

中国南海夏季风强、弱年多尺度相互作用能量学特征^{*}

杨悦 徐邦琪 何金海
YANG Yue HSU Pangchi HE Jinhai

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEME), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2015-10-21 收稿, 2016-04-26 改回.

杨悦, 徐邦琪, 何金海. 2016. 中国南海夏季风强、弱年多尺度相互作用能量学特征. 气象学报, 74(4):556-571

Yang Yue, Xu Bangqi, He Jinhai. 2016. Energetic characteristics of multi-scale interaction in the strong and weak years of South China Sea summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4):556-571

Abstract The South China Sea (SCS) summer monsoon is one of the major systems for the East Asian monsoon. It consists of multi-scale features. In addition to seasonal mean circulation, low-frequency (intraseasonal oscillation) and high-frequency (synoptic-scale) eddies are both active and demonstrate significant interannual variability. This study investigated the energy sources for the interannual variability of monsoon circulation and its interactions with eddies during 1979–2010 using two reanalysis datasets, i. e. the ERA-Interim and the NCEP/NCAR. Results show that during the years with enhanced convections in the SCS summer monsoon, the mean kinetic energy (MKE) strengthened over the southern SCS (south of 12°N) and Indochina. The increase in MKE is associated with the eastward extension of a strengthened westerly jet in the Indian summer monsoon region. In the northern SCS (north of 12°N) and western Pacific, an anomalous cyclonic circulation appeared, which is related to the deepening of monsoon trough. The enhanced MKE in the southern SCS is supported by interactions between eddy momentum fluxes and mean circulation. The monsoon mean flows lost less kinetic energy to eddies (i. e., mean flows retain more kinetic energy) during strong monsoon years. Interactions between the high-frequency (<10 d) and low-frequency (10–90 d) eddies with different components (divergent part, rotational part, and vertical wind shear) of mean flows were further examined. It is found that the interactions between <10 d eddies and monsoon divergent flows play a major role in producing positive MKE anomaly. The MKE in the monsoon trough over the northern SCS is maintained by the interaction between atmospheric heating and ascending motion anomaly. Meanwhile, the enhanced MKE is converted to eddy kinetic energy that is favorable for the growth of eddies. As a result, tropical cyclones and northward-propagating intraseasonal oscillation were both active over the northern SCS during strong monsoon years, which often lead to disastrous weather events in southern China.

Key words South China Sea summer monsoon, Scale interaction, Interannual variability, Energetic of mean kinetic energy

摘 要 中国南海夏季风为东亚季风的主要系统之一,其具有多重尺度特征,除季节平均环流场外,低频(季节内振荡)和高频(天气尺度)扰动也十分活跃,各尺度系统存在明显的年际变化。该研究使用 ERA-Interim 和 NCEP/NCAR 两套再分析资料,从季风平均动能(MKE)诊断的角度出发,探讨了 1979—2010 年中国南海夏季风环流年际变化的能量来源及其和扰动场

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金(41375100)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2015CB453200)、江苏省杰出青年基金(BK20140046)、教育部科学技术研究项目(2013014A)。

作者简介: 杨悦, 主要从事季风年际变化和诊断的研究。E-mail: 1321250930@qq.com

通讯作者: 徐邦琪, 主要从事大气低频振荡研究。E-mail: pangchi@nuist.edu.cn

的相互作用过程。结果表明:中国南海夏季风对流活跃年份,中国南海南部(12°N 以南)及中南半岛一带为季风平均动能显著增强区,此与南亚季风区西风急流的增强并向东延伸有关;中国南海北部(12°N 以北)及西太平洋为气旋性环流盘踞,季风槽加深。中国南海南部季风平均动能增强的能量源自于扰动动量通量与平均环流的相互作用,强季风年,平均环流失去较少的动能给扰动场(亦即平均环流保留较多的动能)。通过进一步探讨高频($<10\text{ d}$)及低频($10\text{—}90\text{ d}$)扰动场与平均环流不同分量的(散度、涡度、风垂直切变)相互作用过程,发现季风平均动能的增长主要来自于 $<10\text{ d}$ 扰动与季风平均散度和涡度的相互作用。中国南海北部季风槽区季风平均动能的维持来自于大气热源和平均上升运动的相互作用,但同时有较多的季风平均动能向扰动动能转换,有利于扰动的成长。因此,强季风年,中国南海北部热带气旋生成数目增多,夏季北传的季节内振荡也增强,导致中国南部沿海及华南地区出现较多的灾害天气。

关键词 中国南海夏季风, 尺度相互作用, 年际变化, 动能诊断

中图法分类号 P432⁺.1

1 引言

亚洲季风为全球最大的季风系统,季风降水及活动影响数亿人的生活及国家水资源规划等。中国南海季风的特殊地理位置使其成为联系东亚和南亚夏季风系统的重要纽带。通过1998年中国南海季风试验及一系列资料分析、数值模拟实验,许多学者(黄荣辉等,1994;丁一汇等,2002,2004)发现中国南海夏季风的强度变化是全球系统非常重要的组成部分,与中国汛期的爆发和降水分布关系密切(李崇银等,1999;何金海等,2007)。

由于中国南海夏季风的建立标志着亚洲季风区雨季的开始,过去许多研究(李崇银等,1999;何金海等,2000;金祖辉等,2002;Ding,2004;Ding, et al, 2005;Wang, et al, 2009;钱维宏等,2010)关注于中国南海夏季风爆发过程的大尺度环流演变特征以及爆发时间和强度的定义。中国南海季风活动存在3—6 a的年际变化(Wang, et al, 2009),造成中国南海季风年际变化的成因复杂,其中,太平洋和印度洋地区海温异常被认为是造成中国南海季风年际变化的原因之一,例如:冬季东太平洋海温偏高(暖ENSO)的次年,中国南海夏季风爆发较晚(Zhou, et al, 2007);西太平洋暖池的热力异常通过改变沃克环流,也会对中国南海季风的强度变化产生影响(黄荣辉等,1994;陈永利等,2003);李东辉等(2006)发现印度洋海温异常与中国南海夏季风活动年际变化的关联性,其指出:前期秋季印度洋偶极子(IOD)处于正(负)相位时,次年中国南海夏季风强度减弱(增强);冯娟等(2009)也指出前期春季至夏季东印度洋及西太平洋区域海温与该年中国南海夏季风强度成显著负相关。

除了大气外部下垫面状态,大气内部动力过程

也可能对季风活动产生影响(Goswami, 1998; Webster, et al, 1998; 温之平等, 2006),这些内部因子主要来自于大气中不同尺度、模态、状态之间的相互作用。Goswami(1998)、Ajaya Monhan 等(2003)和Kang 等(2006)的研究认为印度季风年际变化的来源为大气内部季节内振荡强度的变化,季节内振荡活动活跃的年份,南亚季风偏强,且季风降水偏多;Qi 等(2008)指出南亚季风区扰动动量传播的年际变化会影响季风西风的强弱;Hsu 等(2015)发现季节内振荡与季节平均环流的尺度相互作用,以及大气加热与环流场的相互作用均会影响印度季风环流的年际变化。然而,过去研究多注重于南亚季风年际变化的特征和机理,有关大气内部动力过程如何影响中国南海季风年际变化的研究较为缺乏,且未有定论,已往的研究发现中国南海季风爆发时间(受大气动力、热力状态影响)的年际变化与该年季风强度有关,李东辉等(2006)指出中国南海季风爆发偏早(迟)年,季风强度偏强(弱);而戴念军等(2000)的研究则发现中国南海夏季风强度与爆发时间成负相关;严蜜等(2009)则认为中国南海夏季风的强度与爆发时间不完全一致。因此,中国南海夏季风强度年际变化过程中大气内部过程如何仍须进一步研究,此亦为提高季风可预报性的主要途径之一(Goswami, 1998; Webster, et al, 1998; Kang, et al, 2006)。

中国南海季风区除了季风环流外,季节内振荡(李崇银等,1998;朱乾根等,2000;林爱兰等,2005)和天气尺度扰动(如:台风)也十分活跃(Goh, et al, 2010),存在复杂的尺度间相互作用。为了探讨大气内部动力过程对季风强度年际变化的影响,本研究从能量诊断角度,利用平均动能收支方程,定量探讨季节环流-季节内振荡-天气尺度的相互作用,以及

大气加热-环流场相互作用对中国南海夏季季风强度年际变化的相对贡献。

2 资料与分析方法

2.1 数据分析

选用的资料包括:(1)美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的最新的高分辨率($1^\circ \times 1^\circ$)射出长波辐射(OLR)逐日资料(Liebmann, et al, 1996),射出长波辐射被广泛应用于表示热带对流强度(Murakami, et al, 1986);(2)欧洲中心最新的全球再分析数据 ERA-Interim(Dee, et al, 2011),使用变量为低层(850 hPa)每 6 h 的水平风场、垂直速度场以及气温场,水平分辨率为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$;(3)美国国家环境预报中心(NCEP)/国家大气研究中心

(NCAR)(Kalnay, et al, 1996)提供的 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 全球水平风场、垂直速度场、温度场;(4)台风联合预警中心(JTWC, 2013)提供的热带气旋每 6 h 最佳路径资料,用来探究西北太平洋上台风活动的年际变化,文中考虑最大风速大于 17 m/s 的热带气旋个例。

2.2 动能诊断方程

本研究的诊断工具为开放系统中的三维平均动能方程,Lorenz(1967)讨论了纬向平均环流场与扰动场的相互作用。为了探讨中国南海夏季风区不同时间尺度系统相互作用对其年际变化的作用,将原始方程在时间域上进行分解和推导(Hsu, et al, 2009, 2011)平均动能($(\bar{K} = \bar{u}^2 + \bar{v}^2)/2$)的诊断方程如式(1)

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial t} = \underbrace{\overline{V' \cdot (V'_3 \cdot \nabla_3)} \bar{V}}_{\text{CK}} - \underbrace{\frac{R}{P} \bar{T} \omega - \bar{V}_3 \cdot \nabla_3 \bar{K}}_{\text{CA}} - \underbrace{\overline{V'_3 \cdot \nabla_3 \bar{K}}}_{\text{BK}} - \underbrace{\overline{\nabla_3 \cdot (V_3 \phi)}}_{\text{BG}} + D \quad (1)$$

式中, V 为二维风场(u, v), $V = \bar{V} + V'$, $\bar{V}$ 表示每年夏季(6—8月)的平均风, V' 表示所有小于 90 d 的扰动风场。由式(1)可知,影响中国南海夏季风区平均动能(季风环流强度)变化的物理过程包含:通过平均流和扰动的相互作用使扰动动能转换为季风平均动能(CK 项);平均有效位能转换为季风平均动能(CA 项),当在暖的区域有上升运动或者冷的区域有下沉运动的话,该项就对平均动能的增长有正贡

献;平均和扰动场引起的季风平均动能平流(BK 项);通过平均重力势的边界通量(BG 项);次网格尺度影响以及摩擦消散等作用导致的季风平均动能的变化(D)。局地季风平均动能的生成主要来自于扰动动能转换(CK 项)和平均有效位能转换(CA 项),其他项可以使季风平均动能在空间上重新分配。其中,CK 项包含了不同时间尺度的相互作用,展开如式(2)

$$CK = \underbrace{\overline{u'^2 \frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{v'^2 \frac{\partial v}{\partial y}}}_{\text{CK1}} + \underbrace{\overline{u'v' \frac{\partial u}{\partial y}} + \overline{v'u' \frac{\partial v}{\partial x}}}_{\text{CK2}} + \underbrace{\overline{u'\omega' \frac{\partial u}{\partial p}} + \overline{v'\omega' \frac{\partial v}{\partial p}}}_{\text{CK2}} \quad (2)$$

式中,CK1 项与扰动动量-平均辐合辐散场相互作用有关;CK2 项与扰动动量-平均涡度的相互作用有关;CK3 项与扰动动量-平均垂直风切变的相互作用有关。

式(1)和(2)中,瞬变扰动的定义为 90 d 以下所有分量,包括 10—90 d 季节内振荡和较高频(<10 d)的扰动。为了进一步了解高频扰动、季节内振荡与平均环流的相互作用,分别讨论高频扰动(下标为

H),低频扰动(下标为 L)对季风平均动能变化的相对贡献,根据 Hsu 等(2009),高频和低频扰动为相互独立的分量,其乘积再经过长时间平均(如季节平均)后为 0,因此,高频和低频扰动与平均环流相互作用的过程可写成式(3)和(4)。本研究中,小于 10 d 的高频扰动和 10—90 d 低频季节内振荡由 Lanczos (Duchon, 1979) 滤波器分别提取。

$$CK_H = \underbrace{\overline{u_H' u_H' \frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{v_H' v_H' \frac{\partial v}{\partial y}}}_{\text{CK1}_H} + \underbrace{\overline{u_H' v_H' \frac{\partial u}{\partial y}} + \overline{u_H' v_H' \frac{\partial v}{\partial x}}}_{\text{CK2}_H} + \underbrace{\overline{u_H' \omega_H' \frac{\partial u}{\partial p}} + \overline{v_H' \omega_H' \frac{\partial v}{\partial p}}}_{\text{CK3}_H} \quad (3)$$

$$CK_L = \underbrace{\overline{u_L' u_L' \frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{v_L' v_L' \frac{\partial v}{\partial y}}}_{\text{CK1}_L} + \underbrace{\overline{u_L' v_L' \frac{\partial u}{\partial y}} + \overline{u_L' v_L' \frac{\partial v}{\partial x}}}_{\text{CK2}_L} + \underbrace{\overline{u_L' \omega_L' \frac{\partial u}{\partial p}} + \overline{v_L' \omega_L' \frac{\partial v}{\partial p}}}_{\text{CK3}_L} \quad (4)$$

3 南海夏季风动能的年际变化

中国南海夏季风包含多重尺度系统(李崇银等, 1998; 朱乾根等, 2000; Ding, 2004; 林爱兰等, 2005; Wang, et al, 2009; Goh, et al, 2010), 图 1 为各尺度(夏季季节平均、10—90 d 季节内振荡、<10 d 高频扰动)系统的气候平均及其年际变化的分布特征, 1979—2010 年夏季平均射出长波辐射分布可见, 孟加拉湾、中南半岛以及西太平洋暖池区为亚洲夏季季风对流活跃区(Goswami, 1998; Wang, et al,

2009), 中国南海—西太平洋季风对流虽然比南亚季风区对流偏弱(图 1a), 但其年际变化十分明显(图 1d)。中国南海夏季风的季节尺度以下的扰动活动亦十分活跃, 低频 10—90 d 季节内振荡和高频 10 d 以下波动的活动大值区都出现在海洋上(中国南海、菲律宾海、西太平洋暖池区), 就夏季平均态而言, 高频扰动(图 1c)较季节内振荡(图 1b)活跃, 但是季节内振荡在中国南海—西北太平洋地区显现出较强的年际变化(图 1e、f)。

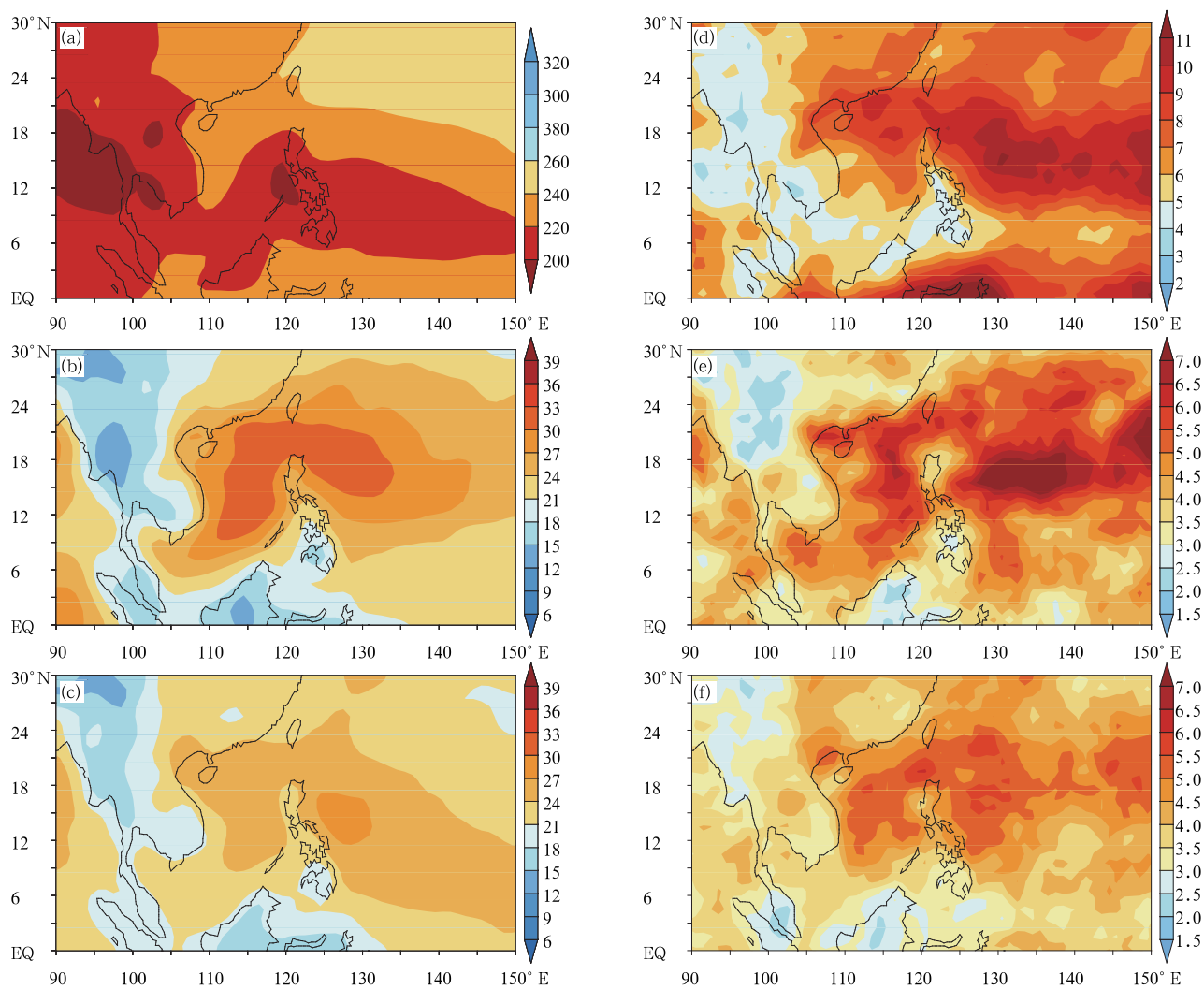


图 1 (a)1979—2010 年 6—8 月(JJA)射出长波辐射平均场分布, (b)10—90 d 和(c)<10 d 射出长波辐射标准差分布, (d)—(f) 分别为(a)—(c)的年际标准差(单位: W/m^2)

Fig. 1 (a) Summertime (JJA) mean OLR over Asia and western Pacific in 1979–2010. (b)–(c) Same as (a) but for the standard deviations of 10–90 d and <10 d OLR, respectively. (d)–(f) Same as (a)–(c) but for their interannual standard deviations from 1979 to 2010 (Unit: W/m^2)

为了进一步探讨中国南海季风各尺度系统相互作用的年际变化如何影响季风的环流强度,首先对强、弱季风年进行分类。已有研究表明,中国南海夏季季风活动的基本特征之一就是低层盛行西南风,其经向风和纬向风同等重要;之二是夏季风突然爆发,西南风和所表示的对流活动具有几乎同步的爆发性增长,并且西南风和射出长波辐射成显著负相关(李崇银等,1999),除此之外东亚降水量局地性较强,并且由于技术原因缺少海上降水资料,所以单独用降水和环流来表示中国南海季风的强弱都不适用。吴尚森等(2001)定义了中国南海区域(10° — 20° N, 110° — 120° E)夏季风强度指数 $I_s = \frac{V_{sw} - \overline{V_{sw}}}{\sigma_{sw}} - \frac{R - \overline{R}}{\sigma_r}$, 式中 $V_{sw} = (u + v)/\sqrt{2}$ 为中国南海区域 850 hPa 月或季平均风在西南方向上的投影, R 为月或季平均的射出长波辐射, $\overline{V_{sw}}$ 和 $\overline{R}$ 为月或季的多年平均。由于降水与对流(射出长波辐射)关系非常显著,而且通过计算发现已有的季风强度指数 I_s 与射出长波辐射成显著负相关($r = -0.7$, 显著性水平大于 0.01)。因此,可以直接用强对流区域射出长波辐射的时间序列来挑选中国南海强、弱季风年。由图 1 可见,中国南海季风及其年际变化活跃区域位于(5° — 25° N, 105° — 125° E),图 2 为此区域标准化的射出长波辐射时间序列(为了方便理解,已将射出长波辐射乘以 -1),将标准差大于 1.0 的年份选

为强季风年,小于 -1.0 的年份选为弱季风年(图 2),强季风年有 1984、1985、1994、1995、1999、2001、2005 年,弱季风年则为 1982、1983、1987、1988、1993、1998、2003 年。其时间序列与吴尚森等(2001)定义的 I_s 的年际变化基本一致(图略),并且与张勇等(2004)、Xu 等(2009)依西南风或环流场定义得到的强、弱季风年基本一致。

图 3 为强、弱季风年合成的低层(850 hPa)环流场季风平均动能分布。中国南海夏季风区低层的主要特征是 3 支气流的辐合,分别是来自印度洋的西风气流、在 105° — 110° E 附近来自南半球的跨赤道气流以及西太平洋副热带高压西侧的东南气流(丁一汇等,1987)。低层的跨赤道西南气流带来暖湿空气,为中国南海地区带来主要降水(梁建茵等,2004)。沿孟加拉湾、中南半岛和中国南海西风大值区(5° — 15° N)有较强的季风平均动能,在强季风年,季风平均动能也显著增强,并且东、西风的辐合区也偏西,季风平均动能大值出现在强西风气流所在的区域(图 3a、b)。中国南海强季风年,伴随印度季风区西风的增强与向东延伸,季风平均动能在中国南海南部(12° N 以南)显著增强,而中国南海北部(12° N 以北)为气旋环流差值,季风槽加深,对流活跃(图 3c)。

由图 3 可知,中国南海季风环流(季风平均动能)与对流一致,均呈现显著的年际变化。为了探究强季风年动能增长的来源,分别诊断了强、弱季风年时 CK、CA 项大气能量转换过程,以便了解大气内部尺度相互作用及大气加热-环流相互作用对季风平均动能年际变化的贡献。图 4 分别为低层 CK 项(正值为扰动动能转给季风平均动能)和 CA 项(正值为平均有效位能转给季风平均动能)在强年和弱年的分布。结果显示,无论强年还是弱年,CK 项在中国南海都是负值,即中国南海季风区的低层平均环流将动能转给扰动场,支持扰动的生成及发展(图 4a、b),强季风年,中国南海南部强西风 CK 项为正差值,说明平均环流场保留了较多的动能(即季风平均动能失去较少能量给扰动动能),可维持季风平均动能的正差值(图 4c)。除了 CK 项有利于中国南海南部季风平均动能的增长,强西风也有利于将印度季风区较大的季风平均动能往中国南海南部平流(BK 项正差值),有利于此区域平均西风的增强(图略),强季风年时,CK 项在中国南海北部季风槽加深的地区呈现负差值(季风平均动能失去较多能量

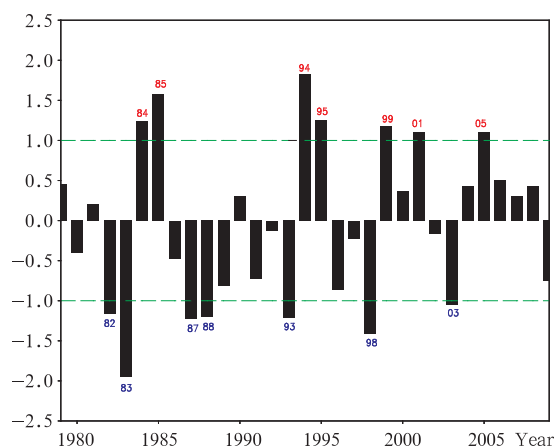


图 2 1979—2010 年中国南海(5° — 25° N, 105° — 125° E)夏季标准化射出长波辐射的年际变化(单位:标准差)

Fig. 2 Normalized OLR in the summer monsoon season over the SCS (5° — 25° N, 105° — 125° E) during 1979–2010 (Unit: Standard deviation)

给扰动动能),显示CK项并非导致季风槽增强的主因,意味着必然有其他过程对低层季风槽动能的增长产生正贡献。图4d和c为低层CA项于强、弱季风年的分布,季风槽区对流加热与上升运动的共同

作用有利于平均有效位能转换为季风平均动能(CA项皆为正值),而强年时,气旋性环流差值有利于CA项的增强,较多的平均有效位能转换给季风平均动能,维持季风槽的加深(图4f)。

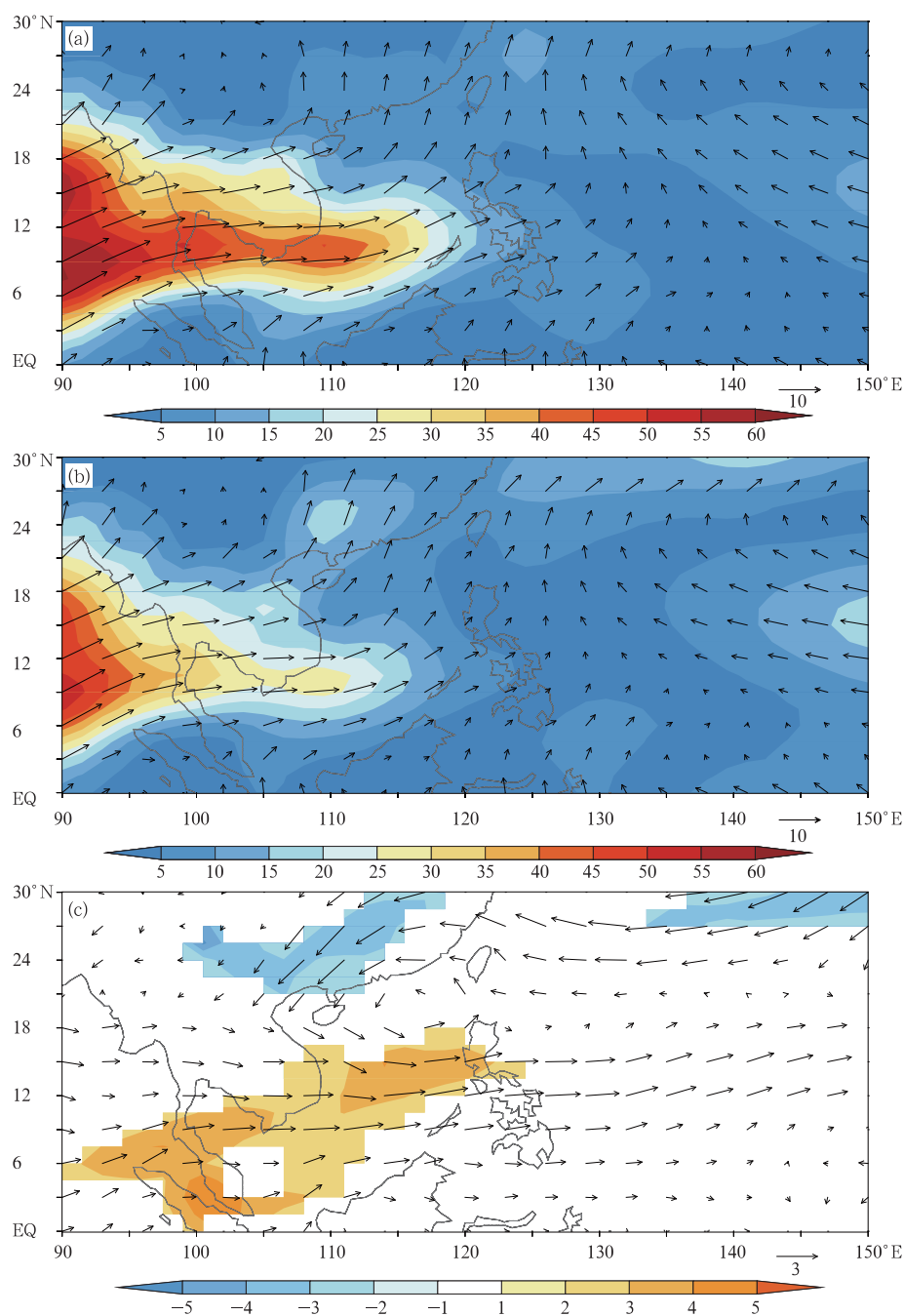


图3 850 hPa 季风平均动能(单位: m^2/s^2)和水平风场(单位: m/s)在(a)强季风年、(b)弱季风年、以及(c)两者差值(强季风年减弱季风年)的空间分布(图(c)中阴影为季风平均动能差值通过95%显著性检验区域)

Fig. 3 Distributions of 850 hPa MKE (Unit: m^2/s^2) and horizontal wind (unit: m/s) during (a) strong and (b) weak monsoon years, and (c) their difference with dots for statistically significant change at the 95% confidence level

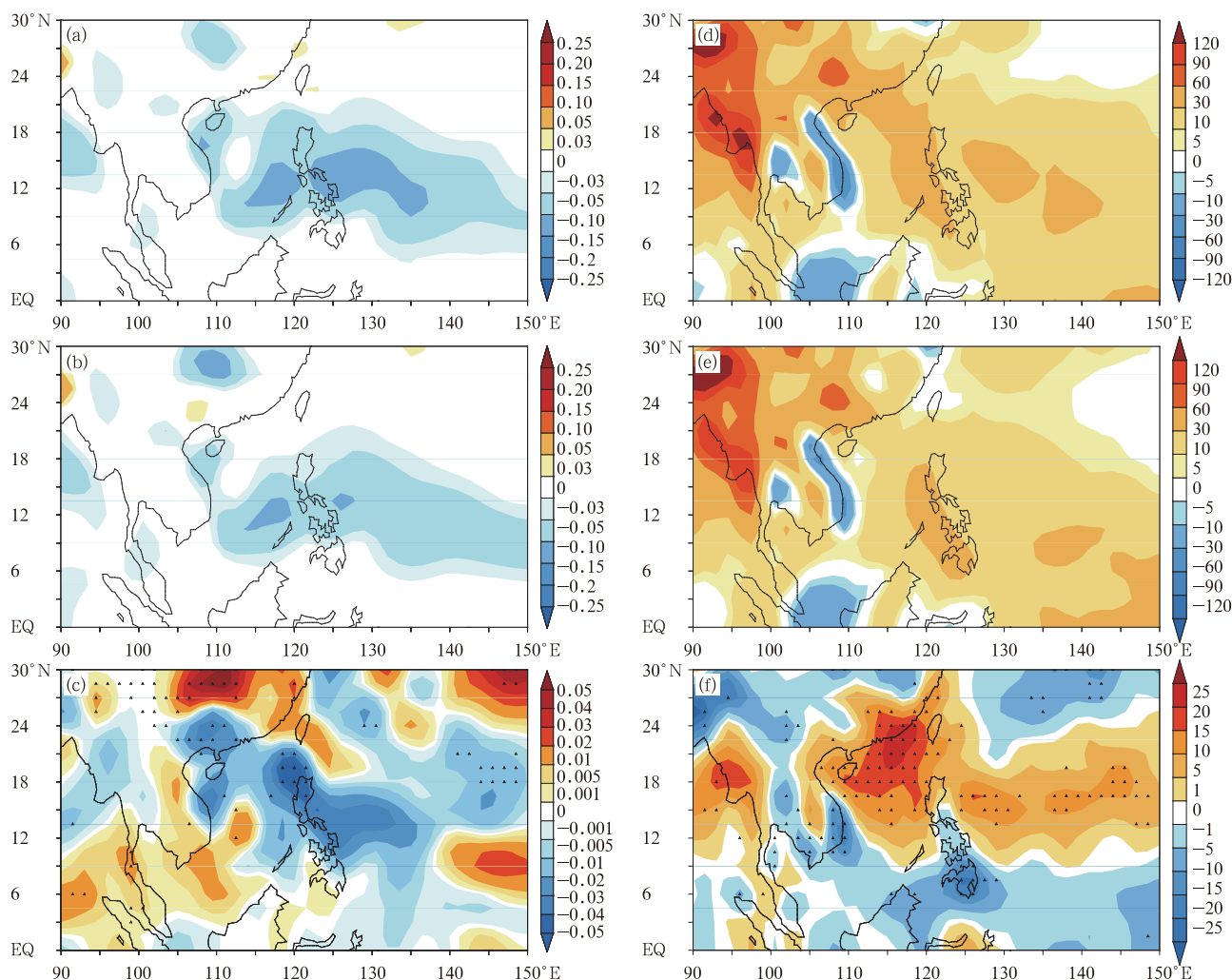


图4 850 hPa CK项(单位: $10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^3$)在(a)强季风年、(b)弱季风年、
以及(c)两者差值(强减弱季风年)的空间分布。(d)–(f)同(a)–(c)但为850 hPa CA项
(图(c)与(f)中黑点代表差值通过95%显著性检验的区域)

Fig. 4 Distributions of 850 hPa CK ($10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^3$) during (a) strong years, (b) weak years, and (c) differences between strong and weak years. (d) – (f) Same as (a) – (c) but for the 850 hPa CA ($10^{-3}\text{m}^2/\text{s}^3$)
(The dots in (c) and (f) indicate changes at the 95% confidence interval)

4 尺度相互作用的年际变化

由第3节季风平均动能的诊断可知,大气内部尺度相互作用影响中国南海季风不同尺度系统的年际变化。如式(2)所示,CK项包含了三维扰动动量通量与平均气流辐散分量(CK1项)、涡度分量(CK2项)、垂直切变(CK3项)的相互作用过程。此外,式(1)和(2)中的瞬时扰动包含所有小于90 d的系统,可以进一步分解为低频(10–90 d)季节内振荡和较高频(<10 d)的天气尺度扰动,本节将深入讨论低频、高频扰动与平均流场不同分量相互作用

过程对季风平均动能的贡献。

图5a显示,中国南海季风强年,沿 5° – 15°N 向东发展的西风急流差值于孟加拉湾、中南半岛及中国南海西南部一带产生辐散($\partial u/\partial x > 0$),扰动动量通量与季风辐散环流相互作用的结果,有利于季风平均动能增长(CK项正差值);中国南海北部及菲律宾海一带则为辐合区($\partial u/\partial x < 0$),较多的季风平均动能转换为扰动动能,使扰动成长,此结果与波动累积机制有利于天气尺度扰动发展(Sobel, et al, 1999; Kuo, et al, 2001)的理论相似。扰动动量通量与季节平均旋转分量相互作用(CK2项)的负

(正)差值出现在中国南海北(南)部的气旋(反气旋)环流差值区(图 5b),说明大尺度反气旋(气旋)环流不利于(有利于)其中的扰动场的成长。低层垂直风

切变与扰动通量相互作用(CK3 项)的贡献较小,但也显示有利于中国南海南部强西风的的增长(图 5c)。

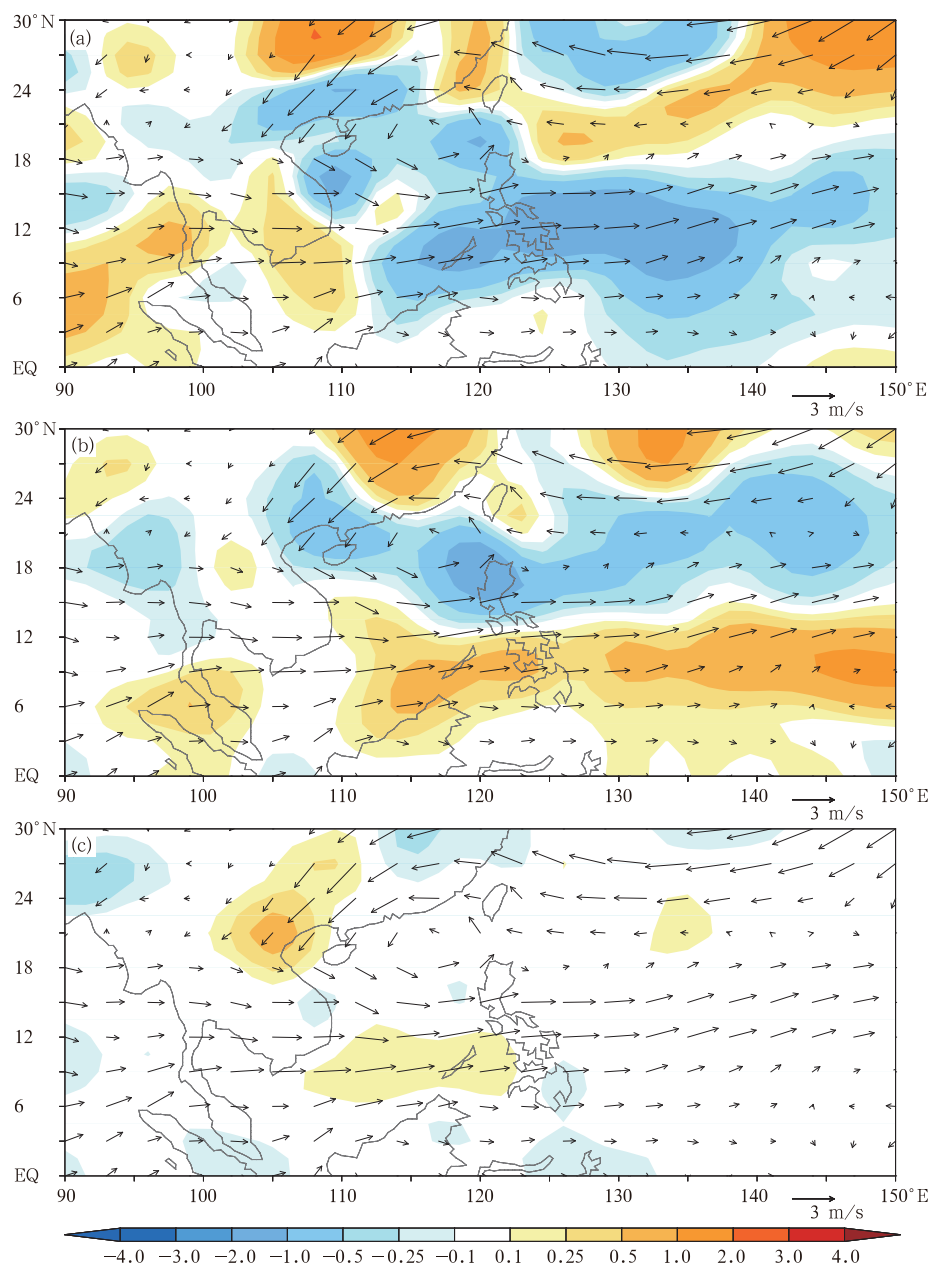


图 5 同图 4c,但为(a)CK1 项, (b)CK2 项, (c)CK3 项(单位: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$);风矢量为强、弱季风年的 850 hPa 风速差值
Fig. 5 Same as Fig. 4c but for (a) CK1, (b) CK2, and (c) CK3 (unit: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$; vectors indicate the difference of 850 hPa wind field between strong and weak monsoon years)

高频($<10 \text{ d}$)和低频($10-90 \text{ d}$)扰动与平均流场相互作用对季风环流强度年际变化的相对贡献如图 6 所示,不论是强、弱季风年,季节平均环流均在提供低层的高、低频扰动成长(图 6a、b、d、e),强季风

年时,孟加拉湾东部、中南半岛及中国南海南部保留了较多的季风平均动能(即较少的能量转给 $<10 \text{ d}$ 的高频扰动及 $10-90 \text{ d}$ 季节内振荡),有利于西风差值的维持(图 6c、f),在中国南海北部及菲律宾海一

带的季风槽区,由于季风槽的加深有利于高频、低频扰动从季风平均动能获得较多能量(图 6c、f)。图 7

进一步比较 CK_H (式(3)) 和 CK_L (式(4)) 每一项的相对贡献,发现中国南海南部强西风的维持主

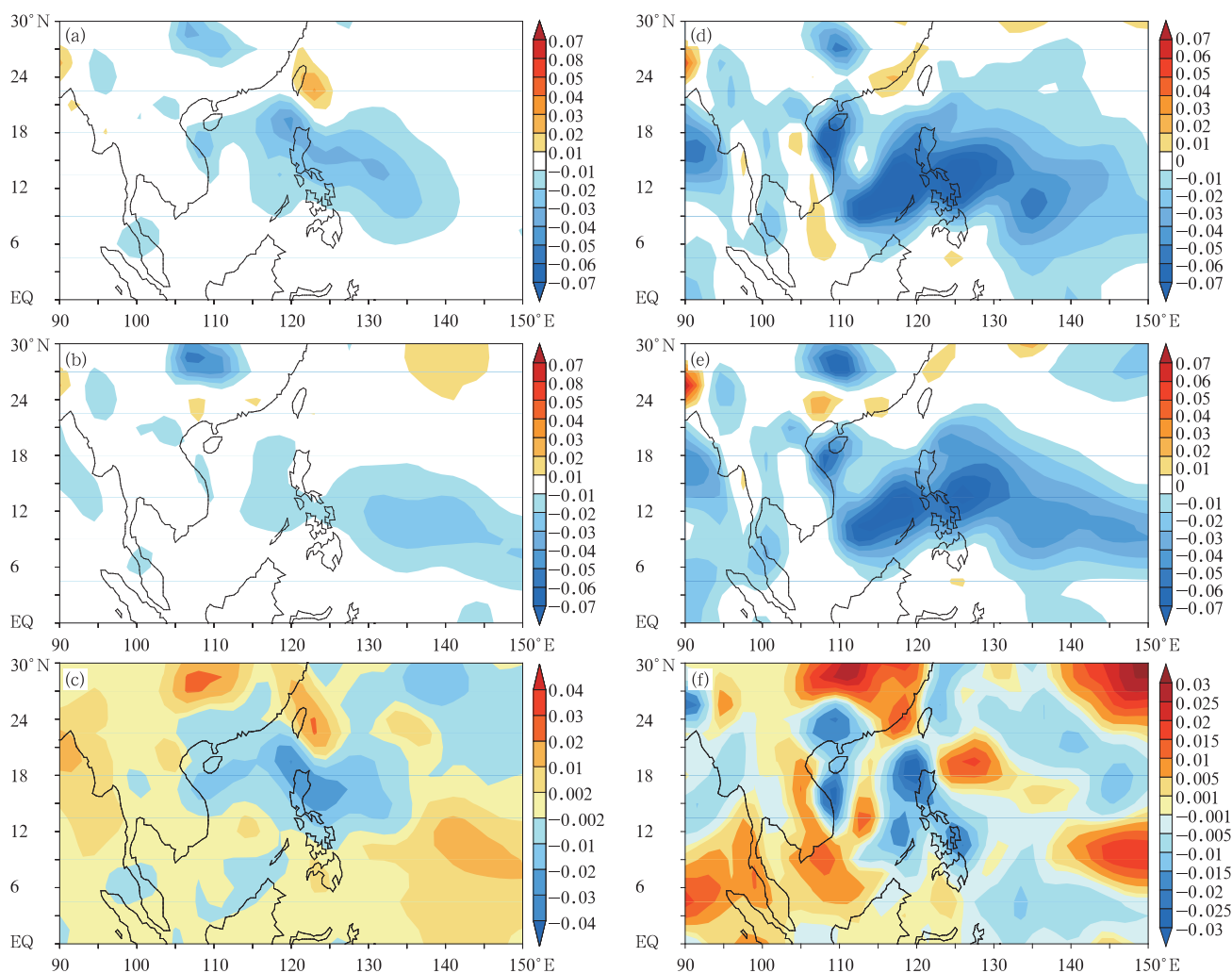


图 6 同图 4 但(a)–(c)为 CK_H , (d)–(f)为 CK_L (单位: $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 6 As in Fig. 4 but (a) – (c) for the CK_H , (d) – (f) for the CK_L (unit: $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^3$)

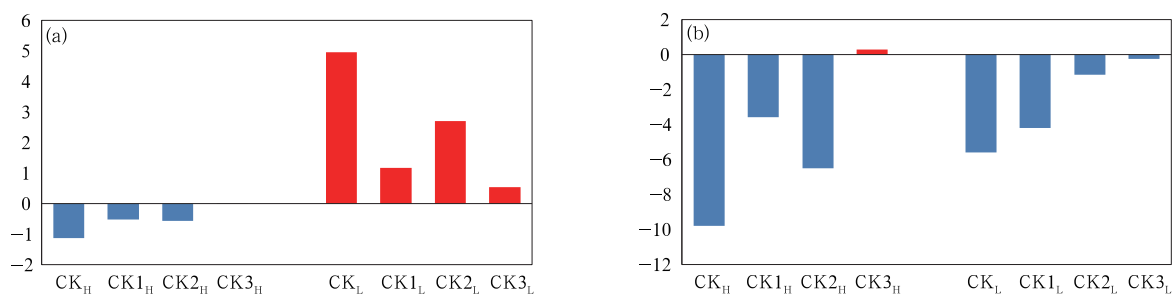


图 7 中国南海季风强弱年相减的 CK_H ($CK1_H$, $CK2_H$, $CK3_H$) 和 CK_L ($CK1_L$, $CK2_L$, $CK3_L$) 各项于

(a) 中国南海南部 ($3^\circ - 12^\circ \text{N}$, $90^\circ - 115^\circ \text{E}$) 和 (b) 中国南海北部 ($12^\circ - 20^\circ \text{N}$, $110^\circ - 125^\circ \text{E}$) 的比较 (单位: $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 7 Differences in the individual terms of CK_H ($CK1_H$, $CK2_H$, $CK3_H$) and CK_L ($CK1_L$, $CK2_L$, $CK3_L$) between strong and weak monsoon years averaged over (a) northern SCS ($3^\circ - 12^\circ \text{N}$, $90^\circ - 115^\circ \text{E}$) and (b) southern SCS ($12^\circ - 20^\circ \text{N}$, $110^\circ - 125^\circ \text{E}$) (Unit: $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^3$)

要来自于低频水平扰动通量与季节平均辐散场、涡度场以及垂直风切变之间的相互作用(CK1_L、CK2_L、CK3_L)。中国南海北部季风槽区的辐合和涡度差值与扰动的相互作用均有利于两类扰动的成长

(图 7b)。由对图 5—7 的分析可知,中国南海季风尺度相互作用的年际变化影响不同尺度系统的生成和发展,强季风年时,中南半岛及中国南海南部一带季节

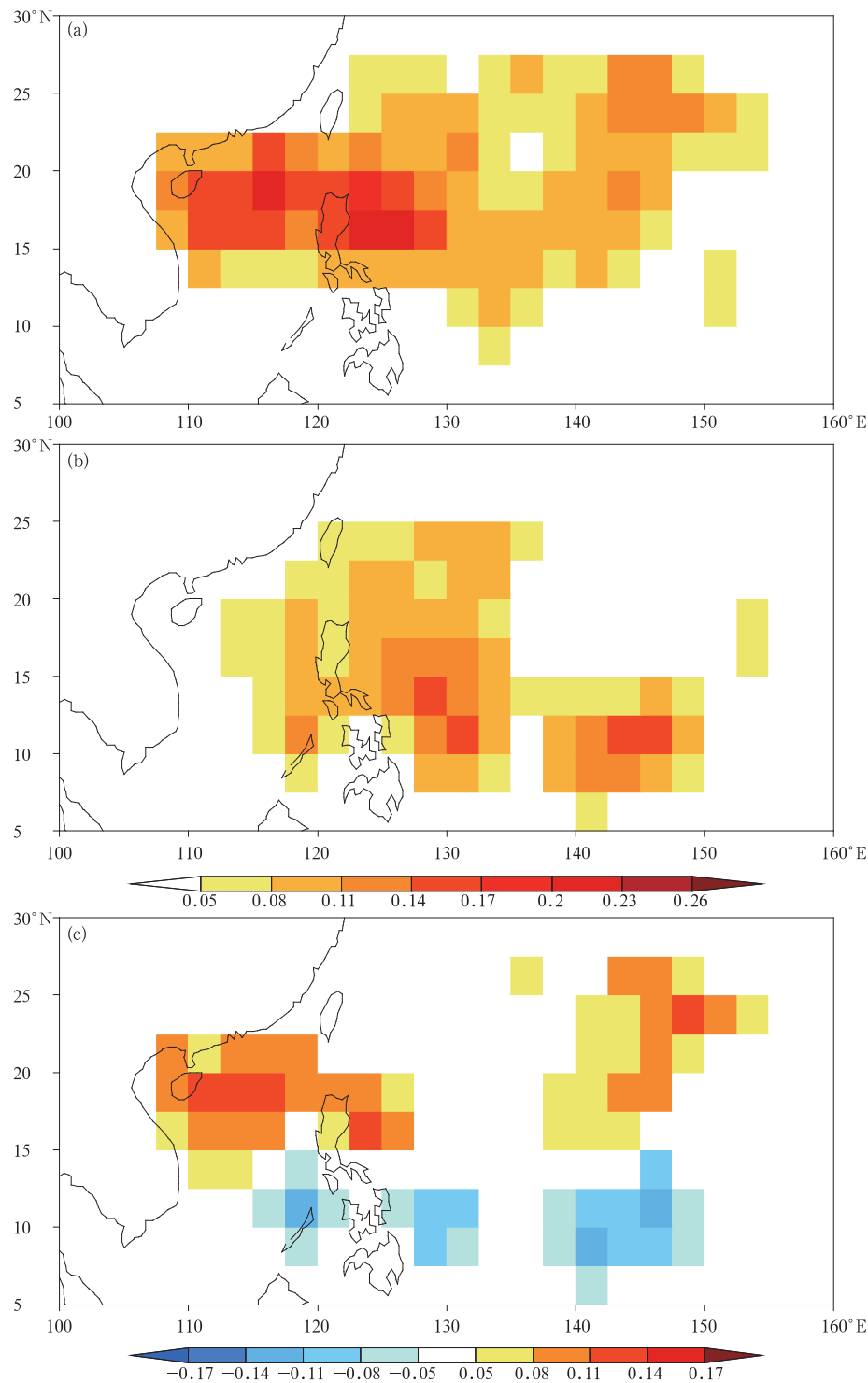


图 8 热带气旋在(a)强季风年、(b)弱季风年以及(c)强减弱年的生成频率分布
Fig. 8 Same as Fig. 3 but for the frequency of tropical cyclone geneses

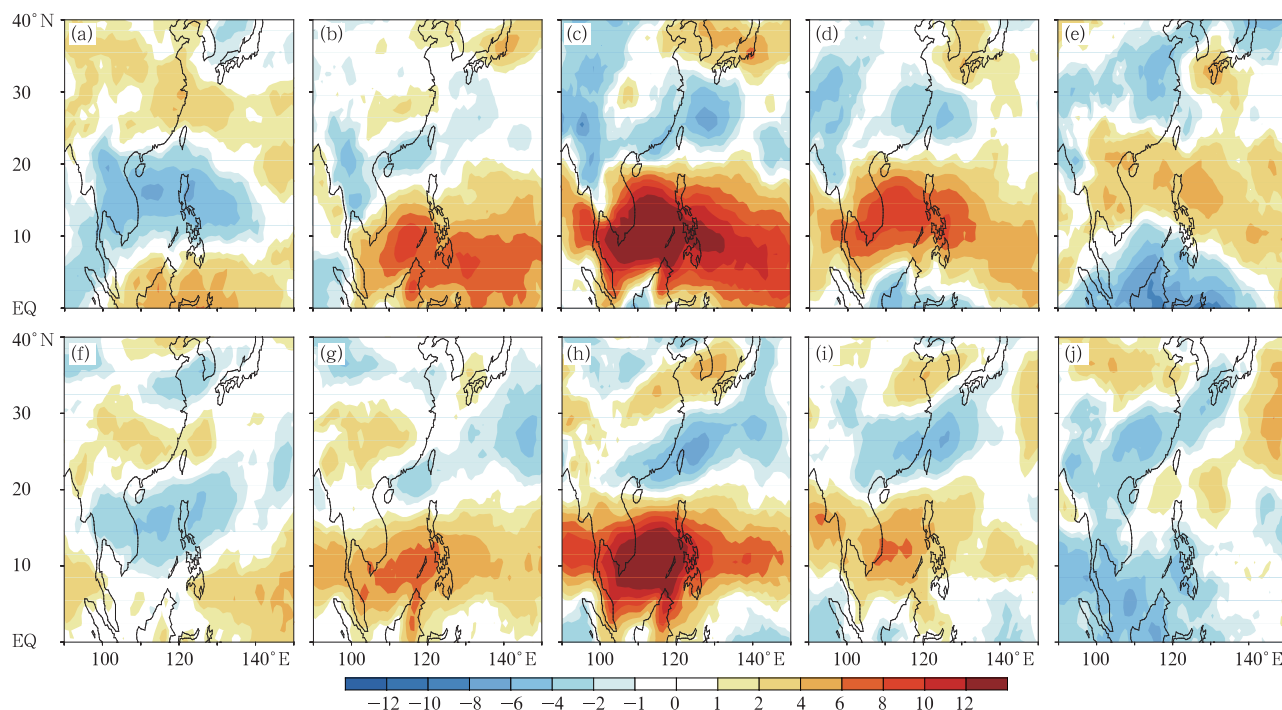


图9 10—90 d 中国南海地区射出长波辐射指数(5° — 15° N, 110° — 120° E 区域平均)与东亚季风区 10—90 d

射出长波辐射的超前滞后回归, 0 天为同时相关, lag 负(正)值代表中国南海射出长波辐射指数落后(超前)

东亚地区射出长波辐射分布。(a)—(e)强季风年, (f)—(j)弱季风年(单位: W/m^2)

Fig. 9 10–90 d OLR over the SCS (5° – 15° N, 110° – 120° E) regressed onto 10–90 d OLR over the East Asian monsoon regions. 0 day indicates the simultaneous correlation. Lag negative (positive) days represent that the SCS OLR index lags (leads) the OLR distributions over East Asia. (a) – (e) for strong monsoon years, (f) – (j) for weak monsoon years (unit: W/m^2)

平均环流保留较多动能,有利于季节平均环流增强;而中国南海北部及菲律宾海一带的季风环流失去较多能量促进高频和低频扰动成长,直接影响中国南海一带台风和季节内振荡的活动。图8为热带气旋生成频次的分布,与能量诊断的结果一致,中国南海季风偏强的年份(图8a),中国南海北部及菲律宾海一带热带气旋活跃,而在中国南海南部的热带气旋生成数目较少(图8c)。中国南海季风的增强也有利于由中国南海地区向北传播的季节内振荡发展(图9a—e),与弱季风年相比(图9g—j),中国南海地区的季节内振荡对流在强季风年较强,具有明显的向北传播,波动的纬向空间尺度较大,波列结构由中国南海—华东—日韩一带延伸(图9c);弱年时,波列尺度较小,显示出中国南海—华南—华北的波列结构(图9h)。此结果显示,中国南海季风(季节平均环流)与季节内振荡扰动的相互作用,可能会进一步加强季节内振荡的向北传播,进而影响中国东部的气候变化(Li, et al, 2001; 李崇银等, 2007)。

5 再分析资料的对比

以上的诊断结果是基于 ERA-Interim 数据,考虑到再分析资料可能存在不确定性,利用另一套资料(NCEP/NCAR)重复所有的计算和分析,检验结论的一致性。图10展示了NCEP/NCAR再分析资料中强、弱季风年低层季风平均动能、CK项、CA项的变化。与 ERA-Interim 的结果相似,强季风年,低层季风平均动能于强西风急流区明显增强(图10a),孟加拉湾、中南半岛及中国南海西南部为CK项正差值,可以维持西风的增强(图10b),而在中国南海北部和西北太平洋一带,大气加热和上升运动的共同作用(CA项)为主要能量来源(图10c)。图11a—c比较了扰动动能与季节平均环流不同分量的相互作用,与 ERA-Interim 结果一致,CK1 和 CK2 项为强西风的能量来源,季风槽区则是有较多的季风平均动能转换给扰动成长。进一步分析不同扰动与季风相互作用的贡献(图12),结果显示,在

强西风区,季节内振荡动量通量与季风涡度场的相互作用(CK2_L)对平均环流差值的维持十分重要(图 12a);中国南海北部的季风槽的辐合、气旋性涡度与高频、低频扰动通量相互作用均有利于能量转换给

扰动场(图 12b)。以上结果皆与 ERA-Interim 一致,进一步说明本研究并非依赖数据,因此结论具有一定的可信度。

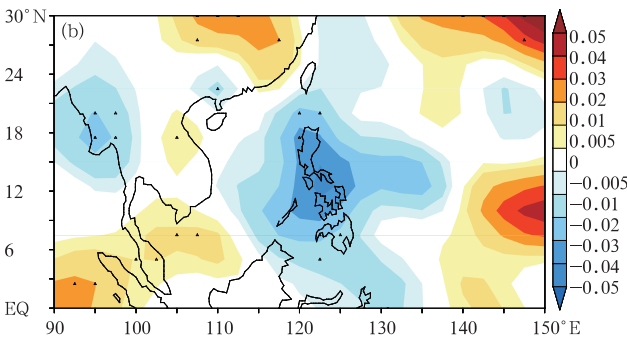
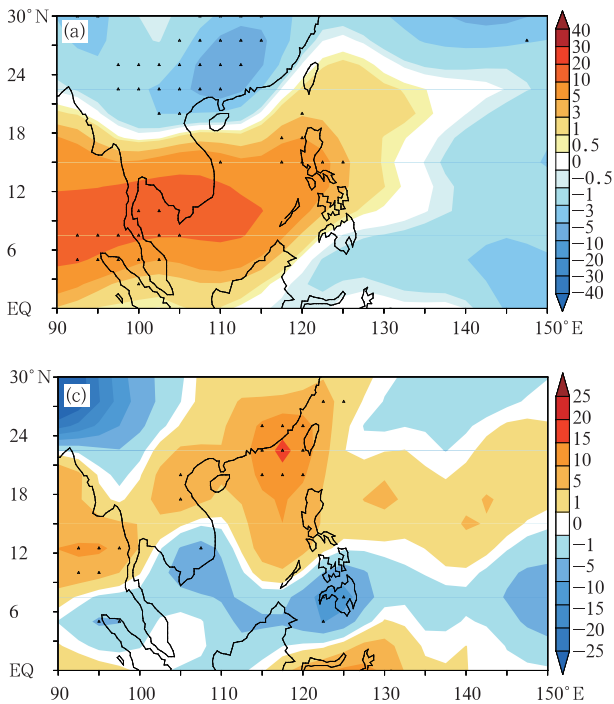


图 10 (a) — (c) 分别同图 3c、4c、4f, 但使用的是 NCEP/NCAR 再分析资料
Fig. 10 (a) — (c) Same as Figs. 3c, 4c, 4f, respectively, but derived from the NCEP/NCAR reanalysis data

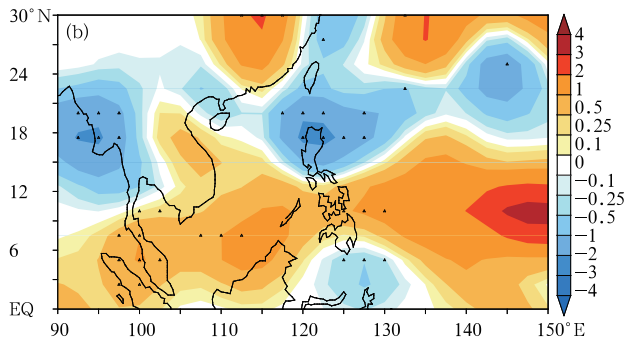
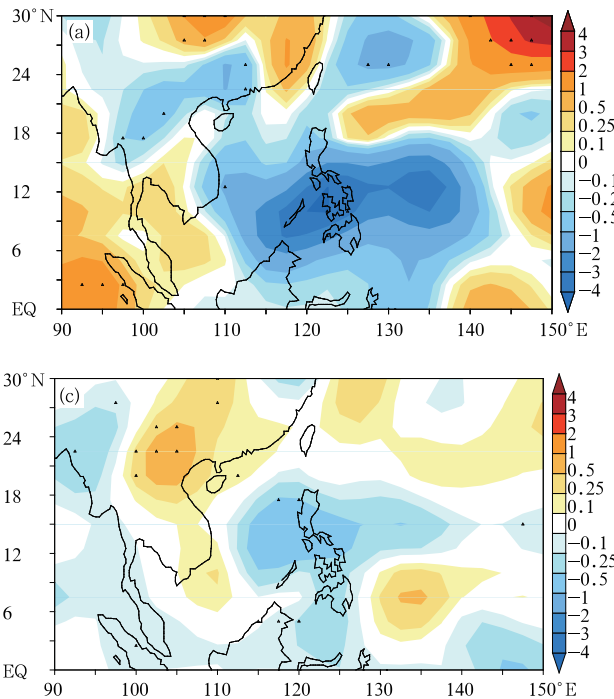


图 11 同图 5,但使用的是 NCEP/NCAR 再分析资料
Fig. 11 Same as Fig. 5 but derived from the NCEP/NCAR reanalysis data

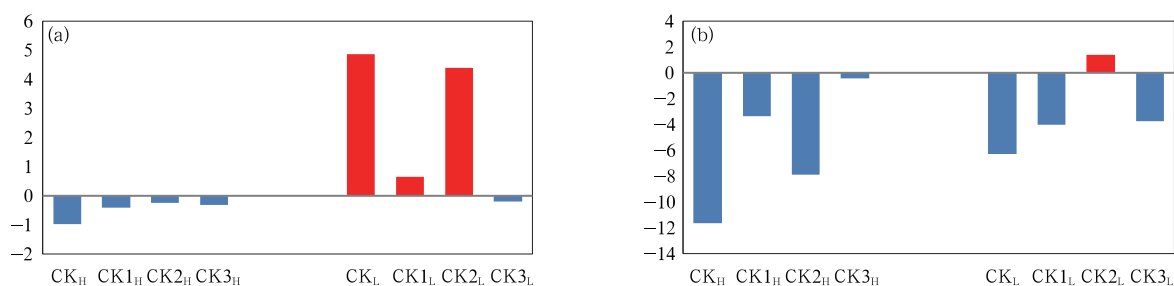


图 12 同图 7,但使用的是 NCEP/NCAR 再分析资料

Fig. 12 Same as Fig. 7 but derived from the NCEP/NCAR reanalysis data

6 结 论

中国南海夏季风存在多重尺度系统,包含季节平均季风环流、季节内振荡、高频天气尺度系统,各尺度系统呈现明显的年际变化,系统间存在复杂的相互作用。本研究利用 ERA-Interim 和 NCEP/

NCAR 两套再分析资料,通过平均动能收支方程的诊断,定量探讨了大气内部多尺度相互作用及大气加热—垂直运动共同作用等过程对中国南海夏季风环流强度年际变化的相对贡献。主要发现总结于示意图(图 13)。

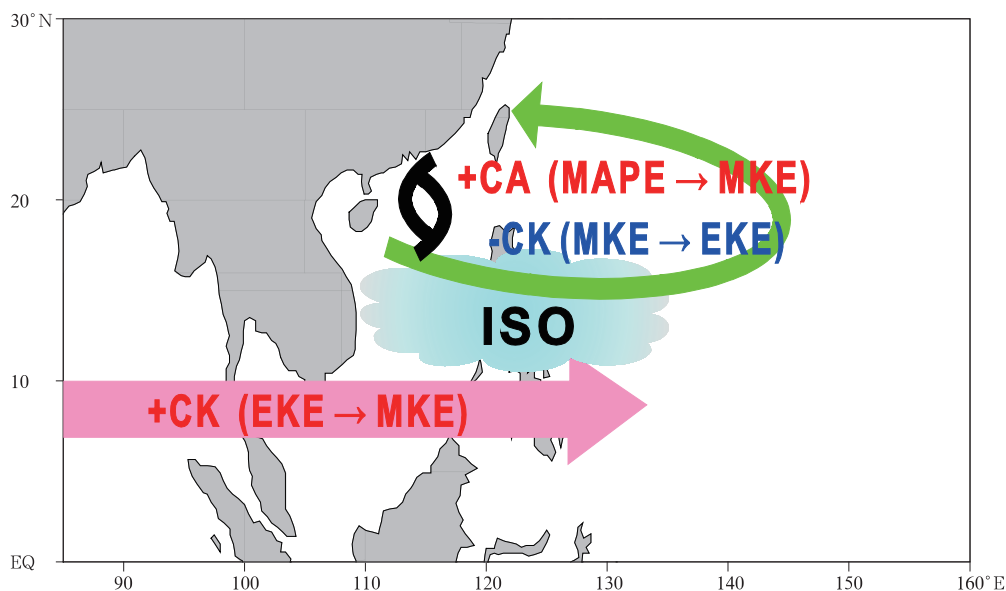


图 13 中国南海季风尺度相互作用年际变化(强、弱季风年的差异)示意图

Fig. 13 Schematic diagram for the interannual variability (strong minus weak monsoon years) of scale interaction in the SCS summer monsoon

中国南海夏季对流活动活跃的年份(强季风年),南亚季风区西风增强,沿 5° — 15° N 自中南半岛、中国南海南部至西太平洋一带为西风差值盘踞,季风平均动能于中国南海南部显著增大,西风差值最强的区域出现在菲律宾一带,因此中南半岛及中国南海南部为辐散差值区($\partial u/\partial x > 0$),赤道为反气旋性环流($\partial u/\partial x > 0$),水平扰动通量与平均流场的

相互作用显示出 CK 项正差值(扰动动能转换至季风平均动能正差值),较多的季风平均动能出现在中国南海南部,维持强西风发展的动能。中国南海季风对流偏强时,中国南海北部为气旋性环流差值,显示中国南海—西太平洋夏季季风槽加深,与中国南海南部不同,季风槽的能量来自于大气加热与垂直运动的共同作用(CA 项),强年时,季风槽区对流加

热和上升运动增强,有较多的平均有效位能转换给季风平均动能,维持气旋性环流的发展,但同时,季风槽区的大尺度背景场辐合和正涡度分量与水平扰动动量通量相互作用,产生CK项负值(季风平均动能转换给扰动动能),有利于扰动的发生和成长,进一步发现 $<10\text{ d}$ 扰动动量通量与平均流场涡度的相互作用最有利于高频扰动增长,而 $10\text{--}90\text{ d}$ 季节内振荡动量通量与平均流场散度的相互作用对季节内振荡发展有最大的贡献。因此,强季风年时,中国南海北部有较多的热带气旋生成,季节内振荡在中国南海较为活跃,纬向的波列尺度变大,向北传播信号显著。

不同于过去研究多注重于中国南海季风爆发过程及其年际变化,本研究对中国南海季风区不同尺度系统相互作用的年际变化特征及物理过程进行定量诊断。目前模式中对多重尺度相互作用特征及大气内部动力过程如何影响季风发展的模拟能力偏低,使季风的可预报性偏低(Goswami, 1998; Ajaya Monhan, et al, 2003; Kang, et al, 2006),因此,季风年际变化中大气内部作用过程的定量诊断为改进模式提供观测基础,增进理解中国南海地区季风环流特征及强度的年际变化如何影响高低频扰动(热带气旋、季节内振荡)生成和发展的机制(林爱兰, 1998; 李崇银等, 1999; Ding, 2004; Goh, et al, 2010),有助于发掘东亚季风区灾害天气的预报因子,减少中国南部沿海及东部地区的天气灾害损失。

参考文献

- 陈永利, 胡敦欣. 2003. 南海夏季风爆发与西太平洋暖池区热含量及对流异常. 海洋学报, 25(3): 20-31. Chen Y L, Hu D X. 2003. The relation between the South China Sea summer monsoon onset and the heat content variations in the tropical western Pacific warm pool region. Acta Oceanol Sinica, 25(3): 20-31 (in Chinese)
- 戴念军, 谢安, 张勇. 2000. 南海夏季风活动的年际和年代际特征. 气候与环境研究, 5(4): 363-374. Dai N J, Xie A, Zhang Y. 2000. Interannual and interdecadal variation of summer monsoon activities over South China Sea. Climatic Environ Res, 5(4): 363-374 (in Chinese)
- 丁一汇, 赵深铭, 张键. 1987. 北半球夏季全球热带和副热带200 hPa平均辐散环流的研究. 气象学报, 45(1): 120-127. Ding Y H, Zhao S M, Zhang J. 1987. Study of the global 200 hPa divergent circulations in the tropics and subtropics in summer. Acta Meteor Sinica, 45(1): 120-127 (in Chinese)
- 丁一汇, 李崇银, 柳艳菊等. 2002. 南海季风试验研究. 气候与环境研究, 7(2): 202-208. Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. 2002. South China Sea monsoon experiment. Climatic Environ Res, 7(2): 202-208 (in Chinese)
- 丁一汇, 李崇银, 何金海等. 2004. 南海季风试验研究与东亚夏季风. 气象学报, 62(5): 561-585. Ding Y H, Li C Y, He J H, et al. 2004. South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon. Acta Meteor Sinica, 62(5): 561-585 (in Chinese)
- 冯娟, 李建平. 2009. 南海夏季风变化及其与全球大气和海温的关系. 大气科学, 33(3): 568-580. Feng J, Li J P. 2009. Variation of the South China Sea summer monsoon and its association with the global atmosphere circulation and sea surface temperature. Chin J Atmos Sci, 33(3): 568-580 (in Chinese)
- 何金海, 徐海明, 周兵等. 2000. 关于南海夏秋季风建立的大尺度特征及其机制的讨论. 气候与环境研究, 5(4): 333-344. He J H, Xu H M, Zhou B, et al. 2000. Large scale features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism. Climatic Environ Res, 5(4): 333-344 (in Chinese)
- 何金海, 祁莉, 韦晋等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识. 大气科学, 31(6): 1257-1265. He J H, Qi L, Wei J, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon. Chin J Atmos Sci, 31(6): 1257-1265 (in Chinese)
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 18(2): 141-151. Huang R H, Sun F Y. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. Scientia Atmos Sinica, 18(2): 141-151 (in Chinese)
- 金祖辉, 陶诗言. 2002. 南海夏季风建立、活跃和中断期的特征. 气候与环境研究, 7(3): 267-278. Jin Z H, Tao S Y. 2002. The onset of the summer monsoon over the South China Sea and its active and break periods. Climatic Environ Res, 7(3): 267-278 (in Chinese)
- 李崇银, 穆明权. 1998. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. 大气科学, 22(4): 481-490. Li C Y, Mu M Q. 1998. Numerical simulations of anomalous winter monsoon in East Asia exciting ENSO. Chin J Atmos Sci, 22(4): 481-490 (in Chinese)
- 李崇银, 张利平. 1999. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 23(5): 257-266. Li C Y, Zhang L P. 1999. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. Chin J Atmos Sci, 23(5): 257-266 (in Chinese)
- 李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究. 大气科学, 31(6): 1049-1058. Li C Y, Pan J. 2007. The interannual variation of the South China Sea summer monsoon trough and its impact. Chin J Atmos Sci, 31(6): 1049-1058 (in Chinese)
- 李东辉, 张瑰, 朱益民等. 2006. 热带印度洋秋季偶极子模态与南海夏季风强度变化的关系. 热带气象学报, 22(5): 439-446. Li

- D H, Zhang G, Zhu Y M, et al. 2006. Relationships between autumn Indian Ocean Dipole mode and the strength of South China Sea summer monsoon. *J Trop Meteor*, 22(5): 439-446 (in Chinese)
- 梁建茵, 李春晖, 吴尚森. 2004. 2003 年我国夏季西南季风活动概况. *气象*, 30(8): 8-11. Lang J Y, Li C H, Wu S S. 2004. A review of activities of Summer Southwest Monsoon over China in 2003. *Meteor Mon*, 30(8): 8-11 (in Chinese)
- 林爱兰. 1998. 南海夏季风的低频振荡特征. *热带气象学报*, 14(2): 113-118. Lin A L. 1998. The characteristics of low-frequency oscillation over South China Sea. *J Trop Meteor*, 14(2): 113-118 (in Chinese)
- 林爱兰, 梁建茵, 李春晖. 2005. 南海夏季风对流季节内振荡的频谱变化特征. *热带气象学报*, 21(5): 542-548. Lin A L, Lang Jianyin, Li Chunhui. 2005. Spectral variation characteristics of South China Sea summer monsoon convection intraseasonal oscillation. *J Trop Meteor*, 21(5): 542-548 (in Chinese)
- 钱维宏, 丁婷, 汤帅奇. 2010. 亚洲季风季节进程的若干认识. *热带气象学报*, 26(1): 111-116. Qian W H, Ding T, Tang S Q. 2010. Some understanding of the seasonal march of Asian monsoon. *J Trop Meteor*, 26(1): 111-116 (in Chinese)
- 温之平, 黄荣辉, 贺海晏等. 2006. 中高纬大气环流异常和低纬 30—60 天低频对流活动对南海夏季风爆发的影响. *大气科学*, 30(5): 952-964. Wen Z P, Huang R H, He H Y, et al. 2006. The influences of anomalous atmospheric circulation over mid high latitudes and the activities of 30—60 d low frequency convection over low latitudes on the onset of the South China Sea summer monsoon. *Chin J Atmos Sci*, 30(5): 952-964 (in Chinese)
- 吴尚森, 梁建茵. 2001. 南海夏季风强度指数及其变化特征. *热带气象学报*, 17(4): 337-344. Wu S S, Liang J Y. 2001. An index of South China Sea summer monsoon intensity and its variation characters. *J Trop Meteor*, 17(4): 337-344 (in Chinese)
- 严蜜, 钱永甫. 2009. 南海夏季风强弱年东亚地表热力异常特征的合成研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 48(2): 124-130. Yan M, Qian Y F. 2009. Composite study of the surface thermal anomaly over the East Asia in strong and weak SCS summer monsoon years. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 48(2): 124-130 (in Chinese)
- 张勇, 谢安, 戴念军. 2004. 南海夏季风异常活动的前期特征. *热带气象学报*, 20(5): 460-471. Zhang Y, Xie A, Dai N J. 2004. Preceding features associated with the anomalous summer monsoon over the South China Sea. *J Trop Meteor*, 20(5): 460-471 (in Chinese)
- 朱乾乾, 徐国强. 2000. 1998 年夏季中国南部低频降水特征与南海低频夏季风活动. *气象科学*, 20(3): 239-248. Zhu Q G, Xu G Q. 2000. The features of LFP in South China with SCS LF summer monsoon activity in the summer of 1998. *Scientia Meteor Sinica*, 20(3): 239-248 (in Chinese)
- Ajaya Monhan R S, Goswami B N. 2003. Potential predictability of the Asian summer monsoon on monthly and seasonal time scales. *Meteor Atmos Phys*, 84(1-2): 83-100
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656): 553-597
- Ding Y H. 2004. Seasonal march of the East Asian summer monsoon. *East Asian Mons*, 2: 3-53
- Ding Y H, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview. *Meteor Atmos Phys*, 89(1-4): 117-142
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions. *J Appl Meteor*, 18(8): 1016-1022
- Goh A Z C, Chan J C L. 2010. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity in the South China Sea. *Int J Climatol*, 30(6): 827-843
- Goswami B N. 1998. Interannual variation of Indian summer monsoon in a GCM: External conditions versus internal feedbacks. *J Climate*, 11(4): 501-522
- Hsu P C, Tsou C H, Hsu H H, et al. 2009. Eddy energy along the tropical storm track in association with ENSO. *J Meteor Soc Japan*, 87(4): 687-704
- Hsu P C, Li T, Tsou C H. 2011. Interactions between boreal summer intraseasonal oscillations and synoptic-scale disturbances over the western North Pacific. Part I: Energetics diagnosis. *J Climate*, 24(3): 927-941
- Hsu P C, Yang Y. 2015. Contribution of atmospheric internal processes to the interannual variability of the South Asian summer monsoon. *Int J Climatol*, doi: 10.1002/joc.4528
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472
- Kang I S, Shukla J. 2006. Dynamic seasonal prediction and predictability of the monsoon// *The Asian Monsoon*. Berlin Heidelberg: Springer, 585-612
- Kuo H C, Chen J H, Williams R T, et al. 2001. Rossby waves in zonally opposing mean flow: Behavior in Northwest Pacific summer monsoon. *J Atmos Sci*, 58(9): 1035-1050
- Li C Y, Long Z X, Zhang Q Y. 2001. Strong/weak summer monsoon activity over the South China Sea and atmospheric intraseasonal oscillation. *Adv Atmos Sci*, 18(6): 1146-1160
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing long wave radiation dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(6): 1275-1277
- Lorenz E N. 1967. *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere*. Vienna: World Meteorological Organization, 161pp
- Murakami T, Chen L X, Xie A. 1986. Relationship among seasonal cycles, low-frequency oscillations and transient disturbances as revealed from outgoing long wave radiation data. *Mon Wea Rev*, 114(8): 1456-1465
- Qi Y J, Zhang R H, Li T, et al. 2008. Interactions between the

- summer mean monsoon and the intraseasonal oscillation in the Indian monsoon region. *Geophys Res Lett*, 35(17): L17704, doi: 10.1029/2008GL034517
- Sobel A H, Bretherton C S. 1999. Development of synoptic-scale disturbances over the summertime tropical northwest Pacific. *J Atmos Sci*, 56(17): 3106-3127
- Wang B, Huang F, Wu Z W, et al. 2009. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review. *Dyn Atmos Oceans*, 47(1-3): 15-37
- Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability and the prospects for prediction. *J Geophys Res*, 103(C7): 14451-14510
- Xu Z F, Fu C B, Qian Y F. 2009. A new index to describe the tropical Asian summer monsoon. *Sci Chin Ser D: Earth Sci*, 52(6): 843-854
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 27(2): 157-167