

郑彬,谷德军,林爱兰,等,2023. 2021 年南海夏季风爆发偏迟原因分析[J]. 气象,49(12):1468-1480. Zheng B, Gu D J, Lin A L, et al, 2023. Possible causes for late onset of the South China Sea summer monsoon in 2021[J]. Meteor Mon, 49(12):1468-1480(in Chinese).

## 2021 年南海夏季风爆发偏迟原因分析\*

郑彬 谷德军 林爱兰 陈静 屈静玄 朱泳

中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510640

**提 要:** 通常 La Niña 年南海夏季风爆发偏早, 但是 2021 年 La Niña 背景下南海夏季风于 5 月第 6 候爆发, 较常年偏迟。利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 从热带海温异常 (SSTA) 和季节内振荡 (ISO) 北传的角度来分析 2021 年南海夏季风爆发偏迟的原因。结果表明 La Niña 确实使春季的西太平洋副热带高压 (以下简称西太副高) 减弱, 特别是 4 月之前; 但是由于热带印度洋海温在冬春季持续偏暖的背景下抵消了 La Niña 的影响, 特别是在 5 月, La Niña 的影响小于热带印度洋的作用, 导致 5 月西太副高偏强, 南海夏季风爆发偏迟。此外, 受 La Niña 影响, 4 月西太副高偏弱, 南海地区背景正压南风偏弱, 不利于南海地区赤道 ISO 的北传, 这与气候态正好相反; 随着热带印度洋 SSTA 的影响越来越显著, 西太副高逐渐加强, 直到 5 月下旬, 背景正压经向南风才扩展到 10°N 以南地区, 导致 2021 年南海地区赤道 ISO 北传偏迟, 这也是 2021 年南海夏季风爆发偏迟的一个重要原因。热带印度洋和太平洋 SSTA 通过“竞争”共同对南海夏季风爆发产生影响, 因此关注二者在冬春季的发展非常重要。

**关键词:** 南海, 夏季风, 爆发, 海表温度

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.101201

## Possible Causes for Late Onset of the South China Sea Summer Monsoon in 2021

ZHENG Bin GU Dejun LIN Ailan CHEN Jing QU Jingxuan ZHU Yong

Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA/Guangdong Provincial  
Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510640

**Abstract:** The South China Sea summer monsoon usually breaks out earlier in the La Niña year, but a late onset (6th pentad of May) appeared in 2021, though 2020/2021 was the year of La Niña. Using NCEP/NCAR reanalysis data, the reasons for the late onset of the South China Sea summer monsoon in 2021 are analyzed from the perspective of tropical sea surface temperature anomaly (SSTA) and intraseasonal oscillation (ISO) northward propagation. The results show that La Niña did weaken the Western Pacific subtropical high in spring, especially before April. However, the tropical Indian Ocean sea surface temperature in the winter and spring continued to be warmer, offsetting the impact of La Niña, especially in May. The influence of La Niña was less than that of the tropical Indian Ocean, resulting in the stronger Western Pacific subtropical high in May and the late onset of the South China Sea summer monsoon. In addition, due to the influence of La Niña, the Western Pacific subtropical high in April was weak and the background barotropic southerly in the South China Sea was weak, which unfavored the equatorial ISO in the South China Sea propagating northward. As the influence of tropical Indian Ocean SSTA became more and more significant, the Western Pacific subtropical high has gradually strengthened, and the background

\* 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515011399、2022A1515011870)和国家自然科学基金项目(41705089)共同资助

2022 年 1 月 11 日收稿; 2023 年 10 月 17 日收修定稿

第一作者: 郑彬, 主要从事季风气候变率、机理及其预测研究. E-mail: zhb@ustc.edu

barotropic southerly did not extend to the area south of  $10^{\circ}\text{N}$  until late May, causing a late northward propagation of the equatorial ISO in the South China Sea in 2021, which is the opposite of the climatic state. This is also an important reason for the late onset of the South China Sea summer monsoon in 2021. The tropical Indian Ocean and Pacific SSTAs together have an impact on the onset of the South China Sea summer monsoon through competition, so it is very important to pay attention to the development of the two in winter and spring.

**Key words:** South China Sea, summer monsoon, onset, sea surface temperature

## 引 言

南海夏季风是影响中国降水的重要系统,其爆发预示着东亚夏季环流的发展。南海夏季风的活动不仅是华南雨季(前汛期)进入盛期的标志(谢炯光等,2008;陈隆勋等,2000),还会对东亚,甚至北半球的环流和天气都产生重要影响。此外,作为东亚季风的重要组成部分,南海夏季风是连接印度/孟加拉湾季风、西北太平洋季风和东亚副热带季风的纽带,其独特的地理位置也越来越受世界各国的高度重视。因此,随着社会经济的发展,每年南海夏季风的爆发日期成为每年海洋和大气领域都重点关注的內容之一。

南海夏季风爆发的研究比较丰富,影响因子主要包含外强迫作用和大气内部动力热力学过程(邵懿等,2014)。大气内部过程包括热带季节内振荡(ISO)(林爱兰等,2016;李春晖等,2017),越赤道气流(陶诗言等,1983;李崇银和吴静波,2002;高辉和薛峰,2006;Lin et al,2017;鲍媛媛,2021)和中高纬度系统(Chang and Chen,1995;温之平等,2006;张立凤等,2008;林爱兰等,2010a;2010b)的影响。外强迫作用主要包含了海温异常(SSTA)(毛江玉等,2000;陈隽和金祖辉,2001;梁卫等,2009;林爱兰等,2013)和陆面过程的影响,而后者主要有青藏高原的动力热力作用(Wu and Zhang,1998;陈隽和金祖辉,2001;邵慧和钱永甫,2001;简茂球和罗会邦,2001;于乐江和胡敦欣,2008)和中南半岛的作用(王世玉和钱永甫,2001;郑彬和蒙伟光,2006;蒙伟光和郑彬,2006)。此外,太阳活动周期变化(周群和陈文,2020)对南海夏季风的爆发也有一定的影响,但是最受关注的外强迫因子还是海温,特别是 ENSO 海温分布型对南海夏季风爆发影响的研究(陈隽和金祖辉,2001;温之平等,2005;胡鹏和陈文,2018)。

ENSO 对影响我国的天气气候系统有显著的调

制作用(殷明等,2016;罗连升等,2017;涂石飞等,2019)。以往研究表明,El Niño 年南海夏季风爆发通常偏迟,而 La Niña 年则偏早。然而,2020/2021 是 La Niña 年(韩荣青等,2021;刘芸芸和高辉,2021;赵俊虎等,2022),但 2021 年南海夏季风爆发却是偏迟的。是什么原因导致 2021 年南海夏季风爆发偏迟呢? 本文从季节内振荡北传和热带海温异常出发,分析二者对 2021 年南海夏季风爆发的影响,希望了解爆发偏迟的原因。

## 1 资料与方法

本文使用的资料为 NCEP/NCAR 再分析(Kalnay et al,1996)逐日等压面的气温、比湿和水平风场,以及逐日下垫面温度和大气顶向外长波辐射(OLR)表面资料。其中等压面资料的水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,表面资料为高斯格点。NCEP/NCAR 资料气候态取 1981—2010 年。

文中南海夏季风区域定义为  $5^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 。ISO 取 10~60 d 周期,利用 11 d 滑动平均值减去 61 d 滑动平均值得到 ISO 扰动,由 61 d 滑动平均计算得到背景场。另外,用垂直积分计算的正压风场与垂直平均得到的结果非常相近(图略),因此,为计算方便,本文采取垂直平均的计算方法。

## 2 分析结果

### 2.1 2021 年南海夏季风爆发

梁建茵和吴尚森(2002)认为南海地区 850 hPa 平均纬向风大于零,西风主要源于热带低纬并持续 5 d 以上即标志着南海夏季风爆发。从气候上来看,5 月第 4 候(16—20 日)时,南海夏季风区域低层 850 hPa 风场全面由东风转为西风并持续(图 1c),表明气候上的南海夏季风爆发日期为 5 月第 4 候。



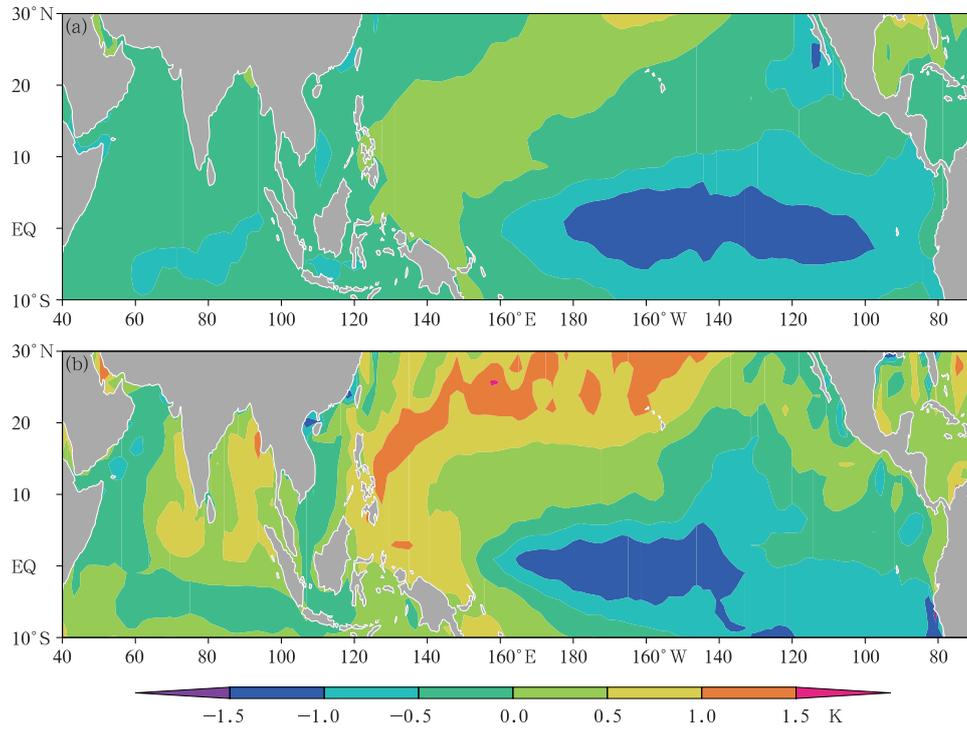


图 2 (a)1950—2021 年 La Niña 年合成的和(b)2021 年的冬季(DJF)海温异常

Fig. 2 SSTA in winter (DJF) for (a) composite of La Niña years during 1950—2021 and (b) in 2021

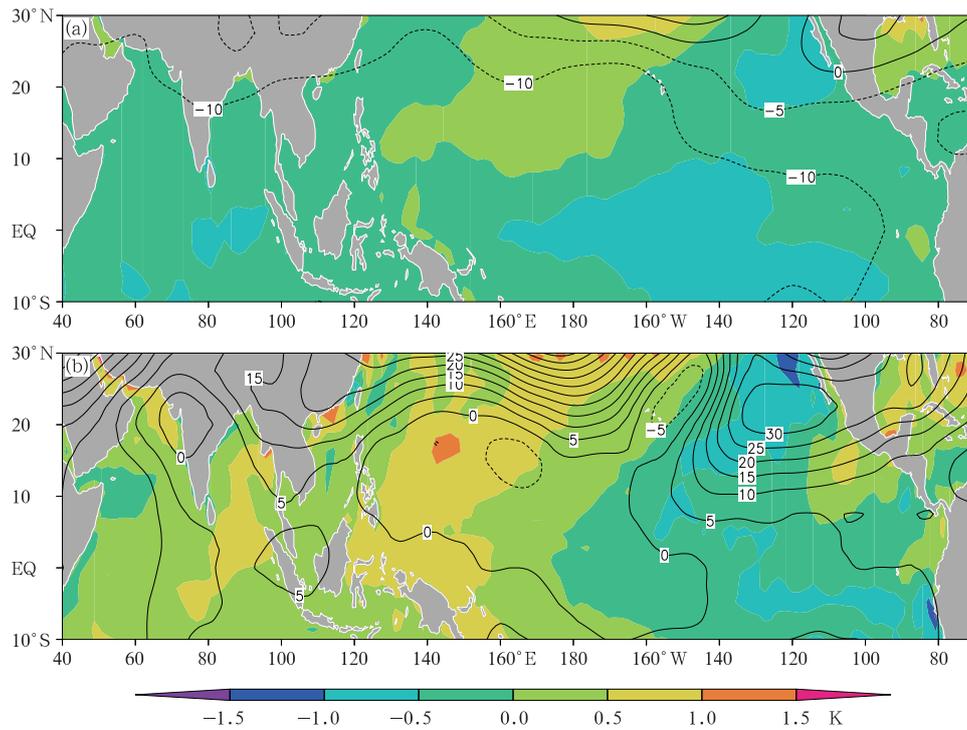


图 3 (a)1950—2021 年 La Niña 年合成的和(b)2021 年的春季(MAM)

海温异常(填色)和 500 hPa 位势高度异常(等值线,单位:gpm)

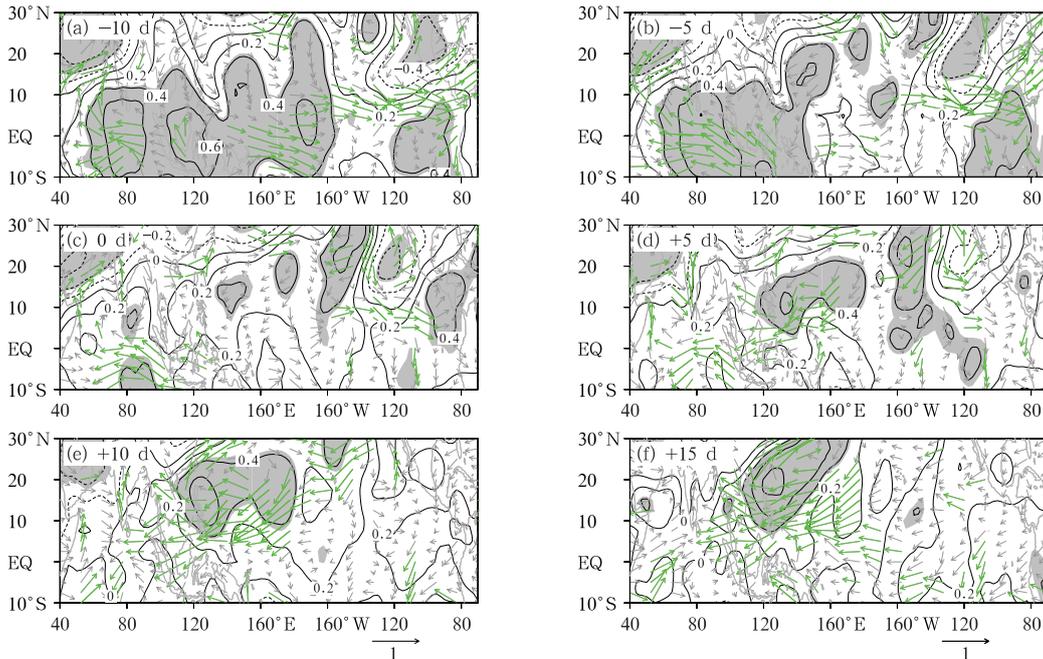
Fig. 3 SSTA (colored) and geopotential height anomaly (contour, unit: gpm) at 500 hPa in spring (MAM) for (a) composite of La Niña years during 1950—2021 and (b) in 2021

时,整个印度洋的海温几乎都是正异常(图 3b),这种印度洋-太平洋 SSTA 偶极型分布与印度洋-太平洋 SSTA 主要模态的结构有很大差异。春季发展成熟的热带印度洋全区一致的增暖通过异常纬向环流(袁媛和李崇银,2009)或者通过增加热带印度洋潜热通量(王宏娜等,2014)会使西太副高加强西伸。2021 年印度洋海盆尺度的增暖抵消了部分 La Niña 的影响,特别是在南海和  $20^{\circ}\text{N}$  以北的西北太平洋地区,副高依然是增强的(图 3b),从而使 2021 年南海夏季风爆发偏迟。

区分南海夏季风爆发早晚年,得到的热带 SSTA 结构基本还是呈现三极型分布,特别是印度洋在南海夏季风爆发偏早和偏晚的 La Niña 年都是负 SSTA,但是对以往爆发偏晚的 La Niña 年合成显示,在西北太平洋地区的 5 月确实存在异常反气旋(异常高压),而 4 月时异常高压不明显,只是从中纬度向南有一些延伸(图略)。因此以往 La Niña 年南海夏季风爆发偏迟可能与中高纬度的影响有关,而热带 SSTA(包括太平洋和印度洋)都是有利于南海夏季风偏早爆发的。

图 4 显示 2021 年赤道印度洋 SSTA 与相关环流的演变。可以看到,超前的反气旋和高压异常是 MAM 印度洋海盆尺度增暖的重要因子(图 4a, 4b),而之后印度洋增暖的 SSTA 对西北太平洋反气旋有显著贡献(图 4d~4f)。印度洋暖 SSTA 如何与西北太平洋反气旋联系在一起?从图 5 可以看到,印度洋暖 SSTA 区有显著的上升运动,而热带西北太平洋地区则是下沉运动。印度洋暖 SSTA 和西北太平洋反气旋之间正是通过异常的纬向垂直环流相联系,这与袁媛和李崇银(2009)的结果是一致的。

从图 3b 可以看到,2021 年 MAM 的西太平洋 SSTA 也有较大的正异常,而春季西太平洋热状态对南海夏季风爆发也有重要影响(黄荣辉等,2005)。接下来将考察其在西北太平洋异常反气旋中的作用。从图 6 可以看到,超前的低压异常将导致赤道西太平洋地区的异常辐合运动,会使海水下翻,更多的表层热海水聚集在赤道西太平洋引起增温(图 6a,6b)。而之后增暖的赤道西太平洋 SSTA 在西北太平洋激发出异常气旋(图 6d 已经出现,但不明



注:阴影和绿色箭头为通过 0.05 显著性水平检验的区域,图 a~图 f 分别为 SSTA 落后 10 d 到超前 15 d。

图 4 2021 年 MAM 赤道印度洋 ( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ) SSTA 与 850 hPa 风场的偏相关系数(箭头),与高度场的偏相关系数(等值线)

Fig. 4 Partial correlation coefficients between the equatorial Indian Ocean ( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ) SSTA and the 850 hPa wind (vector) and height (contour) in MAM of 2021

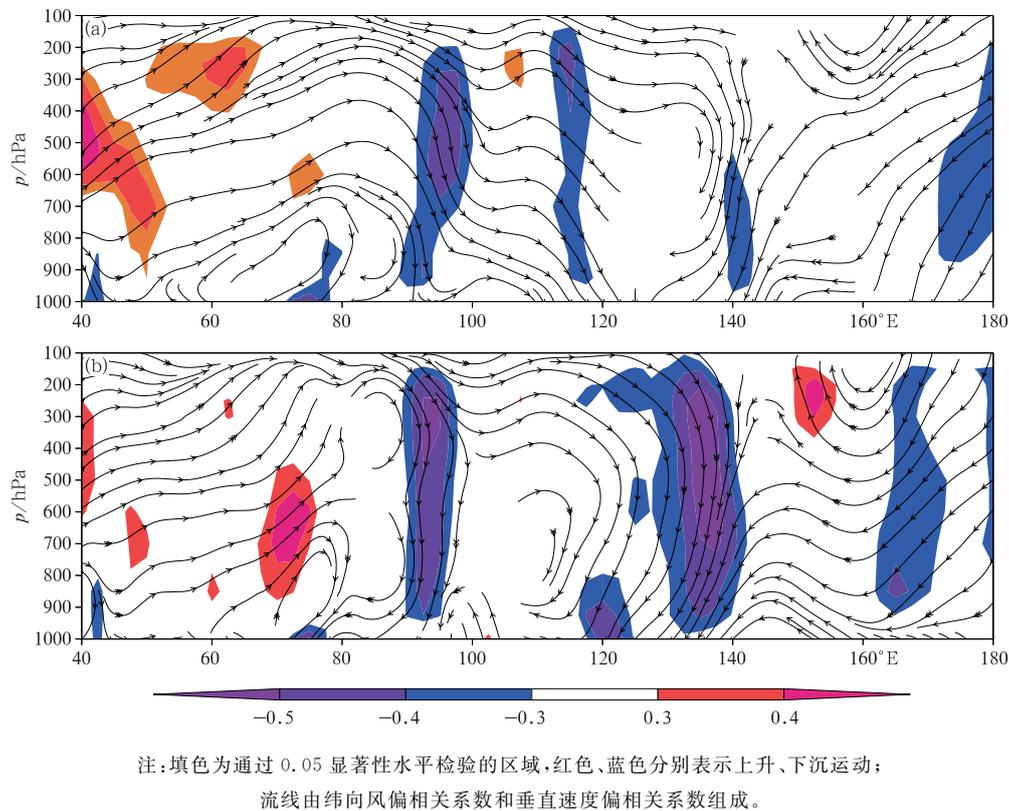


图 5 2021 年 MAM 赤道印度洋(5°S~5°N、40°~100°E)SSTA 与 10°~20°N 平均纬向垂直环流的偏相关系数  
(a)同时相关,(b)SSTA 超前 5 d

Fig. 5 Partial correlation coefficients between the equatorial Indian Ocean (5°S–5°N, 40°–100°E) SSTA and the 10°–20°N averaged vertical zonal circulation in MAM of 2021  
(a) simultaneous correlation, (b) SSTA being 5 d ahead

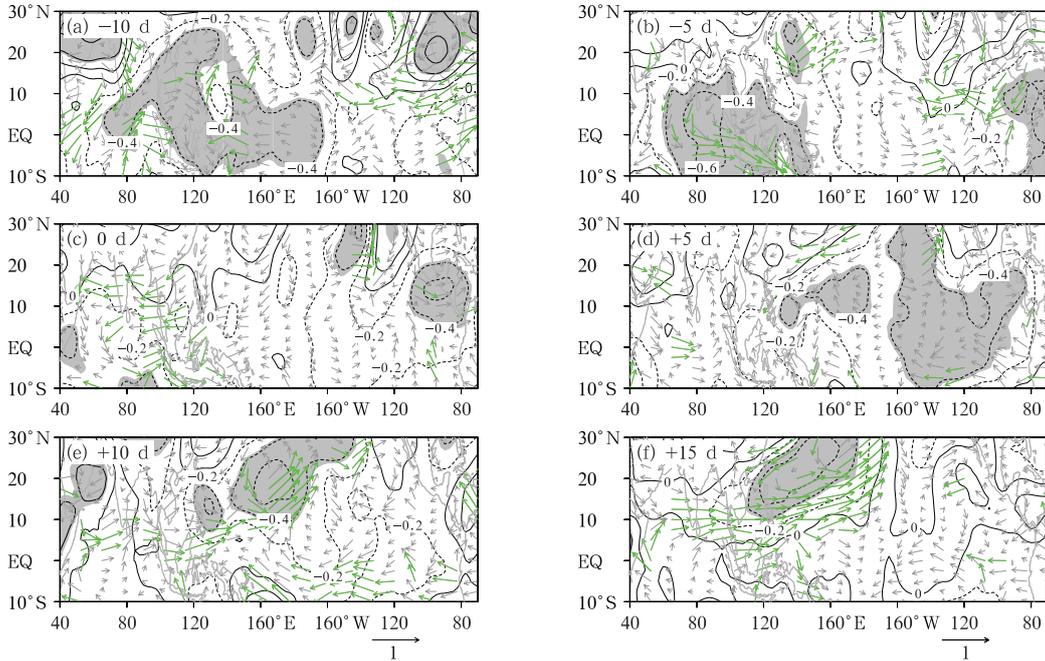
显,图 6e 和 6f 则非常明显)。由此可见,赤道西太平洋 SSTA 对西北太平洋异常反气旋有负贡献,与赤道中东太平洋 SSTA(La Niña)的结果一致(有利于南海夏季风提早爆发),因此印度洋 SSTA 与赤道太平洋 SSTA 的“竞争”是西北太平洋反气旋形成的关键,也即是导致 2021 年南海夏季风爆发偏迟的关键。后文将给出另外的证据表明印度洋 SSTA 在“竞争”中逐渐占优。

### 2.3 ISO 北传的影响

已有许多研究指出 ISO 北传对南海夏季风爆发有显著作用(Zhou and Chan, 2005; Zhou and Murtugudde, 2014; Wang et al, 2018),主要通过发展减弱西太副高,促使其东撤和热带西风向东推进。从图 7a 可以看到,气候态的 10~60 d 尺度的 OLR 从 5 月初开始北传,对流中心在 5 月第 4 候左右传到南海北部;而 2021 年的 10~60 d 尺度的

OLR 从 5 月 16 日左右才开始北传,对流中心在 5 月底传播到南海北部(图 7b)。是什么原因导致 2021 年 ISO 北传偏迟,进而使南海夏季风爆发偏迟?

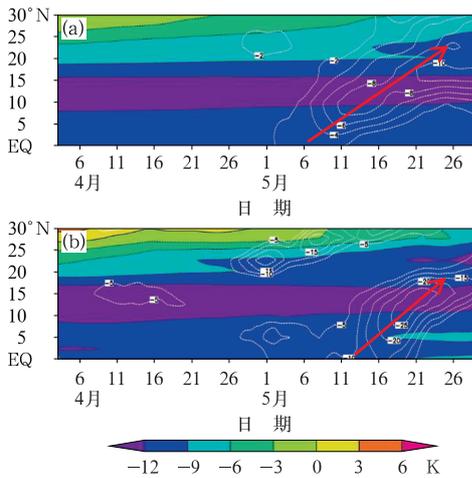
赤道地区的 ISO 对流向北传播的机制已有很多研究,多是对季风爆发后的北半球夏季 ISO,但是总的来说 ISO 北传主要归因于大气背景场的分布结构(DeMott et al, 2013)。由于季风爆发前后的大气环流背景差异,因此爆发前后的机制并不能等效。如爆发后的东风垂直切变机制(Wang and Xie, 1997; Jiang et al, 2004; Drbohlav and Wang, 2005),在爆发前由于背景场是低层东风、高层西风,是西风垂直切变,不利于 ISO 北传。Li et al(2013)提出了季风爆发前 ISO 北传的背景对流不稳定性经向不对称机制,这个机制的关键就是对流不稳定性经向梯度,如果随着纬度增大,对流不稳定性增大,则有利于 ISO 向北传播。本文的对流不稳定性采用



注:阴影和绿色箭矢为通过 0.05 显著性水平检验的区域,图 a~图 f 分别为 SSTA 落后 10 d 到超前 15 d。

图 6 2021 年 MAM 赤道西太平洋(5°S~10°N,140°~160°E)SSTA 与 850 hPa 风场的偏相关系数(箭矢),与高度场的偏相关系数(等值线)

Fig. 6 Partial correlation coefficients between the equatorial Western Pacific (5°S-10°N, 140°-160°E) SSTA and the 850 hPa wind (vector) and height (contour) in MAM of 2021



注:红色箭头表示 10~60 d 对流中心传播方向。

图 7 105°~120°E 平均背景对流不稳定性(填色)和 10~60 d 滤波后 OLR(等值线,单位:W·m<sup>-2</sup>)分布  
(a)气候态,(b)2021 年

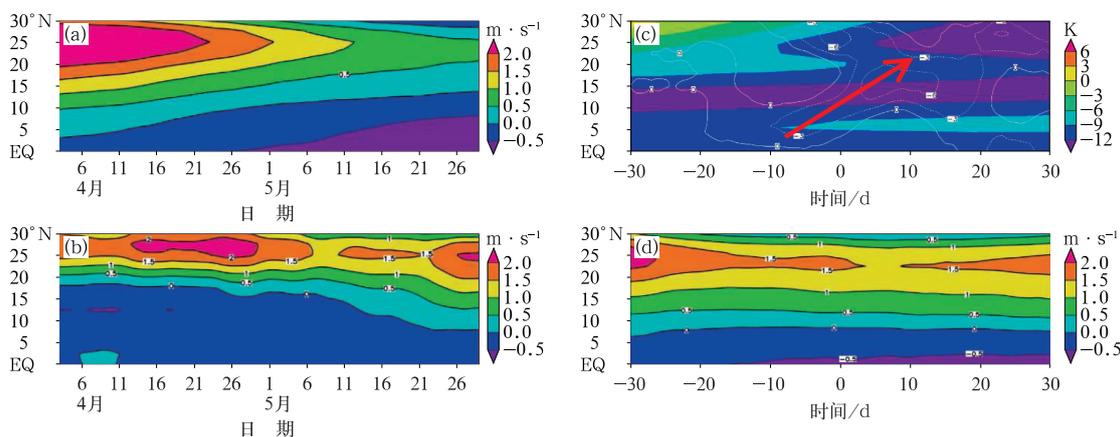
Fig. 7 Background convective instability (colored) and 10-60 d filtering OLR (contour, unit: W·m<sup>-2</sup>) averaged in 105°-120°E  
(a) climatology, (b) in 2021

郑彬等(2006)定义:

$$\Delta\theta_{se} = \theta_{se} |_{700 \text{ hPa}} - \theta_{se} |_{925 \text{ hPa}}$$

式中  $\theta_{se}$  为假相当位温。当  $\Delta\theta_{se} < 0$ , 为对流不稳定;反之则稳定。从图 7 可以看到,2021 年 4—5 月的对流不稳定度的分布与气候态非常相似,最大的不稳定区域位于 12.5°N。也就是说背景对流不稳定度机制仅仅在 12.5°N 以南区域有利于 ISO 北传,并不能解释季风爆发前 ISO 对流从赤道附近传播到南海北部。

最近,有学者提出了季风爆发前 ISO 北传的正压涡度平流机制(Zheng and Huang, 2019; Zheng et al, 2019)。该机制的关键是背景正压经向南风对 ISO 对流引起的正压涡度正异常的平流输送,导致了对流北部超前的正压涡度正异常,从而有利于 ISO 向北传播。从图 8a 可以看到,气候的背景正压经向南风在 4 月初时几乎覆盖整个南海,随着时间推移,背景正压经向南风的范围逐渐缩小,虽然 5 月上半月只有 10°N 以北的南海北部有背景正压经向南风,但是结合背景对流不稳定度机制,季风爆发前的 ISO 依然可以向北传播;而 5 月下半月时,背景正压经向南风的范围继续缩小,南界在 12.5°N 附



注:图 c 和图 d 中横坐标的零值代表南海夏季风爆发日期,负值代表南海夏季风爆发之前,正值代表之后;红色箭头表示 10~60 d 对流中心传播方向。

图 8 105°~120°E 平均的 850~200 hPa(a,b,d)背景正压经向风(填色和等值线), (c)对流不稳定性(填色)和 10~60 d OLR(等值线,单位:W·m<sup>-2</sup>)分布 (a)气候态,(b)2021 年,(c,d)La Niña 年合成

Fig. 8 (a, b, d) Background barotropic meridional wind (colored and contour) averaged in 105°-120°E and 850-200 hPa, (c) convective instability (colored) and 10-60 d filtering OLR (contour, unit: W·m<sup>-2</sup>) (a) climatology, (b) in 2021, (c, d) composite of La Niña years

近,这时南海主要由背景斜压经向风所控制,爆发前的机制已经不适用 ISO 向北传播到南海北部。而 2021 年背景正压经向南风虽然逐渐向南扩张,但是在 5 月上旬之前一直在 15°N 以北(图 8b),即使结合背景对流不稳定性机制也不能有效地促使赤道地区对流向整个南海传播。一直到 5 月中下旬,背景正压经向南风扩展到 12.5°N 以南,有利于 ISO 向北传播到南海北部。

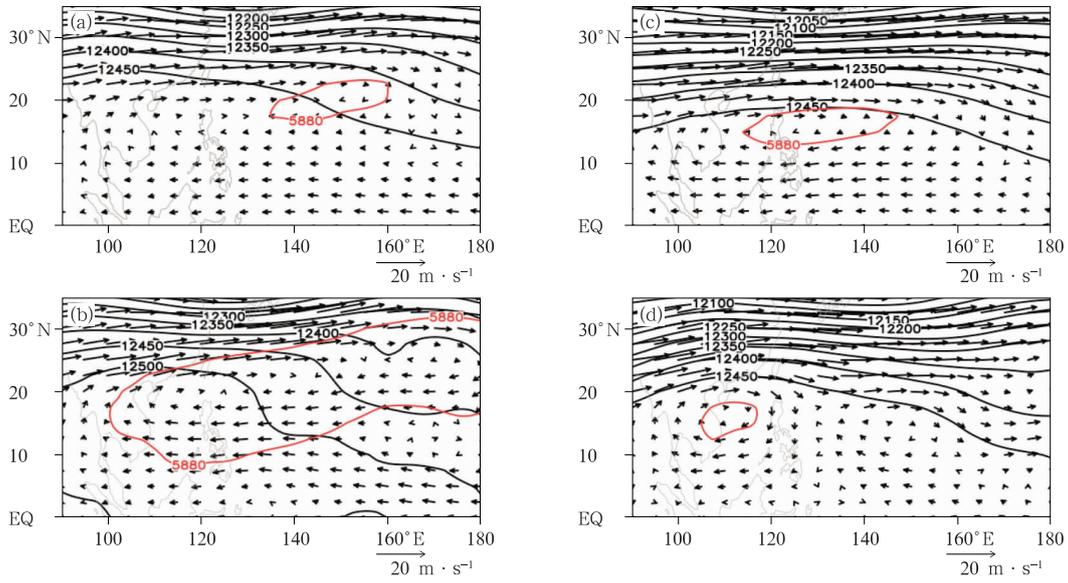
正是由于 2021 年背景正压经向风演变与气候态的差异,使得 ISO 在 5 月中旬之前不能向北传播到南海北部,延缓了南海夏季风的爆发。而背景正压经向南风是由高层南亚高压和低层西太副高决定的。季风爆发前的 4 月,南海地区主要受南亚高压和西太副高西侧控制,因此,南海大部分地区有正压南风,随着南亚高压西移北推和西太副高的东撤,正压南风范围逐渐减小(图 8a)。

从图 8c 可以看到,在所有 La Niña 年的南海夏季风爆发前都有显著的 ISO 北传,而相应的背景环流和不稳定性(图 8c,8d)也都支持 ISO 北传。因此,对于一般 La Niña 年而言,它对 ISO 北传的影响并不明显。当然也可能个别年出现海温显著影响 ISO 北传的例子,如 2021 年季风爆发前的 ISO 北传,海温起了显著的作用,但是在本文中也仅提到海

温的显著影响,而没有排除其他影响因子,因为影响西太副高异常的因素很复杂。

2021 年为什么 4 月的正压南风范围很小,之后逐渐增大呢?从图 9a 和 9c 可以看到,气候态的 4 月位势高度 5880 gpm 线西侧压着南海,5 月则撤出南海。相应地,南海 4 月有显著的正压南风,5 月不明显。而 2021 年 200 hPa 位势高度线分布与气候态非常相似,那么高层风场也与气候态相近。由于正压南风主要源于高低层风场的一致性,可见异常的正压南风演变主要来自中低层风场变化(与西太副高的分布有关)的影响。从图 9b 和 9d 可以看到,受 La Niña 影响,2021 年 4 月热带西北太平洋地区位势高度降低,500 hPa 的 5880 gpm 线仅仅局限在南海,南海地区主要受正压北风影响,而 5 月时副高控制区域明显增大,向东延伸到西北太平洋地区,南海地区主要受正压南风影响。

2021 年 4 月西太副高控制范围偏小(图 9d),而 5 月明显增大,可能与太平洋海温异常的影响减小,而印度洋的影响增大有关。从图 10 可以看到,背景 Niño3.4 区域 SSTA 持续减小,而赤道印度洋地区的 SSTA 则从 4 月中旬开始直到 5 月底,一直维持一个相对的大值。由此可见,2021 年 4 月西太副高受 La Niña 影响更大,而之后主要由印度洋 SSTA



注:红线为 500 hPa 的 5880 gpm 等值线。

图 9 (a,c)气候态,(b,d)2021 年的(a,b)5 月和(c,d)4 月 850~200 hPa 平均水平正压风场(风矢)与 200 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)分布

Fig. 9 The distribution of barotropic horizontal wind (vector) averaged in 850–200 hPa and geopotential height (contour, unit: gpm) at 200 hPa in (a, b) May and (c, d) April (a, c) climatology, (b, d) in 2021

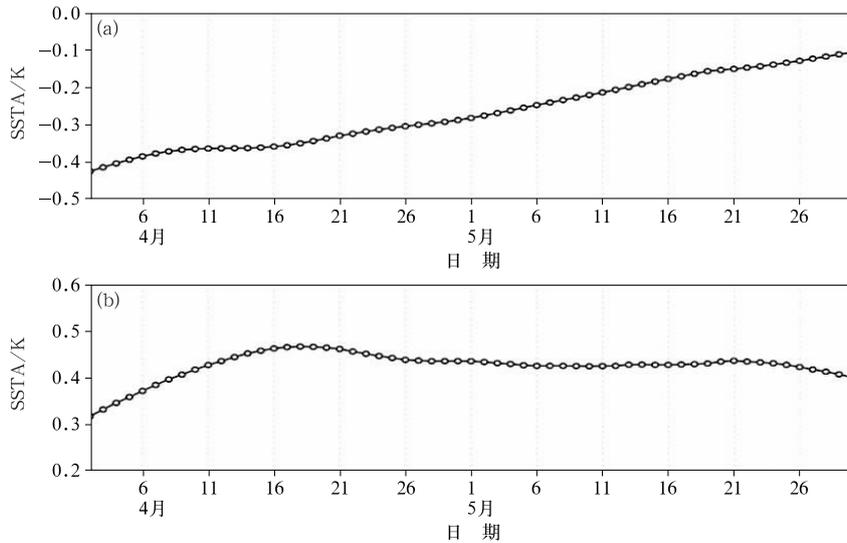


图 10 2021 年 4—5 月区域平均背景 SSTA

(a)Niño3.4 区域(5°S~5°N,120°~170°W),(b)赤道印度洋(5°S~5°N,40°~100°E)

Fig. 10 Background SSTA in April and May 2021

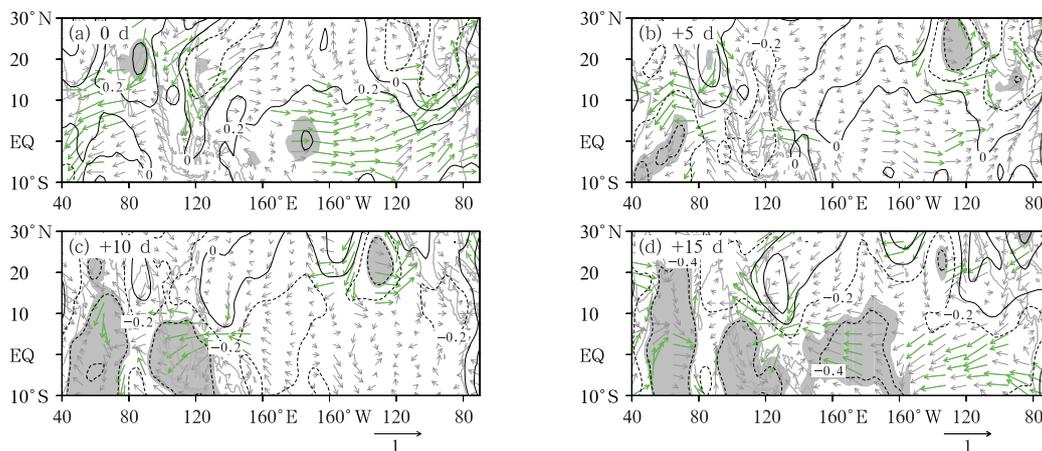
(a) Niño3.4 zone (5°S–5°N, 120°–170°W),

(b) equatorial Indian Ocean (5°S–5°N, 40°–100°E)

进行调制加强。

图 11 给出了印度洋-太平洋 SSTA 联合模态相关的环流演变,可以看到,在 0 d 时,西北太平洋有

异常气旋,而+5 d 时异常气旋减弱,之后的异常反气旋逐渐加强,变得越来越显著。这进一步表明印度洋 SSTA 在“竞争”中逐渐占优,导致 5 月西北太



注:阴影和绿色箭头为通过 0.05 显著性水平检验的区域,图 a~图 d 分别为 SSTA 超前 0~15 d。

图 11 2021 年 MAM 印度洋-太平洋联合模态指数与 850 hPa 风场的相关系数(箭头),与高度场的相关系数(等值线)

Fig. 11 Correlation coefficients between the joint mode index of the Pacific-Indian Ocean SSTA and the 850 hPa wind and height in MAM of 2021

平洋异常反气旋的加强(西太副高的增强)和南海夏季风的偏迟爆发。另一方面,逐渐加强的西太副高使 5 月南海地区的背景正压南风也慢慢增强,5 月下旬时扩展到  $10^{\circ}\text{N}$  以南地区,引导了 ISO 的北传,最终导致南海夏季风在 5 月底爆发。

### 3 结论与讨论

南海夏季风爆发代表冬季环流完成向夏季环流的转化,代表热带环流系统开始影响我国的天气气候,因此一直是我国汛期会商的重要内容之一。影响南海夏季风爆发的因子通常包含外强迫和大气内部动力学过程,其中外强迫,特别是海温异常的强迫尤其得到重视。以往研究表明,El Niño 年南海夏季风爆发通常偏迟,而 La Niña 年则偏早。然而 2020/2021 是 La Niña 年,但是 2021 年的南海夏季风爆发却是偏迟的。本文从热带 SSTA 和 ISO 北传出发,分析其对 2021 年南海夏季风爆发的影响,得到如下结果。

(1)2021 年冬春季的热带太平洋海温异常(热带中东太平洋偏冷,热带西北太平洋偏暖)确实使西太副高减弱,但是由于热带印度洋海温持续偏暖,抵消了这种减弱效应。随着热带太平洋海温异常减弱,热带印度洋海温异常对西太副高的作用越来越大,到 2021 年 5 月,则以热带印度洋海温异常控制为主,导致西太副高偏强,南海夏季风爆发偏迟。

(2)2021 年南海地区赤道 ISO 北传偏迟也是南

海夏季风爆发晚的一个重要因素。主要过程是 4 月西太副高偏弱引起正压南风减弱,从而不支持 ISO 向北传播;之后随着热带印度洋海温异常的影响逐渐增大,南海地区正压南风也逐渐增强,5 月下旬时扩展到  $10^{\circ}\text{N}$  以南地区,有利于 ISO 北传。

如果仅考虑 La Niña 的作用(ISO 北传也仅考虑 La Niña 的影响),那么必然只有其衰减期春季西北太平洋的异常气旋和 ISO 北传的推迟,且 ISO 北传将在 La Niña 的影响结束或减弱(夏季)后才会出现,此时的南海夏季风早已爆发,背景风场也已改变,ISO 的影响已经不重要了。因此,如果仅考虑 La Niña 的作用,那么其引起的西北太平洋异常气旋将起主要作用,南海夏季风将偏早爆发。当然,ISO 北传不仅会受 La Niña 的影响,印度洋 SSTA 也可能有一定的调制作用,如本文提到的 2021 年 ISO 北传就明显受印度洋海盆尺度 SSTA 的影响。对于一般 La Niña 年,南海夏季风爆发偏早和偏迟的年份是相当的,而从图 8c 可以看到,La Niña 衰减年南海夏季风爆发前都有显著的 ISO 北传,可见 ISO 北传是影响南海夏季风爆发的关键因子,而 La Niña 仅仅提供有利爆发的气候背景。

热带印度洋和太平洋 SSTA 都会对南海夏季风爆发产生影响,二者通过“竞争”或者共同作用可能会对南海夏季风爆发产生不同影响,因此关注二者在冬春季的发展非常重要。此外,ISO 北传对南海夏季风的爆发也非常重要,但其本身受背景场的影响,而背景场通常与外强迫(如海温异常)有联系。

实际上,ISO 和海温的确存在相互作用过程。例如, Kemball-Cook and Wang(2001) 提出一个海温对 ISO 北传的影响机制,而之后 Jiang et al(2004) 和 Gao et al(2019) 研究发现,海温通过调制表面潜热和感热通量,可以对 ISO 北传做出贡献(最大达到约 20%),但是总的来说海温对 ISO 北传有调制作用,但并不是关键因子;而 ISO 通过影响表面潜热通量,也会进一步影响局地海温(Kemball-Cook and Wang,2001),而且亚澳季风区 ISO 通过大气桥能够影响赤道中东太平洋海温(李崇银和周亚萍,1994;李崇银和李桂龙,1999),但是 ISO 对 ENSO 也仅仅有调制作用,而不是决定作用。因此,总体来看,ISO 和海温异常虽然有相互作用,但是并不是决定因素,因此本研究中我们将二者分别讨论。

### 参考文献

- 鲍媛媛,2021. 2019 年南海季风爆发异常偏早的机制分析[J]. 气象学报,79(3):400-413. Bao Y Y,2021. Mechanisms for the abnormally early onset of the South China Sea summer monsoon in 2019[J]. Acta Meteor Sin,79(3):400-413(in Chinese).
- 陈隽,金祖辉,2001. 影响南海夏季风爆发因子的诊断研究[J]. 气候与环境研究,6(1):19-32. Chen J, Jin Z H,2001. Diagnosis of factors of influence on onset over the South China Sea summer monsoon[J]. Climatic Environ Res,6(1):19-32(in Chinese).
- 陈隆勋,李薇,赵平,等,2000. 东亚地区夏季风爆发过程[J]. 气候与环境研究,5(4):345-355. Chen L X, Li W, Zhao P, et al,2000. On the process of summer monsoon onset over East Asia[J]. Climatic Environ Res,5(4):345-355(in Chinese).
- 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[J]. 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[J]. Chin J Atmos Sci,40(2):243-256(in Chinese).
- 高辉,薛峰,2006. 越赤道气流的季节变化及其对南海夏季风爆发的影响[J]. 气候与环境研究,11(1):57-68. Gao H, Xue F,2006. Seasonal variation of the cross-equatorial flows and their influences on the onset of South China Sea summer monsoon[J]. Climatic Environ Res,11(1):57-68(in Chinese).
- 韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y,2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon,47(7):880-892(in Chinese).
- 胡鹏,陈文,2018. 南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及 ENSO 的作用[J]. 气候与环境研究,23(4):401-412. Hu P, Chen W,2018. The relationship between the East Asian winter monsoon anomaly and the subsequent summer monsoon onset over the South China Sea and the impact of ENSO[J]. Climatic Environ Res,23(4):401-412(in Chinese).
- 黄菲,谢瑞煌,黄少妮,2010. 印度洋-太平洋海表温度年际变化的联合模态[J]. 中国海洋大学学报,40(1):1-9. Huang F, Xie R H, Huang S N,2010. Joint modes of the Pacific-Indian Ocean sea surface temperature anomaly at interannual timescale[J]. Periodical Ocean Univ China,40(1):1-9(in Chinese).
- 黄荣辉,顾雷,徐予红,等,2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学,29(1):20-36. Huang R H, Gu L, Xu Y H, et al,2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the east Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical Western Pacific[J]. Chin J Atmos Sci,29(1):20-36(in Chinese).
- 简茂球,罗会邦,2001. 1998 年青藏高原东部及其邻近地区大气热源与南海夏季风建立的关系[J]. 高原气象,20(4):381-387. Jian M Q, Luo H B,2001. Heat sources over Qinghai-Xizang Plateau and surrounding areas and their relationships to onset of SCS summer monsoon in 1998[J]. Plateau Meteor,20(4):381-387(in Chinese).
- 据建华,陈琳玲,李崇银,2004. 太平洋-印度洋海温异常模态及其指数定义的初步研究[J]. 热带气象学报,20(6):617-624. Ju J H, Chen L L, Li C Y,2004. The preliminary research of Pacific-Indian Ocean sea surface temperature anomaly mode and the definition of its index[J]. J Trop Meteor,20(6):617-624(in Chinese).
- 李崇银,李桂龙,1999. 赤道太平洋大气低频振荡与海表水温的关系[J]. 科学通报,44(1):78-82. Li C Y, Li G L,1999. The relationship between low frequency atmospheric oscillation and SST in equatorial Pacific[J]. Chin Sci Bull,44(1):78-82(in Chinese).
- 李崇银,吴静波,2002. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用[J]. 大气科学,26(2):185-192. Li C Y, Wu J B,2002. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon[J]. Chin J Atmos Sci,26(2):185-192(in Chinese).
- 李崇银,周亚萍,1994. 热带大气季节内振荡与和 ENSO 的相互关系[J]. 地球物理学报,37(1):17-26. Li C Y, Zhou Y P,1994. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO[J]. Acta Geophysica Sin,37(1):17-26(in Chinese).
- 李春晖,潘蔚娟,李霞,等,2017. 南海-西太平洋春季对流 10~30 天振荡强度对南海夏季风爆发早晚的影响[J]. 热带气象学报,33(1):43-52. Li C H, Pan W J, Li X, et al,2017. The variation characteristics of 10-30 days oscillation intensity of spring over the South China Sea-Western Pacific Ocean and their effects on the South China Sea summer monsoon onset[J]. J Trop Meteor,33(1):43-52(in Chinese).
- 梁建茵,吴尚森,2002. 南海西南季风爆发日期及其影响因子[J]. 大气科学,26(6):829-844. Liang J Y, Wu S S,2002. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors[J]. Chin J Atmos Sci,26(6):829-844(in Chinese).
- 梁卫,温之平,李秀珍,等,2009. 南海夏季风爆发前后南海海温之演变特征[J]. 热带气象学报,25(S1):85-91. Liang W, Wen Z P, Li X Z, et al,2009. An analysis of SST variation during South China

- Sea monsoon onset period in South China Sea[J]. *J Trop Meteor*, 25(S1): 85-91(in Chinese).
- 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等, 2010a. 南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水异常变化的联系[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 49(5): 127-133. Lin A L, Gu D J, Li C H, et al, 2010a. Relationship between the onset of the South China Sea summer monsoon and abnormal variations of frontal precipitation during the first raining period in South China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 49(5): 127-133(in Chinese).
- 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等, 2010b. 南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水气候平均的联系[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 49(4): 134-138, 143. Lin A L, Li C H, Zheng B, et al, 2010b. Relationship between onset of South China Sea summer monsoon and South China frontal precipitation in the first raining period on climatological mean[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 49(4): 134-138, 143(in Chinese).
- 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等, 2016. 赤道 MJO 活动对南海夏季风爆发的影响[J]. *地球物理学报*, 59(1): 28-44. Lin A L, Gu D J, Li C H, et al, 2016. Impact of equatorial MJO activity on summer monsoon onset in the South China Sea[J]. *Chin J Geophys*, 59(1): 28-44(in Chinese).
- 林爱兰, 谷德军, 郑彬, 等, 2013. 南海夏季风爆发与南大洋海温变化之间的联系[J]. *地球物理学报*, 56(2): 383-391. Lin A L, Gu D J, Zheng B, et al, 2013. Relationship between South China Sea summer monsoon onset and Southern Ocean sea surface temperature variation[J]. *Chin J Geophys*, 56(2): 383-391(in Chinese).
- 刘芸芸, 高辉, 2021. 2021 年春季我国气候异常特征及可能成因分析[J]. *气象*, 47(10): 1277-1288. Liu Y Y, Gao H, 2021. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2021[J]. *Meteor Mon*, 47(10): 1277-1288(in Chinese).
- 罗连升, 徐敏, 杨彬, 2017. 长江中下游 2015 年盛夏低温的大气环流特征及 ENSO 的影响[J]. *气象*, 43(3): 278-285. Luo L S, Xu M, Yang W, 2017. Characteristics of atmospheric circulation over the middle and lower reaches of Yangtze River in midsummer 2015 and impact of ENSO[J]. *Meteor Mon*, 43(3): 278-285(in Chinese).
- 毛江玉, 谢安, 宋焱云, 等, 2000. 海温及其变化对南海夏季风爆发的影响[J]. *气象学报*, 58(5): 556-569. Mao J Y, Xie A, Song Y Y, et al, 2000. Impact of sea surface temperature and its variations on the onset of summer monsoon over South China Sea[J]. *Acta Meteor Sin*, 58(5): 556-569(in Chinese).
- 蒙伟光, 郑彬, 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 II: 数值试验[J]. *气象学报*, 64(1): 81-89. Meng W G, Zheng B, 2006. The features of South China Sea summer monsoon onset of 2004 and the possible effects of land-surface process in Indo-China Peninsula II: numerical simulation[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(1): 81-89(in Chinese).
- 邵慧, 钱永甫, 2001. 海陆分布和地形对 1998 年夏季风爆发的热力影响[J]. *热带气象学报*, 17(1): 45-56. Shao H, Qian Y F, 2001. Thermal influences of land-sea contrast and topography on summer monsoon of 1998[J]. *J Trop Meteor*, 17(1): 45-56(in Chinese).
- 邵颢, 黄平, 黄荣辉, 2014. 南海夏季风爆发的研究进展[J]. *地球科学进展*, 29(10): 1126-1137. Shao X, Huang P, Huang R H, 2014. A review of the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Adv Earth Sci*, 29(10): 1126-1137(in Chinese).
- 陶诗言, 何诗秀, 杨祖芳, 1983. 1979 年季风试验期间东亚地区夏季风爆发时期的观测研究[J]. *大气科学*, 7(4): 347-355. Tao S Y, He S X, Yang Z F, 1983. An observational study on the onset of the summer monsoon over Eastern Asia in 1979[J]. *Sci Atmos Sinica*, 7(4): 347-355(in Chinese).
- 涂石飞, 徐峰, 常舒捷, 等, 2019. 西北太平洋热带气旋活动对夏秋型 ENSO 事件的响应[J]. *气象*, 45(7): 920-930. Tu S F, Xu F, Chang S J, et al, 2019. Response of tropical cyclone in the Northwest Pacific for summer and autumn ENSO events[J]. *Meteor Mon*, 45(7): 920-930(in Chinese).
- 王宏娜, 陈锦年, 左涛, 2014. 印度洋潜热通量对南海夏季风爆发的影响[J]. *热带气象学报*, 30(1): 189-193. Wang H N, Chen J N, Zuo T, 2014. Impact of latent heat flux over the Indian Ocean on the onset of South China Sea summer monsoon[J]. *J Trop Meteor*, 30(1): 189-193(in Chinese).
- 王世玉, 钱永甫, 2001. 1998 年地面加热场的基本特征及其与南海夏季风爆发的可能联系[J]. *气象学报*, 59(1): 31-40. Wang S Y, Qian Y F, 2001. Basic characteristic of surface heat field in 1998 and the possible connections with the SCS summer monsoon onset[J]. *Acta Meteor Sin*, 59(1): 31-40(in Chinese).
- 温之平, 黄荣辉, 贺海晏, 等, 2006. 中高纬大气环流异常和低纬 30~60 天低频对流活动对南海夏季风爆发的影响[J]. *大气科学*, 30(5): 952-964. Wen Z P, Huang R H, He H Y, et al, 2006. The influences of anomalous atmospheric circulation over mid-high latitudes and the activities of 30-60 d low frequency convection over low latitudes on the onset of the South China Sea summer monsoon[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(5): 952-964(in Chinese).
- 温之平, 薛晓冰, 梁肇宁, 等, 2005. 热带海温异常与南海夏季风建立迟早的初步研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 44(1): 94-98. Wen Z P, Xue X B, Liang Z N, et al, 2005. A preliminary study on the relationship between SSTA in tropical oceans and onset of South China Sea summer monsoon[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 44(1): 94-98(in Chinese).
- 谢炯光, 纪忠萍, 谷德军, 等, 2008. 南海西南季风异常与广东省汛期重要天气的关系[J]. *热带气象学报*, 24(3): 209-218. Xie J G, Ji Z P, Gu D J, et al, 2008. The relationship between South China Sea southwest monsoon anomalies and important weather in Guangdong Province during the raining season[J]. *J Trop Meteor*, 24(3): 209-218(in Chinese).
- 殷明, 肖子牛, 李崇银, 等, 2016. 2015 年西北太平洋热带气旋活动特征及强 El Niño 现象对其影响的初步分析[J]. *气象*, 42(9): 1069-1078. Yin M, Xiao Z N, Li C Y, et al, 2016. Analysis on features of tropical cyclone activities over the Western North Pacific in 2015 and their variations associated with strong El Niño[J]. *Meteor Mon*, 42(9): 1069-1078(in Chinese).
- 于乐江, 胡敦欣, 2008. 青藏高原春季积雪在南海夏季风爆发过程中的作用[J]. *地球物理学报*, 51(6): 1682-1694. Yu L J, Hu D X, 2008. Role of snow depth in spring of Tibetan Plateau in onset

- of South China Sea summer monsoon[J]. *Chin J Geophys*, 51(6):1682-1694(in Chinese).
- 袁媛,李崇银,2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响[J]. *大气科学*, 33(2):325-336. Yuan Y, Li C Y, 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(2):325-336(in Chinese).
- 张立风,张永垂,张铭,2008. 南海夏季风爆发的动力过程研究[J]. *气象学报*, 66(5):747-755. Zhang L F, Zhang Y C, Zhang M, 2008. A study on the dynamic process of the onset of South China Sea summer monsoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(5):747-755(in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022. 2021 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. *气象*, 48(4):479-493. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Overview of climate prediction for the summer 2021 in China and its precursors[J]. *Meteor Mon*, 48(4):479-493(in Chinese).
- 郑彬,梁建茵,林爱兰,等,2006. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定[J]. *大气科学*, 30(6):1207-1216. Zheng B, Liang J Y, Lin A L, et al, 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China I: determination of the division dates[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(6):1207-1216(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[J]. *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[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(1):72-80(in Chinese).
- 周群,陈文,2020. 太阳活动 11 年周期变化对南海夏季风爆发的可能影响[J]. *热带气象学报*, 36(1):25-31. Zhou Q, Chen W, 2020. Possible influences of the solar cycle on the onset of South China Sea summer monsoon[J]. *J Trop Meteor*, 36(1):25-31(in Chinese).
- Chang C P, Chen G T J, 1995. Tropical circulations associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea[J]. *Mon Wea Rev*, 123(11):3254-3267.
- DeMott C A, Stan C, Randall D A, 2013. Northward propagation mechanisms of the boreal summer intraseasonal oscillation in the ERA-Interim and SP-CCSM[J]. *J Climate*, 26(6):1973-1992.
- Drbohlav H K L, Wang B, 2005. Mechanism of the northward-propagating intraseasonal oscillation: insights from a zonally symmetric model[J]. *J Climate*, 18:952-972.
- Gao Y X, Klingaman N P, DeMott C A, et al, 2019. Diagnosing ocean feedbacks to the BSISO: SST-modulated surface fluxes and the moist static energy budget[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(1):146-170.
- Jiang X N, Li T, Wang B, 2004. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Climate*, 17(5):1022-1039.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-472.
- Kemball-Cook S, Wang B, 2001. Equatorial waves and air-sea interaction in the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Climate*, 14(13):2923-2942.
- Li K P, Yu W D, Li T M, et al, 2013. Structures and mechanisms of the first-branch northward-propagating intraseasonal oscillation over the tropical Indian Ocean [J]. *Climate Dyn*, 40(7):1707-1720.
- 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 [J]. *Int J Climatol*, 37(13):4576-4585.
- Wang B, Xie X, 1997. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 54:72-86.
- Wang H, Liu F, Wang B, et al, 2018. Effects of intraseasonal oscillation on South China Sea summer monsoon onset [J]. *Climate Dyn*, 51(7):2543-2558.
- Wu G X, Zhang Y S, 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. *Mon Wea Rev*, 126(4):913-927.
- Zheng B, Huang Y Y, 2019. Mechanisms of northward-propagating intraseasonal oscillation over the South China Sea during the pre-monsoon period [J]. *J Climate*, 32(11):3297-3311.
- Zheng B, Huang Y Y, Li C H, 2019. The 30 - 60-day northward-propagating intraseasonal oscillation over South China Sea during pre-monsoon period in a coupled model [J]. *Int J Climatol*, 39(12):4811-4824.
- Zheng B, Lin A L, Gu D J, et al, 2011. Determination of onset date of the South China Sea summer monsoon in 2006 using large-scale circulations [J]. *J Trop Meteor*, 17(3):202-208.
- Zhou L, Murtugudde R, 2014. Impact of northward-propagating intraseasonal variability on the onset of Indian summer monsoon [J]. *J Climate*, 27(1):126-139.
- Zhou W, Chan J C L, 2005. Intraseasonal oscillations and the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Int J Climatol*, 25(12):1585-1609.

(本文责编:戴洋 王蕾)