

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.

北太平洋海气界面湍流热通量的年际变化

郑建秋 任保华* 李根

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘 要 本文采用美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量项目提供的 1958~2006 年月平均的湍流热通量及相关气象场数据, 利用 EOF 分析、小扰动方法、线性回归、相关分析等方法研究了北太平洋海气界面湍流热通量年际变化的时空特征、影响因子及其与大气环流的关系。结果表明, 北太平洋湍流热通量的年际变化在冬季最为显著。我国东部海域及其向中东太平洋的延伸部分为冬季潜热通量和感热通量年际变化的关键区。冬季潜热通量的年际变化在副热带太平洋和菲律宾海域主要受风速变化影响, 在北太平洋的高纬和低纬海域尤其是赤道中太平洋主要受比湿差变化影响, 而冬季感热通量的年际变化在整个北太平洋都主要受海气温差变化影响。受大尺度环流影响, 异常低压中心的东(西)侧海气比湿差和海气温度差偏小(偏大), 所以异常低压中心的东(西)侧潜热输送和感热输送偏弱(偏强)。

关键词 潜热通量 感热通量 年际变化

文章编号 1006-9895 (2009) 05-1111-11

中图分类号 P732

文献标识码 A

Interannual Variability of Air-Sea Turbulent Heat Fluxes over the North Pacific

ZHENG Jianqiu, REN Baohua*, and LI Gen

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

Abstract Based on the monthly turbulent heat fluxes and related meteorological variables datasets (1958–2006) from Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes (OAFlux) Project of Woods Hole Oceanographic Institution, the temporal and spatial characteristics, influence factors of interannual variability of air-sea turbulent heat fluxes over the North Pacific and its relation to atmospheric circulation are studied by means of empirical orthogonal functions (EOF) analysis, perturbation method, linear regression and correlation analysis. The result shows that interannual variability of air-sea turbulent heat fluxes over the North Pacific is the most prominent in winter among the four seasons. The East China Sea and its extension to the mid-eastern Pacific are the key regions of interannual variability of air-sea turbulent heat fluxes over the North Pacific. The anomalous wind speed has the greatest influence on the interannual variability of latent heat fluxes in winter in the subtropical Pacific and the Philippine Sea, while the anomalous specific humidity difference has the greatest impact in the high-latitude and low-latitude oceans, especially in the equatorial mid-Pacific. The interannual variability of sensible heat fluxes in winter depends primarily on the air-sea temperature difference anomalies in the whole North Pacific. Under the influence of large-scale atmospheric circulation, negative (positive) air-sea specific humidity difference and temperature difference anomalies tend to occur to the east

收稿日期 2008-04-03, 2008-11-13 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675028, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600, 中国科学技术大学青年基金资助项目

作者简介 郑建秋, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: qiu@ustc.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: ren@ustc.edu.cn

(west) of an anomalous low, therefore negative (positive) latent heat fluxes and sensible heat fluxes anomalies are found to the east (west) of an anomalous low.

Key words latent heat fluxes, sensible heat fluxes, interannual variability

1 引言

气候变化不仅取决于大气自身的影响,海洋对其的影响近年来倍受关注(秦正坤等, 2007; 竺夏英等, 2008; Bao, 2008; Niu et al., 2008)。海气相互作用过程的研究,有助于完善海洋-大气耦合模式,提高数值模式预报的质量。揭示海洋与大气界面热通量交换的特点,是深入研究海气相互作用的基础。

由于海气界面湍流热通量缺乏长期完整的实测资料,热通量研究的数据主要由气象场通过块体空气动力学公式(bulk aerodynamic formulas)(Liu et al., 1979)计算获得。热通量相关的气象场,包括风速、温度、比湿等,主要来源于浮标观测、轮船报告、卫星遥感反演和数值预报模式,但这些方法得到的资料都存在不足,或者时间跨度和空间覆盖面受限,或者存在较大的系统误差和随机误差,从而影响了海气界面热交换的深入研究。美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量项目综合分析了不同资料的优缺点,通过变分客观分析(variational objective analysis)(Yu et al., 2007a)获得了相关气象场的最优估算值,再由最新的热通量算法 COARE 3.0 (Fairall et al., 2003)计算出湍流热通量,即潜热通量和感热通量。这套客观分析海气通量数据(OAFlux)有较长的时间跨度(1958~2006年),较高的分辨率($1^\circ \times 1^\circ$)且覆盖全球,与浮标实测值的偏差小于其它几套通量资料(ERA40、NCEP1 和 NCEP2)(Yu et al., 2008),改进了海气界面湍流热通量研究的数据资料。

关于海气界面热通量的变化以及影响热通量变化的因素,国内外学者已经进行了一些研究。Fu et al. (1992)采用全球海洋大气综合数据集(COADS)分析了热带太平洋潜热通量的变化,并指出热带太平洋潜热通量变化的控制因子;刘衍韞等(2004)采用 COADS 资料通过 EOF 分析对太平洋海气界面净热通量的季节、年际和年代际变化进行了研究;周天军等(2002)提出热带印度洋海气热通量交换的区域性特征明显,海洋对大气的强迫主

要是通过潜热加热实现的;Tanimoto et al. (2003)的研究指出在北太平洋中部湍流热通量的变化会引起局地海温的变化,而在海洋内部动力作用引发海温异常的区域,海温异常对湍流热通量的变化起主要作用;Alexander et al. (1997)研究了北太平洋和北大西洋湍流热通量与海平面气压主模态的关系,提出湍流热通量的变化主要是由低层大气环流引起的。

目前,采用 OAFlux 数据对海气界面湍流热通量变化的研究主要集中于印度洋和大西洋,如 Yu et al. (2007b)采用 OAFlux 数据分析了印度洋海气界面热通量的年变化、季节变化和年际变化,并与 NCEP1、NCEP2、ERA40 等通量数据的结果进行了比较;Jiang et al. (2007)采用 OAFlux 数据分析了热带大西洋湍流热通量的季节变化,并研究了海表风速、海气温差、海气湿度差等因子对湍流热通量的影响。北太平洋的热状况会影响我国东部的降水(余贞寿等, 2005),国内学者已采用 COADS 资料(Fu et al. 1992; 刘衍韞等, 2004; 周天军等, 2002)、GOALS/LASG 模式(张学洪等, 1998)等分析了北太平洋海气界面湍流热通量的变化。采用改进的 OAFlux 数据对北太平洋海气界面湍流热通量变化进行研究有助于增进对北太平洋热状况的理解,也有助于我国东部降水的研究。故本文采用 OAFlux 数据,利用方差分布和 EOF 分析揭示北太平洋湍流热通量的分布特征,利用小扰动方法和回归分析研究海表面风速、比湿和海气温差等因素在北太平洋各局部地区对湍流热通量年际变化的影响,并利用 EOF 分析和相关分析探讨湍流热通量年际变化与大气环流的关系。

2 资料与方法

采用美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量项目提供的 1958~2006 年月平均数据(<http://oafux.who.edu/data.html>),包括湍流热通量(潜热通量和感热通量)及相关气象场(海表温度、2 m 高度气温、2 m 高度比湿和 10 m 高度水平风速),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。通量为正,表示海洋损失热量;

通量为负, 表示海洋获得热量。由海表温度根据马格努斯 (Magnus) 经验公式计算出饱和水汽压, 代入比湿公式求得纯水表面的饱和比湿。考虑到海水盐度引起的水汽压下降, 将纯水表面饱和比湿乘以因子 0.98 以获得海水表面的饱和比湿 (Fairall et al., 1996)。此外, 还采用了美国气候诊断中心提供的 NCEP/NCAR 再分析资料中的海平面气压场的月平均资料 (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

Yu et al. (2007) 指出全球平均潜热通量的长期变化呈递增趋势, Liu et al. (2006) 对热带及副热带的潜热通量进行分析也发现潜热通量存在长期的递增趋势。为分析北太平洋海气界面湍流热通量的年际变化, 以下研究中所采用的数据已采用 Butterworth 递归滤波器滤去 10 a 以上尺度变化。文中分析方法采用了 EOF 分析、功率谱分析、小扰动方法、线性回归和相关分析。

3 湍流热通量的年际变率分析

定义 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12~2 月为冬季, 将潜热通量和感热通量的月平均资料处理成季节平均资料, 由于缺乏 2007 年通量数据, 2006 年冬季值取为该年 12 月的数据。

对北太平洋四个季节的潜热通量分别求标准差, 得到四个季节潜热通量年际变化的标准差分布 (图 1)。由图 1 可见, 春季、秋季、冬季的标准差分布形态相似, 在我国东部海域潜热通量年际变化显著, 冬季尤其突出, 年际变化显著区域可延伸至中东太平洋。而夏季潜热通量在整个北太平洋没有大范围的显著变化区域。图 2 给出的是感热通量四个季节年际变化的标准差分布, 由图可见, 夏季整个北太平洋感热通量的年际变化小, 而春季、秋季、冬季的感热通量在我国东部海域以及太平洋北部的白令海、阿拉斯加湾年际变化显著, 尤其是冬季, 25°N 以北海域的感热通量标准差几乎都在 4 W/m^2 以上。

Cayan (1992a) 采用 COADS 资料给出了 1 月份北太平洋海表湍流热通量标准差的分布, 指出潜热通量标准差的高值区主要位于黑潮附近, 数值在 40 W/m^2 以上, 最大标准差可达 60 W/m^2 。感热通量的标准差分布等值线呈西南-东北走向, 大值

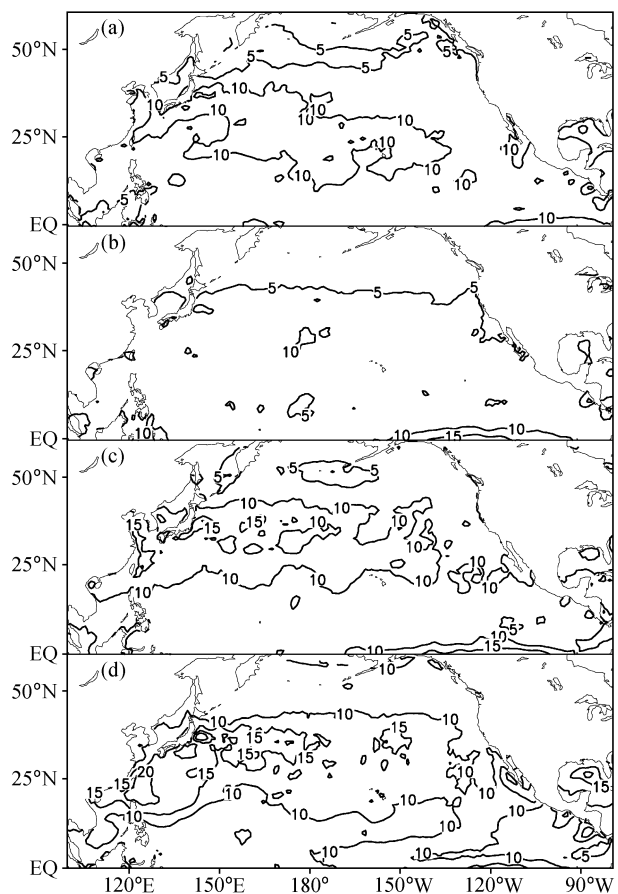


图 1 北太平洋潜热通量年际变化的标准差分布 (单位: W/m^2): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季
Fig. 1 The standard deviation of interannual variability of latent heat fluxes over the North Pacific (units: W/m^2): (a) Spring; (b) summer; (c) fall; (d) winter

区出现在西北太平洋, 最大标准差可达 30 W/m^2 。图 1 和图 2 中冬季湍流热通量标准差与 Cayan (1992a) 给出的标准差的分布型基本一致, 但图 1 中潜热通量最大标准差约为 20 W/m^2 , 图 2 中感热通量最大标准差约为 15 W/m^2 , 与 Cayan (1992a) 的结果在数值上有较大差异。

由四个季节潜热通量与感热通量的方差分布可以看出, 夏季湍流热通量的年际变化不显著, 春季、秋季与冬季湍流热通量年际变化的空间分布相似, 其中冬季的变化最为显著, 故以下对湍流热通量年际变化的分析只重点考虑冬季的情况。

4 冬季湍流热通量年际变化的时空分布

首先, 计算出 1958~2006 年冬季潜热通量和感热通量的距平以消除其年变化, 然后对热通量距

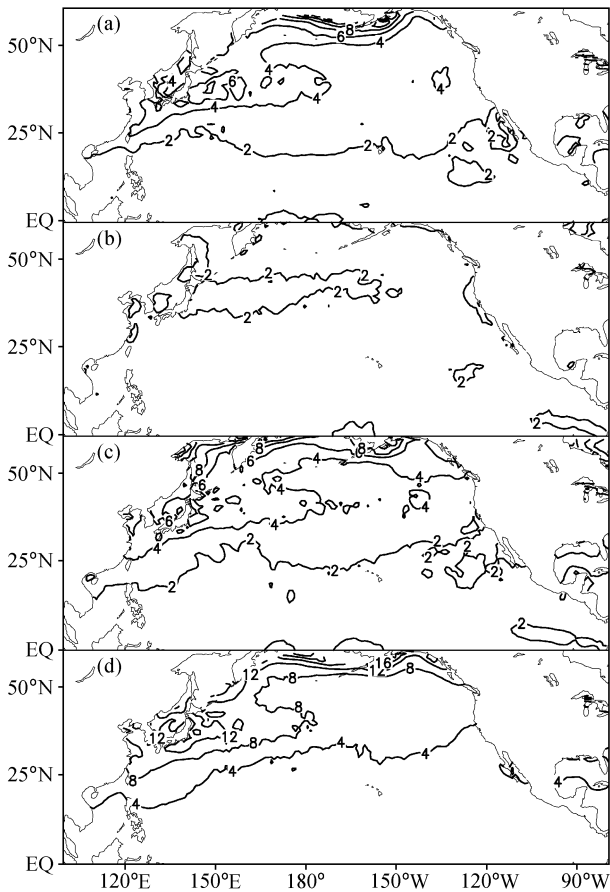


图2 同图1, 但为感热通量
Fig. 2 As in Fig. 1 but for sensible heat fluxes

平作 EOF 分析。潜热通量前三模态的方差解释率分别为 23.6%、14.6%、8.0%，感热通量前三模态的方差解释率分别为 22.9%、19.3%、12.4%。这里着重分析潜热通量和感热通量第一模态的时空分布。

图 3 给出的是潜热通量 EOF 分析第一模态的空间分布和时间系数。第一模态空间型主要表征为偶极子分布, 在我国东部海域及其向中东太平洋的延伸部分为正值, 中太平洋低纬海域存在一负值区。对第一模态的时间系数采用落后自相关方法进行功率谱分析, 其中最大落后步长取 15, 得到该时间序列存在 5 年的显著周期, 这可能与海气系统年际变化的最强信号 ENSO 有关, 即冬季潜热通量的年际变化可能受到 ENSO 的影响。

计算 Niño3.4 区 (5°N~5°S, 120°W~170°W) 的海表温度距平, 定义海温距平高于 1℃ 的冬季为暖冬, 海温距平低于 -1℃ 的冬季为冷冬。1958~2006 年包含 9 个暖冬 (1965、1968、1972、1982、1986、1991、1994、1997、2002), 7 个冷冬 (1970、1973、1975、1984、1988、1998、1999)。利用合成分析给出 1958~2006 年暖冬与冷冬北太平洋潜热通量及海气变量的距平 (图 4)。由图 4a 可见, 暖冬黑潮附近潜热通量比正常年明显减弱, 而在中纬度及赤道东太平洋潜热通量比正常年明显增强。从

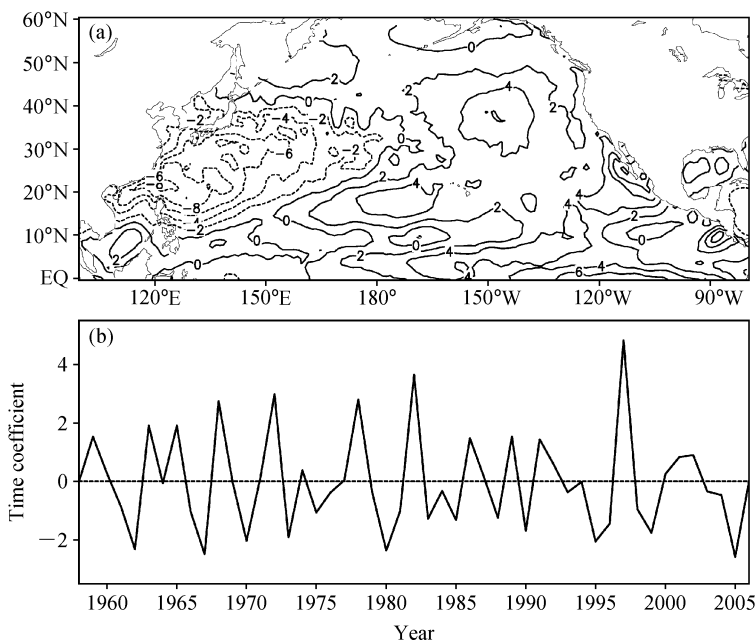


图3 潜热通量 EOF 分析第一模态的 (a) 空间分布 (单位: W/m^2) 和 (b) 时间系数
Fig. 3 (a) The first EOF mode (EOF1) of latent heat fluxes (units: W/m^2) and (b) the associated time series

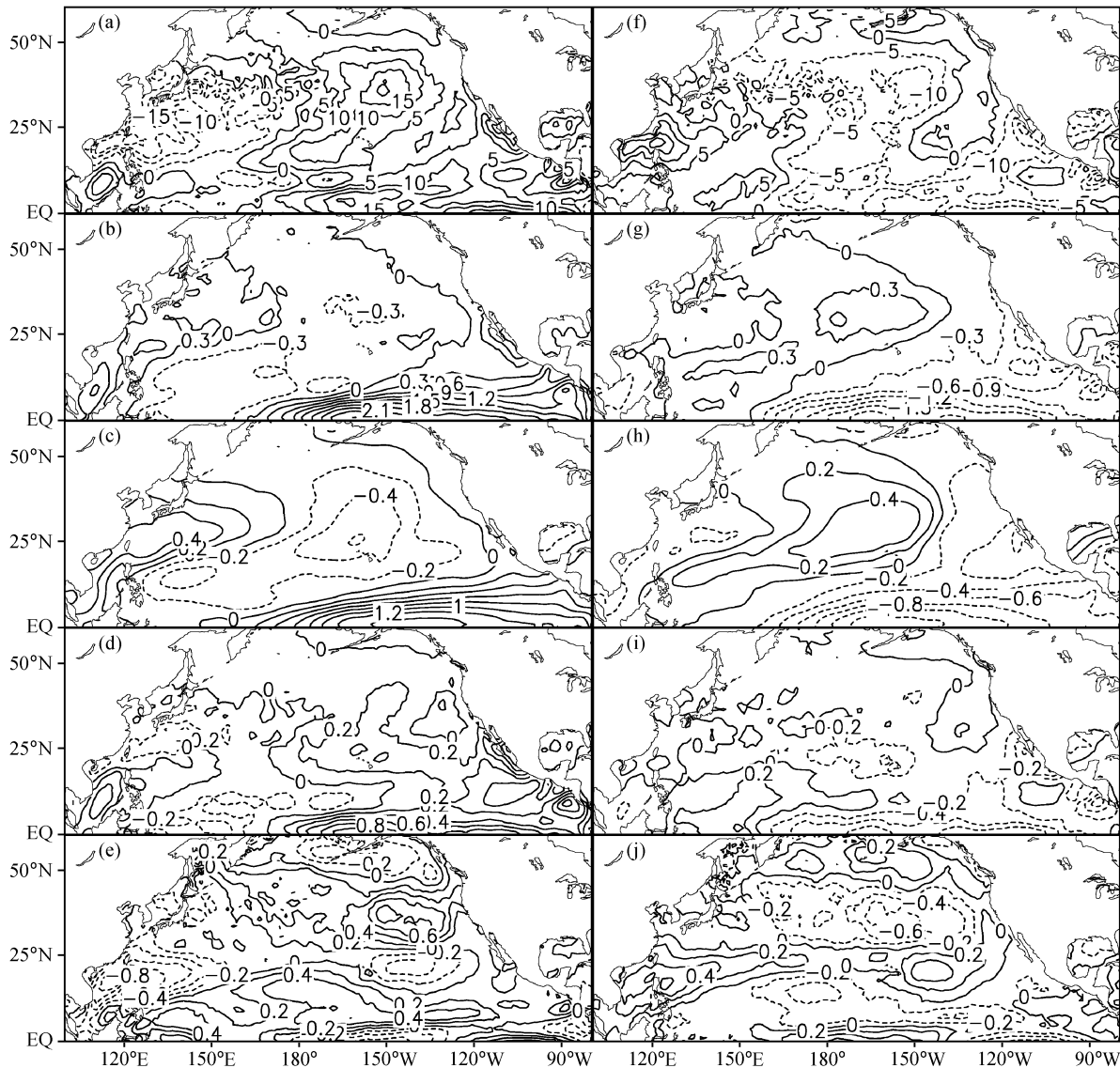


图 4 1958~2006 年北太平洋 (a~e) 暖冬和 (f~j) 冷冬各物理量的距平分布: (a, f) 潜热通量; (b, g) 饱和比湿; (c, h) 2 m 高度比湿; (d, i) 海气比湿差; (e, j) 10 m 风速

Fig. 4 The composite anomaly maps of (a, f) latent heat fluxes, (b, g) saturation specific humidity, (c, h) specific humidity at 2 m, (d, i) difference of air-sea specific humidity, (e, j) wind speed at 10 m over the North Pacific in (a~e) warm winters and (f~j) cold winters during 1958~2006

图 4b 和 4c 可以看出, 暖冬赤道东太平洋海温的异常升高使得赤道东太平洋洋面的饱和比湿和 2 m 高度空气比湿异常增大, 黑潮附近洋面的饱和比湿和 2 m 高度空气比湿也增大, 中纬度东太平洋洋面的饱和比湿和 2 m 高度空气比湿减小。赤道东太平洋洋面的饱和比湿增大的幅度超过 2 m 高度空气比湿, 黑潮附近洋面的饱和比湿增大的幅度小于 2 m 高度空气比湿, 中纬度东太平洋洋面的饱和比

湿减小的幅度小于 2 m 高度空气比湿, 所以海气比湿差在赤道东太平洋呈显著正值分布, 在黑潮附近为负值区, 在中纬度东太平洋为正值区, 如图 4d 所示。由图 4e 可知暖冬黑潮附近风速为显著负距平, 中纬度东太平洋洋面风速为显著正距平, 这有利于黑潮附近潜热通量的减弱和中纬度东太平洋潜热通量的增强。类似地, 可以从图 4f~j 发现冷冬北太平洋潜热通量及海气变量的变化与暖冬基本相

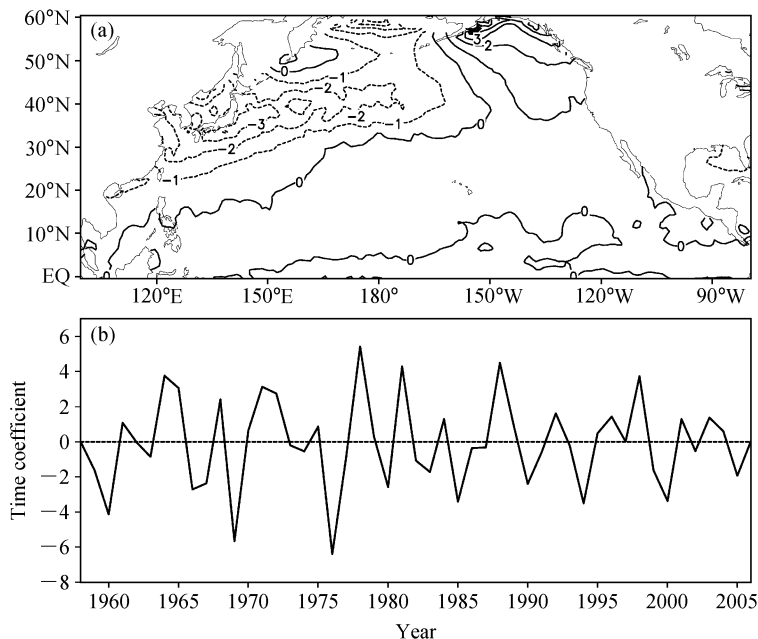


图 5 同图 3, 但为感热通量

Fig. 5 As in Fig. 3 but for sensible heat fluxes

反, ENSO 通过改变比湿和风场分布可以影响潜热通量的年际变化。

图 5 给出的是感热通量 EOF 分析第一模态的空间分布和时间系数。第一模态空间分布在我国东部海域及其向中东太平洋的延伸部分为负值, 在阿拉斯加湾为正值, 正值分布和负值分布的数值大小相当。感热通量第一模态时间序列存在 3.3 a 的显著周期, 采用与暖(冷)冬潜热通量同样的合成分析可以发现暖(冷)冬黑潮附近和阿拉斯加湾感热通量减弱(增强), 白令海海域感热通量增强(减弱), ENSO 通过改变海气温度场和风场分布可以影响感热通量的年际变化。

Cayan (1992a) 采用旋转 EOF 分析研究了潜热通量与感热通量之和在北太平洋的时空分布。为了与 Cayan (1992a) 的结果作个比较, 对潜热通量与感热通量之和的距平作 EOF 分析。EOF 分析第一模态(图略)的空间分布与潜热通量 EOF 分析第一模态的分布相似, 在中纬度主要表现为西太平洋与东太平洋位相相反。西太平洋同位相区域可延伸到 170°W, 与 Cayan (1992a) 的结果基本一致。但本研究中西太平洋的最大值约为东太平洋最大值的两倍, 而 Cayan (1992a) 的分析中西太平洋的最大值约为东太平洋最大值的 4.5 倍。这差异主要由资料不同引起, 也受二者 EOF 分析的空间和时间

范围不同影响。

从方差分布和 EOF 分析可以看出, 我国东部海域及其向中东太平洋的延伸部分为冬季潜热通量和感热通量年际变化的关键区。冬季潜热通量和感热通量的年际变化可能受到 ENSO 的影响。那么, 哪些因子可能对冬季潜热通量和感热通量的年际变化产生影响? 下面将进行分析。

5 冬季湍流热通量年际变化的影响因素分析

潜热通量和感热通量的数据来源于块体空气动力学公式, 即

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

$$Q_{sh} = \rho c_p C_h U (T_s - T_a) = \rho c_p C_h U \Delta T,$$

其中, Q_{lh} 和 Q_{sh} 分别为潜热通量和感热通量, ρ 为空气密度, L_e 为蒸发潜热, C_e 和 C_h 为交换系数, c_p 为定压比热, U 为海表风速, q_s 和 q_a 分别为海表饱和比湿和近表面的空气比湿, T_s 和 T_a 分别为海表温度和近表面的空气温度。

从公式可以看出, 潜热通量与风速和比湿差相关, 感热通量与风速和海气温差相关。为了更直观地分析潜热通量及感热通量的年际变化与各个影响因子的关系, 采用小扰动方法将这两个公式线性化,

$$\overline{Q_{lh}} + Q'_{lh} = \rho L_e C_e (\overline{U} + U') (\overline{\Delta q} + \Delta q'),$$

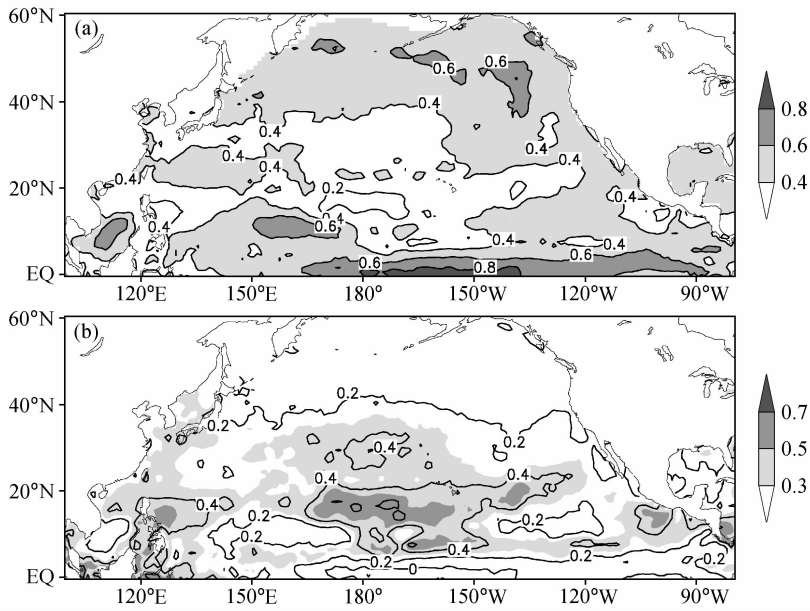


图 6 (a) $\bar{U}\Delta q'$ 和 (b) $U'\Delta q$ 对潜热通量距平的回归系数 (乘以 $\rho L_e C_e$) 的空间分布

Fig. 6 The regression values of (a) $\bar{U}\Delta q'$ and (b) $U'\Delta q$ (multiplied by $\rho L_e C_e$) on latent heat fluxes anomalies

$$\overline{Q_{sh}} + Q'_{sh} = \rho c_p C_h (\bar{U} + U') (\overline{\Delta T} + \Delta T'),$$

又

$$\overline{Q_{lh}} = \rho L_e C_e (\bar{U} \overline{\Delta q} + \bar{U}' \Delta q'),$$

$$\overline{Q_{sh}} = \rho c_p C_h (\bar{U} \overline{\Delta T} + \bar{U}' \Delta T'),$$

所以, 有

$$Q'_{lh} = \rho L_e C_e (\bar{U} \Delta q' + U' \overline{\Delta q} + U' \Delta q' - \bar{U}' \Delta q'),$$

$$Q'_{sh} = \rho c_p C_h (\bar{U} \Delta T' + U' \overline{\Delta T} + U' \Delta T' - \bar{U}' \Delta T'),$$

其中, $(U' \Delta q' - \bar{U}' \Delta q')$ 和 $(U' \Delta T' - \bar{U}' \Delta T')$ 的贡献很小可以忽略不计 (Tanimoto et al. 2003), $\bar{U} \Delta q'$ 和 $U' \overline{\Delta q}$ 分别表征比湿差和风速的变化对潜热通量年际变化的影响, $\bar{U} \Delta T'$ 和 $U' \overline{\Delta T}$ 分别表征海气温差和风速的变化对感热通量年际变化的影响。

图 6 给出了 $\bar{U} \Delta q'$ 和 $U' \overline{\Delta q}$ 对潜热通量距平 Q'_{lh} 的回归系数 (乘以 $\rho L_e C_e$) 的空间分布, 可见在北太平洋的高纬和低纬海域冬季潜热通量的年际变化主要受海气比湿差变化的影响, 尤其在赤道中太平洋海气比湿差变化对冬季潜热通量的影响非常显著。而在副热带太平洋和菲律宾群岛海域, 冬季潜热通量的年际变化则主要受风速变化的影响。Fu et al. (1992) 对 1978~1989 年 COADS 资料中潜热通量及其影响因子进行相关分析指出, 热带东太平洋潜热通量年际变化的控制因子为海气比湿差, 而在热带西太平洋海气比湿差和风速对潜热通量年际变化的影响相当。依据图 6, 热带东太平洋海气比湿差

为潜热通量年际变化的控制因子, 这与 Fu et al. (1992) 的结果一致; 而热带西太平洋除在菲律宾群岛海域风速为控制因子外, 其余海域海气比湿差为控制因子, 综合考虑整个热带西太平洋海域的结果可能与 Fu et al. (1992) 的研究结果相符。

图 7 给出了 $\bar{U} \Delta T'$ 和 $U' \overline{\Delta T}$ 对感热通量距平 Q'_{sh} 的回归系数 (乘以 $\rho c_p C_h$) 的空间分布, 显然海气温差变化是影响北太平洋冬季感热通量年际变化的主导因素, 尤其是在北太平洋的高纬和低纬海域。而风速变化对冬季感热通量年际变化的影响与海气温差变化相比要小得多, 在北太平洋中纬度海域风速变化对冬季感热通量年际变化的影响比在低纬和高纬海域要大一些。

可见, 在北太平洋潜热通量的年际变化依赖于风速和海气湿度差的年际变化, 而感热通量的年际变化主要依赖于海气温差的年际变化。这与 Cayan (1992a) 给出的研究结果一致。

6 冬季湍流热通量年际变化与大气环流的关系

分析湍流热通量的影响因子时主要考虑了各个格点上湍流热通量与风速、海气湿度差、海气温差的关系, 但年际尺度的湍流热交换是非局地的, 风速、海气湿度差、海气温差等都会受到年际变化事件时大尺度环流的影响, 因此分析冬季湍流热通量年

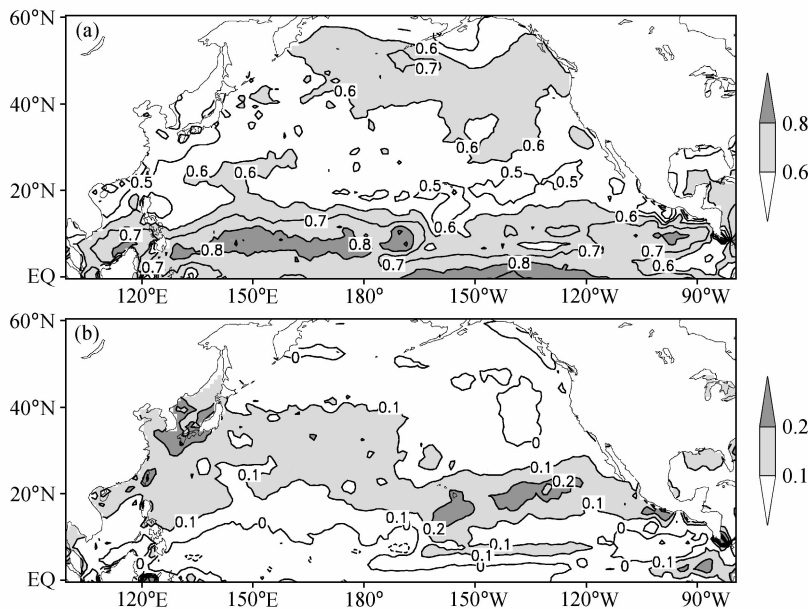


图 7 (a) $\overline{U\Delta T'}$ 和 (b) $\overline{U'\Delta T}$ 对感热通量距平的回归系数 (乘以 $\rho c_p C_h$) 的空间分布

Fig. 7 The regression values of (a) $\overline{U\Delta T'}$ and (b) $\overline{U'\Delta T}$ (multiplied by $\rho c_p C_h$) on sensible heat fluxes anomalies

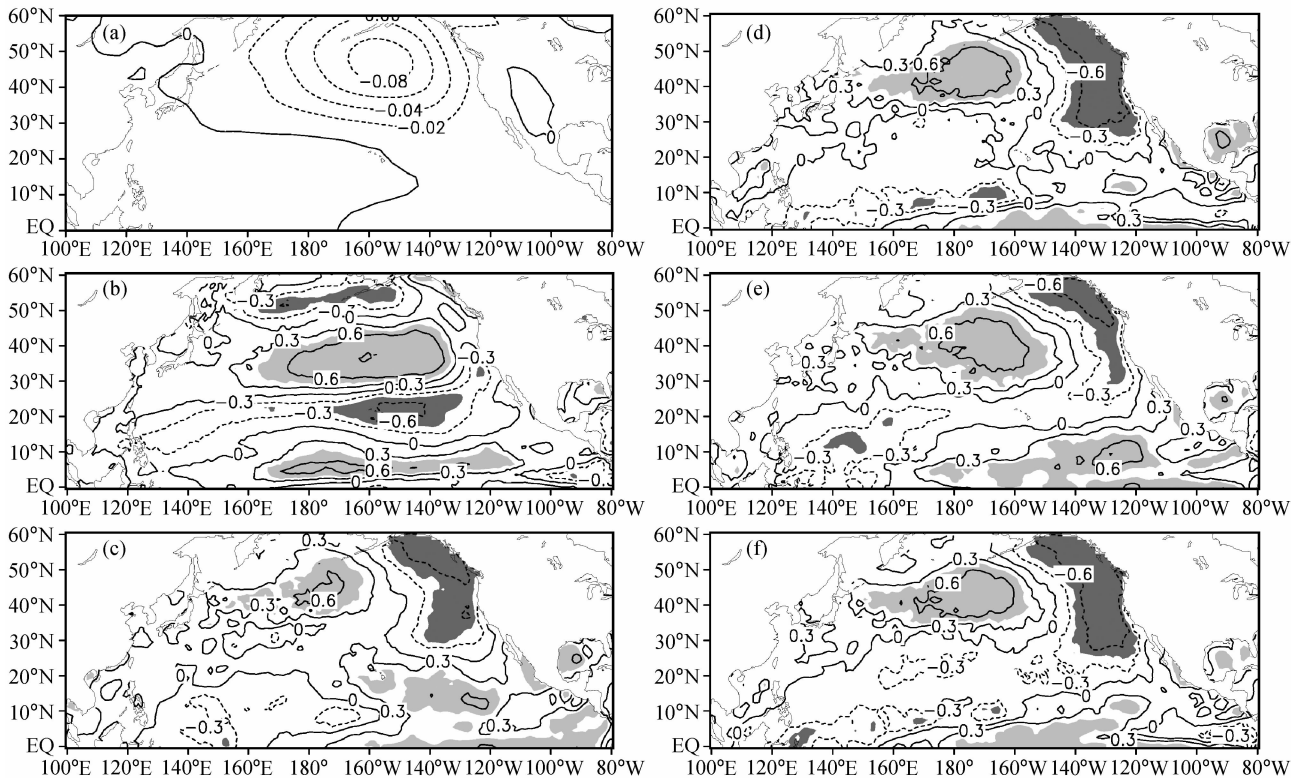


图 8 海平面气压 EOF 分析第一模态的空间分布 (a) 以及时间序列与风速 (b)、海气比湿差 (c)、海气温差 (d)、潜热通量 (e)、感热通量 (f) 距平场的相关系数分布。阴影: 超过 99.9% 信度检验

Fig. 8 (a) The spatial distribution of EOF1 of sea level pressure anomalies and correlation coefficients of the first principal component (PC1) versus anomalies of (b) wind speed, (c) air-sea specific humidity difference, (d) air-sea temperature difference, (e) latent heat fluxes and (f) sensible heat fluxes. Shading denotes the region with a confidence level exceeding 99.9%

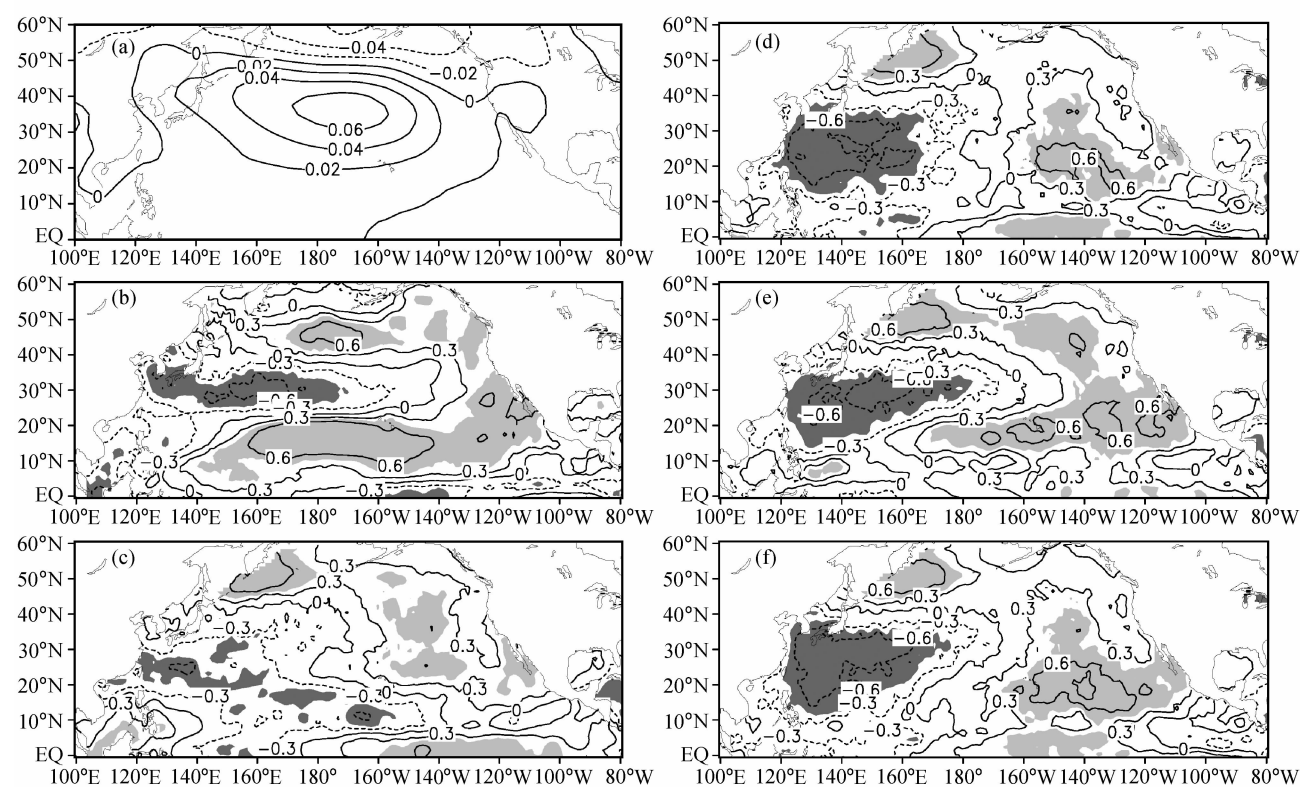


图9 同图8, 但为第二模态
Fig. 9 As in Fig. 8 but for the second EOF mode

际变化与大尺度环流的关系是必要的。下面我们参考Cayan (1992b) 的分析方法, 通过海平面气压场的主要模态诊断湍流热通量年际变化与大气环流的联系。

对北太平洋海平面气压场的距平进行 EOF 分析, 前四个模态的方差解释率分别为 44.5%、18.9%、8.9%、8.4%, 根据 North 准则 (North et al. 1982) 计算特征根的误差, 可以得出第三模态和第四模态没有显著差别。考虑到前两个模态已经可以解释方差的 63.4%, 以下只重点分析海平面气压场的前两个模态。

图 8a 给出了海平面气压场 EOF 分析第一模态的空间分布 EOF1, 主要特征为以 (45°N, 160°W) 附近为中心的负值分布, 这与阿留申低压的强度和位置的年际变化有关。图 8b~f 分别为海平面气压场 EOF 分析第一模态时间序列 PC1 与风速、海气比湿差、海气温差、潜热通量、感热通量等距平场的相关系数分布, 图中阴影部分表示超过 99.9% 信度检验的区域。由图 8b~f 可见, 风速相关型主要为纬向分布, 阿留申低压偏强时异常低压中心的南侧风速偏大, 北侧风速偏小。而海气比湿差、海气

温差、潜热通量、感热通量等则在纬向上为偶极子分布, 在中高纬海域尤为明显, 异常低压中心的西南侧为正值分布, 东侧为负值分布。这是因为在阿留申低压偏强的年份, 根据风压关系, 北太平洋中高纬海域上方为气旋性环流异常, 异常低压中心的西南侧流入的是来自高纬的干冷气流, 使得海气比湿差变大, 海气温度差也变大, 有利于海洋向大气输送潜热和感热; 而异常低压中心的东侧流入的是来自低纬的暖湿气流, 使得海气比湿差变小, 海气温度差也变小, 海洋向大气的潜热和感热输送减弱。阿留申低压偏弱时情况刚好相反。

图 9a 给出了海平面气压场 EOF 分析第二模态的空间分布 EOF2, 主要为南北向的偶极子分布, 北太平洋中纬度海域为正值分布, 中高纬海域为负值分布。图 9b~f 分别为海平面气压场 EOF 分析第二模态时间序列 PC2 与风速、海气比湿差、海气温差、潜热通量、感热通量等距平场的相关系数分布, 图中阴影部分表示超过 99.9% 信度检验的区域。与第一模态结果相似, 风速相关型主要为纬向分布, 异常低压中心的南侧风速偏大, 异常高压中

心的南(北)侧风速偏小(偏大)。异常高压中心的西(东)侧海气比湿差、海气温差、潜热通量、感热通量等偏小(偏大),异常低压情况相反。

潜热通量(感热通量)依赖于风速和海气比湿差(温度差),由于风速相关型呈纬向带状分布,同一纬度气压异常海域的东西侧风速接近,而由于大气的平流输送,异常低压中心的东(西)侧海气比湿差和海气温度差偏小(偏大),所以异常低压中心的东(西)侧潜热输送和感热输送偏弱(偏强)。异常高压中心的情况刚好相反。

7 结论与讨论

(1) 夏季湍流热通量的年际变化不显著,春季、秋季与冬季湍流热通量年际变化的空间分布相似,其中冬季的变化最为显著。

(2) 我国东部海域及其向中东太平洋的延伸部分为冬季潜热通量和感热通量年际变化的关键区。ENSO 通过改变海气比湿(温度)场和风场分布可以影响冬季潜热通量(感热通量)的年际变化。

(3) 冬季潜热通量的年际变化在副热带太平洋和菲律宾群岛海域主要受风速变化影响,在北太平洋的高纬和低纬海域,尤其是赤道中太平洋主要受比湿差变化影响;而冬季感热通量的年际变化在整个北太平洋都主要受海气温差变化影响。

(4) 冬季湍流热通量年际变化受大尺度环流影响,同一纬度气压异常海域的东西侧风速接近,而由于大气的平流输送,异常低压中心的东(西)侧海气比湿差和海气温度差偏小(偏大),所以异常低压中心的东(西)侧潜热输送和感热输送偏弱(偏强)。异常高压中心的情况刚好相反。

关于海气界面湍流热通量异常的观测分析研究目前还不多,这方面 Cayan (1992a) 采用 COADS 资料所做的研究是比较系统的。本文采用 OAFflux 数据得到的北太平洋冬季潜热通量和感热通量的标准差以及潜热通量和感热通量之和 EOF 分析的第一模态与 Cayan (1992a) 的结果分布型基本一致,但在数值上有较大差异,这主要是由于采用了不同的湍流热通量数据。关于冬季潜热通量和感热通量年际变化影响因子的研究,采用 OAFflux 数据和 COADS 资料得到的结果一致。COADS 资料主要来源于轮船观测,观测时间和范围受轮船航线的限制,难以获得准确的湍流热通量数据。而 OAFflux

数据综合了浮标观测、轮船报告、卫星遥感反演和数值预报模式,减小了数据的系统误差和随机误差,准确率较 COADS 资料有所提升,有助于改进海气界面湍流热通量变化规律的研究。

致谢 本研究的湍流热通量及气象场数据由美国伍兹霍尔海洋研究所提供,在此表示感谢!

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: 2963–2978.
- Bao Ming. 2008. Relationship between persistent heavy rain events in the Huaihe River valley and the distribution pattern of convective activities in the tropical western Pacific warm pool [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 329–338.
- Cayan D R. 1992a. Variability of latent and sensible heat fluxes estimated using bulk formulae [J]. *Atmos.-Ocean*, 30: 1–42.
- Cayan D R. 1992b. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 5: 354–369.
- 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]. *J. Geophys. Res.*, 101: 3747–3764.
- Fairall C W, Hare J E, Grachev A A, et al. 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm [J]. *J. Climate*, 16: 571–591.
- Fu Congbin, Henry D, Fan Huijun. 1992. Variability in latent heat flux over the tropical Pacific in association with recent two ENSO events [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 9: 351–358.
- Jiang Hua, Wang Hui, Wu Dexing. 2007. Seasonal variability of turbulent heat fluxes in the tropical Atlantic Ocean based on WHOI flux product [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 26 (5): 1–11.
- Liu J, Curry J A. 2006. Variability of the tropical and subtropical ocean surface latent heat flux during 1989–2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L05706.
- 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: 1722–1735.
- 刘衍韞, 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]. *Journal of Ocean University of Qingdao (in Chinese)*, 34 (3): 341–350.
- Niu Ning, Li Jianping. 2008. Interannual variability of autumn precipitation over South China and its relation to atmospheric circula-

- tion and SST anomalies [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 117–125.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699–706.
- 秦正坤, 孙照渤, 林朝晖, 等. 2007. 一个海气耦合模式对东亚夏季气候预测潜力的评估 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 426–436.
- Qin Zhengkun, Sun Zhaobo, Lin Zhaohui, et al. 2007. Evaluation on potential predictability of summer climate over East Asia by an air-sea coupled model [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (3): 426–436.
- 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: 3304–3315.
- Yu L, Weller R A. 2007a. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 527–539.
- Yu L, Jin X, Weller R A. 2007b. Annual, seasonal, and interannual variability of air-sea heat fluxes in the Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 20: 3190–3209.
- Yu L, Jin X, 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]. Woods Hole Oceanographic Institution, OAFlux Project Technical Report. 64pp.
- 余贞寿, 孙照渤, 王学忠. 2005. 东部夏季降水变化及其与北太平洋 SSTA 的联系 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (2): 189–196.
- Yu Zhenshou, Sun Zhaobo, Wang Xuezhong. 2005. Variability of summer rainfall over eastern China and its relationship with northern Pacific SSTA [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 189–196.
- 张学洪, 俞永强, 刘辉. 1998. 冬季北太平洋海表热通量异常和海气相互作用——基于一个全球海气耦合模式长期积分的诊断分析 [J]. *大气科学*, 22 (4): 511–521. Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Liu Hui. 1998. Wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air-sea interaction in a coupled ocean-atmosphere model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 511–521.
- 周天军, 张学洪. 2002. 印度洋海气热通量交换研究 [J]. *大气科学*, 26 (2): 161–170. Zhou Tianjun, Zhang Xuehong. 2002. The air-sea heat flux exchange in the Indian Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (2): 161–170.
- 竺夏英, 何金海, 吴志伟. 2008. 长江中下游入梅指数及早晚梅年的海气背景特征 [J]. *大气科学*, 32 (1): 113–122. Zhu Xia-ying, He Jinhai, Wu Zhiwei. 2008. Regional Meiyu onset index over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the associated ocean-atmospheric features for the early/late Meiyu onset years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 113–122.