

海气关系的季节变化和时间-空间尺度依赖性

吴仁广^{1*}, 孙小山²

¹浙江大学地球科学学院, 杭州 310058

²中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

*通信作者: 吴仁广, renguang@zju.edu.cn

摘要 本文根据近年来对于表面湍流热通量和海表面温度变化关系的分析回顾了海气关系的季节变化和时间-空间尺度依赖性。内容包括表面湍流热通量和海表面温度变化关系的表征方法、区域变化、季节变化和随时间、空间尺度的变化, 以及表面风速和海气湿度差对表面潜热通量和海表面温度变化关系的相对贡献。表面湍流热通量和海表面温度变化关系在中纬度海洋锋区和副热带涡旋区显著不同。在中纬度海洋锋区, 海洋过程对海表面温度变化的贡献占主导地位, 因而表现为海洋强迫作用, 并且冬季比夏季更大。在副热带涡旋区, 表面湍流热通量对海表面温度变化的作用更为显著, 因而表现为大气强迫作用, 并且夏季比冬季更为明显。在阿拉伯海西部地区, 夏季海洋过程对海表面温度变化影响明显, 表现出海洋强迫作用, 而冬季以表面湍流热通量影响为主, 表现为大气强迫情况。在孟加拉湾、南中国海和菲律宾海地区, 无论冬夏季都表现为大气强迫作用。在中纬度海洋锋区冬季和阿拉伯海西部地区夏季, 海洋强迫随时间尺度增长而增强, 而在其它地区和季节, 存在由较短时间尺度的大气强迫为主向较长时间尺度的海洋强迫变得重要的转换, 转换的时间尺度大约在20-40天。在中纬度海洋锋区, 海洋强迫作用随空间尺度增大而减弱, 并向大气强迫情况转换, 转换的空间尺度夏季比冬季小。一般而言, 大气强迫作用随空间尺度增大而增强。

关键词 表面湍流热通量; 海表面温度; 海气变化关系; 季节变化; 时间-空间尺度依赖性

Seasonal variation and temporal-spatial scale dependence of air-sea relationship

WU Renguang^{1*}, SUN Xiaoshan²

¹School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058

²Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

*Corresponding author: WU Renguang, renguang@zju.edu.cn

Abstract This study reviews the seasonality and temporal-spatial scale dependence of the air-sea relationship based on recent analyses of the relationship between surface turbulent heat flux and sea surface temperature. The contents include the representation, regional change, seasonal change and temporal and spatial scale variation of surface turbulent heat flux-sea surface temperature relationship as well as relative contributions of surface wind speed and sea-air humidity difference to changes in surface latent heat flux-sea surface temperature relationship. The surface turbulent heat flux-sea surface temperature relationship displays notable differences between the

mid-latitude oceanic frontal zones and subtropical gyre regions. In the mid-latitude oceanic frontal zones, the oceanic process has a main contribution to sea surface temperature variations, indicative of an oceanic forcing, which is stronger in winter than in summer. In the subtropical gyre regions, surface turbulent heat flux plays a major role in sea surface temperature variations, indicative of an atmospheric forcing, which is more obvious in summer than in winter. In the western Arabian Sea, the oceanic process has an obvious influence on sea surface temperature variations in summer, indicative of an oceanic forcing, whereas the surface turbulent heat flux has a major influence in winter, indicative of an atmospheric forcing. In the Bay of Bengal, the South China Sea and the Philippine Sea, the atmospheric forcing is prominent in both winter and summer. In the mid-latitude ocean frontal zones during winter and the western Arabian Sea during summer, the oceanic forcing increases with the time scale, whereas in the other regions and seasons, there exists a transition from the atmospheric forcing in shorter time scales to the oceanic forcing in longer time scales with the transition time scale of about 20-40 days. In the mid-latitude oceanic frontal zones, the oceanic forcing decreases with the increase of the spatial scale and switches to the atmospheric forcing with the transition spatial scale shorter in summer than in winter. The atmospheric forcing usually enhances with the increase of the spatial scale.

Keywords Surface turbulent heat flux; sea surface temperature; ocean-atmosphere relationship; seasonality; temporal-spatial scale dependence

1. 引言

海洋和大气变化之间存在相互联系和相互作用。海洋和大气之间的相互作用方式多样。并且，海洋和大气之间的联系随区域和季节而变化（徐海明等 2008；李博等 2011；徐蜜蜜等 2012；缪予晴等 2021）。其中表面湍流热通量是海洋和大气之间热量和水汽交换的主要方式，在海气变化关联中起着重要作用。一方面，海洋状况变化可以通过表面湍流热通量影响其上空大气环流和对流，如在北太平洋黑潮和其延伸区（赵永平 1986；赵永平和 McBean 1995；Nonaka 和 Xie 2003；Kobashi 等 2008；徐蜜蜜等 2010, 2012；Xu 等 2011；马静等 2014；徐全倩等 2018；刘秦玉等 2020；Shan 等 2020）。另一方面，大气强迫通过改变表面湍流热通量能形成海温异常（赵永平和 McBean 1991；赵永平等 1997；周天军等 2006；Vecchi 等 2004；李博等 2011；Shan 等 2020；陈宏莉等 2022）。因此，通过诊断和理解表面湍流热通量和海表面温度变化之间的关系，有助于认识海洋和大气之间相互作用的方式和海洋或大气强迫的相对大小。

海洋-大气相互作用对气候变异有着重要影响。海气相互作用过程的不同会导致气候异常的差异。这种海气相互作用的重要性体现在由于海气关系的不同导致模式模拟的降水变异与观测存在差异（Sperber 和 Palmer 1996；Kumar 和 Hoerling 1998；Wang 等 2005；Wu 等 2006；Wu 和 Kirtman 2007；Wu 和 You 2018）。海气关系的重要性也体现在由于大气环流模式不能考虑大气对海洋的反馈作用，其模拟结果通常不如海气耦合模式的模拟结果（Manabe 和 Stouffer 1996；Barsugli 和 Battisti 1998；Kitoh 和 Arakawa 1999；Lau 和 Nath 2000, 2003；Wu 和 Kirtman 2004, 2005；Wang 等 2005；Wu 等 2006；Wu 和 Kirtman 2007；Fu 等 2013）。因此，诊断分析海气变化的关系及其差异和原因对理解气候变异非常重要。

研究揭示出表面湍流热通量和海表面温度变化关系的多样性和复杂性。这种关系随区域变化，例如中纬度海洋锋区和副热带涡旋区表面湍流热通量和海表面温度变化关系明显不同（Bishop 等 2017；Small 等 2019；Sun 和 Wu 2021）。这种关系也随季节变化，例如阿拉伯海西部冬季和夏季表面湍流热通量和海表面温度变化关系显著不同（Sun 和 Wu

2021)。表面湍流热通量和海表面温度变化关系还随时间尺度变化(例如 Bishop et al. 2017; Sun and Wu 2021), 并依赖于空间尺度(例如 Hausmann et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2022a)。

已有的关于海气变化关系的研究中, 有采用月资料的(Wu et al. 2006; Wu and Kinter 2010; Bishop et al. 2017; Small et al. 2019), 也有采用日资料的(Duvel and Viallard 2007; Ye and Wu 2015; Wu et al. 2015; Wu and Chen 2015; Wu 2016; Jing et al. 2020)。鉴于表面湍流热通量和海表面温度变化关系对时间尺度的依赖性, 并且大气和海洋中都存在次月尺度变化(Hasselman 1976; Frankignoul and Hasselman 1977; Wallace et al. 1990; Frankignoul et al. 1998; Donohue et al. 2016; Jounanno et al. 2016; Small et al. 2019), 利用日资料能更好地反映海气关系的特征和变化, 尤其是次月尺度的变化。

本文回顾表面湍流热通量和海表面温度变化之间的联系, 回顾内容包括三个方面: 1) 如何表征它们之间的关系, 2) 它们之间的关系如何随季节、时间和空间尺度变化, 3) 如何理解它们之间关系变化的因子。本文具体安排如下: 首先, 介绍表面湍流热通量和海表面温度变化关系的诊断方法, 并用一个概念模式模拟结果来说明; 随后, 分析表面湍流热通量和海表面温度变化关系的区域性、季节变化、时间尺度(时间分辨率)依赖性和空间尺度(空间分辨率)依赖性; 之后, 分析风速和海气湿度差对表面潜热通量和海表面温度变化关系的贡献; 最后, 对研究结果的指示意义进行相关的讨论。

2. 表面湍流热通量和海表面温度关系的表征

根据海洋混合层温度诊断方程, 海表面温度的变化受到海洋过程和表面热通量的共同影响。表面热通量包括湍流潜热通量和感热通量、太阳短波辐射和长波辐射。这里主要关注表面湍流热通量(即潜热通量和感热通量)的作用, 海洋上潜热通量通常比感热通量要大(Park et al. 2005; Andreas et al. 2013)。表面热通量的作用大小与海洋混合层厚度和大气高频变化振幅有关, 而海洋过程的作用与平均海温梯度和海洋涡旋运动强度有关。因此, 表面湍流热通量和海表面温度变化的关系受到多个因子的影响。一方面, 表面湍流热通量和海表面温度变化关系与大气和海洋中的扰动变化大小有关。大气中的扰动振幅越大, 表面湍流热通量就越重要, 从而海温变化受大气过程的影响越大。海洋中的涡旋运动越强, 海洋过程就越重要, 对海表面温度变化的贡献就越大。另一方面, 表面湍流热通量和海表面温度变化关系也与平均海温梯度和海洋混合层的厚度有关。平均海表面温度梯度越大, 海洋平流过程的作用就越重要。而海洋混合层的深度影响表面热通量对海表面温度变化贡献的大小。在海洋混合层较浅区域, 表面热通量对海表面温度变化的贡献相对较大。

冬季, 在热带印度洋地区大气季节内振荡显著, 大气过程引起的表面热通量变化幅度较大, 对海表面温度的变化起着重要作用, 因而表面热通量和海表面温度变化的关系体现为大气强迫情况(Duvel and Viallard 2007)。夏季, 在中纬度北太平洋中部地区、热带北印度洋和西北太平洋地区, 海洋混合层较浅, 表面热通量能有效引起海表面温度变化, 因而表面热通量和海表面温度变化的关系属于大气强迫情况(Duvel and Viallard 2007; Wu and Kinter 2010; Ye and Wu 2015; Wu et al. 2015)。在副热带地区, 由于海表面温度梯度小, 海洋过程的作用小, 海表面温度变化主要受表面热通量的影响(Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2021, 2022a)。而在中纬度海洋锋区, 如黑潮和湾流延伸区, 海表面温度梯度大, 并且海洋涡旋运动强烈, 海洋过程对海表面温度变化有重要贡献(Chelton et al. 2004; Small et al. 2008; Bryan et al. 2010; Chelton and Xie 2010; Sugimoto and Hanawa 2011; Bishop et al. 2017; Small et al. 2019), 属于海洋强迫的情况(Robert et al. 2017; Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2021, 2022a)。

局地海气关系可以分为两种基本情况。一种是海洋强迫大气, 另一种是大气强迫海洋。

虽然具体海气关系存在复杂性，通过诊断降水或表面热通量和海表面温度变化之间的超前-滞后相关，或者降水或表面热通量和海表面温度/海表面温度变化倾向之间的同时相关可以有效地判断上述两种情况中以哪一种为主（Frankignoul and Hasselmann 1977; Frankignoul 1985; Wallace et al. 1990; Cayan 1992; Barsugli and Battisti 1998; Frankignoul et al. 1998; von Storch 2000; Wu and Kirtman 2005, 2007; Wu et al. 2006, 2007, 2015; Duvel and Viallard 2007; Ye and Wu 2015; Bishop et al. 2017; Wu and You 2018; Wu 2019; Small et al. 2019; Wu and Kinter 2010）。以表面湍流热通量（SHF）和海表面温度（SST）为例，在海洋强迫大气情况下，SST 升高会导致向上的 SHF 增加，而在大气强迫海洋情况下，大气过程引起的向上 SHF 增加会引起 SST 降低。在超前-滞后相关中，海洋强迫情况表现为 SHF-SST 对称正相关和 SHF-SST 变化倾向反对称相关，而大气强迫情况表现为 SHF-SST 反对称相关和 SHF-SST 变化倾向对称负相关。在同时相关中，海洋强迫情况表现为 SHF-SST 的正相关，而大气强迫情况表现为 SHF-SST 变化倾向的负相关。

简单随机模式结果说明了这种局地相关分析在诊断海气关系中的作用（Barsugli and Battisti 1998; Wu et al. 2006; Bishop et al. 2017; Sun and Wu 2021）。在随机模式中可以通过设定不同参数来模拟以大气强迫为主导和以海洋强迫为主导情况下 SHF 和 SST 的演变，在这两种不同情况下 SHF 和 SST 关系的不同特征说明通过诊断它们的相关关系可以理解大气强迫和海洋强迫的相对重要性。所用的随机模式根据 Bishop et al. (2017) 如下：

$$dT_a/dt = \alpha(T_o - T_a) - \gamma_a T_a + N_a, \quad (1)$$

$$dT_o/dt = \beta(T_a - T_o) - \gamma_o T_o + N_o, \quad (2)$$

其中， T_a 和 T_o 分别为表面气温和表面海温，参数 α 和 β 分别为大气和海洋的热交换系数， γ_a 和 γ_o 分别为 T_a 和 T_o 的辐射衰减系数， N_a 和 N_o 分别表示大气和海洋的随机强迫。根据 Bishop et al. (2017)，随机强迫用强迫频率 ω 乘以一个绝对值小于 1°C 的随机数来表示。大气强迫频率 ω_a 设为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。随机模式中的 α 、 β 和 γ_o 的值根据 Bishop et al. (2017)，取为： $\alpha = 23.9 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ， $\beta = 1.195 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ，和 $\gamma_o = 9.5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ， γ_a 的值根据 Barsugli and Battistis (1998)，取为： $\gamma_a = 2.8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 。我们考察海洋强迫不同频率情况。图 1 给出了取 $\omega_o = 2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 和 $\omega_o = 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时得到的 SHF 和 SST、SHF 和 SST 变化倾向的超前-滞后相关。SST 变化倾向根据后一天减去前一天 SST 的差值除以 2 来计算。在计算相关系数前对时间序列进行了不同时间窗口平滑，以表示相关系数随时间尺度的变化。在 ω_o 值较小时 ($\omega_o = 2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$)，海洋随机强迫较小，反映以大气强迫为主情况。在 ω_o 值较大时 ($\omega_o = 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)，海洋随机强迫较大，反映以海洋强迫为主情况。

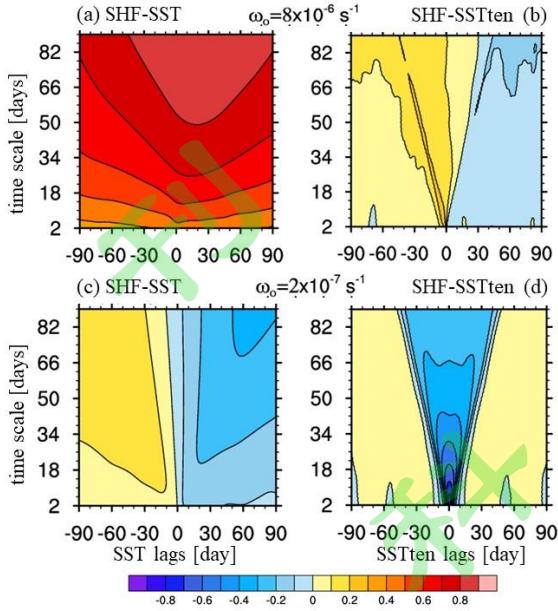


图 1. 根据随机模式模拟得到的(a, c) SHF-SST 和 (b, d) SHF-SST 变化倾向 (SSTten) 的超前-滞后相关随时间尺度变化。X-轴表示 SST/SST 变化倾向超前 (左侧) 和滞后 (右侧) 时间 (天)。Y-轴表示时间尺度 (天)。大气强迫频率参数为 $\omega_a = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 海洋强迫频率参数为 $\omega_o = 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (a, b), $\omega_o = 2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (c, d)。

Figure 1 Time-scale dependence of the lead-lag (a, c) SHF-SST and (b, d) SHF-SST tendency (SSTten) correlation derived from a stochastic model simulation. The x-axis denotes the lead (left) and lag (right) time (day) of SST/SST tendency. The y-axis denotes the time scale (day). The atmospheric forcing frequency $\omega_a = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, and the oceanic forcing frequency $\omega_o = 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (a, b) or $\omega_o = 2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (c, d).

从图 1 可见, 两种情况下, SHF-SST/SST 变化倾向的相关明显不同。在海洋强迫为主导情况, SHF-SST 相关系数为正并随超前和滞后时间增加而减少, 而 SHF-SST 变化倾向相关系数呈非对称特征并且数值很小 (图 1a, 1b)。在大气强迫为主导情况, SHF-SST 相关系数呈现明显反对称特征, 而 SHF-SST 变化倾向同时负相关很大并且相关系数随超前和滞后时间增加而减少 (图 1c, 1d)。另外, SHF-SST 正相关随着时间尺度增加而增大 (图 1a), 说明海洋强迫随时间尺度增加而增强。SHF-SST 变化倾向负相关随着时间尺度增加而减少 (图 1d), 说明大气强迫随时间尺度增加而减弱。

3. 表面湍流热通量和海表面温度关系的区域变化

一些研究指出了海气关系在不同区域之间的差异 (Wu et al. 2006, 2007; Duvel and Viallard 2007; Wu and Kinter 2010; 李博等 2011; Wu et al. 2015; Ye and Wu 2015; Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; 缪予晴等 2021; Sun and Wu 2021)。Duvel and Viallard (2007) 指出冬季的 20-90-天季节内尺度变化中, 在热带印度洋地区, 潜热通量驱动海表面温度变化, 而在热带西太平洋地区, 潜热通量对海表面温度变化的作用较热带印度洋地区的小。Wu and Kinter (2010) 根据月资料进行的分析发现北太平洋中纬度西部和中部地区, 表面潜热通量和海表面温度变化呈现不同关系。在中部地区, 潜热通量驱动海表面温度变化, 而在西部地区海表面温度驱动潜热通量变化, 而后者会反馈于海表面温度变化。研究说明了中纬度海洋锋区和副热带涡旋区海气关系显著不同 (Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2021)。在中纬度海洋锋区, SHF-SST 存在大的正相关, 表示海洋强迫作用。而在副热带涡旋区, SHF-SST 变化倾向负相关明显, 表示大气强迫作用。在热带印度洋-西太平洋地区海气关系也有区域差异 (Sun and Wu 2021)。根据日资料分析, 冬季表面湍流热通量对海表

面温度的影响南中国海地区比阿拉伯海和孟加拉湾地区更大, 夏季阿拉伯海地区海洋强迫明显, 而菲律宾海地区以大气强迫为主 (Sun and Wu 2021)。

图 2 给出了根据所有月份日资料数据计算得到的北太平洋地区 SHF-SST 和 SHF-SST 变化倾向的同时协方差分布。在黑潮延伸区, SHF-SST 同时协方差为大的正值 (图 2a), 说明该地区海洋对大气的影响。类似情况出现在湾流延伸区 (Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2021)。在北太平洋副热带地区, SHF-SST 同时协方差很小, 而 SHF-SST 变化倾向同时负协方差很大 (图 2b), 说明大气对海洋的影响。北大西洋副热带地区情况类似 (Bishop et al. 2017; Small et al. 2019; Sun and Wu 2021)。上述关系的区域变化与海表面温度平均梯度的差异有关。在黑潮延伸区, 由于平均海表面温度梯度大, 海洋过程对海表面温度变化有重要贡献, 进而海表面温度异常导致表面湍流热通量变化 (Bishop et al. 2017; Small et al. 2019)。而在副热带地区, 平均海表面温度梯度小, 海洋过程对海表面温度变化的贡献很小, 海表面温度的变化主要受表面湍流热通量的影响 (Bishop et al. 2017; Small et al. 2019)。

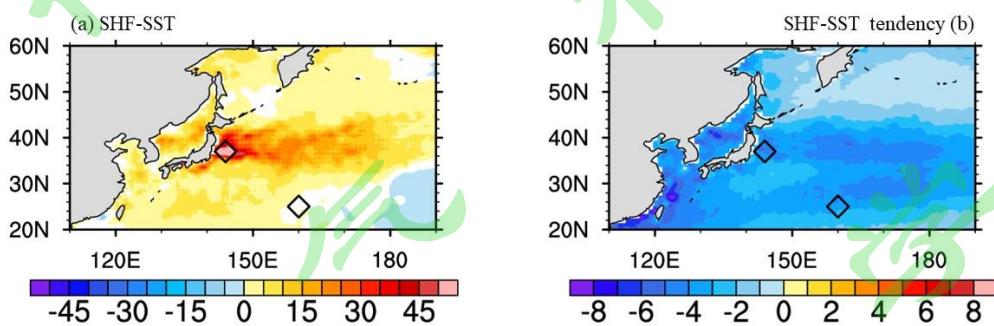


图 2. 根据 1985-2018 年所有月份日资料计算的(a) SHF-SST 和 (b) SHF-SST 变化倾向的同时协方差 ($\text{^{\circ}C W m}^{-2}$)。“◇”表示图 3 中用于计算超前-滞后相关的位于黑潮延伸区和北太平洋副热带涡旋区的两个格点。白色区域表示根据 Student *t*-检验相关系数没有达到 95% 置信度。SHF 资料来自于 OAFlux (objectively analyzed air-sea sensible and latent heat fluxes) (Yu and Weller 2007) 和 SST 资料来自于 NOAA OISST v2.0 (National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature v2.0) (Reynolds et al. 2007)。

Figure 2 Simultaneous covariance ($\text{^{\circ}C W m}^{-2}$) of (a) SHF-SST and (b) SHF-SST tendency based on all month daily data during 1985-2018. The symbol “◇” denotes the two grid points located within the Kuroshio extension and the North Pacific subtropical gyre in calculating the lead-lag correlation in Figure 3. The white regions denote correlation coefficient below the 95% confidence level according to the Student *t*-test. The SHF data are from objectively analyzed air-sea sensible and latent heat fluxes (OAFlux) (Yu and Weller 2007) and the SST data are from National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature v2.0 (NOAA OISST v2.0) (Reynolds et al. 2007).

在热带印度洋-西太平洋地区, SHF-SST 的协方差较小, 而 SHF-SST 变化倾向的协方差较大, 尤其在南中国海和菲律宾海地区 (Sun and Wu 2021)。说明在这些地区, 以大气强迫情况为主。这与东亚冬季风的活动有关。东亚沿海地区由于受到东亚冬季风活动的影响, 大气过程引起的表面湍流热通量变化很大 (Wu and Chen 2005; Wu 2006), 从而表面湍流热通量在海表面温度变化中起着重要作用。

4. 表面湍流热通量和海表面温度关系的季节变化

一些研究揭示出海气关系的季节变化, 并且海气关系的季节性在不同地区存在差异 (Kushnir and Held 1996; Frankignoul et al. 1998; Duvel and Villard 2007; Wu et al. 2007; 徐海明等 2008; Wu and Kinter 2010; 徐蜜蜜等 2012; Putrasahan et al. 2013; Wu et al. 2015;

Bishop et al. 2017; Jing et al. 2020; Sun and Wu 2021)。Duvel and Viallard (2007)发现冬季阿拉伯海、孟加拉湾北部和南中国海地区，潜热通量对海表面温度季节内变化的影响冬季比夏季更大。Wu and Kinter (2010)发现北太平洋中纬度西部地区，潜热通量对海表面温度异常的影响冬季明显，而夏季较弱。Wu et al. (2015)的分析说明热带西北太平洋地区季节内SHF-SST 的协同变化夏季比冬季更大。研究指出在中纬度海洋锋区（如黑潮和湾流延伸区），SHF-SST 变化的协方差冬季比夏季更大 (Bishop et al. 2017; Sun and Wu 2021)，说明在这些地区海洋强迫冬季更强。在副热带涡旋区，SHF-SST 变化倾向的协方差夏季比冬季大 (Sun and Wu 2021)，说明在这些地区大气强迫作用夏季更为明显。

图 3 给出了表面湍流热通量和海表面温度关系季节变化的三种典型情况。在黑潮延伸区，SHF-SST 正相关冬季明显大于夏季，而 SHF-SST 变化倾向负相关夏季大于冬季（图 3a-b）。这说明黑潮延伸区，海洋对大气的影响冬季强于夏季。类似情况出现在湾流延伸区和南大洋厄加勒斯海流区 (Bishop et al. 2017; Sun and Wu 2021)。这一海洋影响大气的季节变化与上述地区平均海表面温度梯度冬季大于夏季有关。在北太平洋副热带涡旋区，夏季 SHF-SST 变化倾向的负相关明显大于冬季 (图 3c-d)，说明大气对海洋的影响夏季更强。类似情况出现在北大西洋副热带涡旋区 (Bishop et al. 2017; Sun and Wu 2021)。这与上述地区海洋混合层深度在夏季较浅有关 (Wu et al. 2015)。在阿拉伯海西部地区，夏季 SHF-SST 同时正相关较大，而 SHF-SST 变化倾向相关呈现反对称特征 (图 3f)，这表示海洋对大气的影响 (Sun and Wu 2021)。这与夏季由于南亚夏季风引起的该地区海表面温度梯度较大有关。冬季 SHF-SST 变化倾向之间为同时负相关，而 SHF-SST 相关呈反对称特征 (图 3e)，表示大气对海洋的影响 (Sun and Wu 2021)。

Sun and Wu (2021) 根据日资料进行的分析指出，在孟加拉湾、南中国海和菲律宾海地区，SHF-SST 变化倾向的负相关夏季比冬季大，说明这些地区大气对海洋的影响夏季更强。这一特征与北太平洋副热带地区的情况类似。与阿拉伯海地区不同的是，无论是冬季还是夏季，上述地区都以大气强迫海洋变化情况为主。

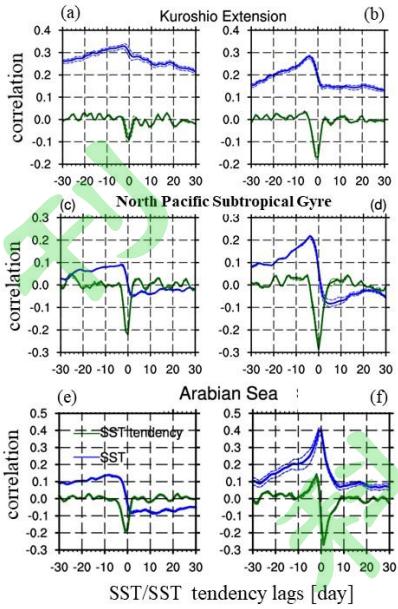


图 3. 根据 1985-2018 年日资料计算的 SHF-SST (蓝实线) 和 SHF-SST 变化倾向 (绿实线) 的超前-滞后相关。(a, b) 为位于黑潮延伸区格点, (c, d) 为位于北太平洋副热带涡旋区格点, (e, f) 为位于阿拉伯海西部格点。(a, c, e) 为根据冬季月份 (NDJFM) 资料, (b, d, f) 为根据夏季月份 (MJJAS) 资料。虚线表示相关系数误差幅度。X-轴表示 SST/SST 变化倾向超前 (左侧) 和滞后 (右侧) 时间 (天)。SHF 资料来自于 OAFlux (Yu and Weller 2007) 和 SST 资料来自于 NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007)。

Figure 3 Lead-lag correlation of SHF-SST (blue solid line) and SHF-SST tendency (green solid line) calculated based on daily data during 1985-2018 at the grid point located within (a, b) the Kuroshio Extension, (c, d) the North Pacific subtropical gyre, and (e, f) the western Arabian Sea for (a, c, e) winter months (November through March) and (b, d, f) summer months (May through September). Dashed lines denote the error margins of the correlation coefficients. The x-axis denotes the lead (left) and lag (right) time (day) of SST/SST tendency. The SHF data are from OAFlux (Yu and Weller 2007) and the SST data are from NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007).

5. 表面湍流热通量和海表面温度关系的时间尺度依赖性

研究揭示出表面湍流热通量和海表面温度变化的关系依赖于时间尺度 (Murakami and Kawamura 2001; Wu et al. 2015; Ye and Wu 2015; Bishop et al. 2017; Small et al. 2019)。Bishop et al. (2017) 和 Small et al. (2019) 指出海洋过程对海表面温度变化的影响随时间尺度增长而增大。Small et al. (2019) 比较了根据 30-天平均和 1-天平均资料计算的表面湍流热通量和海表面温度变化的相关, 发现西北太平洋和西北大西洋地区 30-天平均尺度对应的海洋强迫更大。

Sun and Wu (2021)根据日分辨率资料分析发现存在一个月-次月转变时间尺度。在短于转变时间尺度时, 大气强迫较为重要, 而在大于转变时间尺度时, 海洋强迫变得重要。这一转变时间尺度随区域而不同, 也随季节而变化。在湾流和黑潮延伸区夏季, 转变时间尺度约为 20 天, 而在菲律宾海地区夏季, 转变时间尺度约为 40 天。在中纬度海洋锋区, 冬季的海洋强迫一直延伸到 90-天尺度, 夏季 20 天以下和以上分别为大气强迫和海洋强迫为主。冬季, 在孟加拉湾、南中国海和菲律宾海地区, 90-天以下时间尺度大气强迫明显, 在阿拉伯海地区, 大气强迫主要出现在 40 天以下时间尺度。夏季, 在阿拉伯海地区, 海洋强迫延伸到 90 天尺度, 在菲律宾海地区, 40 天以下和以上时间尺度分别以大气和海洋强迫为主。一般而言, 在热带印度洋-西太平洋地区, 在较短时间尺度, 以大气强迫为主, 而在较长时间尺度, 海洋强迫变得重要。

图 4 给出了冬季黑潮延伸区和南中国海地区 SHF-SST/SST 变化倾向超前-滞后相关随时

间尺度变化。在黑潮延伸区，SHF-SST 的正相关随时间尺度而增大（图 4a），而 SHF-SST 变化倾向维持反对称特征(图 4b)。这说明黑潮延伸区，海洋对大气的影响随时间尺度增长而增强。类似情况出现在湾流延伸区（Sun and Wu 2021）。在南中国海地区，随时间尺度增长，SHF-SST 的相关从反对称向同时正相关增加转换（图 4c），SHF-SST 变化倾向相关呈对称特征，同时负相关开始时随时间尺度增长而增大，在时间尺度超过约 20-天以后，负相关转而随时间尺度增长而减少（图 4d）。上述特征说明，南中国海地区的大气强迫由随时间尺度增强转而向随时间尺度减弱转变。类似情况出现在阿拉伯海地区冬季和孟加拉湾、南中国海和菲律宾海地区的夏季（Sun and Wu 2021）。

在中纬度地区海洋强迫随时间尺度的增强与大气高频变化随时间尺度的减弱有关。由于时间平滑减弱了高频大气变化，使得大气过程引起的表面湍流热通量的影响减少。相应地，海洋过程对海表面温度变化的作用变大。在热带地区大气强迫随时间尺度的增强与表面湍流热通量变率的变化有关。热带印度洋和西太平洋地区，天气尺度扰动和大气季节内振荡非常活跃。由于受天气尺度扰动和大气季节内振荡的影响，表面湍流热通量的变化幅度在较短时间尺度较大，因而对海表面温度变化的影响较大。

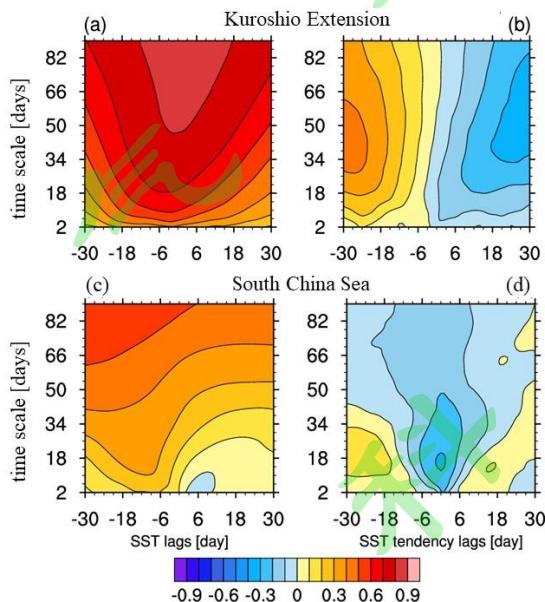


图 4. 根据 1985-2018 年冬季月份 (NDJFM) 日资料计算的 (a, c) SHF-SST 和 (b, d) SHF-SST 变化倾向的超前-滞后相关随时间尺度变化。(a, b) 为位于黑潮延伸区格点，(c, d) 为位于南中国海中部格点。X-轴表示 SST/SST 变化倾向超前（左侧）和滞后（右侧）时间（天）。Y-轴表示时间尺度（天）。SHF 资料来自于 OAFlux (Yu and Weller 2007) 和 SST 资料来自于 NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007)。

Figure 4 Time-scale dependence of the lead-lag correlation of (a, c) SHF-SST and (b, d) SHF-SST tendency calculated daily data during 1985-2018 for the grid point within (a, b) the Kuroshio Extension and (c, d) the central South China Sea for winter months (November through March). The x-axis denotes the lead (left) and lag (right) time (day) of SST/SST tendency. The y-axis denotes the time scale in days. The SHF data are from OAFlux (Yu and Weller 2007) and the SST data are from NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007).

6. 表面湍流热通量和海表面温度关系的空间尺度依赖性

海洋中涡旋通过海洋平流等过程影响海表面温度变化，这种海洋涡旋的作用需要高分辨率才能正确刻画。一方面，这说明了资料空间分辨率的重要性 (Kirtman et al. 2012)。研究指出海洋空间分辨率的增加能改善海气关系的描述 (Putrasahan et al. 2017; Small et al. 2019; Bellucci et al. 2021)。另一方面，这也说明了表面湍流热通量和海表面温度变化之间的关系依赖于空间尺度。

图 5 比较北大西洋地区根据 1 度和 4 度空间分辨率得到的 SHF-SST 和 SHF-SST 变化倾向的同时相关分布。在湾流延伸区，SHF-SST 在 1 度分辨率时为明显正相关（图 5a），而在 4 度分辨率时正相关很小（图 5b），这说明海洋强迫主要出现在高空间分辨率情况。而 SHF-SST 变化倾向的负相关在 4 度分辨率时比 1 度分辨率时要大（图 5c-d），这说明大气强迫在低分辨率时更大。

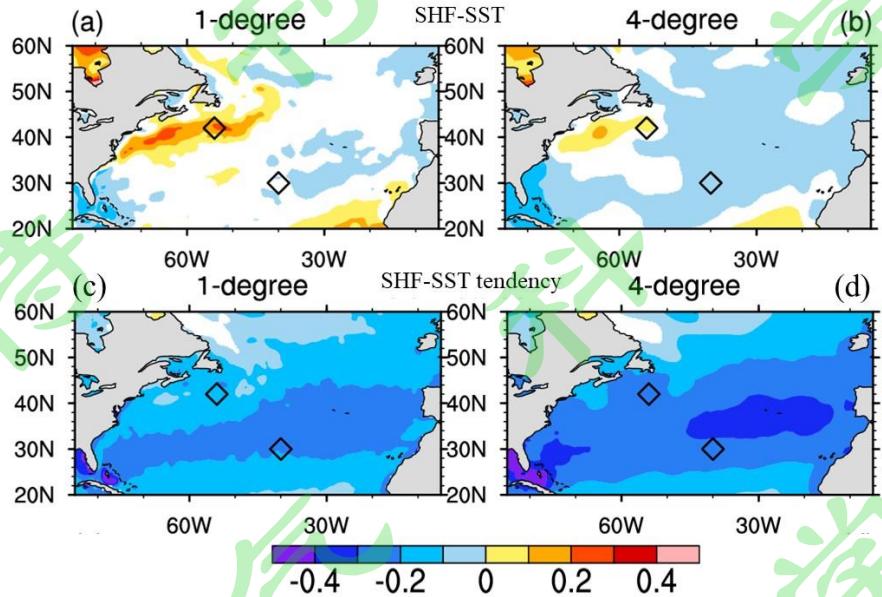


图 5. 根据 1985-2018 年所有月份日资料计算的(a, b) SHF-SST 和 (c, d) SHF-SST 变化倾向的同时相关。(a, c) 为根据空间分辨率 1 度资料, (b, d) 为根据空间分辨率 4 度资料。“◇”表示位于湾流延伸区和北大西洋副热带涡旋区的两个格点。白色区域表示根据 Student *t*-检验相关系数没有达到 95% 置信度。SHF 资料来自于 OAFlux (Yu and Weller 2007) 和 SST 资料来自于 NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007)。

Figure 5 Simultaneous (a, b) SHF-SST and (c, d) SHF-SST tendency correlation calculated based on daily data of all the months during 1985-2018 in the North Atlantic at (a, c) 1° and (b, d) 4° spatial scale. The symbol “◇” denotes the locations within and outside of the Gulf Stream extension. The white regions denote correlation coefficient below the 95% confidence level according to the Student *t*-test. The SHF data are from OAFlux (Yu and Weller 2007) and the SST data are from NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007).

Bishop et al. (2017) 的分析指出海洋过程对海表面温度变化的影响随空间尺度增大而减少。Small et al. (2019) 通过空间滤波资料分析说明 5 度以下空间尺度，全球海洋大部分地区以海洋强迫为主，而在更大空间尺度，以大气强迫为主。在副热带地区，大气强迫出现在所有空间尺度 (Bishop et al. 2017)，并且大气强迫随空间尺度增大而增强 (Sun and Wu 2022a)。在阿拉伯海地区夏季，海洋强迫随空间尺度增大而减弱 (Sun and Wu 2022a)。Sun and Wu (2022a) 的分析说明海气关系对空间尺度的依赖性随季节而变化。

图 6 给出黑潮延伸区 SHF-SST/SST 变化倾向超前-滞后相关随空间尺度的变化。无论是冬季还是夏季，SHF-SST 的正相关随空间尺度增大而减少（图 6a, 6c），这说明海洋强迫作用随空间尺度增大而减弱。SHF-SST 变化倾向的同时负相关随空间尺度增大而增加（图 6b, 6d），这表示大气强迫作用随空间尺度增大而增强。类似情况出现在湾流延伸区 (Small et al. 2019; Sun and Wu 2022a)。Sun and Wu(2022a) 分析了热带印度洋-西太平洋地区表面湍流热通量和海表面温度关系随空间尺度变化，结果说明大气强迫作用随空间尺度增大也增强。

上述海气关系随空间尺度变化有两个原因。一是平均海表面温度梯度的影响。空间平滑会减少海表面温度梯度，从而减弱海洋平流过程对海表面温度变化的贡献，因而大气过程对海表面温度变化的贡献随空间尺度增大而增加。另外一个原因是空间平滑去除了与海气耦合

无关的小尺度变化，从而减少标准差而使得 SHF-SST 变化倾向的相关随空间尺度增大。

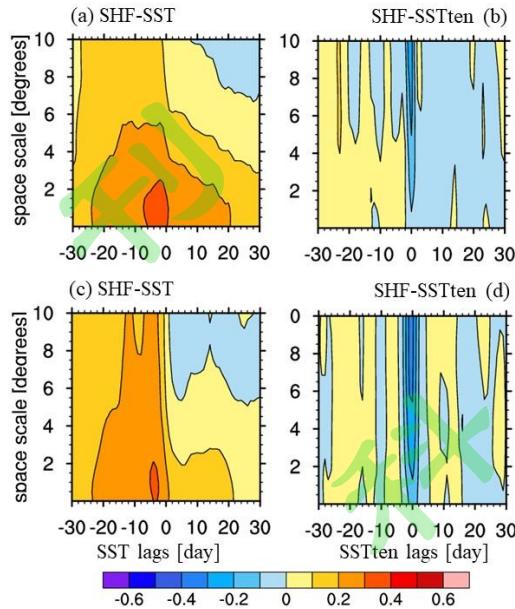


图 6. 根据 1985-2018 年(a, b)冬季月份 (NDJFM) 和(c, d)夏季月份 (MJJAS) 日资料计算的位于黑潮延伸区格点(a, c) SHF-SST 和(b, d) SHF-SST 变化倾向 (SSTten) 的超前-滞后相关随空间尺度变化。X-轴表示 SST/SST 变化倾向超前 (左侧) 和滞后 (右侧) 时间 (天)。Y-轴表示空间尺度 (度)。SHF 资料来自于 OAFlux (Yu and Weller 2007) 和 SST 资料来自于 NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007)。

Figure 6 Space-scale dependence of lead-lag (a, c) SHF-SST and (b, d) SHF-SST tendency (SSTten) correlation calculated using daily data during 1985-2018 at the grid point within the Kuroshio Extension for (a, b) winter months (NDJFM) and (c, d) summer months (MJJAS). The x-axis represents the lead (left) and lag time (day) of SST/SST tendency (right). The y-axis represents the spatial scale in degrees. The SHF data are from OAFlux (Yu and Weller 2007) and the SST data are from NOAA OISST v2.0 (Reynolds et al. 2007).

Bishop et al. (2017) 通过比较 SHF-SST 和 SHF-SST 变化倾向的相关系数大小，定义了一个从海洋强迫向大气强迫转换的空间尺度。这一转换空间尺度随区域而不同。在中纬度海洋锋区，根据 OAflux 表面热通量资料，Bishop et al. (2017) 估计得到的转换空间尺度大约为 1-3°。根据 J-OFuro 表面热通量资料，Small et al. (2019) 得到的转换空间尺度为 4-7°，比 Bishop et al. (2017) 根据 OAflux 表面热通量得到的要大。这一差异归之于资料的空间分辨率 (Small et al. 2019)。Sun and Wu (2022a) 对冬季和夏季分别估计了转换空间尺度，发现中纬度海洋锋区转换空间尺度冬季比夏季要大。根据 OAflux 表面热通量日资料，转换空间尺度冬季为 2.6-4.5°，夏季为 0.8-1.3°。而根据 J-OFuro 表面热通量资料，转换空间尺度冬季为 3.5-5.1°，夏季为 1.5-2.3°。根据日资料分季节估计得到的转变空间尺度对资料分辨率的依赖性不大。这与 Small et al. (2019) 根据月资料分析得到的结果有所不同。

7. 表面风速和海气湿度差的相对贡献

表面湍流热通量变化既与风速有关，也与海气湿度（温度）差有关。风速变化主要由大气过程决定，而后者海气湿度（温度）差主要随海表面温度而变化 (Small et al. 2019)。表面湍流热通量的变化可以分解为与风速变化有关和与海气湿度（温度）差变化有关两部分 (Tanimoto et al. 2003; Wu et al. 2007; Sugimoto and Hanawa 2011; Wu and You 2018; Small et al. 2019; Wu and Sun 2022b)。据此，可以分析表面湍流热通量-海表面温度变化之间的关系主要是由于风速部分的贡献，还是由于海气湿度（温度）差部分的贡献，从而了解表面湍流热通量-海表面温度关系的空间和时间变化的原因。由于海洋上潜热通量比感热

通量要大 (Park et al. 2005; Andreas et al. 2013)，分析中通常关注潜热通量变化中风速和海气湿度差的贡献。

Small et al. (2019) 根据月分辨率资料分析了风速和比湿对表面潜热通量和海表面温度关系的贡献，指出在热带和副热带大部分地区，风速的作用为主导，而在高纬度地区，空气比湿的作用为主。Sun and Wu (2022b) 根据日分辨率资料详细分析了风速和海气湿度差贡献的区域和季节变化，结果表明海气湿度差的贡献在中纬度海洋锋区和热带印度洋-西太平洋地区重要，而风速的贡献在副热带和热带地区重要。中纬度海洋锋区海洋强迫的季节变化归之于海气湿度差贡献的季节变化，副热带涡旋区大气强迫的季节变化来自于风速贡献的季节变化。在热带印度洋-西太平洋地区，夏季潜热通量的作用通过改变海气湿度差的贡献，而冬季潜热通量的作用取决于风速的贡献。风速的贡献取决于区域，在副热带地区无论冬季还是夏季，在阿拉伯海地区夏季，风速有辅助贡献，在菲律宾海地区无论冬季和夏季，南中国海、孟加拉湾地区夏季，风速有抵消作用。

Sun and Wu (2022b) 详细分析了风速和海气湿度差对 SHF-SST 和 SHF-SST/SST 变化倾向关系随时间尺度变化的贡献。海表面温度的作用随时间尺度增大是由于海气湿度差贡献的变化，潜热通量的作用随时间尺度的变化主要由于风速贡献的变化，如阿拉伯海西部冬季在 40 天左右时间尺度的潜热通量对海表面温度变化影响的转折，孟加拉湾、南中国海和菲律宾海夏季在 40 天左右时间尺度由大气强迫向海洋强迫的转换。

总结表面风速和海气湿度差贡献的变化，可以归纳为以下三种情况。第一种为海洋强迫情况。这种情况下，以海气湿度差正贡献为主，而风速贡献分为正的辅助作用、负的抵消作用和贡献小三类。第二种为大气强迫情况。这种情况下，以风速正贡献为主。第三种为海洋贡献小。这种情况下，海气湿度差和风速的贡献趋于互相抵消。

8. 总结和讨论

本文通过比较分析 SHF-SST 和 SHF-SST 变化倾向的相关，回顾了近年来有关海气关系方面的研究。主要结果如下：

- a) **海气关系的区域变化**：在中纬度海洋锋区以海洋强迫大气为主，在副热带涡旋区以大气强迫海洋为主，在热带印度洋-西太平洋地区，南中国海-菲律宾海的大气强迫比孟加拉湾-阿拉伯海的更明显。
- b) **海气关系的季节变化**：中纬度海洋锋区的海洋强迫冬季比夏季更大，副热带涡旋区的大气强迫作用夏季比冬季更为明显，阿拉伯海地区夏季以海洋强迫为主，而冬季以大气强迫为主，在其它热带印度洋-西太平洋地区，大气强迫作用夏季比冬季更大。
- c) **海气关系的时间尺度依赖性**：在中纬度海洋锋区，冬季海洋影响随时间尺度增长而增强，夏季由大气影响随时间尺度增长向减弱转换，转换时间尺度约在 20-40 天；在阿拉伯海西部，夏季海洋强迫随时间尺度增长而增强，冬季的大气影响由随时间尺度增强向减弱转换，转换时间尺度约在 40 天；在其它热带印度洋-西太平洋地区，冬夏季大气强迫随时间尺度先增强而后减弱，其转换时间尺度冬季大于夏季。
- d) **海气关系的空间尺度依赖性**：中纬度海洋锋区的海洋影响随空间尺度增大而减弱，副热带涡旋区的大气影响随空间尺度增大而增强；在中纬度海洋锋区存在一个由海洋强迫向大气强迫转变的空间尺度，此空间尺度冬季大于夏季；在热带印度洋-西太平洋地区，除了阿拉伯海夏季外，大气强迫随空间尺度增大而增强。

这些根据表面湍流热通量和海表面温度变化关系分析的结果对于海气关系相关方面的研究有着指示意义。讨论如下：

1) 时间尺度-空间分辨率的重要性

a) 区分不同时间尺度的必要性

大气和海洋中存在不同时间尺度变化。海洋和大气变化之间的关系在不同时间尺度可能不同。在不区分时间尺度情况下，得到的关系可能主要反映某种优势尺度的关系，当两种尺度海气变化关系相反时，有可能导致总的海气变化关系不明显。因此，在分析海洋和大气的相互作用时有必要针对具体的时间尺度分别进行。

b) 资料空间分辨率的重要性

海洋过程的作用依赖于资料的空间分辨率 (Kirtman et al. 2012; Putrasahan et al. 2017; Small et al. 2019; Bellucci et al. 2021)。只有当空间分辨率达到一定高时，海洋中小尺度涡旋的作用才能体现出来。因此，在比较由不同分辨率资料诊断得到的海气关系时，要注意资料空间分辨率的影响。

2) 模式评估问题

气候模式常被用来进行相关方面的研究。在使用气候模式进行研究前，需要对气候模式的性能进行评估，以了解气候模式的适合性。由于空间分辨率对海气关系的影响，在比较模式的性能时需要关注其差异是否与模式的空间分辨率有关，尤其是海洋模式。Bishop et al. (2019) 指出为了充分模拟海气耦合，模式需要能模拟海洋中的中尺度涡旋。有研究说明海洋模式的空间分辨率大小影响到海气耦合和中纬度风暴轴的模拟 (Roberts et al. 2016; Ma et al. 2017)。此外，还需要注意模式中的平均海表面温度梯度，大气和海洋高频变率大小等的模拟情况，它们都有可能影响模式中的海气关系特征。

致谢 本研究得到国家自然科学基金项目 (41721004) 资助。

参考文献

- Andreas E L, Jordan R E, Mahrt L, et al. 2013. Estimating the Bowen ratio over the open and ice-covered ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (9): 4334-4345, doi:10.1002/jgrc.20295.
- Barsugli J J, Battisti D S. 1998. The basic effects of atmosphere–ocean thermal coupling on midlatitude variability. *J. Atmos. Sci.* [J], 55 (4): 477-493, doi:10.1175/1520-0469(1998)0552.0.CO;2.
- Bellucci A, Athanasiadis P J, Scoccimarro E, et al. 2021. Air–Sea interaction over the Gulf Stream in an ensemble of HighResMIP present climate simulations. *Climate Dynamics* [J], 56 (7–8): 2093–2111, doi:10.1007/s00382-020-05573-z.
- Bishop S P, Small R J, Bryan F O, et al. 2017. Scale dependence of midlatitude air–sea interaction. *J. Climate* [J], 30 (20): 8027–8221, doi:10.1175/JCLI-D-17-0159.1.
- Bryan F O, Tomas R, Dennis J M, et al. 2010. Frontal scale air–sea interaction in high-resolution coupled climate models. *J. Climate* [J], 23 (23): 6277–6291, doi:10.1175/2010JCLI3665.1.
- Cayan D R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.* [J], 22 (8): 859–881, doi:10.1175/1520-0485(1992)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2.
- Chelton D B, Schlax M G, Freilich M H, et al. 2004. Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds. *Science* [J], 303 (5660): 978–983, doi:10.1126/science.1091901.
- Chelton D B, Xie S P. 2010. Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales. *Oceanography* [J], 23 (4): 52–69, doi:10.2307/24860862.
- 陈宏莉, 徐海明, 马静, 等. 2022. 月内尺度上与冬季北太平洋大范围海温异常相联系的海气相互作用特征 [J]. 大气科学, 46 (2): 293–308. Chen Hongli, Xu Haiming, Ma Jing, et al.

2022. Characteristics of air-sea interaction associated with large-scale sea surface temperature warm anomalies over the North Pacific in winter on submonthly timescales [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 46 (2): 293-308, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21047.
- Donohue K A, Watts D R, Hamilton P, et al. 2016. Gulf of Mexico loop current path variability [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 76 (part B): 174-194, doi:10.1016/j.dynatmoce.2015.12.003.
- Duvel J P, Vialard J. 2007. Indo-Pacific sea surface temperature perturbations associated with intraseasonal oscillations of tropical convection [J]. *J. Climate*, 20 (13): 3056-3082, doi:10.1175/JCLI4144.1.
- Frankignoul C. 1985. Sea surface temperature anomalies, planetary waves, and air-sea feedback in the middle latitudes [J]. *Reviews of Geophysics*, 23:357-390, doi:10.1029/RG023i004p00357.
- Frankignoul C, Czaja A, L'Heveder B. 1998. Air-sea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models [J]. *J. Climate*, 11 (9): 2310-2324, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2310:ASFITN>2.0.CO;2.
- Frankignoul C, Hasselmann K. 1977. Stochastic climate models, part II Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability [J]. *Tellus*, 29 (4): 289-305, doi:10.3402/tellusa.v29i4.11362.
- Fu X, Lee J -Y, Hsu P C, et al. 2013. Multi-model MJO forecasting during DYNAMO/CINDY period [J]. *Climate Dynamics*, 41 (3): 1067-1081, doi:10.1007/s00382-013-1859-9.
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models Part I. Theory [J]. *Tellus*, 28 (6): 473-485, doi:10.3402/tellusa.v28i6.11316.
- Hausmann U, Czaja A, Marshall J. 2017. Mechanisms controlling the SST air-sea heat flux feedback and its dependence on spatial scale [J]. *Climate Dynamics*, 48 (3-4): 1297-1307, doi:10.1007/s00382-016-3142-3.
- Jing Z, Wang, S, Wu L, et al. 2020. Maintenance of mid-latitude oceanic fronts by mesoscale eddies [J]. *Science Advances*, 6 (31): eaba7880, doi:10.1126/sciadv.aba7880.
- Jouanno J, Ochoa J, Pallàs-Sanz E, et al. 2016. Loop Current frontal eddies: Formation along the Campeche Bank and impact of coastally trapped waves [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 46 (11): 3339-3363, doi:10.1175/JPO-D-16-0052.1.
- Kirtman B P, Bitz C, Bryan F, et al. 2012. Impact of ocean model resolution on CCSM climate simulations [J]. *Climate Dynamics*, 39 (6): 1303-1328, doi:10.1007/s00382-012-1500-3.
- Kitoh A, Arakawa O. 1999. On overestimation of tropical precipitation by an atmospheric GCM with prescribed SST [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (19): 2965-2968, doi:10.1029/1999gl900616.
- Kobashi F, Xie S P, Iwasaka N, et al. 2008. Deep atmospheric response to the North Pacific Oceanic subtropical front in spring [J]. *J. Climate*, 21(22): 5960-5975, doi: 10.1175/2008JCLI2311.1.
- Kumar A, Hoerling MP. 1998. Specification of regional sea surface temperatures in atmospheric general circulation model simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D8): 8901-8907, doi:10.1029/98jd00427.
- Kushnir Y, Held I M. 1996. Equilibrium atmospheric response to North Atlantic SST anomalies [J]. *J. Climate*, 9 (6): 1208-1220, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<1208:EARTNA>2.0.CO;2.
- Lau N C, Nath M J. 2000. Impact of ENSO on the variability of the Asian–Australian monsoons as simulated in GCM experiments [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4287-4309, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4287:IOEOTV>2.0.CO;2.
- Lau N-C, Nath M J. 2003. Atmosphere–ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO

- episodes [J]. *J. Climate*, 16 (1): 3-20, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0003:AOVITI>2.0.CO;2.
- 李博, 周天军, 林鹏飞, 等. 2011. 冬季北太平洋海表面热通量异常和海气相互作用的耦合模式模拟 [J]. 气象学报, 69 (1) : 52-63. Li Bo, Zhou Tianjun, Lin Pengfei, et al. 2011. The wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air-sea interaction as simulated by the LASG/IAP ocean-atmosphere coupled model FGOALS_s1.0 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (1): 52-63.
- 刘秦玉, 张苏平, 贾英来. 2020. 冬季黑潮延伸体海域海洋涡旋影响局地大气强对流的研究 [J]. 地球科学进展, 35(5): 441-451. Liu Qinyu, Zhang Suping, Jia Yinglai. 2020. Study about ocean eddy effect on strong convection in local atmosphere over the Kuroshio Extension region [J]. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 35(5) : 441-451, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.041.
- 马静, 徐海明, 董昌明. 2014. 大气对黑潮延伸区中尺度海洋涡旋的响应—冬季暖、冷涡个例分析 [J]. 大气科学, 38(3): 438-452. Ma Jing, Xu Haiming, Dong Changming. 2014. Atmospheric response to mesoscale oceanic eddies over the Kuroshio Extension: Case analyses of warm and cold eddies in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 38(3): 438-452, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13151.
- Ma X, Chang P, Saravanan R, et al. 2017. Importance of resolving Kuroshio front and eddy influence in simulating the North Pacific storm track [J]. *J. Climate*, 30 (12): 1861-1880, doi:10.1175/JCLI-D-16-0154.1.
- Manabe S, Stouffer R J. 1996. Low-frequency variability of surface air temperature in a 1000-year integration of a coupled atmosphere-ocean-land surface model [J]. *J. Climate*, 9 (2): 376-393, doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<0376:LFVOSA>2.0.CO;2.
- 缪予晴, 徐海明, 刘佳伟. 2021. 西北太平洋夏季海洋热浪的变化特征及海气关系 [J]. 热带海洋学报, 40 (1): 31-43. Miao Yuqing, Xu Haiming, Liu Jiawei. 2021. Variation of summer marine heatwaves in the Northwest Pacific and associated air-sea interaction [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 40 (1): 31-43, doi:10.11978/2020016.
- Murakami H, Kawamura H. 2001: Relations between sea surface temperature and air-sea flux at periods from 1 day to 1 year observed at ocean buoy stations around Japan [J]. *J. Oceanogr.*, 57(5): 565-580, doi:10.1023/A:1021530903138.
- Nonaka M, Xie S P. 2003. Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmosphere feedback [J]. *J. Climate*, 16(9): 1404-1413, doi:10.1175/1520-0442(2003)16<1404:COSSPA>2.0.CO;2.
- Park S, Deser C, Alexander M A. 2005. Estimation of the Surface Heat Flux Response to Sea Surface Temperature Anomalies over the Global Oceans [J]. *J. Climate*, 18 (21): 4582-4599, doi:10.1175/jcli3521.1
- Putrasahan D A, Miller A J, Seo H. 2013. Isolating mesoscale coupled ocean-atmosphere interactions in the Kuroshio Extension region [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 63 (Sep): 60-78, doi:10.1016/j.dynatmoce.2013.04.001.
- Putrasahan D A, Kamenkovich I, Le Hénaff M, et al. 2017. Importance of ocean mesoscale variability for air-sea interactions in the Gulf of Mexico [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 44 (12): 6352-6362, doi:10.1002/2017GL072884.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature [J]. *J. Climate*, 20 (22): 5473-5496, doi:10.1175/2007JCLI1824.1.
- Roberts C D, Palmer M D, Allan R P, et al. 2017. Surface flux and ocean heat transport

- convergence contributions to seasonal and interannual variations of ocean heat content [J]. *J. Geophys. Res.*, 122 (1): 726-744, doi:10.1002/2016jc012278.
- Shan X, Jing Z, Gan B, et al. 2020. Surface heat flux induced by mesoscale eddies cools the Kuroshio-Oyashio Extension region [J]. *Geophysical Research Letters*, 47 (1): e2019GL086050, doi:10.1029/2019GL086050.
- Sperber K R, Palmer T N. 1996. Interannual tropical rainfall variability in general circulation model simulations associated with the Atmospheric Model Intercomparison Project [J]. *J. Climate*, 9 (11): 2727-2750, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2727:ITRVIG>2.0.CO;2.
- Small R J, DeSzoeke S P, Xie S P, et al. 2008. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 45 (3-4): 274-319, doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001.
- Small R J, Bryan F O, Bishop S P, et al. 2019. Air-sea turbulent heat fluxes in climate models and observational analyses: What drives their variability? [J] *J. Climate*, 32 (8): 2397-2421, doi:10.1175/JCLI-D-18-0576.1.
- Sugimoto S, Hanawa H. 2011. Roles of SST anomalies in the wintertime turbulent heat fluxes in the Kuroshio-Oyashio region: Influences of warm eddies detached from the Kuroshio Extension [J]. *J. Climate*, 24 (24): 6551-6561, doi:10.1175/2011JCLI4023.1.
- Sun X, Wu R. 2021. Seasonality and time scale dependence of the relationship between turbulent surface heat flux and SST [J]. *Climate Dynamics*, 56 (9-10): 3173-3186, doi:10.1007/s00382-021-05631-0.
- Sun X, and Wu R. 2022a. Spatial-scale dependence of the relationship between turbulent surface heat flux and SST [J]. *Climate Dynamics*, 58 (3-4): 1127-1145, doi:10.1007/s00382-021-05957-9.
- Sun X, Wu R. 2022b. Contribution of wind speed and sea-air humidity difference to the latent heat flux-SST relationship [J]. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, Volume 2022, Article ID 9815103, doi:10.34133/2022/9815103.
- 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.
- Vecchi G A, Xie S P, Fischer A S. 2004. Ocean-atmosphere covariability in the western Arabian Sea [J]. *J. Climate*, 17 (6): 1213-1224, doi:10.1175/1520-0442(2004)0172.0.CO;2.
- von Storch J S. 2000. Signature of air-sea interactions in a coupled atmosphere-ocean GCM [J]. *J. Climate*, 13 (19): 3361-3379, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3361:SOASII>2.0.CO;2.
- Wallace J M, Smith C, Jiang Q. 1990. Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter [J]. *J. Climate*, 3 (9): 990-998, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0990:SPOAOI>2.0.CO;2.
- Wang B, Ding Q, Fu X, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15): L15711, doi:10.1029/2005gl022734.
- Wu R, Kirtman B P. 2004. Impacts of the Indian Ocean on the Indian summer monsoon-ENSO relationship [J]. *J. Climate*, 17 (15): 3037-3054, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3037:IOTIOO>2.0.CO;2.
- Wu R, Kirtman B P. 2005. Roles of Indian and Pacific Ocean air-sea coupling in tropical atmospheric variability [J]. *Climate Dynamics*, 25 (2-3): 155-170, doi:10.1007/s00382-005-0003-x.
- Wu R, Kirtman B P, Pegion K. 2006. Local air-sea relationship in observations and model simulations [J]. *J. Climate*, 19 (19): 4914-4932, doi:10.1175/JCLI3904.1.

- Wu R, Kirtman B P. 2007. Regimes of seasonal air-sea interaction and implications for performance of forced simulations [J]. Climate Dynamics, 29 (4): 393-410, doi:10.1007/s00382-007-0246-9.
- Wu R, Kirtman B P, Pegion K. 2007. Surface latent heat flux and its relationship with sea surface temperature in the National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System simulations and retrospective forecasts [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (17): L17712, doi:10.1029/2007gl030751.
- Wu R, Kinter III J L. 2010. Atmosphere-ocean relationship in the mid-latitude North Pacific: Seasonal dependence and east-west contrast [J]. J. Geophys. Res., 115 (D6): D06101, doi:10.1029/2009JD012579.
- Wu R, Cao X, Chen S. 2015. Covariations of SST and surface heat flux on 10–20 day and 30–60 day time scales over the South China Sea and western North Pacific [J]. J. Geophys. Res., 120 (24): 12486-12499, doi:10.1002/2015jd024199.
- Wu R, Chen Z. 2015. Intraseasonal SST variations in the South China Sea during boreal winter and impacts of the East Asian winter monsoon [J]. J. Geophys. Res., 120 (12): 5863-5878, doi:10.1002/2015jd023368.
- Wu R. 2016. Coupled intraseasonal variations in the East Asian winter monsoon and the South China Sea–western North Pacific SST in boreal winter [J]. Climate Dynamics, 47 (7-8): 2039-2057, doi:10.1007/s00382-015-2949-7.
- Wu R, You T. 2018. Summer intraseasonal surface heat flux-sea surface temperature relationship over northern tropical Indo-western Pacific in climate models [J]. J. Geophys. Res., 123 (11): 5859-5880, doi:10.1029/2018jd028468.
- Wu R. 2019. Summer precipitation-SST relationship on different time scales in the northern tropical Indian Ocean and western Pacific [J]. Climate Dynamics, 52 (9-10): 5911-5926, doi:10.1007/s00382-018-4487-6.
- 徐海明, 王琳玮, 何金海. 2008. 卫星资料揭示的春季黑潮海区海洋对大气的影响及其机制研究 [J]. 科学通报, 53 (8): 463-470. Xu Haiming, Wang Linwei, He Jinhai. 2008. Study of impacts of ocean in the Kuroshio region on atmosphere and mechanism during spring revealed using satellite data [J]. Science Bulletin (in Chinese), 53 (8): 463-470, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2008.04.014.
- Xu H M, Xu M M, Xie S P, et al. 2011. Deep atmospheric response to the spring Kuroshio over the East China Sea [J]. J. Climate, 24 (18): 4959-4972, doi: 10.1175/JCLI-D-10-05034.1.
- 徐蜜蜜, 徐海明, 朱素行. 2010. 春季我国东部海洋温度锋区对大气的强迫作用及其机制研究 [J]. 大气科学, 34(6): 1071-1087. Xu Mimi, Xu Haiming, Zhu Suxing. 2010. Ocean-to-atmosphere forcing in the vicinity of the sea surface temperature front in East China Sea during spring time and its possible mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 34(6): 1071-1087, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.04.
- 徐蜜蜜, 徐海明, 朱素行, 等. 2012. 我国东部海洋温度锋区对大气的强迫作用—季节变化 [J]. 大气科学, 36(3): 590-606. Xu Mimi, Xu Haiming, Zhu Suxing, et al. 2012. Ocean-to-atmosphere forcing in the vicinity of the sea surface temperature front in the East China Sea-Seasonal variations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 36(3): 590-606, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11113.
- 徐全倩, 徐海明, 马静. 2018. 与夏季北太平洋副热带中尺度海洋涡旋相联系的海气关系 [J]. 大气科学, 42(6): 1191-1207. Xu Quanqian, Xu Haiming, Ma Jing. 2018. Air-sea relationship

- associated with mesoscale oceanic eddies over the subtropical North Pacific in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 42(6): 1191-1207, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17180.
- Ye K, Wu R. 2015. Contrast of local air-sea relationships between 10–20-day and 30–60-day intraseasonal oscillations during May–September over the South China Sea and western North Pacific [J]. Climate Dynamics, 45 (11-12): 3441-3459, doi:10.1007/s00382-015-2549-6.
- Yu L, 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): 527-540, doi:10.1175/BAMS-88-4-527.
- 赵永平. 1986. 北太平洋中纬海区海-气热量交换对其上空大气环流的影响 [J]. 海洋与湖沼, 17 (1): 57-65. Zhao Yongping. 1986. Air-sea heat exchange over the mid-latitude North Pacific and its impacts on the overlying atmosphere [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 17 (1): 57-65.
- 赵永平, McBean G A. 1991. 北太平洋海洋异常加热主要型及其与海面水温的关系 [J]. 海洋与湖沼, 22 (1): 84-92. Zhao Yongping, McBean G A. 1991. Main patterns of anomalous ocean heating in the North Pacific and their relations to sea surface temperature [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 22 (1): 84-92.
- 赵永平, McBean G A. 1995. 黑潮海域海洋异常加热与北半球大气环流的相互作用 [J]. 海洋与湖沼, 26 (4): 383-388. Zhao Yongping, McBean G A. 1995. Interactions between anomalous ocean heating in the Kuroshio region and the Northern Hemisphere atmospheric circulation [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 26 (4): 383-388.
- 赵永平, 陈永利, 翁学传. 1997. 中纬度海气相互作用研究进展 [J]. 地球科学进展, 12 (1): 33-37. Zhao Yongping, Chen Yongli, Weng Xuechuan. 1997. Advances in mid-latitude air-sea interaction research [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 12 (1): 33-37, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.1997.01.0032.
- 周天军, 宇如聪, 郜永祺, 等. 2006. 北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟 I: 局地海气相互作用 [J]. 气象学报, 64 (1): 1-17. Zhou Tianjun, Yu Rucong, Gao Yongqi, et al. 2006. Ocean-atmosphere coupled model simulation of North Atlantic interannual variability I: Local air-sea interaction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (1): 1-17, doi: 10.11676/qxxb2006.001.