



南海夏季风爆发和撤退的多时间尺度变化及其机制研究进展

陈文^{1,2*}, 胡鹏¹, 皇甫静亮¹

1. 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2021-06-29; 收修改稿日期: 2022-02-09; 接受日期: 2022-02-10; 网络版发表日期: 2022-04-27

国家自然科学基金创新研究群体项目(编号: 41721004)资助

摘要 南海夏季风爆发预示着东亚夏季风和西北太平洋夏季风的建立以及主雨季的开始. 南海夏季风爆发的早晚, 对于中国夏季的气候异常有着重要的指示意义, 因此南海夏季风爆发受到了广泛的研究关注, 并在近几十年一直是季风研究的热点. 文章回顾了南海夏季风爆发在多个时间尺度(从年代际到天气尺度)上的变化及其机制, 并聚焦于最近五年以来的研究进展. 在年代际尺度上, 南海夏季风爆发日期在20世纪90年代中后期经历了显著的提前, 这可能与太平洋海温的年代际背景有关. 在年际时间尺度上, 厄尔尼诺-南方涛动被认为是影响夏季风爆发最关键的因子, 然而二者的关系在近年来有明显减弱. 季节内振荡可以显著地调节南海夏季风的爆发, 由不活跃位相向活跃位相的转变, 可能比位相本身更值得关注. 南海夏季风爆发和天气尺度系统(如热带气旋)之间存在着密切的相互作用, 热带气旋是夏季风爆发重要的触发因子, 而夏季风爆发又会为热带气旋生成提供有利的背景环流. 此外, 本文还回顾了近期关于南海夏季风撤退的一系列工作. 在此基础上, 最后提出了一些未来值得进一步探讨的科学问题.

关键词 南海夏季风爆发, 多时间尺度变化, 厄尔尼诺-南方涛动, 季节内振荡, 热带气旋

1 引言

中国南海(South China Sea)位于亚澳季风区的中心, 是连接东亚季风、南亚季风、西北太平洋季风、澳大利亚季风的桥梁; 同时也是Walker环流和局地Hadley环流的上升支和衔接区(Wang和Wu, 1997; Wang等, 2009; 丁一汇等, 2018; 杨崧等, 2019). 南海夏季风活动的异常, 还可以通过遥相关, 对全球其他地

区的天气气候产生重要的影响(Fukutomi和Yasunari, 1999; Wang等, 2001; Liu和Wang, 2013; Xu等, 2019), 因而受到了广泛的研究关注. 自二十多年前的南海季风试验(South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX)以来, 有关南海夏季风的爆发、活跃/间歇循环, 以及季风的维持与变化, 都有了较为深刻的认识(Lau等, 1998, 2000; Chen等, 2001; Ding和Liu, 2001; Ding等, 2004; Wang等, 2009).

中文引用格式: 陈文, 胡鹏, 皇甫静亮. 2022. 南海夏季风爆发和撤退的多时间尺度变化及其机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 52(6): 992–1009, doi: 10.1360/SSTe-2021-0185

英文引用格式: Chen W, Hu P, Huangfu J. 2022. Multi-scale climate variations and mechanisms of the onset and withdrawal of the South China Sea summer monsoon. Science China Earth Sciences, 65(6): 1030–1046, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9902-5>

南海夏季风的爆发, 标志着大气环流自冬季型向夏季型的调整; 这不仅意味着东亚夏季风和西北太平洋夏季风开始建立, 也预示着主雨季的开始(Lau和Yang, 1997; Wu和Wang, 2001; Wang和LinHo, 2002; Wang等, 2004; Ding等, 2015). 南海夏季风爆发的偏早或偏晚, 常常伴随着中国夏季的气候异常; 例如, 当南海季风爆发偏晚时, 长江中下游地区5月的降水一般偏多(Jiang等, 2018), 而长江下游地区到日本南部一带的夏季总降水量也倾向于偏多(Huang等, 2006; He和Zhu, 2015). 此外, 当南海季风爆发偏晚时, 早夏季节会出现更强的准双周振荡; 而在夏季风爆发偏早时, 则会出现更强的30~60天振荡(Kajikawa和Yasunari, 2005). 而近期研究还发现南海夏季风爆发日期与登陆中国大陆的热带气旋个数呈显著的反相关(Wang和Chen, 2018). 正因为南海夏季风爆发成因的复杂性以及对随后的夏季气候异常的重要指示意义, 近年来有关南海夏季风爆发方面的研究取得了不少进展. 例如, 一方面, 早期工作主要关注的是夏季风爆发的年际变率, 而近期工作则强调了夏季风爆发的年代际变化, 尤其是年际关系的年代际变化(Liu等, 2016; Hu等, 2018b; Lin和Zhang, 2020; Jiang和Zhu, 2021; Geen, 2021; Zeng等, 2021; You等, 2021). 另一方面, 早期工作认为ENSO是影响南海夏季风爆发最为重要的因子, 然而它们二者的关系在近年来有明显减弱(Liu和Zhu, 2019; Deng等, 2020; Lu等, 2020; Liu和Zhu, 2021; Jiang和Zhu, 2021). 因此, 近几年的研究试图寻找影响夏季风爆发的其他重要因子, 尤其是这些因子之间的配合, 这包括南亚高压(Liu和Zhu, 2016)、越赤道气流(Lin等, 2017; Hu等, 2018b)、北极涛动(Hu等, 2021)、沿急流传播的波列(Xu和Li, 2021)、季节内振荡(Wang等, 2018; Li T等, 2020)、天气尺度系统(Huangfu等, 2017b, 2017c, 2018)等. 此外, 南海夏季风的撤退标志着东亚夏季风的结束, 研究夏季风的撤退, 不仅可以帮助我们理解南海夏季风的季节进程, 还可以更好地认识夏季风撤退异常带来的气象灾害成因; 近期有关南海夏季风的撤退也取得了一系列研究进展(如Luo和Lin, 2017; Hu等, 2019c). 本文拟系统回顾南海夏季风爆发的多时间尺度(从年代际尺度到天气尺度)变化特征以及其中的机制, 同时回顾近年来有关南海夏季风撤退的工作, 重点关注了近五年的研究进展; 认识南海夏季风爆发的变异特征和机理并与南海夏季风

撤退进行综合比较, 显然可以在以往侧重夏季风强度之外从夏季风演变来更好地深入理解东亚夏季风.

2 南海夏季风的气候态年循环

图1给出了南海地区纬向平均的低层风场和降水的年变化气候态. 可以看到, 南海地区的季风特征非常明显, 表现为低层风场的季节性反转, 以及夏季多雨、冬季少雨之间的强烈对比(Lau和Yang, 1997; Wang和Wu, 1997; Wang等, 2004, 2009; Hu等, 2019c). 南海夏季风爆发一般发生在5月中下旬, 其主要特征是低空西南风和旺盛对流的突然出现(图1), 此外还包括南海越赤道气流和季风槽建立、西太平洋副热带高压东撤、南亚高压移动至中南半岛、局地季风经圈环流形成、温湿等要素的突变等(Lau和Yang, 1997; Ding和Liu, 2001; 何金海等, 2001; Ding等, 2004; Wang等, 2004, 2009; Hu等, 2018b). 南海夏季风的爆发, 标志着大尺度的东亚和西北太平洋的夏季风开始建立(Lau和Yang, 1997; Wu和Wang, 2001; Wang和LinHo, 2002; Wu, 2002; Ding等, 2004; Wang等, 2004; Ding和Chan, 2005; Ding, 2007; Ding等, 2015; Bombardi等, 2019, 2020).

然而, 相比于夏季风在整个南海地区的突然一致爆发, 南海夏季风在不同纬度带上的撤退表现出逐步的特征. 就气候态而言, 夏季风大概需要两个多月的时间(从9月到11月)才能从南海北部撤退到南海南部(Wang和Wu, 1997; Wang等, 2009; Hu等, 2019c). 并且, 相比于西风 and 旺盛对流的同时建立, 季风西风的撤退明显早于雨季的撤退; 即使在低层西风已经被东风取代之后, 较强的降水依然能够持续一段时间, 这可能与秋季活跃的热带气旋等热带扰动有关(Lau等, 1998; Li和Zhang, 2009; Wang等, 2009; Wu和Takahashi, 2018; Hu等, 2019c).

3 南海夏季风爆发的年代际变化

南海夏季风爆发日期的定义方式有很多(Lau和Yang, 1997; 何金海等, 2001; Wang等, 2004; Liu等, 2016; He等, 2017; Luo和Lin, 2017; Hu等, 2018b; Liu和Zhu, 2019), 主要可以归结为以下三类: 降水或对流活动、大气环流(低层风场、垂直风切变、经向温度梯

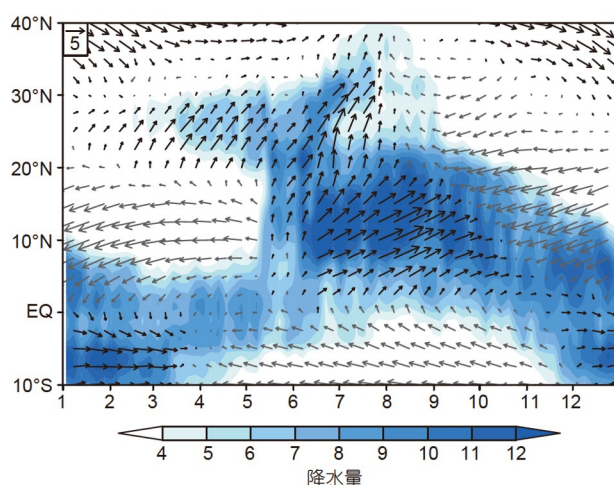


图1 1979~2016年南海地区(110°~120°E)气候态平均的850hPa风场和降水的纬度-时间变化

风场单位 m s^{-1} , 黑色和灰色矢量分别表示对应着纬向西风和东风; 采用的是NCEP-DOE再分析资料; 降水单位 mm day^{-1} ; 采用的是CMAP资料

度等)、温湿要素(例如假相当位温)。Wang等(2004)提出, 可以将南海中部地区(110°~120°E, 5°~15°N)低层西风的稳定建立作为夏季风爆发的客观判据。此定义既简洁又有效, 因而被广泛地采用(Kajikawa和Wang, 2012; Chen, 2015; He和Zhu, 2015; Huangfu等, 2015, 2017b, 2017c, 2018; Wang和Kajikawa, 2015; Zhu和Li, 2017; Hu等, 2018b, 2021; Wang等, 2018; Martin等, 2019)。基于Wang等(2004)及其后续研究, 并综合考虑多套再分析资料, Hu等(2018b, 2020b)给出了南海夏季风爆发日期的时间序列, 如图2所示。

许多工作都指出, 南海夏季风爆发日期在20世纪90年代中期经历了显著的年代际变化, 提前了约半个月(Kajikawa和Wang, 2012; Kajikawa等, 2012; Xiang和Wang, 2013; Yuan和Chen, 2013; Feng和Hu, 2014; Chen, 2015; Ding等, 2015; Wang和Kajikawa, 2015; 丁硕毅等, 2016; Luo和Lin, 2017; 胡鹏和陈文, 2018; Lin和Zhang, 2020)。这一点也为图2所证实: 1979~1993年平均的爆发日期是5月28日, 而1994~2012年平均的爆发日期是5月12日; 二者相差两周多, 且通过了置信度为99%的显著性检验。南海夏季风爆发年代际提前的直接原因, 可能与源自西北太平洋、向西北方向传播的热带扰动有关; 在20世纪90年代中期之后, 季节内振荡的增强和热带气旋活动的增多, 更早地触发了夏季风的爆发(Kajikawa和Wang, 2012; Xiang和Wang,

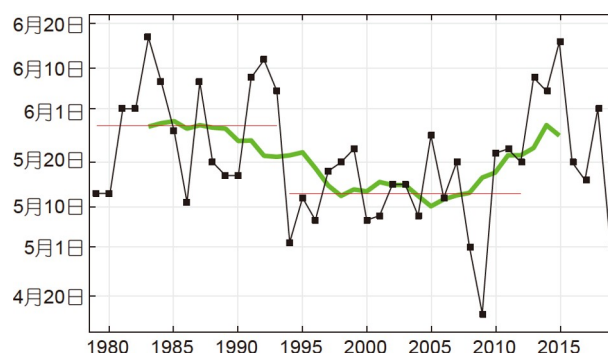


图2 1979~2019年南海夏季风爆发日期

绿线为9年滑动平均的爆发日期, 红线为1979~1993年和1994~2012年平均的爆发日期。具体日期可参考Hu等(2018b)和Hu等(2020b)

2013; Yuan和Chen, 2013; Wang和Kajikawa, 2015)。而此次年代际变化的根本原因, 则可能是菲律宾海附近海温的年代际增暖(Kajikawa和Wang, 2012; Xiang和Wang, 2013; Yuan和Chen, 2013; Feng和Hu, 2014; Ding等, 2015; Wang和Kajikawa, 2015)。

值得注意的是, 此次南海夏季风爆发的年代际提前, 并不只是一个局地的现象。实际上, 整个亚洲地区的夏季风爆发, 包括阿拉伯海、孟加拉湾、南海、菲律宾海, 都在20世纪90年代中后期经历了显著的年代际提前(Kajikawa和Wang, 2012; Kajikawa等, 2012; Yu等, 2012; Xiang和Wang, 2013)。只是略微不同于南海夏季风爆发在1993/1994年之后的年代际提前, 阿拉伯海和孟加拉湾夏季风爆发的年代际提前发生在1998/1999年之后。基于观测数据和模式模拟, Xiang和Wang(2013)将亚洲季风爆发的年代际提前归因于太平洋海温的平均态变化, 即类似于La Niña型分布的年代际尺度海温异常, 通过激发西传的赤道Rossby波并与基本气流相互作用, 影响亚洲季风区的环流异常, 从而引起夏季风爆发的年代际偏早。

此外, 有部分工作认为, 将南海夏季风爆发日期年代际变化的突变年份定在20世纪90年代后期(比如1998/1999年)可能更加恰当。例如Huangfu等(2015)发现南海夏季风爆发日期的突变点有两个, 分别是20世纪90年代的中期和后期; 在进一步检查了海平面气压、海温、OLR之后, 他们发现以1998/1999年为界的前后差异更加显著和系统化。Huangfu等(2015)认为南海夏季风爆发的这两个突变点可能是由不同的因子所引起的, 20世纪90年代中期的年代际变化可能是由于

局地强迫所引起的, 即菲律宾海的时代际增暖; 而90年代后期的年代际变化可能是由于更大尺度的海温强迫所引起的, 即太平洋上类似于La Niña型的海温梯度; 1994~1998年则可认为是过渡时段(Huangfu等, 2015). 这一观点被Hu等(2018b)的工作所支持, 他们发现南海夏季风爆发日期与5月南海越赤道气流的关系在20世纪90年代后期出现了明显的年代际变化, 由显著的负相关变为了几乎不相关. Hu等(2018b)认为这是因为南海夏季风爆发的机制在这两个年代里是不同的; 1998年之前, 南海夏季风爆发主要由北移的赤道辐合带所引起, 而后者跟南海越赤道气流的关系十分密切; 1999年之后, 夏季风爆发则主要是由西移的热带扰动所触发. 而在1994~1998年间, 西移的热带扰动并不明显, 此时南海夏季风爆发的机制可能更接近于前一个年代(Hu等, 2018b).

最后需要指出的是, 与南海夏季风爆发的年代际提前相伴随, 整个亚洲-太平洋季风系统也在同期经历了显著的年代际变化. 除了前面提到的南海夏季风爆发日期, 南海地区的夏季风环流(Wang等, 2009; Wu等, 2010; Ha等, 2014; Choi等, 2017)、热带气旋活动(Kwon等, 2007; Chen等, 2012; Ha等, 2014; Chen T C等, 2017)以及季节内振荡(Kajikawa等, 2009; Ha等, 2014), 都在20世纪90年代中期经历了显著的年代际变化. 而且, 华南地区的夏季降水在1992/1993年之后显著地增加(Ding等, 2008, 2009; Wu等, 2010), 这可能与南海地区的热带气旋活动的年代际变化有关(Kwon等, 2007; Chen等, 2012; Ha等, 2014; Chen J P等, 2017). 与此同时, 华南地区的极端降水和土壤湿度也经历了显著的年代际增加(Yao等, 2008; Ning和Qian, 2009). 此外, 东亚-西北太平洋夏季风的主导模态也发生了变化, 在1993/1994年之前主要是与ENSO(El Niño-Southern Oscillation)有关, 而之后则主要与西北太平洋夏季风有关(Kwon等, 2005; Yim等, 2008; Lee等, 2014). Lu等(2011)指出夏季东亚上空的副热带西风急流的年际变率也在20世纪90年代中期之后明显减弱. Chen等(2019)曾总结过在20世纪90年代出现的年代际变化现象, 这些同时出现的年代际变化很可能与太平洋海温年代际尺度的背景场变化有关(Xiang和Wang, 2013), 即太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)由正到负的位相转换(Newman等, 2016; Henley, 2017).

4 南海夏季风爆发的年际变化

南海夏季风爆发日期除了有明显的年代际变化之外, 还表现出明显的年际变化特征(图2). 有关南海夏季风爆发的年际变化研究揭示出其影响因子的复杂性: 从时间尺度进行分类的话, 这些因子包括热带气旋、冷锋等天气尺度系统, 准双周振荡、30~60天振荡等季节内振荡, ENSO、热带印度洋海温(Yuan等, 2008; Feng等, 2021)、东亚冬季风(胡鹏和陈文, 2018)、南海越赤道气流(Hu等, 2018b)等年际尺度信号. 从扰动的来源进行分类的话, 这些因子又可以分成: 源自南方的越赤道气流(Lin等, 2017; Hu等, 2018b)、赤道辐合带(Zhou等, 2005; Kajikawa和Wang, 2012; Hu等, 2018b)等, 源自东方的热带气旋(Mao和Wu, 2008; Kueh和Lin, 2010; Kajikawa和Wang, 2012; Chen, 2015; Huangfu等, 2017c)、准双周振荡(Chen和Chen, 1995; Zhou和Chan, 2005; Wu, 2010; Lee等, 2013)等, 源自西方的MJO(Madden-Julian Oscillation)和/或30~60天振荡(Chen和Chen, 1995; Zhou和Chan, 2005; Straub等, 2006; Tong等, 2009; Shao等, 2015; Wang等, 2018)、季风爆发涡旋(Monsoon Onset Vortex; Lau等, 1998, 2000; Ding和Liu, 2001; Liu等, 2002; Ding等, 2004; Wu等, 2005, 2012; 吴国雄等, 2010; Li K等, 2016)等, 源自北方的冷锋(Chang和Chen, 1995; Ding和Liu, 2001; Tong等, 2009; Kueh和Lin, 2010; Huangfu等, 2018)及高原积雪等其他热带外因子(Luo等, 2016; Liu和Zhu, 2019; 李春晖等, 2019). 南海夏季风爆发之所以受到这么多因子的影响, 可能与其独特的地理位置——位于亚澳季风区的中心有关(Wang和Wu, 1997; Wang等, 2009), 图3给出了影响南海夏季风爆发年际变化的影响因子示意图. 本节主要回顾太平洋海温异常(ENSO)对南海夏季风爆发的影响, 这通常被认为是最重要的影响因子.

大量研究表明, 在El Niño事件的次年, 南海夏季风爆发日期倾向于偏晚, 即El Niño会推迟南海夏季风的爆发(Ding和Liu, 2001; Zhou和Chan, 2007; Lau和Nath, 2009; Liu等, 2016; Luo等, 2016; He等, 2017; Luo和Lin, 2017; Zhu和Li, 2017; 胡鹏和陈文, 2018; Martin等, 2019). 事实上, 不管是统计经验预测(Zhu和Li, 2017)还是模式动力预测(Martin等, 2019), ENSO都被认为是南海夏季风爆发最主要的预报因子之一. El

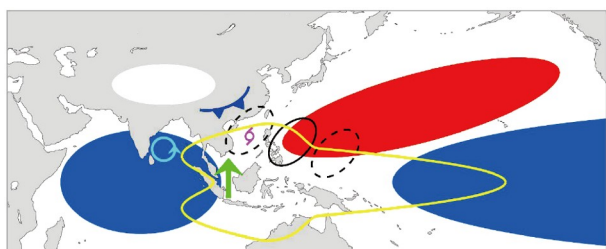


图3 影响南海夏季风爆发年际变化的重要因子

包括厄尔尼诺-南方涛动(蓝色填色)、太平洋年代际振荡(红色填色)、印度洋海盆一致模(蓝色填色)、青藏高原积雪(白色填色)、越赤道气流(绿色箭头)、MJO和/或30~60天振荡(黄线)、准双周振荡(黑线)、热带气旋(洋红)、冷锋(蓝线)、孟加拉湾季风爆发涡旋(青线)等

Niño影响南海夏季风爆发的机制, 主要是通过调节Walker环流(Webster和Yang, 1992; Xie等, 1998; Liang等, 2013; Luo等, 2016)和激发菲律宾海异常反气旋(Zhang等, 1996; Wang等, 2000; Yuan等, 2008; Xie等, 2009, 2016; Li T等, 2017; 张人禾等, 2017). Walker环流的下沉支会抑制南海周边地区对流活动的发生, 而菲律宾海异常反气旋南侧的偏东风会阻碍低层西风的建立, 从而引起南海夏季风爆发的偏晚.

菲律宾海异常反气旋被认为是ENSO影响东亚季风的桥梁, 它在El Niño发展年的秋季开始出现, 在El Niño峰值的冬季得以发展, 并能够一直持续到El Niño衰减年的夏季(Wang等, 2000; Xie等, 2009, 2016; Li T等, 2017; 张人禾等, 2017). 在El Niño达到峰值的冬季, 此异常反气旋可以引起东亚冬季风的偏弱; 而在El Niño衰减年的夏季, 它又会引起东亚夏季风的偏强(Chen等, 2013; Zhou等, 2013; Feng和Chen, 2014; Feng等, 2014; Shi和Qian, 2018), 并与太平洋-东亚型遥相关密切相关(Wang等, 2000; Wang和Zhang, 2002; Ding, 2007). 目前关于菲律宾海异常反气旋形成和维持的机制取得了不少进展(Xie等, 2016; Li T等, 2017; 张人禾等, 2017), 提出了如下八种机制: 西太平洋冷海温(和降水负异常)所激发的赤道Rossby波响应(Zhang等, 1996; Wang等, 2000)、局地海气相互作用正反馈(Wang等, 2000)、印度洋电容器效应(Xie等, 2009)、暖池地区海气相互作用理论(Wang等, 2017)或印度洋-西太平洋电容器效应(Xie等, 2016)、湿熵平流与Rossby波调制(基本气流的相当 β 效应; Wu等, 2017a, 2017b)、大西洋电容器效应(Rong等, 2010)、中太平

洋异常海温强迫(Chen等, 2016)、联合模态理论(Stuecker等, 2015; Li T等, 2016). 既然绝大部分的南海夏季风爆发日期都在5月(见图1和图2), 此时起主要作用的机制应该是局地海气相互作用正反馈(Wang等, 2000)和湿熵平流(Wu等, 2017a, 2017b).

第1节中提到过的南海夏季风爆发的偏早或偏晚, 常常伴随着夏季东亚的气候异常, 这在很大程度上可以用自冬季一直维持到夏季的菲律宾海异常反气旋来解释. 以南海夏季风爆发日期与长江下游-日本南部一带夏季总降水量的正相关为例: 在晚春/早夏时节, 菲律宾海异常反气旋南侧的偏东风会阻碍南海夏季风的爆发; 而在盛夏季节, 反气旋西北侧的异常西南风会增强水汽输送, 从而引起长江下游-日本南部一带的降水偏多(Huang等, 2006; He和Zhu, 2015). 或者从太平洋-日本(Pacific-Japan)型遥相关, 即东亚中纬度地区和西北太平洋地区的降水在季节内和年际尺度上的反相关(Nitta, 1987; Huang和Lu, 1989; Huang和Sun, 1992; Wang等, 2001; Feng等, 2014; Xie等, 2016; Xu等, 2019)的角度来理解这个现象: 菲律宾海异常反气旋除了能引起南海夏季风爆发偏晚之外, 还会一直抑制南海-菲律宾海地区的降水(He和Zhu, 2015; Xie等, 2016); 上述降水负异常可以通过激发北传的Rossby波列, 引起东亚副热带-日本一带的降水正异常.

最后需要指出, ENSO与南海夏季风爆发的关系并不稳定, 且在近年来有明显减弱(Hu等, 2020b; Jiang和Zhu, 2021; Liu和Zhu, 2021). 例如在2017/2018年的La Niña事件之后, 2018年的南海夏季风爆发极端地偏晚(Liu和Zhu, 2019; Lu等, 2020), 并引起了华南地区的极端高温事件(Deng等, 2020). Liu和Zhu(2019)以及Deng等(2020)指出该年极端偏晚的夏季风爆发可能和春季北大西洋海温异常激发的中高纬环流异常有关. 而在2018/2019年的El Niño事件之后, 2019年的南海夏季风爆发却又极端地偏早. Hu等(2020b)认为这可能与该年的瞬变系统, 如季节内振荡、季风爆发涡旋、冷锋等活动有关. Liu和Zhu(2020)则强调了孟加拉湾热带气旋(季风爆发涡旋)对于2019年南海夏季风爆发的触发作用. Jiang和Zhu(2021)最近的工作指出, ENSO和南海夏季风爆发关系的年代际减弱, 可能与近年来频繁发生的冷舌型La Niña事件有关. 不同于传统的La Niña事件, 这些冷舌型La Niña事件的主要特征是中东太平洋出现经向风辐散异常(Jiang和Zhu, 2021). 但正

如2018/2019年厄尔尼诺之后极端偏早的南海夏季风所表明的那样, 仅用La Niña事件并不能完全解释ENSO和季风爆发关系的年代际减弱, 这一问题仍有待深入研究.

长期以来, ENSO一直被认为是南海夏季风爆发最重要的预报因子(Zhu和Li, 2017; Martin等, 2019), 因而二者关系的减弱可能会降低后者在季节预报尺度(Zhu和Li, 2017)的可预报性. 因此, 南海夏季风爆发的季节内尺度预测也就更加重要了(Jiang和Zhu, 2021; Liu和Zhu, 2021), 下一节主要关注南海夏季风爆发和季节内振荡的关系.

5 南海夏季风爆发与季节内振荡

季风和热带大气季节内振荡的关系十分密切, 这体现在二者之间密切的相互作用上. 一方面, 大尺度季风环流为季节内振荡的活动提供了背景场. 例如, 季风环流的大背景会引起季节内振荡(如30~60天振荡)在冬季和夏季的季节差异. 一个关于赤道非对称的、类似于夏季的海温基本态, 会引起赤道Kelvin波的衰减和赤道Rossby波的发展; 而关于赤道对称、类似于冬季的海温基本态, 会引起赤道Kelvin波的发展和赤道Rossby波的衰减(Li, 2014). 因而冬季的30~60天振荡主要表现为沿赤道向东传播的形式(Madden和Julian, 1994; Zhang, 2005); 而夏季季节内振荡(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)则在亚洲季风区明显地表现出北传的特征(Li, 2014; Li T等, 2020), 这种北传还与季风环流的垂直东风切变和水汽分布等有关(Jiang等, 2004; Li等, 2021). 并且, 季节内振荡在早夏和晚夏呈现出一定的差异(Kajikawa和Yasunari, 2005; Yang等, 2008; Hsu, 2012), 这和基本气流在夏季的季节内变化(例如西太平洋副热带高压的北跳)有关. 此外, 气候季节内振荡(Climatological Intraseasonal Oscillation, CISO)是指锁相于年循环的季节内振荡(Wang和Xu, 1997; Wu和Wang, 2001; Hsu, 2012), 这一现象在亚洲-太平洋季风区十分显著.

另一方面, 季节内振荡也会影响季风活动, 比如: 触发夏季风的爆发(Chen和Chen, 1995; Zhou和Chan, 2005; Straub等, 2006; Tong等, 2009; Kajikawa和Wang, 2012; Lee等, 2013; Shao等, 2015; 林爱兰等, 2016; Wang等, 2018; Hu等, 2019c); 引起夏季风和雨季的活

跃/间歇循环(Chen和Chen, 1995; Webster等, 1998; Chen等, 2000; Chan等, 2002; Mao和Chan, 2005; Waliser, 2006; Wang, 2008; Goswami, 2012); 调制夏季风的撤退(Hu等, 2018a, 2019a, 2019b, 2020a); 影响季节总降水量的年际和年代际变化(Goswami和Mohan, 2001; Waliser, 2006; Feng等, 2013; Li等, 2015a, 2015b, 2018)等. 此外, 季节内振荡可以引起不同季风子系统之间的耦合(Chen等, 2000; Chen等, 2001; Li等, 2001; Ding和Chan, 2005; Wang等, 2009; Mao等, 2010; Goswami, 2012; Lee等, 2013; Wei等, 2019). 最后, 季节内振荡被认为是季风系统短期预报和中期预测的重要信号来源(Wheeler和Hendon, 2004; Zhou和Chan, 2005; Wang等, 2009; Lee等, 2013; Sperber等, 2017; Zhu和Li, 2017).

研究表明, 在南海周边地区的季节内振荡非常活跃, 且主要表现出两个功率谱峰值, 即30~60天振荡和准双周振荡(Ding等, 2004; Ding和Chan, 2005; Kajikawa和Yasunari, 2005; Yang等, 2008; Wang等, 2009; Hsu, 2012; Kajikawa和Wang, 2012; Feng等, 2013; Li等, 2015b, 2018; Webster, 2020). 从天气学上来说, 30~60天振荡主要表现为北传的季风槽/脊, 对应于赤道辐合带和副热带高压的交替控制; 而准双周振荡主要表现为源自热带西太平洋、向西北传播的季风高压/低压(Chen和Chen, 1995; Chen等, 2000; Chan等, 2002; Mao和Chan, 2005; Zhou和Chan, 2005; Wang等, 2009). 从动力学上来看, 30~60天振荡经常与东传的MJO(Madden和Julian, 1971, 1972, 1994; Zhang, 2005; Wang等, 2009; Lee等, 2013; Li, 2014; Li T等, 2020)相联系, 而准双周振荡则可被认为是受季风基本气流调制的赤道Rossby波(Yang等, 2008; Kikuchi和Wang, 2009; Wang等, 2009; Chen和Sui, 2010).

不少研究指出, 季节内振荡是南海夏季风爆发重要的触发因子. Chen和Chen(1995)是这方面研究的先驱, 他们分析了1979年的南海夏季风活动, 并指出30~60天尺度的季风槽和12~24天尺度的季风低压二者共同触发了该年的夏季风爆发. 基于更长期、更准确的资料, 后续一系列研究(Wang和Xu, 1997; Zhou和Chan, 2005; Tong等, 2009; Wu, 2010; 林爱兰等, 2016)进一步验证了Chen和Chen(1995)的结论, 即利用多年资料的合成结果揭示出30~60天振荡和准双周振荡二者共同地触发了南海夏季风的爆发. 这种季节内振荡

对南海夏季风爆发的触发机制, 可能是因为季节内振荡可以在南海引起活跃的对流活动, 以及低层纬向风自东风向西风的转换(Tong等, 2009). 上述研究是基于带通滤波的方法, 在Wheeler和Hendon(2004)提出用于描述MJO活动的RMM指数之后, 有一些研究从季节内振荡指数的角度, 进一步确认了30~60天振荡(林爱兰等, 2016; Hu等, 2019c)和准双周振荡(Lee等, 2013)对南海夏季风爆发的触发作用; 并指出南海夏季风爆发更倾向于发生在30~60天振荡和准双周振荡的活跃位相位于南海周边地区的时候. 图4显示了南海夏季风爆发日期在BSISO1(30~60天振荡)和BSISO2(准双周振荡)相空间中的分布情况. BSISO1和BSISO2是Lee等(2013)提出的夏季季节内振荡指数, 他们对亚洲季风区内、去掉了缓变年循环的OLR和850hPa纬向风数据做了多变量EOF. BSISO1指数由多变量EOF的PC1和PC2所定义, 可以用于刻画北传、东北传的30~60天振荡; 而BSISO2指数由多变量EOF的PC3和PC4所定义, 可以用于刻画北传、西北传的准双周振荡. 图4a显示, 夏季风爆发更容易出现在30~60天振荡的活跃位相接近或者占据南海之时(第4~7位相; Lee等, 2013的图9). 而图4b显示, 夏季风爆发也更容易出现在准双周振荡的活跃位相接近或占据南海之时(第2~4位相; Lee等, 2013的图10). 因此, 两种季节内振荡的位相, 对于南海夏季风的爆发, 具有明显的调制作用.

然而, 有个别年份的南海夏季风爆发却是发生在季节内振荡的不活跃位相(Lee等, 2013; 林爱兰等, 2016; Hu等, 2019c). 比如, Shao等(2015)发现几乎所有的南海夏季风爆发都发生在季节内振荡自不活跃位相向活跃位相发展的阶段; 并指出季节内振荡的活跃位相不是夏季风爆发的先决条件, 纬向风和对流活动的趋势与它们本身的数值大小可能是同等重要的. Wang等(2018)则将南海夏季风爆发分为偏早、正常、偏晚三种情况, 进一步揭示出季节内振荡对于这三种夏季风爆发情景的作用并不相同; 他们认为季节内振荡与南海夏季风爆发的关系, 还可能受到气候平均态的影响和控制. 此外, 前人考虑影响夏季风爆发的季节内振荡时, 主要考虑的是热带地区的季节内振荡. 最近, Liu和Zhu(2021)发现源自青藏高原的准双周振荡也可以对南海夏季风爆发产生影响, 这主要是通过调制经向温度梯度来实现的. 目前, 我们对于这些影响夏季风爆发的热带外地区季节内振荡, 还知之甚少.

6 南海夏季风爆发与天气尺度系统

在影响南海季风爆发的因子中, ENSO可以通过菲律宾海异常反气旋来影响南海夏季风爆发的早晚, 而伴随季节内振荡的对流和环流异常可视为夏季风爆

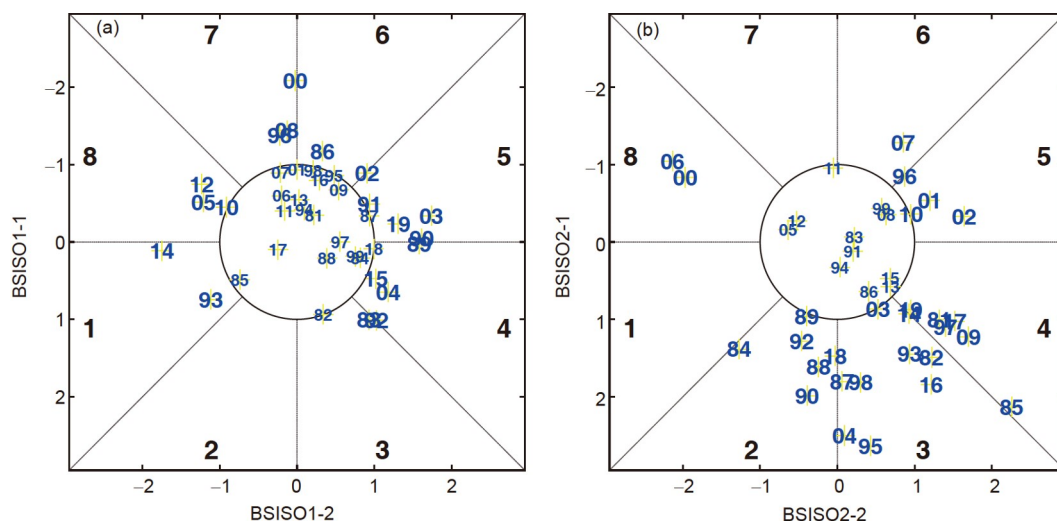


图4 1981~2019年南海夏季风爆发日期在BSISO1(a)和BSISO2(b)相空间中的分布情况

BSISO1和BSISO2是Lee等(2013)提出的夏季季节内振荡指数, 分别用于刻画北传、东北传的30~60天振荡, 以及北传、西北传的准双周振荡. 数字代表年份的后两位(例如19代表2019年); 较大(小)的字体表明季节内振荡比较强(弱). 数据来自<https://apcc21.org/ser/moni.do?lang=en>

发的重要条件. 但是, 异常反气旋可以自冬季到夏季维持数月之久, 季节内振荡的活跃位相的时间尺度也在一周以上; 而南海夏季风爆发的时间尺度却是候(Wang等, 2004)或者日(Hu等, 2018b, 2020b). 因此, 最终触发南海夏季风爆发的一定是时间尺度与之相近的天气尺度系统, 比如热带气旋、冷锋、孟加拉湾季风爆发涡旋.

热带气旋是生成于热带或副热带洋面上, 具有有组织的对流和确定的气旋性环流的非锋面性涡旋的统称; 热带气旋活动与南海夏季风爆发的关系十分密切. 个例研究和统计分析都表明, 热带气旋活动可以触发南海夏季风的爆发; 2006年的热带气旋珍珠(Chanchu)就是一个典型的例子(Mao和Wu, 2008; Chen, 2015; Huangfu等, 2017c). 热带气旋活动还可以影响南海夏季风爆发的年际(Mao和Wu, 2008; 黄菲和李元妮, 2010; Chen, 2015)和年代际变化(Kajikawa和Wang, 2012; Wang和Kajikawa, 2015). 在年际尺度上, 大多数南海夏季风爆发偏早年, 爆发前和爆发时南海-西北太平洋热带气旋活动偏多、生成位置偏西; 而在大多数爆发偏晚年, 爆发前和爆发时则没有热带气旋活动(黄菲和李元妮, 2010; 任素玲等, 2016). 在年代际尺度上也有类似的现象, 针对前文中提到的南海夏季风爆发在1993/1994的年代际提前的研究, 揭示出南海-菲律宾海的热带气旋增加了近1倍(Kajikawa和Wang, 2012; Wang和Kajikawa, 2015), 这被认为是夏季风年代际提前的重要触发因子.

目前为止提出的热带气旋活动对南海夏季风爆发可能的触发机制包括: (1) 从天气学上来说, 热带气旋活动可以影响西太平洋副热带高压的活动(Wang等, 2019), 使其北上东撤、离开南海(黄菲和李元妮, 2010; Huangfu等, 2017c), 从而有利于夏季风的爆发. (2) 从动力学上来说, 热带气旋带来的降水会释放大量凝结潜热, 从而激发赤道Rossby波响应(Gill, 1980; Heckley和Gill, 1984; Philips和Gill, 1987; Mao和Wu, 2008; Xing等, 2014; 邢楠等, 2014), 引起孟加拉湾的西风加速并进入南海. (3) 从热力学上来说, 位于南海北部或华南地区的热带气旋释放的潜热会加热大气, 从而有助于经向温度梯度的反转(Mao和Wu, 2008).

反过来, 南海夏季风爆发也可以影响热带气旋的活动. 伴随着南海夏季风爆发, 南海夏季风槽也随之建立. 而季风槽的加强和东伸为热带气旋的形成及发

展提供了有利的背景环境, 因此, 夏季风爆发之后南海-西北太平洋的热带气旋生成个数和活动频数都明显增多(黄菲和李元妮, 2010; Chen T C等, 2017; Huangfu等, 2017a, 2017b, 2017c; Wu和Takahashi, 2018). 在年际尺度上, 相比于南海夏季风爆发偏晚年, 爆发偏早年5月的热带气旋活动频数明显增多, 生成位置也明显偏西(黄菲和李元妮, 2010; 任素玲等, 2016). 类似地, 在年代际尺度上, 对应于南海夏季风爆发的年代际提前, 西北太平洋5月的热带气旋生成频数也明显增加(任素玲等, 2016; Huangfu等, 2017a). 南海夏季风爆发日期与5月西北太平洋热带气旋频数呈显著的负相关(Huangfu等, 2017b, 2017c). 图5展示了南海夏季风爆发最早的12年和最晚的12年里, 西北太平洋5月热带气旋活动的情况.

南海夏季风爆发的另一个重要的触发因子是源自中高纬的冷锋, 这一点已为个例研究(如1998年南海季风试验)和统计分析所证实(Chang和Chen, 1995; Ding和Liu, 2001; Tong等, 2009; Kueh和Lin, 2010; Huangfu等, 2018). Ding和Liu(2001)将冷锋触发南海夏季风爆发的可能机制总结为以下几点: (1) 上升运动有利于降水和对流发生; (2) 加强经向气压梯度, 令低空东北风加速, 从而增强切变涡度和气旋式环流; (3) 加强水平温度梯度, 令斜压性增大, 为锋区的扰动提供有效位能; (4) 加强低空槽, 令西太平洋副热带高压撤退. 然而, Tong等(2009)指出冷锋的触发作用主要局限在南海北部地区. 除了热带气旋和冷锋, 孟加拉湾季风爆发涡旋(吴国雄等, 2010; Wu等, 2012; Li K等, 2016; Hu等, 2020b)也被认为是南海季风爆发的重要触发因子(Lau等, 1998, 2000; Ding和Liu, 2001; Liu等, 2002; Ding等, 2004; Wu等, 2005; Liu和Zhu, 2020). 基于模式模拟, Liu等(2002)和Wu等(2005)认为季风爆发涡旋会引起低层西风的发展, 并输送水汽到南海北部, 从而触发夏季风的爆发. 此外, 孟加拉湾凝结潜热的释放, 还可能有利于冷空气的南下(Liu等, 2002); 冷锋则可以进一步触发南海夏季风爆发(Ding和Liu, 2001). 除了上述因子之外, 天气尺度波列和赤道Kelvin波也对南海夏季风爆发具有重要的触发作用(例如, Huangfu等, 2018), 前者是西北太平洋最主要的天气模态(Lau和Lau, 1990, 1992; Hu等, 2020e), 而后的影响主要局限在南海南部地区(Straub等, 2006; Huangfu等, 2018).

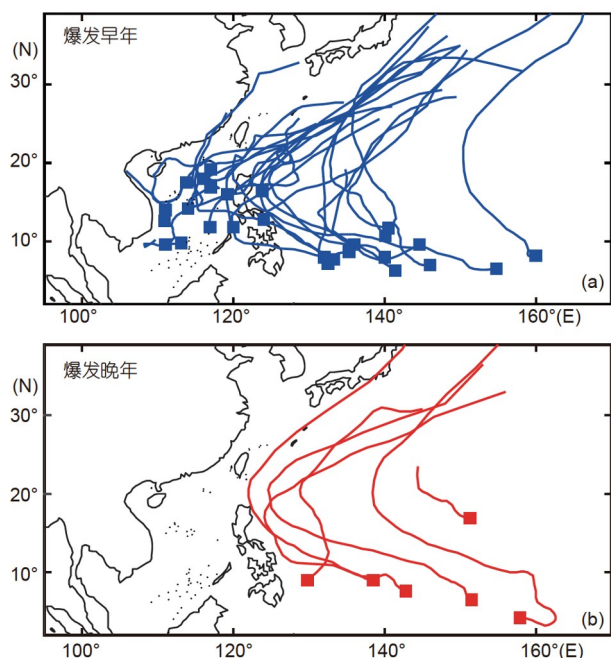


图5 南海夏季风爆发(a)最早的12年和(b)最晚的12年里, 5月热带气旋的生成位置和移动路径

数据来自于中国气象局热带气旋资料中心http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html

7 不同时间尺度之间的联系

需要指出的是, 前面总结的南海夏季风爆发在各种时间尺度上的变化并非孤立的, 而是存在着密切的联系. 按照时间尺度(纵坐标)和季节进程(横坐标), 图6对影响南海夏季风爆发的重要因子之间的联系进行了概括. 比如, 南海夏季风爆发的年代际背景, 会调制其年际变化, 从而引起年际关系的年代际变化. 例如丁硕毅等(2016)指出1993/1994年之前南海夏季风爆发主要受东太平洋海温异常的影响; 而1993/1994年之后, 东太平洋和中太平洋两类海温型均会影响夏季风爆发. Hu等(2018b)也指出南海夏季风爆发日期和南海越赤道气流的关系在20世纪90年代后期经历了年代际减弱, 这与这两个年代里夏季风爆发的不同触发机制有关. 此外, 南海夏季风爆发的年际变化还会受到季节内振荡等的影响, 林爱兰等(2016)指出夏季风爆发时间与海温信号不一致的年份, 经常与MJO和季风爆发涡旋的活动有关. Hu等(2020b)对2019年夏季风爆发的个例分析也指出, 在ENSO-南海夏季风爆发关系年代际减弱的背景下, MJO、季风爆发涡旋、冷锋三者共

同触发了该年极端偏早的夏季风爆发. 作为夏季风爆发直接的触发因子, 天气尺度系统其实是孕育在季节内振荡这样的背景之下的(Li, 2014; Wang和Kajikawa, 2015). 例如, 2006年的南海夏季风爆发, 虽然其直接触发因子是热带气旋, 但这个热带气旋可能与沿赤道东传的MJO有关(Mao和Wu, 2008). 天气尺度系统和季节内振荡之间也存在着密切的相互作用: 一方面, 低频振荡可以通过正压能量转换等过程与天气尺度扰动交换能量; 另一方面, 天气尺度扰动会通过一系列非线性反馈影响到低频振荡(Li, 2014; Wang和Kajikawa, 2015; Hu等, 2020b). 而且, 天气尺度系统之间也会存在相互作用, 例如, 孟加拉湾季风爆发涡旋可能有利于冷锋南下(Liu等, 2002); 不同的天气系统(例如, 冷锋和热带气旋)也可能会协同作用, 从而共同触发南海夏季风的爆发(Kueh和Lin, 2010; Huangfu等, 2018; Hu等, 2020b).

8 南海夏季风撤退的相关研究

相比于被广泛深入研究的南海夏季风爆发以及盛夏季节的夏季风活动(例如, Wang等, 2009), 南海夏季风撤退所受到的关注要少得多. 然而, 夏季风的撤退也是非常重要的, 这体现在以下两方面. 一方面, 就学科内部需求来说, 研究夏季风的撤退能够帮助我们全面、系统地理解南海夏季风的年循环, 从而增进我们对热带气象学和季风动力学的理解和认识. 另一方面, 夏季风撤退的异常, 可能会带来巨大的社会经济影响, 同样需要深入研究其变化及机制. 例如, 2010年的南海夏季风撤退极端偏晚, 相比于正常的季风撤退时间推迟了约一个月(Li D L等, 2016; Hu等, 2018a). 对应此次极端偏晚的夏季风撤退, 海南岛也经历了自1951年有气象记录以来最严重的持续性秋季特大暴雨, 受灾人口约250万, 直接经济损失高达30亿元人民币(蔡亲波等, 2013; 简茂球和张春花, 2013; Feng等, 2013; Qiao等, 2015; Wang等, 2016; Li J等, 2017; Hu等, 2018a). 由此可见, 研究南海夏季风的撤退, 将会为防灾减灾提供重要的理论指导, 因而具有重要的实际意义.

基于国家气候中心出版的《东亚季风年鉴》中的南海夏季风撤退日期, 近期一些研究分析了夏季风撤退的异常及机制. 例如, Hu等(2019c)基于该数据, 研究了南海夏季风撤退的气候态特征. 他们指出, 不同于

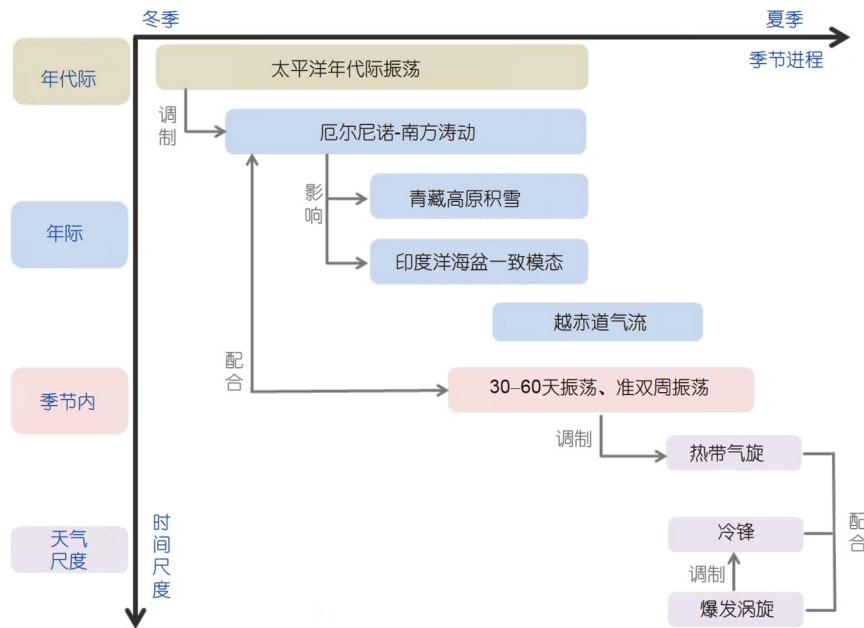


图6 影响南海夏季风爆发变异的重要因子之间的关联示意图

横坐标是自冬季到夏季的季节进程, 纵坐标是自年代际到天气尺度的时间尺度

日历数据所显示的缓慢撤退(图1), 合成的南海夏季风撤退过程也是非常迅速的, 其主要的天气学现象包括: 西太平洋副热带高压西伸, 从而引起南海地区低层纬向风转变(由西风转东风); 西南季风自南海-菲律宾海后撤至北印度洋; 雨带和赤道辐合带的减弱和南移; 高层东风急流和北风越赤道气流的减速; 上升运动由南海北部移动到南海南部, 形成局地异常经圈环流; 大气环流和温湿要素的突变。而从动力学的角度来看, 夏季风撤退时期的环流和对流变化, 一定程度上可以用赤道Rossby波响应和Sverdrup关系来理解(Hu等, 2019c)。

研究还表明, 夏季风撤退日期在21世纪初期经历了显著的年代际变化, 平均的撤退日期推迟了约半个月(Li D L等, 2016; Hu等, 2019a; Chen等, 2019)。南海夏季风撤退的年代际推迟在环流和对流上均有明显的体现。对应于夏季风撤退偏晚的年代(2006~2016年), 在夏季风撤退时期(53~56候), 从中南半岛到菲律宾海出现了显著的风异常, 在南海北部-菲律宾海北部地区出现了气旋式环流异常, 在南海和菲律宾海还出现了降水的增加和对流活动的增强。中南半岛和菲律宾海地区准双周振荡的增强, 以及南海-菲律宾海附近增多的热带气旋活动, 被认为是此次南海夏季风撤退年

代际偏晚的直接影响因子; 而菲律宾海的暖海温, 可能是此次年代际变化的重要背景(Hu等, 2018a, 2019a)。

南海夏季风撤退也具有明显的年际变化, 且受到许多因子的影响。就大气内部动力过程而言, 南海-菲律宾海的热带气旋活动(Hu等, 2019b), 季节内振荡的位相(Hu等, 2019b, 2020a), 天气尺度扰动如东风波(Hu等, 2019b)和冷锋(Hu等, 2019b), 沿副热带西风急流传播的丝绸之路型遥相关(Hu等, 2020d), 都可以影响夏季风的撤退。此外, 太平洋海温异常也会调制南海夏季风撤退的年际变化, La Niña型海温异常有助于南海夏季风撤退的偏晚(Hu等, 2020c, 2020e)。Luo和Lin(2017)认为ENSO是通过影响西太平洋副热带高压来影响夏季风撤退的, 这种副热带高压的异常可能与西太平洋海温异常所激发的赤道Rossby波响应有关(Hu等, 2020c, 2020e)。

最后需要指出的是, 2010年的极端事件(南海夏季风撤退极端偏晚, 海南秋季特大暴雨)并不是孤立的。合成分析结果表明, 当南海夏季风撤退偏晚的时候, 华南沿海(广东、海南、台湾三省)以及南海北部地区的初秋(9~10月)降水也经常偏多(Hu等, 2020c)。夏季风撤退偏晚和华南秋雨偏多的共同背景是La Niña发展型的太平洋海温异常。西北太平洋的暖海温异常, 会

通过激发气旋式的赤道Rossby波响应, 引起平均环流的异常. 此异常气旋南侧的偏西风, 会引起夏季风撤退的偏晚; 而异常南风又会输送更多水汽到华南, 引起秋雨偏多. 此外, 在夏季风撤退偏晚年, 热带气旋和准双周振荡等瞬变系统也偏强, 它们同样会引起华南秋雨的偏多(Hu等, 2019c). 因此, 海温背景、平均环流、瞬变系统, 都有助于南海夏季风撤退-华南秋雨之间出现显著的正相关关系. 类似于第6节中总结的夏季风爆发-热带气旋活动关系, 南海夏季风的撤退也与西北太平洋地区的热带扰动关系密切. 例如, 当夏季风撤退偏晚时, 9月中旬至10月中旬, 西北太平洋的天气尺度波列更加活跃(Hu等, 2020e), 而且热带气旋生成个数也显著增加(Hu等, 2020f). 当夏季风撤退偏晚时, 会在南海附近的对流层低层出现一个异常的气旋式环流. 而这样的低层环流异常会增强自基本气流向天气尺度扰动的正压能量转换, 从而有利于这些扰动的发生发展, 并为热带气旋生成创造有利环境(Hu等, 2020e, 2020f).

9 总结与展望

本文系统地回顾了南海夏季风爆发自年代际到天气尺度的多时间尺度变化及其机制, 重点突出了近五年来的最新研究进展. 早期工作主要关注的是南海夏季风爆发的年际变化, 近期研究则揭示出南海夏季风爆发还存在着显著的年代际变化, 包括其平均值的年代际变化和年际变异的年代际变化. 南海夏季风爆发在20世纪90年代中后期经历了显著的年代际变化, 提前了约半个月; 这可能与太平洋海温的年代际背景有关. 伴随着夏季风平均爆发日期的年代际提前, 夏季风爆发和其他因子(如海温、越赤道气流等)的关系也经历了显著的年代际变化. 前人工作指出ENSO是影响南海夏季风爆发最重要的年际变率因子, 这主要是通过菲律宾海异常反气旋和Walker环流来影响的. 近期研究则指出, ENSO和南海夏季风爆发的关系在近年来出现了明显的减弱. 此外, 近期研究还揭示出一些其他的可以影响南海夏季风爆发的重要因子, 并特别关注了不同因子之间的综合作用. 在季节内时间尺度上, 低频振荡对南海夏季风爆发具有明显的触发作用, 且对于不同的爆发类型(偏早、正常、偏晚)的影响不同. 早期研究主要关注季节内振荡的位相本身,

而近期研究则指出, 由季节内振荡的不活跃位相向活跃位相的转变, 可能比位相本身更值得关注. 天气尺度系统是南海夏季风爆发的直接触发因子; 相比于以往单独分析某类天气系统的影响, 近年来的研究强调了不同天气尺度系统之间的配合, 以及夏季风爆发和热带气旋的相互影响. 此外, 近期一些研究还分析了南海夏季风撤退的变化及机制, 丰富了对南海夏季风演变的认识.

限于篇幅, 本文对个别科学问题未做详细讨论, 这主要包括夏季风爆发的预报预测和青藏高原对夏季风爆发的影响. 事实上, 由于南海夏季风爆发的重要性, 有许多工作致力于它的预报和预测. 例如, 谷德军等(2011)基于多尺度最优子集回归预测方法, 建立了夏季风爆发的短期气候预测模型. Zhu和Li(2017)建立了物理-经验模型和时空投影模型, 分别可以用于南海夏季风爆发的季节预测和延伸期预报. Martin等(2019)分析了GloSea5模式对于南海夏季风爆发的季节预测能力, 发现预报信号主要来源于太平洋的海温异常. 最近, Geen(2021)提出可以使用前期的湿静力能来对夏季风爆发早晚进行预报. 此外, 青藏高原对于南海夏季风的影响也是一个非常重要的问题. 不同于前面提到的Walker环流和菲律宾海异常反气旋环流, ENSO也可以通过影响高原积雪(Shaman和Tziperman, 2005)等方式来进一步影响随后的南海夏季风爆发(于乐江和胡敦欣, 2008). 一般来说, 前期冬春季青藏高原积雪偏多时, 夏季风爆发偏晚; 而积雪偏少时, 夏季风爆发则偏早. 前期冬春季的高原积雪异常, 可以通过影响地面反照率和土壤湿度, 进一步影响地面气温和感热异常(于乐江和胡敦欣, 2008). 上述气温异常和感热异常又可以通过影响海陆热力差异, 影响到大气环流异常(如南亚高压、低层纬向风), 从而引起南海夏季风爆发的异常(李春晖等, 2019). 关于青藏高原热力作用对南海夏季风的影响, 可以参考李春晖等(2019)的综述文章.

另外, 虽然南海夏季风爆发的多时间尺度变化及其机制方面近几年取得了大量研究进展, 但要看到在该领域还存在一些问题需要进一步深入研究. 首先, 正如第4节总结的那样, 以往研究侧重于影响南海夏季风爆发的热带因子(ENSO、季节内振荡、越赤道气流等); 除了中纬度冷锋(见第6节)之外, 其他影响南海夏季风爆发的热带外因子, 目前仍然不十分清楚. 其中

北极涛动是热带外大气环流的主导模态, 而且类似于 ENSO 也可以在菲律宾海地区激发出异常的气旋或者反气旋(Gong等, 2011; Chen等, 2014, 2018; 陈尚锋和陈文, 2016), 因而同样可能影响到夏季风的爆发(Hu等, 2021). 最近, Xu和Li(2021)发现沿亚洲急流传播的波列也可以调制夏季风爆发的早晚. 热带与热带外的相互作用, 一直是热带气象学的中心科学问题之一(例如, 杨崧等, 2015). 研究北极涛动等热带外信号对于南海夏季风爆发的影响, 不仅能够提高我们对季风变异的认识, 还可以寻求到太平洋海温之外的信号来源, 从而改善夏季风爆发的季节预测能力. 其次, 有关南海夏季风爆发的年代际变化研究大多侧重于其爆发日期的年代际变化. 在21世纪10年代之后, 南海夏季风爆发日期似乎又有推迟的趋势(Jiang和Zhu, 2021), 但这一现象仍有待更长的数据来进一步确认. 除了这种平均态的年代际变化之外, 南海夏季风爆发的年际变化同样会出现年代际变化. 例如, 南海夏季风爆发与越赤道气流(Hu等, 2018b)以及ENSO(Hu等, 2020b)的关系都曾经出现过年代际变化, 这种年代际变化也会影响南海夏季风爆发的预报和预测, 因而其重要性不亚于平均态的年代际变化, 值得今后进一步深入研究. 最后, 结合观测和再分析资料的分析结果, 需要详细评估第五次、第六次耦合模式比较计划中各个模式对于南海夏季风年循环的模拟能力(Dong等, 2016; Wang等, 2021), 并分析全球变暖情景下南海夏季风爆发未来的可能变化及其影响.

致谢 在写作过程中曾和中国科学院大气物理研究所的陈晓丹进行过有益的讨论, 在此表示感谢.

参考文献

- 蔡亲波, 冯文, 李勋. 2013. 海南省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社
- 陈尚锋, 陈文. 2016. 北极涛动对ENSO影响的研究进展. 气象科技进展, 6: 6–13
- 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: 243–256
- 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 王遵娅, 李怡, 赵亮, 宋亚芳. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化. 大气科学, 42: 533–558
- 谷德军, 纪忠萍, 李春晖. 2011. 南海夏季风爆发日期与海温的多尺度关系及最优子集回归预测. 海洋学报, 33: 55–63
- 何金海, 丁一汇, 高辉, 徐海明. 2001. 南海夏季风建立日期的确定与

- 季风指数. 北京: 气象出版社
- 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. 气候与环境研究, 23: 401–412
- 黄菲, 李元妮. 2010. 南海夏季风爆发与西北太平洋热带气旋活动. 中国海洋大学学报, 40: 1–10
- 简茂球, 张春花. 2013. 准双周振荡对2010年10月海南持续性暴雨的影响. 热带气象学报, 29: 364–373
- 李春晖, 何超, 万齐林. 2019. 青藏高原热力作用对南海及周边区域夏季气候的影响研究进展. 热带气象学报, 35: 268–280
- 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 郑彬. 2016. 赤道MJO活动对南海夏季风爆发的影响. 地球物理学报, 59: 28–44
- 任素玲, 刘屹岷, 吴国雄. 2016. 亚洲夏季风爆发前后西北太平洋和孟加拉湾热带气旋活动统计特征. 气象学报, 74: 837–849
- 吴国雄, 关月, 王同美, 刘屹岷, 颜京辉, 毛江玉. 2010. 春季孟加拉湾涡旋形成及其对亚洲夏季风爆发的激发作用. 中国科学: 地球科学, 40: 1459–1467
- 邢楠, 李建平, 李耀锟. 2014. 热带大气对单一型赤道非对称热源的响应. 大气科学, 38: 1147–1158
- 杨崧, 邓开强, Ting M, Hu C. 2015. 大气能量传播及不同纬度间大气相互作用的研究进展. 气象学报, 73: 999–1018
- 杨崧, 吴仁广, 简茂球, 黄健, 王子谦, 胡晓明, 蒋兴文. 2019. 东南亚及周边地区气候变化. 北京: 科学出版社
- 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. 地球物理学报, 51: 1682–1694
- 张人禾, 闵庆烨, 苏京志. 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用. 中国科学: 地球科学, 47: 544–553
- Bombardi R J, Kinter J L, Frauenfeld O W. 2019. A global gridded dataset of the characteristics of the rainy and dry seasons. *Bull Am Meteorol Soc*, 100: 1315–1328
- Bombardi R J, Moron V, Goodnight J S. 2020. Detection, variability, and predictability of monsoon onset and withdrawal dates: A review. *Int J Climatol*, 40: 641–667
- Chan J C L, Ai W, Xu J. 2002. Mechanisms responsible for the maintenance of the 1998 South China Sea summer monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 80: 1103–1113
- Chang C P, Chen G T J. 1995. Tropical circulations associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. *Mon Weather Rev*, 123: 3254–3267
- Chen G, Sui C H. 2010. Characteristics and origin of quasi-biweekly oscillation over the western North Pacific during boreal summer. *J Geophys Res*, 115: D14113
- Chen G. 2015. Comments on “interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset”. *J Clim*, 28: 9029–9035
- Chen J P, Wen Z P, Wang X. 2017. Relationship over southern China between the summer rainfall induced by tropical cyclones and that

- by monsoon. *Atmos Ocean Sci Lett*, 10: 96–103
- Chen J, Wu R, Wen Z P. 2012. Contribution of South China Sea tropical cyclones to an increase in southern China summer rainfall around 1993. *Adv Atmos Sci*, 29: 585–598
- Chen L, Zhu C, Wang W, Zhang P. 2001. Analysis of the characteristics of 30–60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX. *Adv Atmos Sci*, 18: 623–638
- Chen S, Yu B, Chen W, Wu R. 2018. A review of atmosphere-ocean forcings outside the tropical Pacific on the El Niño-Southern Oscillation occurrence. *Atmosphere*, 9: 439
- Chen S, Yu B, Chen W. 2014. An analysis on the physical process of the influence of AO on ENSO. *Clim Dyn*, 42: 973–989
- Chen T C, Chen J M. 1995. An observational study of the South China Sea monsoon during the 1979 summer: Onset and life cycle. *Mon Weather Rev*, 123: 2295–2318
- Chen T C, Tsay J D, Matsumoto J, Alpert J. 2017. Impact of the summer monsoon westerlies on the South China Sea tropical cyclone genesis in May. *Weather Forecast*, 32: 925–947
- Chen T C, Yen M C, Weng S P. 2000. Interaction between the summer monsoons in East Asia and the South China Sea: Intraseasonal monsoon modes. *J Atmos Sci*, 57: 1373–1392
- Chen W, Feng J, Wu R. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon. *J Clim*, 26: 622–635
- Chen W, Wang L, Feng J, Wen Z, Ma T, Yang X, Wang C. 2019. Recent progress in studies of the variabilities and mechanisms of the East Asian monsoon in a changing climate. *Adv Atmos Sci*, 36: 887–901
- Chen Z, Wen Z, Wu R, Lin X, Wang J. 2016. Relative importance of tropical SST anomalies in maintaining the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño to La Niña transition years. *Clim Dyn*, 46: 1027–1041
- Choi K S, Kim H D, Kang S D, Kim D W. 2017. Interdecadal change of South China Sea summer monsoon intensity in the mid-1990s. *Int J Climatol*, 37: 559–569
- Deng K, Yang S, Gu D, Lin A, Li C. 2020. Record-breaking heat wave in southern China and delayed onset of South China Sea summer monsoon driven by the Pacific subtropical high. *Clim Dyn*, 54: 3751–3764
- Ding Y, Chan J C. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview. *Meteorol Atmos Phys*, 89: 117–142
- Ding Y, Li C, Liu Y. 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment. *Adv Atmos Sci*, 21: 343–360
- Ding Y, Liu Y, Song Y, Zhang J. 2015. From MONEX to the global monsoon: A review of monsoon system research. *Adv Atmos Sci*, 32: 10–31
- Ding Y, Liu Y. 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998. *J Meteorol Soc Jpn*, 79: 255–276
- Ding Y, Sun Y, Wang Z, Zhu Y, Song Y. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes. *Int J Climatol*, 29: 1926–1944
- Ding Y, Wang Z, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int J Climatol*, 28: 1139–1161
- Ding Y. 2007. The variability of the Asian summer monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 85B: 21–54
- Dong G, Zhang H, Moise A, Hanson L, Liang P, Ye H. 2016. CMIP5 model-simulated onset, duration and intensity of the Asian summer monsoon in current and future climate. *Clim Dyn*, 46: 355–382
- Feng J, Chen W. 2014. Interference of the East Asian winter monsoon in the impact of ENSO on the East Asian summer monsoon in decaying phases. *Adv Atmos Sci*, 31: 344–354
- Feng J, Hu D. 2014. How much does heat content of the western tropical Pacific ocean modulate the South China Sea summer monsoon onset in the last four decades? *J Geophys Res-Oceans*, 119: 4029–4044
- Feng J, Wang F, Yu L, Wang Q, Hu D. 2021. Revisiting the relationship between Indo-Pacific heat content and South China Sea summer monsoon onset during 1980–2020. *Int J Climatol*, 41: 1998–2016
- Feng J, Wang L, Chen W. 2014. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Niño during different PDO phases? *J Clim*, 27: 2682–2698
- Feng X, Wu R, Chen J, Wen Z. 2013. Factors for interannual variations of September–October rainfall in Hainan, China. *J Clim*, 26: 8962–8978
- Fukutomi Y, Yasunari T. 1999. 10–25 day intraseasonal variations of convection and circulation over East Asia and western North Pacific during early summer. *J Meteorol Soc Jpn*, 77: 753–769
- Geen R. 2021. Forecasting South China Sea monsoon onset using insight from theory. *Geophys Res Lett*, 48: e2020GL091444
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Q J R Met Soc*, 106: 447–462
- Gong D Y, Yang J, Kim S J, Gao Y, Guo D, Zhou T, Hu M. 2011. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 37: 2199–2216
- Goswami B N. 2012. South Asian monsoon. In: Lau W K M, Waliser D E, eds. *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 21–72
- Goswami B N, Mohan R S A. 2001. Intraseasonal oscillations and

- interannual variability of the Indian summer monsoon. *J Clim*, 14: 1180–1198
- Ha Y, Zhong Z, Sun Y, Lu W. 2014. Decadal change of South China Sea tropical cyclone activity in mid-1990s and its possible linkage with intraseasonal variability. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 5331–5344
- He B, Zhang Y, Li T, Hu W T. 2017. Interannual variability in the onset of the South China Sea summer monsoon from 1997 to 2014. *Atmos Ocean Sci Lett*, 10: 73–81
- He J, Zhu Z. 2015. The relation of South China Sea monsoon onset with the subsequent rainfall over the subtropical East Asia. *Int J Climatol*, 35: 4547–4556
- Heckley W A, Gill A E. 1984. Some simple analytical solutions to the problem of forced equatorial long waves. *Q J R Met Soc*, 110: 203–217
- Henley B J. 2017. Pacific decadal climate variability: Indices, patterns and tropical-extratropical interactions. *Glob Planet Change*, 155: 42–55
- Hsu H H. 2012. Intraseasonal variability of the atmosphere-ocean-climate system East Asian monsoon. In: Lau W K M, Waliser D E, eds. *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 73–110
- Hu P, Chen W, Chen S, Huang R. 2019b. Interannual variability and triggers of the South China Sea summer monsoon withdrawal. *Clim Dyn*, 53: 4355–4372
- Hu P, Chen W, Chen S, Huang R. 2020a. Statistical analysis of the impacts of intra-seasonal oscillations on the South China Sea summer monsoon withdrawal. *Int J Climatol*, 40: 1919–1927
- Hu P, Chen W, Chen S, Liu Y, Huang R, Dong S. 2020c. Relationship between the South China Sea summer monsoon withdrawal and September–October rainfall over southern China. *Clim Dyn*, 54: 713–726
- Hu P, Chen W, Chen S, Liu Y, Huang R. 2020b. Extremely early summer monsoon onset in the South China Sea in 2019 following an El Niño event. *Mon Weather Rev*, 148: 1877–1890
- Hu P, Chen W, Chen S, Liu Y, Wang L, Huang R. 2020d. Impact of the September Silk Road pattern on the South China Sea summer monsoon withdrawal. *Int J Climatol*, 40: 6361–6368
- Hu P, Chen W, Chen S, Liu Y, Wang L, Huang R. 2021. Impact of the March Arctic Oscillation on the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 41: E3239–E3248
- Hu P, Chen W, Chen S. 2019a. Interdecadal change in the South China Sea summer monsoon withdrawal around the mid-2000s. *Clim Dyn*, 52: 6053–6064
- Hu P, Chen W, Huang R, Nath D. 2018b. On the weakening relationship between the South China Sea summer monsoon onset and cross-equatorial flow after the late 1990s. *Int J Climatol*, 38: 3202–3208
- Hu P, Chen W, Huang R, Nath D. 2019c. Climatological characteristics of the synoptic changes accompanying South China Sea summer monsoon withdrawal. *Int J Climatol*, 39: 596–612
- Hu P, Chen W, Huang R. 2018a. Role of tropical intraseasonal oscillations in the South China Sea summer monsoon withdrawal in 2010. *Atmos Sci Lett*, 19: e859
- Hu P, Huangfu J, Chen W, Huang R. 2020f. Impacts of early/late South China Sea summer monsoon withdrawal on tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 55: 1507–1520
- Hu P, Huangfu J, Chen W, Huang R. 2020e. South China Sea summer monsoon withdrawal and the synoptic-scale wave train over the western North Pacific. *Int J Climatol*, 40: 5599–5611
- Huang R, Gu L, Zhou L, Wu S. 2006. Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on onset date and process of the South China Sea summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 23: 909–924
- Huang R, Lu L. 1989. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific. *Adv Atmos Sci*, 6: 202–214
- Huang R, Sun F. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 70: 243–256
- Huangfu J, Chen W, Wang X, Huang R. 2018. The role of synoptic-scale waves in the onset of the South China Sea summer monsoon. *Atmos Sci Lett*, 19: e858
- Huangfu J, Huang R, Chen W. 2015. Influence of tropical western Pacific warm pool thermal state on the interdecadal change of the onset of the South China Sea summer monsoon in the late-1990s. *Atmos Ocean Sci Lett*, 8: 95–99
- Huangfu J, Huang R, Chen W. 2017a. Interdecadal increase of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific in May. *Int J Climatol*, 37: 1127–1130
- Huangfu J, Huang R, Chen W. 2017b. Relationship between the South China Sea summer monsoon onset and tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Int J Climatol*, 37: 5206–5210
- Huangfu J, Huang R, Chen W. 2017c. Statistical analysis and a case study of tropical cyclones that trigger the onset of the South China Sea summer monsoon. *Sci Rep*, 7: 12732
- Jiang N, Zhu C. 2021. Seasonal forecast of South China Sea summer monsoon onset disturbed by cold tongue La Niña in the past decade. *Adv Atmos Sci*, 38: 147–155
- Jiang X, Li T, Wang B. 2004. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. *J Clim*, 17: 1022–1039
- Jiang X, Wang Z, Li Z. 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. *Clim Dyn*, 51: 3785–3796
- Kajikawa Y, Wang B. 2012. Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset. *J Clim*, 25: 3207–3218
- Kajikawa Y, Yasunari T, Wang B. 2009. Decadal change in intraseasonal variability over the South China Sea. *Geophys Res Lett*, 36: L06810
- Kajikawa Y, Yasunari T, Yoshida S, Fujinami H. 2012. Advanced Asian summer monsoon onset in recent decades. *Geophys Res Lett*, 39: L03803
- Kajikawa Y, Yasunari T. 2005. Interannual variability of the 10-25- and 30-60-day variation over the South China Sea during boreal summer. *Geophys Res Lett*, 32: L04710
- Kikuchi K, Wang B. 2009. Global perspective of the quasi-biweekly oscillation. *J Clim*, 22: 1340–1359
- Kueh M T, Lin S C. 2010. A climatological study on the role of the South China Sea monsoon onset in the development of the East Asian summer monsoon. *Theor Appl Climatol*, 99: 163–186
- Kwon M H, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. *Geophys Res Lett*, 34: L21706
- Kwon M H, Jhun J G, Wang B, An S I, Kug J S. 2005. Decadal change in relationship between East Asian and WNP summer monsoons. *Geophys Res Lett*, 32: L16709
- Lau K H, Lau N C. 1990. Observed structure and propagation characteristics of tropical summertime synoptic scale disturbances. *Mon Weather Rev*, 118: 1888–1913
- Lau K H, Lau N C. 1992. The energetics and propagation dynamics of tropical summertime synoptic-scale disturbances. *Mon Weather Rev*, 120: 2523–2539
- Lau K M, Wu H T, Yang S. 1998. Hydrologic processes associated with the first transition of the Asian summer monsoon: A pilot satellite study. *Bull Amer Meteorol Soc*, 79: 1871–1882
- Lau K M, Ding Y, Wang J T, Johnson R, Keenan T, Cifelli R, Gerlach J, Thiele O, Rickenbach T, Tsay S C, Lin P H. 2000. A report of the field operations and early results of the South China Sea monsoon experiment (SCSMEX). *Bull Amer Meteorol Soc*, 81: 1261–1270
- Lau K M, Yang S. 1997. Climatology and interannual variability of the southeast Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 14: 141–162
- Lau N C, Nath M J. 2009. A model investigation of the role of air-sea interaction in the climatological evolution and ENSO-related variability of the summer monsoon over the South China Sea and western North Pacific. *J Clim*, 22: 4771–4792
- Lee J Y, Wang B, Wheeler M C, Fu X, Waliser D E, Kang I S. 2013. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Clim Dyn*, 40: 493–509
- Lee E J, Ha K J, Jhun J G. 2014. Interdecadal changes in interannual variability of the global monsoon precipitation and interrelationships among its subcomponents. *Clim Dyn*, 42: 2585–2601
- Li B, Zhou L, Qin J, Murtugudde R. 2021. The role of vorticity tilting in northward-propagating monsoon intraseasonal oscillation. *Geophys Res Lett*, 48: e93304
- Li C, Li T, Gu D, Lin A, Zheng B. 2015a. Relationship between summer rainfall anomalies and sub-seasonal oscillation intensity in the Changjiang valley in China. *Dyn Atmos Oceans*, 70: 12–29
- Li C, Li T, Lin A, Gu D, Zheng B. 2015b. Relationship between summer rainfall anomalies and sub-seasonal oscillations in South China. *Clim Dyn*, 44: 423–439
- Li C, Li T, Zheng B. 2018. Characteristic interdecadal change of quasi-biweekly and intraseasonal oscillations of summer convection over the South China Sea and the western Pacific. *Dyn Atmos Oceans*, 83: 41–52
- Li C, Long Z, Zhang Q. 2001. Strong/ weak summer monsoon activity over the South China Sea and atmospheric intraseasonal oscillation. *Adv Atmos Sci*, 18: 1146–1160
- Li D L, Jiang Y C, Zhang L P, Wang H, Li X. 2016. Onset and retreat dates of the South China Sea summer monsoon and their relationships with the monsoon intensity in the context of climate warming. *J Trop Meteorol*, 22: 362–373
- Li J, Ye Q, Li F, Ding C, Chen Y, Huang Y. 2017. Effects of atmospheric oscillations at different time scales on persistent autumn rainstorms in Hainan, China. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 164: 243–258
- Li J, Zhang L. 2009. Wind onset and withdrawal of Asian summer monsoon and their simulated performance in AMIP models. *Clim Dyn*, 32: 935–968
- Li K, Li Z, Yang Y, Xiang B, Liu Y, Yu W. 2016. Strong modulations on the Bay of Bengal monsoon onset vortex by the first northward-propagating intra-seasonal oscillation. *Clim Dyn*, 47: 107–115
- Li T, Ling J, Hsu P C. 2020. Madden-Julian Oscillation: Its discovery, dynamics, and impact on East Asia. *J Meteorol Res*, 34: 20–42
- Li T, Wang B, Wang L. 2016. Comments on “Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone”. *J Clim*, 29: 4685–4693
- Li T, Wang B, Wu B, Zhou T, Chang C P, Zhang R. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review. *J Meteorol Res*, 31: 987–1006
- Li T. 2014. Recent advance in understanding the dynamics of the Madden-Julian oscillation. *Acta Meteorol Sin*, 28: 1–33
- Li Y, Yang S, Deng Y, Zheng B. 2020. Signals of spring thermal contrast related to the interannual variations in the onset of the

- South China Sea summer monsoon. *J Clim*, 33: 27–38
- Liang J Y, Wen Z P, Chen J P, Wu L J. 2013. Characteristics of tropical sea surface temperature anomalies and their influences on the onset of South China Sea summer monsoon. *Atmos Ocean Sci Lett*, 6: 266–272
- Lin A, Zhang R, He C. 2017. The relation of cross-equatorial flow during winter and spring with South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 37: 4576–4585
- Lin A, Zhang R. 2020. Climate shift of the South China Sea summer monsoon onset in 1993/1994 and its physical causes. *Clim Dyn*, 54: 1819–1827
- Liu B, Zhu C, Yuan Y, Xu K. 2016. Two types of interannual variability of South China Sea summer monsoon onset related to the sst anomalies before and after 1993/94. *J Clim*, 29: 6957–6971
- Liu B, Zhu C. 2016. A possible precursor of the South China Sea summer monsoon onset: Effect of the South Asian High. *Geophys Res Lett*, 43: 11,072–11,079
- Liu B, Zhu C. 2019. Extremely late onset of the 2018 South China Sea summer monsoon following a La Niña event: Effects of triple AAR anomaly mode in the North Atlantic and a weaker Mongolian cyclone. *Geophys Res Lett*, 46: 2956–2963
- Liu B, Zhu C. 2020. Boosting effect of tropical cyclone “Fani” on the onset of the South China Sea summer monsoon in 2019. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e31891
- Liu B, Zhu C. 2021. Subseasonal-to-seasonal predictability of onset dates of South China Sea Summer Monsoon: A perspective of meridional temperature gradient. *J Clim*, 34: 5601–5616
- Liu F, Wang B. 2013. Mechanisms of global teleconnections associated with the Asian summer monsoon: An intermediate model analysis. *J Clim*, 26: 1791–1806
- Liu Y, Chan J C L, Mao J, Wu G. 2002. The role of Bay of Bengal convection in the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. *Mon Weather Rev*, 130: 2731–2744
- Lu M M, Sui C H, Sun J R, Lin P H. 2020. Influences of subseasonal to interannual oscillations on the SCS summer monsoon onset in 2018. *Terr Atmos Ocean Sci*, 31: 197–209
- Lu R, Ye H, Jhun J G. 2011. Weakening of interannual variability in the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet since the mid-1990s. *Adv Atmos Sci*, 28: 1246–1258
- Luo M, Leung Y, Graf H F, Herzog M, Zhang W. 2016. Interannual variability of the onset of the South China Sea summer monsoon. *Int J Climatol*, 36: 550–562
- Luo M, Lin L. 2017. Objective determination of the onset and withdrawal of the South China Sea summer monsoon. *Atmos Sci Lett*, 18: 276–282
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 28: 702–708
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J Atmos Sci*, 29: 1109–1123
- Madden R A, Julian P R. 1994. Observations of the 40-50-day tropical oscillation—A review. *Mon Weather Rev*, 122: 814–837
- Mao J, Chan J C L. 2005. Intraseasonal variability of the South China Sea summer monsoon. *J Clim*, 18: 2388–2402
- Mao J, Sun Z, Wu G. 2010. 20-50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea. *Clim Dyn*, 34: 747–761
- Mao J, Wu G. 2008. Influences of typhoon chanchu on the 2006 South China Sea summer monsoon onset. *Geophys Res Lett*, 35: L12809
- Martin G M, Chevuturi A, Comer R E, Dunstone N J, Scaife A A, Zhang D. 2019. Predictability of South China Sea summer monsoon onset. *Adv Atmos Sci*, 36: 253–260
- Newman M, Alexander M A, Ault T R, Cobb K M, Deser C, Di Lorenzo E, Mantua N J, Miller A J, Minobe S, Nakamura H, Schneider N, Vimont D J, Phillips A S, Scott J D, Smith C A. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited. *J Clim*, 29: 4399–4427
- Ning L, Qian Y. 2009. Interdecadal change in extreme precipitation over South China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 26: 109–118
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern Hemisphere summer circulation. *J Meteorol Soc Jpn*, 65: 373–390
- Philips P J, Gill A E. 1987. An analytic model of the heat-induced tropical circulation in the presence of a mean wind. *Q J R Meteorol Soc*, 113: 213–236
- Qiao Y, Zhang C, Jian M. 2015. Role of the 10-20-day oscillation in sustained rainstorms over Hainan, China in october 2010. *Adv Atmos Sci*, 32: 363–374
- Rong X Y, Zhang R H, Li T. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship. *Chin Sci Bull*, 55: 2458–2468
- Shaman J, Tziperman E. 2005. The effect of ENSO on Tibetan Plateau snow depth: A stationary wave teleconnection mechanism and implications for the South Asian monsoons. *J Clim*, 18: 2067–2079
- Shao X, Huang P, Huang R H. 2015. Role of the phase transition of intraseasonal oscillation on the South China Sea summer monsoon onset. *Clim Dyn*, 45: 125–137
- Shi J, Qian W. 2018. Asymmetry of two types of ENSO in the transition between the East Asian winter monsoon and the ensuing summer monsoon. *Clim Dyn*, 51: 3907–3926
- Sperber K R, Cusiner E, Kitoh A, Mechoso C R, Moise A, Moufouma-Okia W, Schiro K, Turner A G. 2017. Modelling monsoons. In:

- Chang C P, Kuo H C, Lau N C, et al., eds. The Global Monsoon System: Research and Forecast. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 79–101
- Straub K H, Kiladis G N, Ciesielski P E. 2006. The role of equatorial waves in the onset of the South China Sea summer monsoon and the demise of El Niño during 1998. *Dyn Atmos Oceans*, 42: 216–238
- Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, McGregor S. 2015. Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone. *J Clim*, 28: 1093–1111
- Tong H W, Chan J C L, Zhou W. 2009. The role of MJO and mid-latitude fronts in the South China Sea summer monsoon onset. *Clim Dyn*, 33: 827–841
- Waliser D E. 2006. Intraseasonal variability. In: Wang B, ed. The Asian Monsoon. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 203–257
- Wang B, Huang F, Wu Z, Yang J, Fu X, Kikuchi K. 2009. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review. *Dyn Atmos Oceans*, 47: 15–37
- Wang B, Kajikawa Y. 2015. Reply to “Comments on ‘interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset’”. *J Clim*, 28: 9036–9039
- Wang B, Li J, He Q. 2017. Variable and robust East Asian monsoon rainfall response to El Niño over the past 60 years (1957–2016). *Adv Atmos Sci*, 34: 1235–1248
- Wang B, LinHo B, Zhang Y, Lu M M. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon. *J Clim*, 17: 699–710
- Wang B, LinHo B. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J Clim*, 15: 386–398
- Wang B, Biasutti M, Byrne M P, Castro C, Chang C P, Cook K, Fu R, Grimm A M, Ha K J, Hendon H, Kitoh A, Krishnan R, Lee J Y, Li J, Liu J, Moise A, Pascale S, Roxy M K, Seth A, Sui C H, Turner A, Yang S, Yun K S, Zhang L, Zhou T. 2021. Monsoons climate change assessment. *Bull Am Meteorol Soc*, 102: E1–E19
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Clim*, 13: 1517–1536
- Wang B, Wu R, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons. *J Clim*, 14: 4073–4090
- Wang B, Wu R. 1997. Peculiar temporal structure of the South China Sea summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 14: 177–194
- Wang B, Xu X. 1997. Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation. *J Clim*, 10: 1071–1085
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine sea anomalous anticyclone is established during El Nino development. *J Clim*, 15: 3252–3265
- Wang B. 2008. Thrusts and prospects on understanding and predicting Asian monsoon climate. *Acta Meteorol Sin*, 22: 383–403
- Wang H, Liu F, Wang B, Li T. 2018. Effects of intraseasonal oscillation on South China Sea summer monsoon onset. *Clim Dyn*, 51: 2543–2558
- Wang H, Sun J, Zhao S, Wei J. 2016. The multiscale factors favorable for a persistent heavy rain event over Hainan island in October 2010. *J Meteorol Res*, 30: 496–512
- Wang L, Chen G. 2018. Relationship between South China Sea summer monsoon onset and landfalling tropical cyclone frequency in China. *Int J Climatol*, 38: 3209–3214
- Wang T, Zhong Z, Sun Y, Wang J. 2019. Impacts of tropical cyclones on the meridional movement of the western Pacific subtropical high. *Atmos Sci Lett*, 20: e893
- Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, Shukla J, Tomas R A, Yanai M, Yasunari T. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J Geophys Res*, 103: 14451–14510
- Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Q J R Met Soc*, 118: 877–926
- Webster P. 2020. Dynamics of the Tropical Atmosphere and Oceans. Oxford: Wiley-Blackwell
- Wei W, Zhang R, Yang S, Li W, Wen M. 2019. Quasi-biweekly Oscillation of the South Asian High and its role in connecting the Indian and East Asian summer rainfalls. *Geophys Res Lett*, 46: 14742–14750
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Weather Rev*, 132: 1917–1932
- Wu B, Zhou T, Li T. 2017a. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part I: Maintenance mechanisms. *J Clim*, 30: 9621–9635
- Wu B, Zhou T, Li T. 2017b. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: Formation processes. *J Clim*, 30: 9637–9650
- Wu C, Yang S, Wang A, Fong S. 2005. Effect of condensational heating over the Bay of Bengal on the onset of the South China Sea monsoon in 1998. *Meteorol Atmos Phys*, 90: 37–47
- Wu G, Guan Y, Liu Y, Yan J, Mao J. 2012. Air-sea interaction and formation of the Asian summer monsoon onset vortex over the Bay of Bengal. *Clim Dyn*, 38: 261–279
- Wu L, Takahashi M. 2018. Contributions of tropical waves to tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 50: 4635–4649
- Wu R, Wang B. 2001. Multi-stage onset of the summer monsoon over the western North Pacific. *Clim Dyn*, 17: 277–289

- Wu R, Wen Z, Yang S, Li Y. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93. *J Clim*, 23: 2389–2403
- Wu R. 2002. Processes for the northeastward advance of the summer monsoon over the western North Pacific. *J Meteorol Soc Jpn*, 80: 67–83
- Wu R. 2010. Subseasonal variability during the South China Sea summer monsoon onset. *Clim Dyn*, 34: 629–642
- Xiang B, Wang B. 2013. Mechanisms for the advanced Asian summer monsoon onset since the mid-to-late 1990s. *J Clim*, 26: 1993–2009
- Xie A, Chung Y S, Liu X, Ye Q. 1998. The interannual variations of the summer monsoon onset over the South China Sea. *Theor Appl Climatol*, 59: 201–213
- Xie S P, Hu K, Hafner J, Tokinaga H, Du Y, Huang G, Sampe T. 2009. Indian ocean capacitor effect on indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J Clim*, 22: 730–747
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, Hu K, Chowdary J S, Huang G. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 33: 411–432
- Xing N, Li J P, Li Y K. 2014. A theoretical explanation of anomalous atmospheric circulation associated with ENSO modoki during boreal winter. *Atmos Ocean Sci Lett*, 7: 352–357
- Xu L, Li Z L. 2021. Impacts of the wave train along the Asian Jet on the South China Sea Summer monsoon onset. *Atmosphere*, 12: 1227
- Xu P, Wang L, Chen W, Feng J, Liu Y. 2019. Structural changes in the Pacific-Japan pattern in the late 1990s. *J Clim*, 32: 607–621
- Yang J, Wang B, Wang B. 2008. Anticorrelated intensity change of the quasi-biweekly and 30-50-day oscillations over the South China Sea. *Geophys Res Lett*, 35: L16702
- Yao C, Yang S, Qian W, Lin Z, Wen M. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades. *J Geophys Res*, 113: D17107
- Yim S Y, Jhun J G, Yeh S W. 2008. Decadal change in the relationship between east Asian-western North Pacific summer monsoons and ENSO in the mid-1990s. *Geophys Res Lett*, 35: L20711
- You J, Jian M, Gao S, Cai J. 2021. Interdecadal change of the winter-spring tropospheric temperature over Asia and its impact on the South China Sea summer monsoon onset. *Front Earth Sci*, 8: 599447
- Yu W D, Li K P, Shi J W, Liu L, Wang H W, Liu Y L. 2012. The onset of the monsoon over the Bay of Bengal: The year-to-year variations. *Atmos Ocean Sci Lett*, 5: 342–347
- Yuan F, Chen W. 2013. Roles of the tropical convective activities over different regions in the earlier onset of the South China Sea summer monsoon after 1993. *Theor Appl Climatol*, 113: 175–185
- Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, Li C. 2008. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 28: 1579–1587
- Zeng Z, Guo Y, Wen Z. 2021. Interdecadal change in the relationship between the Bay of Bengal summer monsoon and South China Sea summer monsoon onset. *Front Earth Sci*, 8: 631
- Zhang C. 2005. Madden-Julian Oscillation. *Rev Geophys*, 43: RG2003
- Zhang C. 2013. Madden-Julian Oscillation: Bridging weather and climate. *Bull Amer Meteorol Soc*, 94: 1849–1870
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 74: 49–62
- Zhou Q, Chen W, Zhou W. 2013. Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 5111–5119
- Zhou W, Chan J C L, Li C. 2005. South China Sea summer monsoon onset in relation to the off-equatorial itcz. *Adv Atmos Sci*, 22: 665–676
- Zhou W, Chan J C L. 2005. Intraseasonal oscillations and the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 25: 1585–1609
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 27: 157–167
- Zhu Z, Li T. 2017. Empirical prediction of the onset dates of South China Sea summer monsoon. *Clim Dyn*, 48: 1633–1645

(责任编辑: 李肇新)