧和陆地利用)共同驱动的,2006~2100 年的 RCP8.5 试验由未来预估的增加的温室气体驱动;各集成员的差别只在于大气初始态的差异 (Kay et al., 2015)。我们同时还将 CESM-LE 计划提供的 1800 年工业革命前控制试验 (PIC) 的结果用来表示无任何人类活动影响的变率。关于 CESM-LE 计划试验设计和模拟输出的详细介绍,请见 [http://www.cesm.ucar.edu/projects/community-projects/LENS/\[2019-10-14\]](http://www.cesm.ucar.edu/projects/community-projects/LENS/[2019-10-14])。

根据目前极端事件归因研究普遍采用的方法 (Christidis et al., 2013; Li et al., 2017), 为了分析人类活动导致的全球变暖对类似 2019 年 4~6 月云南北端暖事件的影响,我们计算了云南北端暖事件在有无人类活动影响下的发生概率和可归因风险比例 (FAR)。FAR 的表达式如下:

$$FAR = 1 - (P_{PIC}/P_{All}) \quad (2)$$

其中, P_{All} 是类似 2019 年 4~6 月云南北端暖事件在历史强迫模拟下的发生概率, P_{PIC} 则是 PIC 模拟下的发生概率。可归因风险比例 FAR 可以用来衡量在人类活动导致的全球增暖下,极端暖事件概率增加多少。用 bootstrap 重采样方法(重采样 1000 次)估算 P 和 FAR 的不确定性,同时用中位数来近似表示 P 和 FAR 的最佳估计值。

3 云南区域性极端高温日的地表气温和环流异常特征

3.1 温度异常空间分布

图 3 表示的是 1961~2018 年和 2019 年 4~6

月期间,云南发生的 306 个和 39 个区域性极端高温日相应的我国日平均气温异常合成的空间分布。如图所示,在 1961~2018 年,当云南发生区域性极端高温天气时,我国西南大部分地区气温偏高,其中云南的平均气温高于 3°C。与此同时,我国的新疆地区却出现了异常偏冷现象,日平均异常气温低于 -1°C,中心位于新疆的阿尔泰山地区 (图 3a)。JRA-55 再分析的地表温度不仅合理地刻画出了云南区域性极端高温期间日平均气温异常的强度,同时较好地揭示了我国西北和西南地区之间的日平均气温异常的偶极子分布 (图 3c)。2019 年云南区域性极端高温期间,云南地区的日平均气温异常较往年偏强且华北和印度地区也出现了明显偏暖 (图 3b, d)。

3.2 大气环流异常

图 4 左列表示的是 1961~2018 年 4~6 月 306 个云南区域性极端高温日对应的大气环流异常的合成结果。如图所示,当云南发生极端高温天气时,在流层中、高层,云南地区盛行异常反气旋,但在垂直结构上表现出明显的差异。其中,对流层高层的反气旋异常中心位于云南的东北侧 (图 4a),对流层中层的反气旋异常强度较高层偏弱,异常中心南移至云南上空 (图 4c),而对流层底层则表现为显著的气旋性异常,呈现显著的低压异常 (图 4e)。欧亚上空的大气环流异常呈现出明显的波列结构,显著的反气旋和气旋异常依次出现在欧洲和中亚地区,且欧洲上空的反气旋异常和西西伯利亚平原上空的气旋异常表现出明显的正压结构。在异常反气旋的控制下,云南上空出现显著的大气下沉运动 (图 5a, c)。该下沉运动会使大气绝热增温。此外,异常反气旋会使云量减少,从而造成入射到地表的太阳短波辐射增加 (图 6a),有利于地表气温升高。异常反气旋导致云南气温出现剧烈的增暖 (图 3),而剧烈的增暖地区的空气受热上升,使地表气压的下降 (图 4e)。

大气中的水汽含量通过吸收和反射太阳短波辐射,从而改变到达地面太阳短波辐射的强度和调节地表温度的高低,当水汽含量高时会吸收短波辐射不利于日间高温的升高 (Dai et al., 1999)。为此,我们计算了整层大气垂直积分水汽通量和水汽含量,并给出了在区域性极端高温日的异常的合成结果 (图 7)。多年平均而言,云南 4~6 月期间水汽主要源自孟加拉湾的西南水汽,其次有一部分来自

南海上空的水汽输送(图 7a)。当区域性极端高温日发生时, 对应对流层低层控制云南至菲律宾海地区的显著的气旋性环流异常, 孟加拉湾地区出现显著的东北风异常, 南海地区出现显著的西风异常(图 4c)。因此, 从孟加拉湾和南海进入云南的水汽减少(图 7b), 云南上空的水汽含量显著偏少(图 7b), 空气变得十分干燥。云南上空水汽含量的显著减少, 使入射到地表的太阳辐射增加(图 6a), 进而促进地表的增温, 利于高温的发生。

如前所述, 云南区域性极端高温天气主要受到局地对流层异常反气旋性环流的影响。为揭示该反

气旋异常发生的前期环流信号, 本文基于 81 个云南区域性极端高温事件, 分别计算了 2 天平均的超前 7 天的 200 hPa 位势高度异常和大气波作用通量演变(图 8)。在云南发生极端高温天气之前的 6~7 天, 200 hPa 位势高度场在北非西海岸的北大西洋上空表现出显著的正异常, 同时在黑海地区上空存在另一个显著的位势高度正异常, 但强度偏弱。在高纬度至极地上空, 位势高度场分别在格陵兰岛东岸的北大西洋上空和新地岛上空表现为显著的负异常和正异常特征。在极端高温发生之前的 4~5 天, 北非西海岸的位势高度正异常东移并减

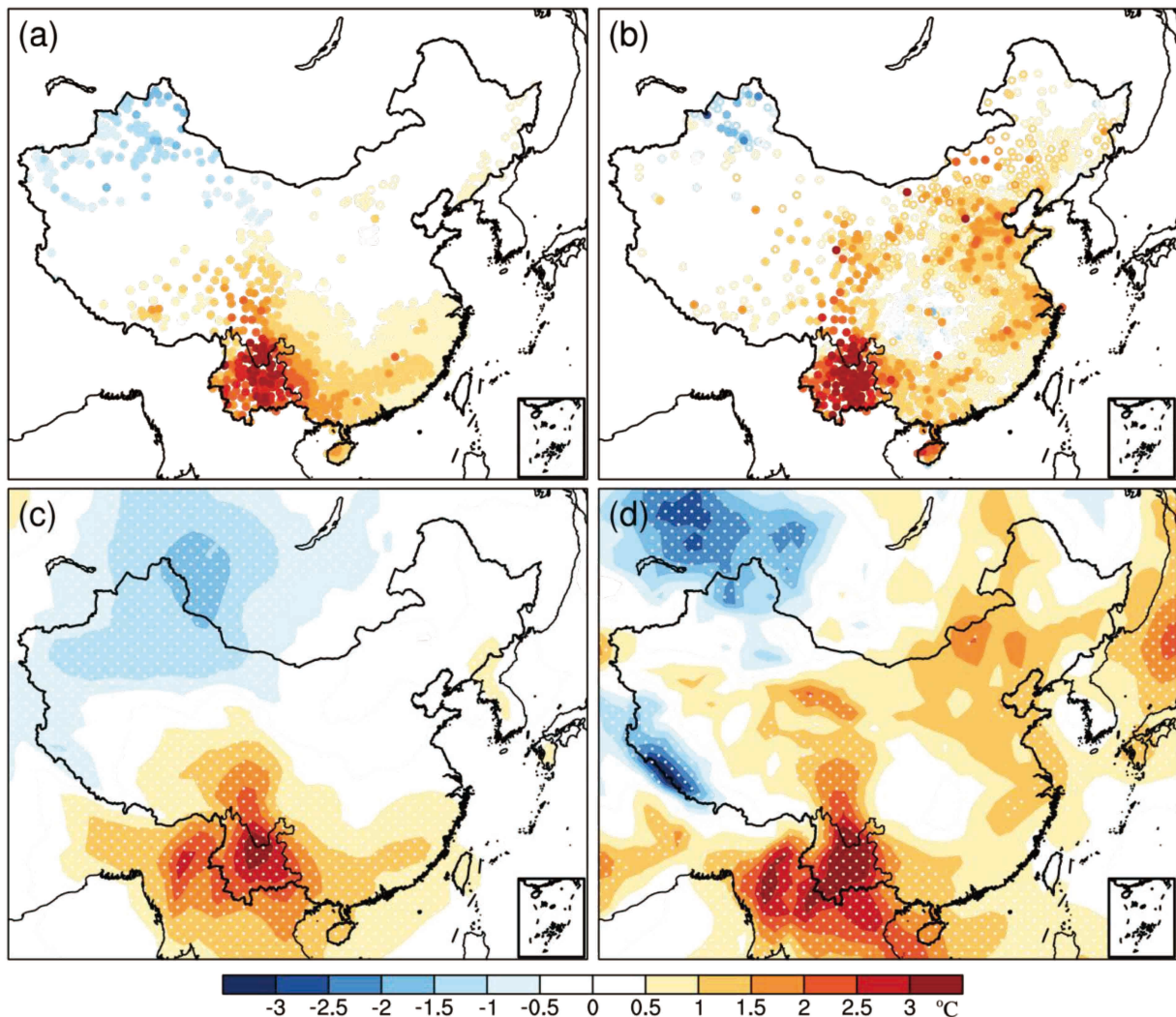


图3 (a, b) 台站和 (c, d) JRA-55 再分析资料中, 云南区域性极端高温日对应的日平均气温异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)。 (a, c) 为 1961~2018 年 4~6 月 306 个极端高温日的异常的合成结果, (b, d) 为 2019 年 4~6 月 39 个极端高温日的异常的合成结果。(a, b) 中的实心圆和 (c, d) 中的白色打点表示通过 0.01 显著性水平检验

Fig. 3 Anomalies of daily mean SAT (units: $^{\circ}\text{C}$) for regionally extreme hot days in Yunnan derived from (a, b) stations and (c, d) JRA55 reanalysis data. (a, c) Composite anomalies for 306 regionally extreme hot days from April to June during 1961–2018; (b, d) composite anomalies for 39 regionally extreme hot days from April to June 2019. Solid circles in (a, b) and white dots in (c, d) indicate significance at the 0.01 level

弱, 而下游黑海上空的位势高度增强, 北非大陆和伊朗高原出现位势高度的显著负异常; 与此同时, 格陵兰岛东海岸的位势高度负异常减弱并东移至挪威海, 极地上空的位势高度正异常增强向南扩张至欧洲上空, 西西伯利亚平原上空出现位势高度的显著负异常, 由此形成了分别沿 60°N 和沿 40°N 向

东传播的两支波列。在极端高温发生的 2~3 天之前, 随着下游波列的进一步发展以及高纬度波列与中纬度波列在青藏高原东侧的汇合, 云南上空的位势高度显著增强, 并延续到极端高温发生的当日。当云南北端极端高温天气发生时, 上游来自极地的位势高度场正异常开始明显减弱。通过对环流异常演变

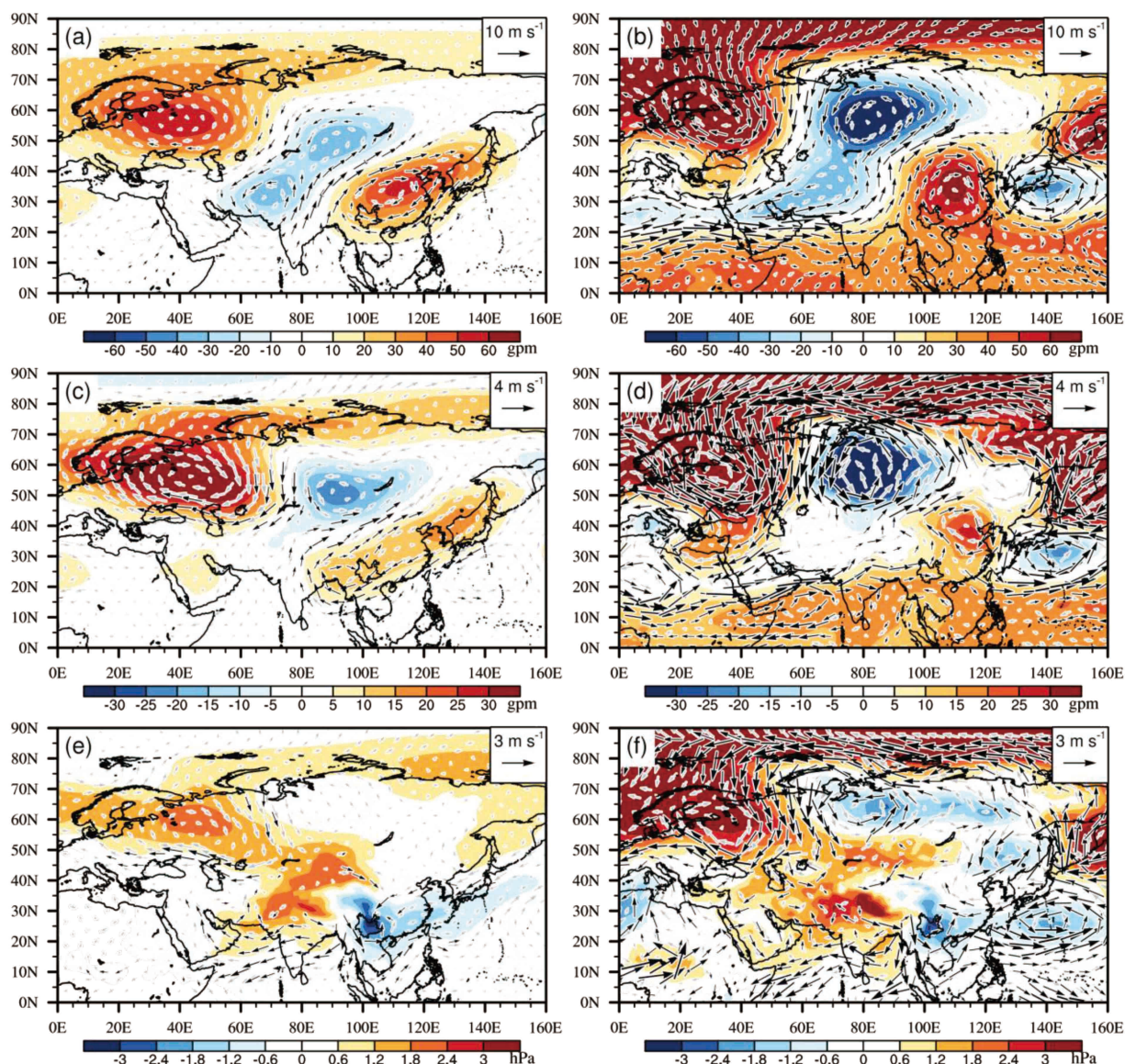


图4 云南区域性极端高温日大气环流配置特征: (a, c, e) 1961~2018 年 4~6 月 306 个极端高温日的异常的合成结果; (b, d, f) 2019 年 4~6 月 39 个极端高温日的异常的合成结果。(a, b) 200 hPa 位势高度 (填色, 单位: gpm)、水平风 (矢量, 单位: m s^{-1}); (c, d) 500 hPa 位势高度 (填色, 单位: gpm)、水平风 (矢量, 单位: m s^{-1}); (e, f) 海平面气压场 (填色, 单位: hPa)、850 hPa 水平风 (矢量, 单位: m s^{-1})。黑色矢量表示经向风或者纬向风异常通过 0.01 显著性水平检验

Fig. 4 Atmospheric circulation structure for regionally extreme hot days in Yunnan: (a, c, e) Composite anomalies for 306 regionally extreme hot days from April to June 1961–2018; (b, d, f) composite anomalies for 39 regionally extreme hot days from April to June 2019. (a, b) 200-hPa geopotential height (shading, units: gpm) and horizontal wind (vector, units: m s^{-1}); (c, d) 500-hPa geopotential height (shading, units: gpm) and horizontal wind (vector, units: m s^{-1}); (e, f) sea level pressure (shading, units: hPa) and 850-hPa horizontal wind (vector, units: m s^{-1}). Vectors are shown in black when significant at the 0.01 level in at least one direction

的合成结果分析,我们可以认为云南的极端高温天气是其上空异常反气旋增强的结果,而该异常反气旋主要来自北大西洋上空沿 40°N 向东传播的罗斯贝波。在这个过程中,与自北大西洋上空沿 60°N 向东传播的罗斯贝波在青藏高原东侧的汇合,加剧了云南上空异常反气旋的强度。

4 2019 年极端高温持续性成因

4.1 环流和水汽异常

2019 年 4~6 月,云南省发生了持续性极端高温天气,全省平均的高温日数(高于 35°C)为

6.8 天,区域性极端高温日数为 39 天,全省平均日最高气温为 28.8°C ,均突破了自 1961 年以来的历史同期最高记录。一个很重要的问题是,为什么这一年的极端高温持续时间如此之长,强度如此之强?为了回答这一问题,我们首先比较了 2019 年 4~6 月 39 个云南区域性极端高温日的环流异常与往年云南极端高温日环流异常普遍特征之间的异同。2019 年极端高温日发生时,云南地区对流层中、高层受显著异常反气旋控制,地表出现显著低压异常,同时欧洲和西西伯利亚平原上空分别出现正压的异常反气旋和异常气旋(图 4b, d, f); 受局地异常

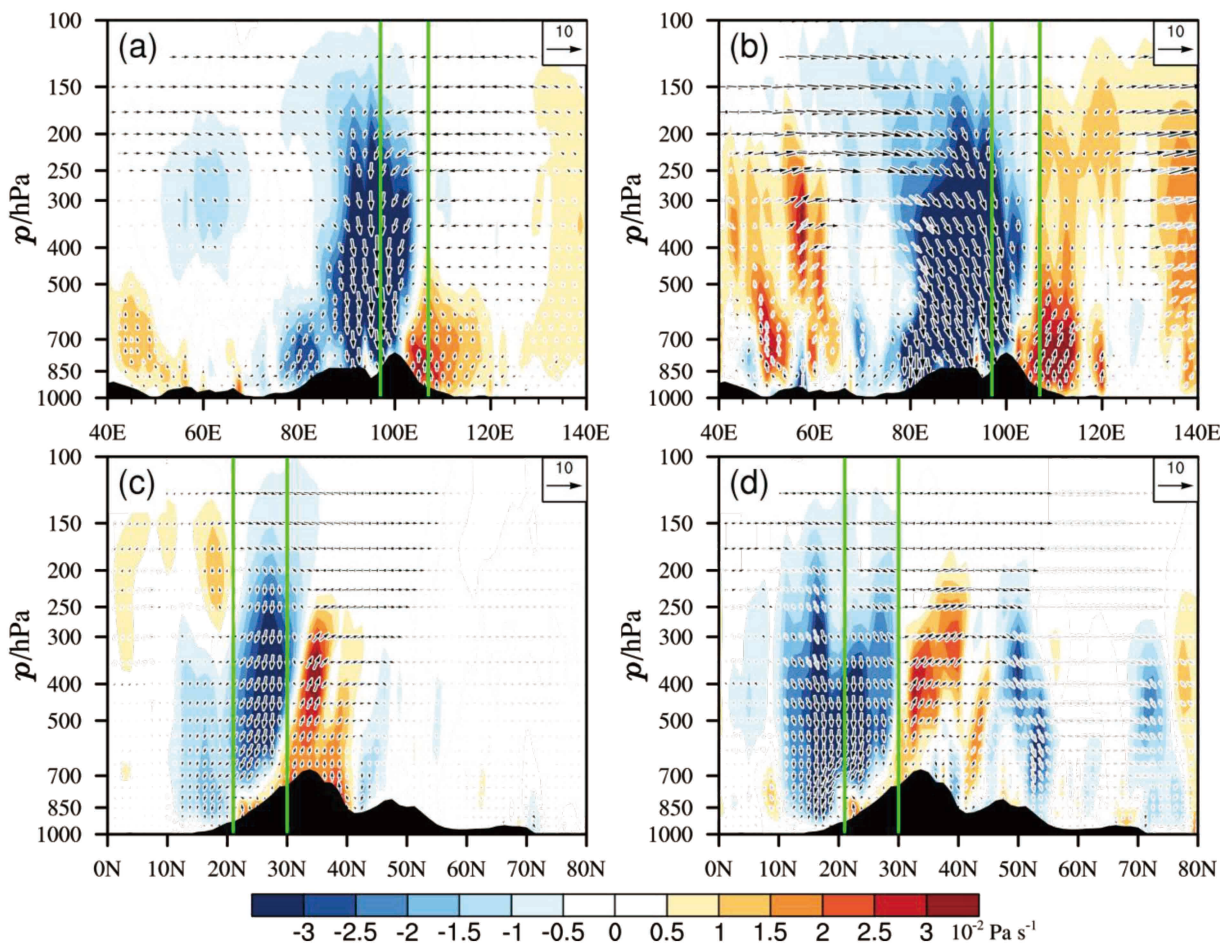


图 5 云南区域性极端高温日异常风场的垂直剖面图: (a, c) 1961~2018 年 4~6 月 306 个极端高温日的异常的合成结果; (b, d) 2019 年 4~6 月 39 个极端高温日的异常的合成结果。(a, b) $21^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 平均纬向风和垂直运动的合成结果; (c, d) $97^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 平均经向风和垂直运动的合成结果。填色代表垂直运动(单位: 10^{-2}Pa s^{-1}), 黑色矢量代表垂直速度或者水平速度异常通过 0.01 显著性水平检验, 绿线代表云南所处的经纬度范围

Fig. 5 Vertical cross-section of anomalous winds for regionally extreme hot days in Yunnan: (a, c) Composite anomalies for 306 regionally extreme hot days from April to June 1961–2018; (b, d) composite anomalies for 39 regionally extreme hot days from April to June 2019. (a, b) Composite anomalies of zonal wind and vertical velocity averaged along $21^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$. (c, d) Composite anomalies of meridional wind and vertical velocity averaged along $97^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$. Shaded area is vertical velocity (units: 10^{-2}Pa s^{-1}), vectors are shown in black when significant at the 0.01 level in at least one direction, green lines in (a–d) indicate the latitude and longitude of Yunnan

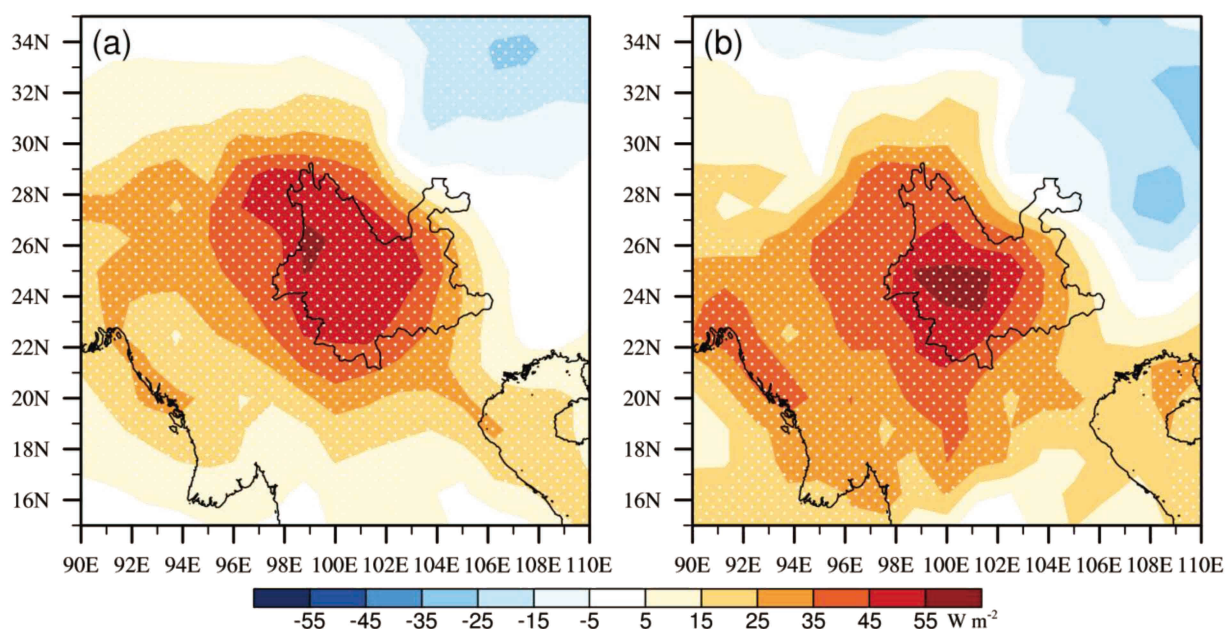


图6 (a) 1961~2018 年 4~6 月 306 和 (b) 2019 年 4~6 月 39 个云南区域性极端高温日到达地面的总的向下太阳辐射通量 (单位: W m^{-2}) 的合成结果。白色打点表示异常通过 0.01 显著性水平检验

Fig. 6 Composite anomalies (units: W m^{-2}) of the downward solar radiation flux reaching the Earth's surface (a) for 306 regionally extreme hot days from April to June during 1961–2018 and (b) for 39 regionally extreme hot days from April to June 2019. Shading is stippled with white dots when significant at the 0.01 level

反气旋影响, 云南地区盛行异常下沉运动 (图 5b, d)。与历史同期高温事件的合成结果相比, 虽然 2019 年与历史个例合成的环流特征高度相似, 但云南对流层的反气旋较之往年异常偏强, 欧洲和西西伯利亚上空波列节点的异常反气旋和异常气旋的强度均较之往年结果偏强 (图 4b, d, f)。受到极端异常反气旋的影响, 2019 年云南上空的异常的垂直下沉运动明显偏强 (图 5b, d)。其中, 2019 年的区域性极端高温日对应的水汽通量异常表现出历史相似的特征, 表现为孟加拉湾地区出现较之往年更加显著的北风水汽通量异常 (图 7c)。除此之外, 在西北太平洋对流层有显著的气旋性环流异常, 加强了南海北部对流层的西风异常。因此, 无论是来自南海和西太平洋, 以及印度洋的水汽输送均表现出对云南的不利影响。

4.2 极端高温的持续性

为了回答 2019 年 4~6 月云南受极端高温持续影响的原因, 我们给出了 4~6 月北半球 200 hPa 和 500 hPa 位势高度场的百分位数空间分布, 以及同期海表温度和 850 hPa 风场的异常空间分布 (图 9)。如图所示, 200 hPa 和 500 hPa 位势高度在极地上空出现历史同期以来的最高值 (超过历年的 100%

的百分位数), 北极上空被深厚的位势高度的正异常 (高于历年的 50% 分位数) 控制, 且呈现出相当正压的结构, 其中东半球极地上空较强的位势高度正异常向南伸至东欧平原, 中高纬度上空的位势高度较之往年明显偏弱 (低于历年的 50% 分位数), 且位势高度异常的分布有较好的纬向一致性。整个热带上空出现位势高度的正异常 (图 9a, b), 西北太平洋出现反气旋性环流异常 (图 9c), 西太平洋副热带高压偏强偏西 (图 9b)。自 4 月中旬以来, 位于云南上空 200 hPa 逐日位势高度场异常表现出持续性正异常特征, 并在 5 月初达到了峰值 (图 9d), 提前云南极端高温发生的时间峰值大概 10 天左右 (图 1c)。因此, 影响云南极端高温的异常反气旋的时间持续性是导致极端高温持续性的直接成因。

2019 年 4~6 月区域性极端高温的频发, 使 4~6 月平均温度出现了自 1961 年以来的历史最高 (图 10)。为了揭示人为导致的全球变暖对该次云南极端暖事件的贡献, 我们从长期气候变化的角度, 将观测中云南 4~6 月平均地表气温的变化特征与 CESM-LE 计划的历史气候模拟试验和工业革命前控制试验的模拟结果进行了比较。由于 CESM-

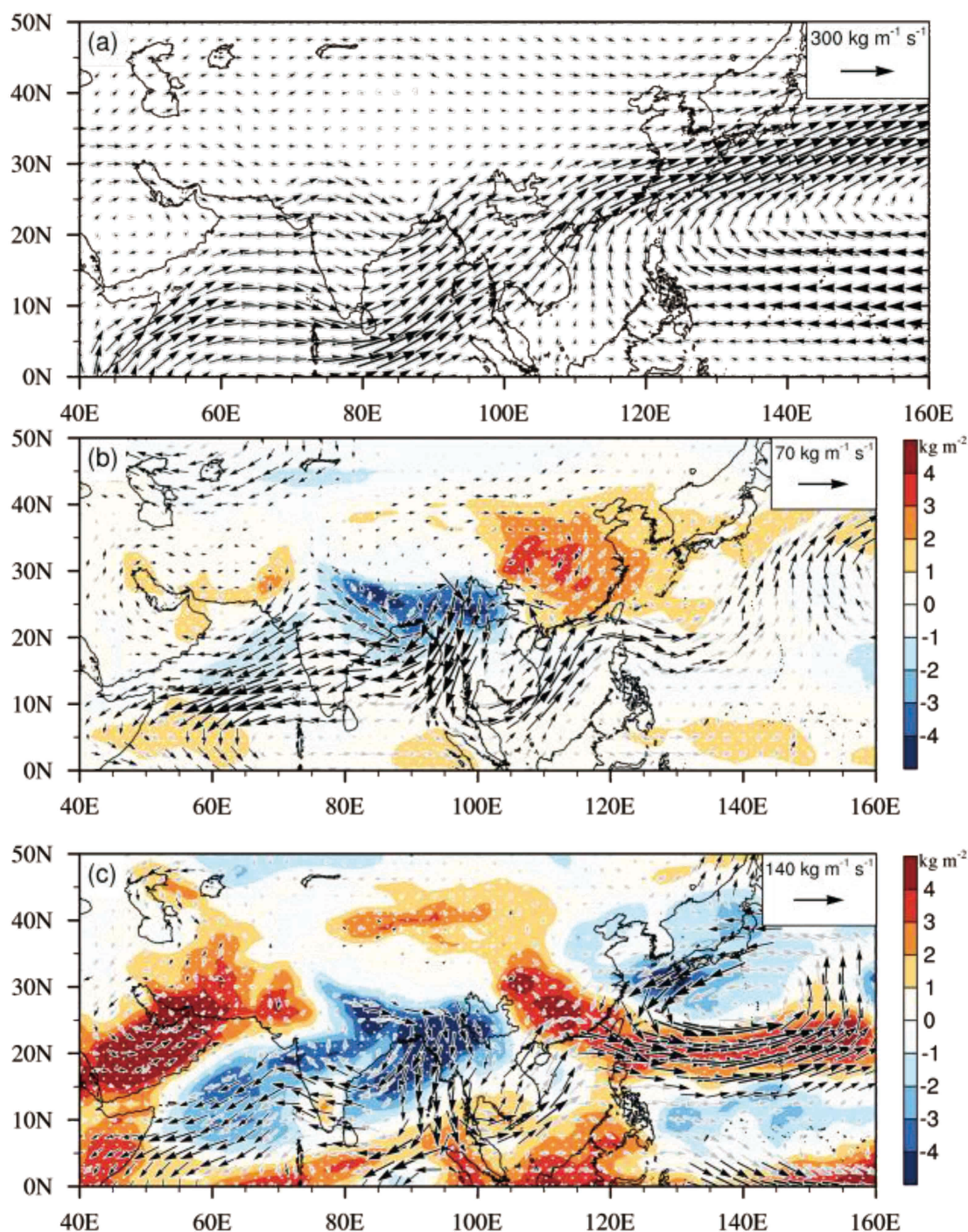


图 7 1961~2018 年 4~6 月 (a) 气候平均的垂直积分水汽通量分布, (b) 306 个云南区域性极端高温日垂直积分水汽通量 (矢量) 和水汽含量 (填色) 异常的合成结果, (c) 2019 年 4~6 月 39 个云南区域性极端高温日垂直积分水汽通量和水汽异常的合成结果。图中垂直积分水汽通量和水汽行两的单位分别为 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 和 kg m^{-2} 。(b) 和 (c) 中的白色打点表示水汽异常通过 0.01 显著性水平检验; 黑色矢量代表纬向或经向水汽通量异常通过 0.01 显著性水平检验

Fig. 7 (a) April–June climatological distribution of the vertical integration of moisture flux during 1961–2018. (b) Composite anomalies of the vertical integration of moisture flux and moisture content for 306 regionally extreme hot days from April to June during 1961–2018 period. (c) Composite anomalies of the vertical integration of moisture flux and moisture content for 39 regionally extreme hot days from April to June 2019. Units of the vertical integration of atmospheric column moisture flux (vector) and moisture (shading) are $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ and kg m^{-2} , respectively. In (b) and (c), shading is stippled with white dots when significant at the 0.01 level and vectors are shown in black when significant at the 0.01 level in at least one direction

LE 历史气候模拟试验的时间覆盖范围为 1920~2005 年, 为了将时间序列延长到 2019 年, 所以, 2006 年之后的模拟数据, 我们使用的是 RCP8.5 情景下的预估结果。图 10 给出了云南 4~6 月平均气温距平的时间序列。观测和 CESM-LE 集合平均中, 2019 年云南 4~6 月平均地表气温均是自 1961 年以来的最高。在 20 世纪 90 年代之前, 云

南 4~6 月平均地表气温无均明显变化, 但在 90 年代之后, 地表气温呈现出缓慢的上升趋势, 2019 年出现显著的暖异常。在 1961~2019 年 4~6 月, 云南地表气温在观测和 CESM-LE 集合平均模拟结果中分别呈现出 $1.08^{\circ}\text{C}/60\text{a}$ 和 $0.82^{\circ}\text{C}/60\text{a}$ 的增加趋势, 且均通过了 0.01 的显著性水平, 这表明云南地区的增暖在一定程度上可能是由人为强迫引起的。

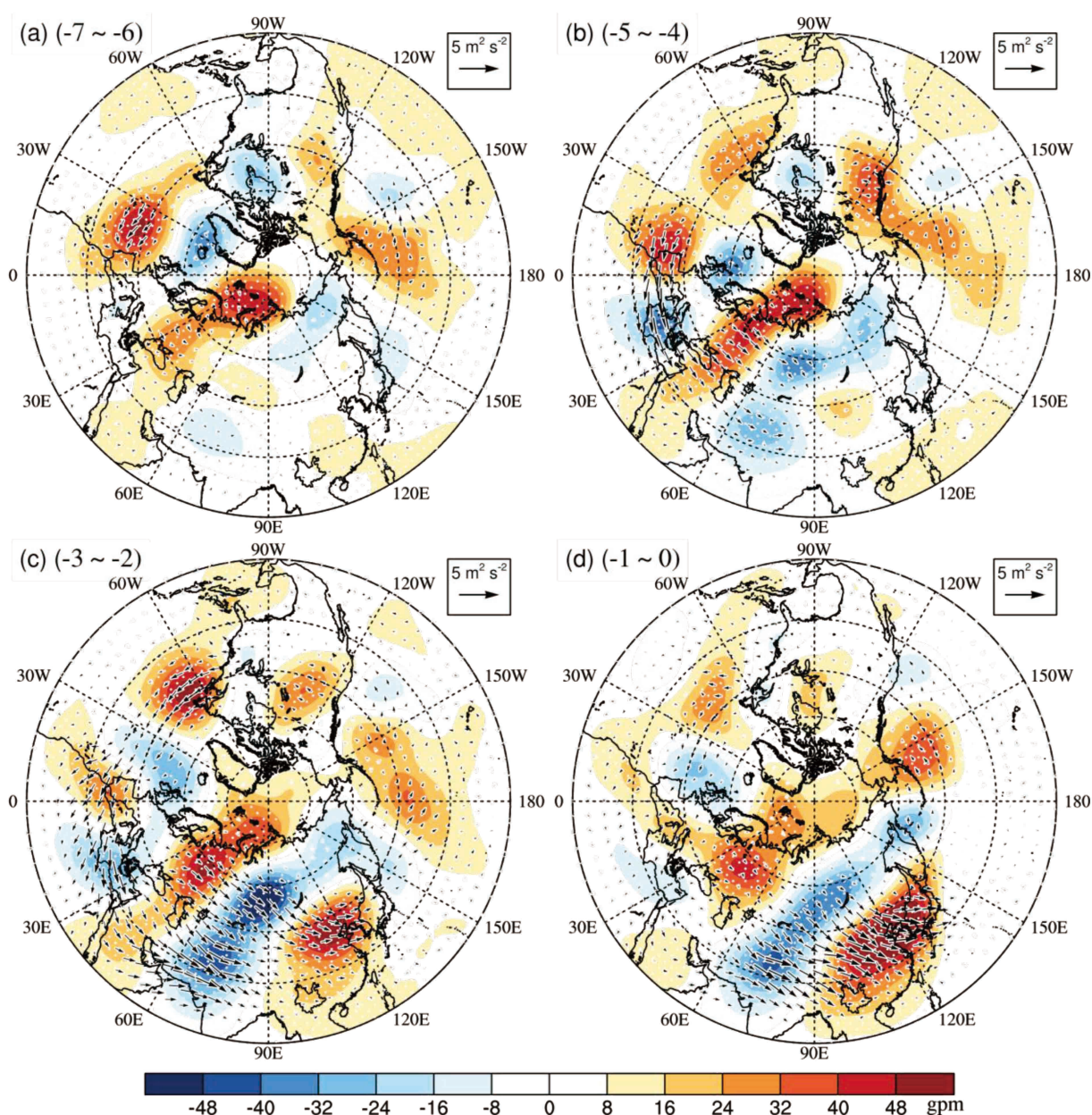


图 8 1961~2019 年 4~6 月云南区域性极端高温日前期 200 hPa 位势高度异常 (填色, 单位: gpm) 和相应的波活动作用通量 (单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$): (a) -7~-6 天; (b) -5~-4 天; (c) -3~-2 天; (d) -1~0 天。白色打点代表通过 0.01 显著性水平, 矢量为相应的波活动作用通量

Fig. 8 200-hPa geopotential height anomalies (shading, units: gpm) and the associated wave activity flux (vectors, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) on lag days from (a) -7 to -6 d, (b) -5 to -4 d, (c) -3 to -2 d, and (d) -1 to 0 d of regionally extreme hot day from April to June during 1961–2019 period. Shading is stippled with white dots when significant at the 0.01 level

外强迫导致的增暖对 2019 年 4~6 月云南的极端暖异常是否有贡献? 观测中, 2019 年 4~6 月, 云南平均地表气温较之正常值偏高 1.57°C 。该观测到的暖异常在 40 个 CESM-LE 成员历史模拟的异常范围内, 但较之 2019 年集合平均结果偏高, 集合平均中 2019 年的暖异常为 0.59°C 。类似于目前

研究 (Knutson et al., 2013; Zhou et al., 2014), 用集合平均结果代表外强迫下的温度响应, 那么, 外强迫对 2019 年云南暖异常的贡献约为 37.51% (2019 年的集合平均异常为 0.59°C , 观测异常为 1.57°C), 内部变率对该暖异常也具有重要作用。相比较于工业革命前控制试验结果, 全强迫历史气

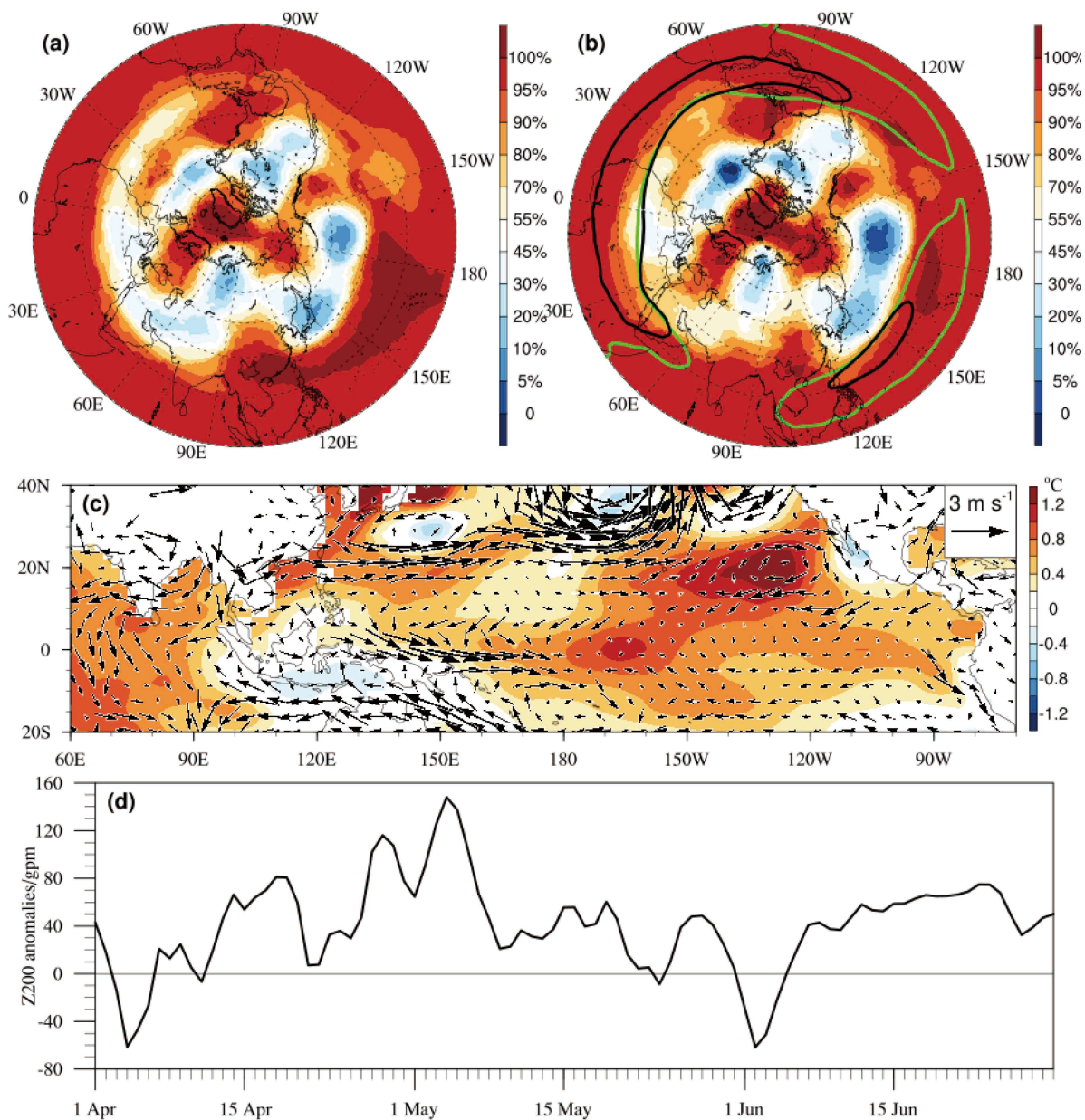


图9 2019年4~6月 (a) 200 hPa 和 (b) 500 hPa 位势高度的百分位数 (绿线和黑线分别为 2019 年和气候态 5870 gpm 等值线)。(c) 2019 年 4~6 月海表面温度 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 850 hPa 水平风 (矢量, 单位: m s^{-1}) 的异常。(d) 2019 年 4~6 月云南上空 ($21^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$) 200 hPa 位势高度异常的逐日演变 (单位: gpm)

Fig. 9 Percentile of (a) 200-hPa and (b) 500-hPa geopotential height during April–June 2019. Green and black lines in (b) are the 5870-gpm contour for 2019 and the climatological status, respectively. (c) April–June mean anomalies of sea surface temperature (SST) (shading, units: $^{\circ}\text{C}$) and 850-hPa horizontal wind (vector, units: m s^{-1}) in 2019. (d) Daily 200-hPa geopotential height anomalies (units: gpm) averaged for Yunnan ($21^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$) from April 1 to June 30

候模拟的云南 4~6 月平均地表气温的 PDF 分布向偏暖方向偏移, 同时离差更大 (图 10 中的内插图)。根据目前极端事件归因研究普遍采用的方法 (Christidis et al., 2013; Li et al., 2017), 我们计算了类似 2019 年 4~6 月极端暖事件在有无人活动影响下的发生概率和可归因风险比例 (FAR)。类似 2019 年 4~6 月云南高温事件或者更强高温事件在工业革命前控制试验中发生的概率为 0.56%, 而在历史全强迫试验中发生的概率为 1.27%, 该极端高温事件归因于外强迫的可归因风险度 FAR 约为 56.32%。这进一步说明自然内部变率对该事件的发生具有重要贡献。

已有研究指出, 全球变暖有利于云南区域高温和干旱事件的发生, 但高温干旱持续性事件往往与影响因子的年际变化存在密切的关联 (Chen and Zhou 2018)。其中, AO 和 ENSO 被认为是影

响西南高温干旱的两个重要的年际强迫因子 (Yang et al., 2012; 黄荣辉等, 2012; Wang et al., 2015)。黄荣辉等 (2012) 发现, 2009 年秋到 2010 年春季的西南地区的持续性严重干旱与 ENSO 和 AO 之间的时间位相配置密切相关。一方面, ENSO 发展暖位相导致热带西太平洋上空异常反气旋环流偏西, 西南地区为下沉气流所控制; 另一方面, 由于 AO 负位相, 东亚冬季冷空气活动强且路径偏东, 使得到达西南地区冷空气偏弱; 二者共同作用导致了 2009~2010 年的持续性高温干旱事件。

伴随全球的变暖, 云南 4~6 月份的平均日最高温度和高温日数均表现出增加的趋势, 两者表现出显著的正相关, 但极端高温日数却表现出间歇性波动特征 (图 11a)。AO 和 Nino3.4 海温指数表现出显著的年际变化特征, 但两者之间并不存在显著的统计关系。即使去掉云南平均日最高温度指数的线性趋势, AO 和 Nino3.4 指数与云南日最高温度变化之间依然不存在显著的线性统计关系。但是, 分析 1961~2019 年 4~6 月平均 AO 指数与 Nino3.4 指数之间的散点图 (图 11b), 我们发现云南历史上平均日最高温度距平大于 0.5 标准差的 18 个年份中, 有 14 个年份发生在 Nino3.4 指数的暖位相, 12 年发生在 AO 的负位相。其中有 9 年发生在 AO 的负位相和 Nino3.4 的暖位相中, 占总数的 50%。2019 年 4~6 月, AO 指数达到 1961 年以来历史同期第 2 低 (图 11a), 对应于 ENSO 的暖位相, Nino3.4 指数达到 1961 年以来历史同期第 4 高 (图 11a)。与往年的高温日环流异常相比, 2019 年极地出现强大的深厚位势高度正异常 (图 4), 呈现为 AO 负位相时的环流特征; 同时在热带上空出现显著的位势高度正异常, 呈现出 ENSO 暖位相时的大气环流响应特征。

如前所述, 云南区域性极端高温相关的其上空的反气旋异常与源自北大西洋经东欧平原和西西伯利亚平原沿 60°N 向东亚传播的高纬度罗斯贝和源自沿 40°N 向东亚传播的中纬度罗斯贝波密切相关。一方面, AO 负位相导致的东欧平原上空的深厚的位势高度正异常利于高纬度波列的加强, 从而加强了云南上空的反气旋异常; 另一方面, ENSO 暖位相导致的西太平洋副热带高压的偏西和偏强, 利于东亚上空反气旋异常的维持。因此, 在 AO 极端负位相和 ENSO 较强暖位相的综合作用下, 云南上空的反气旋异常出现了自 1961 年以来的历史同期

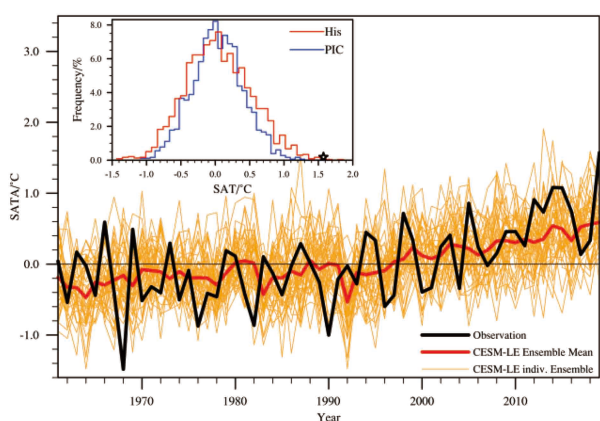


图 10 云南省 1961~2019 年 4~6 月平均地表气温异常 (单位: °C) 的时间序列。黑线为观测数据; 红线为 CESM-LE 集合成员平均模拟结果; 橙色为 CESM-LE 各个集合成员模拟结果。内插图表示云南省 4~6 月平均地表气温异常频率分布的直方图, 其中红线代表 CESM-LE 的 40 个集合成员在 1961~2019 年的历史模拟结果, 标记为 His, 蓝线代表工业革命前控制试验模拟结果, 标记为 PIC, 黑色五角星代表 2019 年的观测结果

Fig. 10 Time series of April–June mean SAT anomalies (SATA, units: °C) averaged over Yunnan during 1961–2019. The black line depicts the observed anomalies, red line depicts the ensemble mean anomalies of 40 ensembles of CESM-LE simulations, and orange lines are individual ensemble members of the CESM-LE simulations. Histograms of April–June mean SAT anomalies (units: °C) averaged over Yunnan are shown in the inset plot. The red curve indicates 40 ensembles of CESM-LE simulations for 1961–2019; denoted as “His”; blue curve, indicates preindustrial control simulations (denoted as “PIC”). The black star indicates the observed 2019 April–June mean SAT anomalies averaged over Yunnan.

最强 (图 9a, b)。由于该反气旋异常持续时间较长 (图 9d), 由此导致了云南持续性极端高温和干旱。

5 结论和讨论

5.1 结论

本文利用中国气象信息中心发布的逐日气温站

点资料、日本气象厅发布的 JRA-55 大气再分析资料和 CESM-LE 计划提供的气候模拟结果, 对 1961~2018 年 4~6 月的云南区域性极端高温日对应的环流异常特征进行分析, 并讨论了 2019 年同期破纪录极端持续性高温发生的可能原因。主要结论如下:

(1) 云南对流层上层显著的异常反气旋导致

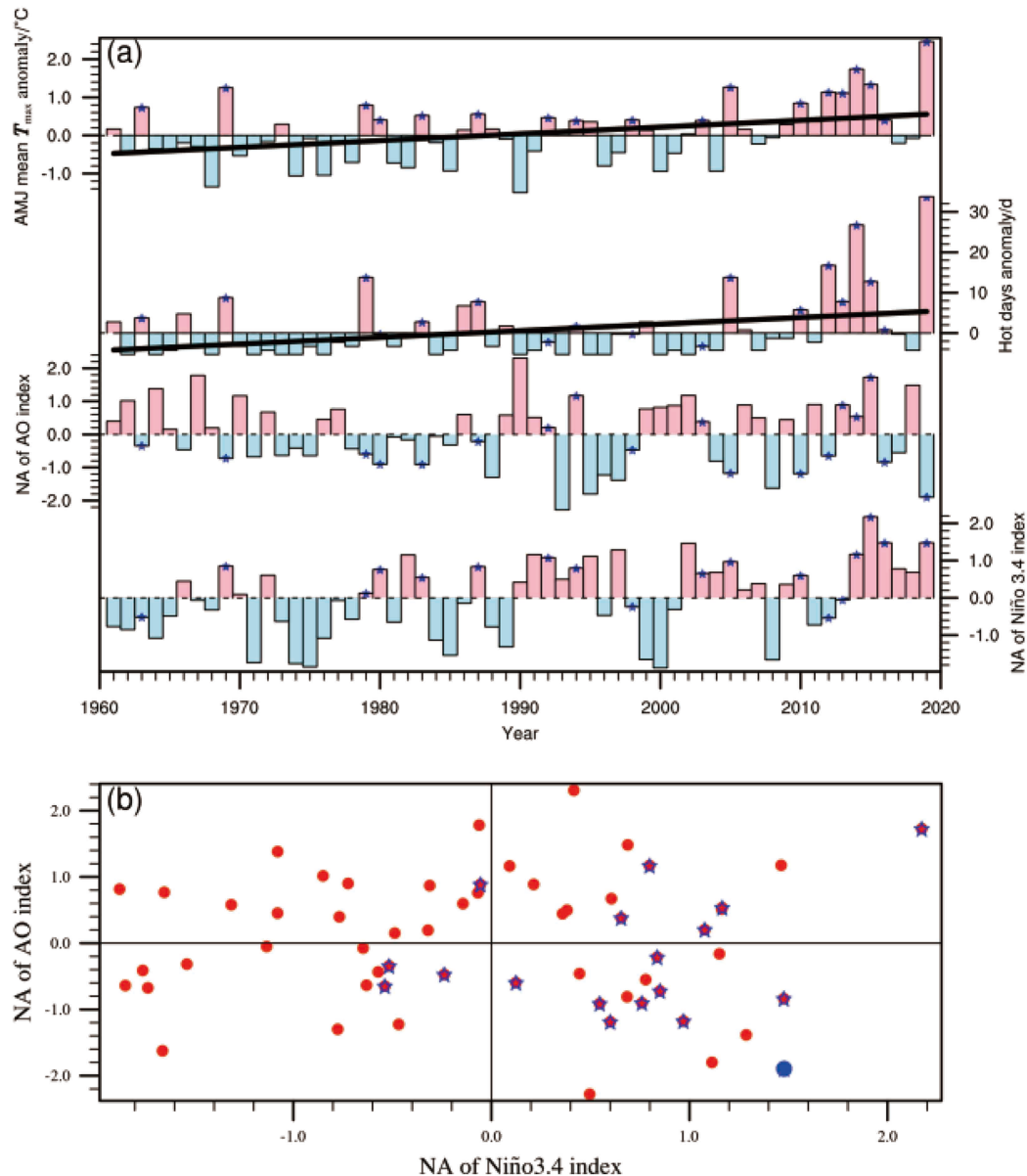


图 11 (a) 云南省 1961~2019 年 4~6 月平均日最高气温 (T_{max})、区域性极端高温日数异常序列和 AO、Niño3.4 指数的标准化异常序列, 黑线为 T_{max} 和高温日数的线性趋势。(b) 1961~2019 年 4~6 月 Niño3.4 指数与 AO 指数的标准化异常的散点图 (蓝点代表 2019 年)。蓝色☆代表 T_{max} 异常大于 0.5 个标准差的年份

Fig. 11 (a) Time series of anomalies of April-June mean daily maximum SAT (T_{max}) and hot days averaged over Yunnan, normalized anomalies AO index, and Niño 3.4 index. Black lines denote the linear trends of T_{max} and hot days. (b) Scatterplot of normalized anomalies of April-June mean Niño 3.4 index and AO index, blue dot indicates that for 2019. Blue stars in (a) and (b) indicate years with April-June mean daily maximum SAT values warmer than norm 0.5 standard deviation

大气下沉气流绝热增温、云量减少和入射地表太阳辐射增加, 是引发该区域极端高温天气的直接原因。该异常反气旋的形成主要源自北大西洋经东欧平原、西西伯利亚平原向东亚传播的高纬度罗斯贝波和经北非、黑海、伊朗高原向东亚传播的中纬度罗斯贝波之间的相互作用;

(2) 外强迫导致的增暖对 2019 年 4~6 月云南极端持续性高温事件具有显著作用, 同时自然内部变率的作用也很重要, 外强迫使类似 2019 年事件或者更强事件的发生概率更加了 56.32%。2019 年 4~6 月, 在 AO 极端负位相下, 东欧平原上空深厚的位势高度正异常增强了影响云南极端高温的高纬度罗斯贝波列, 同时 ENSO 暖位相下, 西北太平洋副热带高压的增强西伸, 利于东亚上空反气旋异常的维持, 进而使高温天气持续影响云南。

5.2 讨论

伴随全球的变暖, 虽然云南地区 4~6 月平均最高气温和极端高温日数表现出线性增加趋势, 但无法完全解释诸如 2019 年极端持续性高温干旱事件。尽管如此, 我们注意到当有利于极端高温的持续性大气环流异常, 例如 AO 的负位相和 ENSO 的暖位相共同发生时, 该地区的极端持续性高温事件呈现出非线性快速增长, 加剧了该区域极端高温干旱发生的几率。本文仅从统计角度讨论了云南极端高温天气与 AO 与 ENSO 位相配置之间的关系, 关于 AO 与 ENSO 位相之间的变化机理以及二者如何相互作用而造成云南极端高温的机制还需进一步深入研究。

参考文献 (References)

Chen X L, Zhou T J. 2018. Relative contributions of external SST forcing and internal atmospheric variability to July–August heat waves over the Yangtze River valley [J]. *Climate Dyn.*, 51(11–12): 4403–4419. doi:10.1007/s00382-017-3871-y

Christidis N, Stott P A, Scaife A A, et al. 2013. A new HadGEM3-A-based system for attribution of weather- and climate-related extreme events [J]. *J. Climate*, 26(9): 2756–2783. doi:10.1175/JCLI-D-12-00169.1

Dai A G, Trenberth K E, Karl T R. 1999. Effects of clouds, soil moisture, precipitation, and water vapor on diurnal temperature range [J]. *J. Climate*, 12(8): 2451–2473. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2451:EOCSMP>2.0.CO;2

龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 2004. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响 [J]. *科学通报*, 49(5): 487–492. Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2004. Arctic Oscillation influence on daily temperature

variance in winter over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 637–642. doi: 10.1360/03wd0481

韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 2014. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因 [J]. *地理学报*, 69(5): 632–639. Han L Y, Zhang Q, Yao Y B, et al. 2014. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 69(5): 632–639. doi:10.11821/dlxb201405006

Harada Y, Kamahori H, Kobayashi C, et al. 2016. The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability [J]. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, 94(3): 269–302. doi: 10.2151/jmsj.2016-015

Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and Intercomparisons [J]. *J. Climate*, 30(20): 8179–8205. doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1

黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. *大气科学*, 36(3): 443–457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(3): 443–457. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11101

IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge: Cambridge University Press. 29pp

解明恩, 程建刚, 范菠, 等. 2005. 2003 年云南夏季罕见高温干旱的诊断研究 [J]. *气象*, 31(7): 32–37. Xie M E, Cheng J G, Fan B, et al. 2005. Diagnosis of high temperature and drought event in summer 2003 in Yunnan [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31(7): 32–37. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2005.07.008

Kay J E, Deser C, Phillips A, et al. 2015. The community Earth System Model (CESM) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96(8): 1333–1349. doi:10.1175/BAMS-D-13-00255.1

Knutson T R, Zeng F R, Wittenberg A T. 2013. The extreme March–May 2012 warm anomaly over the eastern United States: Global context and multimodel trend analysis [in “Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective”] [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94(9): S13–S17.

Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, 93(1): 5–48. doi:10.2151/jmsj.2015-001

Li C X, Tian Q H, Yu R, et al. 2017. Attribution of extreme precipitation in the lower reaches of the Yangtze River during May 2016 [J]. *Environ. Res. Lett.*, 13(1): 014015. doi:10.1088/1748-9326/aa9691

Li Y H, Xu H M, Liu D. 2011. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 25(2): 176–187. doi:10.1007/s13351-011-0025-8

- Liu B Q, Zhu C W, Su J Z, et al. 2019. Record-breaking northward shift of the western North Pacific subtropical high in July 2018 [J]. *J Meteor Soc Japan Ser. II.*, 97(4): 913–925. doi:10.2151/jmsj.2019-047
- 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 2007. 2005 年初夏云南严重干旱的诊断分析 [J]. *热带气象学报*, 23(1): 35–40. Liu Y, Zhao E X, Huang W, et al. 2007. Diagnostic analysis of the severe drought over Yunnan area in the early summer of 2005 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 23(1): 35–40. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.01.006
- 吕俊梅, 据建华, 任菊章, 等. 2012. 热带大气 MJO 活动异常对 2009~2010 年云南极端干旱的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 42(4): 599–613. Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al. 2012. The influence of the Madden-Julian Oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009–2010 [J]. *Science China Earth Sciences*, 55(1): 98–112. doi: 10.1007/s11430-011-4348-1
- Ma S M, Zhou T J, Stone D A, et al. 2017a. Attribution of the July–August 2013 heat event in central and eastern China to anthropogenic greenhouse gas emissions [J]. *Environ. Res. Lett.*, 12(5): 054020. doi:10.1088/1748-9326/aa69d2
- Ma S M, Zhou T J, Angéilil O, et al. 2017b. Increased chances of drought in southeastern periphery of the Tibetan Plateau induced by anthropogenic warming [J]. *J. Climate*, 30(16): 6543–6560. doi:10.1175/JCLI-D-16-0636.1
- 毛政旦. 1977. 云南的“四季如春” [J]. *气象*, 3(2): 30–32. Mao Z D. 1977. Four spring-like seasons in Yunnan [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 3(2): 30–32. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1977.02.025
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(6): 608–627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2015. Drought in Southwest China: A review [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 8(6): 339–344.
- 谢应齐, 黄华秋, 赵华柱. 1994. 云南干旱灾害初步研究 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 16(S1): 69–73. Xie Y Q, Huang H Q, Zhao H Z. 1994. An analysis of drought in Yunnan [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 16(S1): 69–73.
- Xu K, Lu R Y, Kim B J, et al. 2019. Large-scale circulation anomalies associated with extreme heat in South Korea and Southern–Central Japan [J]. *J. Climate*, 32(10): 2747–2759. doi:10.1175/JCLI-D-18-0485.1
- 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. *气候与环境研究*, 17(3): 315–326. Yang H, Song J, Yan H M, et al. 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(3): 315–326. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10134
- Yang J, Gong D Y, Wang W S, et al. 2012. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 115(3–4): 173–184. doi:10.1007/s00703-011-0172-6
- 云南省气象局. 2017. 云南省气象预警信息分类发布指导意见 (试行) [R]. 24–26. Yunnan Meteorological Bureau. 2017. The guidelines for the issuing of the levels of meteorological early warning information in Yunnan Province (trial implementation) [R]. 24–26
- 中国气象局. 2015. 2014 年中国气候公报 [R]. 35pp. China Meteorological Administration. 2015. China Climate Bulletin for 2014 (in Chinese) [R]. 35pp.
- Zhou T J, Ma S M, Zou L W. 2014. Understanding a hot summer in central eastern China: Summer 2013 in context of multimodel trend analysis [in "Explaining extremes of 2013 from a climate perspective"] [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95(9): S54–S57.