

2019 年南海季风爆发异常偏早的机制分析*

鲍媛媛

BAO Yuanyuan

国家气象中心, 北京, 100081

National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2020-08-17 收稿, 2021-01-15 改回.

鲍媛媛. 2021. 2019 年南海季风爆发异常偏早的机制分析. 气象学报, 79(3): 400-413

Bao Yuanyuan. 2021. Mechanisms for the abnormally early onset of the South China Sea summer monsoon in 2019. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):400-413

Abstract Detailed process and mechanisms of the abnormally early onset of the South China Sea Summer Monsoon (SCSSM) in 2019 were analyzed using the NCEP/NCAR reanalysis daily data and NOAA daily OLR and SSTA data. The results are as follows: (1) The SCSSM broke out on 6 May. The heat sources of Qinghai-Tibet Plateau and Indochina Peninsula are weaker than normal, and have little influence on the onset of SCSSM. (2) During the medium-range evolution of the atmospheric circulation, a warm high-pressure ridge formed and persisted for two weeks over the Tibetan Plateau and nearby. Under the influence of strong warm advection from the tropics and strong clear sky radiation in the eastern Qinghai-Tibet Plateau, this high-pressure ridge caused an abnormally high temperature in the middle-upper levels, which played a key role in the SCSSM onset by accelerating the process of seasonal change of land sea thermal difference. (3) The latent heat of condensation released by "Fani" during its northward movement and its residual low pressure after landing at northeastern Indian, the warm advection caused by the southwest monsoon in the Bengal that was triggered by condensational latent heat and the cyclonic circulation due to "Fani", the warm advection by the anticyclone circulation of the South Asian High (SAH) which was strengthened by "Fani", the condensational latent heat caused by convergence of southwest monsoon and backflow related to the East Asian cold trough after "Fani", step by step, formed a "relay" to strengthen the positive temperature anomaly, which eventually led to the increase of temperature gradient in the SCS, and resulted in the strengthening of the cross equatorial flows and the onset of SCSSM. (4) El Niño and periodic development of positive real-time SSTA in the equatorial western Pacific made the WNSPH stronger and located more westward, which is not favorable for the SCSSM onset. However, the easterly winds at the western WNSPH converged with northerly winds from the middle-high latitudes and formed a cyclone which grew dramatically under the background of strong positive SSTA in the equatorial Indian Ocean and the Bay of Bengal and produced "Fani", which developed to a typhoon and led to a series of circulation changes, and finally resulted in the extremely early onset of SCSSM.

Key words South China Sea summer monsoon, Middle and high latitude circulation, Tropical cyclone "Fani", Sea surface temperature anomalies

摘要 利用美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐日再分析资料及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)逐日向外长波辐射、海温距平等资料诊断分析 2019 年中国南海季风爆发异常偏早的机制。结果表明:(1)南海季风爆发于 5 月 6 日,青藏高原和中南半岛热源较常年弱,对季风爆发无明显影响。(2)中高纬度环流中期变化过程中在青藏高原及附近区域形成为期两周的偏强高压脊,来自热带的暖平流以及青藏高原东部晴空辐射强等因素使其温度偏高,起到加快海陆热力差异季节转变进程的作用,对季风爆发至关重要。(3)孟加拉湾气旋“Fani”北上及登陆后迅速减弱后的残留低压的凝结潜热释放,“Fani”

* 资助课题: 国家科技支撑计划课题“10—20 天延伸期预报技术研究”(2015BAC03B06)。

作者简介: 鲍媛媛, 主要从事中期延伸期天气预报及灾害天气研究。E-mail: baoyy@cma.gov.cn

凝结潜热释放和气旋性环流增强诱发孟加拉湾西南季风爆发从而引起西南季风暖平流输送,因“Fani”而加强北跳的南亚高压反气旋环流的暖平流输送,“Fani”影响结束后西南季风与东亚冷槽后部回流辐合产生降水释放凝结潜热等因素,一步接一步,形成了加剧温度正距平的“接力”,最终导致中国南海地区温度梯度增强,越赤道气流增强,南海季风爆发。(4)厄尔尼诺及赤道西太平洋实时海温阶段性正距平增大使得西北太平洋副热带高压偏西偏强,本身不利于季风爆发;但其西端的偏东风在赤道印度洋与中高纬度南下的偏北气流辐合,并在赤道印度洋和孟加拉湾海温正距平阶段性增强的背景下得以强烈发展,生成孟加拉湾气旋“Fani”,其在北上过程中发展成为台风,由此引起大气环流一系列变化,最终导致南海季风的偏早爆发。

关键词 南海季风, 中高纬度环流, 孟加拉湾气旋“Fani”, 海温异常

中图法分类号 P466 P458.3

1 引言

中国南海季风爆发标志着东亚夏季风来临和中国东部主汛期的开始(Lau, et al, 1997; Ding, et al, 2015),其年际变化对中国夏季降水有重要影响(Xie, et al, 2016; Jiang, et al, 2018; Wang, et al, 2018; 李汀等, 2013),深受气候学者的重视,并成为气候预测的重要对象。进入21世纪以来,随着天气、气候预报预测一体化“无缝隙”预报系统兴起,南海季风爆发也成为中期和延伸期预报的重要内容。

1998年南海季风实验(SCSMEX)之后大量研究表明,南海季风爆发的重要标志是对流层低层从东风转为西南风,对流和降水突然发展(Matsumoto, 1997; Wang, et al, 2002)。同时,亚洲大尺度环流也发生显著变化:200 hPa南亚高压跃上中南半岛北部(Ding, et al, 2004; He, et al, 2003)或中国南海上空(Liu, et al, 2016),副热带高压(简称副高)从中国南海撤退(Ding, et al, 2001; He, et al, 2017)等。

南海季风爆发的平均时间是5月第4候(Liu, et al, 2015; Wang, et al, 2004; Gao, et al, 2001),但年际变化较大。由于中国南海所处的独特地理位置,影响季风爆发年际变化的因素极为复杂。首先,青藏高原(张永生等, 1999; Qian, et al, 2003; 梁萧芸等, 2005)及中南半岛感热(柳艳菊等, 2007; 温敏等, 2004; 郑彬等, 2006; 刘萱飞等, 2009; Bao, et al, 2010)通过影响海陆热力差进而影响南海季风的爆发时间。越赤道气流(Lin, et al, 2017; Hu, et al, 2018)、热带大气季节内振荡(MJO)(Shao, et al, 2015; Wang, et al, 2018)、中国南海或者孟加拉湾涡旋(Wu, et al, 2012; Xing, et al, 2016)、中纬度天气系统(Huangfu, et al, 2018; 温之平等, 2016)也影响南海季风的爆发。

印度洋和太平洋海温也是影响南海季风爆发早晚的最重要因素之一。大量研究(丁硕毅等, 2016;

Martin, et al, 2019; 谷德军等, 2018)表明,前期厄尔尼诺通过调节沃克环流或者激发西太平洋反气旋推迟南海季风爆发。但是,2019年,一次典型的厄尔尼诺事件之后,南海季风却偏早爆发。对此,Hu等(2020)采用Wang等(2004)制定的南海季风爆发标准(5° — 15° N, 110° — 120° E)平均纬向风从东风转为稳定的西风),确定爆发的时间为5月1日,认为春末西北太平洋没有出现海温负距平和相关的反气旋,因此,春季末的平均环流有利于南海季风爆发;源自印度洋的30—60 d低频振荡中,活跃的对流和西风位相为南海季风的爆发提供了有利背景;并引用已有的研究结果认为孟加拉气旋活动和东亚冷槽触发了南海季风爆发。显然,该研究可以解释南海季风爆发为什么不是偏晚,但并不能解释为什么偏早,对于触发机制的分析也不够充分。Liu等(2020)分析了孟加拉湾气旋“Fani”对南海季风爆发的影响,认为“Fani”不仅推动南亚高压北进,而且加强了青藏高原西部斜压槽,通过加强中国南海上空的“抽吸”作用促进中国南海地区对流发展;并认为“Fani”在印度东部登陆产生强降雨释放凝结潜热给对流层大气加热,并通过温度平流促使南亚高压北移和南海季风爆发。但其采用的是候平均分析,且没有结合环流形势分析;此外,“Fani”在5月3日登陆后即迅速减弱,能在多大程度上增加凝结潜热或者改变温度场,文中并未能清晰说明。

本研究的目的是用逐日资料分析2019年南海季风爆发的详细过程,包括“Fani”生成之前的大气环流背景和海温背景,“Fani”生成后北上过程以及登陆减弱后季风环流、对流、大气热力结构及热源的变化特征,辨析“Fani”的影响,并揭示他人(Hu, et al, 2020; Liu, et al, 2020)采用月平均或候平均分析未能揭示的细节,借此探讨在厄尔尼诺背景下南海季风爆发偏早的复杂机制,为10 d以内中短期预报和10—30 d延伸期预报提供参考。

2 资料和方法

所用资料包括: (1) 美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR) 2019年4—5月逐日平均风、位势高度、温度、比湿等气象要素及其多年平均再分析资料(2.5°×2.5°); (2) 美国国家海洋和大气管理局(NOAA) 2019年4—5月逐日向外长波辐射(OLR)及其多年平均资料; (3) NOAA 2019年4—5月逐日海温距平。视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 按照 Yanai 等(1973)提供的公式计算。

虽然 Wang 等(2004)提出的南海季风爆发标准更具有气候预测可行性(Martin, et al, 2019), 但本研究仍采用 Gao 等(2001)提出的标准。该标准为中国气象局现行业务标准, 即中国南海中北部区域(10°—20°N, 110°—120°E)西风稳定建立, 且假相当位温(θ_{se})超过 340 K。主要基于 3 方面原因: (1) 本研究不针对气候预测业务, 而是针对中期延伸期预报分析 2019 年南海季风爆发的复杂机理; (2) 用 θ_{se} 而非单纯西风风量, 可以体现热带季风爆发的性质, 避免西风带西风增强给出南海季风虚假爆发信息; (3) 该标准选定的中国南海中北部区域与华南地区相连, 季风爆发直接引起华南前汛期进入季风雨季, 对于华南地区暴雨洪涝灾害预报具有现实意义(赵欢等, 2015; 胡娅敏等, 2014), 在防灾、减灾方面更具价值。

3 南海季风偏早爆发的事实和过程

从 2019 年中国南海中北部区域 850 hPa 平均纬向风和假相当位温的演变(图 1)可见, 该区在 5 月 1 日即转为西风, 风速为 2.7 m/s, 但 θ_{se} 仅为 336.3 K, 不能视为季风爆发。5 月 5 日, 西风风速为 4.9 m/s, θ_{se} 为 339.6 K, 接近但未达到南海季风爆发标准。5 月 6 日, 西风风速为 5.6 m/s, θ_{se} 为 342.4 K, 两者完全达到南海季风爆发标准。从而确定 5 月 6 日为 2019 年南海季风爆发日期, 与国家气候中心确定的 5 月第 2 候(即第 26 候)一致。

从逐日环流来看, 本次南海季风爆发大致可分为 3 个阶段。第 1 阶段, “Fani”发展为台风之前的准备期。2019 年 4 月 24 日前后(图略), 500 hPa 乌拉尔山为阻塞高压, 巴尔喀什湖至伊朗为深槽, 青藏高原受强暖高压脊控制。副高异常强盛, 西部与阿拉伯海高压连接; 0°—20°N 区域内, 从赤道印度

洋到西太平洋均为 588 dagpm 等值线包围, 850 hPa 盛行偏东风。在孟加拉湾对应经度带的南半球热带地区有一个已经存在多日的气旋(4 月 19 日已呈明显气旋性环流), 其北侧的偏西风、北半球中高纬度经印度半岛和阿拉伯海南下的偏北气流、与副高相关的偏东风等气流在孟加拉湾南部(5°N 附近)产生辐合, 此即孟加拉湾气旋“Fani”的雏形。27 日(图 2a), “Fani”发展为热带风暴(Liu, et al, 2020)。之后, 逐步加强, 并缓慢向西北方向移动, 29 日 18 h 发展为台风。

第 2 阶段, “Fani”北上登陆到影响完全结束, 称之为“Fani”影响期。4 月 30 日(图 2b), “Fani”继续北上, 索马里越赤道气流增强, 西南季风在孟加拉湾东部和南部爆发, 副高在孟加拉湾断裂。5 月 1 日(图 2c), “Fani”气旋性环流进一步加强, 出现 584 dagpm 闭合等值线。其路径不再是向西北行, 而是略东折北上。其东侧西南季风涌上青藏高原东南部和中南半岛西北部, 但东传极弱, 中国南海海域仅靠近中南半岛南部的小范围区域出现 θ_{se} 高于 340 K, 且有弱西风存在, 500 hPa 副高仍控制南海中南部, 200 hPa 甚至没有形成完整的南亚高压环流, 显然不符合南海季风爆发条件。2—3 日(图 2d、e), “Fani”缓慢北上, 于 3 日上午在印度东北部登陆, 并迅速减弱, 4 日 00 时(世界时, 下同)停止编号; 同时, 在西南季风前端, 即中南半岛北部, 200 hPa 位势高度出现明显增长, 形成闭合南亚高压。5 月 4 日(图 2f), 青藏高原西南部深槽有短波分裂东移, 与“Fani”残留低压合并, 在槽底偏西气流和西南季风的推动下, 移向青藏高原东南部和中南半岛北部。南亚高压向东北方向移到中南半岛北部和西南地区东部交界处, 强度达到峰值。此时, 有部分西南季风进入中国南海西部, 而南海东北部受东亚槽冷空气南下影响, 仍为偏北风, 东南部也有部分为偏北风。

第 3 阶段, “Fani”已无影响的南海季风爆发期。5—6 日(图 2g、h), 乌拉尔山高压脊发展东移, 中亚深槽分裂东移, 引导冷空气侵入青藏高原西北部, 原青藏高原暖脊减弱东移。同时, 东亚冷槽加深东移, 其后部偏东回流经过中国东海南部海域进入华中、华南一带, 与东传西南季风形成低层辐合形势。南亚高压仍然维持, 只是强度略有减弱, 且呈南压趋势。此时, 索马里越赤道气流减弱, 甚至

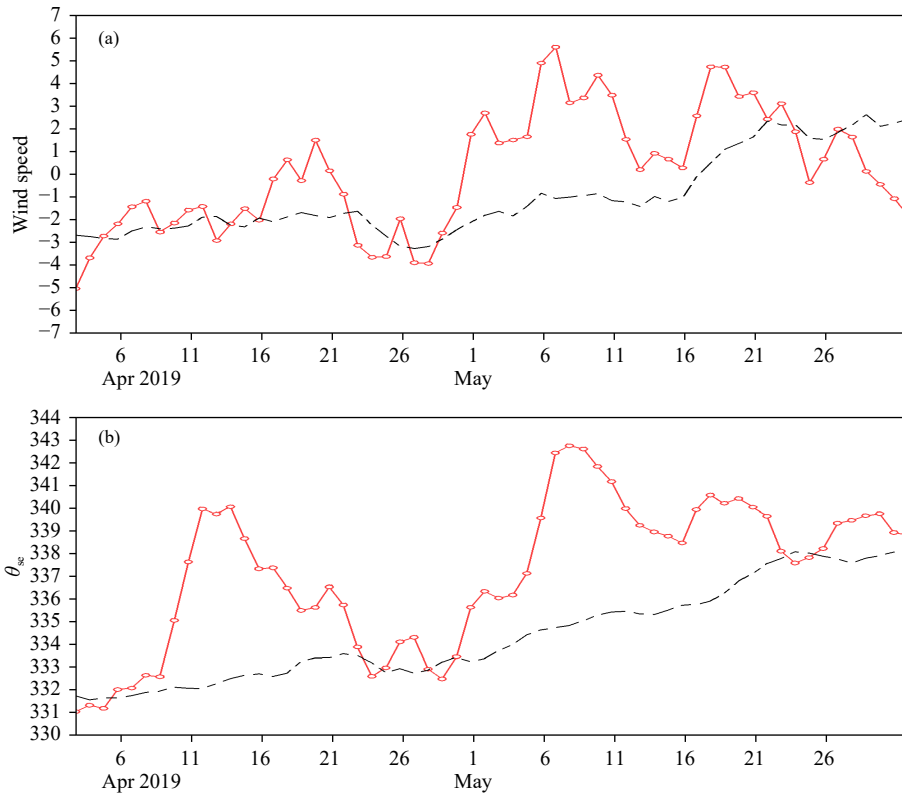


图1 2019年(红线)及气候平均(黑虚线)4—5月中国南海中北部区域850 hPa平均纬向风(a,单位:m/s)和假相当位温(b,单位:K)的演变

Fig. 1 Average of zonal wind (a, unit: m/s) and θ_{se} (b, unit: K) at 850 hPa over the north-central South China Sea from April to May in 2019 (red solid line) and the climatological mean (black dotted line)

成为偏北风,但赤道印度洋东部到印度尼西亚群岛越赤道气流加强,西南季风大举进入中国南海,副高减弱南退,588 dagpm等值线南落到南海中部,南海季风爆发。

4 季风爆发偏早的成因

4.1 亚洲太平洋地区大气热力状况异常变化

结合500 hPa环流形势及大气中高层温度场和风场的逐日演变可见,第1阶段,4月24日前后,青藏高原及其以南受暖高压脊控制,温度持续比多年平均高3—4℃(图略)。27日前后(图3a),温度正异常继续加强到5—7℃。主要有3个方面因素:(1)冷空气实力弱;(2)西南气流带来的源自于阿拉伯半岛南部、非洲北部、阿拉伯海北部的暖平流加热;(3)阿拉伯高压反气旋环流将阿拉伯海南部和赤道印度洋高热量输送到暖平流输送带上,进一步增强了暖平流。关于青藏高原热源的作用后续将重点分析。

第2阶段,“Fani”影响期。4月30日至5月1日(图3b、c),青藏高原暖脊减弱东移,上游有部分气流转为西偏北风,因而青藏高原北部暖平流减弱,温度正距平也有所减弱。但由于“Fani”加强北上,发展深厚,其对流凝结潜热释放形成的暖中心也随之移向印度半岛东北部。在青藏高原南部和孟加拉湾北部,原西南气流暖平流仍较明显,同时受“Fani”凝结潜热以及“Fani”前部偏南气流引导的暖平流影响,仍为明显的温度正距平。在“Fani”气流气旋性卷入和海陆热力差异的双重影响下,索马里越赤道急流和孟加拉湾西南季风爆发。5月2—3日(图3d、e),“Fani”附近出现-14℃以上闭合暖中心,青藏高原及其以南地区温度正距平再度增强,体现出“Fani”凝结潜热释放和西南季风对来自赤道印度洋的暖平流输送。5月4日(图3f),“Fani”减弱停止编号,但受其残留低压和强盛的西南季风水汽和热量输送影响,在西南季风前端,青藏高原东侧至中南半岛北部温度正距平显著增大,暖中心

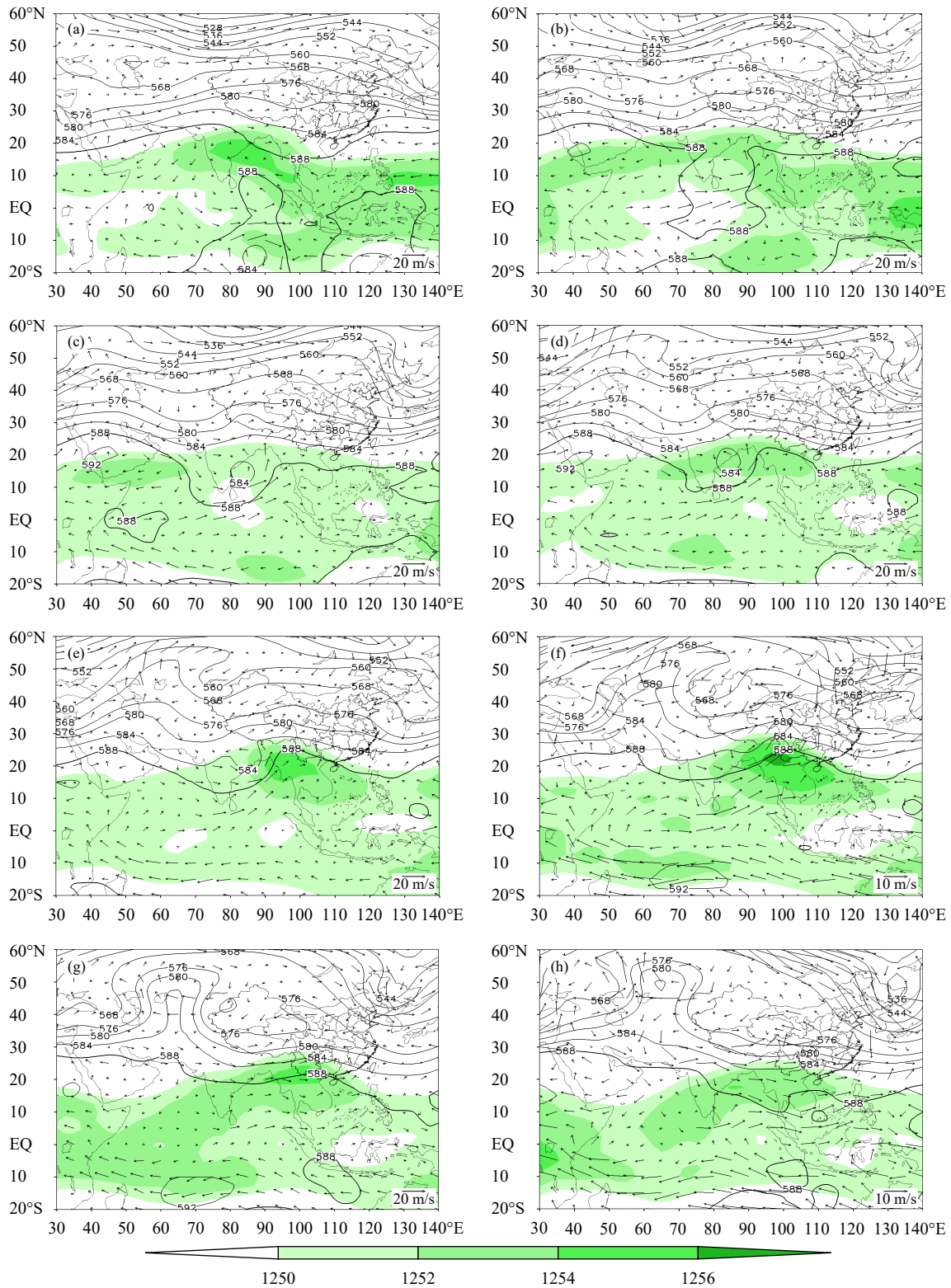


图2 2019年4月27(a)、30(b)日、5月1—6日(c—h) 500 hPa 位势高度(实线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(箭矢,单位:m/s)及200 hPa 高度场(色阶,单位:dagpm)

Fig. 2 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), 850 hPa wind(vector, unit: m/s) and 200 hPa height (shading, unit: dagpm) on 27 (a), 30 (b) April and 1—6 (c—h) May in 2019

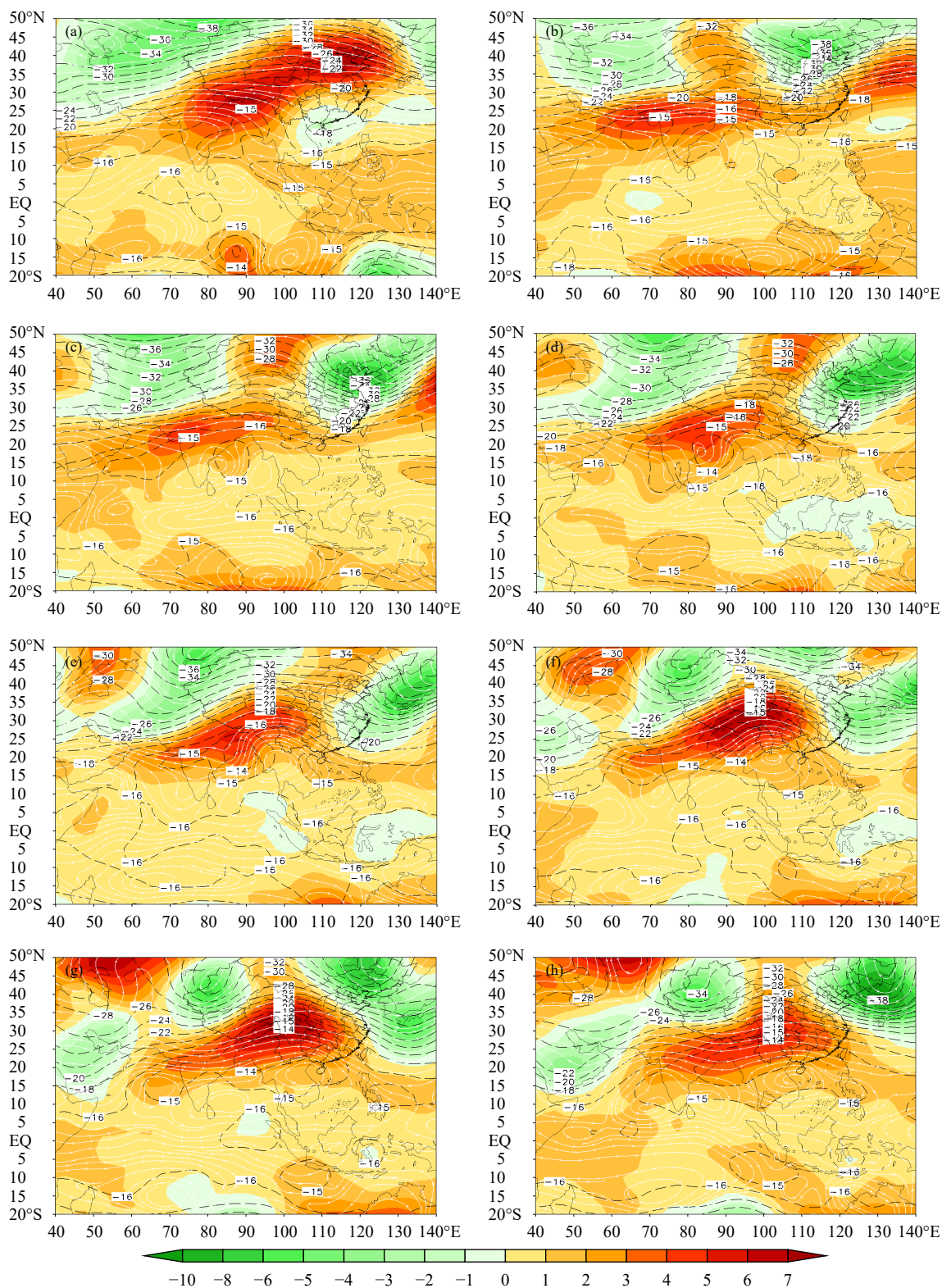


图3 2019年4月27(a)和30(b)日,5月1—6日(c—h)500—300 hPa平均温度(黑色虚线,单位:℃)、温度距平(色阶,单位:℃)及平均风场(白色流线)

Fig. 3 500—300 hPa average temperature (black dotted line, unit: °C) and anomalies (shading, unit: °C), average wind (white stream line) for 27 (a), 30 (b) April, and 1—6 (c—h) May in 2019

强度达到 -13°C 以上。此过程中,南亚高压表现为明显的趋暖效应,在“Fani”暖中心右侧,向青藏高原南部和中南半岛北部移动,强度增强,在5月4日达到最强。

第3阶段,5月5日(图3g),大气中上层,南亚高压主体仍位于中南半岛,但西段及印度半岛有新的反气旋环流生成。青藏高原暖脊继续缓慢东移,温度正距平依然维持,并东移。虽然“Fani”作用已经完全消失,不再有相应暖中心,但南亚和东南亚反气旋仍将赤道印度洋和中国南海热量输送到青藏高原东部和南部。东亚冷槽后部偏东回流带来的来自中国东海南部海域的暖湿气流与西南季风在华中、华南一带辐合,并产生降水(图略),其凝结潜热释放对温度正距平加强也极为有利。因此,在青藏高原东部和南部、中南半岛至中国南方大部地区大气中上层呈显著温度正距平。6日(图3h),青藏高原西北部分裂冷槽东移,东部冷槽加深,造成中高层温度正距平南压,中国南海北部温度正距平和温度南北梯度增大,越赤道气流加强,南海季风爆发。

丁一汇等(2004)分析认为海陆热力差的季节演变是南海季风爆发的基本因子,海温与青藏高原热源是一种直接导致或增强季风爆发的区域性因子,中纬度扰动、热带天气系统和低频振荡是重要触发因素。由以上分析所述,2019年4月中旬开始到5月上旬,中高纬度大气环流及其变化过程中,暖高压脊给青藏高原、孟加拉湾和中南半岛及中国南方地区提供了一个显著偏暖大背景,相当于加速了海陆热力差季节转换进程。而“Fani”加强北上引发索马里急流和孟加拉湾西南季风爆发,以及“Fani”之后东亚冷槽后部回流与孟加拉湾西南季风辐合、南亚和东南亚反气旋暖平流输送等进一步增强了海陆热力差,并最终触发了南海西南季风爆发。从2019年4—5月大气中高层500—300 hPa温度沿青藏高原到孟加拉湾北部(17.5°N — 37.5°N)的经度-时间剖面(图4a)来看,这种温度异常特征起始于4月24日前后,结束于5月8日。包括青藏高原、孟加拉湾北部及中国西南地区东部在内的(17.5°N — 37.5°N , 70° — 105°E)区域位势高度距平和温度距平的高度-时间剖面(图4b)显示,这次维持时间约两周的温度正距平与中高层长波暖脊对应的位势高度正距平在时间和强度上高度吻合。因此,完全有理由推断,是大气环流长波系统的中期

变化过程中在青藏高原及附近地区形成为期两周的高压暖脊,为南海季风偏早爆发提供了一个显著暖背景。

4.2 对流和热源

逐日向外长波辐射及其距平显示,在南海季风爆发的第1阶段(准备期),从4月中旬末开始,在赤道印度洋中部偏南区域出现持续强对流,并有气旋生成。印度尼西亚群岛也存在明显对流带(ITCZ),并因凝结潜热释放形成强热源带(图略),有利于副高偏强和偏西(刘屹岷等,1999)。24日,在赤道印度洋南部气旋与赤道对称区域, 2.5°N 附近出现对流中心,即早期的“Fani”(图略)。4月25—27日,“Fani”与其对称气旋均不断成长,并开始脱离。至4月27日(图5a),“Fani”对流中心北移到 5°N 附近,中心强度也加大,向外长波辐射下降到 100 W/m^2 以下,外围气流与周边气流辐合,对流区域加大,向东与印度尼西亚群岛ITCZ连接,形成宽广的强对流带和热源带(图6a)。

南海季风爆发第2阶段,“Fani”在4月29日18时加强为台风后至5月2日,缓慢北上,强的对流(图5b—d)和视热源(图6b—d)也随之加强北上,孟加拉湾西南季风爆发。受“Fani”影响,副高在孟加拉湾断裂;马来半岛为东传的单一弱西南气流控制,强的对流和热源消失,原宽广对流带和热源带断裂。此时,按照Wang等(2004)所定义的南海季风爆发区域(5° — 15°N , 110° — 120°E)未出现明显对流,向外长波辐射在 280 W/m^2 以上。“Fani”北上过程中,虽然仍保持台风级别,但主要受本身气流的辐合影响,不再具备与外围气流的辐合条件,对流面积逐步缩小。因此,虽然热源强度保持,但范围缩小。

5月3日12时,“Fani”以台风级别登陆时,对流(图5e)和热源(图6e)仍较明显,但登陆后迅速减弱。5月4日,受东移“Fani”残余低压和孟加拉湾西南季风北涌影响,青藏高原东南部和中南半岛北部出现明显的对流区(图5f);该对流相对于“Fani”停编前减弱,凝结潜热释放及热源也有所减弱(图6f);因此,对青藏高原东南部、中南半岛北部一带庞大的强温度正距平有明显贡献,但西南季风以及与南亚高压相关反气旋环流的暖平流输送贡献仍然极为重要。与此同时,索马里越赤道气流继续保持旺盛的态势,除一部分向北进入孟加拉湾东

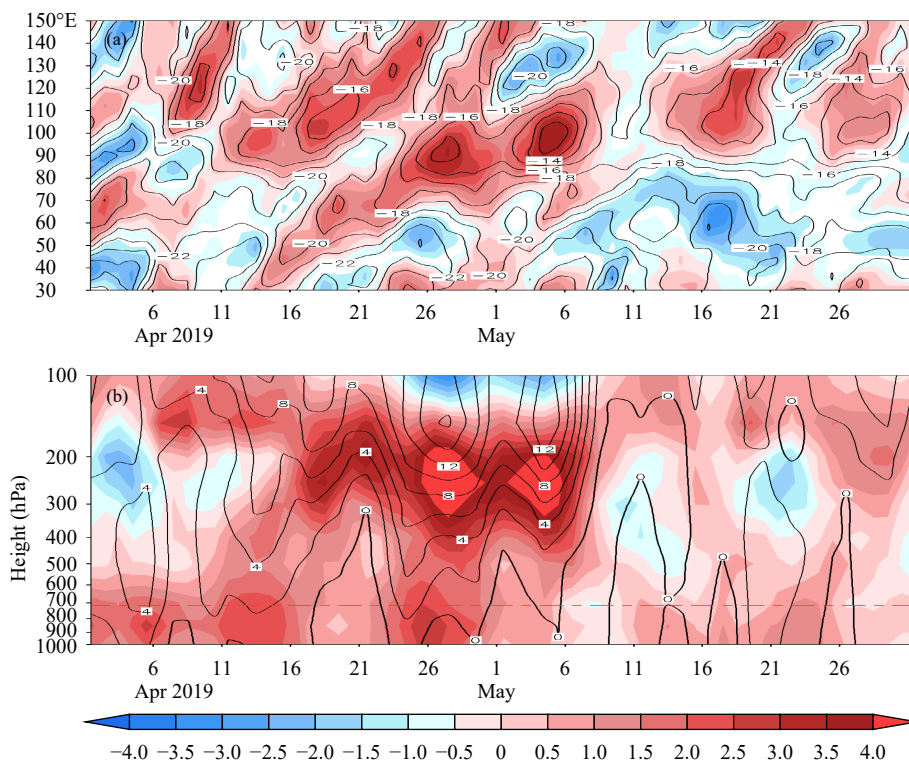


图4 2019年4—5月(a)大气中高层(500—300 hPa)平均温度(等值线,单位:℃)及其距平(色阶,单位:℃)沿17.5°—37.5°N的经度-时间剖面,(b)(17.5°—37.5°N,70°—105°E)区域位势高度距平(等值线,单位:dagpm)和温度距平(色阶,单位:℃)的高度-时间剖面(红色虚线为地形高度)

Fig. 4 (a) Longitude-time profiles of average temperature (contour, unit: °C) at middle and upper levels (500–300 hPa) and temperature anomalies (shading, unit: °C) along 17.5°–37.5°N, (b) height-time profiles of potential height anomalies (contour, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: °C) over the region of (17.5°–37.5°N, 70°–105°E) (the red dotted line is the terrain height) from April to May in 2019

北部外,向南有一部分流向中南半岛南部和中国南海西部,形成一条西南—东北走向的有多个辐合中心的对流带。

第3阶段,5—6日,“Fani”影响完全消失,青藏高原东南部和中南半岛几乎没有对流(图5g、h),且主要为视热源负值(图6g、h),但受来自于热带洋面暖平流等因素影响,大气中上层的温度仍为明显的正距平。此时,由于东部冷槽加深,冷槽后部回流与西南季风及中纬度偏西风在华中和华南一带辐合,产生明显降雨(图略);其释放的凝结潜热使得这一带为明显视热源,从而使强温度正距平向华中和华南一带扩展。受冷槽冷空气从青藏高原西北部逐渐东移影响,原青藏高原高压暖脊及温度正距平东移南压,中国南海中高层大气南北温度梯度增大,赤道印度洋东部及印度尼西亚群岛一带越赤道气流加强,中国南海地区西南气流和对流加强,季风爆发。

从图5、6还可以看到,在南海季风爆发过程中,除“Fani”的影响外,青藏高原及附近地区对流和热源均较弱。从青藏高原的视热源和视水汽汇逐日演变曲线(图7a)可见,在多年平均状况下,青藏高原在4月初开始就呈现弱的热源;在5月中旬及之前,主要为感热,视热源强度在50 W/m²左右。2019年,南海季风爆发过程中,青藏高原热源整体上强度并不突出,除“Fani”影响时段外,均比常年同期弱,视水汽汇和对流也明显弱,因此潜热贡献也非常弱。2019年3月,青藏高原降雪量比多年平均明显多(图略),积雪也比多年平均明显多。在4月中旬末至5月初南海季风爆发前夕,青藏高原为大暖高压脊控制,有利于晴空短波辐射对大气加热和感热增强,但热源特别是感热却偏低,这反映了青藏高原积雪融化对热源的抑制作用。因此,可以推断,青藏高原及附近地区强温度正距平与青藏高原热源无关。此外,南海季风爆发过程中,青

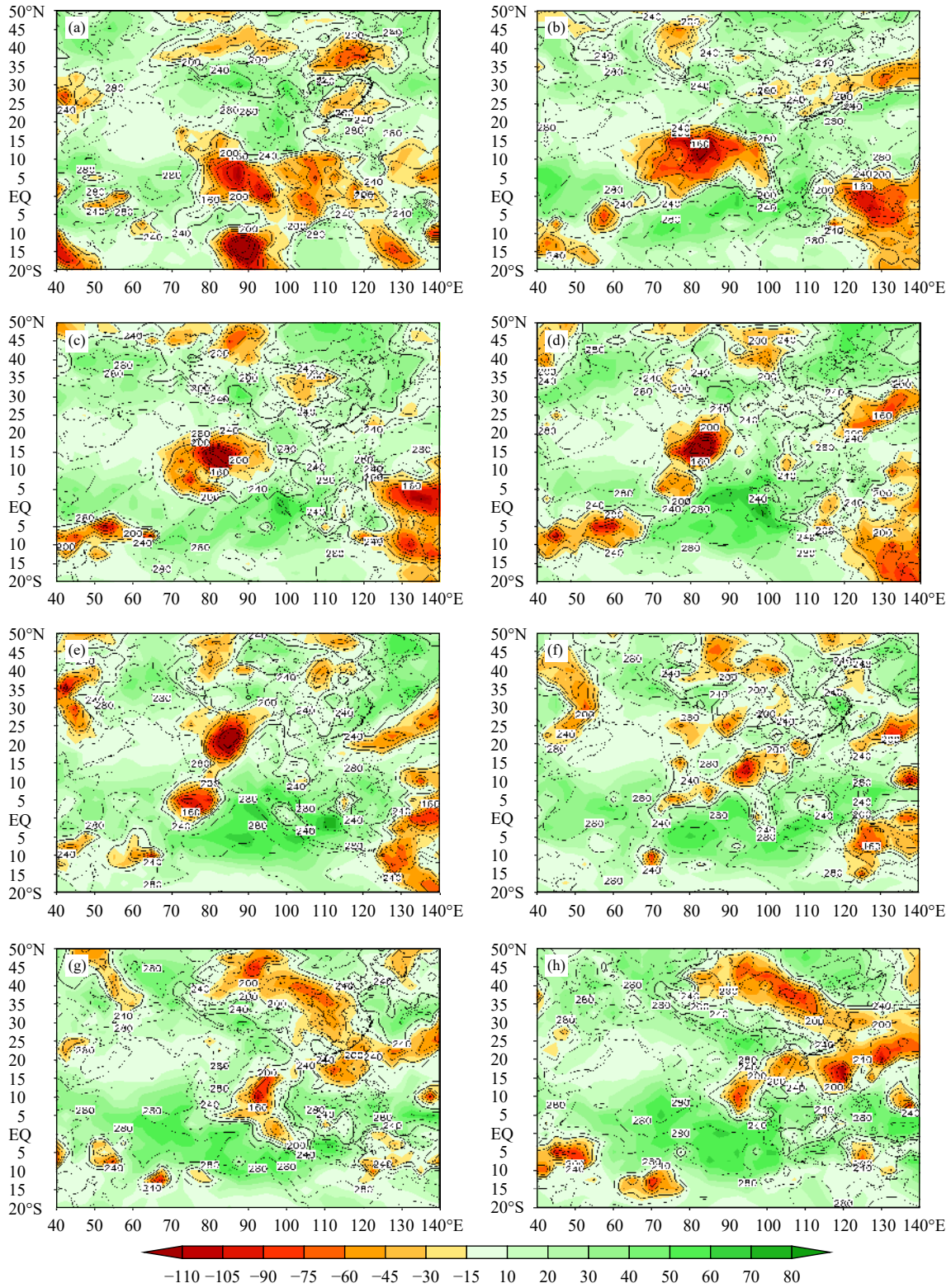


图5 2019年4月27(a)、30(b)日和5月1—6(c—h)日向外长波辐射(等值线,单位: W/m^2)及其距平(色阶,单位: W/m^2)

Fig. 5 OLR (contour, unit: W/m^2) and OLR anomalies (shading, unit: W/m^2) on 27 (a) and 30 (b) April, and 1—6 (c—h) May 2019

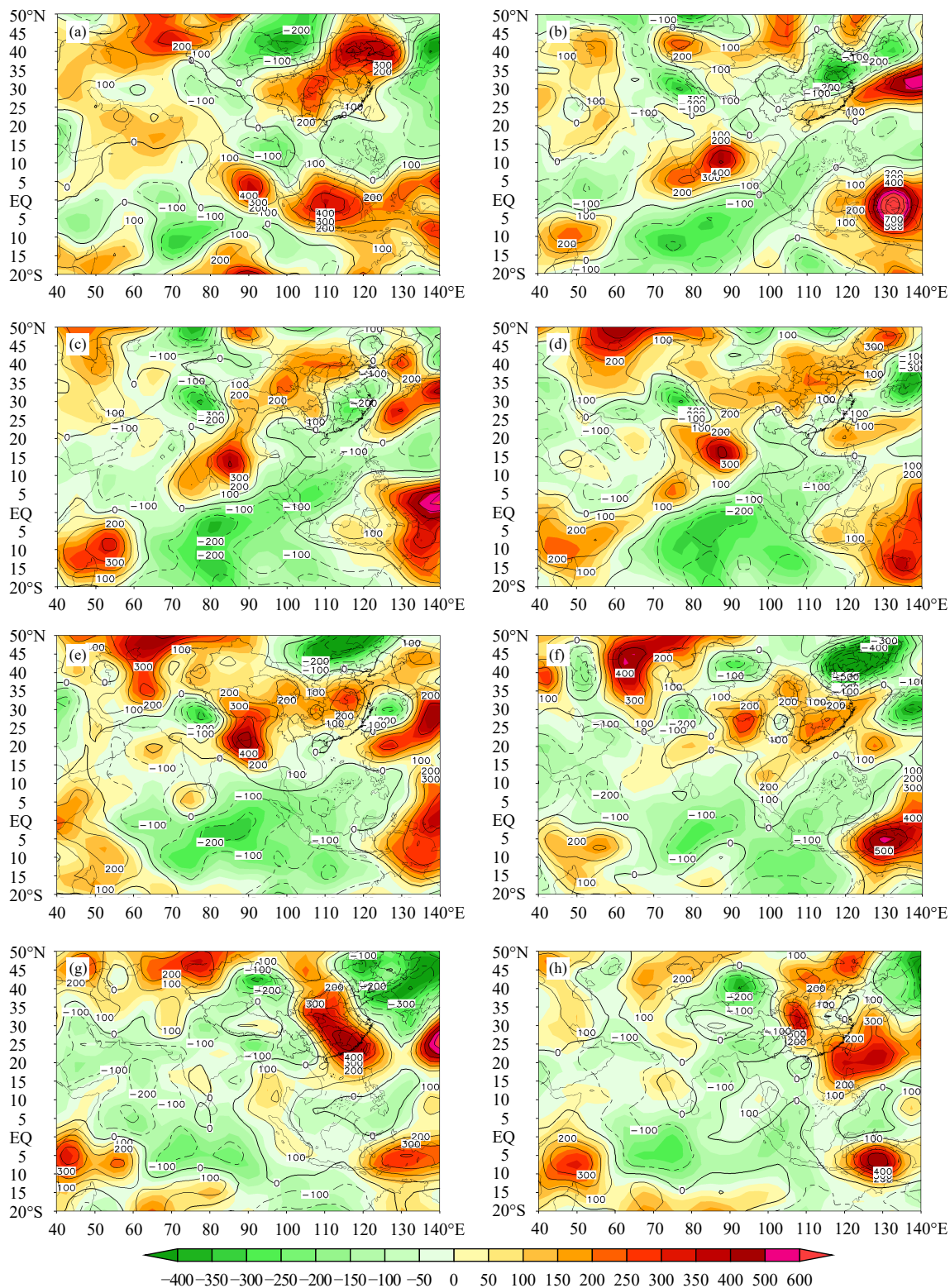


图 6 2019年4月27(a)、30(b)日和5月1—6(c—h)日整层积分的视热源(等值线,单位: W/m^2)及其距平(色阶,单位: W/m^2)

Fig. 6 Vertically integrated apparent heat source (contour, unit: W/m^2) and its anomalies (shading, unit: W/m^2) on 27 (a) and 30 (b) April, and 1—6 (c—h) May 2019

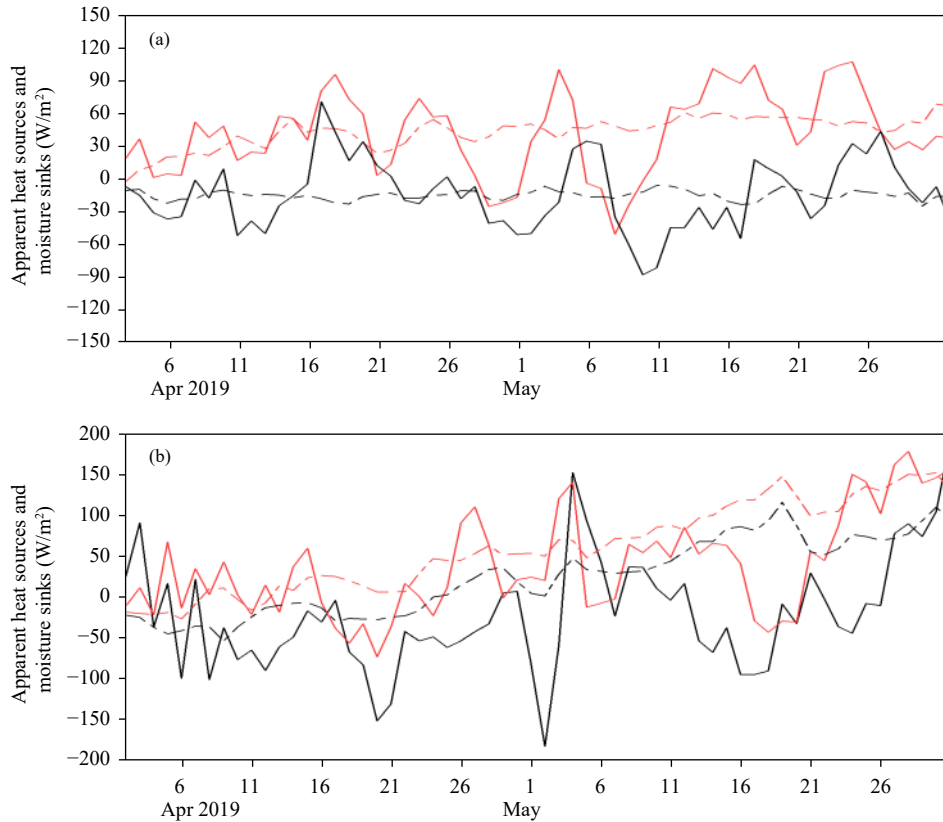


图7 2019年4—5月(a)青藏高原(27.5°—37.5°N, 70°—102.5°E)和(b)中南半岛(15°—27.5°N, 95°—107.5°E)整层积分的视热源(红色实线, 单位: W/m^2)和视水汽汇(黑色实线, 单位: W/m^2)(红色和黑色虚线分别为多年平均视热源和视水汽汇)

Fig. 7 Vertically integrated apparent heat sources (red solid line, unit: W/m^2) and moisture sinks (black solid line, unit: W/m^2) over the (a) Tibet Plateau (27.5°—37.5°N, 70°—102.5°E) and (b) Indochina Peninsula (15°—27.5°N, 95°—107.5°E) from April to May in 2019 (The red and black dotted lines are multi-year average heat sources and moisture sinks, respectively)

藏高原东部地面气温较多年平均高1—3℃(图略),说明太阳辐射对于地面加热偏强,因此辐射对于中高层温度偏高有正的贡献。而青藏高原西部地面气温在前期接近常年,后期降低,甚至呈明显负距平,因此,辐射对于中高层温度偏高无正的贡献。

从中南半岛视热源和视水汽汇逐日演变(图7b)可见,多年平均状态下,中南半岛在4月中旬后期开始成为热源,凝结潜热对热源有一定贡献。而2019年,南海季风爆发过程中,除去孟加拉湾气旋影响外,中南半岛热源也较多年平均偏弱。

上述分析充分说明,2019年南海季风爆发过程中,造成海陆热力差异的主要因素是青藏高原附近暖脊及暖平流、“Fani”北上、西南季风和反气旋暖平流输送以及西南季风和回流辐合形成的对流凝结潜热释放等,青藏高原和中南半岛热源贡献并不突出。

4.3 海温异常对南海季风爆发的影响

由2019年4月6日至5月5日逐候海温距平

分布(图8)可见,4月第2候至中旬(图8a—c),北印度洋出现大范围海温正距平增强。在这种海温异常正距平背景下,与强大副高相关的偏东风与来自北半球中高纬度,途径印度次大陆和阿拉伯海的偏北风在此辐合后,可以得到源源不断的能量补充,从而不断发展,引发这一带大范围对流;南赤道印度洋气旋和北赤道印度洋气旋“Fani”在此先后生成。4月中旬后期至下旬(图8c—e),孟加拉湾北部出现海温正距平增强过程,有利于“Fani”在北上过程中加强为台风;并且,台风行进过程中凝结释放潜热使中上层大气呈明显温度正距平,其暖平流输送对于青藏高原南部和中南半岛北部温度正距平也有贡献。4月下旬后期开始(图8e—f),赤道印度洋中部海温正距平明显减弱,甚至呈负距平,相应热带对流减弱,大气中上层温度距平也呈减小趋势,有利于越赤道气流加强;并且,也有利于“Fani”之后不再有新的热带气旋生成。

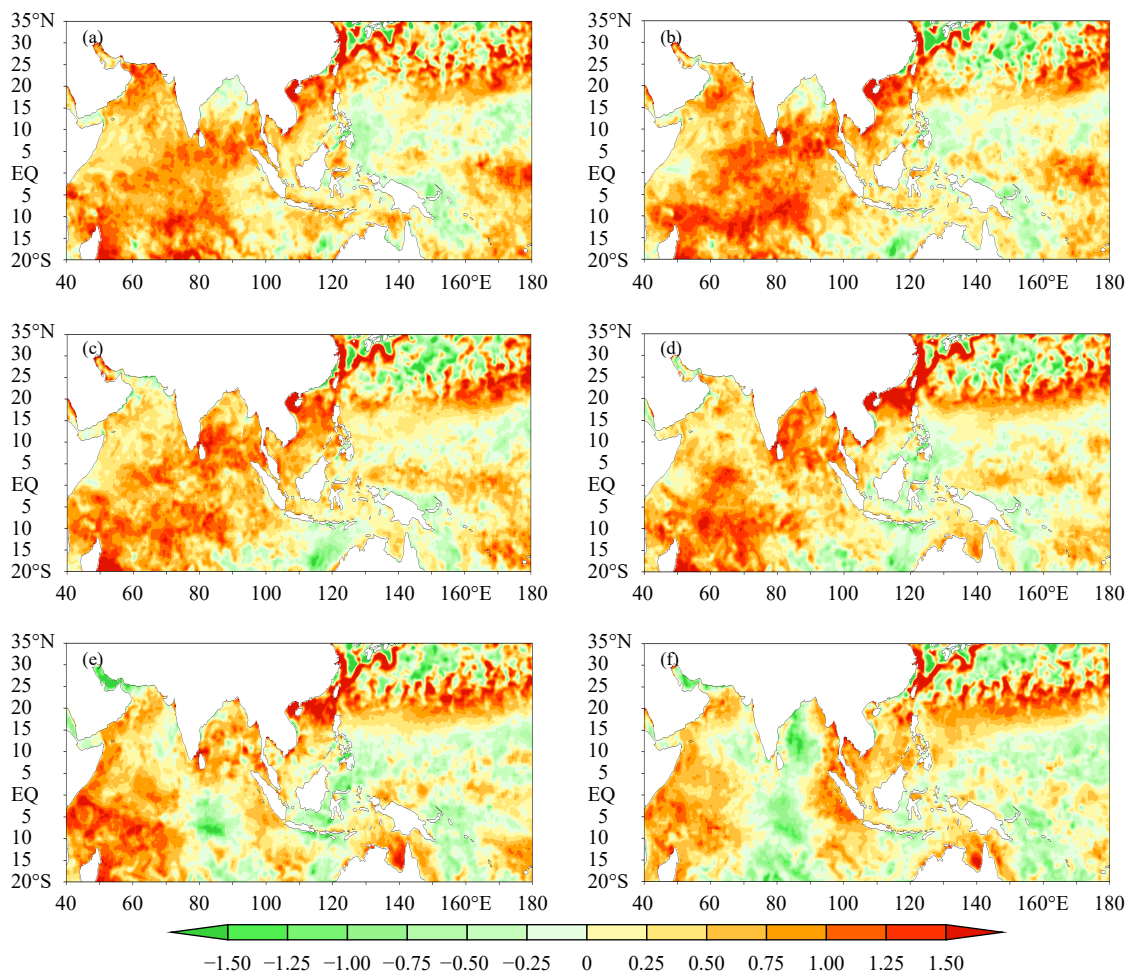


图8 2019年4月6日至5月5日逐候平均海温距平(单位: °C)
(a. 4月第2候, b. 4月第3候, c. 4月第4候, d. 4月第5候, e. 4月第6候, f. 5月第1候)

Fig. 8 Mean sea surface temperature anomalies (unit: °C) of every five days from April 6 to May 5 in 2019
(a. 6–10 Apr, b. 11–15 Apr, c. 16–20 Apr, d. 21–25 Apr, e. 26–30 Apr, f. 1–5 May)

4月至5月上旬,赤道太平洋海温整体上呈厄尔尼诺分布状态。4月中旬到下旬前期(图8b—d),赤道西太平洋也有带状海温正距平发展,只是比东段弱;10°—20°N西太平洋为海温负距平。这两个区域分别对应向外长波辐射负距平和正距平、视热源的正距平和负距平(图略)。毫无疑问,这种海温分布有利于赤道西太平洋地区产生偏强对流和热源,从而有利于副高在热源北侧(10°—20°N)偏强维持。副高偏强本身是不利于南海季风爆发的,但其相应的偏东风却是赤道印度洋气旋得以生成辐合气流的重要组成部分,对“Fani”的生成有重要贡献。

可见,4月中旬开始的赤道印度洋对流加强、南赤道印度洋气旋和“Fani”先后生成,4月底

“Fani”加强成台风,索马里越赤道气流加强推动“Fani”北上,“Fani”后赤道印度洋对流减弱,南海季风爆发后南海地区对流加强,这一系列变化的整个过程就构成了Hu等(2020)所描述的30—60 d的振荡以及MJO在印度洋和中国南海地区的活动。在此过程中,赤道印度洋海温、赤道太平洋海温阶段性变化均起到了重要的直接和间接作用。

此外,4月下旬后期开始(图8e—f),赤道西太平洋海温正距平开始南落,强度减弱,甚至有负距平出现,对副高的减弱南落有利。同时,也使得这一带对流和热源减弱,相应大气中上层温度从偏高2°C左右下降到接近多年平均(图3),从而有助于印度尼西亚群岛到赤道西太平洋地区越赤道气流增强。

5 结论和讨论

文中分析了2019年南海季风爆发的详细过程,并探讨了南海季风爆发异常偏早的机制,得出以下结论:

(1)2019年南海季风于5月6日爆发,比常年偏早。本年度青藏高原热源和中南半岛热源较常年同期弱,对此次南海季风爆发无明显影响。

(2)季风爆发过程分为3个阶段:第1阶段,准备期,青藏高原及附近地区暖高压脊建立,孟加拉湾气旋“Fani”生成;第2阶段,“Fani”发展成台风并北上,以及“Fani”登陆减弱后残留低压影响期;第3阶段,“Fani”影响彻底结束后南海季风爆发期。

(3)中高纬度环流中期变化过程中青藏高原及附近地区形成为期两周的暖高压脊,来自热带的暖平流输送以及青藏高原东部偏强的太阳辐射增温等使大气中上层温度异常偏高,加速了海陆热力差异季节转换进程,对南海季风爆发至关重要。“Fani”及其残留低压释放凝结潜热,同时通过诱导孟加拉湾西南季风爆发,加强暖平流,使南亚高压跃上中南半岛北部。“Fani”结束后,西南季风与东亚冷槽后部回流形成辐合降水并释放凝结潜热、南亚东南亚反气旋(南亚高压)引起热带地区暖平流输送,如此等等,形成多次温度正距平加剧“接力”,最终使得青藏高原东部、中南半岛以及中国西南、华南地区持续保持强温度正距平,并影响中国南海北部,使之出现强南北温度梯度,导致越赤道气流增强,最终触发南海西南季风爆发。

(4)实时海温区域性阶段性变化对南海季风爆发也极为重要。厄尔尼诺及4月底之前赤道西太平洋实时海温正距平阶段性加大使得副高偏西偏强,本身不利于季风爆发,但是副高偏强引起偏强东风却是赤道印度洋气旋得以生成辐合气流的重要组成部分,对“Fani”的生成有重要贡献。赤道印度洋和孟加拉湾出现阶段性海温正距平增大,使得来自北半球中高纬度西北气流与强大的副高相关的偏东风在赤道印度洋产生辐合后,得以不断发展,生成孟加拉湾气旋“Fani”,在北上过程中加强为台风,从而诱发孟加拉西南季风爆发,成为引起大气环流和热力结构变化的重要环节,并最终导致南海季风爆发。此外,5月初,赤道西太平洋出现阶段性的海温正距平减弱,对副高南退和越赤道气流的加强也起到一定促进作用。

参考文献

- 丁硕毅,温之平,陈文. 2016. 南海夏季风爆发与热带太平洋两类海温型关系的年代际差异. 大气科学, 40(2): 243-256. Ding S Y, Wen Z P, Chen W. 2016. Interdecadal change in the relationship between the South China Sea summer monsoon onset and two types of Pacific sea surface temperature anomaly. Chinese J Atmos Sci, 40(2): 243-256 (in Chinese)
- 丁一汇,李崇银,何金海等. 2004. 南海季风试验与东亚夏季风. 气象学报, 62(5): 561-586. Ding Y H, Li C Y, He J H, et al. 2004. South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon. Acta Meteor Sinica, 62(5): 561-586 (in Chinese)
- 高辉,何金海,谭言科等. 2001. 40 a 南海夏季风建立日期的确定. 南京气象学院学报, 24(3): 379-383. Gao H, He J H, Tan Y K, et al. 2001. Definition of 40-year onset date of South China Sea summer monsoon. J Nanjing Insti Meteor, 24(3): 379-383 (in Chinese)
- 谷德军,纪忠萍,林爱兰. 2018. 影响南海夏季风爆发年际变化的关键海区及机制初探. 热带气象学报, 34(1): 1-11. Gu D J, Ji Z P, Lin A L. 2018. The key oceanic regions affecting interannual variation of onset date of SCSSM and their preliminary mechanisms. J Trop Meteor, 34(1): 1-11 (in Chinese)
- 胡娅敏,翟盘茂,罗晓玲等. 2014. 2013 年华南前汛期持续性强降水的大尺度环流与低频信号特征. 气象学报, 72(3): 465-477. Hu Y M, Zhai P M, Luo X L. 2014. Large scale circulation and frequency signal characteristics for the persistent extreme precipitation in the first rainy season over South China in 2012. Acta Meteor Sinica, 72(3): 465-477 (in Chinese)
- 李汀, 琚建华. 2013. 孟加拉湾西南季风与南海热带季风季节内振荡特征的比较. 气象学报, 71(3): 492-504. Li D, Ju J H. 2013. A comparison of intra-seasonal oscillation characteristics between the southwest monsoon of the Bay of Bengal and the South China Sea summer monsoon. Acta Meteor Sinica, 71(3): 492-504 (in Chinese)
- 梁潇云,刘屹岷,吴国雄. 2005. 青藏高原对亚洲夏季风爆发位置及强度的影响. 气象学报, 63(5): 799-805. Liang X Y, Liu Y M, Wu G X. 2005. Effect of Tibetan Plateau on the site of onset and intensity of the Asian summer monsoon. Acta Meteor Sinica, 63(5): 799-805 (in Chinese)
- 刘莹飞,李青,何金海等. 2009. 中南半岛与南海热力差异对南海季风爆发的影响. 气象学报, 67(1): 100-107. Liu X F, Li Q, He J H, et al. 2009. Effects of the thermal contrast between Indo-China Peninsula and South China Sea on SCS monsoon onset. Acta Meteor Sinica, 67(1): 100-107 (in Chinese)
- 刘屹岷,吴国雄,刘辉等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报, 57(5): 525-538. Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part III: Condensation heating and South Asia high and Western Pacific subtropical high. Acta Meteor Sinica, 57(5): 525-538 (in Chinese)
- 柳艳菊,丁一汇. 2007. 亚洲夏季风爆发的基本气候特征分析. 气象学报, 65(4): 511-526. Liu Y J, Ding Y H. 2007. Analysis of the basic features of the onset of Asian summer monsoon. Acta Meteor Sinica, 65(4): 511-

- 526 (in Chinese)
- 温敏, 何金海, 肖子牛. 2004. 中南半岛对流对南海夏季风建立过程的影响. *大气科学*, 28(6): 864-875. Wen M, He J H, Xiao Z N. 2004. Impact of the convection over the Indo-China Peninsula on the onset of SCS summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 28(6): 864-875 (in Chinese)
- 温之平, 吴乃庚, 陈桂兴. 2016. 南海夏季风爆发早晚的经向环流异常的机理研究. *大气科学*, 40(1): 63-77. Wen Z P, Wu N G, Chen G X. 2016. Mechanisms for the anomaly of local meridional circulation during early and delayed onsets of the South China Sea summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 40(1): 63-77 (in Chinese)
- 张永生, 吴国雄. 1999. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析 II: 青藏高原及邻近地区地表感热加热的作用. *气象学报*, 57(1): 56-73. Zhang Y S, Wu G X. 1999. diagnostic investigations on the mechanism of the onset of Asian Summer Monsoon and abrupt seasonal transitions over the northern hemisphere. Part II: The role of surface sensible heating over Tibetan Plateau and surrounding regions. *Acta Meteor Sinica*, 57(1): 56-73 (in Chinese)
- 赵欢, 张人禾, 温敏. 2015. 2013年5月华南强降雨与中国南海夏季风爆发. *气象学报*, 73(3): 4442-458. Zhao H, Zhang R H, Wen M. 2015. Severe rainfalls in South China during May 2013 and its relation to the onset of the South China Sea summer monsoon. *Acta Meteor Sinica*, 73(3): 4442-458 (in Chinese)
- 郑彬, 蒙伟光. 2006. 2004年南海夏季风的爆发及中南半岛陆面过程的可能影响 I: 诊断分析. *气象学报*, 64(1): 72-80. Zheng B, Meng W G. 2006. The features of South China Sea summer monsoon onset of 2004 and the possible effects of land-surface process in Indo-China Peninsula I: Diagnostic study. *Acta Meteor Sinica*, 64(1): 72-80 (in Chinese)
- Bao Y Y, Jv J H, Jin R H. 2010. Reasons for the late onset and anomalous southward persistence of the South China Sea summer monsoon in 2005. *J Trop Meteor*, 16(1): 27-34
- Ding Y H, Liu Y J. 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998. *J Meteor Soc Japan*, 79(1B): 255-276
- Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment. *Adv Atmos Sci*, 21(3): 343-360
- Ding Y H, Liu Y J, Song Y F, et al. 2015. From MONEX to the global monsoon: A review of monsoon system research. *Adv Atmos Sci*, 32(1): 10-31
- He B, Zhang Y, Li T, et al. 2017. Interannual variability in the onset of the South China Sea summer monsoon from 1997 to 2014. *Atmos Ocean Sci Lett*, 10(1): 73-81
- He J H, Xu H M, Wang L J, et al. 2003. Climatic features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism. *Acta Meteor Sinica*, 27(S1): 19-34
- Hu P, Chen W, Huang R P. 2018. On the weakening relationship between the South China Sea summer monsoon onset and cross-equatorial flow after the late 1990s. *Int J Climatol*, 38(7): 3202-3208
- Hu P, Chen W, Chen S F. 2020. Extremely early summer monsoon onset in the South China Sea in 2019 following an El Niño event. *Mon Wea Rev*, 148(5): 1877-1890
- Huangfu J L, Chen W, Wang X, et al. 2018. The role of synoptic-scale waves in the onset of the South China Sea summer monsoon. *Atmos Sci Lett*, 19(11): e858
- Jiang X W, Wang Z Y, Li Z N. 2018. Signature of the South China Sea summer monsoon onset on spring-to-summer transition of rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Climate Dyn*, 51(9): 3785-3796
- Lau K M, Yang S. 1997. Climatology and interannual variability of the southeast Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 14(2): 141-162
- Lin A L, Zhang R H, He C. 2017. The relation of cross-equatorial flow during winter and spring with South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 37(13): 4576-4585
- Liu B Q, Liu Y M, Wu G X, et al. 2015. Asian summer monsoon onset barrier and its formation mechanism. *Climate Dyn*, 45(3-4): 711-726
- Liu B Q, Zhu C W. 2016. A possible precursor of the South China Sea summer monsoon onset: Effect of the South Asian High. *Geophys Res Lett*, 43(20): 11072-11079
- Liu B Q, Zhu C W. 2020. Boosting effect of tropical cyclone "Fani" on the onset of the South China Sea summer monsoon in 2019. *J Geophys Res: Atmos*, 125(4): e2019JD031891
- Martin G M, Chevuturi A, Comer R E, et al. 2019. Predictability of South China Sea summer monsoon onset. *Adv Atmos Sci*, 36(3): 253-260
- Matsumoto J. 1997. Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region. *Adv Atmos Sci*, 14(2): 231-245
- Qian Y F, Zhang Y Q, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, 23(6): 593-613
- Shao X, Huang P, Huang R H. 2015. Role of the phase transition of intraseasonal oscillation on the South China Sea summer monsoon onset. *Climate Dyn*, 45(1-2): 125-137
- Wang B, Ho L. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J Climate*, 15(4): 386-398
- Wang B, Ho L, Zhang Y S, et al. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon. *J Climate*, 17(4): 699-710
- Wang L, Chen G H. 2018. Relationship between South China Sea summer monsoon onset and landfalling tropical cyclone frequency in China. *Int J Climatol*, 38(7): 3209-3214
- Wu G X, Guan Y, Liu Y M, et al. 2012. Air-sea interaction and formation of the Asian summer monsoon onset vortex over the Bay of Bengal. *Climate Dyn*, 38: 261-279
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 33(4): 411-432
- Xing N, Li J P, Wang L N. 2016. Effect of the early and late onset of summer monsoon over the Bay of Bengal on Asian precipitation in May. *Climate Dyn*, 47(5): 1961-1970
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J Atmos Sci*, 30(4): 611-627