

汪雷, 李建平, 丁瑞强. 分层扰动位能理论及其应用——以南海夏季风的年际变化为例. 地球物理学报, 2013, 56(2): 392-408, doi:10.6038/cjg20130204.

Wang L., Li J. P., Ding R. Q. Theory on layer perturbation potential energy and its application; a case study on annual variation of the South China Sea summer monsoon. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(2): 392-408, doi:10.6038/cjg20130204.

分层扰动位能理论及其应用 ——以南海夏季风的年际变化为例

汪 雷^{1,2}, 李建平¹, 丁瑞强¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 在扰动位能(PPE)理论的基础上, 针对不同高度上局地环流能量转换问题, 本文提出了分层扰动位能(LPPE)的概念. 研究表明 850hPa 的分层扰动位能一阶矩(LPPE1)在热带地区为正, 高纬度地区为负, 200 hPa 高度 LPPE1 在北美高纬度地区出现正值分布, 100 hPa 及以上 LPPE1 热带地区为负, 高纬度为正. LPPE1 冬季半球的分布与年平均相似, 北半球夏季大陆上出现正的极大值. 在局地, LPPE1 在数值上远远大于分层扰动位能二阶矩(LPPE2)及更高阶矩, 因此, LPPE 的分布与 LPPE1 的分布相似. 南海季风区低层动能的季节变化与 LPPE 呈现反向变化关系. 相关分析表明, 南海夏季风(SCSSM)与春季的 LPPE1 偶极型分布之间存在着显著的年际(正)相关关系, 可以作为 SCSSM 强度的一个预报因子. 春季赤道印度洋、西太平洋海表温度(SST)的负(正)异常对应春季、夏季 LPPE1 的南负北正(南正北负)偶极型分布, 夏季(JJAS) LPPE1 的偶极型分布与南海季风区动能的一致增大(减小)是两者耦合模态的主导模态, 夏季南海季风区的西风增强(减弱), SCSSM 增强(减弱), 这是能量异常影响 SCSSM 的一个可能的机制.

关键词 分层扰动位能, 南海夏季风, 有效能量, 动能

doi:10.6038/cjg20130204

中图分类号 P425

收稿日期 2012-06-06, 2012-08-28 收修定稿

Theory on layer perturbation potential energy and its application: a case study on annual variation of the South China Sea summer monsoon

WANG Lei^{1, 2}, LI Jian-Ping¹, DING Rui-Qiang¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the theory of Perturbation Potential Energy (PPE), at the issue of energy transform at any isobaric surface in local circulation, the concept of Layer perturbation potential energy (denoted as the LPPE) is presented. The first-order moment term of LPPE (denoted as LPPE1) is positive over the tropics and negative over high-latitude regions in the low and middle troposphere. It is positive over high-latitude of North American at 200hPa, but is positive over the high-latitude and negative over the tropics at 100 hPa and higher isobaric surface. The distributions of the LPPE1 in the winter hemisphere is quite similar to that of the annual mean,

基金项目 国家自然科学基金重点项目 41030961, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950400, 及国家海洋局项目资助.

作者简介 汪雷, 男, 博士研究生, 主要从事有效位能理论与季风研究. E-mail: wanglei@mail.iap.ac.cn

* **通讯作者** 李建平, 男, 博士, 研究员, 主要从事气候学、季风、非线性动力学、数值计算等方面的研究. E-mail: ljpl@lasg.iap.ac.cn

and the LPPE1 is featured by maxima over the Continent in the summer hemisphere. Locally, as the LPPE1 is superior to the second-order (denoted as LPPE2) and high-order ones in order of magnitude, the distributions of the LPPE are quite similar to the LPPE1. The analyses show that there is a significant negative correlation between the LPPE and kinetic energy at 850hPa over the South China Sea Summer Monsoon (denoted as SCSSM) region. There is a significant positive correlation between the SCSSM index (denoted as SCSSMI) and the out-of-phase pattern of LPPE1 in the prior spring which is a substantial relation, the later could be taken as an indicator of the SCSSM variation. The spring sea surface temperature anomalies (denoted as SSTA) over Indian Ocean are closely related to the out-of-phase relationship between anomalies in the tropical oceans and those in the extra-tropical Asian Continent of LPPE1 in spring and JJAS. The out-of-phase relationship of LPPE1 and coherent distribution of Kinetic Energy over SCSSM region are the dominant pattern of their coupled modes, westerly wind increases over the SCSSM region while Kinetic Energy increases, further influences the SCSSM.

Keywords Layer perturbation potential energy, South China Sea summer monsoon, Available potential energy, Kinetic energy

1 引言

大气的运动形成了地球上的各种天气现象,由于摩擦的存在,大气不断消耗动能,因此需要从外界获得能源.大气的总能量包括动能、内能和势能(两者之和称全位能),动能和全位能之间可以互相转化,实际上全位能向动能的转化率很小^[1-2],为此需要一个可以表征绝热条件下向动能转化的有效能量,从而在能量的框架下探讨天气系统(如台风等)和大气环流(如季风环流等)的发展演变.

首先提出有效能量概念的是 Margules^[3],将可以转化为动能的那部分能量称为“有效动能”.在此基础上,Lorenz^[1]提出了有效位能的概念,这引起了大气环流的能量学深入研究.此后,有效位能的概念得到了很大的发展,Mieghem^[4]定义了新形式的有效位能,允许引入不同的参考状态,但是最优参考状态的选择极其复杂,Dutton等^[5]研究了非静力条件下的有效位能.有效位能受地形和水汽的影响也得到了进一步研究^[6-15].前人研究中的有效位能是对全球平均而言,反映了全球积分的全位能向动能转化的最高上限^[16],但是有效位能理论不能用来处理区域能量转换问题,李建平等^[17]提出了扰动位能(PPE)理论,克服了传统理论将全球大气作为整体的应用限制,提出了考察局地能量有效性和局地大气能量转换的新概念,便于研究区域天气气候的变化^[18-19].分析表明,在局地上,扰动位能一阶矩(PPE-1)在数值上远远大于二阶矩(PPE-2),传统的

有效位能在数值上等于 PPE-2 的全球平均,有效位能是全球大气整体的转化效率,有效位能在局地的应用(数值上等于 PPE-2)是不合适的,因为局地上 PPE-2 相比 PPE-1 是小量,只占总能量的很小一部分,综上所述,研究局地的能量问题,需要使用扰动位能的概念.

季风是地球气候系统中一个重要组成部分,表现为从冬到夏风向的季节转变^[20],季风爆发的早晚和强弱影响着大范围的天气和气候^[21],因此季风的预测非常重要.亚洲季风由南亚季风和东亚季风组成^[22],南海夏季风(SCSM)的爆发标志着东亚夏季风(EASM)区域大尺度环流的季节转换^[23].不同学者定义了很多南海夏季风爆发时间指数和强度指数^[23-41],不同的季风指数对于季风的表征存在差别,由于这些指数是根据特定区域的情况构造,无法对不同季风区进行比较,李建平等^[42-45]采用动态环流标准化季节变率构造了统一的季风指数,本文将使用该指数研究南海夏季风的特征.季风的成因及其影响因子有很多研究,曾庆存等^[46]指出热带季风主要由行星尺度热对流和准定常行星波两大推动力驱动.Wang and Fan^[47]的研究表明亚洲夏季风的两个主要热源分别位于孟加拉湾—印度—阿拉伯海和南中国海—菲律宾海.毛江玉等^[48]指出南海和西太暖池 SSTA 异常影响南海夏季风的爆发.冯娟等^[49]分析了印度洋海温对南海夏季风强度的影响.Ding等^[50]探讨了东亚夏季风和热带印度洋海温的年代际变化.Wu^[51]等分析了北大西洋海温异常在联系春季 NAO 和东亚夏季风的作用.李建平等^[52]等系统

研究了亚印太交汇区海气相互作用对东亚夏季风的影响。

夏季风的强弱受到热源的支配,从能量学的角度考察季风的强度等特征非常必要,不同天气现象有不同的垂直结构特征,如季风的风向转变在大气高低层的反映并不一致,这需要考察局地、不同高度上的能量收支和转化特征. 本文对南海夏季风强度的年际变化与能量之间的关系开展研究,在扰动位能的基础上,引入分层扰动位能(LPPE)的概念,探讨其时空分布特征以及与大气动能(K_E)之间的可能联系,研究 LPPE 与南海夏季风(SCSSM)强度的年际变化之间的关系,考察 LPPE 与动能之间的关系及前期海温异常对 LPPE 的影响,在此基础上分析 LPPE 影响 SCSSM 的可能机制.

2 资料、理论和指数介绍

本文使用的资料主要包括:

(1)1948—2010 年 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)提供的月平均再分析资料^[53],分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层,本文使用的气候平均值均是 1961—2000 年 40 年平均.

(2)1948—2010 年 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)提供的逐月海面温度(ERSST.v3)^[54],水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$.

(3)1958—2010 年 WHOI OaFlux project 提供的全球海洋热通量数据^[55],来自(ftp.whoiedu/pub/science/oaflux/data_v3.),水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$.

李建平等^[17]提出了扰动位能(PPE)的新理论,探讨了大气参考状态遵循的物理约束^[56],推导得到 PPE 的数学表达式为

$$P'_{Li} = \frac{p_{00}^{(i-1)\kappa} \prod_{j=0}^{i-1} (1+\kappa-j)}{i!r_d(1+\kappa)} \int_0^{p_s} \frac{T'^i}{p^{(i-1)(1+\kappa)}} \left(-\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}\right)^{-i+1} dp, \quad (1)$$

其中第一阶矩与第二阶矩的表达式为

$$P'_{A1} = \frac{1}{r_d} \int_0^{p_s} T' dp, \quad (2)$$

$$P'_{A2} = \frac{\kappa p_{00}^\kappa}{2r_d} \int_0^{p_s} \frac{T'^2}{p^{1+\kappa}} \left(-\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}\right)^{-1} dp. \quad (3)$$

扰动位能二阶矩的全球平均恰好等于传统的有效位能,扰动位能的分布在局地与其一阶矩的情形相似,很多区域一阶矩要比二阶矩大一个量级.

选用的指数为李建平等^[43-44]提出的南海夏季风指数

$$\delta = \frac{\|\bar{\mathbf{V}}_1 - \bar{\mathbf{V}}_{m,n}\|}{\|\bar{\mathbf{V}}\|} - 2, \quad (4)$$

其中 $\bar{\mathbf{V}}_1$ 是 1 月气候平均风矢量, $\bar{\mathbf{V}}$ 是 1 月和 7 月气候平均风矢量的平均, $\bar{\mathbf{V}}_{m,n}$ 是某年(n)某月(m)的月平均风矢量,该指数反映了环流季节变动强度. 选取的南海季风区域是(0°N — 25°N , 100°E — 125°E). 本文选取 925 hPa 风场资料计算南海夏季风指数(SCSSMI),除非特别指出,本文中夏季均指 JJAS.

3 分层扰动位能(LPPE)及其表达

李建平等^[17]给出了 PPE 的数学表达式,本文考虑气压 p_1 和 p_2 之间的能量 LPPE,只需将积分的上下限改变为 p_1 和 p_2 可得 LPPE 的表达式

$$P'_{Li} = \frac{p_{00}^{(i-1)\kappa} \prod_{j=0}^{i-1} (1+\kappa-j)}{i!r_d(1+\kappa)} \int_{p_2}^{p_1} \frac{T'^i}{p^{(i-1)(1+\kappa)}} \left(-\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}\right)^{-i+1} dp, \quad (5)$$

由此可见,对于整层大气来说,LPPE 等价于 PPE. 为考察 LPPE 各阶矩的特征,计算了逐月 LPPE 全球面平均值,由于在垂直方向上 LPPE 的数值在低层大于高层,所以以 850 hPa 为例进行分析(见表 1),类似于 PPE(表略),二阶以上的 LPPE 相对于

表 1 1961—2000 年全球平均 850 hPa 大气分层扰动位能第二到第五阶矩的计算值(单位: 10^6 J)

Table 1 Calculated values from the second to fifth-order moment terms of 850 hPa atmospheric layer perturbation potential energy averaged over the globe for the period of 1961—2000 (units: 10^6 J)

850 hPa				
月份	二阶矩 (LPPE2)	三阶矩 (LPPE3)	四阶矩 (LPPE4)	五阶矩 (LPPE5)
一月	0.55	0.03	0.01	0.00
二月	0.6	0.04	0.01	0.00
三月	0.65	0.05	0.02	0.01
四月	0.65	0.07	0.04	0.02
五月	0.62	0.07	0.04	0.03
六月	0.6	0.07	0.04	0.03
七月	0.62	0.08	0.05	0.03
八月	0.65	0.09	0.05	0.03
九月	0.63	0.07	0.04	0.02
十月	0.57	0.04	0.02	0.01
十一月	0.52	0.03	0.01	0.00
十二月	0.52	0.03	0.01	0.00
年平均	0.6	0.06	0.03	0.02

分层扰动位能二阶矩(LPPE2)来说是小量,简单起见,可以被忽略.全球面平均的能量特征让我们对LPPE各阶矩有了初步的整体认识,在实际的研究应用中,本文更加关注局地的能量特征对于认识区域的天气、气候特征的作用,接下探讨LPPE的时空分布特征.

4 分层扰动位能(LPPE)的时空结构

大气热源有不同的时空特征,下垫面的性质千差万别,所以,能量收支具有很明显的局地特征,研究局地能量收支首先要考察LPPE的时空分布特征,本文研究了不同高度上的LPPE全球分布和季节变化特征.

4.1 LPPE的全球分布

图1给出了带面积加权的年平均850 hPa分层

扰动位能的一阶矩(LPPE1)、二阶矩及它们总和的全球分布.从图可见LPPE1呈现较明显的纬向带状分布特征,在赤道及低纬度地区为正而在中高纬地区为负,且大体以南北纬 35° 为界.这种分布表明,赤道及低纬度地区为850 hPa LPPE1的源区,而在中高纬地区为其汇区,这与太阳净辐射的南北分布密切相关.纬向偏差场上仍可见纬向上有较清楚的结构(图1b),即在北半球中高纬地区表现出波数为2的波状分布,两个槽分别位于亚洲大陆和北美大陆的东面,两个脊分别位于欧洲和北美的西面.在南半球副热带地区呈现出波数为3的波状分布,三个脊分别位于南非、澳大利亚和南美上空,三个槽分别位于印度洋、太平洋和大西洋上;在南半球中高纬地区则表现出1波的分布特征.850 hPa LPPE1的纬向分布特征与整层大气气候态年平均PPE-1的分布特征^[17]十分相似.

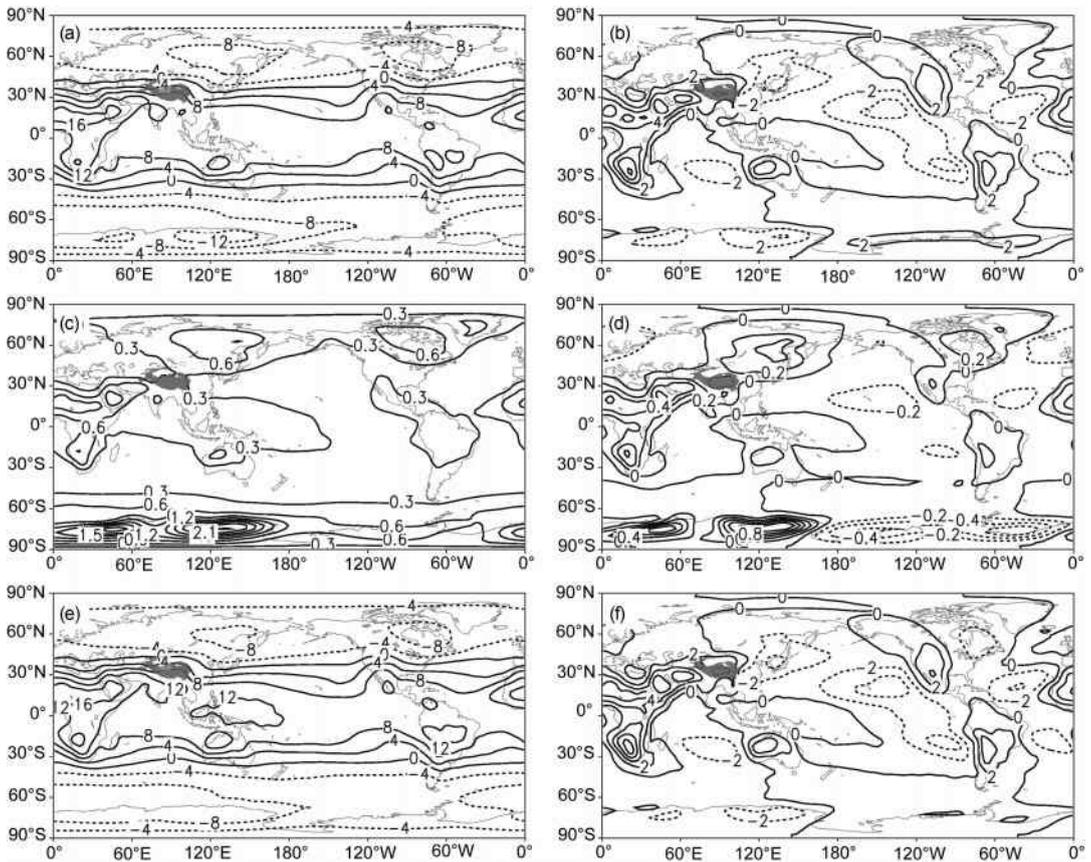


图1 1961—2000年带面积加权的年平均850 hPa大气分层扰动位能(a、c、e)及其纬偏场的全球分布(b、d、f):(a)与(b)是一阶矩;(c)与(d)是二阶矩;(e)与(f)是一阶矩项和二阶矩项的总和.a—f的等值线间隔分别为4, 2, 0.3, 0.2, 4, 2 (单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 1 Global distribution of 850 hPa area-weighted atmospheric layer perturbation potential energy(a, c, e) and its departure from zonal mean(b, d, f) for annual-mean conditions; (a) and (b), the first-order moment term; (c) and (d), the second-order moment term; (e) and (f), the sum of the first two-order moments. The contour intervals are 4, 2, 0.3, 0.2, 4, 2 (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) in (a)–(f), respectively

从年平均 850 hPa LPPE2 的全球分布(图 1c)可见,其值为恒正,与 LPPE1 相比数值上小的多,纬向带状分布特征不像 LPPE1 那么明显. 分层 LPPE2 在中纬度是小值,赤道和高纬地区为大值. LPPE2 的纬向偏差场来看(图 1d),在北半球和南半球的中高纬地区分别表现出 2 波和 1 波的结构,但位相与 LPPE1 的相反;在热带和副热带地区,LPPE2 与 LPPE1 的结构相似. 850 hPa LPPE2 的特征与整层大气 PPE-2(图略)的特征相似. LPPE 的全球分布(图 1e、f)基本上与 LPPE1 的分布形势相似,因为在数值上 LPPE1 比 LPPE2 大很多,所以,在研究局地能量学问题中,必须考虑 LPPE1 的作用.

年平均 500 hPa LPPE 的分布特征(图略)与 850 hPa 的分布特征基本相似,但对于赤道及低纬度来说,500 hPa LPPE 的纬向偏差结构较为复杂. 这是否与低纬度、高纬度大气斜压性的不同有关,值得进一步探讨. 200 hPa LPPE1(图略),低纬度和南

半球呈现带状分布特征. LPPE1 在北半球中、高纬度地区,均呈现 1 波的结构,但中、高纬位相相反,在高纬,槽位于欧亚大陆,脊位于太平洋及北美大陆. 与中低层大气形成鲜明对比的是,200 hPa LPPE1 在北美高纬地区为正值,通过西北太平洋地区的正值与低纬度的正值分布连接起来. 100 hPa LPPE1(图略)在赤道及低纬度地区为负,中高纬度地区为正. LPPE2 在北半球中亚、大西洋有极大值. 纬向偏差场在高纬度呈现 1 波的结构,东半球为脊,西半球为槽.

4.2 LPPE 的季节变化

LPPE 具有明显的季节变化. 无论是 LPPE1 还是 LPPE2 都是冬半球的分布与年平均的情形相似. 在北半球冬季时,850 hPa LPPE1 的最大中心分别位于南非、澳大利亚和南美等南半球副热带的大陆上(图 2a),在北半球夏季时,最大中心移到北半球的副热带大陆上(图 2b),其中伊朗高原和非洲撒

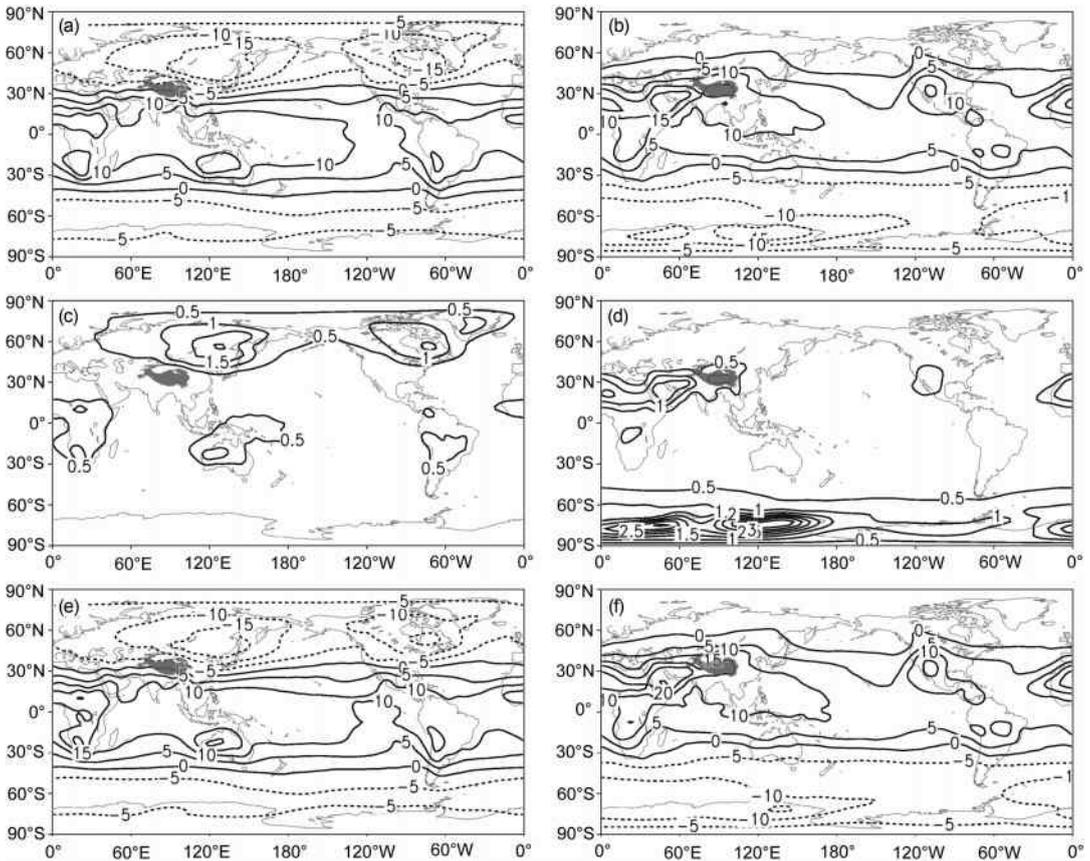


图 2 12—2 月(a、c、e)和 6—8 月(b、d、f)平均的带面积加权的气候态 850 hPa 大气层扰动位能的分布:(a、b)一阶矩项;(c、d)二阶矩项;(e、f)一阶矩项和二阶矩项的总和,a—f 的等值线间隔分别为 5, 5, 0.5, 0.5, 5, 5 (单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
 Fig. 2 Global distribution of area-weighted 850 hPa atmospheric layer perturbation potential energy for Dec-Feb (DJF) mean (a, c, e) and Jun-Aug (JJA) mean (b, d, f): (a) and (b), the first-order moment term; (c) and (d), the second-order moment term; (e) and (f), the sum of the first two-order moments; The contour intervals are 4, 2, 0.3, 0.2, 4, 2 (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) in (a)-(f), respectively

哈拉上空的增强最为显著。850 hPa LPPE1 的零线在北半球冬季时,分别位于约 30°N 和 40°S 附近,在北半球夏季时则分别移到 50°N 和 30°S 附近,这与太阳辐射的季节变化有关。850 hPa LPPE1 的南北零线随季节移动幅度的不对称性可能与南半球的海洋面积远远大于北半球有关。高纬度地区 LPPE1 的数值在冬半球要比夏半球大很多。从 LPPE1 的纬向偏差场上(图略)可见,北半球随季节改变其槽脊位置有显著的纬向移动,冬夏槽脊的位置大致位相相反;与此不同的是,南半球槽脊的位置变化很小,仅强度有所变化。

在热带和副热带地区,850 hPa LPPE2 的结构在北半球冬季时相对赤道对称,最大中心位于非洲、澳大利亚和南美(图 2c),在北半球夏季时其分布是非对称的,最大中心在北半球的副热带大陆上(图 2d),其中最强中心位于伊朗高原、青藏高原和非洲。在高纬度地区,LPPE2 在冬半球要比夏半球大很多。LPPE2 的纬向偏差场显示(图略),北半球由冬至夏槽脊中心由高纬向低纬移动,南半球副热带的槽脊中心的强度减弱,高纬地区增强。LPPE1、LPPE2 之和的分布特征与 LPPE1 的分布基本一致。

500 hPa LPPE1 的分布特征及纬偏场与 850 hPa 的情形非常相似,不同的是 500 hPa 上纬向带状分布特征更加明显,LPPE2 在数值上要小一些。200 hPa LPPE1,在南半球有明显的带状分布特征,夏半球赤道地区基本上为正值,其余地区为负值;北半球冬季脊位于太平洋,槽位于亚欧大陆和大西洋,夏季脊位于亚欧大陆,槽位于太平洋和大西洋,南半球来说没有显著的槽脊分布。200 hPa LPPE2 的分布特征与中低层大气相似,在冬半球数值要大于夏半球。LPPE1、LPPE2 之和的分布特征与 LPPE1 的分布一致。

半球平均的 850 hPa LPPE 的季节变化是显著的,但全球平均的季节变化不明显。LPPE1 北半球的平均值在夏季为正,冬季为负,南半球与之相反。LPPE2,北半球在冬季有大值,夏季为小值。中高层大气来说,LPPE 的季节变化特征基本一致,不同的是 200 hPa LPPE2,由于南、北半球的 LPPE2 均在夏季有大值,全球平均的 LPPE2 的季节变化,表现为在夏季有最大值。

5 分层扰动位能(LPPE)与动能之间的联系

天气系统的发展消亡伴随着能量的增长和衰

减,LPPE 和动能是局地能量环流的重要部分,LPPE 的分布具有明显的区域差异以及季节演变特征,研究动能的时空分布以及局地上 LPPE 和动能的关系对于揭示局地天气、气候的特征具有重要的意义。

850 hPa 年平均大气动能的分布(图 3a),在低纬度和中纬度分别有极大值中心,低纬度地区反映了季风环流和低纬度信风的存在,对于中东太平洋高值在赤道并向两侧递减,印度洋赤道为极小并向两侧递增,这是由于低纬度太平洋年平均为东风,低纬度印度洋在南、北半球分别为东风和西风;中纬度地区,由于南半球海洋的均匀分布形成连续的高值带,北半球则有 2 个极大值中心,一个位于日本以东的西北太平洋上空,另一个位于北美东部的大西洋。对于冬季和夏季的情形(图 3b, 3c),动能在冬半球的分布与年平均的相似,同一地区动能在冬季要比夏季大很多。从动能夏季和冬季之差可见,差别最显著的是在阿拉伯海、孟加拉湾及南亚地区的增大,中纬度急流区和赤道太平洋的减小。对比 850 hPa LPPE1 的夏季和冬季的差,LPPE1 在北半球中高纬度增加,最显著的是亚洲东部和北美。500 hPa 大气动能的分布(图略)与整层大气动能分布(图略)形势相似,中纬度具有极大值,南半球中纬度地区 80°E—120°W 之间分裂成南北两个高值带。冬夏差别最大的是冬半球急流的增强,尤其是北半球。500 hPa LPPE1 的季节差异与动能的正好相反。200 hPa 的大气动能的分布(图略)与 500 hPa 相似,不同的是南半球中纬度整个纬圈呈现连续的高值带。这说明整层大气动能(图略)在南半球的高值带分裂主要是中层的特征,这种现象值得进一步研究。

850 hPa 全年及冬夏平均的大气动能的纬向平均分布(图 4a)可以看出,大气动能在全球呈现三峰结构,在中纬度和赤道有极大值,赤道的极值是低层特有的,在整层大气动能的分布(图略)中不存在。850 hPa 动能的季节变化在不同的纬度具有正负振荡的特征,LPPE1 的季节变化与动能的季节变化存在反向变化关系(图 4b),LPPE2 的季节变化与动能不存在这种关系。500 hPa 大气动能的纬向平均分布与整层大气动能(图略)的分布相似,在夏季呈双峰分布,冬季呈单峰分布,并且北半球的季节变化远大于南半球,纬向平均动能的结构在季节上的差异与 LPPE1 反位相。200 hPa 大气动能的纬向平均分布仅在北半球夏季为双峰分布,极值在 10°N 和 45°N 附近,其他均呈单峰分布,极大值在中纬度,北

半球的季节变化稍大于南半球的季节变化. 南海季风区区域平均 ($0^{\circ}\text{N}-25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$) 的 (图 5) 850 hPa 动能在夏季和冬季分别有极大值, 春季和秋季转换季节有极小值, LPPE1 在冬季和夏季分

别有极小值, 春季和秋季有极大值, LPPE1 与动能季节变化反位相. LPPE2 的季节变化特征与 LPPE1 类似, 量级要小 2 个量级. 下一步本文将探讨 LPPE1 与 SCSSM 之间的关系.

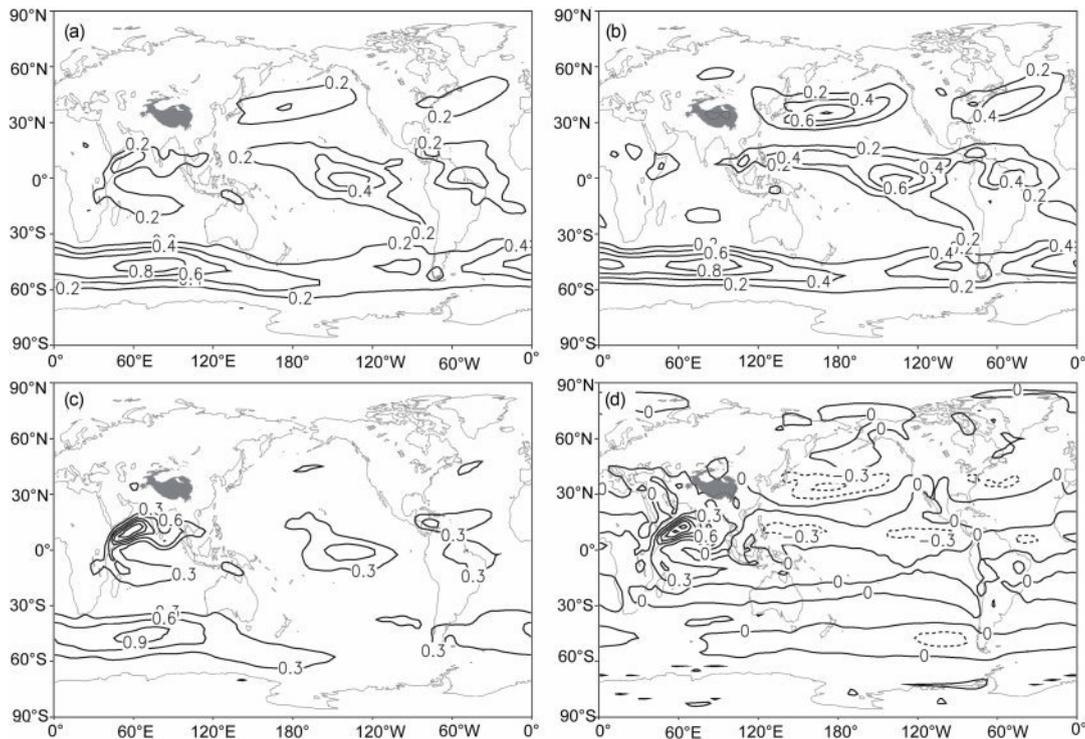


图 3 850 hPa 大气动能的分布

(a) 年平均; (b) 冬季; (c) 夏季; (d) 夏季与冬季的差. a-d 等值线间隔分别为 0.2, 0.2, 0.3, 0.3 (单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$).

Fig. 3 Distribution of 850 hPa atmospheric kinetic energy

(a) Annual mean; (b) winter; (c) summer; (d) summer-winter difference. Contour intervals are 0.2, 0.2, 0.3, 0.3 in (a)-(d), respectively (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$).

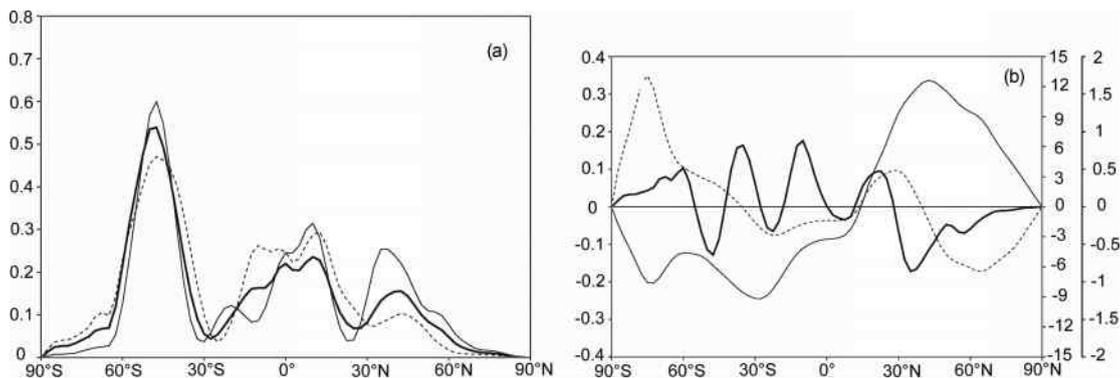


图 4 (a) 全年(粗实线)、12—2 月(细实线)和 6—8 月(虚线)平均的带面积加权的气候态 850 hPa 大气动能的纬向分布 (单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$); (b) 850 hPa 大气总动能(粗实线, 左边纵坐标)、分层扰动位能一阶矩(细实线, 次右边纵坐标)和二阶矩(虚线, 最右边纵坐标)的夏季与冬季之差的纬向平均分布(单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 4 (a) Zonal mean distribution of 850 hPa kinetic energy for annual mean (thick solid line), DJF mean (thin solid line) and JJA mean (dashed line) (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$); (b) zonal mean distribution of differences between winter and summer for 850 hPa atmospheric kinetic energy (thick solid line, left coordinate), the first-order moment term (thin solid line, sub-right coordinate) and the second-order moment term (dashed line, right coordinate) of 850 hPa atmospheric layer perturbation potential energy (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)

6 南海夏季风(SCSSM)强度与分层扰动位能(LPPE)

南海季风区平均能量的季节循环特征表明, LPPE1 与动能有反位相的变化关系, SCSSM 的强弱影响着大范围的天气和气候异常, LPPE1 与 SCSSM 的年际变化特征研究有助于增进对 SCSSM 特征的认识, 并为 SCSSM 强度的预测提供一个新的因子。

6.1 LPPE1 偶极型分布对 SCSSM 的预测

为了研究 SCSSM 与 LPPE1 的关系, 计算了 850 hPa 春、夏 LPPE1 与 SCSSMI 的超前和同期相关。SCSSMI 与夏季(JJAS) 850 hPa LPPE1 的同期相关分布图可以看出(图 6d), 显著负相关区域主要是东印度洋延伸到菲律宾海、赤道大西洋和南半球高纬度海洋, 正相关区分布在亚洲东部大陆以及北美西部大陆。在强(弱)的 SCSSM 时, 东印度洋延伸到菲律宾海的区域 LPPE1 减小(增大), 亚洲东部大陆的 LPPE1 增大(减小), 加大(减小)了能量经向梯

度对比。为深入考察能量与 SCSSMI 的关系, 给出了 SCSSMI 与春季 3—5 月的 850 hPa LPPE1 超前

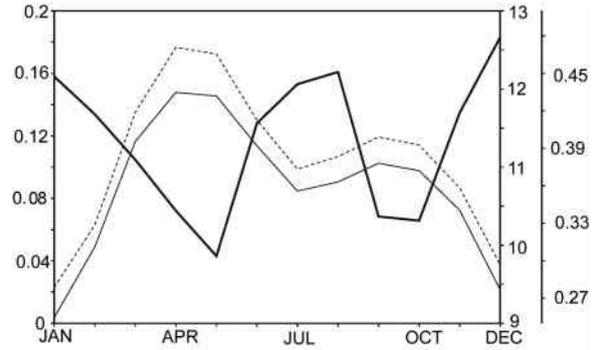


图 5 850 hPa 区域平均($0^{\circ}\text{N}-25^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$)的大气动能(粗实线, 左边纵坐标), 分层扰动位能一阶矩(细实线, 次右边纵坐标), 分层扰动位能二阶矩(细虚线, 最右边纵坐标)的季节变化(单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 5 Seasonal variations of regional-averaged 850 hPa atmospheric kinetic energy (thick solid line, left coordinate), the first-order moment term (thin solid line, sub-right coordinate) and second-order moment term of layer perturbation potential energy (units: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$); region ($0^{\circ}\text{N}-25^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$)

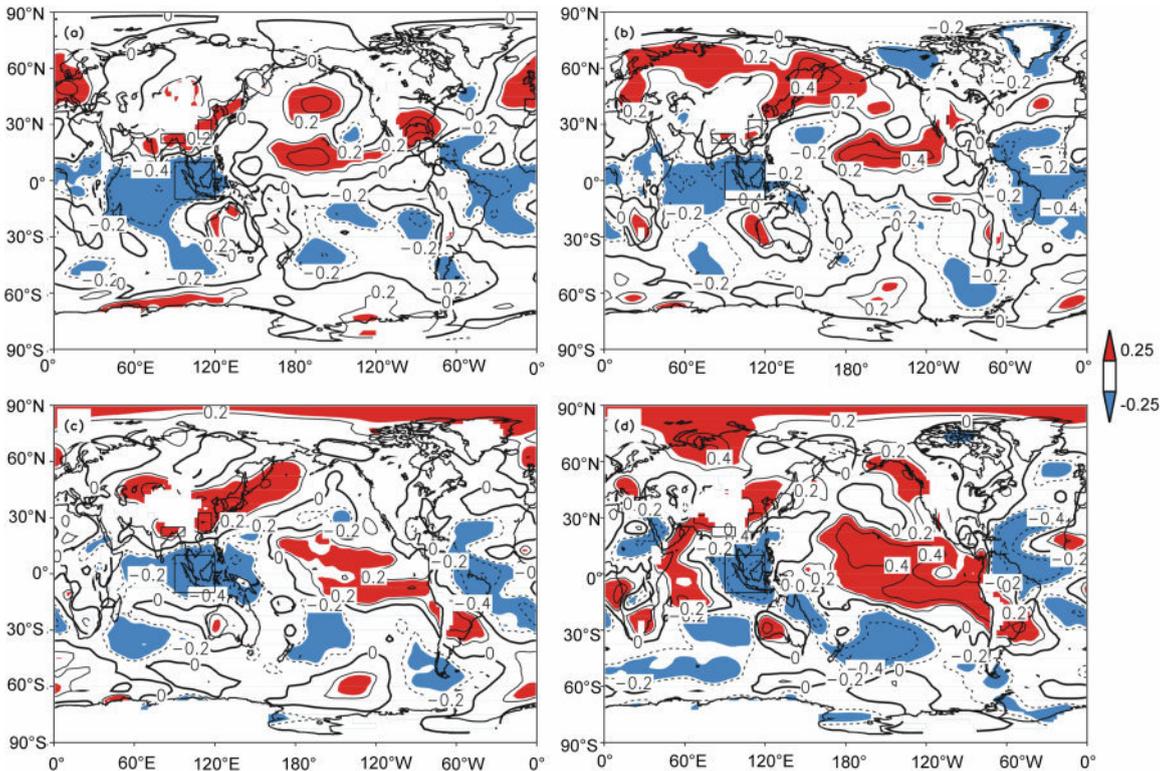


图 6 1948—2010 年南海夏季风指数 SCSSMI 与全球 850 hPa 分层扰动位能的相关分布

(a)3 月; (b)4 月; (c)5 月; (d)JJAS. 等值线间隔, 0.2; 阴影, 通过 95% 信度检验区。

Fig. 6 Correlation maps between the SCSSMI and the global 850 hPa atmospheric layer perturbation potential energy for (a) March, (b) April, (c) May and (d) JJAS during 1948—2010. Shading indicates areas where the correlation coefficients are statistically significant at the 95% confidence level; contour interval is 0.2

相关分布(图 6a~c),发现 3 月份赤道东印度洋向东延伸至南中国海,为负相关区,中国东南、青藏高原以南地区为正相关,并且持续到 SCSSM 爆发之后.为了进一步分析前期春季 LPPE1 与 SCSSM 的联系,定义分层扰动位能指数(I_{LPPE})为 $(IA+IB)/2-IC$,其中 IA 为 $(107.5^{\circ}E-117.5^{\circ}E, 22.5^{\circ}N-32.5^{\circ}N)$ 的 LPPE1 面积平均值、IB 为 $(80^{\circ}E-97.5^{\circ}E, 20^{\circ}N-25^{\circ}N)$ 的 LPPE1 面积平均值、IC 为 $(10^{\circ}S-10^{\circ}N, 90^{\circ}E-120^{\circ}E)$ 的 LPPE1 面积平均值. I_{LPPE} 与 SCSSMI 的具有显著相关,3 月、4 月、5 月 I_{LPPE} 与 SCSSMI 的时间序列(图 7),相关系数分别为 0.46、0.39 和 0.54,同期夏季的相关系数为 0.55,均超过了 0.01 显著性水平.由于 I_{LPPE} 与 SCSSM 有显著的正相关,并且前期的正相关一直持续到同期,所以可以作为 SCSSM 强度的一个预测因子.

分析 LPPE1 的异常变化对于 SCSSM 强度的影响,本文以 5 月份 I_{LPPE} 对夏季平均(JJAS)的环流作了合成分析.图 8 给出了高低 I_{LPPE} 指数年水平风场和位势高度场差值图,由图可见,差别显著的是孟加拉湾、中南半岛的西风异常以及中国东部的南风异常,南海区域中国大陆的位势高度负异常.当 I_{LPPE} 为高指数时(图略),低层(850 hPa) $90^{\circ}E-100^{\circ}E$ 范围内越赤道气流增强, $10^{\circ}N-20^{\circ}N$ 范围存在异常西风,在中南半岛、南海北部区域存在异常西南风,南海东部存在一个异常的气旋性环流.青藏高原东北侧内陆有气旋性异常环流,伴随着 850 hPa 位势高度负异常中心,并在高原东部形成一个延伸

至中南半岛的深槽,西北太平洋地区有异常反气旋环流,500 hPa 位势高度场,在中南半岛和中亚分别存在负异常中心,东北亚为正异常中心,高层(200 hPa)赤道及北印度洋以东的低纬度地区为东风异常.当 I_{LPPE} 为低指数时(图略),850 hPa 中国东部为显著的北风异常,东风异常从阿拉伯海延伸到孟加拉湾,200 hPa 南海南部区域有显著的西风异常.当 I_{LPPE} 为高值时,环流场的配置有利于 SCSSM 区域对流的发生和发展,较强的 SCSSM 的维持. JJAS 时段同期 I_{LPPE} 对环流场的合成结果与 5 月份 I_{LPPE} 对 JJAS 的合成类似.通过分析发现, I_{LPPE} 存在很强的自相关:4 月 I_{LPPE} 序列与 5 月 I_{LPPE} 序列, $R=0.82$;4 月与 JJAS 的 I_{LPPE} 序列, $R=0.73$;5 月与 JJAS 的 I_{LPPE} 序列, $R=0.76$,说明春季 I_{LPPE} 的异常可以一直持续到夏季.

6.2 LPPE1 与动能的耦合模态及影响 SCSSM 的物理机制

夏季风的强弱对应着风场的变化,动能的改变反映着风速的改变,在年际尺度上季风区的 LPPE1 和动能有什么关系? LPPE1 是否通过影响动能从而影响 SCSSM 的强度?为了回答这一问题,本文分别对 1948—2010 年夏季平均(JJAS)的 850 hPa LPPE1 和 850 hPa 动能做了经验正交函数分解(EOF)和奇异向量分解(SVD)^[57-59].动能(K_E)的 EOF 分解(图 9),第一模态 $E1(K_E)$ 的解释方差 21%,表现出带状的夹心结构,其中 $0^{\circ}-5^{\circ}N$ 存在最小值,两侧为正值分布,EOF 分解第二模态 $E2(K_E)$

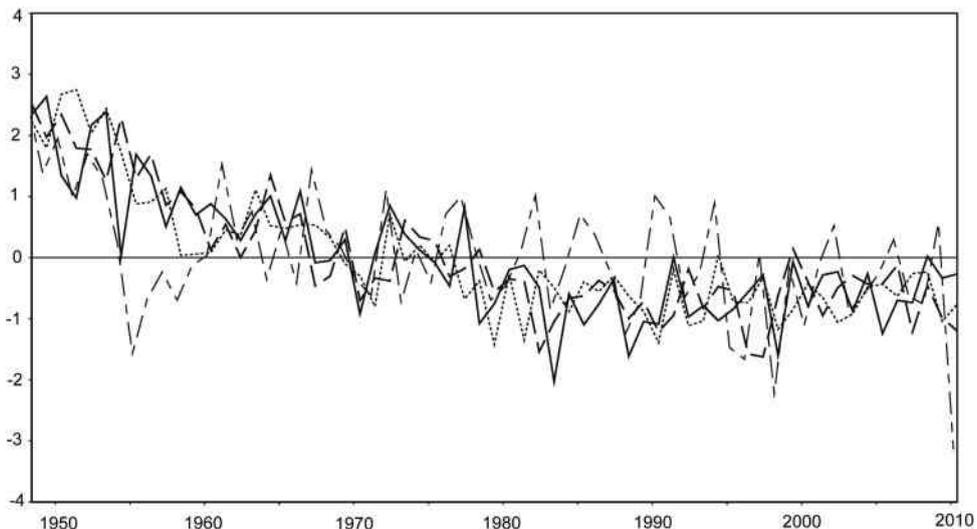


图 7 1948—2010 年 3—5 月 850 hPa I_{LPPE} 与 SCSSMI 标准化时间序列变化曲线
实线:3 月 LPPE;长虚线:4 月 LPPE;短虚线:5 月 LPPE;长短虚线:SCSSMI.

Fig. 7 Normalized time series of 850 hPa I_{LPPE} in March (solid), April (long dash), May (short dash), and SCSSMI (long dash, short dash) from 1948 to 2010

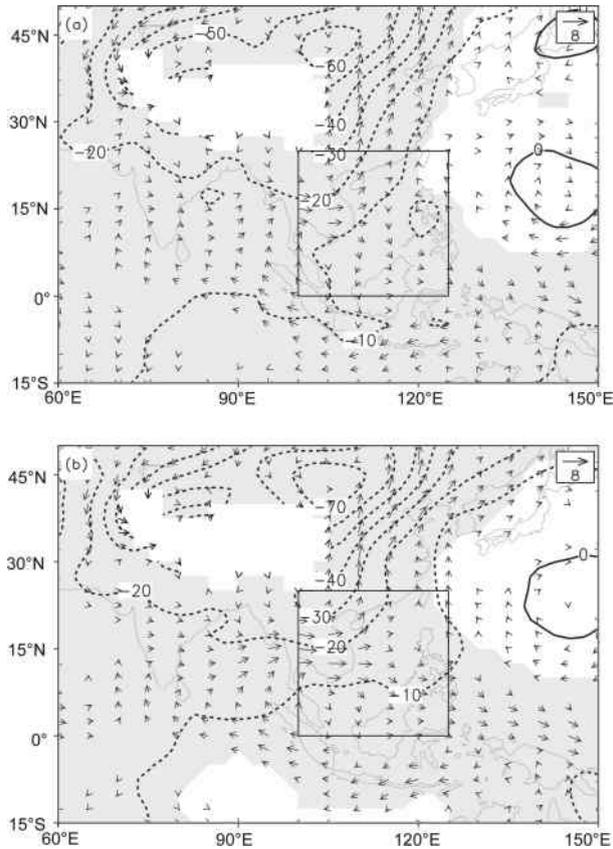


图 8 I_{LPPE} 标准化时间序列正、负年对应的 JJAS 时段 850 hPa 环流场的合成差

(a) 5 月 I_{LPPE} ; (b) JJAS 夏季平均 I_{LPPE} . 画出的风场都通过了 95% 信度检验, 阴影代表通过 95% 显著性水平的位势高度场, 高原大于 3000 m 赋值为缺测.

Fig. 8 Composite differences of wind and geopotential height at 850 hPa in JJAS between the years with the positive I_{LPPE} and the years with negative I_{LPPE} (a) in May; (b) in JJAS

The wind depicted is statistically significant at the 95% confidence level, shading indicates areas where the GH are statistically significant at the 95% confidence level.

的解释方差为 10%, 说明 $E1(K_E)$ 是夏季动能变率的支配模态. LPPE1 的 EOF 分解(图 10), 第一模态 $E1(LPPE1)$ 的解释方差 33%, 显示出热带外与热带地区反位相的偶极型分布, 第二模态 $E2(LPPE1)$ 的解释方差为 17%, 显示出带状分布特征, 其中最大值在中南半岛、孟加拉湾, $E1(LPPE1)$ 是夏季分层扰动位能变率的支配模态. 以 1948—2010 年夏季 (JJAS) 的 850 hPa LPPE1 为左场, 850 hPa 动能为右场做 SVD 分析, 第一模态 S1(图 11) 解释两个场总协方差平方和的 69%, 代表了两个场耦合变化的主要特征, 分别解释了 850 hPa LPPE1 方差的 31% 和动能方差的 21%, 左右场展开系数之间的相关为 0.9. 左场同类相关图上(图 11c), 显著的特征

是低纬度负相关区和中纬度的正相关区, 大致以 $22.5^\circ N$ 分界. 右场同类相关图上(图 11d), 显著的特征是夹心带状相关分布, 大部分区域是正相关, 仅在赤道印度洋和新加坡以东的小片海域、吕宋岛是负相关. 左右场的异类相关图与同类相关图分布很相似. 分析发现, S1 左异类相关图与 $E1(LPPE1)$ 很相似, S1 右异类相关图与 $E1(K_E)$ 很相似, 其中 SVD 第一模态左场(LPPE1)时间系数与 $E1(LPPE1)$ 时间系数相关为 0.95, SVD 第一模态右场(K_E)时间系数与 $E1(K_E)$ 时间系数的相关为 0.99, 说明两者之间可能存在着相互制约的物理机制.

大气分层扰动位能表征了在大气绝热调整到参考状态时, 局地的全位能可以向局地动能转化的最大值. 为理解低层 LPPE1 偶极型分布的物理意义及其与动能的耦合机理, 利用 I_{LPPE} 高低指数年合成了夏季的异常经向环流 ($90^\circ E \sim 130^\circ E$ 平均值), 夏季 I_{LPPE} 指数的合成结果如图 12d 所示, 在南海季风区北部 ($15^\circ N \sim 22.5^\circ N$) 有异常的上升运动, 在南海季风区南部 ($0^\circ \sim 12.5^\circ N$) 有异常的下沉运动, 这会引起北部的辐合和南部的辐散, 对应着 850 hPa 上南海区域 ($0^\circ \sim 25^\circ N$) 异常的南风, 异常的南风在科氏力作用下偏转, 产生异常的西风分量, 导致大气低层的西南风增强, 南海区域动能正异常. 5 月 I_{LPPE} 指数合成的夏季环流(图 12c) 与夏季 I_{LPPE} 指数合成的同期环流(图 12d) 有一致的特征. 从能量守恒的角度来说, 在没有外源强迫和边界输送的情况下, 南海季风区的分层扰动位能的减小对应着南海季风区动能的增加. 动能和 LPPE1 的 SVD 第一模态中, 动能的时间系数与 850 hPa 水平风场的相关(图略) 显示, 该模态对应着南海北部西南风异常增大, 南海中部的西风异常增大, 总体上对应着偏强的 SCSSM. 总之, 当 LPPE1 的分布是热带负异常、热带外正异常时, 产生经向环流异常, 影响动能和水平风场, 对应南海季风区的动能正异常, 水平风场为西南风异常, SCSSM 强度增强.

由于海洋巨大的热容量, 海洋表面温度 (SST) 的异常对大气有重要的影响, 冯娟等^[49] 研究了 EIOWP 区域 ($80^\circ E \sim 130^\circ E, 20^\circ S \sim 20^\circ N$) 的 SST 对 SCSSM 的影响, 并指出该区域的 SST 具有较大的持续性. SST 是否会影响到 LPPE1 的分布? 为考察这一问题, 本文计算了春夏 SST 和 I_{LPPE} 指数的相关, 由图 13a 可以看出, 4 月份赤道印度洋、西太平洋 SST 出现显著的负相关, 并且负相关一直可以持续到夏季, 这说明当赤道印度洋、西太平洋海温为负

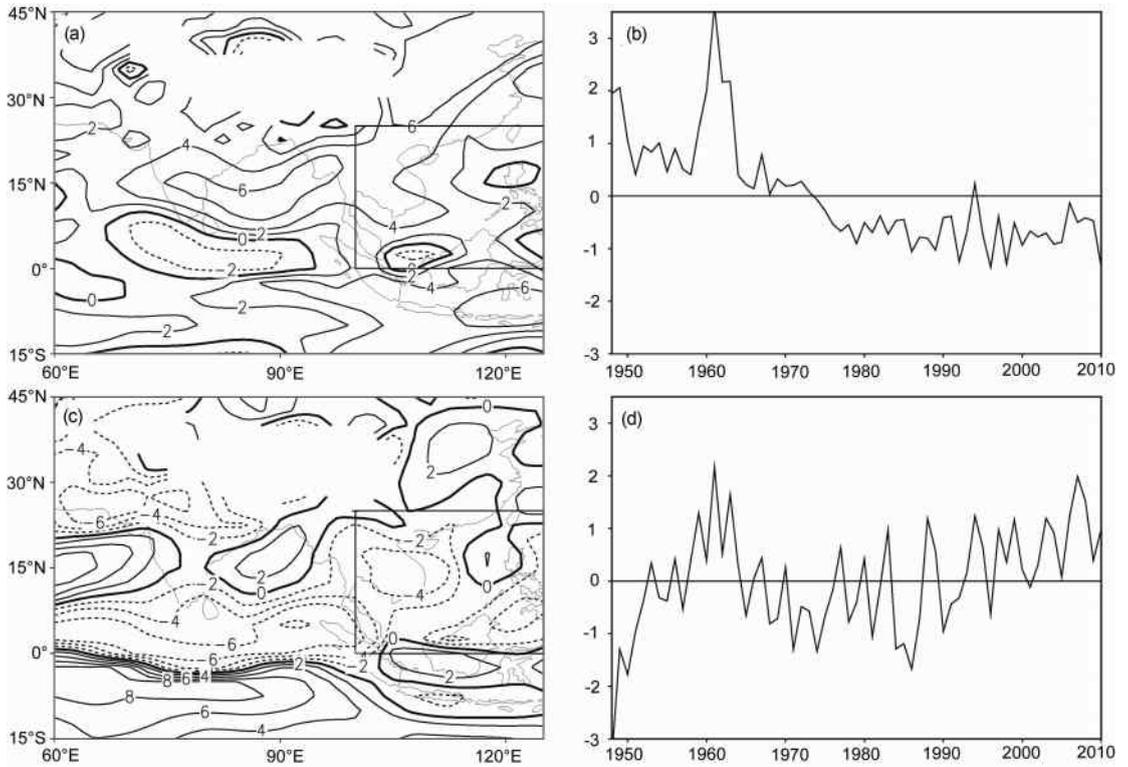


图9 亚印太地区夏季(JJAS)850 hPa动能 EOF分解的前两个空间模态和对应的时间系数(a, b是第一模态, c, d是第二模态), 使用了1948—2010年夏季(JJAS)63年的资料. 前两个解释方差分别为21%, 10%

Fig. 9 The first two EOFs and time coefficient of normalized Asia, Indian Ocean and Pacific 850 hPa kinetic energy based on data for 63 summer seasons (June-September) 1948—2010 (a, b is the first mode, c, d is the second mode). The fractions of variance of the normalized data field explained by the first, second modes are 21%, 10%

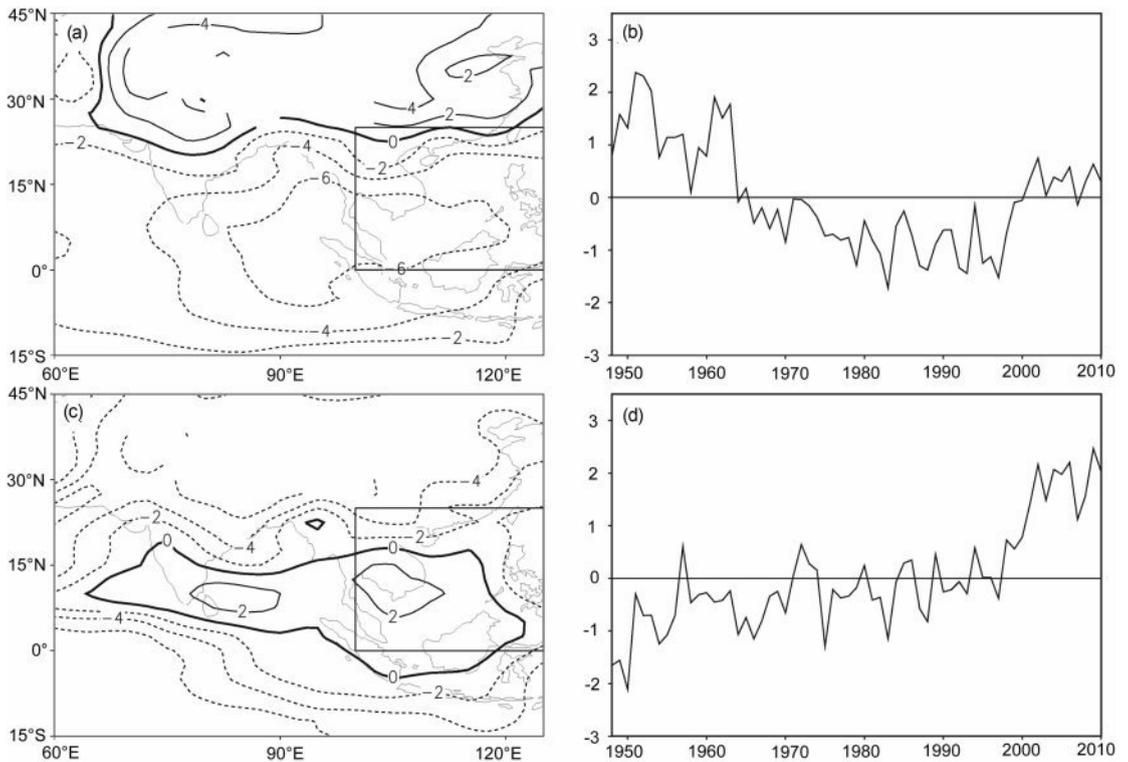


图10 亚印太地区夏季(JJAS)850 hPa 层扰动位能一阶矩 EOF分解的前两个空间模态和对应的时间系数(a, b是第一模态, c, d是第二模态), 使用了1948—2010年夏季(JJAS)63年的资料. 前两个模态解释方差分别为33%, 17%

Fig. 10 The first two EOFs and time coefficient of normalized Asia, Indian Ocean and Pacific LPPEI based on data at 850 hPa for 63 summer seasons (June-September) 1948—2010 (a, b is the first mode, c, d is the second mode). The fractions of variance of the normalized data field explained by the first, second modes are 33%, 17%

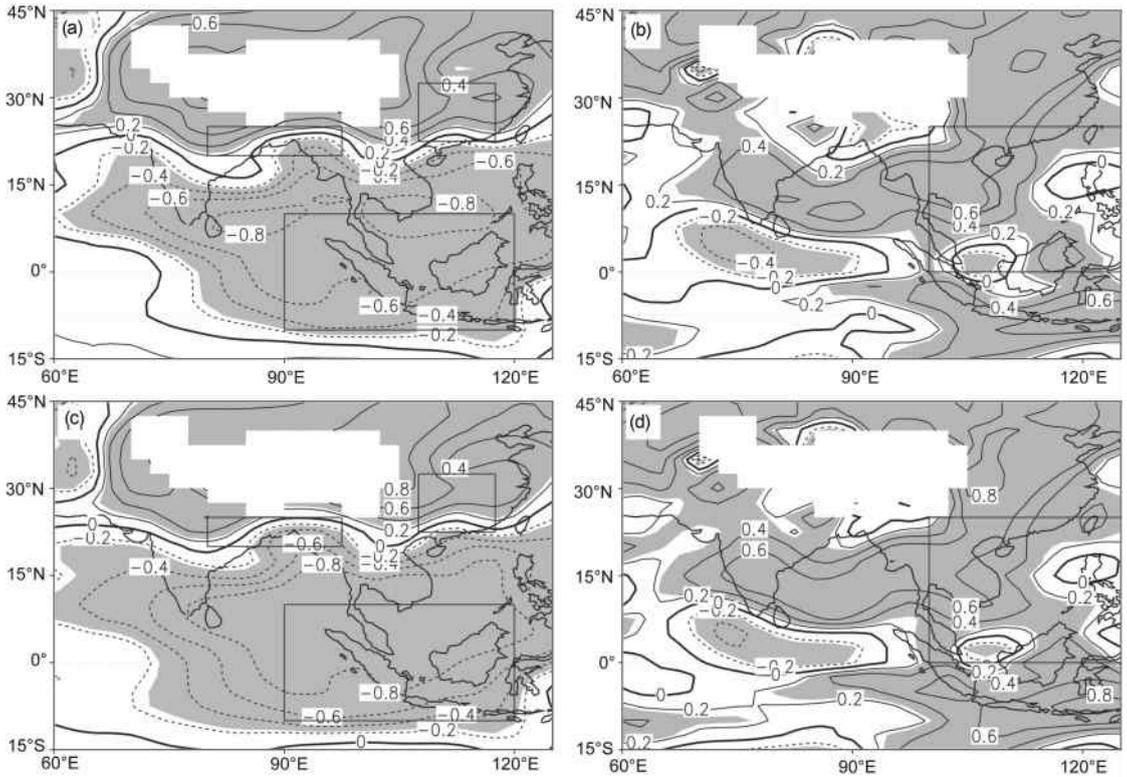


图 11 SVD 分解第一模态的相关分布图, a, b 为异类相关, c, d 为同类相关, a, c 为 850 hPa 分层扰动位能一阶矩(左场), b, d 为 850 hPa 动能(右场), 阴影代表通过 95% 信度检验. 解释的协方差为 68%, 左右场的时间系数的相关为 0.9, 解释左场(右场)的方差为 30%(20%)

Fig. 11 Correlation patterns for the first mode in the SVD expansion. a, b are heterogeneous correlation, c, d are homogeneous correlation, a, c are 850 hPa LPPE1, b, d are 850 hPa kinetic energy, significant at the 95% confidence level is shaded

异常时,海洋上空的 LPPE1 为负异常(即 IC 负异常),从而 I_{LPPE1} 指数为正异常. SST 的异常如何影响 LPPE1 的变化? 由于海气之间的感热通量与海气温差有关,潜热通量与近海表大气比湿和海表比湿(SST 的函数)有关, SST 的异常直接影响海洋向上的感热通量和潜热通量,湍流热通量(感热通量和潜热通量)是非绝热加热的组成部分,非绝热加热决定着 LPPE1 的收支,是 LPPE1 的源汇项^[61], SST 异常可能通过湍流热通量的异常影响 LPPE1. 为了考察海气之间的湍流热通量与 SST 异常的关系,利用 1958—2010 年的 OAFLUX 资料,计算了 5 月份 I_{SST} 指数(定义为 EIOWP 区域平均 SST)正负年对应的湍流热通量合成差,如图 14a 所示,在 5 月 EIOWP 区域为湍流热通量正异常,极大值位于澳洲西北沿海和南印度洋,在夏季 EIOWP 区域主要表现为湍流热通量的正异常(图 14b),仅在安达曼群岛附近为负异常,5 月和夏季共同的特征是,在 I_{SST} 高指数年海洋加热大气,在 I_{SST} 低指数年海洋冷

却大气. 周天军等^[60]对印度洋海气热通量交换的研究得出赤道印度洋主要表现为湍流热通量与 SST 的正相关,这与本文的结果是一致的. 总之,春季 5 月份 EIOWP 区域 SST 正(负)异常,对应湍流热通量为正(负)异常,海洋加热(冷却)大气,海洋上空 LPPE1 正(负)异常,利于形成 LPPE1 南正北负(南负北正)的分布.

需要指出的是大气和海洋之间存在复杂的反馈过程,如 SST 异常通过湍流热通量影响 LPPE1, LPPE1 向动能的转化改变风场特征,这进一步会影响海气之间的湍流通量交换,从而对海洋产生反馈. Wang 等^[62]指出西北太平洋夏季风区大气对海洋的强迫可能比海洋强迫大气更重要,限于本文篇幅,大气与海洋之间的相互作用,有待于季节内时间尺度的进一步工作.

图 15 总结了 LPPE1 影响 SCSSM 的可能机制:春季 EIOWP 区域 SST 的负(正)异常,改变了海气之间的湍流热通量交换,非绝热加热的异常影

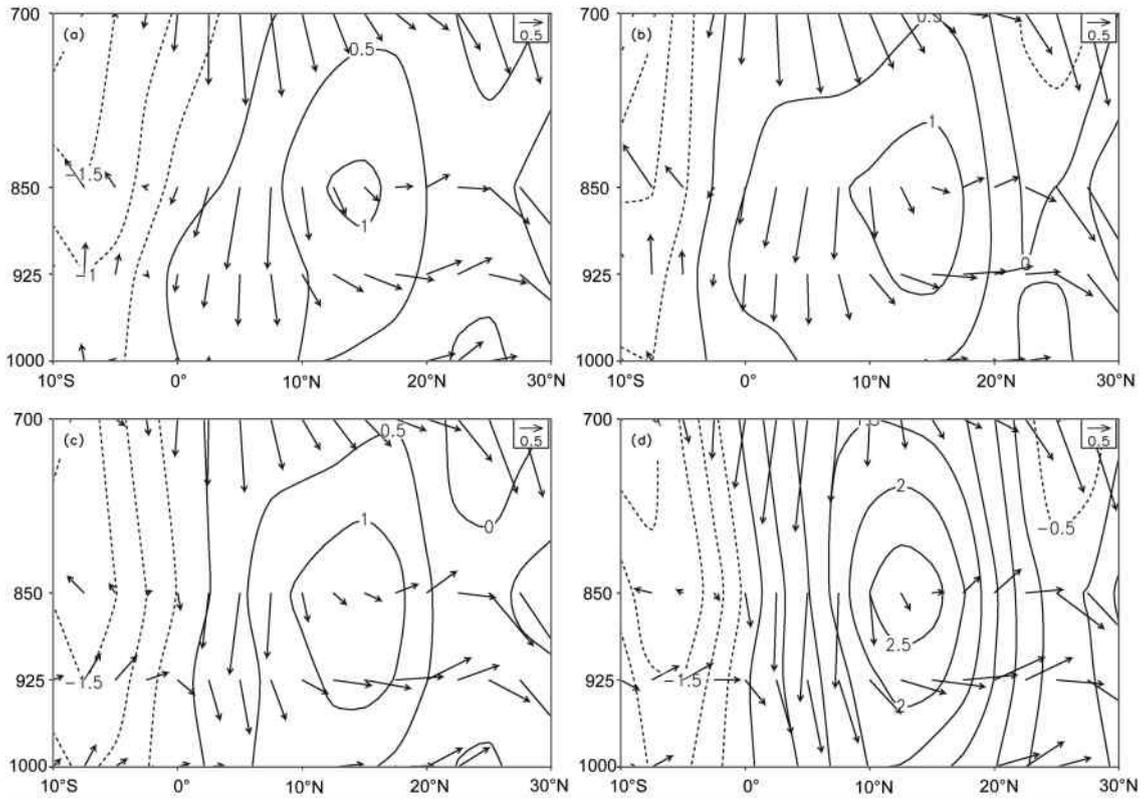


图 12 1948—2010 年 I_{LPPE} 标准化时间序列正、负年对应的夏季(JJAS)经向环流场的合成差

(a),(b),(c),(d)分别为 3 月,4 月,5 月,夏季平均的 I_{LPPE} . 图中等值线表示水平纬向风, 矢量表示经向环流,纬向平均的范围是 $90^{\circ}\text{E}-130^{\circ}\text{E}$.

Fig. 12 Composite difference patterns in JJAS anomalous zonal-mean zonal wind (contours), meridional circulation (vectors)

between $I_{LPPE} > +1\text{SD}$ of the index and those with a $I_{LPPE} < -1\text{SD}$ since 1948

(a),(b),(c),(d) are I_{LPPE} in March, April, May, JJAS, respectively, the average region is from 90°E to 130°E .

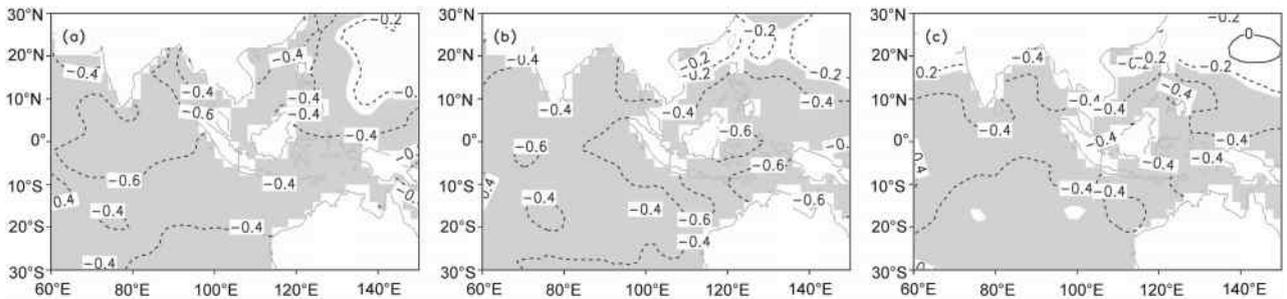


图 13 1948—2010 年海温(SST)与 PPEI 的相关图

(a) 4 月份 SST 和 5 月份 PPEI; (b) 5 月份 SST 和 5 月份 PPEI; (c) 5 月份 SST 和 JJAS PPEI. 等值线间隔:0.2; 阴影:通过 95% 信度检验区.

Fig. 13 (a) Correlation maps between the SST and PPEI, SST in April and PPEI in May, (b) SST in May and PPEI in May, (c) SST in May and PPEI in JJAS. Shading indicates areas where the correlation coefficients are statistically significant at the 95% confidence level; contour interval is 0.2

响春季、夏季 850 hPa LPPE1 的南负北正(南正北负)偶极型分布,夏季(JJAS) 850 hPa LPPE1 的偶极型分布与南海季风区 850 hPa 动能的一致增大(减小)是两者耦合模态的主宰模态,LPPE1 的异常分布通过经向环流异常,改变水平风场和动能,夏季南海季风区的 850 hPa 西南风增强(减弱),SCSSM 增强(减弱).

7 总结与讨论

针对不同高度上的局地能量转化问题,本文提出了分层扰动位能(LPPE)的概念,利用 LPPE1 研究了南海夏季风强度的变化. 结果表明:

(1)气候态的年平均 850 hPa LPPE1,热带地区

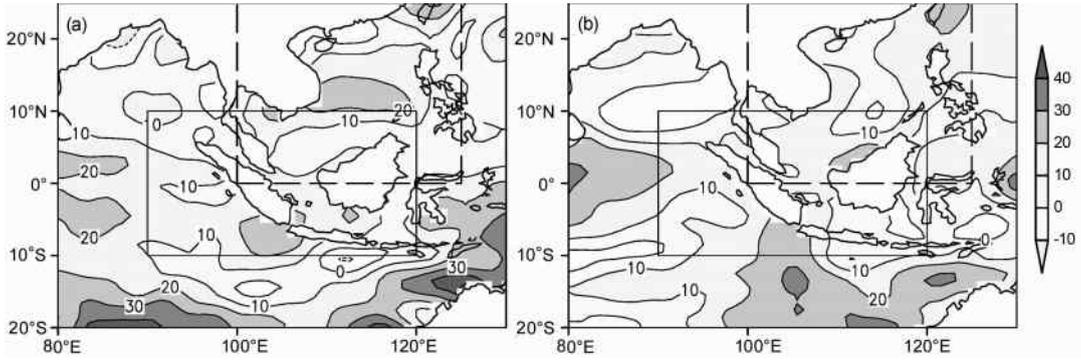


图 14 1958—2010 年 5 月 EIOWP 区域平均的 SST, 标准化时间序列正、负年对应的湍流热通量(感热与潜热的和)的合成差 (a), (b) 分别为 5 月份和夏季(JJAS)的湍流热通量, 正正常代表海洋向大气的加热正异常。

Fig. 14 Composite difference patterns in anomalous turbulent heat flux (sum of sensible heat flux and latent heat flux) between springs with a SSTI > +1SD of the index and those with a SSTI < -1SD since 1958

(a), (b) are the turbulent flux in May and JJAS, respectively, positive sign means the atmosphere gain heat from the ocean.

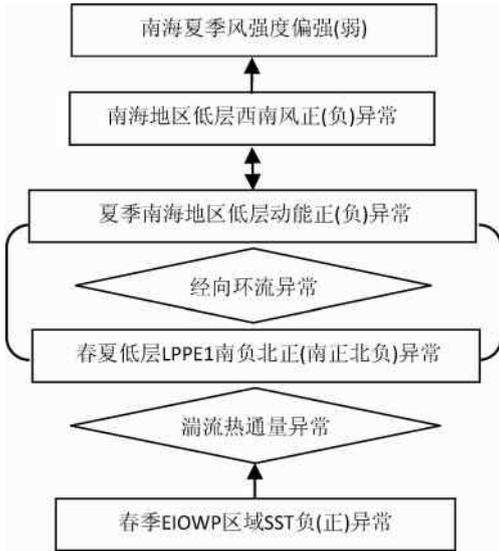


图 15 LPPE1 影响南海夏季风强度可能机制的简要概念图, 低层的能量分析以 850 hPa 的结果为例

Fig. 15 Schematic diagram of the possible mechanisms for LPPE1 influence on the SCSSM

为正, 高纬度地区为负, 500 hPa LPPE1 的分布与低层分布类似, 纬向分布更明显, 200 hPa LPPE1 在北美高纬度地区为正值, 大西北太平洋的正值分布与低纬度的正值分布连接, 总体为低纬正值、高纬负值的特征, 100 hPa 及高层 LPPE1 的分布特征为, 热带地区为负, 高纬度为正. LPPE1 在冬季半球的分布与年平均的分布相似, 在北半球夏季大陆一般会出现正的极大值。

(2)气候态的年平均 850 hPa 动能在低纬度和中纬度分别为极大值中心, 低纬度反映了季风环流和信风, 500 hPa 在中纬度有极大值, 南半球中纬度海洋上 80°E—120°W 分裂成南北两个高值带, 200 hPa 动能分布与 500 hPa 类似, 但在南半球中纬度海洋

为单个高值带; 季节变化的特征是夏半球在季风区、冬半球急流区的动能增大. 南海季风区动能和 LPPE 的季节变化呈现反位相的特征。

(3)强(弱)南海夏季风年, 前期春季 850 hPa LPPE1 呈现出亚洲东部大陆正(负)异常、北印度洋及南海区域负(正)异常的偶极型分布, 该偶极型分布可以作为 SCSSM 强度的一个预报因子。

(4)LPPE1 影响 SCSSM 的可能机制: 春季赤道印度洋、西太平洋 SST 的负(正)异常对应春季、夏季分层扰动位能 LPPE1 的南负北正(南正北负)偶极型分布, 夏季 LPPE1 的偶极型分布与 SCSSM 区域动能的一致增大(减小)是两者耦合模态的主宰模态, SCSSM 区域动能的一致型分布表现为夏季 SCSSM 区域的西风异常增强(减弱), SCSSM 增强(减弱)。

本文给出了由下垫面加热异常(SSTA), 影响 LPPE1 和动能的异常, 最终影响夏季风强度的可能机制. 不同的季风区有不同的特征, 其他季风区如东亚季风区是否也存在类似的影响机制? 有待于进一步讨论. 另外, 季风爆发、热带气旋生成等天气现象都伴随着大范围的能量转换, LPPE 在其中的发挥什么作用, 今后的研究中将深入的探讨。

致 谢 感谢审稿专家和编辑老师的建议。

参考文献(References)

[1] Lorenz E N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 1955, 7(2): 157-167.
 [2] Peixoto J P, Oort A H. Physics of climate. New York: Springer, 1992. Peixoto J P, Oort A H. 气候物理学. 吴国雄, 刘辉等, 校译. 北京: 气象出版社, 1995.
 [3] Margules M. über die energie der stürme. *Jahrbucher der*

- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, 1903, 40: 1-26.
- [4] Van Mieghem J. Atmospheric Energetics. Oxford: Clarendon Press, 1973.
- [5] Dutton J A, Johnson D R. The theory of available potential energy and a variational approach to atmospheric energetics. *Advances in Geophysics*, 1967, 12: 333-436.
- [6] Taylor K E. Formulas for calculating available potential energy over uneven topography. *Tellus*, 1979, 31: 236-245.
- [7] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础(第1卷). 北京: 科学出版社, 1979.
- Zeng Q C. The Physical-Mathematical Basis of Numerical Weather Prediction (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979.
- [8] Lorenz E N. Available energy and the maintenance of a moist circulation. *Tellus*, 1978, 30(1): 15-31.
- [9] 谢义炳. 能量天气分析、预报方法的现状和将来的可能发展. 气象科技资料, 1978, (2): 5-9.
- Xie Y B. Current status and future possible development of energetic synoptic analysis and prediction method. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 1978, (2): 5-9.
- [10] 谢义炳. 湿斜压大气的天气动力学问题//暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1978: 1-15.
- Xie Y B. Weather dynamics problems of moist baroclinic atmosphere//Collection of Heavy Rain (in Chinese). Changchun: Jilin People Press, 1978.
- [11] Smith P J, Horn L H. A computational study of the energetics of a limited region of the atmosphere. *Tellus*, 1969, 21(2): 193-201.
- [12] Smith P J. On the contribution of a limited region to the global energy budget. *Tellus*, 1969, 21(2): 202-207.
- [13] Johnson D R. The available potential energy of storms. *J. Atmos. Sci.*, 1970, 27(5): 727-741.
- [14] Edmon H J Jr. A reexamination of limited-area available potential energy budget equations. *J. Atmos. Sci.*, 1978, 35(9): 1655-1659.
- [15] 辜旭赞. 有限区域有效位能理论再探. 气象学报, 1990, 48(2): 248-252.
- Gu X Z. A theoretical study of the available potential energy in a limited atmospheric region. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1990, 48(2): 248-252
- [16] 高丽, 李建平. 大气能量有效性的研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(5): 486-494.
- Gao L, Li J P. Progress in the study of atmospheric energy efficiency. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2007, 22(5): 486-494.
- [17] 李建平, 高丽. 扰动位能理论及其应用——扰动位能的概念、表达及其时空结构. 大气科学, 2006, 30(5): 834-848.
- Li J P, Gao L. Theory on perturbation potential energy and its applications-Concept, expression and spatio-temporal structures of Perturbation Potential Energy. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, 30(5): 834-848.
- [18] 高丽, 李建平. 局地大气能量有效性中的表面扰动位能特征. 气象学报, 2011, 69(4): 664-671.
- Gao L, Li J P. Characteristics of the surface perturbation potential energy in the local atmospheric energetic efficiency. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2011, 69(4): 664-671.
- [19] 高丽, 李建平. 扰动位能与大气环流异常的耦合关系及机理研究. 地球物理学报, 2012, 55(3): 768-780.
- Gao L, Li J P. Relationship and mechanism between perturbation potential energy and atmospheric general circulation anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 768-780.
- [20] Pedelaborde P. The Monsoons (Tr. By M. J. Clegg). London: Methuen, 1963.
- [21] Webster P J, Maga? a V, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability and prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(C7): 14451-14510.
- [22] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. // Chang C P, Krishnamarti T N, Eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [23] Wang B, Ho L, Zhang Y S, et al. Definition of South China sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon. *J. Climate*, 2004, 17(4): 699-710.
- [24] 戴念军, 谢安, 张勇. 南海夏季风活动的年际和年代际特征. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 363-374.
- Dai N J, Xie A, Zhang Y. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, 5(4): 363-374.
- [25] 何金海, 丁一汇, 高辉等. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京: 气象出版社. 2001.
- He J, Ding Y H, Gao H, et al. Determination of the Onset Date of the South China Sea Monsoon and the Monsoon Index. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
- [26] Hsu H H, Terng C T, Chen C T. Evolution of large-scale circulation and heating during the first transition of Asian Summer monsoon. *J. Climate*, 1999, 12: 793-810.
- [27] Kueh M T, Lin S C. South China Sea summer monsoon onset definition and characteristics. *Atmos. Sci.*, 2001, 29: 141-170.
- [28] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, 23(3): 187-194.
- Li C Y, Zhang L P. Summer Monsoon Activities in the South China Sea and Its Impacts. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, 23(3): 187-194.
- [29] Li C, Yanai M. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast. *J. Climate*, 1996, 9(2): 358-375.
- [30] Li C Y, Wu J B. On the onset of the South China Sea summer monsoon in 1998. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, 17(2): 193-204.
- [31] 梁建茵, 吴尚森, 游积平. 南海夏季风的建立及强度变化.

- 热带气象学报, 1999, 15(2): 97-105.
- Liang J Y, Wu S S, You J P. The research on variations of onset time of the SCS summer monsoon and its intensity. *J. Trop. Meteor.*, 1999, 15(2): 97-105.
- [32] Lu E, Chan J C L. A unified monsoon index for South China. *J. Climate*, 1999, 12(8): 2375-2385.
- [33] Mao J Y, Chan C L, Wu G X. Relationship between the onset of the South China Sea summer monsoon and the structure of the Asian subtropical anticyclone. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(3): 845-849.
- [34] Chang C P, Chen T J. Tropical circulations associated with Southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, 123(11): 3254-3267.
- [35] Wu G X, Zhang Y S. Tibetan plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126(4): 913-927.
- [36] 吴尚森, 梁建茵. 南海夏季风强度指数及其变化特征. 热带气象学报, 2001, 17(4): 337-344.
- Wu S S, Liang J Y. An index of South China Sea summer monsoon intensity and its variation characters. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, 17(4): 337-344.
- [37] Xie A, Chung Y S, Liu X, et al. The interannual variations of the summer monsoon onset over the South China Sea. *Theor. Appl. Climatol.*, 1998, 59(3-4): 201-213.
- [38] 姚永红, 钱永甫. 用湿位涡定义的南海西南季风指数及其与我国区域降水的关系研究. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 781-788.
- Yao Y H, Qian Y F. A study on the South China Sea monsoon index and the relationship between the index and regional rainfalls of china. *Journal of Nanjing University (Natural Science)* (in Chinese), 2001, 37(6): 781-788.
- [39] 张庆云, 彭京备. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. 大气科学, 2003, 27(1): 97-106.
- Zhang Q Y, Peng J B. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, 27(1): 97-106.
- [40] 张秀芝, 李江龙, 阎俊岳等. 南海夏季风爆发的环流特征及指标的研究. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 321-331.
- Zhang X Z, Li J L, Yan J Y, et al. A study of circulation characteristics and index of the South China Sea summer monsoon. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7(3): 321-331.
- [41] Zhang X Z, Li J L, Ding Y H, et al. A study of circulation characteristics and index of South China Sea summer monsoon. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 2001, 15(4): 450-464.
- [42] 李建平, 曾庆存. 风场标准化季节变率的显著性及其表征季风的合理性. 中国科学(D辑: 地球科学), 2000, 30(3): 331-336.
- Li J P, Zeng Q C. Significance of the normalized seasonality of wind field and its rationality for characterizing the monsoon. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2000, 43(6): 646-653.
- [43] Li J P, Zeng Q C. A unified monsoon index. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(8): 1274, doi: 10.1029/2001GL013874.
- [44] Li J P, Zeng Q C. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, 20(2): 299-302.
- [45] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和雨量的关系. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 351-365.
- Li J P, Zeng Q C. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10(3): 351-365.
- [46] Zeng Q C, Li J P. Interactions between the Northern and Southern hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, 26(4): 207-226.
- [47] Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, 80(4): 629-638.
- [48] 毛江玉, 谢安, 宋焱云等. 海温及其变化对南海夏季风爆发的影响. 气象学报, 2000, 58(5): 556-569.
- Mao J Y, Xie A, Song Y Y et al. Impact of sea surface temperature and its variations on the onset of Summer Monsoon over South China Sea. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2000, 58(5): 556-569.
- [49] 冯娟, 李建平. 南海夏季风变化及其与全球大气和海温的关系. 大气科学, 2009, 33(3): 568-580.
- Feng J, Li J P. Variation of the South China sea summer monsoon and its association with the global atmosphere circulation and sea surface temperature. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2009, 33(3): 568-580.
- [50] Ding R Q, Ha K J, Li J P. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean. *Clim. Dyn.*, 2010, 34(7-8): 1059-1071.
- [51] Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: D18120, doi: 10.1029/2009JD011733.
- [52] 李建平, 吴国雄, 胡敦欣等. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响. 北京: 气象出版社, 2011.
- Li J P, Wu G X, Hu D X. Ocean-Atmosphere Interaction over the Jointing Area of Asia and Indian-Pacific Ocean (AIPO) and Its Impact on the Short-term Climate Variation in China (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2011.
- [53] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77(3): 437-471.
- [54] Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J. Clim.*, 2008, 21(10): 2283-2296.
- [55] Xin J, Weller R A. Multidecade global flux datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFflux) Project;

- Latent and sensible heat fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables, 2008, Woods Hole Oceanographic Institution OAFlux Project Tech. Rep. OA-2008-01, 64 pp.
- [56] 高丽, 李建平, 任宏利. 绝热大气过程的若干性质. 自然科学进展, 2006, 16(2): 243-247.
Gao L, Li J P, Ren H L. Some Characteristics of the atmosphere during an adiabatic process. *Process in Natural Science* (in Chinese), 2006, 16(6): 644-648.
- [57] Prohaska J T. A technique for analyzing the linear relationships between two meteorological fields. *Mon. Wea. Rev.*, 1976, 104(11): 1345-1353.
- [58] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *J. Clim.*, 1992, 5(6): 561-576.
- [59] Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Clim.*, 1992, 5(6): 541-560.
- [60] 周天军, 张学洪. 印度洋海气热通量交换研究. 大气科学, 2002, 26(2): 161-170.
Zhou T J, Zhang X H. The Air-Sea heat flux exchange in the Indian Ocean. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, 26(2): 161-170.
- [61] 汪雷, 李建平, 郭彦. 大气分层扰动位能控制方程及其应用——南海夏季风活动的能量收支. 大气科学, 2012, 36(4): 769-783.
Wang L, Li J P, Guo Y. Governing equations of atmospheric layer perturbation potential energy and its applications——Energy budget of the South China Sea summer monsoon activity. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2012, 36(4): 769-783.
- [62] Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32: L15711, doi: 10.1029/2005GL022734.

(本文编辑 刘少华)