

单永强, 任保华, 齐义泉, 等. 2016. 西太平洋—南海地区潜热通量长期变化趋势的南北差异及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 467–478. Shan Yongqiang, Ren Baohua, Qi Yiquan, et al. 2016. The north–south contrast of long-term trend of latent heat flux in West Pacific–South China Sea and the possible mechanism [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 467–478, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15241.

西太平洋—南海地区潜热通量长期变化趋势的 南北差异及成因分析

单永强¹ 任保华¹ 齐义泉² 郑建秋¹

¹ 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

² 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301

摘 要 利用 1958~2014 年美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量项目 (OAFlux) 的月平均潜热通量和相关气象要素数据, 以及 NCEP/NCAR 再分析表面气压数据, 通过 Trend-EOF 分析方法, 本文研究了西太平洋—南海地区潜热通量的长期变化趋势。发现西太平洋—南海地区潜热通量整体呈上升的趋势, 其中冬季上升趋势最强。冬季潜热通量趋势存在明显的南北差异, 特别是在南海地区, 南海北部为上升趋势而南部为下降趋势。南海北部以及菲律宾海地区冬季潜热通量上升的主要原因是海气比湿差的增大, 而南海南部潜热通量呈下降趋势, 在东侧主要原因是风速减小, 在西侧主要原因是海气比湿差减小。南海潜热通量长期趋势的南北差异是风速和海气比湿差的共同作用造成的。另外, 研究发现风速变化趋势受到局地环流变化的影响, 在表面气压下降中心线以北地区为上升趋势, 在其以南为下降趋势, 而海气比湿差的变化趋势则主要取决于海表温度的变化趋势。

关键词 南北差异 潜热通量 长期趋势 南海

文章编号 1006-9585 (2016) 04-0467-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15241

The North–South Contrast of Long-term Trend of Latent Heat Flux in West Pacific–South China Sea and the Possible Mechanism

SHAN Yongqiang¹, REN Baohua¹, QI Yiquan², and ZHENG Jianqiu¹

¹ School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

² State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

Abstract Using the monthly latent heat flux data and relevant meteorological variables for the period of 1958 to 2014 produced by the Objectively Analyzed Air–Sea Fluxes project (OAFlux) of the Woods Hole Oceanographic Institution, and surface pressure data extracted from NCEP/NCAR reanalysis data, the authors investigate the long-term trend of latent heat flux over the West Pacific–South China Sea (WP–SCS). The method of Trend-EOF is applied in this study. An increasing trend of latent heat flux is found when the entire area is taken into account as a whole, especially in the winter. A north–south contrast of latent heat flux changing trend in the winter is noted, especially in the SCS where an increasing trend occurred in the north and a decreasing trend occurred in the south. The increasing trend of latent heat flux in the Philippine Sea and northern SCS is primarily attributed to an increase in the air–sea humidity difference. The decreasing

收稿日期 2015-10-27; **网络预出版日期** 2016-03-10

作者简介 单永强, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用方面的研究。E-mail: shanyq@mail.ustc.edu.cn

资助项目 热带海洋环境国家重点实验室 (中国科学院南海海洋研究所) 开放课题 LTO1502, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417403

Funded by State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (Grant LTO1502), National Basic Research Program of China (Grant 2012CB417403)

trend of latent heat flux in the southwestern SCS is resulted from a decrease in the air-sea humidity difference, while in the southeastern SCS it is a result of the decrease in wind speed. Air-sea humidity difference works together with wind speed, leading to the north-south contrast of long-term changing trend. In addition, the trend of wind speed is closely associated with changes in surface pressure, while the trend of air-sea humidity difference is associated with changes in sea surface temperature.

Keywords North-south contrast, Latent heat flux, Long-term trend, South China Sea

1 引言

潜热通量是海气相互作用的重要参量,表征了热量和水汽的输送。海洋表面蒸发一方面是大气中水汽和大气运动能量的主要来源之一,另一方面也影响着海表温度和盐度。对潜热通量的研究,有助于理解海气相互作用过程和改善海气耦合模式。

潜热通量吸引了众多研究者的关注,在季内、季节、年际和年代际等时间尺度方面都有广泛的研究(Alexander and Scott, 1997; 刘衍楹等, 2004; Araligid and Maloney, 2008; 郑建秋等, 2009; Zeng and Wang, 2009)。也有学者进行了长期变化趋势的研究。Yu and Weller (2007) 利用美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量项目(OAFlux)的潜热通量资料研究发现 1980~1990 年代全球无冰洋面平均的潜热通量呈上升趋势,并指出主要原因是海表温度的升高。Liu and Curry (2006) 采用多种数据资料研究了 1990 年代全球热带和副热带地区的潜热通量变化趋势,发现大部分地区呈上升趋势,并指出主要是表面风速增加造成的。Li et al. (2011) 也利用 OAFlux 资料研究了热带和副热带太平洋潜热通量在 1980~1990 年代的变化趋势,同样发现了大部分地区是上升的,但其指出海表温度影响是直接原因,而风速影响是间接原因。

以上学者对潜热通量长期变化趋势研究的空间尺度都较大,对于我国而言,热带西太平洋—南海区域的潜热通量变化与我国天气和气候的关系更为直接和密切。一方面,西太平洋—南海地区是我国降水的主要水汽源地之一(黄荣辉等, 1998; 谢安等, 2001; 田红等, 2004; 周长艳等, 2006; 李秀珍等, 2010),黄荣辉等(1998)指出的东亚地区夏季的 4 条主要水汽通道中有两条位于西太平洋—南海地区。另一方面,西太平洋—南海地区是影响我国的台风的主要生成地,而潜热通量对台风的生成有重要影响(吴国雄, 1992; Zhou et al., 2015)。另外,该地区潜热通量与东亚季风也有着密切的关

系(黄荣辉和孙凤英, 1994; 刘秦玉等, 2000; 曲绍厚等, 2000; 骆美霞和李崇银, 2004; 王丽娟等, 2008)。王丽娟等(2008)发现前一年冬季南海潜热通量距平的南北特征对南海夏季风爆发的早晚和强弱有很好的指示意义。目前,针对西太平洋—南海地区的潜热通量有一些季内、年际变化尺度的研究(王丽娟等, 2008; Zeng and Wang, 2009),但对其长期趋势的研究还很少,故本文重点研究西太平洋—南海地区潜热通量的长期变化趋势。

2 数据与方法

美国伍兹霍尔海洋研究所将 NCEP、欧洲中尺度天气预报中心再分析数据(ERA-40),特种传感器微波成像仪(SSM/I)和舰克卫星散射计(QuikSCAT)资料反演的近海面风速和空气湿度数据,先进甚高分辨率辐射仪(AVHRR)、热带降雨测量卫星微波成像仪(TRMM/TMI)、先进微波扫描辐射计(AMSR-E)资料反演的海表温度数据,通过客观分析的方法融合得到与热通量相关的气象要素场数据,包括海表温度、2 m 空气湿度、10 m 风速等(Yu et al., 2007)。在此基础上,通过热通量算法 COARE 3.0 计算得到热通量数据(OAFlux)。与浮标观测数据比较,OAFlux 资料的平均偏差仅为 1 W m^{-2} ,优于 NCEP1、NCEP2、ERA-40 等数值模式数据(Yu et al., 2004, 2007, 2008)。并且,OAFlux 资料时间范围长(1958~2014 年),空间分辨率较高[1° (纬度) $\times$ 1° (经度)],得到了广泛的应用(郑建秋等, 2009; Li et al., 2011; Li and Ren, 2012)。本文采用了 OAFlux 资料中的 1958~2014 年月平均潜热通量数据,以及相关的海表温度、2 m 空气湿度、10 m 风速等气象要素数据。潜热通量可由相关气象要素根据块体空气动力学公式计算(Liu et al., 1979):

$$Q_{\text{lh}} = \rho L_e C_e (q_s - q_a) \cdot U = \rho L_e C_e \cdot \Delta q \cdot U, \quad (1)$$

其中, Q_{lh} 为潜热通量(单位: W m^{-2}), ρ 为湿空气密度(单位: kg m^{-3}), L_e 为蒸发潜热(单位:

$W s g^{-1}$), C_e 为传输系数, q_s 为海表饱和比湿 (单位: $g kg^{-1}$), q_a 为 2 m 高度空气比湿 (单位: $g kg^{-1}$), U 为 10 m 高度风速 (单位: $m s^{-1}$), Δq 为 q_s 与 q_a 的差。海表饱和比湿 q_s 可由海表温度 (SST, 记为 T_{ss}) 计算得到:

$$q_s = 0.98q_{sat}(T_{ss}), \quad (2)$$

$q_{sat}(T_{ss})$ 为纯水饱和比湿, 可根据经验公式计算。0.98 为考虑到海水盐度造成的饱和水汽压下降的修正系数 (Fairall et al., 1996)。

另外, 本文还使用了 NCEP/NCAR 再分析资料中 1958~2014 年月平均的表面气压 p_s (surface pressure) 数据。

为提取潜热通量长期变化趋势的时空特征, 本文采用了 Hannachi (2007) 提出的 Trend-EOF 分析方法。Trend-EOF 分析方法基于对反秩矩阵的协方差阵的特征值分析, 能够更有效地分离出与趋势变化相关的模态。Barbosa and Andersen (2009)、Weng (2010)、Li et al. (2011)、Li and Ren (2012) 等学者都利用 Trend-EOF 分析方法研究了相关气候变量的变化趋势, 验证了其在提取趋势信息方面的优势。

3 潜热通量的长期变化趋势

3.1 区域平均潜热通量的长期上升趋势

为对西太平洋—南海区域 ($0^{\circ} \sim 25^{\circ}N$, $100^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$) 潜热通量变化趋势有整体的认识, 我们首先研究区域平均的潜热通量。图 1 为西太平洋—南海区域 1958~2014 年年平均、春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月) 和冬季 (12 月至次年 2 月) 平均的潜热通量变化, 以及各自的线性拟合斜率 (S_{slope}) 和 t 检验值 (t_{val})。就年平均而言, 潜热通量有显著的上升, 平均上升趋势为 $2.26 W m^{-2} (10 a)^{-1}$ 。从季节来看, 各季节均有显著的上升趋势, 其中冬季上升最强, 平均上升趋势为 $4.00 W m^{-2} (10 a)^{-1}$; 春季上升最弱, 平均上升趋势为 $0.90 W m^{-2} (10 a)^{-1}$ 。另外, 冬季潜热通量是四个季节中最强的, 其年际变化也最大。郑建秋等 (2009) 也曾得出过相似的结论。

由于冬季潜热通量上升趋势最强, 所以在接下来的研究中, 本文重点研究冬季潜热通量变化趋势。

3.2 长期变化趋势的南北差异

西太平洋—南海区域平均的潜热通量呈显著

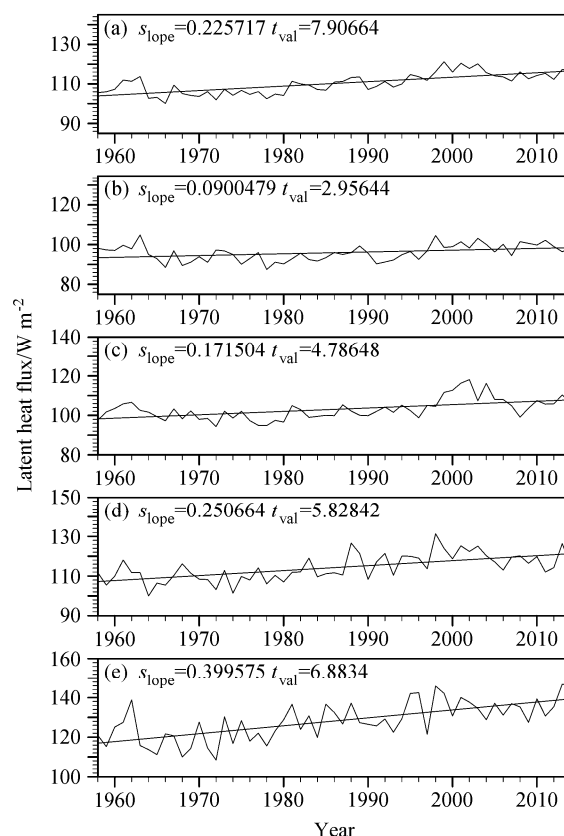


图 1 西太平洋—南海 ($0^{\circ} \sim 25^{\circ}N$, $100^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$) 区域平均的潜热通量变化: (a) 年平均; (b) 春季平均; (c) 夏季平均; (d) 秋季平均; (e) 冬季平均

Fig. 1 Variations of latent heat flux averaged over the West Pacific-South China Sea (WP-SCS) ($0^{\circ} \sim 25^{\circ}N$, $100^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$) in (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter

的上升趋势, 其中冬季最强。为研究该区域潜热通量变化趋势的时空特征, 我们对 1958~2014 年冬季平均的潜热通量距平进行 Trend-EOF 分析。前 5 个模态的特征值谱如图 2a 所示。第一模态可以与第二模态显著分离, 而第二模态与第三模态不能分离, 根据 North 准则, 对第一模态进行分析。

图 2b 和 2c 所示为 1958~2014 年西太平洋—南海地区冬季潜热通量距平 Trend-EOF 分析第一模态时间序列 PC1 和空间型 EOF1。第一模态反映出该区域冬季潜热通量的变化趋势存在明显的南北差异, 特别是在南海地区。南海北部和菲律宾海北部地区均为上升趋势, 而菲律宾海南部的上升趋势明显比其北部地区弱, 南海南部地区反而为下降趋势。南海南部有两个下降中心, 一个较强, 位于西侧的中南半岛南部 ($0^{\circ}N$, $105^{\circ}E$) 附近, 另一个较弱, 位于东侧的加里曼丹岛北部 ($6^{\circ}N$, $113^{\circ}E$) 附近。潜热作为大气热源之一, 其南北变化趋势的差

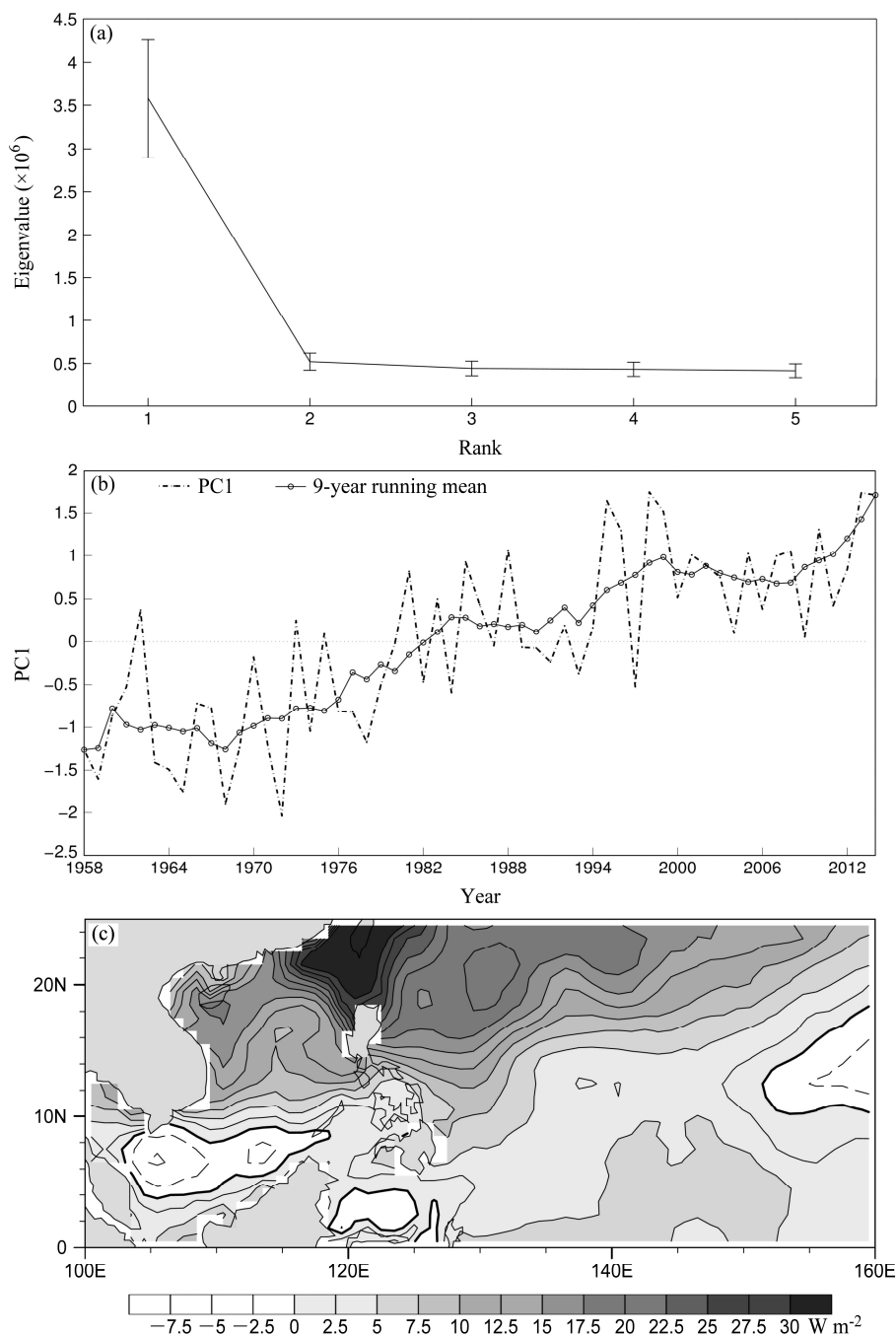


图2 1958~2014年西太平洋—南海地区冬季潜热通量距平 Trend-EOF 分析 (a) 特征值谱、(b) 第一模态时间序列 PC1 和 (c) 空间型 EOF1 (粗线为零线)

Fig. 2 (a) Eigenvalue spectrum, (b) time series of the first Trend-EOF mode, and (c) spatial pattern of the first Trend-EOF mode (bold lines mark zero contours) resulted from Trend-EOF analysis of latent heat flux anomaly averaged over the WP-SCS in winter from 1958 to 2014

异必然会对大气运动产生影响。另一方面,从公式(1)可知,潜热通量受到风速和空气湿度的影响,所以潜热通量变化趋势的南北差异也可能是大气环流变化的一个方面的体现。

从第一模态的时间序列可以看出,冬季潜热通

量的变化趋势基本是单调的。所以,可直接研究冬季潜热通量线性变化趋势的分布情况,如图3所示,可以得出与 Trend-EOF 分析结果相似的结论,南海南部和北部相反的变化趋势形成强烈的对比。同时,通过 t 统计检验可知,大部分地区的变化趋势

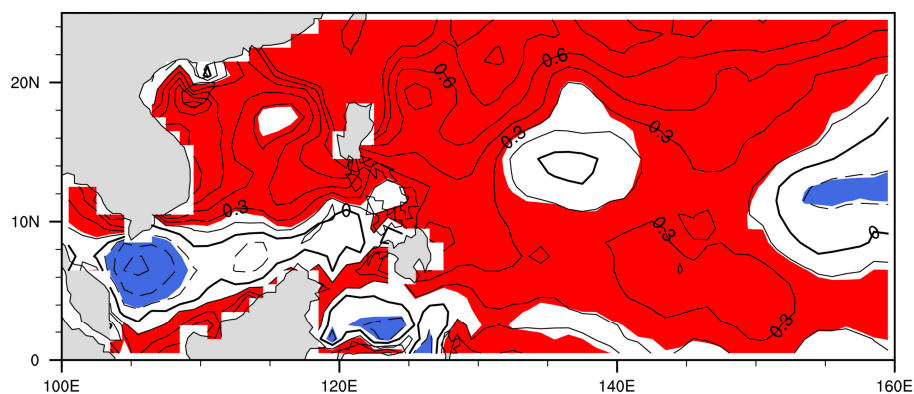


图3 1958~2014年冬季潜热通量的线性趋势分布(单位: $\text{W m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 填色表示通过95%的信度检验, 粗线为零线)

Fig. 3 Linear slopes of latent heat flux changes ($\text{W m}^{-2} \text{a}^{-1}$) in the winter from 1958 to 2014 (shadings are for values that exceed the 95% confidence level and bold lines indicate zero contours)

都是显著的, 可通过95%的信度检验。

3.3 南北趋势差异的成因分析

西太平洋—南海地区冬季潜热通量整体呈上升趋势, 但变化趋势存在明显的南北差异, 特别是在南海地区, 南海北部为上升趋势而南海南部为下降趋势。由公式(1)可知, 潜热通量受风速和海气比湿差的影响, 所以首先分别从风速和海气比湿差两个方面研究潜热通量变化的原因, 之后再对两个方面进行比较分析。

首先讨论风速的影响。就局地关系而言, 如 Yu (2007) 指出的, 较大的风速有利于蒸发表面水汽的流动, 从而加速蒸发。为研究风速对西太平洋—南海区域潜热通量变化趋势的影响, 我们对1958~2014年冬季风速距平进行 Trend-EOF 分析。前5个模态的特征值谱如图4a所示, 可见第一模态可与其他模态分离, 其余模态不能相互分离, 所以分析第一模态。

图4b和4c为1958~2014年西太平洋—南海地区冬季风速距平 Trend-EOF 分析第一模态时间序列 PC1 和空间型 EOF1。第一模态反映出风速基本呈单调的趋势变化, 并且表现出南北变化趋势的不一致, 北部为上升趋势, 而南部为下降趋势, 形成明显的对比。北部风速的上升有利于潜热通量的增加, 而南部风速的下降则不利于潜热通量的增加, 所以风速变化趋势的南北差异对潜热通量变化趋势的南北差异有一定的贡献。Xu et al. (2006) 和 Guo et al. (2011) 等研究发现, 受表面气温升高, 特别是高纬地区表面气温升高导致的环流变化的影响, 中国大陆地区风速为下降趋势。西太平洋—南

海地区纬度较低, 受高纬度地区影响可能较小, 如下文所指出的, 该地区风速的变化趋势与局地的环流变化有关。

仔细分析可以发现, 风速在不同的地区对潜热通量的变化趋势的作用是不同的。在南海北部和菲律宾海北部地区, 风速的增加对潜热通量的上升趋势有正的作用。但在菲律宾海南部地区, 风速呈下降的趋势, 不利于潜热通量的增加, 对潜热通量的上升趋势有负的作用。在南海南部地区, 风速与潜热通量均呈下降趋势, 风速的减小对潜热通量的下降趋势有正的作用。另外, 注意到在南海南部地区, 风速下降的中心位于加里曼丹岛北部地区, 说明风速对此处潜热通量的下降有更大的贡献。

接下来讨论海气比湿差的影响。图5a为1958~2014年西太平洋—南海地区冬季海气比湿差距平 Trend-EOF 分析的特征值谱, 可见, 与潜热通量距平、风速距平的 Trend-EOF 分析类似, 仍是第一模态与其他模态可明显分离, 而其他模态之间不能相互分离。图5b和5c为其第一模态时间序列 PC1 和空间型 EOF1, 也与潜热通量距平、风速距平的 Trend-EOF 分析第一模态类似, 反映了趋势变化。再次验证了 Trend-EOF 分析在提取趋势信号方面的优越性。

海气比湿差距平 Trend-EOF 分析第一模态的时间序列 PC1 基本为单调递增的趋势, 其空间型也与潜热通量距平 Trend-EOF 分析第一模态的空间型非常相似, 在南海北部和整个菲律宾海地区为上升趋势, 而在南海南部部分地区为下降趋势, 说明海气比湿差对潜热通量的变化趋势在大部分地区为正

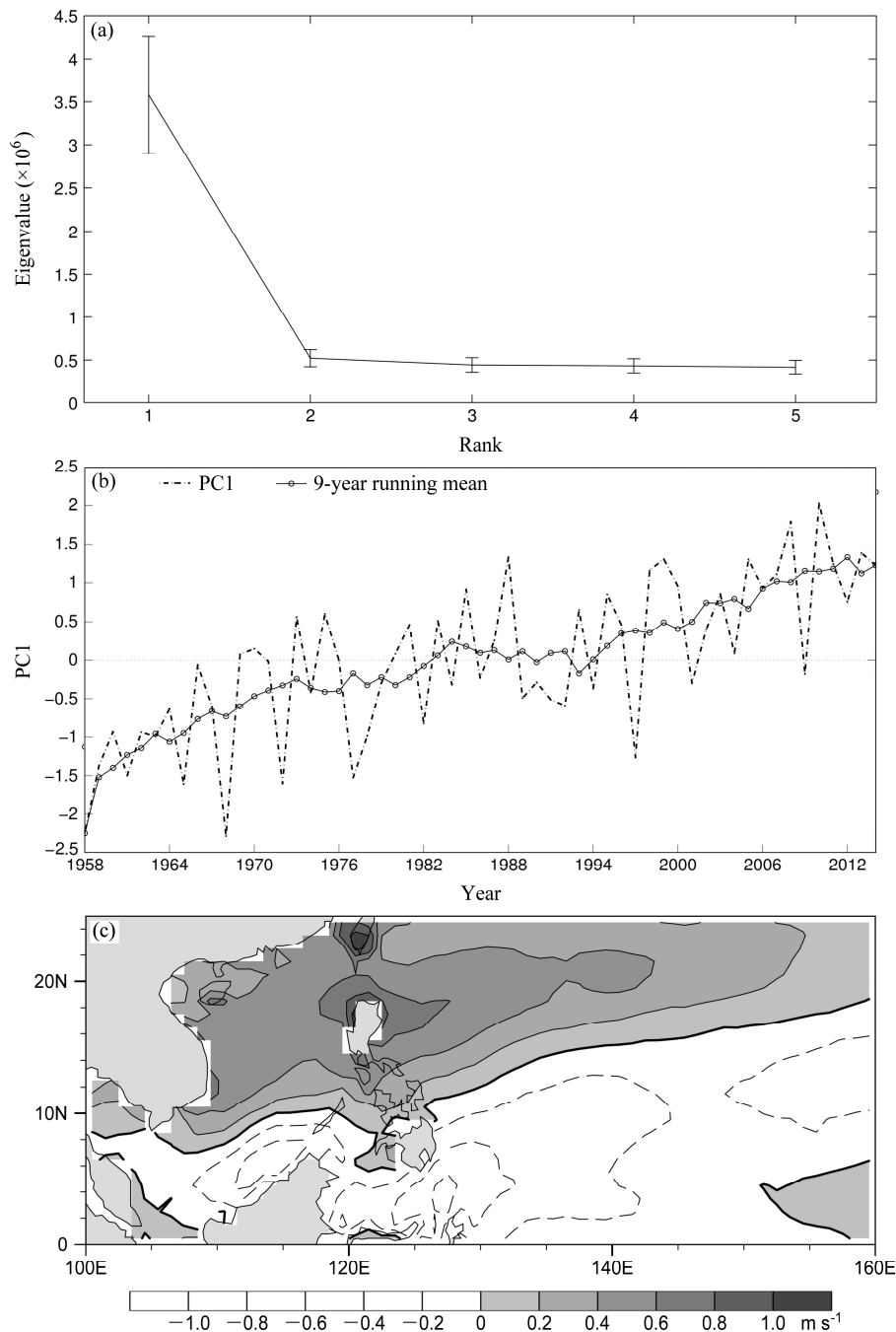


图4 同图2, 但为风速距平

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for wind speed anomaly

的作用。值得注意的有两点, 一是菲律宾海中部地区海气比湿差的上升趋势最弱, 而南部和北部的差异较小, 与潜热通量变化趋势存在明显的南北差异不同; 二是在南海南部地区海气比湿差下降的中心位于中南半岛南部地区, 说明海气比湿差对此处潜热通量的下降趋势有更大的影响。

从以上的分析可知, 风速和海气比湿差对潜热

通量的上升趋势都有一定的作用。然而在不同的区域, 二者的作用是不尽相同。另外, 由公式(1)可知:

$$Q'_{\text{h}} = \rho L_e C_e (\Delta q' \cdot \bar{U} + \bar{\Delta q} \cdot U' + \Delta q' \cdot U' - \overline{\Delta q' \cdot U'}), \quad (3)$$

其中, Q'_{h} 、 $\Delta q'$ 、 U' 分别代表潜热通量、海气比湿差和风速的距平, $\bar{U}$ 和 $\bar{\Delta q}$ 表示风速和海气比湿

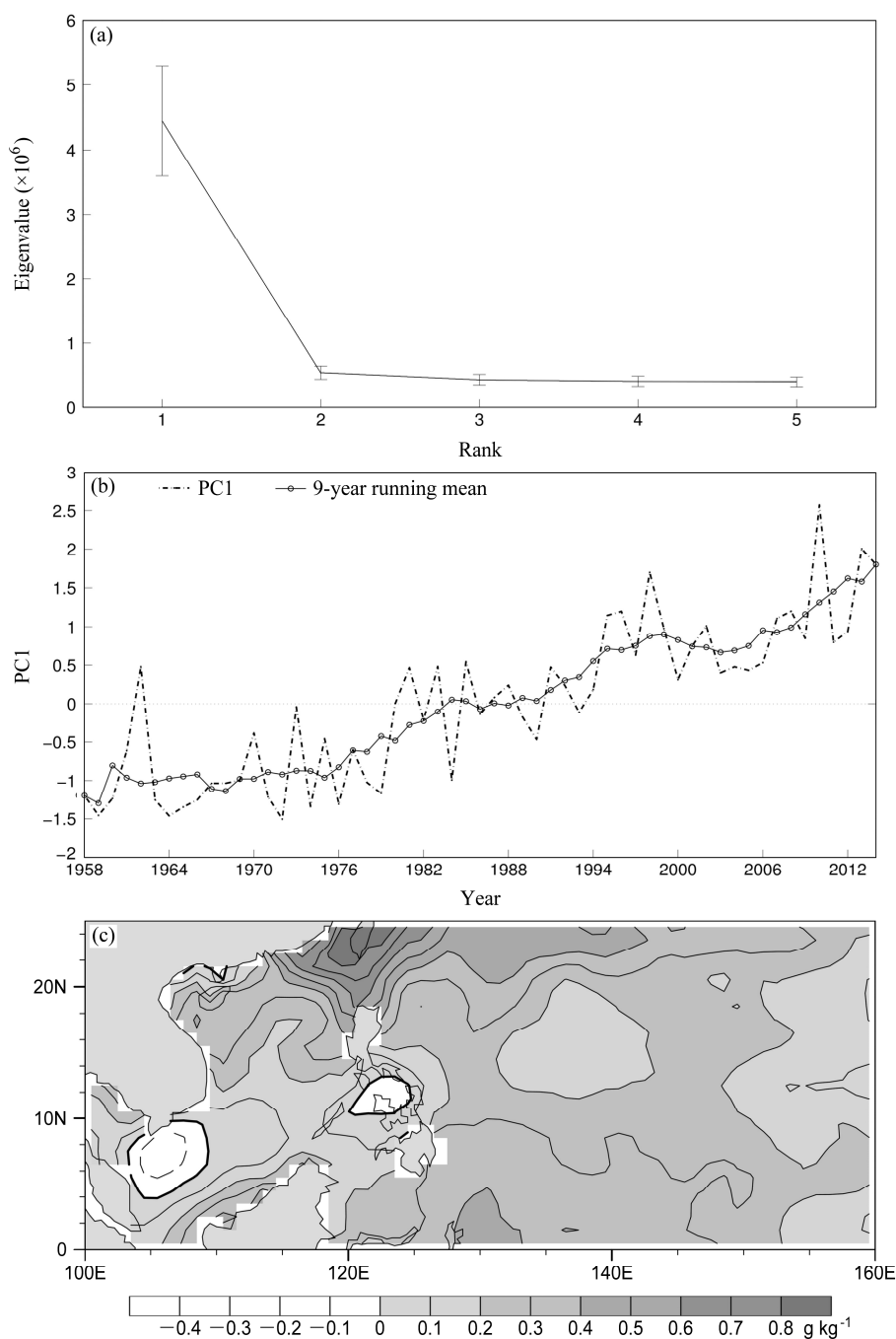


图5 同图2, 但为海气比湿差距平

Fig. 5 Same as in Fig. 2, but for the air-sea humidity difference anomaly

差的气候平均场。对于 Q'_h 的趋势而言, 须考虑等式右边前三项的作用。可见, 考虑风速或海气比湿差对潜热通量的影响时, 还需考虑平均场的作用。另外, $\rho L_e C_e \Delta q' \cdot U'$ 项也对潜热通量趋势有影响, 但为二阶小项, 可暂不考虑 (Cayan, 1992; Tanimoto et al., 2003)。为具体研究风速和海气比湿差对潜热通量变化趋势的影响, 分别计算风速项 $\rho L_e C_e \overline{\Delta q} \cdot U'$

和海气比湿差项 $\rho L_e C_e \Delta q' \cdot \overline{U}$ 的变化趋势, 其中风速平均场 $\overline{U}$ 和海气比湿差平均场 $\overline{\Delta q}$ 取为 1958~2014 年冬季的气候平均态 (结果如图 6 所示)。公式右边括号里面的最后一项的物理意义是海气比湿差和风速的协变化对潜热通量影响的平均值 (协方差)。

比较分析发现, 南海北部和菲律宾海北部地

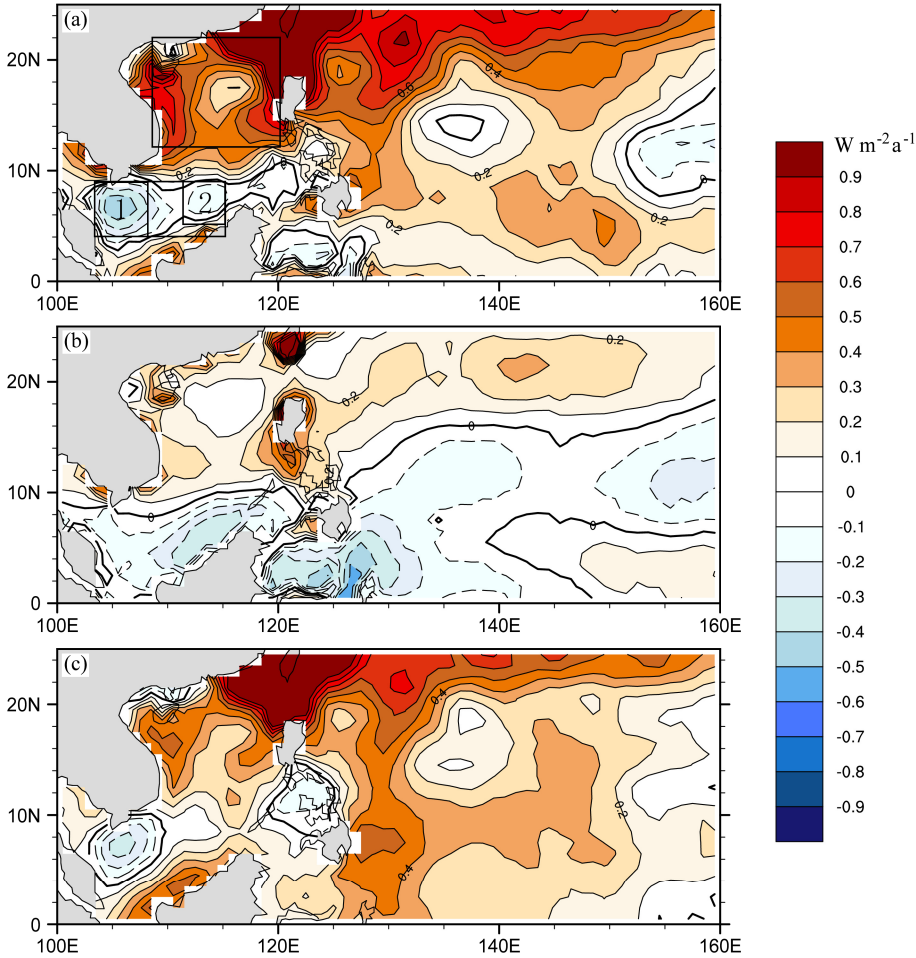


图 6 1958~2014 年冬季 (a) 潜热通量距平、(b) 风速项、(c) 海气比湿差项的线性趋势分布 (粗线为零线)
Fig. 6 Linear slopes of (a) latent heat flux anomaly, (b) the term of wind speed, and (c) the term of air-sea humidity difference in the winter from 1958 to 2014 (bold lines mark zero contours)

区, 风速项和海气比湿差项对潜热通量的增加都有一定的作用, 其中海气比湿差的贡献更大。在菲律宾海南部地区, 潜热通量的上升趋势则是海气比湿差项的贡献, 风速项的贡献为负。南海南部的情况比较复杂, 如上文提到的, 南海南部潜热通量的两个下降中心分别对应着风速项和海气比湿差项的贡献。为具体分析, 我们计算了如图 6a 中所示的南海北部 (12°N~22°N, 108°E~120°E)、南海南部 (4°N~9°N, 103°E~115°E)、南海南部 1 区 (4°N~9°N, 103°E~108°E)、南海南部 2 区 (5°N~9°N, 111°E~115°E) 区域平均的潜热通量距平、风速项、海气比湿差项以及二阶项变化趋势 (结果如表 1 所示)。可见, 二阶项趋势比其余两项小 1~2 个量级, 可暂不考虑。南海北部地区, 风速项和海气比湿差项均有显著的上升趋势, 其中海气比湿差项的作用更大, 约为

表 1 南海北部、南海南部、南部 1 区和南部 2 区区域平均的潜热通量距平、风速项、海气比湿差项以及二阶项的变化趋势
Table 1 Slopes of latent heat flux anomaly, the term of wind speed, the term of air-sea humidity difference, and the second order term averaged over northern SCS, southern SCS, region 1 of southern SCS, and region 2 of southern SCS

	变化趋势/ $\text{W m}^{-2} \text{a}^{-1}$			
	潜热通量距平	风速项	海气比湿差项	二阶项
南海北部	0.588*	0.182*	0.412*	-0.008
南海南部	-0.145	-0.149*	0.019	-0.002
南海南部 1 区	-0.287*	-0.074	-0.182*	-0.008
南海南部 2 区	-0.085	-0.278*	0.187*	0.001

注: *表示通过 95% 信度检验。

风速项的 2.3 倍。南海南部整体而言, 风速项有显著的下降趋势, 而比湿差项变化趋势很小, 比风速项小一个量级。在南海南部 1 区, 风速项和海气比湿差项

均有下降趋势, 但海气比湿差项的下降趋势更强, 约为风速项的 2.6 倍。在南部 2 区, 风速项为显著的下降趋势, 而海气比湿差项有显著的上升趋势, 其中风速项的下降趋势更强, 导致潜热通量为下降趋势。

通过以上分析可以发现, 南海北部和菲律宾海地区潜热通量呈上升趋势的主要原因是海气比湿差增大, 南海南部潜热通量的下降趋势的主要原因, 在东侧 (2 区) 主要是风速减小, 在西侧 (1 区) 主要是海气比湿差减小, 南部整体而言, 主要是风速减小。从表 1 可见, 南海南部和北部的风速项、海气比湿差项均有较大差异, 二者的共同作用导致了南海潜热通量长期变化趋势的南北差异。

4 潜热通量变化原因与局地环流及海表温度变化的关系

潜热通量是海气相互作用的重要参量, 其同时受到海洋和大气的影 响。Cayan(1992)曾指出大气环流通过影响风速和空气湿度来影响潜热通量。从公式 (1) 和 (2) 可知, 海表温度也与潜热通量密切相关。为研究西太平洋—南海地区的潜热通量的变

化原因与大气环流及海表温度变化的关系, 本文计算了该区域 1958~2014 年冬季表面气压 (surface pressure) 和海表饱和比湿 (可由海表温度计算) 的线性趋势分布 (如图 7b 和图 8b 所示)。

4.1 风速变化趋势与局地环流变化的关系

如图 7b 所示, 表面气压在南海中部 (10°N) 附近有最大的下降中心, 下降中心线可延伸到菲律宾海中部地区 (图 7b 中点线所示)。注意到该下降中心线与图 7a 中风速变化零线的位置基本一致, 即表面气压下降中心线以北地区风速为增大趋势, 以南地区风速为减小趋势。根据变压风原理, 表面气压变化产生指向该中心线的变压风。在冬季, 西太平洋—南海地区的气候平均风场为强的东北风, 所以变压风场在该表面气压下降中心线以北地区与平均风场夹角小于 90°, 风速呈增大趋势, 而在以南地区与平均风场夹角大于 90°, 风速呈减小趋势。可见, 表面气压的变化影响了风速的变化, 从而影响了潜热通量的变化, 如 3.3 节所述。

4.2 海气比湿差变化趋势与局地环流及海表温度变化的关系

表面气压的变化不仅影响着风速的变化, 还影

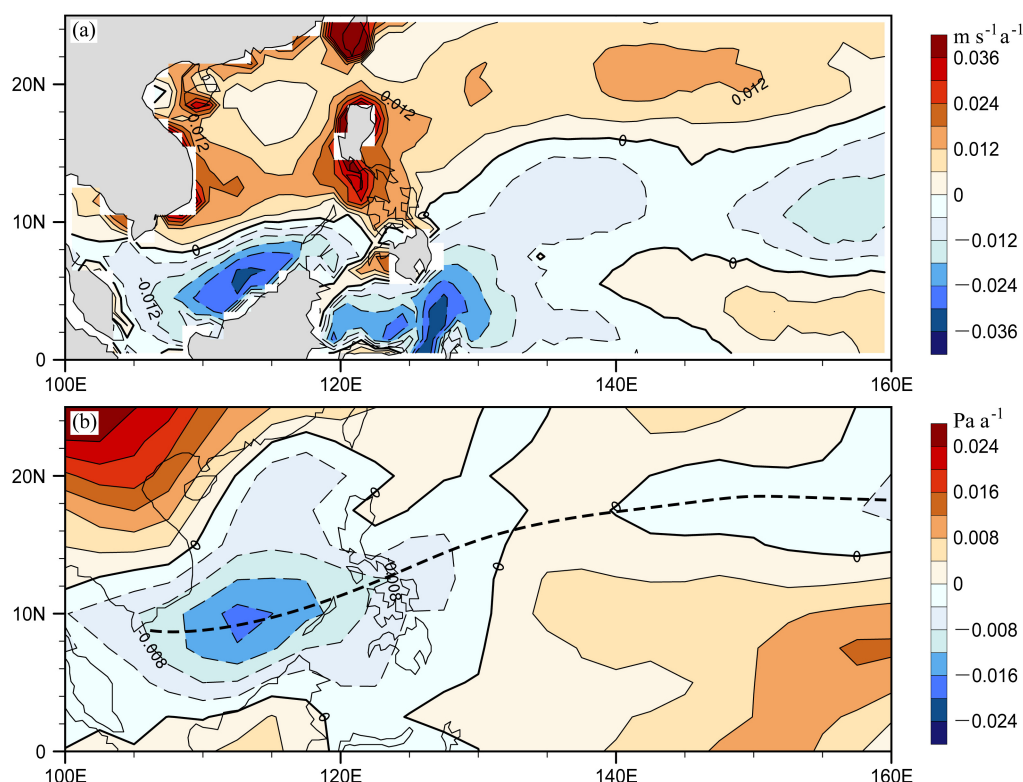


图 7 1958~2014 年冬季 (a) 风速线性趋势分布和 (b) 表面气压线性趋势分布 (粗线为零线)

Fig. 7 Linear slopes of (a) wind speed and (b) surface pressure in the winter from 1958 to 2014 (bold lines mark zero contours)

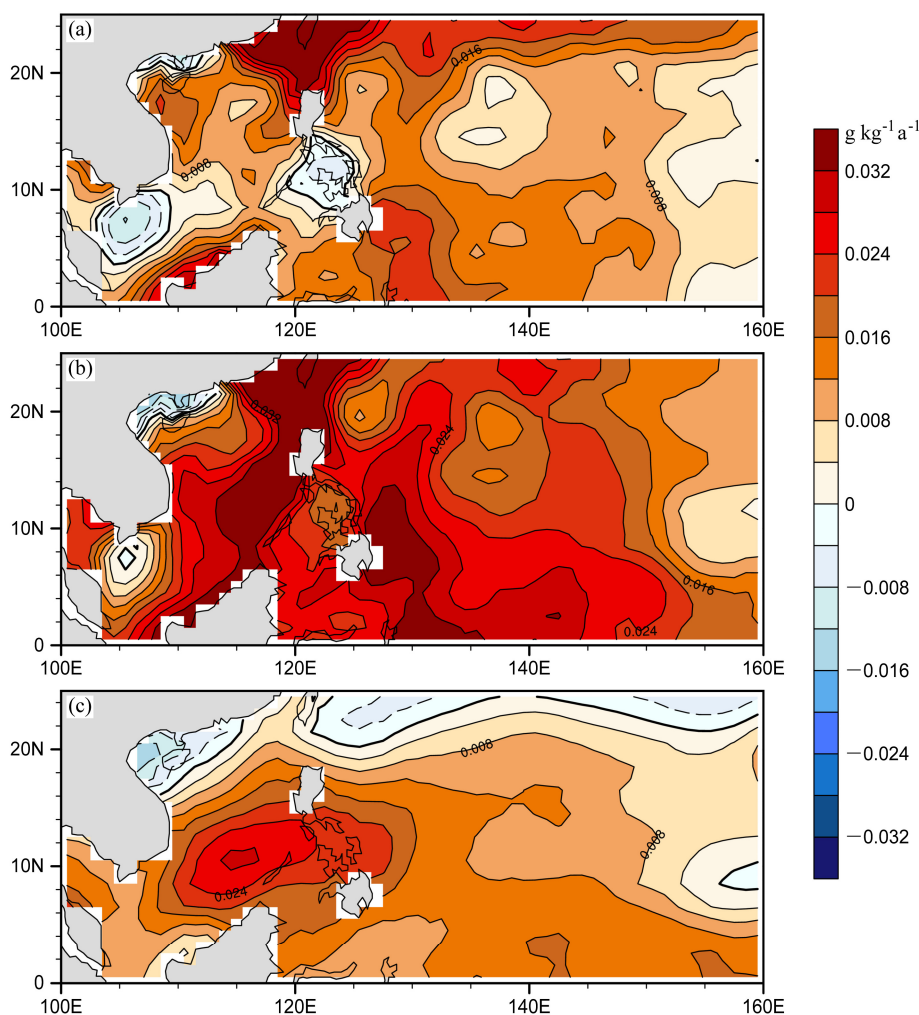


图8 同图7, 但为 (a) 海气比湿差、(b) 海表饱和比湿、(c) 空气比湿

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for (a) air-sea humidity difference, (b) sea surface saturation specific humidity, and (c) near-surface air-specific humidity

响着空气湿度的变化, 因为变压风的辐合必然伴随着水汽的辐合, 如图 8c 所示, 在表面气压下降中心附近, 空气湿度有很强的上升趋势。空气湿度变化趋势影响着海气比湿差变化趋势, 但比较分析发现, 海气比湿差的变化趋势 (图 8a) 与海表饱和比湿变化趋势 (图 8b) 更为相似, 均是在中南半岛南部有极小值, 而在吕宋海峡附近有极大值, 二者的空间相关系数达到 0.67。这说明海气比湿差的变化趋势虽然也受到局地环流变化的影响, 但主要还是取决于海表温度的变化趋势特征。

5 总结和讨论

通过分析 1958~2014 年 OAFlux 潜热通量资料, 发现西太平洋—南海地区年平均及季节平均的

潜热通量均呈显著的上升趋势, 其中冬季平均的上升趋势最强, 达到 $4.00 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$ 。然而, 通过 Trend-EOF 分析发现该地区冬季潜热通量的趋势有着明显的南北差异, 特别是在南海地区, 南海北部为上升趋势, 而南海南部为下降趋势。为研究潜热通量变化趋势的成因, 本文对影响潜热通量的风速和海气比湿差两个因子做了 Trend-EOF 分析。发现风速的变化趋势存在明显的南北差异, 北部为上升趋势, 南部为下降趋势, 有利于潜热通量变化趋势南北差异的形成, 而海气比湿差仅在中南半岛南部部分地区有下降趋势, 其余地区均为上升趋势。为具体比较分析风速和海气比湿差的作用, 本文计算了南海北部 ($12^{\circ}\text{N} \sim 22^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)、南海南部 ($4^{\circ}\text{N} \sim 9^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E} \sim 115^{\circ}\text{E}$)、南海南部 1 区 ($4^{\circ}\text{N} \sim 9^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E} \sim 108^{\circ}\text{E}$)、南海南部 2 区 ($5^{\circ}\text{N} \sim$

9°N, 111°E~115°E) 区域平均的潜热通量距平、风速项、海气比湿差项以及二阶项的变化趋势, 发现南海北部潜热通量呈上升趋势的原因主要是海气比湿差增大, 而南海南部潜热通量呈下降趋势, 整体而言主要原因是风速减小, 但具体分析发现在东侧的加里曼丹岛以北海域主要原因是风速减小, 而在西侧的中南半岛以南海域主要原因是海气比湿差减小。可见, 风速和海气比湿差的共同作用造成了南海潜热通量长期变化趋势的南北差异。

利用 NCEP/NCAR 再分析表面气压数据和 OAFlux 海表温度数据, 本文进一步研究了西太平洋—南海地区潜热通量变化趋势原因与局地环流和海表温度的关系。发现风速的变化趋势与表面气压变化趋势密切相关。表面气压下降趋势的中心线与风速变化趋势的零线基本一致, 表面气压变化产生的变压风使得北部风速增大, 而南部风速减小。表面气压的变化虽然也影响空气湿度, 从而影响海气比湿差, 但研究发现海气比湿差的变化趋势主要还是取决于海表温度的变化趋势。

本文研究了西太平洋—南海地区潜热通量的长期变化趋势, 并对其成因进行了分析。西太平洋—南海海域是影响我国天气和气候的重要海域, 如王丽娟等(2008)研究发现南海夏季风爆发早晚与前一年冬季南海潜热通量距平特征密切相关。那么, 该区域潜热通量整体的上升趋势以及冬季南北趋势的差异, 将如何影响我国的天气和气候, 这是我们下一步要研究的方向。

参考文献 (References)

- Alexander M A, Scott J D. 1997. Surface flux variability over the North Pacific and North Atlantic oceans [J]. *J. Climate*, 10 (11): 2963–2978, doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<2963:SFVOTN>2.0.CO;2.
- Araligidad N M, Maloney E D. 2008. Wind-driven latent heat flux and the intraseasonal oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (4): L04815, doi: 10.1029/2007GL032746.
- Barbosa S M, Andersen O B. 2009. Trend patterns in global sea surface temperature [J]. *International Journal of Climatology*, 29 (14): 2049–2055, doi: 10.1002/joc.1855.
- Cayan D R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 5 (4): 354–369, doi: 10.1175/1520-0442(1992)005<0354:LASHFA>2.0.CO;2.
- Fairall C W, Bradley E F, Rogers D P, et al. 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment [J]. *Geophys. Res.*, 101 (C2): 3747–3764, doi: 10.1029/95JC03205.
- Guo H, Xu M, Hu Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005 [J]. *International Journal of Climatology*, 31 (3): 349–358, doi: 10.1002/joc.2091.
- Hannachi A. 2007. Pattern hunting in climate: A new method for finding trends in gridded climate data [J]. *International Journal of Climatology*, 27 (1): 1–15, doi: 10.1002/joc.1375.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响 [J]. *大气科学*, 18 (4): 456–465. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impact of the convective activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 18 (4): 456–465.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. *大气科学*, 22 (4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in south Asian monsoon region in summer [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 22 (4): 460–469.
- 李秀珍, 梁卫, 温之平. 2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系 [J]. *热带气象学报*, 26 (5): 626–632. Li Xiuzhen, Liang Wei, Wen Zhiping. 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in south China in northern autumn, winter and spring [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 626–632.
- Li G, Ren B H. 2012. Evidence for strengthening of the tropical Pacific Ocean surface wind speed during 1979–2001 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 107 (1–2): 59–72, doi: 10.1007/s00704-011-0463-3.
- Li G, Ren B H, Yang C Y, et al. 2011. Revisiting the trend of the tropical and subtropical Pacific surface latent heat flux during 1977–2006 [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D10): D10115, doi: 10.1029/2010JD015444.
- Liu J P, Curry J A. 2006. Variability of the tropical and subtropical ocean surface latent heat flux during 1989–2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (5): L05706, doi: 10.1029/2005GL024809.
- 刘秦玉, 贾旭晶, 孙即霖, 等. 2000. 1998 年夏季风爆发前后南海上混合层的特征及成因 [J]. *气候与环境研究*, 5 (4): 469–481. Liu Qinyu, Jia Xujin, Sun Jilin, et al. 2000. Dynamic features and formation mechanism of the upper mixed layer in the South China Sea before and after 1998 summer monsoon onset [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (4): 469–481.
- Liu W T, Katsaros K B, Businger J A. 1979. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36 (9): 1722–1735, doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2.
- 刘衍楹, 刘秦玉, 潘爱军. 2004. 太平洋海气界面净热通量的季节、年际和年代际变化 [J]. *中国海洋大学学报*, 34 (3): 341–350. Liu Yanyun, Liu Qinyu, Pan Aijun. 2004. Seasonal, annual and decadal variations of air-sea heat fluxes in the northern Pacific Ocean [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 34 (3): 341–350.
- 骆美霞, 李崇银. 2004. 南海夏季风建立的模式诊断研究 [J]. *气候与环境研究*, 9 (3): 494–509. Luo Meixia, Li Chongyin. 2004. A study of the onset of the summer monsoon over the South China Sea [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (3): 494–509.

- 曲绍厚, 胡非, 李亚秋. 2000. 1998 年 SCSMEX 期间南海夏季风海气交换的主要特征 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 434–446. Qu Shaohou, Hu Fei, Li Yaqiu. 2000. Some characteristics of air-sea exchange for the South China Sea summer monsoon in the period of SCSMEX981 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 434–446.
- Tanimoto Y, Nakamura H, Kagimoto T, et al. 2003. An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux [J]. J. Geophys. Res., 108 (C10): 3304, doi: 10.1029/2002JC001750.
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2004. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因素分析 [J]. 热带气象学报, 20 (4): 401–408. Tian Hong, GuoPinwen, Lu Weisong. 2004. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (4): 401–408.
- 王丽娟, 王辉, 闫俊岳, 等. 2008. 南海海气界面潜热通量的分布特征及其对西南季风爆发影响的初步分析 [J]. 海洋学报, 30 (1): 20–30. Wang Lijuan, Wang Hui, Yan Junyue, et al. 2008. A preliminary analysis on the distribution characteristics of the air-sea latent heat flux over the SCS and its impact on the onset of southwest monsoon [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 30 (1): 20–30.
- Weng S P. 2010. Changes of diurnal temperature range in Taiwan and their large-scale associations: Univariate and multivariate trend analyses [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 88 (2): 203–226, doi: 10.2151/jmsj.2010-206.
- 吴国雄. 1992. 海温异常对台风形成的影响 [J]. 大气科学, 16 (3): 322–332. Wu Guoxiong. 1992. Tropical storm formation in response to sea surface temperature anomaly [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 16(3): 322–332.
- 谢安, 宋焱云, 毛江玉, 等. 2001. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 425–434. Xie An, Song Yanyun, Mao Jiangyu, et al. 2001. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 425–434.
- Xu M, Chang C P, Fu C B, et al. 2006. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. J. Geophys. Res., 111: D24111, doi: 10.1029/2006JD007337.
- Yu L S. 2007. Global variations in oceanic evaporation (1958–2005): The role of the changing wind speed [J]. J. Climate, 20 (21): 5376–5390, doi: 10.1175/2007JCLI1714.1.
- Yu L S, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88 (4): 527–539, doi: 10.1175/BAMS-88-4-527.
- Yu L S, Weller R A, Sun B M. 2004. Mean and variability of the WHOI daily latent and sensible heat fluxes at in situ flux measurement sites in the Atlantic Ocean [J]. J. Climate, 17 (11): 2096–2118, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2096:MAVOTW>2.0.CO;2.
- Yu L S, Jin X Z, Weller R A. 2007. Annual, seasonal, and interannual variability of air-sea heat fluxes in the Indian Ocean [J]. J. Climate, 20 (13): 3190–3209, doi: 10.1175/JCLI4163.1.
- Yu L S, Jin X Z, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. OAFlux Project Tech. Rep. OA-2008-01.
- Zeng L L, Wang D X. 2009. Intraseasonal variability of latent-heat flux in the South China Sea [J]. Theor. Appl. Climatol., 97 (1–2): 53–64, doi: 10.1007/s00704-009-0131-z.
- 郑建秋, 任保华, 李根. 2009. 北太平洋海气界面湍流热通量的年际变化 [J]. 大气科学, 33 (5): 1111–1121. Zheng Jianqiu, Ren Baohua, Li Gen. 2009. Interannual variability of air-sea turbulent heat fluxes over the north Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1111–1121.
- 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2006. 东亚地区秋季水汽输送特征及水汽源地分析 [J]. 热带气象学报, 22 (4): 380–385. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2006. Climatological characteristics of water vapor transport over East Asian and water vapor source in autumn [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 380–385.
- Zhou L T, Chen G S, Wu R G. 2015. Change in surface latent heat flux and its association with tropical cyclone genesis in the western North Pacific [J]. Theor. Appl. Climatol., 119 (1–2): 221–227, doi: 10.1007/s00704-014-1096-0.