北半球春季海洋大陆对流的年际变化及热带海温的可能影响

董心雨 施晓晖 * 温敏 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

摘要 北半球春季,海洋大陆对流活动的季节转换与亚洲夏季风的建立和推进密切相关,但对于其年际变化的成因仍然不够清楚。根据海洋大陆地区季节转换的气候特征,本文定义了表征转换过程关键节点的对流活动和环流特征指标,进一步分析了海洋大陆对流活动季节转换的年际变化特征,并探讨了热带地区海温异常的可能影响。研究结果表明,海洋大陆对流季节转换以及周边地区环流演变的年际变化具有较高的整体一致性,ENSO 事件对其具有重要的调控作用。除此之外,热带东印度洋海温异常能够独立于 ENSO 激发出局地异常大气环流,最终对海洋大陆对流活动产生一定的影响。

关键词:海洋大陆;对流季节转换;年际变化;热带海温 文章编号 2023124A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2404.23124

The interannual variation of convection over Maritime

Continent during the boreal spring and the possible effects

of tropical SST

Dong Xinyu, Shi Xiaohui*, Wen Min

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The seasonal transition of the convection (STC) in the Maritime Continent during the boreal spring is closely linked with the onset and advance of the Asian summer monsoon, but its interannual variation and impact factors are still poorly understood. In this paper, based on the climatic characteristics of seasonal transition in the Maritime Continent, indices of convection activity and circulation indicating key points during the process of seasonal transition are defined to analyze the interannual variation of STC in the Maritime Continent, and explore the possible effects of sea surface temperature anomalies (SSTA) in the tropics. The results show that the interannual variations of STC in the Maritime Continent and the evolution of atmospheric circulation over the surrounding areas are basically synchronous, which is mainly regulated by the El Niño–South Oscillation (ENSO). Besides, the SSTA in the eastern tropical Indian Ocean independent of ENSO could stimulate anomalous local atmospheric circulation and thus lead to the convective anomalies in MC to a certain extent.

Keywords Maritime Continent, seasonal transition of convection, interannual variation, tropical sea surface

作者简介 董心雨, 女, 1999 年出生, 硕士研究生, 主要从事海洋大陆对流研究。E-mail:

收稿日期 2023-09-25; 网络预出版日期

^{1306540515@}qq.com

通讯作者 施晓晖, E-mail: * shixh@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金重大研究计划"西太平洋地球系统多圈层相互作用"重点项目 92158203; 国家重点研发计划项目 2019YFC1510104;中国气象科学研究院科技发展基金项目 2023KJ040, 2021KJ023

Funded by National Natural Science Foundation of China Major Research Plan "Western Pacific Earth System Multispheric Interactions" key project (Grant 92158203), National Key R&D Program Project of China (Grant 2019YFC1510104), Science and Technology Development Fund of CAMS (Grant 2023KJ040, 2021KJ023)

1 引言

海洋大陆位于全球最大的暖水区,西太平洋-东印度洋暖池,由众多岛屿和浅海组成,海陆交错分布、地形复杂。它既连接了印度洋和西太平洋,又连接了亚洲和大洋洲,是全球 对流最活跃的地区之一,对全球大气环流和天气气候都有重要影响(Ramage, 1968)。在美 国迈阿密大学 Chidong Zhang 教授和日本海洋--地球科技研究所 Kunio Yoneyama 教授的积极 倡导下,包括我国在内的 15 个国家和地区共同实施了"海洋大陆年"(Years of the Maritime Continent,简称 YMC)国际观测试验计划,其主要目标就是促进对海洋大陆地区多尺度海 洋和大气变率及其全球影响的理解,大气对流状况是该计划关注的重点之一(Yoneyama and Zhang, 2020)。

海洋大陆对流活动是 Walker 环流和局地 Hadley 环流的重要组成部分,深对流活动带来的大量水汽供应、凝结潜热释放维持了 Walker 环流和局地 Hadley 环流上升支(Yang et al, 2019)。海洋大陆对流活动释放的潜热可被运送到对流层顶,影响中高层大气环流形势(Neale and Slingo, 2003; Shibagaki et al., 2006; Qian, 2008; Wu and Hsu, 2009),也可引起局地 Hadley 环流异常,进而影响中纬度地区(Zhou and Wang, 2006;周波涛和崔绚, 2008),因此成为影响全球大气环流和调节行星尺度变化的重要热量和能量来源(Ramage, 1968; Simpson et al., 1993; Neale and Slingo, 2003; Dong and Wang, 2022)。

海洋大陆地区对流活动具有从日变化到年际和年代际尺度的多时间尺度变化特征 (Chang et al., 2004a; Yang et al., 2019)。其中,与亚洲季风活动密切相关的春夏季节性转换 及对流沿亚澳"大陆桥"向北移动的过程一直是我国学者关注的重点之一(何金海等, 1996; Wu and Zhang, 1998; Qian and Yang, 2000; Liu et al., 2002; Wang and LinHo, 2002; Zhang et al., 2002; Tao and Zhang, 2004)。北半球春季,海洋大陆强对流中心由赤道以南跳至赤道以北并 沿亚澳"大陆桥"向北推进是海洋大陆地区季节转换的主要特征(何金海等, 1996; He et al., 2006a)。4月中旬苏门答腊岛北部对流中心由东北延伸至中南半岛上空,该地区对流开始活 跃,使得北半球副热带高压带随后在孟加拉湾上空断裂,强对流迅速向东北和西北两个方向 推进,先后导致南海季风和印度季风的建立(He et al., 2006a, 2006b),因此,春季海洋大陆 对流的季节转换与亚洲夏季风建立及推进过程存在着密切的联系。

海洋大陆对流活动及降水具有显著的年际变化,主要受到厄尔尼诺-南方涛动(ENSO) 的调制,且ENSO对其年际尺度上的影响要比年代际强(Dong et al., 2021)。一般认为,El Niño 年,海洋大陆地区对流减弱、降水偏少,而La Niña 年对流增强、降水偏多(Aldrian and Susanto, 2003; Chang et al., 2004b; Kubota et al., 2011)。也有研究指出,不同类型的ENSO 事件(中部型、东部型)对对流及降水异常分布的影响存在差异,而且不同研究得到的结果 也不尽相同(Kao and Yu, 2009; Feng et al., 2010; Salimun et al., 2014; As-syakur et al., 2016; Wang et al., 2018)。由此可见, ENSO 如何调制海洋大陆地区对流活动还需要进一步研究。 另外, ENSO 对海洋大陆的影响也体现在对流和降水异常在不同季节的分布差异上。比如在 北半球冬季, 对流和降水异常在海洋大陆的东西部可能是反向的, 而在北半球夏季, 海洋大 陆对流和降水对 ENSO 的响应则是全区一致的(Zhang et al., 2016; Yang et al., 2019)。

除了 ENSO 事件,人们还发现印度洋海温变化也会影响海洋大陆地区对流活动(Saji et al., 1999; Ashok et al., 2003; Hamada et al., 2012; As-syakur et al., 2014)。印度洋偶极子(IOD) 是印度洋海温异常的主要信号,一般出现在北半球夏秋季节,且与 ENSO 事件有密切关系(Saji et al., 1999)。IOD 对海洋大陆地区对流活动的影响在北半球夏季比较明显,在冬季较弱,春季更弱(As-syakur et al., 2014)。因 IOD 受到 ENSO 的显著影响,致使它与海洋大陆地区对流活动的关系经常会崩溃。为此,Lee et al (2022)提出了另一种反映热带东南印度洋海温异常的信号,Java-Sumatra Nino/Nina (JSN)。其研究表明,JSN 几乎不受 ENSO 信号的影响,可与 ENSO 共同影响、也可以独立影响海洋大陆的对流与降水活动。Zhu et al (2022)的研究也指出,Java 岛南侧存在着独立于 ENSO 的夏季海温异常模态,可对亚澳季风区的夏季和冬季降水产生较大的影响。

综上所述,北半球春季海洋大陆对流活动的季节转换与亚洲夏季风爆发和推进有密切 关系,其年际变化因受东西两侧印度洋和太平洋海温的共同影响而显得复杂多变。目前多数 研究主要针对冬夏两季,对于季节转换时期对流活动的研究较少,同时这些研究更多地是着 眼于季节平均的对流异常。海洋大陆对流在春季沿亚澳大陆桥的季节性移动(何金海等,1996) 是一个动态过程,怎样简单有效地表示这种动态过程的年际变化?这个过程的年际变化又是 如何受到热带海温异常的影响的?将是本文关注的重点。为此,本文将根据海洋大陆对流季 节转换的气候特征,定义能表示转化过程的特征指标,进而分析春季海洋大陆对流活动季节 转换的年际变化特征,并探讨热带地区海温异常的可能影响及其机理。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料主要有:(1)欧洲中尺度天气预报中心(ECMWF)逐月 ERA5 再分析 资料(Hersbach et al., 2020),包括等压面风速、相对涡度和位势高度,海温等要素,水平分 辨率为 0.25°×0.25°,下载自 <u>https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home</u>;(2)美国国家海 洋和大气管理局(NOAA)逐月、逐日向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR),下载自 https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.olrcdr.interp.html,空间分辨率分别为 2.5°×2.5°,1°×1°。以上资料的时间长度均为 43 年,即从 1979 年 1 月至 2021 年 12 月。本 文中的气候平均即指 43 年平均值,距平或异常则为减去气候平均值的差值。另外,本文中 使用的距平或异常均进行了去除线性趋势的处理。

为确定 ENSO 事件,本文还使用了 NOAA 气候预测中心发布的逐月 Niño 3.4 指数

(Huang et al., 2017),即 Niño 3.4 区(5°N-5°S, 120°-170°W)逐月海温异常,下载网址为: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis monitoring/ensostuff/detrend.nino34.ascii.txt。

2.2 海洋大陆的范围

早期,海洋大陆被定义为赤道西太平洋 10°S-10°N 之间的区域,主要包括马来西亚、 印度尼西亚及其周边的岛屿和海洋 (Ramage, 1968)。近年来,有学者提出海洋大陆是指由 中南半岛、菲律宾群岛、印度尼西亚群岛、新几内亚岛等众多岛屿和中国南海及一系列浅海 组成的区域 (王鑫等,2016),范围扩展为 90°-150°E, 10°S-20°N (许琪和管兆勇,2017;Zhu et al, 2022),同时将包含印度尼西亚群岛主要部分的关于赤道对称的区域 (95°-145°E, 10° S-10°N)称为海洋大陆的核心区域 (许琪和管兆勇,2017),基本对应于 Ramage (1968)定 义的海洋大陆。考虑到海洋大陆对流在春季可以一直向北移动到中南半岛,为了能更加完整 地获取春季海洋大陆对流季节转换特征,本文同样将海洋大陆定义为 90°-150°E, 10°S-20 °N 区域 (图 1 中红色方框所示)。此外,图中①-⑦标示的半岛和岛屿共同组成了亚澳"大 陆桥",春/秋季节转换时期,对流主要沿其从南向北/从北向南移动。



图 1 海洋大陆(红色方框区域)及亚澳"大陆桥"示意图。①-⑦为组成亚澳"大陆桥"的主要半岛和岛屿 Fig. 1 Schematic diagram of the Maritime Continent (the red box) and the Asian-Australian "land bridge". ①-⑦ show the main peninsulas and islands of the Asian-Australian "land bridge"

3 海洋大陆对流活动季节转换特征及其指标

早在1996年,何金海等(1996)利用1980–1988年的黑体辐射温度(TBB)资料就已 发现,海洋大陆地区对流由冬入夏的季节转换从4月开始,并表现出沿亚澳"大陆桥"北移 的明显特征。本节我们将使用最新的 OLR 和大气环流资料对这一转换过程进行回顾,并且 针对季节转换过程中的关键事件定义其特征指标。

3.1 北半球春季海洋大陆地区的对流活动特征

海洋大陆上空终年有对流活动。3 月(图 2a),受岛屿地形影响,对流在苏门答腊、加 里曼丹、苏拉威西和新几内亚四个岛屿上空形成强中心。值得注意的是,强对流中心均偏向 赤道以南。强对流区北侧为北半球副热带高压带(以 1510gpm 等值线表示)控制,阿拉伯 海、印度半岛东岸、西太平洋均有反气旋性环流中心。此时赤道上均为向南的越赤道气流, 是明显的北半球冬季大气环流特征。

与 3 月相比, 4 月海洋大陆对流最显著的变化是强对流中心在苏门答腊上空移动到了 赤道以北, OLR 低于 240 W m⁻² 的低值区沿亚澳"大陆桥"向北延伸到 10°N,而其他岛屿 上空的对流则有所减弱(图 2b)。4 月与 3 月 OLR 差值图(图 2e)更清晰地反映出这一变 化。在苏门答腊岛上空,正负差值区分界线几乎与赤道平行,以北的负值区延伸至马来半岛 上空。850hPa 环流显示,苏门答腊以西开始出现向北的越赤道气流以及西风气流,虽然以 1510gpm 表示的北半球副热带高压带在中南半岛至印度半岛上空断裂,但其脊线依旧是连 续的,中南半岛依然受西北太平洋副热带高压(以下简称西太副高)西伸脊控制,不过 OLR 值已明显低于东西两侧,实际上已经开始有了对流活动,与 He et al. (2006a)利用逐侯资料 得到的中南半岛对流从 4 月中旬开始活跃的结果基本一致。

5月,北半球副热带高压带和 OLR 高值带都彻底断裂,强对流沿亚澳"大陆桥"向北 推进,控制孟加拉湾东南部和整个中南半岛,该区域的 OLR 己低于 240 W m⁻² (图 2c)。从 其与 4 月的差值图 (图 2f)上可以看出,孟加拉湾东南部和整个中南半岛的 OLR 都有明显 的降低。气候平均而言,南海季风于 5 月 4 候爆发,因此在月平均图上,虽然南海地区 (10 °-20°N,110°-120°E) OLR 值仍较高,但风向己转为偏南风和西南风控制,而且对流活动 也从加里曼丹上空北伸至菲律宾群岛上空,可见岛屿地形在热带对流加强北移的过程中具有 重要作用。

6月(图 2d),亚洲夏季风全面建立,西太副高的西伸脊点东退至 120°E,整个赤道以 北到 20°N 附近为西风及西南风控制,与5月比较,南海成为 OLR 降低最明显的区域之一 (图 2g),对流活动强盛。







图 2 (a) - (d) 海洋大陆及周边地区气候平均 3-6 月 OLR (阴影,单位: Wm⁻²)、850hPa 位势高度(等 值线,单位: gpm)和风场(矢量,单位: ms⁻¹),黄色粗虚线为副高脊线,蓝色方框为海洋大陆区域。(e) - (g) 气候平均 OLR 逐月变化趋势(单位: Wm⁻²),仅给出强对流区(月平均 OLR<240 Wm⁻²)情况,红 色方框为海洋大陆区域

Fig. 2 (a)–(d) The climatic monthly OLR (shading, units: W m⁻²), geopotential height (contours, units: gpm) and wind in 850hPa (vectors, units: m s⁻¹) over the Maritime Continent and surrounding areas during March–June. The thick yellow dashed line denotes the ridge of subtropical high and the blue box indicates the region of the Maritime Continent; (e)–(g) The monthly tendencies of climatic OLR (units: W m⁻²) during March–June. Only the values in vigorous convection area (OLR<240 W m⁻²) are shown and the red box indicates the region of the Maritime Continent

3.2 海洋大陆地区对流季节转换及相关环流的特征指标

从上面的转换过程可以看出,海洋大陆地区对流的季节转换最早出现在苏门答腊上空, 表现为4月份对流中心由赤道以南跳至赤道以北。图3a给出了以赤道为界,苏门答腊南部 (100°-105°E, 5°S-0°)、北部(95°-105°E, 0°-5°N)的气候平均逐日OLR时间演变图, 可以看到两者 OLR 演变出现了两次反转,一次是 4 月进入北半球对流活跃期,一次是 11 月进入南半球对流活跃期。因此我们将 4 月苏门答腊北部(95°-105°E,0°-5°N)区域平均 OLR 定义为海洋大陆对流季节转换的第一个指标 (OLR_{NS})。

海洋大陆地区对流季节转换的第二个显著特征是中南半岛地区对流建立。虽然在月平 均图上中南半岛的 OLR 值在 5 月才降到 240 W m⁻²以下(图 2c),但在 4 月已有 OLR 低值 槽伸向中南半岛(图 2b),同时从逐日 OLR 演变也可以看到 4 月中南半岛(95°-105°E,10 °-20°N)区域平均 OLR 迅速降低,到 4 月下旬已降至 240 W m⁻²以下,对流开始活跃(图 3b)。Wen and Zhang(2007)根据 TBB 逐候的变化特征定义了 1980-2001年中南半岛对流 建立时间,发现最早为 20 候(4 月 6-10 日),最晚则出现在 30 侯(5 月 26-31 日)。此外, 4 月和 5 月中南半岛对流强度的年际变化具有很高的正相关(温敏等,2004)。因此将 4-5 月 中南半岛区域平均 OLR 定义为海洋大陆对流季节转换的第二个指标(OLR_{ICP})。

海洋大陆地区对流季节转换的第三个显著特征是南海地区对流活跃,即南海季风爆发。因为南海夏季风的平均爆发时间为5月第4候,从前面的逐月平均图上也可以看到,5月南海地区的OLR值仍较高(图2c),直到6月才表现为对流活跃(图2d)。因此,我们将5-6月南海地区(110°-120°E,10°-20°N)区域平均OLR作为海洋大陆地区对流季节转换的第三个指标(OLRscs)。

海洋大陆地区对流的阶段性变化也带来环流的阶段性变化,这里我们选择了3个与对流指标对应的主要环流特征指标。一是4月热带北印度洋(80°-100°E,0°-5°N)区域平均850hPa纬向风速(U850_{TIO})。当苏门答腊北部地区对流增强后,赤道印度洋上空的西风随之建立,并表现为向西扩展的特征,是对流激发的Rossby波的主要特征。二是4-5月孟加拉湾(80°-90°E,10°-20°N)的区域平均850hPa相对涡度(ζ850_{BOB})。中南半岛对流建立后,北半球副热带高压带通常会在1-2候之内断裂(Wen and Zhang, 2007),孟加拉湾上空形成宽广的槽区,ζ850_{BOB}的正/负值可分别代表北半球副热带高压带的断裂/维持,同时也可反映孟加拉湾槽的强度。三是5-6月南海地区(110°-120°E,10°-20°N)区域平均的850hPa纬向风速(U850_{SCS})。南海区域的纬向风由东风稳定地转为西风是南海夏季风爆发的主要监测指标之一,同时从图2可发现,3-4月,副高带维持,南海地区被副高南侧的偏东或东南气流控制,副高带在5月断裂,西太副高开始东退,南海地区主要受偏南风和西南风的影响,6月西太副高继续东退,南海的盛行风转为偏西或西南风,U850_{SCS}在一定程度上可反映西太副高的东退和南海夏季风的强度。

7

5-6 月,OLR_{SCS}从 250 W m⁻² 降至 220 W m⁻² 左右,南海对流活跃,同时 U850_{SCS} 由负转正, 南海地区纬向风由东风转为西风,一定程度上代表了西太副高的东退和南海夏季风的爆发。 由此可见,以上指标可以较好地反映春季海洋大陆对流季节转换的典型时间点及先后关系。 因此,下面我们将利用这 6 个指标来进一步讨论春季海洋大陆对流季节转换的年际变化。



图 3 (a) 苏门答腊地区气候平均 OLR 逐日变化曲线。其中实线为苏门答腊北部 (NSI, 95°-100°E, 0°-5°N), 虚线为苏门答腊南部 (SSI, 100°-105°E, 5°S-0°); (b) 中南半岛区域气候平均 OLR 逐日变化曲 线; 细线为原始序列, 粗线为用 1-4 波傅立叶谐函数表示的季节循环; (c) 区域气候平均的苏门答腊北部 (OLR_{NS})、中南半岛 (OLR_{ICP}) 和南海 (OLR_{SCS}) OLR (单位: W m⁻²) 以及热带北印度洋 (U850_{TIO})、南 海 (U850_{SCS}) 850hPa 纬向风速 (单位: m s⁻¹) 和孟加拉湾 850hPa 相对涡度 (ζ850_{BOB}, 单位: 10⁻⁶ s⁻¹) 的 逐月变化

Fig. 3 (a) Climatic daily OLR over Sumatra. The solid curve is for northern Sumatra (NSI, 95°–100°E, 0°–5°N) and the dashed curve is for southern Sumatra (SSI, 100°–105°E, 5°S–0°); the thin curve is the original series, and the thick curve is the seasonal cycle expressed as a 1–4 wave Fourier harmonic function; (b) same as (a), but for Indo-China Peninsula (ICP); (c) Climatic monthly OLR (units: W m⁻²) for northern Sumatra (OLR_{NS}), ICP (OLR_{ICP}), and the South China Sea (OLR_{SCS}), the 850hPa zonal winds (units: m s⁻¹) of the northern tropical Indian Ocean (U850_{TIO}) and the South China Sea (U850_{SCS}), and the 850hPa relative vorticity in the Bay of Bengal (ζ 850_{BOB}, units: 10⁻⁶ s⁻¹)

4 春季海洋大陆对流季节转换年际变化的一致性

根据上述定义,计算了 1979-2021 年的逐年特征指标,图 4 给出了各指标距平在这期间的年际变化情况。从图中可以看到,3 个对流指标的年际变化较为一致(同步),另外 3 个环流指标则表现出与对流指标反向变化的特征,即环流和对流变化趋势是一致的,同时增强或同时减弱。需要注意的是,U850_{scs}与其余两个环流指标存在距平符号相反的情况,但总体上其与 OLR_{scs} 的反向变化关系仍较为明显。总的来说,当苏门答腊北部对流偏强(弱)时,热带印度洋西风偏强(弱),后期中南半岛对流也偏强(弱),有利于副热带高压带在孟加拉湾的断裂(维持),导致南海对流和西风偏强(弱),即南海夏季风偏强(弱)。



图 4 1979–2021 年北半球冬夏转换过程中海洋大陆对流及相关环流的特征指标距平逐年变化 Fig. 4 Interannual variations on the anomalies of indices for the convection over the Maritime Continent and related circulation in the transition process from winter to summer during 1979–2021

表1给出了各指标距平两两之间的相关系数。总体而言,除U850_{SCS}外,各指数之间的 相关性显著,进一步证实亚洲热带夏季风建立过程中海洋大陆对流活动和周边地区大气环流 季节转换的年际变化具有较高的整体一致性。具体来看,OLR_{NS}和U850_{TIO}的相关系数为-0.5880(通过0.001显著性检验),表明两者的年际变化有显著的相关性,苏门答腊岛对流的 活跃和热带北印度洋西风的建立密切相关,即苏门答腊岛对流明显偏强的年份,热带北印度 洋西风也偏强;OLR_{NS}和OLR_{ICP}序列的相关系数为0.5627(通过0.001显著性检验),考虑 到OLR_{NS}和OLR_{ICP}时间上的差异,可以认为苏门答腊岛北部对流在4月的活跃程度及其向 北传播的速度,可能将对后期(5月)中南半岛的对流建立和强度产生较大的影响;OLR_{ICP} 和U850_{TIO}的相关系数高达-0.7370,是所有相关系数中最高的,表明4月热带北印度洋西风 的发展在很大程度上可导致后续中南半岛对流的活跃。ζ850_{BOB}与OLR_{ICP}、U850_{TIO}的相关 系数也分别达到-0.6522和0.6270,均通过0.001的显著性检验,说明同期中南半岛对流的 活跃和前期热带北印度洋西风的发展都有可能促进北半球副热带高压带的断裂;OLR_{SCS}与 前期其它指标的相关性明显要差很多,与 OLR_{NS} 的相关系数为 0.2315,未达到 0.05 的显著 性检验水平,且仅有与 OLR_{ICP} 的相关系数通过了 0.001 的显著性检验,而 U850_{SCS} 也仅与 OLR_{SCS} 显著相关,与其他指标的相关性均不明显,表明前期中南半岛的对流活动可能是影 响南海地区对流发展的重要因素,但南海地区的对流和环流可能还受到了其它很多因子的影 响,尤其是环流的变化更为复杂。如何表征南海季风的爆发及强度一直以来也是中国学者高 度关注的问题。多数研究都指出,单要素指标难以反映南海季风的复杂变化,多要素构建的 指标在南海季风爆发时间的确定上显示出优势,但目前仍缺少表征南海夏季风年际变化的综 合指标,需要进一步开展深入研究。

表 1.1979-2021 年海洋大陆对流转换过程特征指标之间的相关系数*

 Table 1 Correlation coefficients between the indices characterizing the convection transition process over the Maritime Continent during 1979–2021*



5 ENSO 事件的调控作用

厄尔尼诺–南方涛动 (ENSO) 是气候系统中最为显著的年际变率信号,众多研究都认为 ENSO 是影响亚洲季风年际变率的主要因素 (黄荣辉等,2003; Wu et al., 2003; Li et al., 2017; Zhang et al., 2017)。为清楚了解季节转换时期 ENSO 的可能影响,同时保证 ENSO 事件的持 续性,本文利用逐月 Niño3.4 指数,定义 4 月、5 月海温异常 (SSTA) 均满足|SSTA|>0.5℃ 为季节转换时期冷 (La Niña)、暖 (EI Niño) 事件的标准,挑选出 1979–2021 年期间所有季 节转换时期 ENSO 事件的发生年份,并同时给出了相应年份的 SSTA 和 6 个特征指标距平

(表2)。

从表 2 可以明显看出,对流指标在 El Niño 年大部分为正异常,除 U850_{SCS} 在 2019 年为 正异常外,环流指数均为负异常;La Niña 年则相反,对流指标大部分为负异常,而环流指 标大部分为正异常,只是 U850_{SCS} 有 3 年出现了负异常,表明南海的大气环流对 ENSO 事件 的响应存在着较大的不确定性。总体上看,虽然对流和南海环流指标都存在一些变化不一致 的情况,但仍可发现春季 ENSO 事件对海洋大陆对流季节转换和亚洲热带夏季风建立过程 的年际变化具有明显的调控作用。即 El Niño 年,苏门答腊北部对流不活跃,热带印度洋西 风强度偏弱,进而中南半岛对流也受到抑制,副热带高压带断裂偏晚,孟加拉湾槽偏弱,南 海夏季风爆发也偏晚、强度偏弱;与之相反,在 La Niña 年,各关键区的对流较为活跃,热 带印度洋西风和孟加拉湾槽偏强,副高带断裂偏早,南海夏季风建立偏早、强度偏强。

表 2 EI Niño 年和 La Niña 年 Niño 3.4 区海温异常和海洋大陆对流转换过程特征指标距平

Table 2 The anomalies of Niño 3.4 SST and indices characterizing convection transition process over the

类型		SSTA	SSTA	OL D	11050	OL D	×0.50		110.50
	年份	4 月	5月	OLR _{NS}	U850 _{TIO}	OLRICP	ζ850 _{BOB}	OLR _{SCS}	U850 _{SCS}
		°C		W m ⁻²	m s ⁻¹	W m ⁻²	$10^{-6} s^{-1}$	W m ⁻²	m s ⁻¹
EI Niño	1983	1.2	1.2	16.73	-2.05	18.13	-3.50	20.86	-0.83
	1987	0.8	0.9	6.13	-2.12	5.84	-3.95	11.08	-0.15
	1992	1.3	1.2	8.25	-1.33	16.01	-1.44	4.92	-0.10
	1993	0.7	0.9	0.53	-0.91	3.83	-2.87	15.66	-1.10
	1998	0.9	0.7	20.99	-3.31	16.18	-1.07	4.39	-0.92
	2015	0.7	0.9	-2.98	-0.87	9.91	-0.48	19.19	-0.21
	2019	0.6	0.6	2.26	-0.80	6.00	-2.23	-0.07	0.73
La Niña	1985	-0.9	-0.8	-10.71	2.38	-0.39	0.43	-8.97	2.22
	1989	-0.8	-0.6	0.69	1.10	10.07	2.23	-0.06	-1.15
	1999	-1.0	-1.0	-10.02	6.30	-29.20	6.42	-4.23	-0.14
	2000	-0.8	-0.7	-8.39	4.24	-21.27	1.13	-6.81	-0.44
	2008	-1.0	-0.8	-8.90	1.24	-16.30	2.60	-1.80	0.54
	2011	-0.8	-0.5	6.30	1.39	-6.27	0.36	-5.24	0.38

Maritime Continent for EI Niño and La Niña years

* 阴影表示与其它指标变化不一致

目前一般认为 ENSO 事件对亚洲夏季风的影响主要是通过菲律宾附近的环流异常来实现的,而异常环流是因为海温异常引起的对流异常造成的(Wang et al., 2000; Wang et al., 2001)。根据表 2 中列出的 El Niño 年和 La Niña 年,将 4-5 月平均 OLR 和 850hPa 风场分别进行合成,并对比分析其异常分布(图 5)。可以发现,El Niño 年的海洋大陆为 OLR 显著正异常区,即对流显著偏弱,赤道中东太平洋和热带南印度洋的对流则显著偏强。因此海洋大陆对流对大气的加热作用为冷源,赤道中东太平洋和热带南印度洋则为热源,加热中心位于赤道中太平洋。异常环流则主要表现为赤道中太平洋上空出现显著的异常西风,热带北印度

洋为显著的异常东风,菲律宾东侧和孟加拉湾均为异常反气旋环流,海洋大陆处于低层环流 辐散区,与该区域被抑制的对流相吻合(图 5a)。La Niña 年的情况则基本上与 El Niño 年相 反,海洋大陆为 OLR 显著负异常区,对流显著偏强,对流显著偏弱区域主要位于赤道中太 平洋和热带南印度洋,因此海洋大陆为热源,加热中心位于菲律宾附近,而赤道中太平洋和 热带南印度洋为冷源。赤道中太平洋上空为异常东风,热带北印度洋到海洋大陆均被异常西 风所控制,而菲律宾附近、孟加拉湾为异常气旋性环流,海洋大陆处于低层环流辐合区,对 应于该区域强盛的对流活动(图 5b)。



图 5 El Niño 年(a) 和 La Niña 年(b) 合成 4-5 月平均 OLR(阴影,单位: W m⁻²,仅给出通过 0.05 显著 性检验的部分)及 850hPa 风场(矢量,单位: m s⁻¹,黑色加粗部分表示通过 0.05 显著性检验)的异常分 布,深蓝色等值线为 OLR 距平零线,红色方框为海洋大陆地区

Fig. 5 Anomalies of OLR (shading, units: W m⁻², only the sections that pass the 0.05 significance test are shown) and 850hPa wind (vector, units: m s⁻¹, black bolded sections indicate that it passes the 0.05 significance test) during April–May composed for the El Niño years (a) and the La Niña years (b) respectively, and the dark blue contour is the zero line of OLR anomaly, the red box indicates the region of the Maritime continent

综上所述, ENSO 事件对亚洲热带夏季风建立过程中对流活动和大气环流季节转换年际 变化的调控机制主要是其异常海温分布首先将在暖区上空产生异常对流,进而激发出异常环 流。整个海洋大陆对流季节转换和亚洲热带夏季风建立过程对 ENSO 的响应是比较明显的, 即 El Niño (La Niña)年,苏门答腊岛北部对流偏弱(强),热带北印度洋西风偏弱(强)、 中南半岛对流偏弱(强),副热带高压断裂晚(早),南海地区有异常反气旋(气旋)环流出 现,通常南海季风建立晚(早),强度偏弱(强)。这一结果与前人(何金海等,2000)的研 究结论基本相符。

6 独立于 ENSO 的热带东印度洋海温异常影响

仔细分析表 2 还可发现, ENSO 事件对热带北印度洋西风和孟加拉湾相对涡度的影响是 稳定的,即U850_{TIO}和 ζ850_{BOB}在 El Niño 年和 La Niña 年的符号都一致,但 OLR_{NS}和 OLR_{ICP} 都有符号不一致的情况(表 2 中阴影所示)。因此,可以认为在季节转换时期,ENSO 事件 导致的环流异常是确定的,但其对海洋大陆对流活动的影响却表现出一定的不确定性,其中 1989 年尤为特殊, 其春季 SSTA 达到 - 0.8℃, 为 La Niña 年, 但 OLR_{NS} 和 OLR_{ICP} 均为正 值,表明4月苏门答腊岛北部和4-5月的中南半岛对流都偏弱,尤其是OLR_{ICP}超过10Wm-²,与其它 La Niña 年的情况存在明显差异。本节将针对这一特殊年份,讨论海温异常本身及 其激发的异常环流所处位置与对流活动之间存在的可能联系。

从 1989 年 4-5 月 OLR 异常的逐月分布上看 (图 6),导致 1989 年 OLR_{ICP} 偏高的原因 主要是因为 4 月海洋大陆西北部基本上均为 OLR 正异常, 与 La Niña 年海洋大陆对流偏强 相反。为此,选取表 2 中其它的典型 La Niña 年,即 1985、1999、2000、2008、2011、2021 年 4 月的海温和环流进行合成,与 1989 年进行对比,以了解这种异常可能的形成机理。



(a) Apr

(a) 4月; (b) 5月 Fig. 6 Spatial distribution of monthly OLR anomalies in April-May 1989 (units: W m⁻²), and the black box indicates

the region of the Maritime Continent

(a) April; (b) May

图 7 给出了 1989 年 4 月海温异常场与典型 La Niña 年合成异常场的对比。可以看到 1989 年 4 月的海温异常(图 7a)总体上表现出了 La Niña 型海温分布特征,即赤道中东太 平洋和热带印度洋偏冷,西北太平洋偏暖(图 7b)。但两者之间仍然存在一定的差异,从差 值场(图 7c)上可以发现,1989 年 4 月,从赤道中东太平洋到海洋大陆东南部,大部分海 域的海温都较典型 La Niña 年偏低,表明此次 La Niña 事件的强度较强,而热带东印度洋则 有较多的海域出现了正差值,海温相对偏高,即太平洋和印度洋的海温存在不一致的变化。 图 7a、c 还显示,1989 年 4 月中南半岛东西两侧的南海北部和孟加拉湾的海温较常年和典 型 La Niña 年都明显偏低,但中南半岛南侧从马来西亚半岛西侧的热带北印度洋到南海南部 这一海域的海温却是偏高的。中南半岛周边海温变化的不一致表明其可能并不是影响当地对 流活动的主要因子。



(a) 1989年; (b) 典型 La Niña 年; (c) 1989年-La Niña 年的差值

Fig. 7 Contrast of the anomalies of sea surface temperature (SST) in April (units: $^{\circ}$ C), and the black box indicates MC

(a) 1989; (b) Typical La Niña Years; (c) the difference of 1989- Typical La Niña Years

1989年4月大气环流与典型LaNiña年相比,也存在很大的差异。中南半岛所处纬度范

围(10°-20°N)平均的经向垂直异常环流(图 8a)显示,异常上升运动主要出现在 150°E-150°W 的太平洋上,即菲律宾以东海温偏高的区域(图 7a),中南半岛及附近区域,90°-120°E 范围内则以异常下沉气流为主,这可能是包括中南半岛在内的海洋大陆西北部地区的对流发 展受到抑制的原因之一。典型 La Niña 年合成场的情况则不同,异常上升运动中心相对于 1989 年位置偏西,90°-150°E 之间存在大范围的异常上升运动(图 8b)。从垂直环流的差值 场中可以看到,90°-150°E 范围内均为下沉差值环流,更加明显地体现了 1989 年 4 月海洋 大陆北部的上升运动整体比典型 La Niña 年偏弱的特征(图 8c)。





(a) 1989 年; (b) 典型 La Niña 年; (c) 1989 年-La Niña 年的差值

Fig. 8 Contrast of vertical circulation anomalies averaged over 10° – 20° N in April. The pink / blue shading indicates the anomalous upward / downward motion with vertical velocities higher than 1×10^{-2} Pa s⁻¹ respectively (the vertical velocity is magnified by 100 times for matching the magnitude of horizontal speed), and the red box shows the longitude of ICP (95°–105°E)

(a) 1989; (b) Typical La Niña Year; (c) the difference of 1989- Typical La Niña Year

进一步比较低层 850hPa 大气环流的异常情况(图 9)可以看到,在 1989年,中南半岛

至菲律宾以东附近洋面为反气旋性异常环流,受到异常高压脊的控制(图 9a),不利于对流 发展;典型 La Niña 年合成的情况则不同,中南半岛 - 南海 - 西北太平洋一线均为气旋性异 常环流控制(9b),与这些区域旺盛的对流活动相匹配。低层异常水平环流的分布与异常垂 直环流同样存在较好的对应关系,即异常下沉运动对应低层反气旋性异常环流,上升运动则 与低层气旋性异常环流相联系。



通过上述对比分析,发现 1989 年 4 月的热带地区海温异常与典型 La Niña 年的情况存 在差异:太平洋和印度洋的海温出现了不一致变化,中南半岛东西两侧的海域异常偏冷,南 侧海域却偏暖。大气环流也有明显区别,与典型 La Niña 年相反,中南半岛低层大气为反气 旋性异常环流,受异常下沉气流控制。那么,是否存在着独立于 ENSO 的热带海温异常,引 起大气环流响应,进而影响到中南半岛的对流活动?为此,利用 Niño3.4 区 4 月海温距平和 线性回归方法,对 1979 年–2021 年的 4 月中南半岛 OLR 距平进行了去除 ENSO 影响的处 理,然后计算了其与热带海温的相关系数(图 10a)。图中显示,在热带东印度洋上存在较大 范围的显著正相关区,说明除了 ENSO 影响之外,热带东印度洋海温异常可能对中南半岛 的对流活动也起到了明显的调控作用。



图 10 (a) 1979-2021 年 4 月中南半岛区域平均 OLR 距平去除 ENSO 影响后与海温的相关系数(仅给出 通过 0.05 显著性检验的部分),其中黑色方框为热带东印度洋显著相关区,蓝色直线表示热带东印度洋--中南半岛的斜剖面;(b)热带东印度洋显著相关区平均海温序列去除 ENSO 影响后的斜剖面回归垂直环 流,阴影表示通过 0.05 显著性检验

Fig.10 (a) The correlation coefficients between the regional mean OLR anomaly on ICP that removed the influence of ENSO and the SST in April over 1979–2021 (only the sections that passed the 0.05 significance test are shown). The black box indicates the significant correlation area in the tropical eastern Indian Ocean (ETIO), and the blue line represents oblique section from ETIO to ICP; (b) The vertical circulation along the oblique section from ETIO to ICP regressed against the regional mean SST of the box in (a) after removed the influence of ENSO, and shading indicates that it passes the 0.05 significance test

为分析大气环流对热带东印度洋海温异常的响应,将水平和垂直风速线性回归到去除 ENSO 影响后的热带印度洋显著相关区(70°-103°E, 7°S-10°N,图 10a 中方框所围区域) 区域平均海温距平序列上,并绘制了热带东印度洋--中南半岛斜剖面(10°S, 70°E - 20°N, 105°E,图 10a 中蓝色直线所示)的回归垂直环流(图 10b),可以清楚地看到,热带东印 度洋海温偏高会激发出西南-东北向的异常垂直环流,印度洋上空为异常上升气流,高层向 东北输送,中南半岛受到其下沉支的控制,将抑制中南半岛对流的发展。



为验证上述回归分析结果,从非 ENSO 年中挑选出热带东印度洋海温高值年,即 4 月 热带东印度洋显著相关区的标准化海温异常大于 0.8 个标准差的年份(表 3),进行了合成分 析。合成的海温和热带东印度洋—中南半岛斜剖面垂直环流的异常场(图 11)显示,非 ENSO 年热带东印度洋海温显著偏高时(图 11a),热带东印度洋—中南半岛间存在西南—东北向的 异常垂直环流,气流在印度洋显著上升,中南半岛受到显著下沉气流的控制(图 11b),与去 ENSO 影响后的回归垂直环流场(图 10b)非常相似,进一步证实热带东印度洋海温异常能 够独立于 ENSO 激发异常垂直环流,进而影响中南半岛对流发展。





Fig.11 Anomalies of (a) SST anomalies (only the sections that passed the 0.05 significance test are shown, and the black box is the significant correlation area in the ETIO); (b) The vertical circulation along the oblique section from ETIO to ICP (the pink / blue shading indicates that upward / downward vertical velocities anomalies passed the 0.05 significance test) in April composed for high SST years in the ETIO during non–ENSO years

综上所述,热带东印度洋海温异常激发的垂直环流影响与 1989 年 4 月热带东印度洋海 温异常偏高、中南半岛上空为异常下沉运动,OLR 距平为正值的情况十分吻合,与爪哇岛 和苏门答腊岛南侧、西南侧(简称 JS)的海温变化相对于 ENSO 独立,且 1989 年为 JS Niño 年,JS 海温异常偏高,可能会导致中南半岛 4-6 月的降水偏少的研究结论(Lee et al, 2022) 也基本相符。因此,在 ENSO 事件对海洋大陆对流季节转换和周边地区环流演变的年际变 化起到主要调控作用的大背景下,特殊年份的热带东印度洋海温异常也有可能激发局地的异 常大气环流,对中南半岛的对流活动产生一定的独立影响。

7 结论与讨论

利用 ERA5 再分析资料和 NOAA OLR 等数据对春季海洋大陆及周边地区对流及环流的 季节转换气候特征进行了分析,发现春季海洋大陆对流的季节性移动、发展与热带印度洋西 风建立、副高带断裂、西太副高移动等环流变化之间具有良好的对应关系,表明春季海洋大 陆对流活动的季节转换与亚洲热带夏季风建立过程存在着密切的联系。

根据春季海洋大陆对流和相关环流的季节转换特征,定义了 6 个对流、环流特征指标, 探讨了海洋大陆对流季节转换和相关环流演变的年际变化及热带海温的可能影响。研究结果 表明,对流、环流指标之间具有良好的相关性,大部分相关系数均可通过 0.001 显著性检验, 表明海洋大陆对流季节转换和周边地区环流演变的年际变化具有较高的整体一致性,且 ENSO 事件在其中起到了明显的调控作用,即 El Niño(La Niña)年,苏门答腊北部对流偏 弱(强),热带北印度洋西风偏弱(强)、中南半岛对流偏弱(强),副热带高压断裂晚(早), 南海地区有异常反气旋(气旋)环流出现,通常南海季风建立晚(早),强度偏弱(强)。进 一步分析还发现,在 ENSO 事件对海洋大陆对流季节转换和周边地区环流演变的年际变化 起到主要调控作用的大背景下,独立于 ENSO 的热带东印度洋海温异常也有可能激发局地 异常大气环流,导致海洋大陆对流活动出现不一致的情况。

本文的研究证实了 ENSO 事件对春季海洋大陆对流季节转换和亚洲热带夏季风建立过 程的年际变化具有重要的调控作用,但同时也发现 ENSO 事件对海洋大陆对流活动的影响 存在一定的不确定性。其他热带地区海温异常的可能影响还需要开展更多的研究来加以证 实。对于表 2 中 OLR_{NS}表现不一致的另外两个年份,根据 Lee et al (2022)的研究结果, 2011 年为 JS Niña 年,爪哇岛和苏门答腊岛南侧及西南侧的印度洋海温异常偏低,使得苏门 答腊岛及周边区域 4-6 月的降水偏少,这可以作为 2011 年 OLR_{NS}为正值的一种解释。但 2015 年 OLR_{NS}为负值,与其它 El Niño 年的情况不符,同时也未发生 JSN 事件,其成因尚 需进一步探讨。此外,不同类型的 ENSO 事件对海洋大陆对流活动的影响存在怎样的差异? 其中物理机制如何?南海地区的对流活动和大气环流变化,除了前期中南半岛对流会影响到 南海的对流以外,还存在哪些可能的影响因素?这些仍是值得继续深入研究的方向。

19

参考文献(References)

- Aldrian E, Susanto R D. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature [J]. J. Climatol., 23: 1435–1452. doi:10.1002/joc.950
- Ashok K, Guan Z Y, Yamagata T. 2003. Influence of the Indian Ocean Dipole on the Australian winter rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 30: 1821. doi:10.1029/2003GL017926
- As-syakur A R, Adnyana I W S, Mahendra M S, et al. 2014. Observation of spatial patterns on the rainfall response to ENSO and IOD over Indonesia using TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) [J]. J. Climatol., 34: 3825–3839. doi:10.1002/joc.3939
- As–syakur A R, Osawa T, Miura F, et al. 2016. Maritime Continent rainfall variability during the TRMM era: The role of monsoon, topography and El Niño Modoki [J]. Dyn. Atms. Ocea., 75: 58–77. doi:10.1016/j.dynatmoce.2016.05.004
- Dong Z Z, Wang L, Xu P Q, et al. 2021. Interdecadal Variation of the Wintertime Precipitation in Southeast Asia and Its Possible Causes [J]. Journal of Climate, 34(9):3503–3521. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0480.1
- Dong Z Z, Wang L. 2022. Quasi-Biweekly Oscillation over the Western North Pacific in Boreal Winter and Its Influence on the Central North American Air Temperature [J]. Journal of Climate, 35(6):1901–1913. doi: 10.1175/JCLI-D-21-0531.1
- Chang C P, Harr P A, McBride J, et al. 2004a. Maritime continent monsoon: annual cycle and boreal winter variability [M]. World Scientific Series on Asian–Pacific Weather and Climate, 2: 107–150. doi:10.1142/9789812701411_0003
- Chang C P, Wang Z, Ju J H, et al. 2004b. On the relationship between western Maritime Continent monsoon rainfall and ENSO during northern winter [J]. Climate, 17: 665–672. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0665:Otrbwm>2.0.Co;2
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. Geophys. Res. Atmos., 115: D24122. doi:10.1029/2010JD014761
- Hamada J–I, Mori S, Kubota H, et al. 2012. Interannual rainfall variability over northwestern Jawa and its relation to the Indian Ocean Dipole and El Niño–Southern Oscillation events [J]. SOLA, 8: 69–72. doi:10.2151/sola.2012-018
- He J H, Wen M, Ding Y H, et al. 2006a. Possible mechanism of the effect of convection over Asian– Australian "land bridge" on the East Asian summer monsoon onset [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 49(11): 1223–1232. doi:10.1007/s11430-006-2039-0
- He J H, Wen M, Wang L J, et al. 2006b. Characteristics of the onset of the Asian summer monsoon and the importance of Asian–Australian "land bridge" [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 23(6): 951–963. doi:10.1007/s00376-006-0951-z
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 730: 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- 何金海, 徐海明, 周兵, 等. 2000. 关于南海夏季风建立的大尺度特征及其机制的讨论 [J]. 气候与环境研究, 2000(04): 333–344. He Jinhai, Xu Haiming, Zhou Bin, et al. 2000. Discussion on the large-scale characteristics and mechanism of the establishment of the South China Sea summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2000(04): 333–344. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.04.01
- 何金海,朱乾根. 1996. T_{BB}资料揭示的亚澳季风区季节转换及亚洲夏季风建立的特征 [J]. 热带气象学报, 12(01): 34-42. He Jinhai, Zhu Qian'gen, Murakami M. 1996. The seasonal transition of Asian-Australian monsoon and the onset feature of the Asia summer monsoon by

TBB data [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 12 (01): 34–42.

- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. 大气科学, 27(4): 484–502. Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 484–502. doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2003.04.05
- Huang B, Thorne W P, Banzon F V, et al. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and InterContrasts [J]. Journal of Climate, 30(20): 8179–8250. doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern–Pacific and central–Pacific types of ENSO [J]. J. Climate, 22: 615–632. doi:10.1175/2008JCLI2309.1
- Kubota H, Shirooka R, Hamada J–I, et al. 2011. Interannual rainfall variability over the eastern Maritime Continent [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 89A: 111–122. doi:10.2151/jmsj.2011A07
- Lee S, Lopez H, Foltz R G, et al. 2022. Java–Sumatra Niño/Niña and Its Impact on Regional Rainfall Variability [J]. Journal of Climate, 35 (13): 4291–4308. doi:10.1175/JCLI-D-21-0616.s1
- Li T, Wang B, Wu B, et al. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review [J]. Journal of Meteorological Research, 31(6): 987– 1006. doi:10.1007/s13351-017-7147-6
- Liu Y M, Chan J, Mao J–Y, et al. 2002. The Role of Bay of Bengal Convection in the Onset of the 1998 South China Sea Summer Monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 2731–2744. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2731:TROBOB>2.0.CO;2
- Neale R, Slingo J. 2003. The Maritime Continent and its role in the global climate: A GCM study[J]. Journal of Climate, 16(5): 834–848. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0834:TMCAIR>2.0.CO;2
- Qian J H. 2008. Why precipitation is mostly concentrated over islands in the Maritime Continent [J]. J. Atmos. Sci., 65: 1428–1441. doi:10.1175/2007JAS2422.1
- Qian W, Yang S, 2000. Onset of the regional monsoon over Southeast Asia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 75: 29–38. doi:10.1007/s007030070013
- Ramage C S. 1968. Role of a tropical "maritime continent" in the atmospheric circulation [J]. Monthly Weather Review, 96(6): 365–370. doi:10.1175/1520-0493(1968)096< 0365:ROAT MC>2.0.CO;2
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature, 401: 360–363. doi:10.1038/43854
- Salimun E, Tangang F, Juneng L, et al. 2014. Differential impacts of conventional El Niño versus El Niño Modoki on Malaysian rainfall anomaly during winter monsoon [J]. J. Climatol., 34: 2763–2774. doi:10.1002/joc.3873
- Shibagaki Y, Shimomai T, Kozu T, et al. 2006. Multiscale aspects of convective systems associated with an intraseasonal oscillation over the Indonesian Maritime Continent [J]. Mon Wea Rev, 134(6): 1 682–1 696. doi:10.1175/MWR3152.1
- Simpson J, Keenan T D, Ferrier B, et al. 1993. Cumulus mergers in the Maritime Continent region [J]. Meteor. Atmos. Phys., 51: 73–99. doi:10.1007/BF01080881
- Tao S Y, Zhang X L. 2004. The seasonal change of the rainfall patterns in East Asia and its

relationship with the seasonal change of the East Asian summer monsoon [C]. The fourth international symposium on Asian monsoon system (ISAM4), Kunming, china., 2004: 24–29.

- Wang B, LinHo. 2002. Rainy season of the Asian–Pacific summer monsoon [J]. J. Climate, 15: 386– 398. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific–East Asian Teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000) 013<1517:PEATHD> 2.0.CO;2
- Wang M, Guan Z Y, Jin D C. 2018. Two new sea surface temperature anomalies indices for capturing the eastern and central equatorial Pacific type El Niño–Southern Oscillation events during boreal summer [J]. J. Climatol., 38: 4066–4076. doi:10.1002/joc.5552
- Wang Y F, Wang B, Oh J H. 2001. Impact of the preceding El Niño on the East Asian summer atmosphere circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79: 575–588. doi:10.2151/jmsj.79.575
- Wen M, Zhang R H. 2007. Role of the quasi-biweekly oscillation in the onset of convection over the Indochina Peninsula [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 133: 433–444. doi:10.1002/qj.38
- 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 [J]. 大气科学, 28(6): 864-875. Wen Min, He Jinhai, Xiao Ziniu. 2004. Impact of the convection over the Indo-China Peninsula on the onset of SCS summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 864-875. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06. 06
- Wu C H, Hsu H H. 2009. Topographic influence on the MJO in the Maritime Continent [J]. Journal of Climate, 22(20): 5433–5448. doi:10.1175/2009JCLI2825.1
- 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. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0913:TPFATT>2.0.CO;2
- Wu R, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO–related rainfall anomalies in East Asia [J]. Journal of Climate, 16(22): 3742–3758. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<37 42:EOERAI> 2.0.CO;2
- 王鑫, 王东晓, Chidong Zhang, 等. 2016. "海洋性大陆"观测研究计划介绍及中国参与进展
 [J]. 气象学报, 74(4): 653-654. Wang Xin, Wang Dongxiao, Zhang Chidong, et al. 2016. Introduction of observation and research program of "oceanic continent" and progress of China's participation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(4): 653-654. doi:10.11676/qxxb2016.070
- 许琪,管兆勇. 2017. 海洋性大陆核心区域非绝热加热年代际变化及其与东亚夏季风变异的 可能联系 [J]. 热带气象学报, 33(1): 21–29. Xu Qi, Guan Zhaoyong. 2017. Interdecadal change of diabatic forcing over key region of the maritime continent and its possible relations with East Asian summer monsoon anomalies [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(1): 21–29. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.01.003
- Yang S, Zhang T, Li Z, et al. 2019. Climate Variability over the Maritime Continent and Its Role in Global Climate Variation: A Review [J]. Journal of Meteorological Research 33: 993–1015. doi:10.1007/s13351-019-9025-x
- Yoneyama K, Zhang C. 2020. Years of the Maritime Continent [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(12). doi:10.1029/2020GL087182
- 周波涛, 崔绚. 2008. 春季 Hadley 环流与长江流域夏季降水关系的数值模拟 [J]. 气候与环境 研究, 13(2): 182–188. Zhou Botao, Cui Xuan. 2008. Modeling the relationship between spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. Climatic and

Environmental Research (in Chinese), 13(2): 182–188. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02. 07

- Zhang R, Min Q, Su J. 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone [J]. Science China Earth Sciences, 60(6): 1124–1132. doi:10.1007/s11430-016-9026-x
- Zhang T T, Yang S, Jiang X W, et al. 2016. Seasonal–interannual variation and prediction of wet and dry season rainfall over the Maritime Continent: Roles of ENSO and monsoon circulation [J]. J. Climate, 29: 3675–3695. doi:10.1175/jcli-d15-0222.1
- Zhang Y C, Qian Y F. 2002. Mechanism of thermal features over the Indo–China peninsula and possible effects on the onset of the South China Sea monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 19: 885–900. doi:10.1007/s00376-002-0053-5
- Zhou B T, Wang H J. 2006. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. J. Geophys Res., 111: D16109. doi:10.1029/2005JD007006
- Zhu J, Guan Z Y, Wang X D. 2022. Variations of Summertime SSTA Independent of ENSO in the Maritime Continent and Their Possible Impacts on Rainfall in the Asian–Australian Monsoon Region [J]. Journal of Climate, 35 (24):7949–7964. doi:10.1175/JCLI-D-21-0783.1

