

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 Xiaoyan, Guan Zhaoyong, He Jielin, et al. 2017. 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 1-14, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15182.

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

黄小燕^{1,2,3} 管兆勇¹ 何洁琳⁴ 何立³

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 广西壮族自治区气象减灾研究所, 南宁 530022

4 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022

摘 要 利用美国 NOAA 提供的向外长波辐射 (OLR) 资料、NCEP/NCAR 再分析资料以及上海台风所提供的热带气旋 (TC) 资料等, 通过定义一个描写南海范围内 (5°N~20°N, 105°E~120°E) 的热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ) 强度指数, 研究了南海 ITCZ 年际和年代际异常变化特征及其对非移入性南海 TC [South China Sea-generated tropical cyclone (SCS-G TC)] 活动的可能影响, 并从异常强、弱南海 ITCZ 年份的大气环流背景和 sea surface temperature 等变化特征来尝试揭示南海 TC 的活动规律。结果表明: 在年际和年代际时间尺度上, 南海 ITCZ 强度指数与南海 TC 的生成频数存在显著的负相关关系, 长期趋势变化间的关系存在不同。南海 ITCZ 的强、弱显著地影响到南海 TC 的生成频数。强南海 ITCZ 年, 南海 TC 频数偏多; 弱南海 ITCZ 年, 南海 ITCZ 频数偏少。强、弱南海 ITCZ 年对于南海 TC 的生成源地、TC 的维持时间以及路径和强度的影响不显著。进一步分析表明, 动力和环境条件方面, 强、弱南海 ITCZ 年可能差异较大。异常偏强年, 对流层低层出现气旋性环流, 上层出现反气旋性环流; 季风槽在南海区域偏强、位置偏南。与 OLR 表示的深对流区相配合, 存在暖的海表温度和低层强烈的正涡度和强辐合, 在高层存在相应的气流辐散, 形成了极有利于南海 TC 发生发展的条件。弱南海 ITCZ 年则相反。另外, ITCZ 强年, 太平洋异常 SST (Sea Surface Temperature) 出现为 La Niña 特征, 南海 ITCZ 区对流活跃, 强度偏强。反之, ITCZ 弱年则表现为 El Niño 特征, 南海 ITCZ 关键区的对流强度偏弱。这些结果可为深刻认识南海 TC 的生成规律以及对南海 TC 的预报提供线索。

关键词 热带辐合带 热带气旋 年际变化 南海

文章编号 1006-9895(2017)01-0001-14

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15182

Variations of ITCZ in the South China Sea and Their Possible Influences on the South China Sea-Generated Tropical Cyclone (SCS-G TC) Activities

HUANG Xiaoyan^{1,2,3}, GUAN Zhaoyong¹, HE Jielin⁴, and HE Li³

收稿日期 2015-04-14; 网络预出版日期 2016-04-19

作者简介 黄小燕, 女, 1978 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事台风气候学和季风动力学研究。E-mail: gx_huangxy@163.com

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41465003、41575051, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406024, 灾害天气国家重点实验室课题 2015LASW-A03, 2014 气象关键技术集成与应用项目 CMAGJ2014M41

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41465003 and 41575051), Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201406024), Subject of State Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2015LASW-A03), Meteorological Key Technology Integration and Application Projects (Grant CMAGJ2014M41)

1 Key Laboratory of Ministry of Education for Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

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

3 Guangxi Research Institute of Meteorological Disasters Mitigation, Nanning 530022

4 Guangxi Climate Center, Nanning 530022

Abstract Using the Outgoing Long-wave Radiation (OLR) from NOAA, the NCEP/NCAR reanalysis data and the tropical cyclone (TC) best track dataset over the western North Pacific (WNP) provided by Shanghai Institute of Typhoon Of CMA, an intensity index of Intertropical Convergence Zone (ITCZ) over the region of (5°N–20°N, 105°E–120°E) in the South China Sea (SCS) was defined. Impacts of ITCZ variations on the South China Sea-generated tropical cyclone (SCS-G TC) have been studied in the present paper. Results show that there is a significant negative correlation between the intensity index of the ITCZ and the occurrence frequency of SCS-G TC on the interannual and interdecadal time scale. However, long-term trends are different between the two time scales. These results indicate that the intensity of the ITCZ may strongly affect the occurrence of SCS-G TC. However, the ITCZ intensity does not significantly affect the location of the TC genesis, life time, moving path and intensity of SCS-G TC. Furthermore, large differences in the dynamic and environmental conditions were found between the strong and weak ITCZ years. The anomalous conditions in the strong ITCZ years are conducive to the development of SCS-G TC; the cyclonic circulation in the lower troposphere cooperates with the anticyclonic circulation in the upper troposphere as usual, and the location of the monsoon trough is located more southern in the SCS. These match with the deep convection zone as shown by OLR. The warmer SST (Sea Surface Temperature) and stronger positive vorticity along with stronger convergence in the lower troposphere and stronger divergence in the upper troposphere all facilitate stronger vertical movement. In weak ITCZ years, the situations are opposite. Moreover, the SSTA in strong ITCZ years is usually characterized by a La Niña pattern with more vigorous SCS convection. On the contrary, if the El Niño events occur, the ITCZ in SCS will become weaker. All these results are important for us to better understand the formation mechanism for the SCS-G TC and are beneficial for predicting the occurrence of the locally generated TC in SCS.

Keywords Intertropical Convergence Zone, Tropical cyclone, Interannual variation, South China Sea

1 引言

热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ) 是南北两副热带高压带之间气压最低、气流汇合的带区, 其亦可被定义为热带对流带、气压槽和低层风场辐合带 (Sadler, 1975; Gadgil and Guruprasad, 1990; Waliser and Gautier, 1993) 等等。ITCZ 可分为两种类型: 一类是信风槽, 东北信风和东南信风之间的信风辐合带, 其主要表现为一条辐合渐近线, 其中的扰动通常不够活跃; 另一类是季风槽, 它是由西南季风与偏东信风形成的, 槽中风速小, 扰动较为活跃。

ITCZ 的位置随季节变化而南北移动, 且具有强的经向风切变并伴随强的对流。ITCZ 通过经向风的辐合为热带气旋 (TC) 的生成提供大气低层的动力条件, 且释放大量潜热, 促进了热带气旋的发展。TC 活动通常与 ITCZ 的变化联系在一起 (孙淑清等, 2007)。Gray (1968) 及陈联寿和丁一汇 (1979) 指出, 西北太平洋 TC 约 80% 在 ITCZ 中生成。

ITCZ 与各种大气环流系统乃至与 SST (Sea Surface Temperature) 相互作用能导致西太平洋 TC

活动异常 (谢安和叶谦, 1994; 仇永炎等, 1999; 何丽萍等, 2006)。ITCZ 的强弱和位置存在明显的年际变化。由于这种变化与西太平洋副热带高压的强弱和进退、南海和孟加拉湾的天气系统、中高纬度的天气系统活动异常等均有直接或间接的关系, 故 ITCZ 的异常也能直接地或通过各环流系统间接地对西太平洋 TC 活动产生影响 (McBride, 1995; 丁一汇和莱特, 1983; 蒋乐怡和应明, 2002; 于玉斌和姚秀萍, 2005; 曹西等, 2013)。ITCZ 活动异常不仅能影响 TC 的生成, 而且对其路径、登陆也起着重要的作用 (宋文玲和何敏, 1998; 张庆云和彭京备, 2003; 刘舸等, 2007)。

南海地区作为水汽源地和热源中心之一, 对中国大陆的天气气候具有重大影响。南海 ITCZ 主要属季风槽型辐合带, 是夏半年影响我国南方地区的主要天气系统之一。研究表明, 南海 ITCZ 活动主要由大尺度流场决定。

由于资料的限制, 关于南海 ITCZ 的研究工作并不太多。1984 年, 蒋全荣和余志豪 (1984) 分析了南海 ITCZ 的月平均天数, 过程的持续时间, 移动以及与 TC 的关系等天气气候学特征, 发现 ITCZ

在南海地区的活动存在着准二周的周期振荡。随着资料的增多, 1986 年, 蒋全荣等 (1986) 进一步分析了南海 ITCZ 的动力学和能量学特征, 结果则表明, 南海地区 ITCZ 在对流层低层存在大量水汽、潜热和全能量的水平辐合, 垂直向上输送并在高层向副热带地区水平辐散开去。近年来, 随着 MICAPS 资料的进一步完善, 杨彩福 (2003) 利用 1991~2001 年的天气图和卫星云图进行了统计分析, 发现 ITCZ 对南海气候影响显著, 其主要表现在南海 TC 的纬度和个数与 500 hPa 的 ITCZ 的纬度和频率有着一致的逐月变化趋势; 南海各站的降雨、相对湿度和温度与 850 hPa 的 ITCZ 关系密切。李淑君 (2010) 则结合天气图及相关海区指标站实时资料, 把南海 ITCZ 分为偏东型、偏西型、东西相连型和南压型 4 种类型, 并得出这 4 种类型的出现与其组成气流和所在季节有密切关系, 且对南海不同海区天气的影响有较大差异。

以上分析表明, TC 与 ITCZ 活动联系紧密。尽管关于南海 ITCZ 已有一些研究, 但南海 ITCZ 与 TC 活动的关系仍不十分清楚。由于每年 ITCZ 的位置和强弱不同, 且不同区域的 ITCZ 也存在较大差异, 故有必要研究南海地区的 ITCZ 的活动。然而, 目前的研究大多是针对整个西太平洋海域的 ITCZ 变化及其对整个西太平洋 TC 的影响, 而针对南海海区 ITCZ 异常变化及其生成于南海 TC 的影响的研究相对较少。因此, 南海 ITCZ 的年 (代) 际变化如何, 不同异常强度的南海 ITCZ 年及其位置变化对于南海 TC 活动有怎样的影响等仍不清楚。为此, 本文首先定义一个南海 ITCZ 强度指数, 进而确定南海 ITCZ 的异常强、弱年份, 研究生成于南海即非移入性的南海 TC 分别在异常强、弱南海 ITCZ 年的活动特征, 尝试揭示南海 ITCZ 年 (代) 际变化与南海 TC 活动异常的关系及其物理机制。

2 资料与方法

本文选用的资料为: (1) 美国 NOAA 提供的向外长波辐射 (Outgoing Long-wave Radiation, 简称 OLR) 月平均资料和逐日资料; (2) NCAR/NCEP 再分析大气环流逐月资料 (Kistler et al., 2001), 包括风场、位势高度场、海平面气压场等, 以上物理量的分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; (3) 美国 NOAA 提供的逐月海表温度资料, 水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 共 35 年; (4) TC 资料取自中国台风网 (<http://www.typhoon.gov.cn> [2014-12-01]) “CMA-STITC 最佳路径数据集”提供的 TC 定位资料。这些资料的时间长度均取为 1979~2013 年。

本文所选取的南海海域范围是 ($5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)。非移入性南海 TC 是指在此海域内生成的 (包含边界上生成的), 包括热带低压 (TD; 中心风速 $\geq 10.8 \text{ m s}^{-1}$) 在内的所有 TC 个例, 但不包括这个海域范围外生成后移入的 TC。分别使用合成分析、低通滤波等方法分析南海 ITCZ 的异常变化与非移入性南海 TC 活动之间的关系。

3 南海 ITCZ 的年 (代) 际变化

3.1 南海 ITCZ 的气候特征

南海海域范围内的 ITCZ 主要涉及赤道地区的西风气流、副热带高压南侧的偏东风和越赤道气流。在天气图上, 根据低层风场所定的 ITCZ 与 OLR 低值所在位置比较一致, 而且 OLR 分布图可清楚地反映 ITCZ 上一些强的对流区域 (谢安和叶谦, 1987)。因此本文中 ITCZ 的强度与位置主要用 OLR 来表征。首先计算 1979~2013 年共 35 年间南海区域 ($5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 的气候平均 OLR 值, 并以平均值 $< 240 \text{ W m}^{-2}$ 作为衡量 ITCZ 强弱的阈值。从 35 年南海 ITCZ 纬度—季节演变得知 (图 1), 5 月份开始, OLR 值突减 ($< 240 \text{ W m}^{-2}$), 240 W m^{-2} 线一直延伸到 20°N 以北, 此时 ITCZ 开始增强, 6~9 月南海 ITCZ 进入强盛期, 深对流的 OLR 值最小可达到 205 W m^{-2} 以下, 鼎盛期的 8 月份 OLR 值 $\leq 220 \text{ W m}^{-2}$ 的深对流区域可以达到 20°N ; 10 月份, ITCZ 中心逐渐南移到 12°N 以南, 强度同时减弱, OLR 值在 12 月增强, ITCZ 进入相对较弱期。

这里主要选取南海区域 ($5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 作为研究 TC 生成的关键区域。南海和西北太平洋区域 TC 生成的年 (代) 际变化和季节变化存在较大的区域差异性。如果笼统地把西太平洋 TC (包括南海) 作为一个整体进行研究, 将不利于分析研究影响 TC 生成的环流系统, 也不利于理解 TC 的成因机理 (孙淑清等, 2007; 李雪等, 2010; 赵军平等, 2012)。统计多年的南海 TC 频数可知, 35 年间, 南海地区生成的 TC 共有 169 个, 频发季节主要集中在 5~11 月份, 共有 159 个, 占总生成频数的 94.6%, 12~4 月的南海 TC 频数相对较少。据此, 这里主要选取 5~11 月南海 TC 活跃季作为研究时段来进行计算分析。

基于上述分析, 可用 ITCZ 上的 OLR 来表征 ITCZ 强度, 这里分别计算了 1979~2013 年共 35 年间南海范围 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 和相邻海域即西太平洋 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 以及整个西太平洋海域 [包括南海 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)] 范围内的 ITCZ 上的 OLR 与南海 TC 的相关关系。计算结果表明, 南海 TC 生成频数与南海段的 ITCZ 强度的相关系数为 -0.40 , 而与西太平洋范围 (不包括南海) 的 ITCZ 强度的相关仅为 -0.24 , 与整个西太平洋海域 (包括南海) 的相关为 -0.29 。由此可知, 南海海域的 ITCZ 强度与南海 TC 发生频数的相关较高, 南海 ITCZ 可能对南海 TC 的影响更大。所选地区的 ITCZ 年 (代) 际变化和南海热带气旋频数的年 (代) 际变化确实

具有显著联系。当南海地区对流活动强时, 热带气旋生成频数也随之偏多, 对流活动弱时, 热带气旋生成频数偏少。因而本文主要选取南海段的 ITCZ 作为研究对象, 探寻南海 ITCZ 的年 (代) 际变化及其与非移入性南海 TC 的各种关系。

3.2 南海 ITCZ 的年际/年代际变化

1979~2013 年每年的 5~11 月份, 南海区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 均处于热带辐合带对流上升区, 为南海 TC 生成的活跃季节。南海 ITCZ 的强弱程度逐年不同, 具有非常明显的年际变化。从 OLR 变化 (图 2) 可看出, 1990 年代后期有一个明显的增强过程, 最强年出现在 1998~2001 年间, 最强深对流时的 $\text{OLR} \leq 220 \text{ W m}^{-2}$ 值的区域能一直往北伸展到 18°N 左右, 而 1982、1983 和 1997

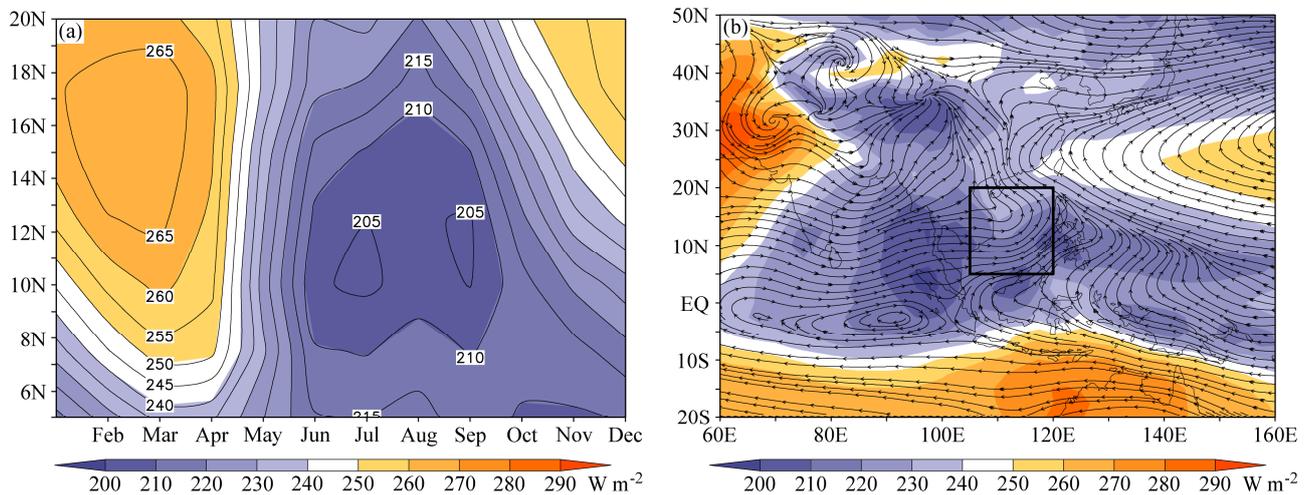


图 1 1979~2013 年 (a) 南海 ITCZ 强度的纬度—月份演变以及 (b) 5~11 月 850 hPa 平均风场 (单位: m s^{-1}) 及向外长波辐射 (OLR; 填色; 单位: W m^{-2})

Fig. 1 (a) Latitude-month evolution of climatological mean ITCZ strength in SCS (South China Sea), (b) climatology of winds at 850 hPa (streamlines; units: m s^{-1}) and OLR (Outgoing Long-wave Radiation; shaded; units: W m^{-2}) averaged over the period from May to November over the period of 1979 to 2013

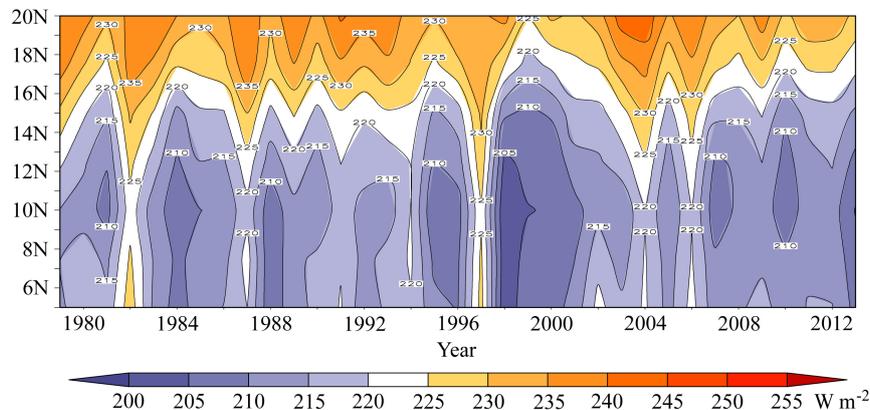


图 2 1979~2013 年南海 (SCS) ITCZ 强度 (单位: W m^{-2}) 的纬度—时间演变

Fig. 2 Latitude-time cross section for the intensity (units: W m^{-2}) of ITCZ in SCS from 1979 to 2013

年相对较弱, 基本没有深对流的区域。

为分析南海 ITCZ 的变化, 这里定义南海 ITCZ 强度指数, 即取南海区域 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 面积平均的 OLR 标准化后的距平值, 可以用 I_{SCSITCZ} 来表示, 即:

$$I_{\text{SCSITCZ}} = \frac{x_{\text{OLR}i} - \bar{x}_{\text{OLR}}}{S_{\text{OLR}}}, \quad (1)$$

其中, $x_{\text{OLR}i}$ 表示 5~11 月平均的南海区域各年的 OLR 值, \bar{x}_{OLR} 为 $x_{\text{OLR}i}$ 的多年平均值, S 为均方根,

$$S = \sqrt{(1/n) \sum (x_{\text{OLR}i} - \bar{x}_{\text{OLR}})^2}.$$

I_{SCSITCZ} 为负值表示 OLR 偏低, ITCZ 中对流活跃且偏强, 其为正值时则相反。后文将以该指数作为衡量南海 ITCZ 强弱变化的指标, 并据此进一步讨论南海 ITCZ 的强弱变化对南海 TC 的影响。

南海 ITCZ 强度的年际变化显著。这可由南海 ITCZ 强度指数 I_{SCSITCZ} 的逐年演变 (图 3a) 清楚地看出, 且其强弱变化趋势与南海非移入性 TC 生成频数有很好的对应关系。通过南海 ITCZ 强度指数 I_{SCSITCZ} 序列的小波变换功率谱分析 (图 3b) 可知, 南海 ITCZ 强度存在准 2~3 年的周期变化。1980 年代末和 2000 年代中期存在显著的准 2 年周期, 而准 3 年周期在 1990 年代中末期比较显著。若以正负 0.5 个标准差作为选取异常强弱年的标准, ITCZ 异常偏强年共有 13 年, 异常偏弱年有 12 年, 具体见表 1。需要说明, 在后续的合成分析中, 除非有特别说明, 否则强/弱年中南海 TC 存在日期并未剔除, 并且, 年代际信号亦未被滤除。因此, 本文的分析主要针对实际的 ITCZ 强度变化与南海 TC 活动的关系而言。

表 1 南海 ITCZ 偏强和偏弱年

Table 1 Stronger and weaker ITCZ years in SCS for composite analysis

I_{SCSITCZ}	ITCZ 强度	年份
$>0.5 \text{ W m}^{-2}$	偏弱	1979、1982、1983、1987、1989、1991、1993、1994、1997、2003、2004、2006
$<-0.5 \text{ W m}^{-2}$	偏强	1981、1984、1988、1995、1996、1998、1999、2000、2001、2007、2008、2010、2013

4 南海 ITCZ 与南海 TC 活动变化的联系

4.1 ITCZ 强度异常与南海 TC 生成

南海 ITCZ 生成频数与 ITCZ 强度变化有较好的联系。利用高斯低通滤波器, 滤除 9 年及以上周

期扰动后, 南海 TC 生成频数与南海 ITCZ 强度变化的相关系数为 -0.63 , 如果不作任何滤波, 两者相关为 -0.40 (图 3a)。这说明在年际时间尺度上, 南海 TC 的频数与 ITCZ 强度变化联系密切, 即南海 ITCZ 强度增强, 南海 TC 频数也增多, 反之则减少。

在年代际及更长时间尺度上, 南海 ITCZ 强度变化与南海 TC 生成频数的关系较为复杂。利用高斯低通滤波器滤除 9 年以下的年际变化后得到图 4, 图中当南海 ITCZ 强度曲线下降 (上升) 时, 表示 ITCZ 增强 (减弱)。由图 4 知, ITCZ 从 1970 年代末期到近期, 南海 ITCZ 强度和 TC 频数均存在年代际波动, 并且这两者也呈反位相关关系。然而, 自 1970 年代以来的长期趋势却显示出另外一种不同的关系。可以看到 (图 4), 南海 ITCZ 强度存在趋势性加强, 尤其是 2000 年以后, ITCZ 增强更为明显, 然而, 南海 TC 频数却是缓慢减少。这种 ITCZ 越强而 TC 发生频数越小的现象的成因目前还不能找到合理的解释。

为进一步了解 ITCZ 强度与 TC 发生频率的关系, 在分析之前, 将 TC 事件从时间序列中剔除。计算发现, 如果不滤除年代际变化和长期趋势, 剔除 TC 日前的南海 ITCZ 强度时间序列 (1979~2013 年 5~11 月南海 ITCZ 强度逐年平均值) 与剔除南海 TC 日后南海 ITCZ 强度时间序列之间的相关为 0.71, 表明剔除 TC 日前后, ITCZ 强度序列的基本特征变化不大。如果对经剔除 TC 日前后的南海 ITCZ 的逐年平均强度时间序列进行低通滤波 (所得结果见图 4), 则滤除年代际变化和长期趋势后的南海 ITCZ 强度时间序列所示年际变化之间的相关变为 0.81, 表明年代际和长期趋势至少有一个因素产生了作用, 使得未滤波时的相关系数较小。但是, 无论是 0.71 还是 0.81 的高相关系数均表明, TC 存在日是否被剔除, 并不改变南海 ITCZ 强度年均指数年 (代) 际变化的基本特征。但是遗憾的是, 计算表明, 在剔除了 TC 后得到的 ITCZ 的逐年平均强度的时间序列与南海 TC 频数的相关系数仅为 0.08, 相关很小。这说明了剔除 TC 日后 ITCZ 的强弱与否与 TC 的发生与否并无必然联系。但是, 毫无疑问, 某些 ITCZ 中会产生 TC 而某些则不能。为什么会如此, 仍有待未来对 ITCZ 进一步分类后再进行深入分析。

4.2 ITCZ 强度异常与南海 TC 源地

为了说明南海 ITCZ 强度异常对南海 TC 生成

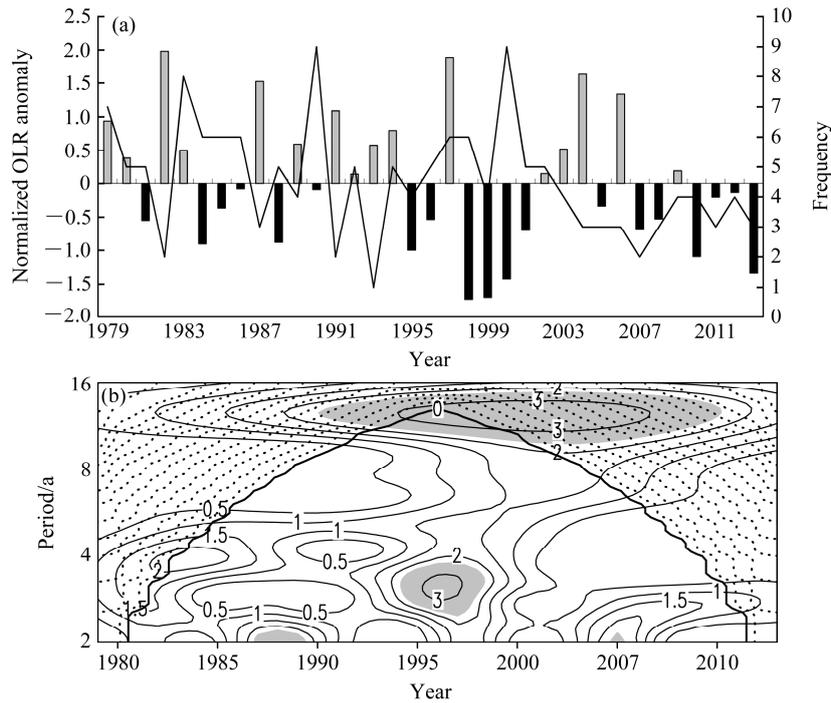


图3 1979~2013年(a)南海5~11月份ITCZ强度(直方)和TC频数(曲线)的年度变化以及(b)ITCZ强度序列Morlet小波变换功率谱(阴影部分表示通过90%信度统计,打点区是小波变换受边界影响的区域)

Fig. 3 (a) Interannual variation of the ITCZ intensity (histogram) and TC frequency (curve) in SCS during the period from May to November and (b) the Morlet wavelet transform power spectrum for the time series of $I_{SCSITCZ}$ from 1979 to 2013. Shaded areas are for values significant at and above the 90% confidence level. The dotted area represents the cone of influence

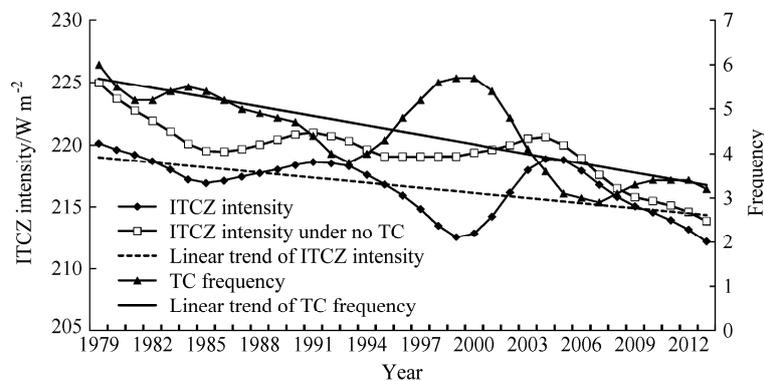


图4 低通滤波的逐年5~11月南海ITCZ强度(菱形)、剔除TC日之后的ITCZ强度(空心矩形)以及南海TC频数(三角形)的年代际变化曲线。实直线和虚直线分别为南海TC频数和ITCZ强度的线性趋势

Fig. 4 Low-pass filtered time series of SCS ITCZ intensity (line with rhombus) and that under no TC influences (line with hollow square), and SCS_G (South China Sea-generated) TC frequency (line with triangle) during the period from May to November. The solid (dashed) line represents the linear trend of SCS_G TC frequency (SCS ITCZ intensity)

和发展至最强时的地理位置有无影响,这里统计了南海ITCZ强、弱年南海TC生成和发展到最强时地理位置的平均结果,发现两者之间的均值仅在80%~85%的信度上显著。这一结果表明南海ITCZ强度的异常对南海TC生成的源地和发展强盛的区域影响在较低信度水平上具有一定指示意义。

南海ITCZ位置和强度的变化对南海TC生成源地的影响有多大呢?分别用各月区域内OLR最低值上的格点的经度和纬度来表示ITCZ轴线的位。计算发现,ITCZ轴线与南海TC生成时的纬度平均值的相关是-0.73(超过99%信度),与经度平均值的相关为-0.10,说明ITCZ的位置影响南海

TC 的生成源地, 对纬度的分布影响更大。进一步计算各月 $I_{SCSITCZ}$ 与对应的南海 TC 源地位置的相关可知, $I_{SCSITCZ}$ 与南海 TC 生成源地纬度值的相关是 -0.82 (超过 99% 信度), 而与经度值的相关仅为 -0.04 , 说明 $I_{SCSITCZ}$ 越大, 南海 TC 的生成源地就越能伸展到较高的纬度。计算还发现, 异常偏强年的南海 ITCZ 的位置和强度分别与南海 TC 源地的位置的相关比弱年的相关高。

4.3 ITCZ 强度异常与南海 TC 维持时间

南海 TC 的维持时间与南海 ITCZ 强弱是否存在显著联系? 统计发现, 异常偏强年的南海 TC 维持时间的平均是 111.2 小时, 弱年仅为 107.5 小时。尽管两者均未能通过 95% 的信度检验, 但仍说明在一定程度上强、弱南海 ITCZ 异常与南海 TC 的维持时间间存在可能的联系。

4.4 ITCZ 强度异常与南海 TC 路径和强度

在对路径的影响上, 强、弱年的南海 TC 的移向差别并不是非常明显 (图略), 两者都是西行和西北行路径占绝大多数, 其中强 ITCZ 年往北或者东北行的 TC 数量有 10 个, 占全部频数的 14.7%, 较弱年的 12.5% 偏多。而通过计算在南海 ITCZ 强、弱年生成的南海 TC 在整个生命过程中所能达到的最大风速的平均值发现, 强、弱年间差别很小 (强年为 22.84 m s^{-1} , 弱年为 22.79 m s^{-1}), 说明南海 ITCZ 的强弱变化对于南海 TC 的强度影响并不明显。

综上所述, 南海 ITCZ 强弱对非移入性南海 TC 的频数有显著影响。南海 ITCZ 强度异常强年有利于 TC 的生成, 反之, 南海 ITCZ 强度异常偏弱年的南海 TC 频数偏少。南海 ITCZ 强弱异常对非移入性南海 TC 源地、维持时间以及南海 TC 的路径和最大强度的影响并不明显。

5 影响机制

南海 ITCZ 有明显的年 (代) 际变化, 而这种年 (代) 际尺度上强度变化的产生必然与大气动力和热力变化有明显的关系。很多研究也表明 (Gray, 1979; 丁一汇和莱特, 1983; Wu and Lau, 1992; Watterson et al., 1995; 吴胜安等, 2011), 只有热力因子和动力因子相互配合, 共同作用, 才能构成有利于 TC 生成活动的背景条件。南海 ITCZ 年 (代) 际变化与南海 TC 活动特征的联系可通过结合强、弱南海 ITCZ 异常年各个要素的不同特征, 并通过

合成分析大尺度环流背景和海温异常等动力和热力的变化特征来揭示。

5.1 环流异常

5.1.1 季风槽及低层涡度

大尺度环流的动力作用对 ITCZ 的影响以及 TC 的生成都非常重要。ITCZ 在动力学上表现为对流层低层东西风的强辐合带。就强、弱南海 ITCZ 年所对应的季风槽位置和强弱而言。利用 1979~2013 年 5~11 月强、弱南海 ITCZ 年合成了 850 hPa 平均流场。由图 5 可知, 强南海 ITCZ 年的季风槽基本位于南海区域, 槽线位置相对于整个西北太平洋来说, 异常偏西和偏南, 它的最东端只伸展到 120°E 附近, 槽区的气流与南海 ITCZ 深对流区配合较好。而在弱南海 ITCZ 年, 相对所讨论的南海区域而言, 较强的槽线切变区基本位于 120°E 以东的西北太平洋海区, 槽线与 ITCZ 深对流区的配合不够紧密, 深对流较弱。

低层正的绝对涡度有利于 TC 的生成和维持。这里对比分析了强、弱南海 ITCZ 年的低层涡度差异情况。从南海 ITCZ 异常偏强年与异常偏弱年的 5~11 月 850 hPa 上的涡度差值 (图 6) 可以看到, 我们所讨论的南海区域基本都为正值, 说明整个南海地区在 ITCZ 异常偏强年比 ITCZ 异常偏弱年低层绝对涡度强。且正值中心位于区域比较偏南的海面, 为南海 TC 在较南的海面上生成发展和维持提供了有利的动力条件。对流层低层有强的正涡度, 由于摩擦产生辐合, 从而产生上升运动, 促使不稳定能量释放, 积雨云发展, 进而有利于 TC 的发生发展。因此在南海 ITCZ 异常偏强年的对流层低层季风槽偏南, 对应着较大的正涡度区, 有利于南海 TC 较 ITCZ 异常偏弱年生成频数偏多, 而一些 TC 个例的源地也能在较为偏南的位置上生成。

5.1.2 环流的垂直结构

ITCZ 强、弱年间 5~11 月对流层高低层风场距平存在极其明显的差别。在 ITCZ 活动强年的 200 hPa 上 (图 7a), 南海地区存在明显的偏东风辐散气流, 北部的亚欧大陆则存在很强烈的反气旋环流异常, 而南海南侧一直到南半球有明显的偏南风异常, 12°N 附近的热带太平洋地区存在异常的气旋性环流, 125°E 以东的赤道太平洋地区存在强的西风异常。在对流层低层, 反气旋性环流异常出现在 120°E 以东的 18°N 附近的热带太平洋地区 (图 7c),

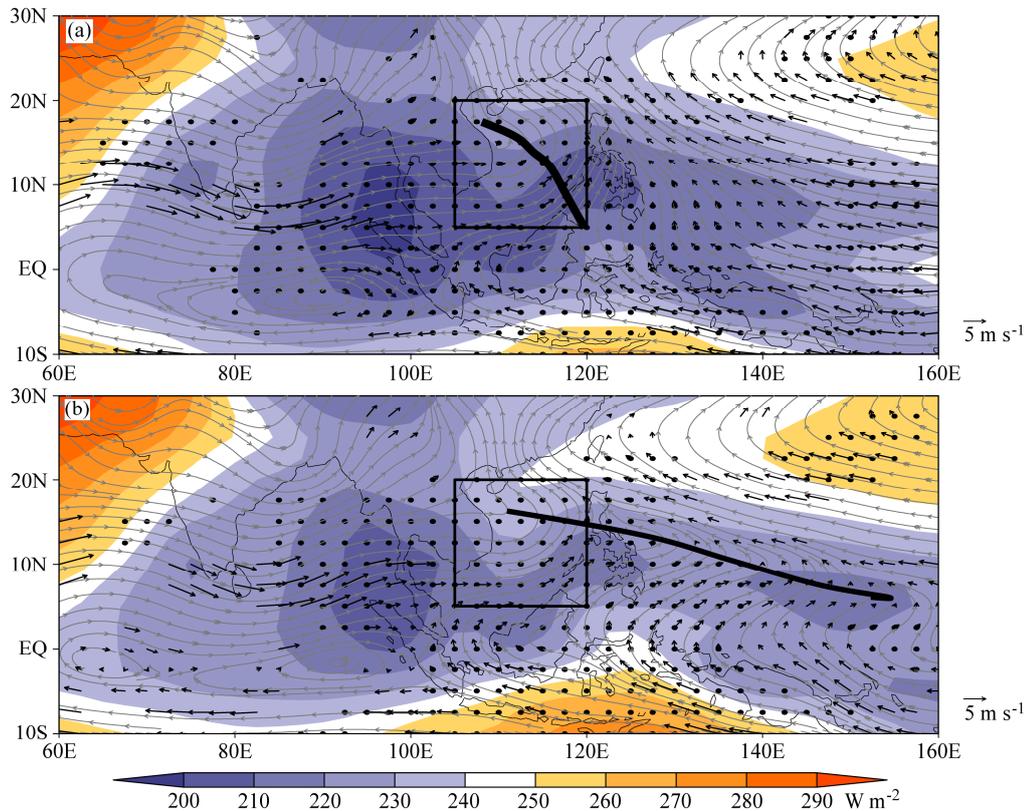


图5 (a) 强、(b) 弱南海 ITCZ 年合成的 850 hPa 平均流场和 OLR (阴影区表示 OLR 平均值, 单位: W m^{-2}), 圆点区表示超过 95% 信度水平的 OLR, 黑色箭头代表超过 95% 信度水平的风场

Fig. 5 Composite means of streamline fields at 850 hPa and OLR (shaded areas, units: W m^{-2}) for (a) strong and (b) weak ITCZ years. The dotted areas are for OLR values significant at and above the 95% confidence level. The bold arrows denote horizontal wind fields that are significant at/above the 95% confidence level

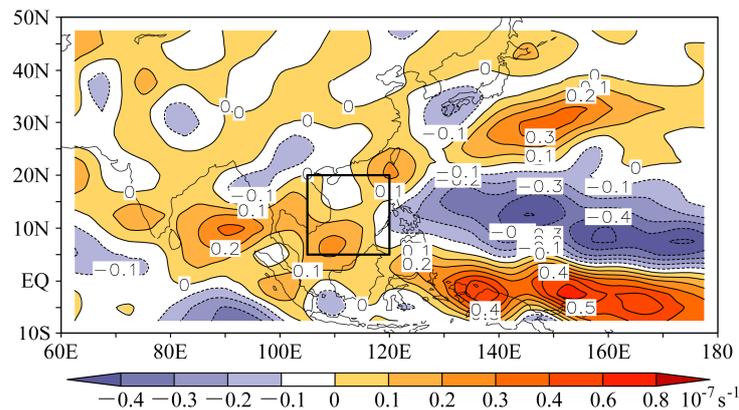


图6 强、弱南海 ITCZ 年 850 hPa 涡度差值 (单位: 10^{-7}s^{-1})

Fig. 6 Vorticity difference (units: 10^{-7}s^{-1}) at 850 hPa between strong and weak ITCZ years

而南海—印度洋区域则存在气旋性环流异常, 由南海南侧一直到南半球存在偏北风异常, 125°E 以东的赤道太平洋地区存在强的东风异常。由此, 可以认为在南海 ITCZ 异常强的年份, 对流层低层的南海—印度洋地区气旋性环流偏强且辐合气流

亦偏强, 南海地区东风异常偏强存在从印度地区穿越中南半岛直至南海—西太平洋的强大的 ITCZ 区, 表现出 ITCZ 较为活跃。与气候平均的 ITCZ 位置相比, 强南海 ITCZ 的位置略为偏北。这样分布有利于南海地区与南海附近的东风气流

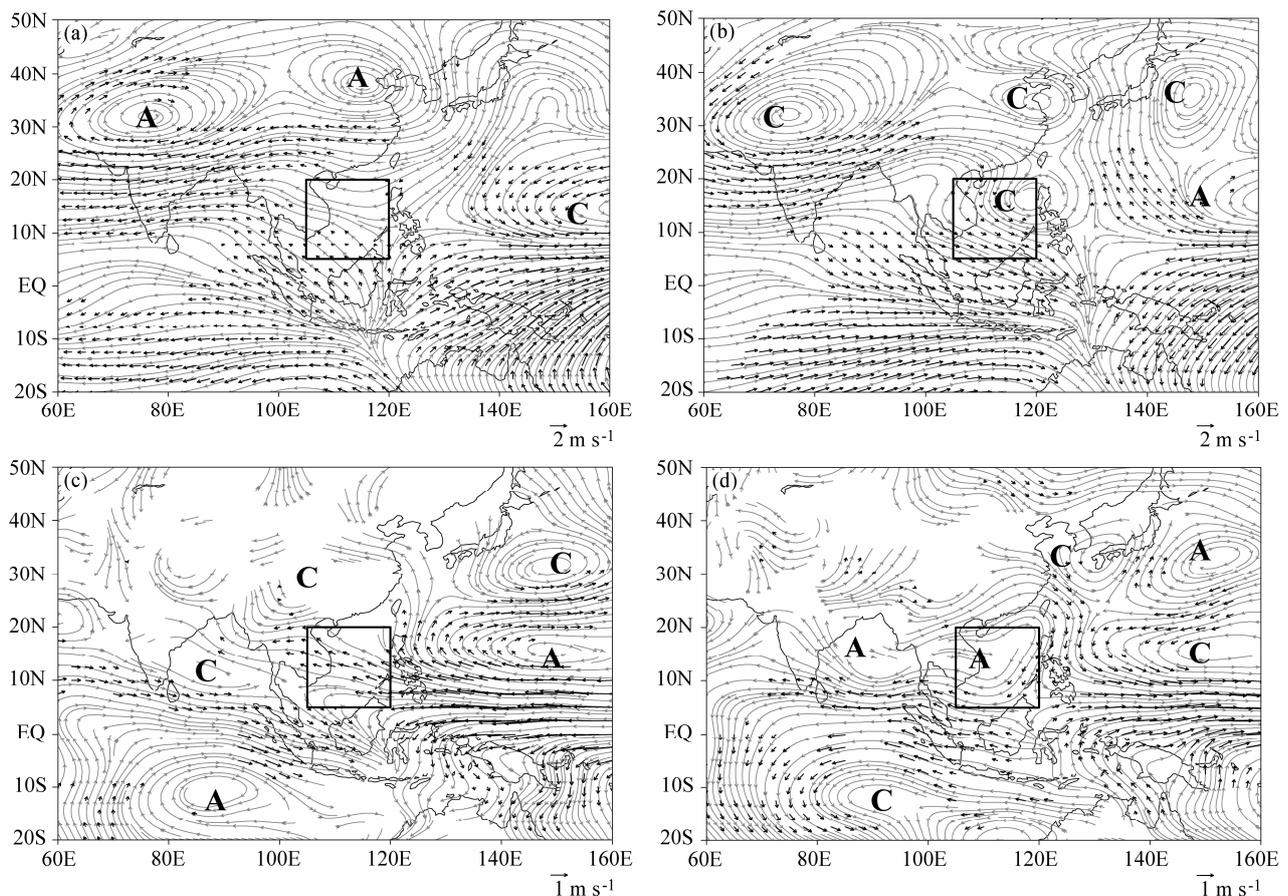


图7 合成的 (a, b) 200 hPa 和 (c, d) 850 hPa 上的风场异常: (a, c) 强南海 ITCZ 年份; (b, d) 弱南海 ITCZ 年份。图中“C”表示气旋,“A”代表反气旋,粗箭头代表超过 95% 信度水平的异常风场

Fig. 7 Composite means of wind anomalies at (a, b) 200 hPa and (c, d) 850 hPa for (a, c) strong and (b, d) weak ITCZ years. Labels “A” and “C” denote anticyclonic and cyclonic circulation, respectively. The thick arrows represent wind anomalies that are significant at/above the 95% confidence level

辐合上升而在高层辐散,从而有利于南海 TC 的发生发展。

弱 ITCZ 年情形则存在很大不同。在对流层上层(图 7b),在南海地区存在明显的偏西北风异常,偏西北风异常一直向南延续到南半球。在 140°E 以东的 20°N 附近的太平洋地区存在异常的反气旋性环流且在 130°E 以东的赤道太平洋地区是强的东风异常。在对流层低层南海—印度洋区域存在明显的反气旋性环流异常(图 7d),但 140°E 以东的 18°N 附近的热带太平洋地区则是气旋性环流异常。由南海南侧一直到南半球存在偏东风异常且 125°E 以东的赤道太平洋地区亦存在强的东风异常。如此,在南海 ITCZ 异常弱时,南海地区低层为弱的异常反气旋性环流且伴有辐散,而在对流层上层则为辐合区。这说明了南海季风槽强度有所减弱,南海 ITCZ 也较弱,南海 TC 生成

频数减少。

5.1.3 垂直环流

强、弱南海 ITCZ 年 5~11 月 ITCZ 中存在整层的上升运动,但强年的上升运动更强烈且强年的极大值出现的高度高于弱年。由图 8 可见,在强年,南海地区存在明显的垂直速度场负异常(图 8a),在这个异常带南侧的赤道地区则为正的垂直速度场异常中心,而南海区域东侧的西太平洋地区存在明显的正的垂直速度异常。

在南海 ITCZ 强度偏弱的年份,其垂直速度异常的分布与强南海 ITCZ 年有显著不同(图 8b),南海地区一直延续到其南侧的赤道地区都为很明显的正的垂直速度异常,下沉运动强烈,不利于南海 TC 的生成,相反,南海以东的西太平洋地区则是负的垂直速度场异常,上升运动强烈,对该区的 TC 生成发展有利。

5.1.4 引导气流与波列状高度场扰动

南海 ITCZ 活动强、弱年 5~11 月份 500 hPa 位势高度距平的合成, 呈现明显的不同 (图 9), 即位势高度距平自低纬向高纬总是表现为“一十—”的带状波列分布或者“十—十—”的反相分布。在南海 ITCZ 活动强年 (图 9a), 赤道附近的南北半球低纬地区的都是负位势高度异常; 东亚大陆整个地区出现正位势高度异常; 在日本—鄂霍次克海上空是很强的负距平, 位势偏低。在这种分布下, 极涡偏西半球, 鄂霍次克海高压减弱, 同时就减弱了中高纬的经向型环流, 有利于副热带高压偏北, 以至西风带偏北和夏季风的推进偏北。这种高空大型环流异常有利于南海地区 ITCZ 的对流发展, 热带气旋频数偏多。与强年的情况相反, 弱南海 ITCZ 年 (图 9b), 赤道附近的南北半球低纬地区的都为正位势高度异常; 日本—鄂霍次克海上空则为强的正位势高度异常, 此时西风带偏南, 鄂霍次克海高压偏强, 极涡偏在东半球, 中高纬盛行经向环流, 因而西风带偏南。这种环流异常使得热带气旋多发区的风速垂直切变增大, 并抑制了 ITCZ 的对流发展, 热带气旋频数偏少。

TC 的移动路径很大程度上受到对流层中层气流的引导, 副高的面积、强弱、脊线位置和具体形态等特征对 TC 路径具有重要影响 (Harr and Elsberry, 1995a, 1995b; 陈联寿, 1977)。这里合成了南海 ITCZ 活动强、弱年 5~11 月份 500 hPa 位势高度图 (图略), 并且合成了 35 年 5880 gpm 线气候态的位置以及强、弱南海 ITCZ 年的 5880 gpm 线位置, 分析发现, 强、弱年两者与气候态的差异不很明显, 可推断其对于南海 TC 的路径影响也差异不大, 也就是南海 TC 的路径在强、弱年里都是以偏西和偏西北移动为主。但由于日本—鄂霍次克海上空存在很强的负距平, 因而强南海 ITCZ 年的南海 TC 路径往东转向的较多, 弱年则相反。

5.2 热力异常

热力作用对 ITCZ 的影响以及 TC 的生成都非常重要。洋面上的 ITCZ 极大地受到下垫面海表温度异常加热的影响, ITCZ 强弱不同所对应的海表温度分布也有差异。图 10 为本文主要讨论的南海台风季 (5~11 月) 的海表温度分布, 以及其在强、弱年间的差异情况。

在台风季 (5~11 月), 强、弱南海 ITCZ 年所对应的海表温度异常分布是截然不同的。在强南海

ITCZ 年 (图 10a), 海表温度分布非常类似于 La Niña 事件期的特征, 在赤道东太平洋地区有冷舌状的负异常从南美洲的西海岸向西延伸展至赤道中太平洋, 而在西北太平洋海区有较强的海表温度正异常。在弱南海 ITCZ 年 (图 10b), 5~11 月的台风季时, 赤道中东太平洋有明显的海表温度正距平的存在, 有类似于 El Niño 事件的海表温度分布, 此时在西北太平洋海区为海表温度负异常分布。计算表明, $I_{scstrcz}$ 与 NINO3.4 指数的相关系数为 0.81, 与图 10 所得吻合, 亦与前人研究西太平洋 TC 活动时所得结论一致 (潘怡航, 1982; Rasmusson and Carpenter, 1982; Chan, 1985; 李崇银, 1987; 何敏等, 1999; 王会军和范可, 2006)。

6 结论

本文通过定义南海 ITCZ 的强度指数, 分析了南海 ITCZ 年 (代) 际变化对非移入性南海 TC 活动的影响, 并探讨了与南海 ITCZ 年 (代) 际变化相联系的环境场的动力和热力特征, 得到:

(1) 南海 ITCZ 的强弱具有非常明显的年 (代) 际变化。利用 OLR 强度定义了南海 ITCZ 强度指数 $I_{scstrcz}$, 通过分析该指数, 揭示出南海 ITCZ 强度存在准 2~3 年的周期变化, 1980 年代末和 21 世纪中期存在显著的准 2 年周期, 而准 3 年周期在 90 年代中末期比较显著。南海 ITCZ 强度存在明显的年代际变化, 同时还存在自 1970 年代至今的不断增强的长期趋势。

(2) 在南海 TC 活跃季 (5~11 月), 南海 ITCZ 的年际异常与南海 TC 的年频数存在显著的相关关系; 南海 ITCZ 的年际异常对 TC 生成源地及 TC 维持时间影响不显著。南海 ITCZ 偏强, 有利于南海 TC 的生成发展。南海 ITCZ 的强度变化比位置变化对南海 TC 生成频数的影响更大, 而对南海 TC 源地南北分布的影响比东西分布的影响更大。在路径上, 强、弱年的南海 TC 都是西行和西北行路径占绝大多数, 两者差异并不明显。

(3) 强、弱南海 ITCZ 年动力环境存在较大的差异。强南海 ITCZ 年, 季风槽位于南海区域, 槽区的气流与南海 ITCZ 深对流区配合较好; 对流层低层有强的正涡度, ITCZ 的位置略为偏北。这种分布有利于南海地区与南海附近对流层低层的东风气流辐合上升而在高层辐散, 从而有利于南海 TC 的发生发展, 弱南海 ITCZ 年情况则相反。

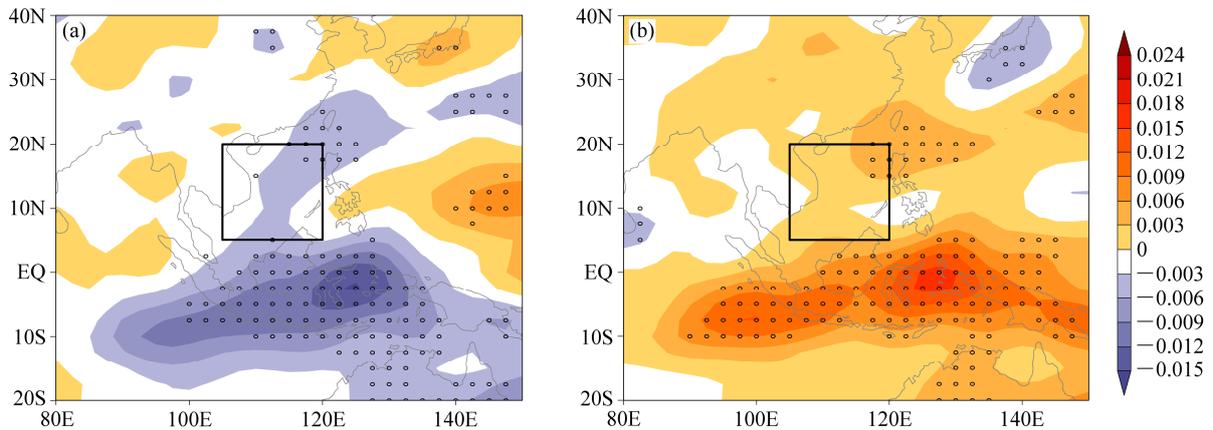


图 8 (a) 强、(b) 弱南海 ITCZ 年 500 hPa 上垂直速度 (ω) 距平合成 (单位: hPa s^{-1})。圆点区表示超过 95% 信度水平

Fig. 8 Composite means of anomalous vertical velocity (ω) at 500 hPa for (a) strong and (b) weak ITCZ years, respectively. The dotted areas are for values significant at and above the 95% confidence level

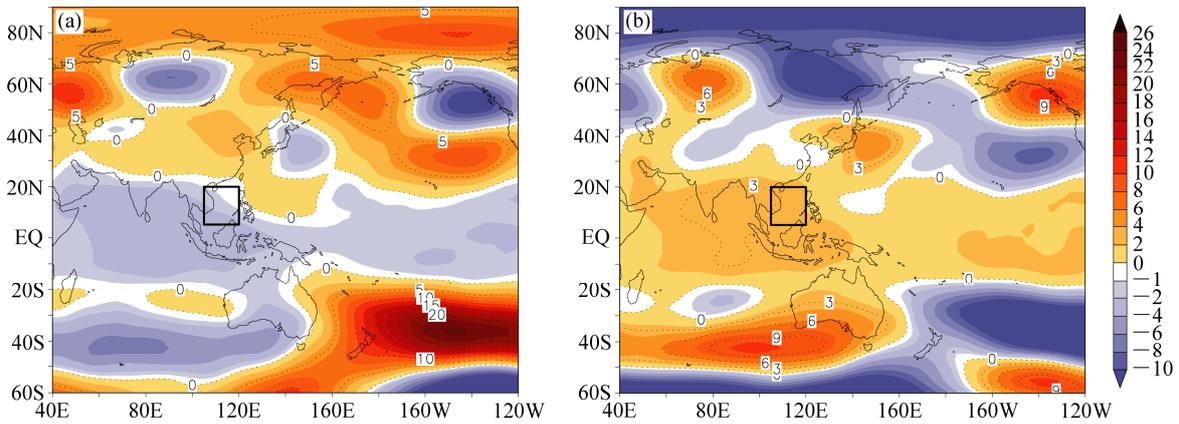


图 9 (a) 强、(b) 弱南海 ITCZ 年 500 hPa 位势高度距平合成 (单位: gpm)

Fig. 9 Composite anomalies (units: gpm) of geopotential height at 500 hPa for (a) strong and (b) weak ITCZ years

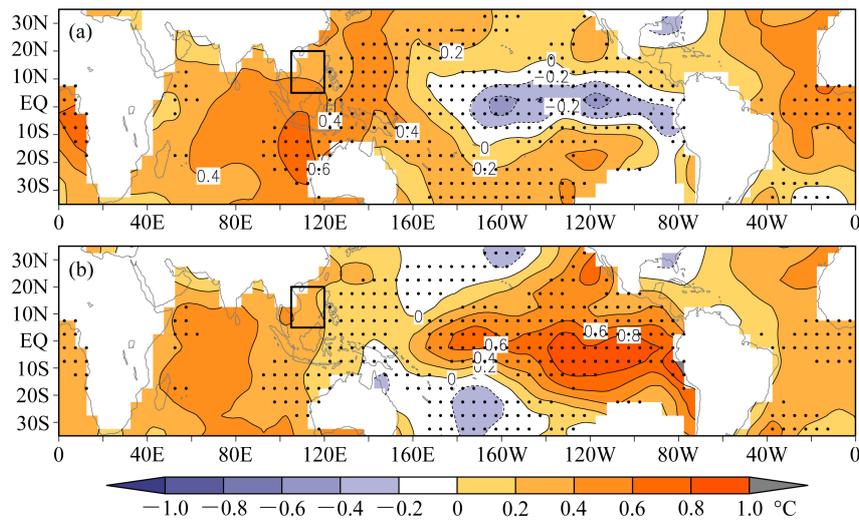


图 10 (a) 强、(b) 弱南海 ITCZ 年台风季 (5~11 月) SST 距平场合成 (阴影区, 单位: $^{\circ}\text{C}$)。圆点区信度水平高于 95%

Fig. 10 Composite SST anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) in the typhoon season (May–November) in (a) strong and (b) weak ITCZ years. Dotted areas are for values significant at the 95% confidence level

强、弱南海 ITCZ 年的 ITCZ 中存在整层的上升运动,但强年的上升运动更强烈且强年的极大值出现的高度高于弱年的高度。在引导气流与波列状高度场扰动方面,南海 ITCZ 活动强、弱年也呈现明显的不同,两者的位势高度距平基本为反相分布。而 35 年间 5880 gpm 线气候态的位置以及强、弱南海 ITCZ 年的 5880 gpm 线位置的差异不很明显,因而对于南海 TC 的路径影响也差异不大。

(4) 强、弱南海 ITCZ 年海表面温度异常从前冬开始,于 5~11 月的 TC 季达到最强。当太平洋 SSTA 表现为 La Niña 特征时,也即赤道中东太平洋 SST 出现负异常,西太平洋暖池出现 SST 正异常时,南海 ITCZ 对流活跃 ($I_{SCSITCZ}$ 偏小),南海 TC 生成频数偏多。当出现 El Niño 信号,赤道中东太平洋为 SST 正异常,西太平洋暖池出现 SST 负异常时,南海 ITCZ 关键区的对流偏弱 ($I_{SCSITCZ}$ 偏大),南海 TC 生成频数偏少。

要说明的是:(1) 南海 ITCZ 的强、弱异常变化与其相邻的西太平洋地区的 ITCZ 的强、弱变化有相当大的差异,大气环流背景场亦有显著不同(图略),这种环流背景的不同如何不同地影响南海 TC 和西太平洋 TC 尚有待进一步研究;(2) ITCZ 从 1970 年代末期到近期,有显著的强度增强的趋势,而南海 TC 频数却是趋势性地缓慢减少,且在 2000 年中后期以后的 ITCZ 强度持续增强,但是对应的南海 TC 频数增加却不明显,为何出现这种现象,还需进一步探讨;(3) 本文在考虑 ITCZ 强弱变化时,基于 TC 与 ITCZ 存在相互作用,而未能将 TC 在南海地区存在的那些日期从资料中剔除,如若剔除这些 TC 存在的日期后,ITCZ 的年(代)际变化与南海 TC 活动的关系如何,亦需要另文研究;(4) 文中分析了热带太平洋海表温度异常与南海 ITCZ 强度的同期关系。考虑到海温的“记忆”能力也即海温慢变过程和影响的持续性,强、弱南海 ITCZ 年前冬(12~2 月)的海表温度分布存在显著差异,表明南海 ITCZ 强度异常与否通常在前冬(12~2 月)就已经热带中东太平洋地区存在前兆特征,这一前兆信号可为南海 TC 季 TC 发生频率的短期气候预测提供线索,因而需要进一步深入研究。

致谢 向外长波辐射资料、NCAR/NCEP 再分析大气环流逐月资料以及逐月海表温度资料取自美国国家海洋和大气管理局 NOAA/OAR/ESRL“<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>[2014-12-01]”; TC 资料取自中国台

风网(<http://www.typhoon.gov.cn> [2014-12-01])“CMA-STITC 最佳路径数据集”;文中诸图由 GrADS 软件绘制。

参考文献 (References)

- 曹西, 陈光华, 黄荣辉, 等. 2013. 夏季西北太平洋热带辐合带的强度变化特征及其对热带气旋的影响 [J]. 热带气象学报, 29 (2): 198–206.
- Cao Xi, Chen Guanghua, Huang Ronghui, et al. 2013. The intensity variation of the summer intertropical convergence zone in western North Pacific and its impact on tropical cyclones [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (2): 198–206, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.02.003.
- Chan J C L. 1985. Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon [J]. Mon. Wea. Rev., 113 (4): 599–606, doi:10.1175/1520-0493(1985)113<0599:TCAITN>2.0.CO;2.
- 陈联寿. 1977. 台风研究和预报问题的评述 [J]. 大气科学, 1(2): 138–148. Chen Lianshou. 1977. A review of the present status of the research and forecasts of typhoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1 (2): 138–148, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1977.02.08.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 64–145. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 64–145.
- 仇永炎, 马德贞, 林玉成. 1999. 台风与西风槽相互作用与赤道辐合带的北跳 [J]. 气象, 25 (2): 3–9. Chou Yongyan, Ma Dezhen, Lin Yucheng. 1999. The relations between the intertropical convergence zone (ITCZ) skipping northward and the interaction between typhoon and westerly trough (TT) pattern [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (2): 3–9, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.02.001.
- 丁一汇, E. R. 莱特. 1983. 影响西太平洋台风形成的大尺度环流条件 [J]. 海洋学报, 5 (5): 561–574. Ding Yihui, Light E R. 1983. The large scale circulation conditions affecting the formation of the western Pacific typhoon [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 5 (5): 561–574.
- Gadgil S, Guruprasad A. 1990. An objective method for the identification of the intertropical convergence zone [J]. J. Climate, 3 (5): 558–567, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0558:AOMFTI>2.0.CO;2.
- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms [J]. Mon. Wea. Rev., 96 (10): 669–700, doi:10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2.
- Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the general circulation [M]// Shaw D B. Meteorology over the Tropical Oceans. Bracknell: James Glaisher House, 155–218.
- Harr P A, Elsberry R L. 1995a. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 123 (5): 1225–1246, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1225:LSCVOT>2.0.CO;2.
- Harr P A, Elsberry R L. 1995b. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part II: Persistence and transition characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 123 (5): 1247–1268, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1247:LSCVOT>2.0.CO;2.
- 何丽萍, 王元, 马辛宇. 2006. 西北太平洋 TC 高频源地与 GMS-SST 暖

- 水区及 ITCZ 的匹配关系 [J]. 南京气象学院学报, 29 (4): 440–447.
- He Liping, Wang Yuan, Ma Xinyu. 2006. Matching relation among TC initiating locations of high frequency, SST warm-water region and ITCZ measured by GMS-5 in the North–West Pacific Ocean [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (4): 440–447, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.002.
- 何敏, 宋文玲, 陈兴芳. 1999. 厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件与西北太平洋台风活动 [J]. 热带气象学报, 15 (1): 17–25. He Min, Song Wenling, Chen Xingfang. 1999. Typhoon activity in the Northwest Pacific in relation to El Niño/La Niña events [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (1): 17–25.
- 蒋乐贻, 应明. 2002. 华东地区热带气旋年频数异常的分析 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 88–95. Jiang Leyi, Ying Ming. 2002. Analysis of anomalous frequency of tropical cyclone in East China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (1): 88–95, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.010.
- 蒋全荣, 余志豪. 1984. 南海及其邻近地区赤道辐合带的活动特征及其结构的个例分析 [C]//1982 年热带环流和系统学术会议论文集. 北京: 海洋出版社, 105–119. Jiang Quanrong, Yu Zhihao. 1984. Case analysis to the activities characteristics and structure of ITCZ in SCS and its adjacent areas [C]//Academic Conference of Tropical Circulation and System (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 105–119.
- 蒋全荣, 管兆勇, 余志豪. 1986. 南海地区赤道辐合带的动力学与能量学特征分析 [J]. 热带气象, 2 (1): 37–44. Jiang Quanrong, Guan Zhaoyong, Yu Zhihao. 1986. Analysis on some dynamic and energy features of the ITCZ around South China Sea [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2 (1): 37–44.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (2): 247–268, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.
- 李崇银. 1987. 厄·尼诺影响西太平洋台风活动的研究 [J]. 气象学报, 45(2): 229–236. Li Chongyin. 1987. A study on the influence of El Niño upon typhoon action over western Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 45 (2): 229–236, doi:10.11676/qxxb1987.028.
- 李淑君. 2010. 南海热带辐合带的气流分型 [J]. 广东气象, 32 (2): 18–20. Li Shujun. 2010. Classification of the air streams in the ITCZ over South China Sea [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 32 (2): 18–20, doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2010.02.007.
- 李雪, 任福民, 杨修群, 等. 2010. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区域性差异分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 504–510. Li Xue, Ren Fumin, Yang Xiuqun, et al. 2010. A study of the regional differences of the tropical cyclone activities over the South China Sea and the western North Pacific [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 504–510, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.18.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2007. 2005 年夏季中国登陆台风的环流特征 [J]. 大气科学, 31 (5): 909–918. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2007. The circulation characteristics of frequent activities of typhoons over eastern China during the summer of 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 909–918, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.14.
- McBride J L. 1995. Tropical cyclone formation. Chap. 3, Global Perspectives on Tropical Cyclones [R]. Technical Document. WMO/TD No. 693, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 63–105.
- 潘怡航. 1982. 赤道东太平洋热力状况对西太平洋台风发生频率的影响 [J]. 气象学报, 40 (1): 24–34. Pan Y H. 1982. The effect of the thermal state of equatorial eastern Pacific on the frequency of typhoons over the western Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 40 (1): 24–34, doi:10.11676/qxxb1982.003.
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (5): 354–384, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2.
- Sadler J C. 1975. The monsoon circulation and cloudiness over the GATE area [J]. Mon. Wea. Rev., 103 (5): 369–387.
- 宋文玲, 何敏. 1998. 热带太平洋对流活动与西北太平洋台风活动关系的探讨 [J]. 应用气象学报, 9 (增刊): 110–119. Song Wenling, He Min. 1998. Relationship between convective activity over tropical Pacific and typhoon activity over Northwest Pacific [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (S): 110–119.
- 孙淑清, 刘舸, 张庆云. 2007. 南半球环流异常对夏季西太平洋热带气旋生成的影响及其机理 [J]. 大气科学, 31 (6): 1189–1200. Sun Shuqing, Liu Ge, Zhang Qingyun. 2007. The influence of the Circulation anomalies in the Southern Hemisphere on the tropical cyclone frequency in summer over the western Pacific and its mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1189–1200, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.14.
- Waliser D E, Gautier C. 1993. A satellite-derived climatology of the ITCZ [J]. J. Climate, 6 (11): 2162–2174, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2.
- 王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系 [J]. 科学通报, 51 (24): 2910–2914. Wang Huijun, Fan Ke. 2006. Relation of oscillation and Northwest Pacific TC frequency [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (24): 2910–2914, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.24.015.
- Watterson I G, Evans J L, Ryan B F. 1995. Seasonal and interannual variability of tropical cyclogenesis: Diagnostics from large-scale fields [J]. J. Climate, 8 (12): 3052–3066, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<3052:SAIVOT>2.0.CO;2.
- Wu G X, Lau N C. 1992. A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO [J]. Mon. Wea. Rev., 120 (6): 958–977, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<0958:AGSOTR>2.0.CO;2.
- 吴胜安, 李涛, 孔海江. 2011. 夏季西北太平洋台风生成数的敏感性因子 [J]. 热带气象学报, 27 (6): 797–804. Wu Sheng'an, Li Tao, Kong Haijiang. 2011. Sensitivity factors for typhoon genesis over the western North Pacific during July–September [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (6): 797–804, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.06.002.
- 谢安, 叶谦. 1987. OLR 低频振荡与西太平洋台风活动的探讨 [J]. 气象, 13 (10): 8–13. Xie An, Ye Qian. 1987. Relationship between OLR low-frequency oscillation and the formation of typhoon over the western Pacific [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 13 (10): 8–13.
- 谢安, 叶谦. 1994. OLR 低频振荡与西太平洋台风的发生 [J]. 应用气象

- 学报, 5 (2): 143–150. Xie An, Ye Qian. 1994. Relationship between OLR low-frequency oscillations and the formation of typhoon over the western Pacific [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (2): 143–150.
- 杨彩福, 焦新龙, 彭灿. 2003. 热带辐合带与南海气候 [J]. 海洋通报, 22 (6): 83–87. Yang Caifu, Jiao Xinlong, Peng Can. 2003. The tropical belt of convergence and the climate of South China Sea [J]. Marine Science Bulletin (in Chinese), 22 (6): 83–87, doi:10.3969/j.issn.1001-6392.2003.06.013.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2005. 2003 年夏季 OLR 特征及与中国异常天气的关系 [J]. 气象, 31 (7): 10–15. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2005. OLR characteristics and relationship with abnormal weather processes in China in summer 2003 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (7): 10–15, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2005.07.003.
- 张庆云, 彭京备. 2003. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响 [J]. 大气科学, 27 (1): 97–106. Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2003. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 97–106, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.09.
- 赵军平, 吴立广, 赵海坤. 2012. 西北太平洋热带气旋潜在生成指数的改进 [J]. 气象科学, 32 (6): 591–599. Zhao Junping, Wu Liguang, Zhao Haikun. 2012. Improvement of tropical cyclone genesis potential index in the western North Pacific basin [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 32 (6): 591–599, doi:10.3969/2012jms.0110.