

南海暖季天气系统与中尺度对流过程研究进展

王东海^{1,2} 曾智琳^{1,2} 张春燕^{1,2} 杨帅³ 梁必骐¹

1 中山大学大气科学学院/气候变化与自然灾害研究广东省重点实验室, 珠海, 519082

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海, 519082

3 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京, 100029

摘 要 本文总结了近几十年来暖季(5—10月)南海热带天气系统及中尺度对流过程的相关研究进展。聚焦暖季南海中尺度对流过程, 概述性回顾了与南海中尺度对流过程相关的热带大气环流和夏季风的基本特征、影响南海中尺度对流发生发展的重要天气系统, 并着重归纳了南海中尺度对流系统的活动规律、结构特征与形成机理。在此基础上, 探讨了当前及未来南海中尺度对流过程研究面临的机遇与挑战, 并指明了未来该领域的研究方向。

关键词 暖季大气环流 南海 天气系统 中尺度对流过程 机遇与挑战

文章编号 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21041

收稿日期 2021-03-09; **网络预出版日期** 2021-XX-XX

作者简介 王东海, 男, 教授, 主要从事中小尺度天气动力学、热带对流系统、数值天气预报、数值模拟和气象资料同化及分析应用方面研究。E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

通讯作者 曾智琳, E-mail: zengzhlin@mail2.sysu.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2019YFC1510400, 国家自然科学基金项目——国际(地区)合作与交流项目 41861164027, 国家自然科学基金项目 41775097

Funded by National Key R&D Program of China (2019YFC1510400), International (regional) Cooperation and Exchanges Natural Science Foundation of China (41861164027), and National Natural Science Foundation of China (41775097)

Advances in synoptic systems and mesoscale convective processes in warm season over the South China Sea

WANG Donghai^{1,2} ZENG Zhilin^{1,2} ZHANG Chunyan^{1,2}

Yang Shuai³ LIANG Biqu¹

1 School of Atmospheric Sciences, and Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

3 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This review summarizes the research progresses of tropical synoptic systems and mesoscale convective processes during warm season (May–October) over the South China Sea in recent decades. Basic characteristics of the tropical atmospheric circulation and summer monsoon related to the mesoscale convective processes are briefly reviewed. Furthermore, the activity regularities, structure features, and formation mechanism for mesoscale convective system are emphatically summarized. Opportunities and challenges regarding the mesoscale convective processes over the South China Sea confronted currently are proposed, and future research directions in this field are then highlighted.

Keywords Warm-season circulation, the South China Sea, Synoptic systems, Mesoscale convective processes, Opportunities and challenges

1 引言

南海作为全球海洋–大气–陆地相互作用最活跃地区之一，中尺度对流活动频繁。在热带大气环流和夏季风背景下，受热带气旋、赤道辐合带等多尺度天气系统影响，频发的中尺度对流活动易造成大风、强降水等剧烈天气，对海洋产业、航运交通等带来严重影响。在全球气候变暖背景下，21 世纪以来南海的极端天

气候事件日益复杂，南海海洋天气系统对于海洋渔业、贸易、运输和旅游的船舶航行的影响越来越大，面对南海海上生产活动、交通运输和海洋气象综合应用不断发展的需求，需要不断加强南海监测与预报预警能力，进一步提高对南海的天气系统发生发展规律与大气结构特征的认知。近年来，“一带一路”的国家发展战略对南海气象保障能力提出了新的要求。因此，南海天气系统及中尺度对流过程的研究在保障国家海洋经济与社会发展层面具有重要的战略地位。

南海上空的热带大气环流具有鲜明的地域性和季节性特征（Krishnamurti, 1979; 梁必骥, 1991），夏季风活动显著，形成的天气系统成员众多，其中影响暖季中尺度对流发展的天气系统主要包括南海热带气旋、季风低压、热带波动和中层气旋等。在这些天气系统影响下，南海中尺度对流活动频繁，过程极其复杂。早期关于南海中尺度对流过程的研究大多是基于 1998 年 5–6 月的南海季风试验外场观测（SCSMEX）所开展的，通过两次外场加密观测，在南海及周边地区组建了大型气象探测网络，涵盖 66 个探空站、285 个地面站、20 多部气象雷达、海洋观测船、海岛通量观测、浮标、无人机以及日本 GMS-5（地球静止轨道气象卫星）、美国 NOAA（美国国家海洋和大气管理局）与 TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）卫星观测等（巢清尘和丁一汇, 1999; 丁一汇等, 2002）。该试验获取了大量宝贵的观测数据，随后的研究较为清晰地认识了南海季风的活动特征及其与海气通量与热量阶段性变化的关系，从海气–陆气相互作用角度，揭示了南海季风爆发机理，同时也初步揭示了南海北部季风对流系统的云系结构与演变等，取得了丰富的科研成果（Ding et al., 2004; 丁一汇等, 2004），为后续研究奠定了理论基础。

热带海洋问题、低纬度问题和青藏高原问题是当前大气科学领域内的三个宏观难题，而南海中尺度对流过程的研究，涉及前面的两大难题，低纬度热带海洋被认为是驱动全球天气气候变化的最大热机，但由于海洋观测资料稀缺，导致南海中尺度对流过程的科研进展和本地化的数值预报模式发展缓慢，这也限制了南海海洋气象业务监测预报的发展。南海季风和中尺度对流的演变影响着我国降水及分布，对我国乃至东亚的水汽和热量循环具有重要影响，因此也成为北半球天气气候变化最敏感的地区之一（Yanai and Tomita, 1998; Ding and Chan, 2005）。为此，本文将着重回顾南海暖季大气环流和夏季风、及其影响下的南海热带天气系

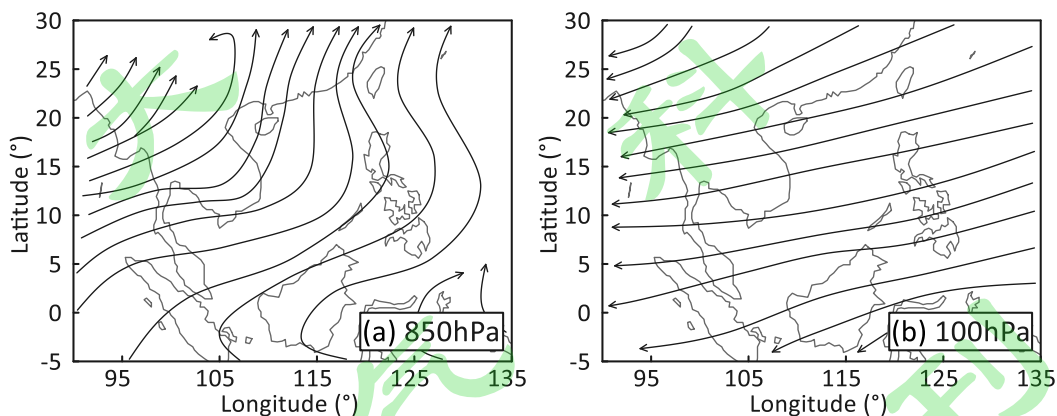
85 统和中尺度对流过程的主要进展及成果，并提出该领域的未来研究方向。

86

87 2 南海暖季大气环流与南海夏季风

88 2.1 南海暖季大气环流特征

89 有利的南海夏季大气环流形势可为天气尺度系统和中尺度对流的发生发展
90 提供背景场。由大尺度平均场合成得到南海暖季环流的基本特征为：暖季（以 7
91 月份为例）对流层低层（850 hPa）南海大部盛行来自于印度洋、孟加拉湾的西南
92 气流及来自南海南部越赤道的偏南气流（图 1a）。在南海东北部则为来自西太平
93 洋副热带高压南缘的东南气流，与西南气流相互作用形成热带辐合带
94 （Intertropical Convergence Zone，简称 ITCZ），在气压场上表现为季风槽形势。
95 在对流层高层（100 hPa）南海处在南亚高压东南侧，受稳定且较为一致的东到东
96 北气流控制（热带东风急流，图 1b），其 100 hPa 附近强风中心在 20°N 附近，在
97 300 hPa 则位于 15°N。这样的高低层环流特征使南海及邻近地区暖季处在越赤道
98 的季风经圈环流中，南海地区为经圈环流的上升支，其下沉支在南半球的澳大利
99 亚附近（梁必骐, 1991）。



100

101 图 1* 暖季（7 月份）南海及附近地区低层 850 hPa（a）与高层 100 hPa
102 （b）平均流场（梁必骐, 1991）

103 Fig.1* Averaged winds (streams) at (a) 850 hPa and (b) 100 hPa on July over
104 the South China Sea and its vicinity

105

106 *注：根据气象出版社 1991 年 6 月第一版《南海热带大气环流系统》图 1.3(b)重新绘制

2.2 南海夏季风

南海夏季风是亚洲季风环流系统的重要成员,与南海中尺度对流活动密切相关。亚洲夏季风系统涵盖南印度洋马斯克林反气旋、东非索马里急流、印度洋西南季风、季风槽、亚洲热低压和热带东风急流等主要成员(Krishnamurti, 1979),南海处在印度洋西南季风下游、季风槽区域,若将其细分为南亚(印度)季风区与东亚季风区(Tao and Chen, 1987),则南海夏季更多地从属于东亚季风区。东亚夏季风系统由澳大利亚高压、印尼附近的越赤道气流、赤道辐合带、西太平洋副热带高压和梅雨锋等系统构成,南海处热带辐合带(季风槽)区域。

南海夏季风的爆发、传播与演变过程,一直是国内国际的研究热点(李崇银和张利平, 1999)。关于亚洲夏季风爆发源地的研究已取得很多成果,但其中部分观点存在一些分歧。20 世纪 80–90 年代,有些学者认为亚洲夏季风最早爆发于南海,从赤道逐渐传播到南海中部,随后西传至孟加拉湾(Tao and Chen, 1988; Chen et al., 1996)。21 世纪初期,一些研究认为季风对流最早爆发是在孟加拉湾或中南半岛,再向东传播至南海地区(梁建茵和吴尚森, 2000; 何金海等, 2001; 钱维宏和朱亚芬, 2001)。关于南海夏季风爆发和变动机制,20 世纪 90 年代以来取得系列研究进展,如季风热动力学研究(Huang et al., 2003, 2012),有研究认为海陆热力差异,如青藏高原大地形的加热和强迫作用(Ueda and Yasunari, 1998; Wu and Zhang, 1998)、中南半岛—南海之间的纬向感热差异(王世玉和钱永甫, 2001),对夏季风环流建立有重要影响(Murakami et al., 1986; So and Chan, 1997),张立凤等(2008)通过计算分析球面 Rossby 波发展型波包的演变,波包向低纬度传播激发热带地区的积云对流,积云对流的爆发并向季风区传播,加速了大气环流调整,最终促使南海夏季风的爆发。南海夏季风的爆发是局地现象,但其爆发原因却是全球性的。此外,从海气相互作用角度,袁媛和李崇银(2009)指出热带海温异常对南海夏季风爆发有显著影响,南海—西太平洋较大的纬向温度梯度是南海夏季风爆发早于南亚季风的原因之一(谢安等, 1999)。从中低纬度环流系统相互作用的角度,中纬度西风槽与冷锋活动是南海夏季风的触发机制之一(Chang and Chen, 1995; 吴池胜等, 2001),即较深的西风槽东移配合一定强度的锋面系统南下促使西太平洋副热带高压东退,进而有助于南海夏季风建立。南海夏季风活动也与大气低频振荡有密切关系,表明热带天气系统的活动可能有调

节作用(温之平等, 2006; 陈尚锋等, 2011; Huang et al., 2018)。温之平等(2016)从局地经向环流异常的角度, 分析影响季风爆发的相应天气过程与贡献机制, 局地经向环流异常呈现为“Hadley 环流”形态, 非均匀的潜热加热的对这种异常的贡献作用最为显著, 其次是温度平流和西风动量输送过程。

3 影响暖季南海中尺度对流过程的重要天气系统

20 世纪 80 年代, 梁必骐(1985)逐步开展南海地区热带大气环流系统的研究, 较为全面地归纳了南海夏季环流系统的成员构成(包括南海 ITCZ、东风波、热带气旋与季风低压等)、活动和结构特征等, 指出了南海地区夏季热带环流结构的复杂性, 并存在各种不同尺度的天气系统相互作用, 如行星尺度的 ITCZ、热带东风急流, 天气尺度的东风波、热带气旋以及热带云团, 次天气尺度的中层气旋、季风低压以及赤道反气旋等, 多尺度天气系统相互作用使得南海地区的天气现象多样且复杂。本节将概述性回顾暖季影响南海地区的重要天气系统。

3.1 南海热带辐合带 (ITCZ)

作为暖季南海地区最常见的行星尺度系统, 南海 ITCZ 主要是由于暖季西太平洋副热带高压位置北移, 其南缘低层的偏东气流或东北气流与来自孟加拉湾的西南季风气流、110°E 印尼附近低层向北的越赤道气流形成的宽阔带状辐合区, 其对应在气压场上表现为准东西向的赤道低压槽。按气流来源方向分类, ITCZ 可分为季风辐合带和信风辐合带, 南海暖季的 ITCZ 属于典型的季风辐合带(陈世训和柯史创, 1983)。

南海 ITCZ 具有明显的季节性移动特征, 在南海附近随季节变化南北摆动(图 2), 其活动主要由大尺度流场决定(黄小燕等, 2017), 每年 7–9 月份主要在南海东部、巴士海峡一带摆动, 辐合强度达到最强, 辐合带形态最清晰, 其最北可推进至 25°N 附近。蒋全荣和余志豪(1984)统计 1973–1979 年南海及邻近地区 ITCZ 频数表明, ITCZ 平均生命史为 7–8 天, 平均出现日数(18.9 天)、过程频次(2.4 次)均在 8 月份达到全年峰值, 而过程平均持续日数最长(10.2 天)则出现在 9 月份。10 月份南海 ITCZ 向南撤退至 15°N 以南。由于暖季西太平洋副热带高压较为强盛, 因此南海 ITCZ 的活跃程度主要受西南季风、越赤道气流影响, 当南

半球冬季风势力增强，印度洋西南季风及印尼附近向北的越赤道气流随之增强，南海 ITCZ 会形成强烈的气流辐合，形成大面积的热带对流云团，并产生一些气旋性涡旋（沈如金等, 1978）。此外，南海 ITCZ 的强度与位置有准双周的周期性振荡（陈世训和柯史创, 1983；蒋全荣和余志豪, 1984）与明显的年际变化特征（李崇银和潘静, 2007；黄小燕等, 2017）。

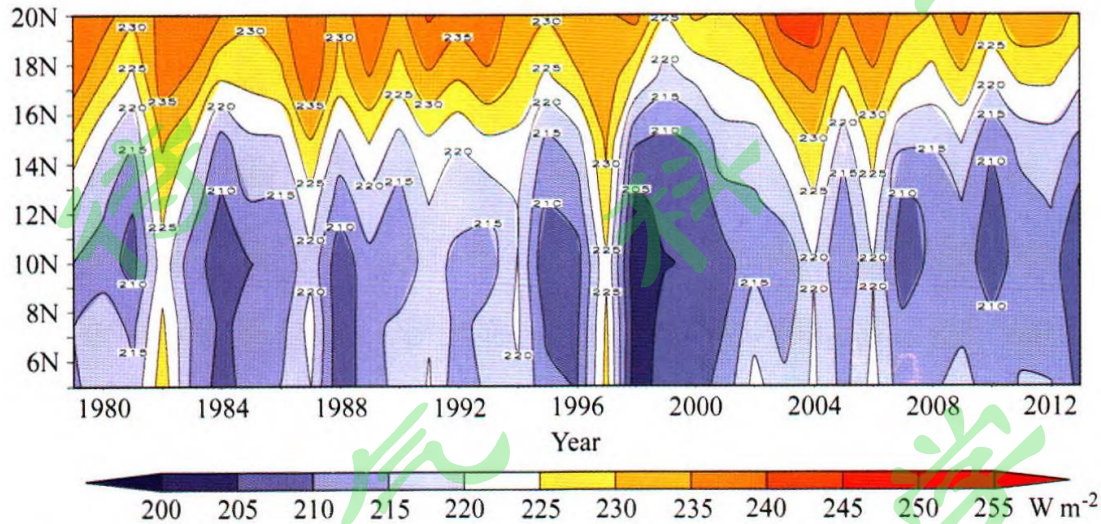


图 2 1979-2013 年逐月的南海热带辐合带 (ITCZ) 向外长波辐射值 (单位: W m^{-2}) 的纬度-时间演变, 经度范围取 110°E – 120°E 平均 (黄小燕等, 2017)

Fig.2 Latitude-time cross section for the outgoing long-wave radiation (units: W m^{-2}) of ITCZ over the South China Sea from 1979 to 2013 with 1-month interval, the average longitude range is from 110°E to 120°E

关于南海 ITCZ 的结构特征，大多数情况下其在垂直方向上随高度向南倾斜或近乎垂直，呈现低层辐合-高层辐散、中低层正-高层弱正或负涡度的结构；湿度场呈舌状形态分布，南侧的湿度高于北侧；温度场上无明显的水平温度梯度，南北两侧温度小于 3°C ，其在垂直方向上表现出低层冷、中高层暖且对流层顶附近存在冷中心的特征（梁必骐等, 1976；蒋全荣和余志豪, 1984），这种垂直方向上的风温结构特征表明第二类条件不稳定可能是南海 ITCZ 形成与维持的重要机制（梁必骐, 1985），但这与南亚地区 ITCZ（Sawyer, 1947）、中美洲 ITCZ 以及大西洋、东太平洋 ITCZ（Estoque, 1975；Frank, 1983；Partages and Estoque, 1984）的垂直温度结构都有较为明显的差异。

3.2 南海热带气旋

南海地区是全球热带气旋活动最频繁的海区之一(梁必骐, 1985), 影响南海的热带气旋有两类, 一类起源于西北太平洋, 另一类在南海海域生成, 南海作为热带气旋影响我国华南的“海上关键区”, 一直以来备受重视与关注。20 世纪 50 年代, 李宪之(1956)对国际上关于热带气旋生成的不同学说与批判进行了归纳与整理, 较为全面系统地解答了当时让我国许多学者困惑的基本问题, 并形成了热带气旋生成的综合学说, 强调了大气热力学稳定度与冷空气触发作用对热带气旋初生的重要性。后来, 南海热带气旋的基本特点开始被逐渐认识(赵亚民, 1959)。韦有暹等(1965)对南海热带气旋发生发展问题进行了初步探索, 并构建了南海热带气旋是否发展的经验判别式, 开创了我国对南海热带气旋预报研究的先河。

西北太平洋和南海存在三个热带气旋生成源高频中心(图 3), 其中南海东北部海域是热带气旋生成源地的高频中心之一, 其生成密度仅次于菲律宾吕宋岛东南部西北太平洋(柳龙生等, 2019)。然而, 相较于西北太平洋洋面生成的热带气旋, 南海热带气旋总体具有尺度偏小、强度较弱、生命史较短和生成纬度偏北等特点(梁必骐, 1985)。因暖季南海高层受热带东风急流影响, 低层盛行西南季风, 这种高低层风场与系统配置使南海热带气旋具有明显的结构不对称性, 云系结构的螺旋性形态也较西北太平洋热带气旋差, 因此其造成的降水亦有不均匀性(梁必骐, 1991), 这种结构差异也体现在热带气旋内部动力结构上, 例如其螺旋结构自下而上明显向外倾斜, 这在散度场结构上较为显著(徐燚等, 2007), 又如对流层高低层散度、涡度之差与南海热带气旋发生发展的关系密切, 这与西北太平洋的热带气旋有较大差异(杨松和梁必骐, 1988)。南海热带气旋活动期间存在显著的海气界面热量交换(吴迪生等, 2001), 蒋迪等(2012)指出南海热带气旋形成过程中, 海洋向大气释放的热通量是逐日递增的, 热带气旋中心南侧的海洋为其发展提供主要能量来源, 热通量沿顺时针方向向热带气旋北侧传播, 表明热带气旋外围涡旋具有罗斯贝波的能量频散特征。

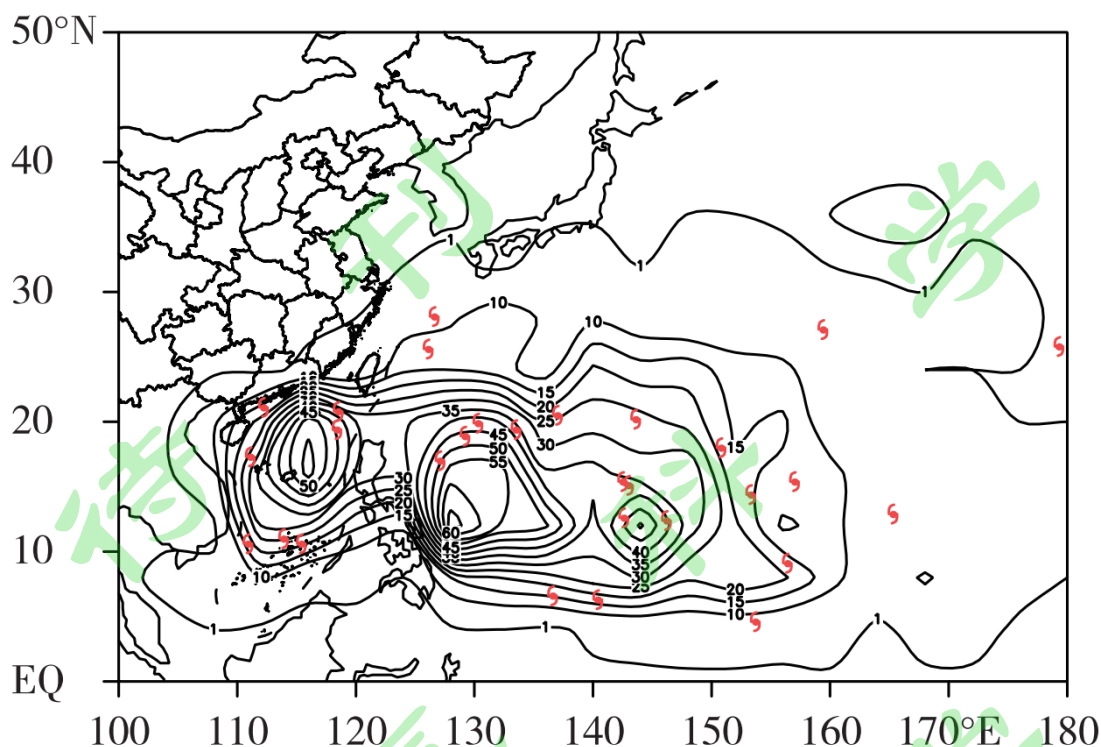


图3 1949-2018年西北太平洋和南海台风生成源地密度分布（等值线，单位： $\text{个} \cdot \pi^{-1} \text{R}^{-2}$ ， $\text{R}=250\text{km}$ ）与2018年台风生成位置（柳龙生等, 2019）

Fig.3 Density distribution of typhoons formation over western North Pacific and the South China Sea from 1949 to 2018 (isoline, units: $\text{incident} \cdot \pi^{-1} \text{R}^{-2}$, $\text{R}=250\text{ km}$) and formation positions of typhoons in 2018 (red typhoon symbol)

影响南海地区的热带气旋，其生命史和路径较之其它地区，特色鲜明（黄忠和林良勋, 2004；陈子通等, 2014；廖菲等, 2019）。崔志强等（1992）统计研究发现，一般强度越弱的南海热带气旋生命史越长，其中最长生命史南海热带气旋多位于海南岛东南方海面。然而，西北太平洋和南海热带气旋出现复杂路径的概率并不低，且蛇形路径、突然偏折及打转等路径更多地发生在南海地区，成因可能与南海上空复杂的大尺度热带环流系统有关（韦有暹和朱庆圻, 1985），而路径快速转向主要出现在近海岸地区和南海中北部的偏东区域（廖菲等, 2019）。此外，锋面涡旋、西南涡等外围天气系统也会对南海热带气旋的发生发展及移动路径产生影响（包澄澜, 1981；李崇银, 1983；徐梦婷等, 2016）。

3.3 南海热带波动

赤道波亦称热带波或低纬波，是热带波动的统称，其中对流层高层的混合 Rossby 重力波、Kelvin 波与低纬度 Rossby 波等是影响热带低纬度地区的三种主要波动类型。经典的东风波（即低纬度 Rossby 波）最早是在 20 世纪 50 年代被 Riehl（1958）首先提出，作为影响南海地区的主要天气波动，从 20 世纪 70 年代以来一直被广泛研究。Burpee（1972）与 Shapiro（1977）认为东风波有三类形成机制，第一类是中低纬度地区对流层高层的高空冷涡系统逐渐向下发展，从而在对流层中低层形成波动；第二类是由于西风带中的 Rossby 波槽加深，伸入热带地区而产生；第三类是 ITCZ 的扰动移至北半球副热带高压南侧的东风气流，气流发生弯曲形成。不同类型东风波的热动力结构有明显的差异：经典东风波的波槽一般随高度略向东倾斜，在水平方向呈南北走向，槽前为东北风，槽后为东南风，东风随高度减弱，槽后辐合上升，因此对流性降水天气多发生在槽后；叠加在低层西南季风之上的东风波一般在 5–12 km，东风风速随高度增强，槽前低层辐合，高层辐散，所以对流天气主要发生在槽前及槽线附近（梁必骐, 1985）。

早期有研究认为南海地区暖季盛行西南季风，东风波难以在南海地区活动，但业务预报中发现，低空西南季风上部经常叠加东风波（朱抱真等, 1966），可影响南海及我国华南地区中尺度对流的发生发展。梁必骐等（1985）归纳了影响华南地区不同东风波类型，分别是发生在深厚东风气流层中的东风波（经典型）、对流层中低层的东风波以及叠加在西南季风上的东风波，不同类型的东风波造成的降水落区有明显不同。

单纯的东风波通常会给南海及华南地区造成对流性降水天气，但当其与低涡叠加、与西南季风相联系等其它天气系统相互作用，产生的降水强度会明显增大（梁必骐, 1991）。在南海地区东风波与西南季风的相互作用经常发生，来自孟加拉湾的强盛西南季风或印尼附近较强的越赤道气流与南海地区对流层中低层的东风波相结合，增加东风波的低层辐合，同时水平风切变加强，在适当的环境条件下可发展为热带气旋。另外，东风波也可与切变东风基流、绝热加热、赤道西风与热带气旋等相互作用进而影响南海及华南地区的天气（吕克利, 1985；刘伯汉, 1991；陈瑞闪等, 1995；吴阳和周毅, 2005）。

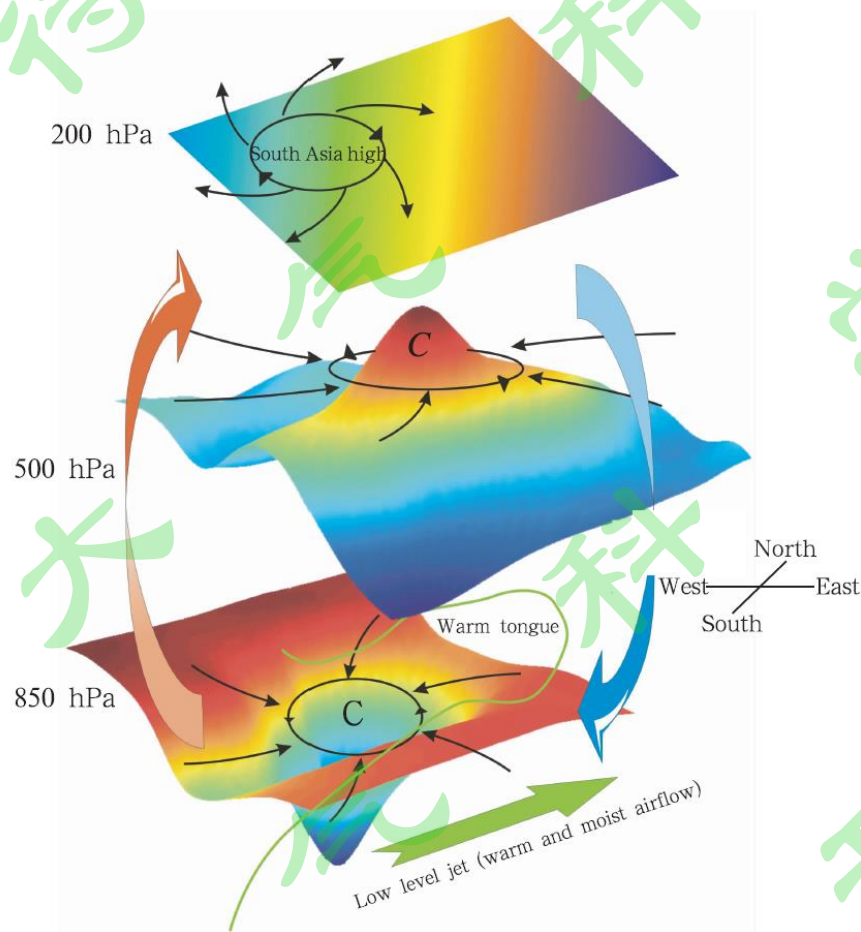
3.4 南海季风低压

季风低压一般是指发生在 ITCZ 内的天气尺度气旋性环流系统,因在气压场上表现为处在季风槽内部的闭合性低压系统,且与西南季风联系密切,因此称之为季风低压。季风低压实质上属于热带低压的一种,但其与西南季风相结合,这是它与狭义上的热带低压的主要区别。当暖季南海有季风槽活动,且西南季风较为强盛时,季风槽内部会发展出季风低压,南海季风低压不仅直接影响南海海洋上的天气,也会影响中南半岛以及我国华南地区的天气。

对南海季风低压的研究主要从 20 世纪 80 年代开始,但在此之前(20 世纪 70 年代),关于印度(孟加拉湾)季风低压的研究取得了不少成果,为南海季风低压的研究提供了借鉴,包括其动力结构与能量诊断(Krishnamurti et al., 1975, 1976; Nitta et al., 1981)、涡度与动量收支(Daggupaty et al., 1977; 江敦春, 1987; 孔期和赵思雄, 2005)与形成机理(Shukla, 1978)等。1973–1987 年 5–10 月份关于南海季风低压数量的统计表明,南海季风低压年平均生成 4.3 个,其中有 57% 作为初始扰动发展加强为热带气旋(梁必骐, 1991)。南海季风低压的生命史在 3 天左右,一般向西或西北方向移动,移速约为每天 3–4 个经距。关于南海季风低压的活动与结构特征(梁必骐等, 1985)、演变与涡度收支以及潜热释放的反馈作用(梁必骐和刘四臣, 1989; 刘四臣和梁必骐, 1993)不断有新的研究结论。此外,刘四臣和梁必骐(1988)还探讨了南海季风低压的发生发展机制,发现以积云对流所造成的潜热加热、水平温度平流与涡度平流对季风低压的形成与发展起重要作用。季风低压的发展与大气中水汽含量密切相关,积云对流过程及其潜热的释放对季风低压发展有显著影响(容广坝和谭锐志, 1991)。然而,与南海热带气旋比较发现,南海季风低压无论是在垂直涡度和散度结构、环境场条件,还是在对称性特征等方面都存在明显差异(邹美恩和梁必骐, 1984)。

南海季风低压是华南地区暖季尤其是华南后汛期(7–9 月)的重要暴雨系统(梁必骐等, 1993)。蒋建莹等(2007)针对华南一次季风低压大暴雨过程开展详细分析,发现季风低压具有上暖下冷的热力层结分布,对流层中低层具有对流不稳定特征,动力结构方面则表现出低层辐合且伴随有气旋性涡度、高层辐散并伴有反气旋性涡度的特点(图 4),低压中心轴线随高度向东南方向倾斜,这种结构与南亚季风低压和梅雨锋低压均有较大不同。2018 年 8 月末在南海季风低压提

286 供的显著天气尺度系统强迫背景下（图 5），华南沿海出现了一次持续性大范围
287 强降水，最大 24 小时降水量 1056.7 mm 刷新广东省历史极值（[Li et al., 2020](#)；[曾智琳等, 2020](#)），表明季风低压可产生不亚于热带气旋的暴雨强度。[蔡景就等\(2019\)](#)
288 [蔡景就等\(2019\)](#)分析指出，暴雨盛期低压环流的涡度大值中心位置逐渐升高，季风低压的强度演变与暴雨落区范围大小的逐日分布是同步的，但与日最大降水量的逐日演变仅在
289 分析指出，暴雨盛期低压环流的涡度大值中心位置逐渐升高，季风低压的强度演变与暴雨落区范围大小的逐日分布是同步的，但与日最大降水量的逐日演变仅在
290 低压加强阶段保持一致。基于 Hysplit 后向轨迹模式追踪该季风低压的水汽来源，
291 发现主要水汽来自于印度洋，季风低压可使华南沿岸成为北半球最强的水汽汇合
292 区（[郭姿佑等, 2019](#)）。
293



294
295 图 4 华南季风低压的三维结构概略模型（[蒋建莹等, 2007](#)）

296 Fig.4 Schematic diagram for three-dimensional monsoon depression over
297 South China

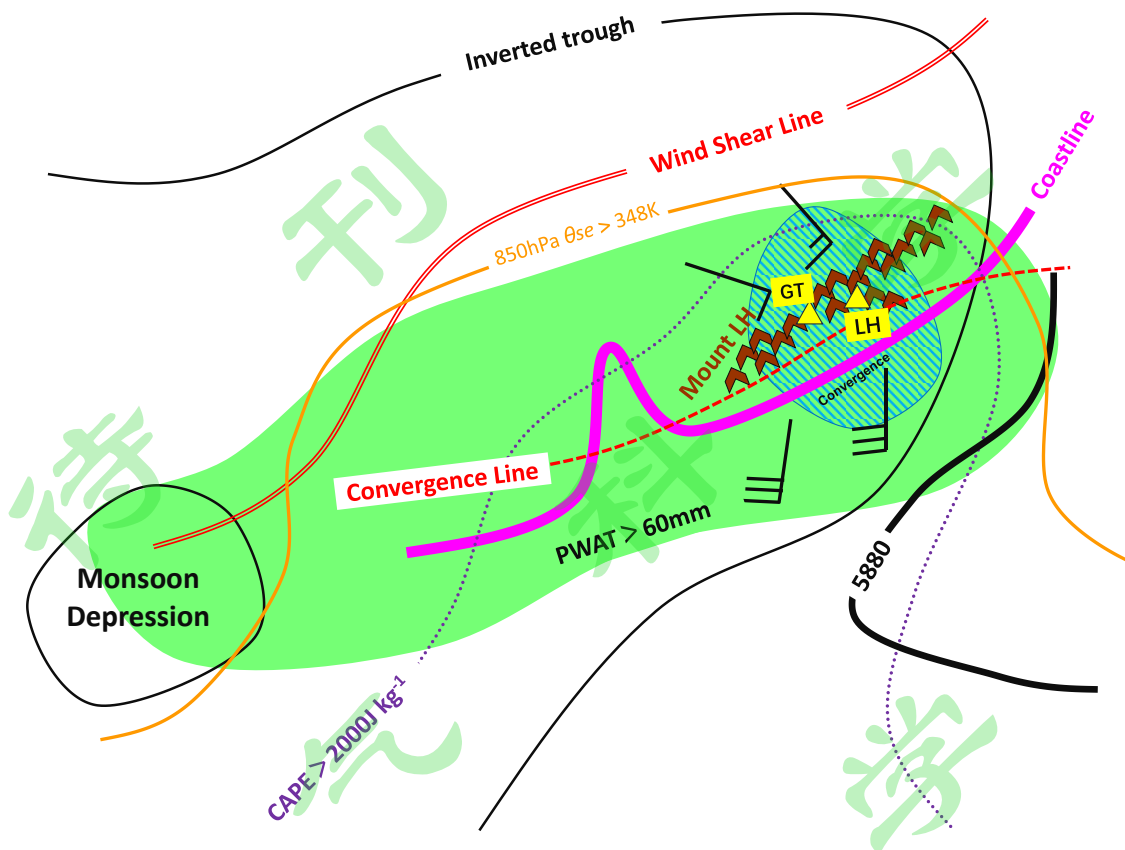


图 5 2018 年 8 月 30-31 日与南海季风低压相关的华南海极极端降水事件的多尺度概念模型（曾智琳等, 2020）

Fig.5 Multiscale schematic diagram for the extreme rainfall event associated with monsoon depression over the South China during 30–31 Aug 2018

3.5 南海中层气旋

南海地区（尤其是南海北部）暖季有类似副热带气旋的气旋性环流活动，由于在对流层中层（700–500 hPa）最为明显，因此称为中层气旋。许宁等（1976）研究发现，南海中层气旋与在东北太平洋发现的副热带气旋有差异，实际上中层气旋与季风低压、热带低压本质是类似的，但其有别于后两者的是尺度相对较小、气旋性环流和最强的垂直上升运动都发生在对流层中层。中层气旋的移动规律也颇为复杂，不同过程的中层气旋的移动方向不一样，但整体移速偏慢（15–20 km/h），部分呈现准静止的状态（梁必琪, 1991）。根据对南海中层气旋的合成分析研究显示，中层气旋也具有上暖下冷的结构特征，这与季风低压类似，但低层冷心较为深厚，气旋性旋转轴随高度向暖心一侧倾斜，气旋性辐合最强在 700 hPa

附近, 较季风低压要更高 (许宁等, 1976; 邹美恩和梁必骐, 1982a)。

Carr (1977) 依据天气学分析, 认为中层气旋可分为热带辐合带类、切断低
涡类、东风扰动类和季风扰动类, 张爱华和蒋伯仁 (1993) 则将其分为切断类气
旋、东风类气旋、南风类气旋与辐合类气旋等四类, 不同类型 (形成方式) 的南
海中层气旋对华南地区影响程度不同。在中层气旋发生发展阶段, 中层气旋首先
在中层形成, 随后向上、下层逐渐延伸发展, 在地面一般无明显反映, 这与南海
季风低压、热带气旋自下而上发展过程、地面有相应的闭合中心有显著区别 (梁
必骐等, 1976)。南海地区发展型和非发展型中层气旋的结构特征有着明显的区别,
发展型中层气旋的中心涡度逐渐增大, 并同时向高层和低层发展, 其中低层辐合
维持得较好 (黄辉军等, 2012)。基于对南海中层气旋的温湿结构分析表明, 南海
中层气旋的发展维持不完全依赖于潜热释放的反馈作用, 边界层摩擦辐合不明显,
其发生发展也不完全符合第二类条件不稳定机制, 结合其环境流场配置发现其垂
直风切变比较大, 因此相较于热带天气系统通常依赖于正压不稳定机制, 斜压不
稳定对南海中层气旋的发生发展与维持的作用更为重要 (梁必骐, 1985; 邹美恩
和梁必骐, 1982b)。

4 南海中尺度对流活动

南海暖季中尺度对流活动频繁, 活跃的对流除了具备中尺度对流系统
(Mesoscale convective system, 简称 MCS) 的一般特性, 其对流组织和发生发展
还具备地域独特性。MCS 通常被广泛定义为包含对流核的云团, 尺度不小于 100
km, 在这种系统内经常出现强烈天气现象, 如强雷暴、大风、暴雨、冰雹等 (Houze,
2004; Schumacher and Johnson, 2005), 这些中尺度过程是地球大气产生降水的主
要形式。关于 MCS 的研究进展, Houze (2018) 对最近 100 年的 MCS 的研究进
行了详细的回顾及总结。然而, 关于南海中尺度对流过程的研究成果更多地来源
于 1998 年 5–6 月开展的南海季风试验 (SCSMEX), 期间收集了丰富的雷达、探
空和海洋观测数据集, 并被用于研究与南海季风爆发有关的对流系统与环境 (Lau
and Coauthors, 2000)、对流的组织和传播特征、对流结构和降水微物理、对流区
域变化、对流加热廓线及其日变化演变等 (Chan et al., 2000; Johnson and Ciesielski,
2002; Wang, 2004; Johnson et al., 2005; Wang and Carey, 2005; Ciesielski and Johnson,

2006; Aves and Johnson, 2008)。

本文第 3 节回顾了暖季影响南海地区的 ITCZ、季风低压、中层气旋等主要天气系统的研究成果，而在这些不同类型系统的天气背景影响下，MCS 的发生发展、移动演变具有不同的活动特征（梁必骥, 1991）。例如，南海 ITCZ 下的对流云区宽达数百公里，最活跃对流位于地面 ITCZ 以南 3–6 个纬距；移入南海的东风波伴随有 MCS 逐渐西移，且不同类型东风波的 MCS 所产生的坏天气分别可能出现在槽后、槽前以及槽线附近等不同位置；而对于南海热带气旋相关的中尺度对流，除了热带系统本体旺盛的对流以外，热带气旋外围螺旋雨带的 MCS 可发展为线状形态甚至飑线（台前飑线），这种飑线多发生在热带气旋移动路径前方或右后方，造成雷暴大风、短时强降水、龙卷等剧烈天气现象。

4.1 南海中尺度对流系统的结构特征与活动规律

基于 SCSMEX 的研究成果，南海地区的对流组织与其它热带海洋系统具有相似特征，但在不同垂直风切变的大气结构下有本地独特的组织模态，即切变平行形态（shear-parallel bands），其成因可能是南海地区对流与中纬度副热带锋面系统相互作用的结果（Johnson et al., 2005）。然而，在锋面的前侧与锋后位置对流的发展强度、垂直伸展高度以及降水微物理等有较大差异（Wang, 2004; Wang and Carey, 2005）。

许多研究表明，季风活跃期与间歇期的对流强度和结构存在明显差异（Williams et al., 1992; Petersen and Rutledge, 2001; Cifelli and Rutledge, 1998; Xu and Zipser, 2012）。例如，在热带低纬度的亚马逊地区，低层盛行西风时的对流与在盛行东风期间有很大不同（Cifelli et al., 2002; Williams and Coauthors, 2002）。统计发现季风间歇期和低层盛行东风期期间的对流更加强烈（Petersen et al., 2002）。季风爆发后南海的闪电比例较季风爆发前减少，降水系统的垂直发展强度减弱（Yuan and Qie, 2008）。南海季风区在夏季风爆发前后热带深对流的传播具有显著的多向性特征，其传播受南半球热带地区与北半球中纬度地区天气系统共同影响，因而其对流活动远比孟加拉湾季风区复杂（高辉, 2009）。在对流强度方面，南海地区的对流也表现出不同阶段的强度差异特征，虽然季风爆发后，MCS 的云水含量显著增加（Johnson et al., 2005），但季风爆发前的对流强度明显高于季风爆发后，其主要表现是具有更高的闪电比率（Yuan and Qie, 2008）。

在季风爆发初期，由于对流层上层相对较干冷，层结不稳定特征更为显著，因而南海北部的降水系统主要为深对流（Ciesielski and Johnson, 2006），其层云面积相对热带其它区域比例偏少（Johnson et al., 2005; Lee et al., 2013），而南海南部的降水系统主要表现为婆罗洲西边海岸线周期性的、层云降水比重较大的 MCS 和浅的对流云（Ciesielski and Johnson, 2006）。然而，杜爽等（2020）基于双频星载雷达对比分析了南海与华南地区对流发展高度特征，发现南海海洋对流回波顶高普遍低于华南陆地（图 6），无明显季节性变化，但无论层云降水还是对流性降水，其回波顶高频率在 3.5 km 与 5.5 km 高度处存在峰值（图 7）。此外，基于 SCSMEX 学者们也开展了大量个例研究，并从中尺度角度分析研究了南海对流的结构特征与演变过程（Johnson and Ciesielski, 2002; Lin and Kueh, 2003）以及与大尺度天气系统的关系（柳艳菊等, 2005; 柳艳菊和丁一汇, 2005）。

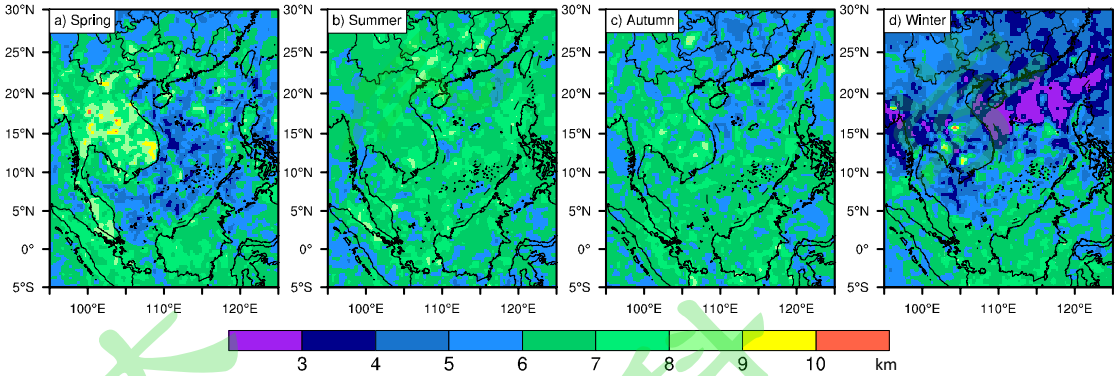


图 6 华南与南海地区（a）春季，（b）夏季，（c）秋季和（d）冬季的雷达回波顶高度（杜爽等，2020）

Fig.6 Top height of radar echo for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter over South China and the South China Sea

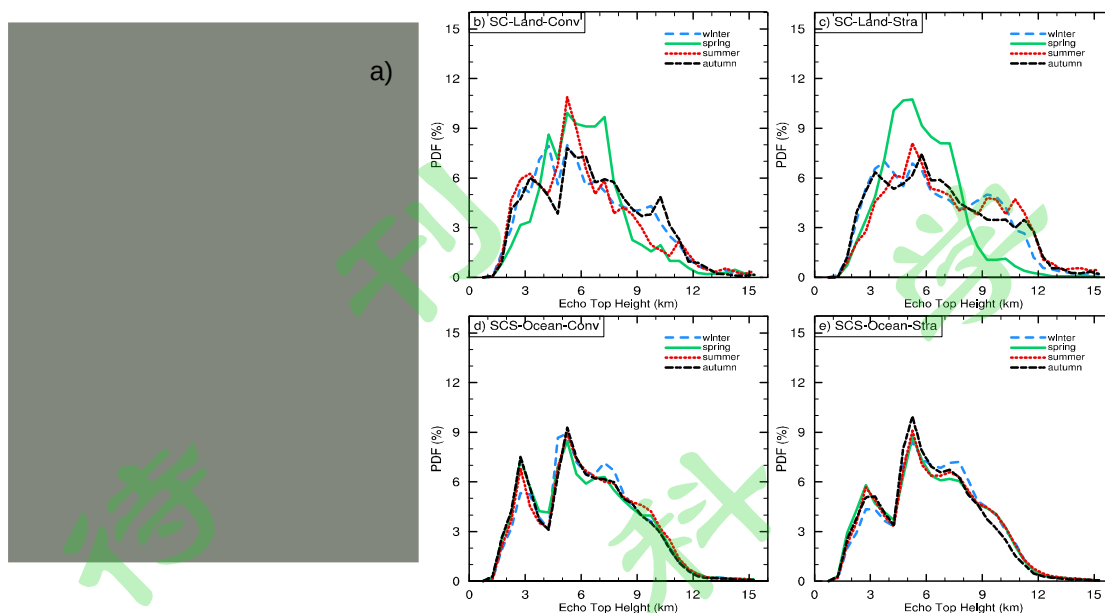
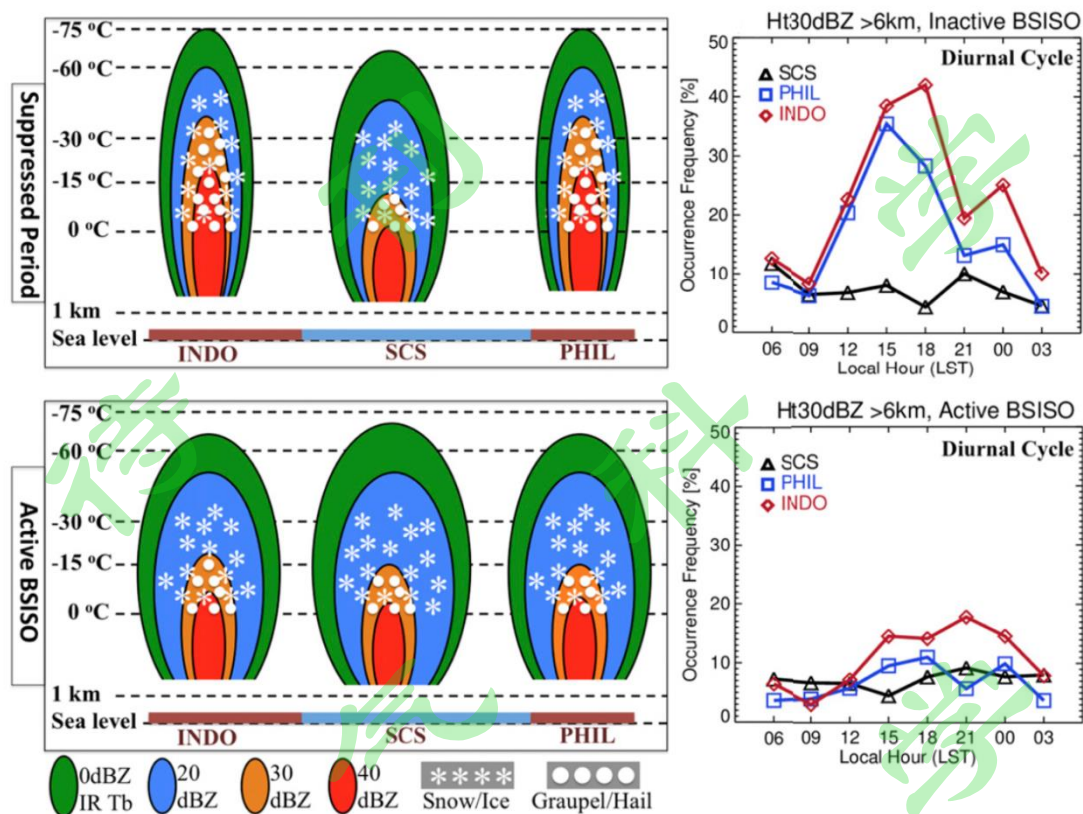


图 7 (a) 华南与南海区域及地形, (b) 华南陆地对流性降水, (c) 华南陆地层状性降水, (d) 南海海洋对流性降水, (e) 南海海洋层状性降水不同季节回波顶高度的概率密度函数 (PDF) 分布 (杜爽等, 2020)

Fig.7 (a) Schematic diagram for location (topography) of (in vicinity of) the South China Sea, within which the black frame indicates the South China land. Probability density functions for the convective precipitation over (b) the South China land and over (d) the South China Sea, the stratiform precipitation over (c) the South China land and over (e) the South China Sea

在南海对流与季节尺度振荡的关系方面, Ho et al. (2008) 研究了热带季节内振荡 (ISO) 与热带对流活动的关系, 发现与 ISO 活跃期 (西风环境条件下) 相比, ISO 非活跃期 (东风环境条件下) 在天气雷达图上显现出的对流更为强烈。此外, ISO 非活跃期南海附近的对流多触发于午后的陆地, 夜间逐渐地向近海迁移。Xu and Rutledge (2018) 采用 TRMM 卫星数据研究了南海和邻近陆地对流云系特征与北半球夏季季节内振荡 (BSISO) 的关系, 发现南海上空在 BSISO 不活跃期存在着浅积云、浓积云和深对流三种不同对流模态, 而陆地对流只表现为浓积云和深对流两种模态。在 BSISO 活跃期, 南海上空的浅积云明显减少, 但造成降水对流系统尺度更大, 亦含有较大比例的层状降水。此外, BSISO 非活跃期陆地 (中南半岛及菲律宾) 对流发展得更高, 混合相态的微物理过程更明显 (图 8), 南海在 BSISO 活跃期与不活跃期的对流结构差异不明显, 亦无显著的日变

410 化特征 (Xu and Rutledge, 2018)。



411
412 图 8 北半球夏季季节内振荡 (BSISO) 雨带区域 (中南半岛, 南海与菲律宾)
413 对流结构与微物理特征的概念模型 (左图), 其中左上图表示对流抑制阶段
414 (BSISO 不活跃阶段), 左下图表示 BSISO 活跃阶段; 右图表示与之对应的对
415 流性降水区域 30 dBZ 以上对流发生频率的日变化, 其中右上图 (右下图) 表示
416 BSISO 不活跃阶段 (活跃阶段) 对流性降水区域内距离地面 6 km 以上 30 dBZ
417 以上反射率因子发生频率的日变化 (Xu and Rutledge, 2018)

418 Fig. 8 (left) Conceptual model of convective structures and microphysical properties
419 across the BSISO rainband region (Indonesia, the South China Sea, and Philippines)
420 during (top) suppressed condition and (bottom) active BSISO periods, and (right)
421 corresponding diurnal variations on 30 dBZ occurrence frequency above 6 km in
422 convective precipitation areas.

424 4.2 中尺度对流系统的发生发展机理

425 在大尺度天气背景下, MCS 及降水的形成需具备有利的海洋和大气环境条
426 件和要素, 如适当的海洋感热潜热, 这些有利条件通过引起海面温盐异常和热通
427 量异常, 进而影响 MCS 的形成 (Sun et al., 2016; 谢旭丹等, 2018; Zu et al., 2019;

Qiu et al., 2019)。来自孟加拉湾与副热带高压西侧的西南气流可为南海北部提供大量水汽, 形成该区深厚的湿层和强水汽辐合(王立琨等, 2001), 进而促使 MCS 发生发展。在季风爆发初期, 华南和南海北部对流层低层较高的假相当位温与对流不稳定性, 潜热加热可增大至季风爆发前的两倍(Li et al., 2013a; Li et al., 2013b), 低层西南风辐合和高层的辐散(柳艳菊等, 2005)使得大气湿层变得深厚, 为季风槽的维持和 MCS 的发展提供有利的大尺度热力、动力和水汽条件(蒙伟光等, 2004, 2007, 2014, 2019), 其中水汽的持续输送补充作用尤为重要(Tao et al., 2003)。另外, 南海北部的冷空气活动是对流发生的重要触发机制之一, 其作用是加速对流不稳定能量的迅速释放与对流爆发(柳艳菊和丁一汇, 2005), 由季风环流触发的风切变有利于强对流云的维持与发展。Wang and Carey (2005) 分析了 SCSMEX 期间 MCS 造成的一次持续 10 h 的飑线过程, 指出该飑线具有较高雷达反射率, 层状云降水较小且位于对流区前侧, 而强上升区位于后侧的特征, 这与典型热带海洋飑线有所不同, 与中纬度地区的飑线结构(Tollerud and Esbensen, 1985)也有很大差异。

与一般的热带海洋对流(40%–50%)相比, 南海北部降水系统中的层状降雨比例(25%)要小得多, 这可能与南海北部大气不稳定程度、海表温度较高以及对流层上部相对干燥的环境条件有关(Wang and Carey, 2005; Johnson et al., 2005)。Choudhury et al. (2011) 针对南亚季风槽研究发现, 当 MCS 以层云降水为主时其加热可更有效地促进季风槽气旋性环流的向上发展, 而当 MCS 以深对流降水加热为主时, 中层的响应则仅限于某些局部区域。这从侧面说明 MCS 的发生发展对大尺度环流有重要的反馈作用。然而 SCSMEX 主要关注的是 5–6 月南海季风爆发之前和爆发期间发生的对流, 对于华南后汛期(7–9 月)与季风槽相关的 MCS 研究比较有限。

在对流发生发展的微物理方面, Park et al. (2007) 认为南海上空的对流发展比菲律宾海附近的更强, 通常表现在前者更强烈的雷达反射率结构和微波冰散射特征。南海上空对流的发生发展既有大陆性对流的特征, 也具有热带海洋性对流的特征, 属于典型的海洋性大陆对流, 其成因可能与来自邻近大陆、海洋岛屿的气溶胶有关, 也与对流系统从周边陆地触发、随后移进南海地区有关(Takayabu et al., 2006; Park et al., 2007; Ho et al., 2008)。而对南海上空来说, Fu et al. (2011) 的研究结果表明, 冰相态的微物理效应主要受辐射过程而不是微物理本身来控制

的。此外,冰云还可以导致中高层大气变暖变干,并使层结变得稳定,从而抑制对流的进一步发展。

4.3 中尺度对流系统的形成与增长机制

南海 MCS 的形成与增长机制与有利的天气尺度强迫密不可分(Tao and Chen, 1987; Chen et al, 1996; 史学丽和丁一汇, 2000; Ding and Liu, 2001; 柳艳菊等, 2005)。特别是在南海季风爆发期,南海地区对流强烈发展,积云与积雨云在短时间内迅速增多(梁必骐, 1991)。来自热带海洋的暖湿空气提高了大气的湿静力能,同时来自孟加拉湾的西南季风扩展至南海,在急流出口区一方面加强垂直风切变,另一方面引起辐合,可为 MCS 的对流增长提供有利的动力和热力条件。SCSMEX 外场观测与研究表明,1998 年 5 月 15–17 日的强对流首先在南海北部突然爆发,降水迅速加强,季风雨季在这个地区开始建立(Lau et al., 2000; Ding and Liu, 2001; Johnson and Ciesielski, 2002)。南海季风带来充沛的水汽,有利于降水的产生,而降水期间对流的潜热释放会进一步促成新的中尺度扰动的发展(Lin and Kueh, 2003),可见水汽凝结潜热加热对 MCS 的增长有重要作用,但如何量化潜热对 MCS 的反馈仍具有较大不确定性。例如,基于数值模拟与卫星观测反演的加热廓线有较大差异,这影响数值天气预报对热带对流系统的预报效果(Krishnamurti et al., 2010)。此外,在南海及邻近地区,包括我国东南沿海、华南地区, MCS 和暴雨的发生与低空急流和边界层急流等天气尺度或次天气尺度系统密切相关(Chen and Yu, 1988; Chen, 1992; Du and Rotunno, 2014; Du and Chen, 2018, 2019),而急流的发展是季风加强的表现形式之一,它引起的动量水平输送与中低纬度锋面、低涡或切变线的等天气尺度强迫有关(Uccellini and Johnson, 1979; Uccellini, 1980; 高守亭等, 1984)。

在适宜的大尺度环境条件下, MCS 是在南海季风槽、相应的风场切变线和中尺度低涡中不断组织发展的,生命期为 6–10 h 或更长(柳艳菊等, 2005)。南海 MCS 在全天都较为活跃,午夜形成最多,平均持续时间 7.5 h。在 10°N 附近(南海南部) MCS 活跃期为后半夜至白天(Shu et al., 2013),而在 20°N 附近(南海北部),对流则在早晨(0500–0800 LST)海岸线附近频繁出现,并以 10–15 m/s 的速度东移至南海北部的中心区域,1400 LST 达到峰值而后逐渐消亡(Ciesielski and Johnson, 2006; Aves and Johnson, 2008)。在华南后汛期(7–9 月)由于处在西太平洋副热带高压南侧的东风带,南海地区的 MCS 以西移为主,移速较中纬度

西风带中的 MCS 明显偏慢, 对流层中低层的垂直风切变在 MCS 的移动中具有主导作用 (Johnson et al., 2005)。

总体来说, 在有利的环境条件下南海 MCS 往往向着更有利的环境条件持续增长, 然而缺乏像中纬度斜压强迫、多层不同天气系统配置作用, 热带对流发展与维持机制更依赖于潜热释放 (Luo and Yanai, 1983, 1984; Yanai and Tomita, 1998; 柳艳菊和丁一汇, 2005)。专门针对南海海洋上 MCS 发生发展的精细结构特征、中尺度过程及增长机理方面的研究仍然比较少, 对这方面的认识依然非常有限。

很多研究表明, 在热带低纬度海洋或受海洋调节影响的大陆地区, 季风活跃与非活跃阶段的对流表现出不同特征, 如在南美洲的亚马逊河流域, 盛行东风期间的中尺度对流通常伴随强烈的多相态混合过程, 这可能与大气对流有效位能 (CAPE) 较高以及上升气流较强有关, 从而导致频繁的闪电现象 (Mohr and Zipser, 1996; Petersen and Rutledge, 2001; Williams and Stanfill, 2002; Xu and Zipser, 2012), 但该区域在季风期间 (盛行西风) 对流则类似于海洋对流, 其特征是对流强度多为弱到中等强度 (闪电活动明显减少), 表现为显著的“暖雨”过程, 仅伴随有弱的混合相态降水增长 (Petersen and Rutledge, 2001; Williams and Stanfill, 2002; Xu and Zipser, 2012), 这些特征与南海地区的对流相似, 如果以雷达反射率 20 dBZ 为阈值表征云顶高度, 统计发现云顶高度在 3–6 km 的占比可超过 40% (Xu and Rutledge, 2018)。此外, Ho et al. (2008)、Xu and Rutledge (2018) 分别研究南海对流活动与 ISO、BSISO 的关系亦发现类似特征。BSISO 活跃期南海的对流可发展为尺度更大降水系统, 且层状降水更多、闪电密度亦增加 (图 9), 这种现象是由 BSISO 活跃期南海对流层中层具有更强的垂直风切变和更湿的环境条件所致 (Xu and Rutledge, 2018)。上述关于南海对流强度增长、混合相态的微物理特征在不同阶段表现出的差异, 一方面可归因于热带低纬度大气中低层的热动力条件的变化 (Williams et al., 1992; Rosenfeld and Lensky, 1998; Petersen and Rutledge, 2001), 另一方面与气溶胶数量有关 (Rosenfeld and Lensky, 1998; Williams and Stanfill, 2002), 或取决于二者协同作用 (Williams and Stanfill, 2002; Stolz et al., 2015)。此外, 大气中不同类型潜热 (如冰相相变、凝华潜热、碰冻潜热) 的释放过程可通过影响海面热通量、大气稳定度的变化, 最终影响南海 MCS 的降水 (付丹红和郭学良, 2016)。

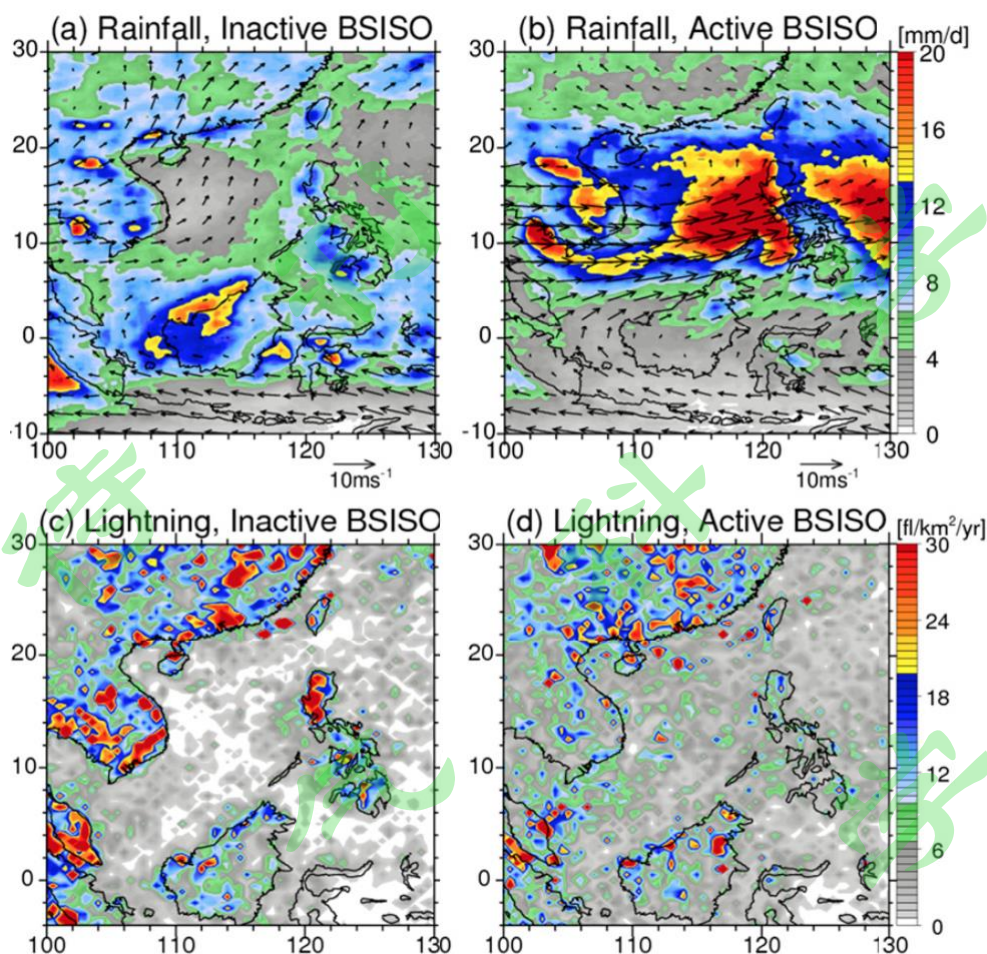


图 9 BSISO 周期的活跃期（5–7 位相）与非活跃期（1–3 位相）平均降水量和闪电密度，（a）不活跃阶段的降水分布与 850hPa 风场，（b）活跃阶段的降水分布与 850hPa 风场，（c）不活跃阶段的闪电密度，（d）活跃阶段的闪电密度

（[Xu and Rutledge, 2018](#)）

Fig.9 Mean rainfall overlaid with 850 hPa winds and lightning flash density during inactive (phases 1–3) and active (phases 5–7) BSISO periods: (a) rainfall and 850 hPa winds (vectors) during inactive, (b) rainfall and 850 hPa winds (vectors) during active, (c) lightning during inactive, and (d) lightning during active.

5 当前研究的局限性、机遇与挑战

5.1 当前研究的局限性

尽管早期通过南海季风试验获取了较多宝贵的观测资料，并取得了一系列科研成果，仍不足以全面认识南海的天气系统，尤其是时空尺度较小的中尺度对流系统。总体来看，当前研究的局限性包括：一是近 10 年关于南海天气系统的研

究进展明显放缓；二是未有专门针对南海 MCS 的系统性研究，且研究大多是基于个例，对南海 MCS 的发生频率、活动特征等气候态特征与发生机理等问题仍然不太清晰。这一方面造成了对南海重要天气系统的基本科学认识仍然停留于 20 世纪 80–90 年代，另一方面是与南海中尺度对流系统相关的研究主要是基于 20 多年前的 SCSMEX 外场观测资料。最近 10 多年来该领域的研究未能取得科学认识上的新突破，这种窘境很大程度上是由南海海洋观测资料稀缺所致。另外，我国现有的数值天气预报模式及与中尺度对流系统相关的主客观预报技术与分析方法偏重于我国陆地，关于南海中尺度过程及对流系统至今未有系统地形成有针对性的预报理论、技术与方法。

5.2 机遇与挑战

作为中国近海中面积最大、水深最深的海区，南海在我国经济和军事中具有重要地位。近年来，“一带一路”的国家发展战略对南海气象保障能力提出了新的要求，迫切需要加快提升对南海热带大气环流与天气系统的新认识，尤其亟需提高对那些容易产生暴雨、大风等对海洋航运、渔业与交通运输等安全影响的中尺度对流系统的科学认识。基于目前的研究现状，未来该领域研究的挑战包括：

（1）南海海洋地面观测受限。受到海岛地理位置限制，海岛站、浮标站的空间分布不均匀，难以满足探测南海区域所有中尺度对流系统的需求；垂直观测探空观测欠缺。目前我国常规探空业务一天仅观测 2 次，且分布在海洋岛屿探空极为稀少，南海海区探空观测除西沙永兴岛外，其余均分布在周边的陆地海岸地区。因此，南海海区现有垂直观测的时空尺度较粗，与中尺度系统生命史（多为数小时）相比，这无法完整刻画出中尺度对流系统的发生发展过程和三维立体结构；

（2）近地层海气梯度通量探测空白。海-气通量输送强烈影响大气边界层结构，进而影响大气环流并造成不同尺度的天气与气候变化。然而，关于南海海-气通量开展的研究依然局限于 1998 年 SCSMEX 获取到的非常有限的资料（[闫俊岳等, 2007](#)）。

但随着气象科技的发展与进步，近年来可供研究海洋区域的数据亦日益丰富，为加深认识南海重要天气系统以及中尺度对流系统提供更多的可能性与机遇：

（1）各类再分析资料和新一代卫星数据的应用。近年来全球再分析资料（如

ERA5、JRA-55 等)、较高分辨率卫星数据(如我国的风云 4 号卫星[FY-4]、日本的葵花 8 号卫星[Himawari-8]、GPM 等)迅速发展,为日后研究南海地区天气系统及中尺度对流系统提供了可用的、时空分辨率较为精细的数据基础;

(2) 南海海洋气象探测能力的发展。近年来,在南海区域已初步建成了包括海岸、海岛、塔台(海上石油钻井平台)自动气象观测站,海上锚碇浮标观测站、志愿观测船等自动站加密观测,以及以沿岸海域为主的海洋观测、高空观测、气象雷达和气象卫星遥感观测等构成的海洋气象观测系统。

目前中国气象局在南海及华南沿岸的常规地面观测设备包括沿岸天气雷达 17 部,海岛自动站 91 个,石油平台(塔台) 19 个,浮标观测站 11 个。2019 年中国气象局三沙海洋气象野外科学试验基地挂牌成立,试验基地包括由海南岛及周边海域观测区(六道岭基地)、西沙观测区(永兴岛基地)、南沙观测区(美济礁基地)等三大综合气象观测区(图 10)。在南海北部、中部和南部同时具备了地面与高空、天气雷达、卫星接收、太阳辐射、酸雨、闪电定位、紫外线强度、对流层风廓线、气溶胶、GNSS/MET 水汽等 11 种气象观测能力。南海海洋气象探测资料的时空分辨率不断得到提升,为日后加深认识南海热带大气环流以及中尺度对流系统活动与结构特征提供必要的观测数据基础。

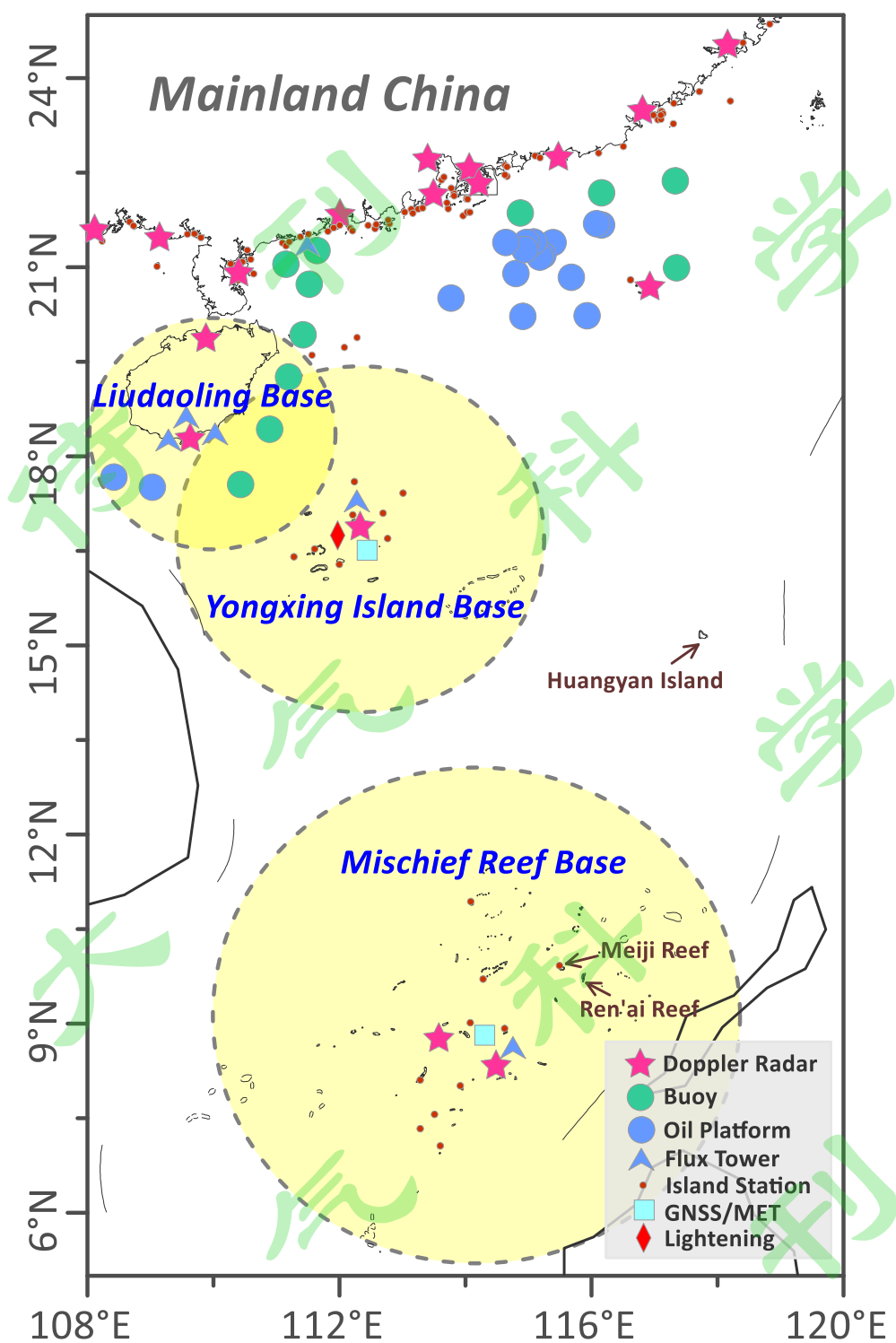


图 10 南海海洋及我国近岸气象观测网示意图

Fig.10 Schematic diagram of the observation network over the South China Sea Ocean and coastal region for mainland China

6 总结与展望

本文对南海暖季重要天气系统及中尺度过程的研究进展进行了概述性回顾,初步总结了最近几十年关于暖季南海热带大气环流的主要特征、影响南海的重要天气系统以及南海中尺度过程(尤其是中尺度对流系统)的活动规律、结构特征和形成机理等。总结发现,早前关于南海大气环流系统尤其是中尺度过程的研究很大程度上受限于海洋观测稀缺,亦是当前及未来一段时间该领域研究的需要直面的挑战之一。此外,南海海洋气象观测网络日渐发展与完善、海洋气象野外科学试验基地的成立等为未来研究南海中尺度对流系统提供了必要的基础条件。未来需要继续加强关于南海天气系统与中尺度对流系统的研究主要包括:

(1) 从热带大气环流和关键天气系统的角度,在前人对南海季风低压、南海中层气旋、南海热带波动等天气系统基本特征研究的基础上,采用更高时空分辨率的再分析数据与多源卫星观测资料,开展更为细致的统计分析与研究,进一步提升对海洋天气系统的科学认识。

(2) 实施专门针对南海中尺度对流过程的大型外场观测试验,构建空-天-海的多源稠密观测网络。加深认识南海中尺度过程及 MCS 的发生发展,充分提炼并归纳在季风低压、ITCZ、热带波动等不同类型的天气系统影响下南海中尺度对流系统演变的多尺度天气学特征。研究南海中尺度对流系统活动特征与规律、中小尺度过程、云微物理过程,以及在海洋下垫面独立影响下其发生发展过程与陆地中尺度对流系统的差异,揭示南海中尺度对流系统的三维热动力特征及多尺度相互作用的过程与机理。

(3) 发展具有针对性的南海高分辨率区域数值预报技术系统,优化与改进适用于南海热带地区的模式物理参数化方案和资料同化技术,提升对南海中尺度对流系统及其降水的预报能力。

参考文献 (References)

- Aves S L, Johnson R H. 2008. The diurnal cycle of convection over the northern South China Sea [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 86, 919–934.
- 包澄澜. 1981. 西南涡发展成南海台风的个例分析[J]. 气象学报, 39(1): 123-127.
- Bao C L. 1981. A case study of Southwest Vortex developing into Typhoon in the

611 South China Sea[J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 39(1): 123-127.

612 Burpee R W. 1972. The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere
613 of North Africa [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29: 77-90. doi: 10.1175/1520-
614 0469(1972)029<0077:TOASOE>2.0.CO;2

615 蔡景就, 伍志方, 陈晓庆, 等. 2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨成因分
616 析[J]. *暴雨灾害*, 38(6): 576-586. Cai Jingjiu, Wu Zhifang, Chen Xiaoqing, et al. 2019.
617 Analysis on the causes of persistent heavy rain in Guangdong on August 2018 [J].
618 *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 38(6): 576-586. doi:10.3969/j.issn.1004-
619 9045.2019.06.002

620 巢清尘, 丁一汇. 1999. 南海季风试验 [J]. *科学*, 51(2): 24-26. Chao Q C, Ding Y H.
621 1999. South China Sea Monsoon Experiment[J]. *Science* (in Chinese), 51(2): 24-26.

622 Chan J C L, Wang Y G, Xu X L. 2000. Dynamic and thermodynamic characteristics
623 associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon [J]. *J.*
624 *Meteor. Soc. Japan*, 78: 367-380.

625 Chang C P, Chen G T. 1995. Tropical circulations associated with southwest monsoon
626 onset and westerly surges over the South China Sea [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123: 3254-
627 3267.

628 Chen G T, Yu C C. 1988. Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over
629 northern Taiwan in the Mei-yu season [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116(4): 884-891.
630 doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0884:sollja>2.0.co;2

631 Chen G T J. 1992. Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-yu season [J]. *J.*
632 *Meteor. Soc. Japan*, 70(1): 497-516. doi: 10.2151/jmsj1965.70.1B_497

633 Chen L X, Yang S, Murakami T. 1996. The characteristics of large scale convective
634 system variation during onset and prevailing period of summer monsoon over the
635 South China Sea [C]. *The Atmospheric Circulation to Global Change*. Beijing: China
636 Meteorological Press, 314-328.

637 陈瑞闪, 邹燕, 宋松月. 1995. 东风波对台风疑难路径的影响[J]. *气象*, 21(8): 49-
638 52. Chen R S, Zou Y, Song S Y. 1995. The Influence of Easterly Wave on Typhoon
639 Knotty Track [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 21(8): 49-52.

640 陈尚锋, 温之平, 陈文. 2011. 南海地区大气 30~60 天低频振荡及其对南海夏季
641 风的可能影响 [J]. *大气科学*, 35(5): 982-992. Chen S F, Weng Z P, Chen W. 2011.
642 Tropical Low Frequency Oscillations with 30- 60 Day Period and Its Possible
643 Influence on the South China Sea Summer Monsoon [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in

Chinese), 35(5): 982-992.

陈世训, 柯史创. 1983. 季风区热带环流的振荡与季风辐合带[C]. 全国热带夏季风学术会议文集, 昆明: 云南人民出版社, 1-13. Chen Shixun, Ke Shichuang. 1983. Oscillation of tropical circulation over monsoon region and monsoon convergence zone [C], National Conference on tropical summer monsoon, Kunming: Yunnan People's publishing house.

Choudhury A D, Krishnan R. 2011. Dynamical response of the South Asian monsoon trough to latent heating from stratiform and convective precipitation[J]. J. Atmos. Sci., 68: 1347-1363. doi:10.1175/2011JAS3705.1

Ciesielski P E, Johnson R H. 2006. Contrasting characteristics of convection over the northern and southern South China Sea during SCSMEX [J]. Mon. Wea. Rev., 134, 1041-1062. doi:10.1175/MWR3113.1

Cifelli R, Rutledge S A. 1998. Vertical motion, diabatic heating and rainfall characteristics in north Australia convective systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124, 1133-1162. doi:10.1002/qj.49712454806

Cifelli R, Peterson W A, Carey L D, et al. 2002. Radar observations of the kinematic, microphysical, and precipitation characteristics of two MCSs in TRMM LBA [J]. J. Geophys. Res., 107, 8077. doi:10.1029/2000JD000264

崔志强, 蔡剑平, 沙文钰. 1992. 南海热带气旋的时空分布特征分析[J]. 气象, 18(6): 31-33. Cui Z Q, Cao J P, Sha W Y. 1992. Analysis of the spatial and time distribution characteristics of tropical cyclones in the South China Sea [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 18(6): 31-33.

Daggupaty S M, Sikka D R. 1977. On the vorticity budget and vertical velocity distribution associated with the life cycle of a monsoon depression[J]. J. Atmos. Sci., 34: 773-792. doi:10.1175/1520-0469(1977)034<0773:otvbav>2.0.co;2

Ding Y H, Liu Y J. 2001. Onset and the evolution of the Summer Monsoon over the South China Sea during SCSMEX Field Experiment in 1998 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79(1B): 255-276.

丁一汇, 李崇银, 柳艳菊, 等. 2002. 南海季风试验研究 [J]. 气候与环境研究, 7(2): 202-208. Ding Y H, Li C Y, Liu Y J, et al. 2002. Experimental study on South China Sea Monsoon[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7(2): 202-208. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.007

丁一汇, 李崇银, 何金海, 等. 2004. 南海季风试验与东亚夏季风 [J]. 气象学报,

677 62(5): 561-585. Ding Y H, Li C Y, He J H, et al. 2004. South China Sea Monsoon
678 Experiment and East Asian summer monsoon [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese),
679 62(5): 561-585. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.005

680 Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment
681 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21(3): 343-360. doi:10.1007/BF02915563

682 Ding Y, Chan J. C.-L.. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview [J]. *Meteor.*
683 *Atmos. Phys.*, 89(1-4): 117-142. doi:10.1007/s00703-005-0125-z

684 杜爽, 王东海, 李国平, 等. 2020. 基于双频星载降水雷达 GPM 数据的华南地区
685 降水垂直结构特征分析 [J]. *热带气象学报*, 36(1): 115-130. Du S, Wang D H, Li
686 G P, et al. 2020. Analysis of vertical structure characteristics of precipitation in South
687 China based on GPM data of dual frequency spaceborne precipitation radar[J]. *J.*
688 *Trop. Meteor.* (in Chinese), 36(1): 115-130. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2020.012

689 Du Y, Rotunno R. 2014. A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over
690 the Great Plains of the United States[J]. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3674-3683.
691 doi:10.1175/JAS-D-14-0060.1

692 Du Y, Chen G X. 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over
693 southern. China. Part I: Ensemble-based analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146(11):
694 3827-3844. doi:10.1175/MWR-D-18-0101.1

695 Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over
696 southern. China. Part II: Convection initiation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 147(2): 543-565.
697 doi: 10.1175/MWR-D-18-0102.1

698 Estoque M A. 1975. Structure of the mid-oceanic intertropical convergence zone[J]. *J.*
699 *Meteor. Soc. Japan*, 53(5): 304-316. doi:10.2151/jmsj1965.53.5_317

700 Frank W M. 1983. The structure and energetics of the east Atlantic intertropical
701 convergence zone[J]. *J. Atmos. Sci.*, 40, 1916-1929. doi: 10.1175/1520-
702 0469(1983)040<1916:tsaeot>2.0.co;2

703 Frederick H. Carr. 1977. Mid-tropospheric cyclones of the summer monsoon[J]. *Pure*
704 *and Applied Geophysics*, 1977, 115(5-6): 1383-1412. doi: 10.1007/BF00874415

705 Fu D H, Guo X L, Liu C H. 2011. Effects of cloud microphysics on monsoon convective
706 system and its formation environments over the South China Sea: A two-dimensional
707 cloud-resolving modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,
708 2011, 116(D7). doi:10.1175/1520-0493(2000)129<3941:SOHRSO>2.0.CO;2.

709 付丹红, 郭学良. 2016. 南海季风区冰相相变潜热对中尺度对流云和降水影响作

用的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 21(6): 687-699. Fu D H, Guo X L. 2016.

Numerical Studies of Influences of Ice-Phase Change Induced Diabatic Heating on

Mesoscale Convective Clouds and Precipitation over the South China Sea Monsoon

Region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese). 21(6): 687-699.

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15280

高辉. 2009. 南海夏季风爆发前后深对流传播的多向性 [J]. 大气科学, 33(1): 29-

37. Gao H. 2009. Multi-direction Propagation of the Tropical Convection during the

Onset Period of the South China Sea Summer Monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci.

(in Chinese), 33(1): 29-37.

高守亭, 孙淑清. 1984. 次天气尺度低空急流的形成 [J]. 大气科学, 8(2): 178-

188. Gao Shouting, Sun Shuqing. Formation of sub synoptic scale low level jet [J].

Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 1984, 8(2): 178-188. doi:10.3878/j.issn.1006-

9895.1984.02.08

郭姿佑, 伍志方, 蔡景就, 等. 2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨水汽输

送特征 [J]. 暴雨灾害, 38(6): 587-596. Guo Ziyu, Wu Zhifang, Cai Jingjiu, et al.

2019. Analysis of water vapor transport characteristics of a monsoon low-pressure

continuous heavy rain event at the end of August 2018 in Guangdong

area [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 38(6): 587-596.

doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.003

何金海, 丁一汇, 高辉, 等. 2001. 南海夏季风爆发建立日期的确定和季风指数

[M]. 北京: 气象出版社: 123pp. He J H, Ding Y H, Gao H, et al. Establishment date

of onset of South China Sea Summer Monsoon and monsoon index [M]. Beijing:

Meteorology Press: 123pp.

Ho C H, Park M S, Choi Y S, et al. 2008. Relationship between intraseasonal oscillation

and diurnal variation of summer rainfall over the South China Sea [J]. Geophys. Res.

Lett., 35(3): 247-255. doi:10.1029/2007GL031962

Houze, R. A. 2004. Mesoscale convective systems [J], Rev. Geophys., 42(4): 43pp.

doi:10.1029/2004RG000150

Huang F J, Chen W, Wang X, Huang R. The role of synoptic-scale waves in the onset

of the South China Sea summer monsoon [J]. Atmos. Sci. Lett., 2018, 19: e858.

doi:10.1002/asl.858

黄辉军, 袁金南, 李春晖, 毛伟康. 2012. 南海地区发展型和不发展型中层涡旋的

结构特征[J]. 热带气象学报, 2012, 28(6): 829-837. Huang H J, Yuan J N, Li C H, Mao W K. 2012. Comparison of the structural characteristics of developed versus undeveloped mid-level vortexes[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012 28(6): 829-837. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2012.06.005

Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (1): 55-69. doi:10.1007/BF03342050

Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. Adv. Atmos. Sci., 29(5): 910-942. doi:10.1007/s00376-012-2015-x.

黄小燕, 管兆勇, 何洁琳, 等. 2017. 南海 ITCZ 异常变化及其对非移入性南海热带气旋(TC)活动的可能影响 [J]. 大气科学, 41(1): 1-14. Huang X Y, Guan Z Y, He J L, et al. Variations of ITCZ in the South China Sea and Their Possible Influences on the South China Sea-Generated Tropical Cyclone (SCS-G TC) Activities [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 41(1): 1-14. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15182

黄忠, 林良勋. 2004. 快速西行进入南海台风的统计特征[J]. 气象, 30(9): 14-18. Huang Z, Lin L X. 2004. Statistical Characteristics of Tracking Westward Typhoons at High Speed into the South China Sea [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30(9):14-18. doi: 10.3969/j.issn.1000-0526.2004.09.003

江敦春. 1987. 季风低压角动量收支的研究[J]. 气象学报, 45(4): 416-425. Jiang Dunchun. 1987. Study on the angular momentum budget of monsoon low pressure[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 45(4): 416-425. doi:10.11676/qxxb1987.054

蒋迪, 黄菲, 郝光华, 等. 2012. 南海土台风生成及发展过程海气热通量交换特征 [J]. 热带气象学报, 28(6): 888-896. Jiang Di, Huang Fei, Hao Guanghua, et al. 2012. The characteristics of air-sea heat flux exchange during the generation and development of the local typhoon over the South China Sea [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 28(6): 888-896.

蒋建莹, 江吉喜, 布亚林, 等. 2007. 华南季风低压暴雨及其结构分析[J]. 气象学报, 65(4): 537-549. Jiang J Y, Jiang J X, Bu Y L, et al. 2007. Heavy rainfall associated with monsoon depression in South China: structure analysis[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65(4): 537-549. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2007.04.007

774 蒋全荣, 余志豪. 1984. 全国热带环流和系统学术会议论文集[C], 北京: 海洋出
 775 版社, 105-119. Jiang Quanrong, Yu Zhihao. 1984. Proceedings of the National
 776 symposium on tropical circulation and systems, ocean press, 105-119.

777 Johnson R H, Ciesielski P E. 2002. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset
 778 over the northern South China Sea [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80(4): 561-578.
 779 doi:10.2151/jmsj.80.561

780 Johnson R H, Aves S L, Ciesielski P E, et al. 2005. Organization of oceanic convection
 781 during the onset of the 1998 East Asian summer monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 133,
 782 131-148.

783 孔期, 赵思雄. 2005. 一次引发南亚大暴雨的季风低压结构、涡度与水汽收支分析
 784 [J]. 气候与环境研究, 10(3): 526-542. Kong Qi, Zhao Sixiong. 2005. Study of the
 785 structure, vortex budget and moisture supply of a monsoon depression producing
 786 heavy rainfall in South Asia[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),
 787 10(3): 526-542. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.03.022

788 Krishnamurti T N, Kanamitsu M, Godbole R, et al. 1975. Study of a monsoon
 789 depression (I), Synoptic structure[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 53: 227-240.
 790 doi:10.2151/jmsj1965.53.4_227

791 Krishnamurti T N, Kanamitsu M, Godbole R, et al. 1976. Study of a monsoon
 792 depression (I), Dynamical structure[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 54: 208-225.
 793 doi:10.2151/jmsj1965.54.4_208

794 Krishnamurti T N. 1979. Tropical Meteorology, Compendium of Meteorology [M].
 795 Vol.II, Part 4, WMO-NO. 364 (中译本, 气象出版社, 1983)

796 Krishnamurti T N, Chakraborty A, Mishra A K. 2010. Improving multimodel forecasts
 797 of the vertical distribution of heating using the TRMM profiles[J]. J. Climate,
 798 23: 1079-1094. doi:10.1175/2009JCLI2878.1

799 Lau K M, Coauthors. 2000. A report of the field operations and early results of the
 800 South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81,
 801 1261-1270.

802 Lau K M, Ding Y H, Wang J T. 2000. A Report of the Field Operations and Early Results
 803 of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) [J]. Bulletin of the
 804 American Meteorological Society, 81(6): 1261-1270.

805 Lee J-Y, Wang B, Wheeler M C, et al. 2013. Real-time multivariate indices for the
 806 boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region [J].

Climate Dyn., 40, 493–509. doi:10.1007/s00382-012-1544-4

李崇银. 1983. 环境流场对台风发生发展的影响[J]. 气象学报, 41(3): 275-283. Li C Y. 1983. The influence of Environmental flow Field on the occurrence and Development of Typhoon[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 41(3): 275-283.

李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1049-1058. Li C Y, Pan J. The Interannual Variation of the South China Sea Summer Monsoon Trough and Its Impact[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 2007, 31(6): 1049-1058.

李崇银, 张利平. 1999. 南海夏季风活动及其影响 [J]. 大气科学, 1999, 23(3): 257-266. Li C Y, Zhang L P. 1999. Summer wind activity in the South China Sea and its effects[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 1999, 23(3): 257-266.

Li H, Wan Q, Peng D, et al. 2020. Multiscale analysis of a record-breaking heavy rainfall event in Guangdong, China [J]. Atmos. Res. 232, 1–13. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104703

Li X, Guo X, Fu D. 2013a. TRMM-retrieved cloud structure and evolution of MCSs over the northern South China Sea and impacts of CAPE and vertical wind shear [J]. Adv. Atmos. Sci. 30, 77–88. doi:10.1007/s00376-012-2055-2

Li J, Yang C, Li F, et al. 2013b. A comparison of summer precipitation. structures over the South China Sea and the East China Sea based on tropical rainfall measurement mission[J]. Acta Oceanologica Sinica, 32(11): 41-49. doi:10.1007/s13131-013-0376-3

李宪之. 1956. 台风生成的综合学说[J]. 气象学报, 27(2): 86-100. Li X Z. 1956. A comprehensive theology of typhoon generation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 27(2): 86-100.

梁必骐, 彭本贤, 仲荣根, 等. 1976. 热带天气会议论文集(1974) [C], 北京: 科学出版社, 85-91. Liang Biqi, Peng Benxian, Zhong Ronggen, et al. 1976. Proceedings of the tropical weather Conference(1974) [C]. Beijing: Science Press, 85-91.

许宁, 何华庆, 谭志保, 等. 1976. 南海及其附近地区中层气旋的分析研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 15(3): 106-122. Xu Ning, He Huaqing, Tan Zhibao, et al. 1976. Analysis and study of mid-level cyclones in and around the South China Sea[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 15(3): 106-122.

梁必骐, 杨运强, 等. 1984. 全国热带环流和系统学术会议论文集[C], 海洋出版

社, 165-167. Liang B Q, Yang Y Q, et al. 1984. National Collection of Tropical
Cycling and Systems Academic Conference Papers [C]. Beijing: China Ocean Press.

梁必骐. 南海热带环流系统的若干研究 [J]. 气象, 1985, 11(6): 2-6. Liang B Q.
Some studies on the tropical circulation system in the South China Sea.
Meteorological Monthly (in Chinese), 1985, 11(6): 2-6.

梁必骐, 邹美恩, 李勇等. 1985. 南海季风低压的活动和结构特征[J]. 热带海洋,
4(4): 60-67. Liang Biqi, Zou Meien, Li Yong et al. 1985. Activity and structure of
monsoon low over the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 4(4):
60-67. doi:CNKI:SUN:RDHY.0.1985-04-007

梁必骐, 刘四臣. 1988. 南海季风低压的结构演变和涡度收支[J]. 海洋学报, 10(5):
626-634. Liang Biqi, Liu Sichen. 1988. Structure evolution and vorticity budget of
the South China Sea Monsoon Depression[J]. Acta Oceanologica Sinica, 10(5): 626-
634. doi:CNKI:SUN:SEAC.0.1988-05-013

梁必骐, 刘四臣. 1989. 加热效应对南海季风低压垂直环流的贡献[J]. 气象学报,
47(3): 364-370. Liang Biqi, Liu Sichen. 1989. The contribution of heating effect to
the South China Sea monsoon low vertical circulation[J]. Acta Meteor. Sinica (in
Chinese), 47(3): 364-370. doi:10.11676/qxxb1989.049

梁必骐. 南海热带大气环流系统 [M]. 北京:气象出版社, 1991: 1-244. Liang B Q.
Tropical atmospheric circulation system in the South China Sea [M]. Beijing:
Meteorology Press (in Chinese), 1991: 1-244.

梁必骐, 雷从华, 欧阳红. 1993. 南海季风低压的活动及其降水分析[J]. 中山大学
学报论丛, 13(1): 17-23. Liang Biqi, Lei Conghua, Ou Yanghong. 1993. The activity
of monsoon low over the South China Sea and its precipitation analysis[J]. Sun Yat-
sen University Forum, 13(1): 17-23.

梁建茵, 吴尚森. 2000. 1998 年南海西南季风活动的初步分析[J]. 热带气象学报,
16(1): 28-37. Liang J Y, Wu S S. 2000. The preliminary analyses on the activities of
South China sea summer monsoon in 1998 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 16(1):
28-37. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2000.01.004

廖菲, 李文婷, 张子然, 等. 2019. 1949-2017 年南海海域热带气旋强度和路径快速
变化统计特征[J]. 海洋学报(中文版), 41(9): 126-135. Liao F, Li W T, Zhang Z R,
et al. 2019. Analysis of rapid changes of tropical cyclones over the South China Sea
for 1949-2017[J]. Marine Forecasts (in Chinese), 41(9): 126-135. doi:

10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.012

Lin S C, Kueh M T. 2003. A modeling diagnosis of the development of mesoscale convective system over South China Sea during the summer monsoon onset in 1998 [J]. 14: 369-399. doi:10.1175/15200493(2003)131<3069:TICPIN>2.0.CO;2

刘伯汉. 1991. 夏季南海区域赤道西风与热带扰动的相互作用[J]. 热带气象, 7(1): 48-54. Liu B H. 1991, The Interaction Between Equatorial West Wind and Tropical Disturbance in the South China Sea Region in Summer. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 7(1): 48-54. stems Academic Conference Papers [C]. Beijing: China Ocean Press.

刘四臣, 梁必骐. 1988. 南海季风低压发生发展机制的探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 80(4): 77-88. Liu Sichen, Liang Biqu. 1988. Discussion on the mechanism of the occurrence and development of the South China Sea Monsoon Depression[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 80(4): 77-88.

刘四臣, 梁必骐. 1993. 南海季风低压的扰动动能收支[J]. 热带海洋, 12(1): 1-8. Liu Sichen, Liang Biqu. 1993. Disturbance kinetic energy budget of monsoon low over the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 12(1): 1-8. doi:CNKI:SUN:RDHY.0.1993-01-000

柳龙生, 吕心艳, 高拴柱. 2019. 2018 年西北太平洋和南海台风活动概述 [J]. 海洋气象学报, 39(2): 1-12. Liu L S, Lv X Y, Gao S Z. 2019. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea [J]. Journal of Marine Meteorology. (in Chinese), 39(2): 1-12. doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.001

柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件分析[J]. 气象学报, 63(4): 431-442. Liu Yanju, Ding Yihui, ZHAO Nan. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998: I analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(4): 431-442. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.04.005

柳艳菊, 丁一汇. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: II 中尺度对流系统对大尺度场的作用[J]. 气象学报, 63(4): 443-454. Liu Yanju, Ding Yihui. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the south china sea in 1998: II effect of the meso-scale convective systems

903 on large-scale fields [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63(4): 443-454.
 904 doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.04.006
 905 Luo H B, Yanai M. 1983. The Large-Scale Circulation and Heat Sources over the
 906 Tibetan Plateau and Surrounding Areas during the Early Summer of 1979. Part I:
 907 Precipitation and Kinematic Analyses [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111(5): 922-944. doi:
 908 10.1175/1520-0493(1983)1112.0.CO;2
 909 Luo H B, Yanai M. 1984. The large-scale circulation and heat The Large-Scale
 910 Circulation and Heat Sources over the Tibetan Plateau and Surrounding Areas during
 911 the Early Summer of 1979. Part II: Heat and Moisture Budgets[J]. *Mon. Wea. Rev.*,
 912 112(5): 966-989. doi: 10.1175/1520-0493(1983)1112.0.CO;2
 913 吕克利. 1985. 切变东风基流和非绝热加热对热带扰动的作用[J]. *热带气象*, 1(1):
 914 35-43. Lv K L. 1985. The Effect of Shed East Wind substation and Non-insothermal
 915 Heating on Tropical Disturbances[J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 1(1): 35-43.
 916 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分
 917 析 [J]. *大气科学*, 28(3): 330-341. Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al.
 918 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale
 919 convective systems in South China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 28(3):
 920 330-341. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.02
 921 蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰, 等. 2007. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和
 922 发展过程[J]. *热带气象学报*, 23(6): 521-529. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Dai
 923 Guangfeng, et al. 2007. The formation and development of a heavy rainfall
 924 mesoscale convective system along southern China coastal area[J]. *J. Trop. Meteor.*
 925 (in Chinese), 23(6): 521-529. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.06.001
 926 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南, 等. 2014. 华南沿海 2011 年 7 月 15-18 日持续暴雨过程
 927 中的季风槽与中尺度对流系统相互作用[J]. *气象学报*, 72(3): 508-525. Meng W
 928 G, Zhang Y X, Yuan J N, et al. 2014. The interaction between the monsoon trough
 929 and the mesoscale convective system during the continuous rainstorm along the coast
 930 of South China from 15 to 18 July 2011[J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 72(3):
 931 508-525. doi: 10.11676/qxxb2014.034
 932 蒙伟光, 张艳霞, 吴亚丽, 等. 2019. 季风槽环境中暴雨中尺度对流系统的分析与
 933 数值预报试验[J]. *气象学报*, 77(6): 980-998. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Wu
 934 Yali, et al. 2019. Analysis and numerical prediction experiment of rainstorm-

935 producing MCSs in a monsoon trough environment[J]. *Acta Meteor. Sinica* (in
936 Chinese), 77(6): 980-998. doi:10.11676/qxxb2019.069

937 Mohr K I, Zipser E J. 1996. Mesoscale convective systems defined by their 85-GHz ice
938 scattering signature: Size and intensity comparison over tropical oceans and
939 continents[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2417–2437. doi: 10.1175/1520-
940 0493(1996)1242.0.CO;2

941 Murakami T, Chen L X, Xie A. 1986. Relationship among seasonal cycles, low-
942 frequency oscillations, and transient disturbances as revealed from outgoing
943 longwave radiation data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (8): 1456-1465. doi:10.1175/1520-
944 0493(1986)114<1456:rasclf>2.0.co;2

945 Nitta T M. 1981. Observational study of a monsoon depression developed over the Bay
946 of Bengal during summer MONEX [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 59: 672-682.
947 doi:10.2151/jmsj1965.59.5_672

948 Paptagas. F J, Estoque M A. 1985. Characteristics of the ITCZ over the Eastern Pacific,
949 5–8 June 1979[J]. *Mon., Wea. Rev.*, 113(1): 99-105. doi: 10.1175/1520-
950 0493(1985)113<0099:COTIOT>2.0.CO;2

951 Park M, Choi Y S, Ho C H, et al. 2007. Regional cloud characteristics over the tropical
952 northwestern Pacific as revealed by Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)
953 precipitation radar and TRMM Microwave Imager[J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D05209.
954 doi:10.1029/2006JD007437

955 Petersen W A, Rutledge S A. 2001. Regional variability in tropical convection:
956 Observation from TRMM [J]. *J. Climate*, 14, 3566–3586. doi:10.1175/1520-
957 0442(2001)0142.0.CO;2

958 Petersen W A, Nesbitt S W, Blakeslee R J, et al. 2002. TRMM observations of
959 intraseasonal variability in convective regimes over the Amazon [J]. *J. Climate*, 15,
960 1278–1294. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1278:TOOIVI>2.0.CO;2

961 钱维宏, 朱亚芬. 2001. 亚洲夏季风爆发的深对流特征 [J]. *气象学报*, 59(5): 165-
962 174. Qian W H, Zhu Y F. 2001. Study on the deep convective characteristics of Asian
963 summer monsoon onset [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 59(5): 165-174.
964 doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.05.008

965 Qiu C, Mao H, Liu H, et al. 2019. Deformation of a warm eddy in the northern South
966 China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 124(8): 5551–5564.
967 doi:10.1029/2019JC015288

968 Riehl,H, 程纯枢. 1958. 热带气象学(中译本)[M]. 北京: 科学出版社. Riehl,H,
969 Cheng C S. 1958. Tropical Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

970 Robert A. Houze Jr. 2018. 100 Years of Research on Mesoscale Convective System[J].
971 Meteorological Monographs. 59: 17.1-17.54. doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHIS-
972 D-18-0001.1

973 Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation
974 processes in continental and maritime convective clouds[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc.,
975 79, 2457–2476. doi: 10.1175/1520-0450(2003)0422.0.CO;2

976 容广坝, 谭锐志. 1991. 风低压发展的数值试验[J]. 大气科学, 1991, 15(4): 79-86.
977 Rong G X, Tan R Z. Numerical test of low pressure development of the South China
978 Sea monsoon in early summer[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 1991, 15(4):
979 79-86.

980 Sanders F. 1982. 热带气象译文集[C]. 中山大学学报(自然科学), 译丛(1): 108-111.
981 Sanders F. 1982. Translation of Tropical Meteorology[C]. Acta Scientiarum
982 Naturalium Universitatis Sunyatseni, Translation(1):108-111.

983 Sawyer J S. 1947. The structure of the intertropical front over N.W. India during the
984 S.W. Monsoon[J]. Quart. J. Roy. Met. Soc., 73, 317-318. doi:
985 10.1002/qj.49707331709

986 Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and Environmental Properties of
987 Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems [J]. Mon. Wea. Rev, 133(4):
988 961-976.

989 Shapiro L J. 1977. Tropical storm formation from easterly waves: A criterion for
990 development [J]. J. Atmos. Sci., 1977, 34: 1007-1021. doi: 10.1175/1520-
991 0469(1977)034<1007:TSFFEW>2.0.CO;2

992 沈如金, 杨义碧, 罗绍华, 等. 1978. 西太平洋及南海地区一次热带辐合带环流和
993 结构的初步分析[J]. 大气科学, 1978, 2(1): 38-47. Shen R J, Yang Y B, Luo S H, et
994 al. 1978. A preliminary analysis of the currents and structures of a tropical
995 convergence zone in the western Pacific and South China Sea regions[J], 1978, 2(1):
996 38-47.

997 史学丽, 丁一汇. 2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的
998 研究[J]. 气象学报, 2000, 58(6): 666-678. Shi X L, Ding Y H. 2000. A study on
999 extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in
1000 1994[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 2000, 58(6): 666-678.

- 1001 Shu Y, Pan Y, Wang J. 2013. Diurnal variation of MCSs over Asia and the western
1002 Pacific Region[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 27(3), 435-445. doi: 10.1007/s13351-
1003 013-0305-6
- 1004 Shukla J. 1978. CISK-Barotropic-Baroclinic instability and the growth of monsoon
1005 depressions[J]. *J. Atmos. Sci.*, 35(3): 495-508. doi: 10.1175/1520-
1006 0469(1978)035<0495:CBBIAT>2.0.CO;2
- 1007 So C H, Chan J C L. 1997. An observational study on the onset of the summer monsoon
1008 over South China around Hong Kong [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 75 (1): 43-57.
- 1009 Stolz D C, Rutledge S A, Pierce J R, 2015. Simultaneous influences of thermodynamics
1010 and aerosols on deep convection and lightning in the tropics[J]. *J. Geophys. Res.*
1011 *Atmos.*, 120, 6207–6231. doi: 10.1002/2014JD023033
- 1012 Sun ., Fang Y, Liu B. et al. 2016. Coupling between SST and wind speed over mesoscale
1013 eddies in the South China Sea [J]. *Ocean Dynamics*, 66(11): 1467–1474.
1014 doi:10.1007/s10236-016-0993-4
- 1015 Takayabu Y N, Yokomori J, Yoneyama K. 2006. A diagnostic study on interactions
1016 between atmospheric thermodynamic structure and cumulus convection over the
1017 tropical western Pacific Ocean and over the Indochina Peninsula[J]. *J. Meteor. Soc.*
1018 *Japan*, 84A, 151–169. doi:10.2151/jmsj.84A.151
- 1019 Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer
1020 monsoon in China [M]. Oxford University Press, 60-92.
- 1021 Tao S Y, Chen L X. 1988. A review of recent research on the East Asian monsoon in
1022 China [M]. *Monsoon Meteorology*. London: Oxford University Press, 60-92.
- 1023 Tao W K, Halverson J, LeMone M, et al. 2003. The research of Dr. Joanne Simpson:
1024 fifty years investigating hurricanes, tropical clouds, and cloud systems.
1025 *Meteorological Monographs*, 51: 1-16. doi: 10.1007/978-1-878220-63-9_1
- 1026 Tollerud E I, Esbensen S K. 1985. A composite life-cycle of nonsquall mesoscale
1027 convective systems over the tropical ocean. Part 1: Kinematic fields [J]. *Atmos. Sci.*,
1028 42(8): 823-837. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0823:aclcon>2.0.co;2
- 1029 Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet
1030 Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms[J]. *Mon.*
1031 *Wea. Rev.*, 107(6): 368–378. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107.0.CO;2
- 1032 Uccellini L W. 1980. On the Role of Upper Tropospheric Jet Streaks and Leaside
1033 Cyclogenesis in the Development of Low-Level Jets in the Great Plains[J]. *Mon.*

1034 Wea. Rev.,108(10): 1689–1696. doi: 10.1175/1520-0493(1980)1082.0.CO;2

1035 Ueda H, Yasunari T. 1998. Role of warming over the Tibetan Plateau in early onset of

1036 the summer monsoon over the Bay of Bengal and the South China Sea [J]. J. Meteor.

1037 Soc. Japan, 76 (1): 1-12.

1038 Wang J J. 2004. Evolution and structure of the mesoscale convection and its

1039 environment: A case study during the early onset of Southeast Asian summer

1040 monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 132, 1104–1120. doi:10.1175/1520-

1041 0493(2004)1322.0.CO;2

1042 Wang J J, Carey L D. 2005. The development and structure of an oceanic squall-line

1043 system during the South China Sea Monsoon Experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 133,

1044 1544–1561. doi:10.1175/MWR2933.1

1045 王立琨, 郑永光, 陶祖钰, 等. 2001. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初

1046 步分析[J]. 气象学报, 59(1): 115-119. Wang Likun, Zheng Yongguang, Tao Zuyu,

1047 et al. 2001. Preliminary analysis of environment and cloud clusters during Huanan

1048 rainstorm experiment [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 59(1): 115-119.

1049 doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.01.013

1050 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

1051 可能联系 [J]. 气象学报, 59(1): 31-40. Wang S Y, Qian Y P. 2001. Basic

1052 characteristic of surface heat field in 1998 and the possible connections with the scs

1053 summer monsoon onset [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 59(1): 31-40.

1054 doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.01.004.

1055 韦有暹, 王荫桐, 郭秀英, 屈翠虹, 韩光华. 1965. 南海台风发生发展问题的初步探索

1056 [J]. 气象学报, 37(2): 148-154. Wei Y Q, Wang Y T, Guo X Y, Qu C H, Han G H.

1057 1965, A preliminary exploration of the development of typhoons in the South China

1058 Sea[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 37(2): 148-154.

1059 韦有暹, 朱庆圻. 1985. 平洋台风复杂路径的气候分析[J]. 大气科学, 1985, 9(4):

1060 358-365. Wei Y X, Zhu Q Q. Climate analysis of the complex path of typhoons in

1061 the South China Sea and the Northwest Pacific[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in

1062 Chinese), 1985, 9(4): 358-365.

1063 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

1064 对流活动对南海夏季风爆发的影响 [J]. 大气科学, 30(5): 952-964. Weng Z P,

1065 Huang R H, He H Y, et al. 2006. The Influences of Anomalous Atmospheric

1066 Circulation over Mid-High Latitudes and the Activities of 30-60 d Low Frequency
 1067 Convection over Low Latitudes on the Onset of the South China Sea Summer
 1068 Monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30(5): 952-964.

1069 温之平, 吴乃庚, 陈桂兴. 2016. 南海夏季风爆发早晚的经向环流异常的机理研
 1070 究[J]. 大气科学, 40(1): 63-77. Wen Z P, Wu N G, Chen G X. 2016. Mechanisms for
 1071 the Anomaly of Local Meridional Circulation during Early and Delayed Onsets of
 1072 the South China Sea Summer Monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese),
 1073 40(1): 63-77. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15204

1074 Williams E R, Rutledge S A, Geotis S G, et al. 1992. A radar and electrical study of
 1075 tropical “hot towers.” [J]. J. Atmos. Sci., 49, 1386–1395. doi:10.1175/1520-
 1076 0469(1992)049<1386:araeso>2.0.co;2

1077 Williams E R, Coauthors. 2002. Contrasting convective regimes over the Amazon:
 1078 Implications for cloud electrification [J]. J. Geophys. Res., 107, 8082.
 1079 doi:10.1029/2001JD000380

1080 Williams E R, Stanfill S. 2002. The physical origin of the land–ocean contrast in
 1081 lightning activity[J]. C. R. Phys., 3, 1277–1292. doi:10.1016/j.crhy.2003.12.003

1082 吴池胜, 王安宇, 冯瑞权, 等. 2001. 1994 年南海夏季风爆发的数值模拟和分析研
 1083 究 [J]. 大气科学, 25(4): 455-464. Wu C S, Wang A Y, Feng R Q, et al. 2001. A
 1084 Numerical Study of the Onset of the South China Sea Summer Monsoon of 1994 [J].
 1085 Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25(4): 455-464.

1086 吴迪生, 邓文珍, 张俊峰, 何一金, 白毅平, 宋萍萍, 詹进源, 林晓能, 陈惠君,
 1087 郭卫平, 王祖渊, 曹勇生, 蔡扬, 唐元春. 南海台风状况下海气界面热量交换
 1088 研究[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 329-341. Wu D S, Deng W Z, Zhang J F, He Y J,
 1089 Bai Y P, Song P P, Zhan J Y, Lin X N, Chen H J, Guo W P, Wang Z Y, Cao Y S, Cai
 1090 Y, Tang Y C. A Research on Air-Sea Interface Heat Exchange under the Typhoon
 1091 over the South China Sea[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 2001, 25(3): 329-
 1092 341.

1093 Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset
 1094 over South Asia and the South China Sea [J]. Mon. Wea. Rev., 126 (4): 913–927.

1095 吴阳, 周毅. 2005. 影响我国的东风波特征分析[J]. 海洋通报, 24(3): 88-91. Wu
 1096 Yang, Zhou Yi. 2005. Characteristic analysis of easterly waves affecting China.
 1097 Marine Sci. Bul. (in Chinese), 24(3): 88-91. doi:10.3969/j.issn.1001-

1098 6392.2005.03.015

1099 谢安, 毛江玉, 叶谦. 1999. 海温纬向梯度与南海夏季风爆发[M]//丁一汇, 李崇银.

1100 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用 [M]. 北京: 气象出版社, 48-51.

1101 Xie A, Mao J Y, Ye Q. 1999. Zonal gradient of SST and onset of South China Sea

1102 Monsoon [M]//Ding Y H, Li C Y. Onset and evolution of South China Sea Monsoon

1103 and its interaction with ocean [M]. Beijing: Meteorology Press, 48-51.

1104 谢旭丹, 王静, 储小青, 等. 2018. 南海中尺度涡温盐异常三维结构[J]. 海洋学报

1105 (中文版), 40(4): 1-14. Xie Xudan, Wang Jing, Chu Xiaoqing, et al. 2018. Three-

1106 dimensional thermohaline anomaly structures of mesoscale eddies in the South China

1107 Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 40(4): 1-14. doi:10.3969/j.issn.0253-

1108 4193.2018.04.001

1109 徐梦婷, 葛旭阳, 周顺武, 王传辉. 2016. 锋面涡旋诱发南海热带气旋

1110 Noguri(2002)的数值试验[J]. 热带气象学报, 32(3): 407-415. Xu M T, Ge X Y,

1111 Zhou S W, Wang C H. 2016. Numerical study on tropical cyclone Noguri (2002)

1112 formation in the South China Sea associated with a frontal vortex[J]. J. Trop. Meteor.

1113 (in Chinese), 32(3): 407-415. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2016.03.012

1114 Xu W, Zipser E J. 2012. Properties of deep convection in tropical continental, monsoon,

1115 and oceanic rainfall regimes [J]. Geophys. Res. Lett., 39, L07802.

1116 doi:10.1029/2012GL051242

1117 Xu W, Rutledge S A. 2018. Convective Variability Associated with the Boreal Summer

1118 Intraseasonal Oscillation in the South China Sea Region [J]. J. Climate, 31(18), 7363-

1119 7383. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0091.1

1120 徐燚, 闫敬华, 王谦谦. 2007. 南海台风“尤特”螺旋结构的综合分析[J]. 热带气象

1121 学报, 23 (4): 365-375. Xu Y, Yan J H, Wang Q Q. 2007. A comprehensive analysis

1122 of the spiral structure features of typhoon Utor(2001) [J]. J. Trop. Meteor. (in

1123 Chinese), 23 (4): 365-375. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2007.04.007

1124 闫俊岳, 刘久萌, 蒋国荣, 等. 2007. 南海海-气通量交换研究进展[J]. 地球科学进

1125 展, 2007, 22(7): 685-697. Yan J Y, Liu J M, Jiang G R, et al. 2007. Advances in the

1126 Study of Air-Sea Flux Exchange over the South China Sea[J]. Advances in Earth

1127 Science (in Chinese), 2007, 22(7) : 685-697. doi: 10.3321/j.issn:1001-

1128 8166.2007.07.004

1129 Yanai M, Tomita T. 1998. Seasonal and Interannual Variability of Atmospheric Heat.

1130 Sources and Moisture Sinks as Determined from NCEP–NCAR Reanalysis[J]. J.
 1131 Climate, 11(3): 463-482. doi: 10.1175/1520-0442(1998)0112.0.CO;2
 1132 Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007. Diagnostic analyses of the ageostrophic vector in
 1133 the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow. Journal of
 1134 Geophysical Research: Atmospheres, 112(D9). doi: 10.1029/2006JD008142
 1135 杨松, 梁必骐. 1988. 初夏南海台风的结构分析[J]. 热带气象, 1988, 4(1): 61-66.
 1136 Yang S, Liang B Q. 1988. Structural Analysis of Typhoon in the South China Sea in
 1137 early Summer[J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 1988, 4(1): 61-66.
 1138 Yuan T, Qie X. 2008. Study on lightning activity and precipitation characteristics before
 1139 and after the onset of the South China Sea summer monsoon [J]. Geophys. Res. Lett.,
 1140 113, D14101. doi:10.1029/2007JD009382
 1141 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
 1142 响[J]. 大气科学, 33 (2): 325-336. Yuan Y, Li C Y. 2009. Possible Impacts of the
 1143 Tropical Indian Ocean SST Anomaly Modes on the South China Sea Summer
 1144 Monsoon Onset [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(2): 325-336.
 1145 曾智琳, 湛芸, 王东海. 2020. 2018 年 8 月华南超历史极值降水事件的观测分析
 1146 与机理研究[J]. 大气科学, 44(4): 695–715. Zeng Zhilin, Chen Yun, Wang Donghai.
 1147 2020. Observation and Mechanism Analysis for a Record-Breaking Heavy Rainfall
 1148 Event over Southern China in August 2018[J]. Chinese J. Atmos. Sciences (in
 1149 Chinese), 44(4): 695–715. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18265.
 1150 张立凤, 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,
 1151 66(5):747-755. Zhang L F, Zhang Y C, Zhang M. 2008. A study on the dynamic
 1152 process of the onset of South China Sea summer monsoon[J]. Acta Meteor. Sinica
 1153 (in Chinese), 66(5):747-755. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.008
 1154 赵亚民. 1959. 南海台风的一些基本特点[J]. 天气月刊, 1959(8). Zhao Y M. 1959.
 1155 Some basic features of typhoons in the South China Sea[J], Weather Monthly,
 1156 1959(8).
 1157 朱抱真, 等. 1966. 东南亚和南亚的大气环流和天气[M]. 北京: 科学出版社, 155-
 1158 157. Zhu B Z, et al. 1966. Atmospheric Currents and Weather in South-East and
 1159 South Asia[M]. Beijing: Science Press., 155-157.
 1160 邹美恩, 梁必骐. 1982a. 南海地区中层气旋的合成结构, 全国热带夏季风学术会
 1161 议论文集 [C]. 云南: 云南人民出版社. Zou M E , Liang B Q. 1982. Synthesis

1162 structure of mid-level cyclones in the South China Sea region, collection of papers
 1163 from the National Tropical Summer Wind Academic Conference [C]. Yunnan:
 1164 Yunnan People's Publishing House.
 1165 邹美恩, 梁必骐. 1982b. 影响华南西部的中层气旋 [J]. 气象学报, 51(2): 253-256.
 1166 Zou M E, Liang B Q. 1982. A mid-level cyclone affecting western South China
 1167 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 51(2): 253-256.
 1168 邹美恩, 梁必骐. 1984. 南海季风低压和南海台风的对比分析[J]. 中山大学学报
 1169 (自然科学版), 76(2): 91-99. Zou Meien, Liang Biqu. 1984. Comparative analysis
 1170 of South China Sea monsoon depression and South China Sea typhoon[J]. Acta
 1171 Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 76(2): 91-99.
 1172 doi:CNKI:SUN:ZSDZ.0.1984-02-013
 1173 Zu Y C, Sun S W, Zhao W, et al. 2019. Seasonal characteristics and formation
 1174 mechanism of the thermohaline structure of mesoscale eddy in the South China
 1175 Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 38(4): 29–38. doi:CNKI:SUN:SEAE.0.2019-
 1176 04-004
 1177