

周倩, 凌铁军, 李响, 等. 2019. 中国周边海域海面温度日变化对区域气候的影响 [J]. 气候与环境研究, 24 (2): 214–226. Zhou Qian, Ling Tiejun, Li Xiang, et al. 2019. Influence of diurnal variation of SST on the regional climate over coastal waters of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (2): 214–226, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18087.

中国周边海域海面温度日变化对区域气候的影响

周倩 凌铁军 李响 张蕴斐

国家海洋环境预报中心, 北京 100081

摘 要 利用区域气候模式, 分别以逐时海面温度 (sea surface temperature, SST) 数据及逐日 SST 数据作为模式的海表温度进行强迫, 开展了 1991~2010 年共计 20 年的数值模拟, 探讨 SST 日变化对中国区域气候变化的影响。对比结果表明, 两组试验均能合理地再现中国区域气候的主要气候态特征。同时发现, 两组试验模拟的气候特征在我国沿海区域以及近海洋面上存在明显差异: 考虑 SST 日变化之后, 2 m 气温和感热通量差异呈现夏季 (冬季) 升高 (降低) 为主的趋势; 潜热通量则与之相反; 低层风场差异在夏季以海洋吹向大陆的东南风为主, 冬季则以陆面吹向海洋的西北风差异为主; 另外, 水汽输送差异呈气旋式 (反气旋式) 时, 降水出现正差异 (负差异)。SST 日变化对上述气候因子的影响在夏季更为显著。

关键词 海面温度 日变化 中国近海区域 区域气候

文章编号 1006-9585 (2019) 02-0214-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18087

Influence of Diurnal Variation of SST on the Regional Climate over Coastal Waters of China

ZHOU Qian, LING Tiejun, LI Xiang, and ZHANG Yunfei

National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081

Abstract In order to clarify the influence of diurnal variation of sea surface temperature (SST) on regional climate over coastal waters of China, two sensitivity experiments have been conducted using a regional climate model forced by both hourly-mean SST and daily-mean SST for 20 years (1991–2010). Although the main characteristics of climate over the coastal region of China can be well simulated by these two sensitivity experiments, there still exist some significant differences between them. For the sensitivity experiment forced by hourly-mean SST, the temperature at 2 m (T_2) and the sensible heat flux tend to have positive anomalies in the summer and negative anomalies in the winter, while the tendency of the latent heat flux is opposite. In the summer, southeasterly wind anomalies blowing from the ocean to the land prevail in the lower levels; in the winter, northwesterly wind anomalies blowing from the land to the ocean are the primary features. For water vapor transport, positive/negative rain anomalies always correspond to cyclonic/anticyclonic circulation anomalies. The influence of diurnal variation of SST over the coastal waters of China on these climatic variables are much more significant in the summer than in the winter.

Keywords Sea surface temperature (SST), Diurnal variation, Coastal region of China, Regional climate

收稿日期 2018-07-02; 网络预出版日期 2018-10-25

作者简介 周倩, 女, 1987 年出生, 博士, 主要从事海气相互作用、短期气候可预报性方面研究。E-mail: zhouq@nmefc.cn

通讯作者 李响, E-mail: lixiang@nmefc.cn

资助项目 全球变化与海气相互作用专项 GASI-IPOVAI-06, 国家自然科学基金 41606031、41376016、41506040

Funded by National Program on Global Change and Air-Sea Interaction (Grant GASI-IPOVAI-06), National Natural Science Foundation of China (Grants 41606031, 41376016, and 41506040)

1 引言

全球与区域气候变化问题被人们日益重视, 海洋在全球气候变化中的重要性也越来越被关注。由于海水的热容量是大气的 3000 多倍, 因此, 海洋上层 3 m 海水就可以相当于整个大气层所含热量的总和, 海洋环流的径向热量输送在决定地球表面气温高低过程中的作用与大气环流基本相当。海气相互作用一直是科学家们研究的主要方向(Liu et al., 2006), 它关系到海洋与大气之间的动量、热量、水汽、质量等交换, 并通过这些物理变量和物理过程影响大气与海洋的环流。

海气相互作用对于中国的短期气候变化影响显著。中国处于季风区域, 印度洋、西太平洋的暖池等海洋表面状况变化影响着季风的起始和强度, 从而影响着中国的汛期降水等主要短期气候变化。南海季风、印度季风爆发等引起的水汽输送, 是影响我国短期气候的主要因素。如 1998 年的中国大洪水, 其暴雨区的水汽辐合是由半球尺度的水汽输送造成, 南海季风的爆发及其区域内西南方向水汽输送大于来自于西边的水汽输送(丁一汇和胡国权, 2003), 亚洲夏季风从孟加拉湾、南海携带大量的水汽和热带西太平洋以及西风带来的水汽先在长江中、下游, 后在长江中、上游流域辐合, 造成长江流域的持续性强降水(黄荣辉等, 1998)。此外, 印度季风变化引起的水汽输送与长江中下游降水关系密切(Zhang, 2001), 东亚夏季风西北影响区降水的水汽来源于南风水汽通量。类似的研究还有很多(何金海和于新文, 1986; 田红等, 2004; 陈长胜等, 2004; 何金海等, 2005; 汤绪等, 2006; 黄荣辉等, 2006), 这些研究都表明, 来自南海、印度洋等区域的水汽输送对我国降水有重要影响。

海面温度(sea surface temperature, SST)是海气相互作用最重要的因子, 它既是大气的下边界, 同时又受到大气条件的控制。SST 在月际乃至气候尺度上的变化, 也将引起全球或区域气候的显著变化。在时间尺度上, 除了月际和气候等较长尺度的变化之外, SST 还存在着日变化。

最近的卫星观测等表明, 较大的 SST 日变化可能导致在海面净热通量每天平均增加 50~60

W/m^2 , 长期的平均值增加超过 10 W/m^2 , 这对于气候尺度上的大气环流变化而言是不可忽略的(Webster et al., 1996; Soloviev and Lukas, 1997)。

SST 的日变化是产生海气表面通量日变化的主要原因(Webster et al., 1996), 其中潜热是海气热量通量交换的主要因子。考虑 SST 日变化(包括那些没有形成 SST 日变化或较小的情况)将使得月平均 SST 有 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的差异, 净辐射差异减少 5 W/m^2 。在热带太平洋, $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 SST 误差可以导致大约 27 W/m^2 的净辐射误差(Soloviev and Lukas, 1997)。近年来的研究表明, 不考虑 SST 日变化或对其低估, 可能造成日海温相差 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 并且直接导致海洋上的表面通量在白天时减少 40 W/m^2 , 这对把 10 m 厚度作为均一块体考虑的海洋模式而言, 平均温度或许差异不大, 但对大气就不可忽略了, 因为大气的热容量远远小于海洋, 此量级的辐射值变化足以导致大气下层不稳定。利用大气模式与海洋混合层模式相耦合的模式的研究工作表明, SST 日变化可以改变西太平洋暖池或近海的大气环流场, 但其相关的物理机制尚需要进一步研究(Clayson and Chen, 2002; Shinoda, 2005)。此外, SST 日变化还会显著影响印度洋与西太平洋 MJO 的传播特征(Slingo et al., 2003; Dai and Trenberth, 2004)。

数值模式在气候预测研究过程中发挥着不可替代的作用(Kawai et al., 2006; Bader et al., 2008), 在研究海洋与气候变化方面的应用也日益广泛且效果良好(Zhou et al., 2007)。区域气候模式不仅可以细化全球气候模拟的信息, 还可以使用更加精准的局地信息和更利于局地模拟的、可分辨较小尺度的物理过程, 更准确地模拟区域气候变化(Durman et al., 2001; Giorgi et al., 2001; Pan et al., 2001; Denis et al., 2002; Lorenz and Jacob, 2005; 乔方利, 2007; Anderson et al., 2007)。提高海表面温度的日变化模拟能力将有助于更好地模拟季节变化等时间尺度的模拟与预测(Li et al., 2001; Noh et al., 2002; Clayson and Chen, 2002; Bernie et al., 2005; Stephens et al., 2005; Vitart et al., 2007)。由于大面积的 SST 日变化连续观测数据极为有限, 目前大多数区域气候模式还是以日平均或频度更低的分析海面温度作为下边界条件, 而用逐小时 SST 数据作为区域气候模式分析海面温度场的研究还很少(Chen et al.,

1994; Walsh et al., 2004)。

Ling et al. (2015) 发展了一个新的一维混合层模式, 该模式可以很好地模拟出 SST 的日变化特征。随后, Li et al. (2018) 将该一维模式扩展为二维混合层模式, 并且制作得到了 31 a 的全球高分辨率逐时 SST 数据集 MLSST。本文利用该套逐时 SST 数据集, 使用区域气候模式, 研究探讨了中国周边海域 SST 日变化对我国区域气候的影响。

2 模式、数据和试验设计

2.1 模式

本研究利用 WRF 模式, 建立了适用于中国区域气候研究的短期气候模拟系统。

WRF 模式 (Skamarock et al., 2008) 是由 NCAR、NCEP/NOAA 和俄克拉荷马大学的暴雨分析预报中心等多单位联合发展起来的新一代非静力平衡、高分辨率、科研和业务预报统一的中尺度预报和资料同化模式。WRF3.4 版本模式是 NCAR 于 2012 年 4 月推出的一个版本。该版本模式适用于精细化天气预报、区域气候和季节时间尺度大气研究、耦合 (海洋、化学等) 模式应用、参数化研究、多尺度下的理想化模拟 (如对流、斜压波模拟) 和资料同化研究。

本研究中使用的区域气候模式范围为 ($5^{\circ}\text{N}\sim 49^{\circ}\text{N}$, $72^{\circ}\text{E}\sim 158^{\circ}\text{E}$)。该区域除了包含整个中国区域及西北太平洋之外, 还考虑了部分北印度洋地区。该区域气候模式水平分辨率为 0.25° , 垂向 36 层, 其中低层略有加密。模式的时间积分步长为 60 s。通过参数化对比的敏感性试验, 确定使用 Zhang-MC 积云对流参数化方案和 NSSL2 微物理参数化方案作为模式的主要物理参数化方案。

2.2 数据

本研究使用区域气候模式, 采用 NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 数据作为初始场及边界场。CFSR 再分析数据集 (Saha et al., 2010) 是 NCEP 2010 年研制的覆盖全球大气、海洋、陆面的高分辨率再分析资料, 该资料中首次同化了卫星辐射率。CFSR 数据可以提供 1979 年以来的高分辨率再分析资料, 其中大气水平分辨率约为 38 km (T382), 垂直达到 64 层。

在本研究中, 还使用了一套逐时 SST 资料 MLSST。该资料使用 1991~2010 年的 CFSR 再分

析数据的表面风应力及太阳短波辐射作为外强迫, 驱动二维海洋混合层模式, 积分得到了逐时 SST 数据 MLSST (Li et al., 2018)。MLSTT 是覆盖全球的高精度逐时 SST 资料, 水平分辨率为 0.3° (纬度) $\times 0.3^{\circ}$ (经度)。与浮标观测数据的分析对比表明, MLSST 数据的平均值偏差为 0.07°C , 均方根误差 0.37°C , 和观测的相关系数达到 0.98; 另外, MLSST 也较好地模拟了 SST 的日变化。因此, MLSST 是一套真实可靠的逐时 SST 数据, 可以作为 SST 日变化对我国区域气候的影响研究的外强迫资料。

2.3 试验设计

SST 是影响海气相互作用的一个重要因子, 其日变化会影响区域的气候。为了研究 SST 日变化对中国区域气候的影响, 利用上述中国区域气候模式, 开展了敏感性试验。试验采用 CFSR 再分析数据作为初始场即边界条件, 并使用逐时 SST 数据 MLSST 作为 SST 下垫面数据。具体试验设计如下: 试验一采用逐时 SST 作为中国区域气候模式的下垫面, 从 1991 年 1 月 1 日开始积分, 积分至 2010 年 12 月 31 日, 该组试验记为试验 hourly_SST; 试验二采用逐日 SST 作为中国区域气候模式的下垫面, 积分时段同试验一, 记为试验 daily_SST。其中, 逐日 SST 数据由逐时 SST 数据计算日平均得到。

3 结果分析

在试验一中采用 hourly_SST 作为区域气候模式的 SST 下垫面, 而在试验二中, 区域气候模式的 SST 下垫面为 daily_SST, 两组试验的其他设置均相同, 因此, 两组试验结果的差异, 仅来源于 SST 下垫面是否包含日变化信息。

简单分析了两组试验的 SST 气候态之差, 结果显示, hourly_SST 试验和 daily_SST 试验得到的 SST 气候态差异很小, 两者之差的绝对值不超过 0.002°C 。相比而言, hourly_SST 试验中的 SST 外强迫包含了日变化过程, 可以影响海水表面的热力通量, 进而影响动力过程。因此, 主要分析两组试验结果的热力和动力上的差异。

前面的分析已经提到, 我们主要关注海温日变化对中国区域的气候影响, 因此, 主要考察两组试验的气候态差异。而对于北半球夏季和冬季, 各变量也有不同的差异, 为了考察夏冬季节的差异, 定

义 6~8 月为夏季, 12 月至次年 2 月为冬季, 分析结果表明, 夏季或冬季的各月份之间差异较小, 但是 7 月和 12 月之间对比差异最大, 为了更好地说明夏季和冬季的差异, 因此, 文中分别选取 7 月和 12 月作为夏季和冬季的典型月份展开研究。

3.1 2 m 气温

Hourly_SST 试验和 daily_SST 试验的差异只来源于 SST 外强迫是否包含日变化, 因此, 两组试验外强迫的差异仅存在于海面上, 但是, DSST (即 SST 的日变化, 定义为日最高 SST 和日最低 SST 之差) 的差异可以导致整个区域内表面 2 m 气温 (T2) 以及 DT2 (即 T2 的日变化, 定义为 T2 的日最高温度和日最低温度之差) 的差异。图 1 给出了 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验的 DT2 气候态差异。两组试验结果的对比表明, 当使用逐时 SST 作为外强迫时, DT2 差异的大值区主要位于我国东南沿海地区, 两组试验 DT2 气候态差异的极大值可以达到 0.5°C 。

图 2 分别以 7 月和 12 月作为夏季和冬季的典型月份, 给出了两组试验结果中 DT2 的差异。由于 SST 的日变化在夏季要显著强于冬季, 因此, DT2 在海面上的季节变化特征也与 DSST 的相似, 即 7 月比 12 月更为显著。无论是夏季还是冬季, hourly_SST 试验模拟得到的 DT2 振幅在我国中东部地区均有所增大。

当使用 MLSST 的 hourly_SST 作为下垫面外强迫之后, 除了 T2 的日变化差异更加显著之外, T2 本身的气候态也存在差异。从气候态平均而言 (图略), 两组试验的差异主要位于陆地区域, 而在海上的差异几乎为 0。这是由于两组试验中海洋下垫面的气候态差异很小, 而 SST 日变化通过海洋的热力和动力过程, 可以进一步影响陆面上的动力热力过程, 可能导致陆面上大气的下垫面影响较大。而 2 m 气温可能会显著地受到下垫面的影响, 因此导致陆地上 2 m 气温差异比海洋上更大。

考虑 SST 日变化之后, 中国区域气候模式模拟得到的逐月 T2 气候态也有差异。图 3 分别给出了 T2 在 7 月及 12 月的气候态差异。从图中可以看出, 在不同季节, T2 气候态的主要差异也仍然集中在陆面区域。相比于 daily_SST 试验, 夏季时, hourly_SST 试验模拟的 T2 在我国中东部地区以暖差异为主, 其差异可以达到气候态的 3%; 冬季时, 则以冷差异为主, 差异的绝对值可以达到气候态

的 8%。

3.2 感热通量

两组试验对比表明, 是否考虑 SST 日变化也会影响中国区域感热通量的气候态。

对于这两组试验, 在陆面上的气候态差异要远大于海面上的差异, 除了青藏高原地区的差异大值区之外, 我国的东南沿海地区也存在两组试验差异的大值区 (图略)。在这些区域, 海温日变化导致了感热通量存在一个较大的正差异。

图 4 分别给出了 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验模拟得到的 7 月和 12 月感热通量气候态 (向上为正) 的差异分布。两组试验模拟的感热通量在不同季节差异的绝对值可以达到 13.6 W/m^2 。考虑海温日变化过程之后, 对于我国中东部地区, 7 月时, 海温日变化导致的感热通量变化以正差异为主, 差异可以达到气候态值的 10%; 与之相反, 12 月时, 以感热通量负差异为主。海面上的感热通量差异在夏季和冬季的分布则与陆面上的相反, 即包含 SST 日变化之后, 我国近海大洋上的感热通量差异在 7 月为负差异, 沿岸的差异值最大可以达到气候态值的 30%, 12 月则为正差异。

3.3 潜热通量

作为大气的下边界, 不同的 SST 外强迫也会影响潜热通量的差异。

气候态上 (图略), 在我国东南部, hourly_SST 试验模拟的潜热通量相对于 daily_SST 试验的差异空间分布特征, 呈现负—正—负—正结构: 在我国东南部有一个较大的负差异, 而在我国近海海面有正差异, $125^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$ 洋面上为负差异, 145°E 以东则为正差异。两组试验模拟的潜热通量的最大差异可以达到 8.1 W/m^2 。

两组试验模拟的潜热通量逐月气候态差异也存在月际变化。图 5 分别给出了两组试验模拟的潜热通量气候态 (向上为正) 在 7 月和 12 月的差异。在 7 月, 我国大陆东部以及近海的潜热通量差异均以负值为主, 并且该差异最多可以达到气候值的 10%, 而在 12 月的差异则以正值为主。需要指出的是, 无论是 7 月还是 12 月, 两组试验模拟的潜热通量在海上的差异均大于陆地区域。

3.4 风场

除了表面的热力通量差异以外, 我们也考察了两组试验的动力特征差异。这里给出两组试验结果中低层和高层风场的差异。

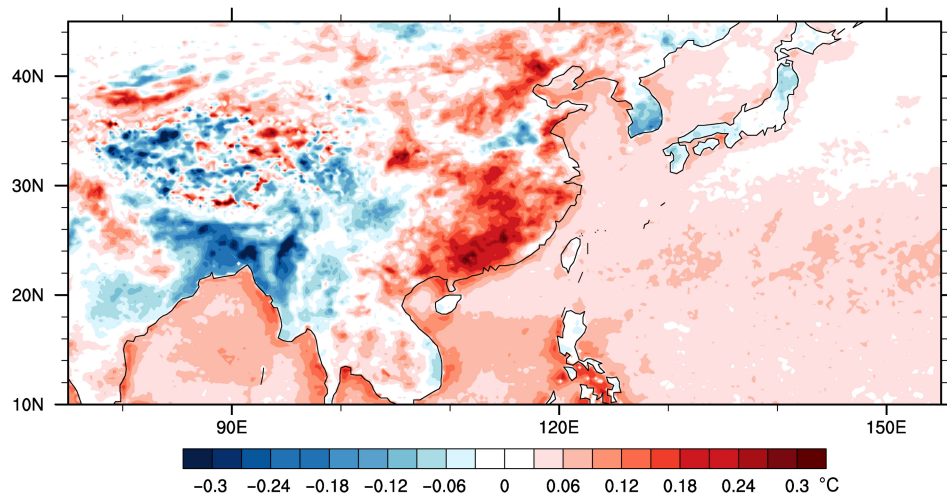


图1 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验的 DT2 (2 m 气温的日变化) 的气候态差异 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 1 Climatological differences of DT2 (diurnal variation of 2-m air temperature) between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

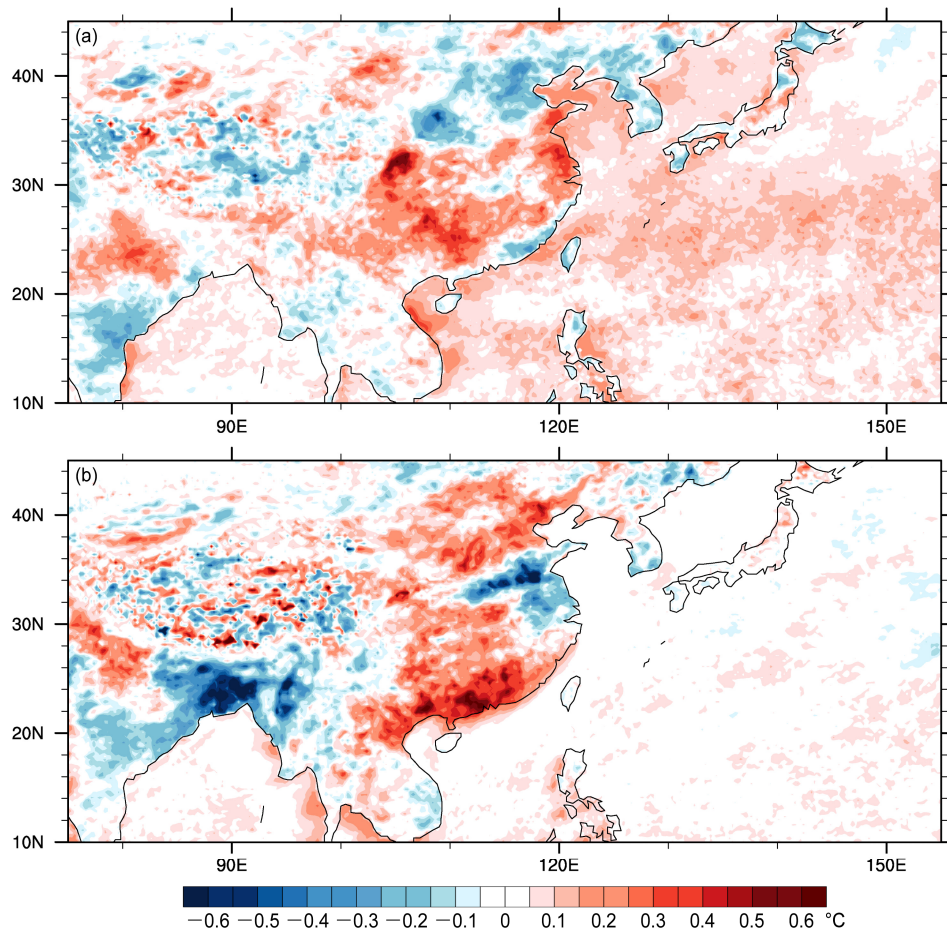


图2 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验中 DT2 的月气候态差异: (a) 7 月; (b) 12 月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 2 Climatological differences of DT2 in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

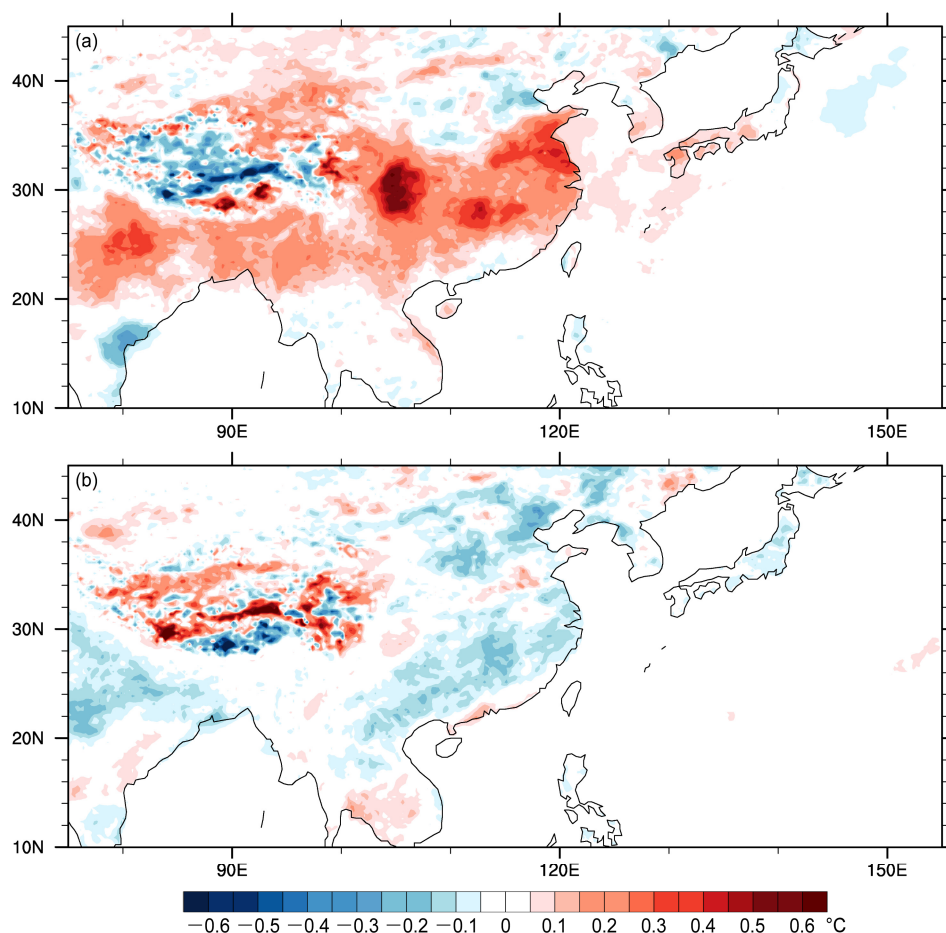


图3 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验中 T2 的月气候态差异：(a) 7 月；(b) 12 月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 3 Climatological differences of T2 in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

图 6 分别给出了 hourly_SST 和 daily_SST 两组试验中 10 m 纬向风场 U10 和经向风场 V10 的气候态差异。从图中可以看到，两组试验模拟的 10 m 风场的差异主要表现在海面上。对于 U10，日本岛以南的广阔海域上有较大的西风异常；而对于 V10，异常的大值中心自西向东呈现北风—南风—北风—南风差异的模式。

图 7 分别给出了 hourly_SST 和 daily_SST 试验的 10 m 风场在 7 月和 12 月的月气候态之差。总体而言，在 7 月和 12 月，两组试验的 10 m 纬向风和经向风的最大差异均达到 0.50 m/s 左右，且差异主要集中在海上。其中，相对于 daily_SST 试验，hourly_SST 试验中的 10 m 风场在 7 月表现为明显的海洋吹向大陆的东南风差异，而在 12 月，则以大陆吹向海洋的北风差异为主。

除了低层风场存在差异之外，高层风场也存在较大差异。以 100 hPa 高度场为例（图 8），两组试

验的差异在 7 月呈现为整个欧亚大陆上空以反气旋为主，即我国东部地区以北风差异为主，纬向风的最大差异近 1 m/s；而在 12 月则呈现为中国东部则以东南风差异为主，纬向风的最大差异约 0.5 m/s。

中国区域的风场差异可能与海陆温差差异对比有关。除了前文分析过的下垫面的海陆温差差异之外，对流层中上部的海陆区域气温差异也会影响高层环流异常（图略）。夏季时，T2 以陆面暖差异为主，500 hPa 等压面上温度场也在我国广大中东部地区均表现为暖差异，这就导致了该区域的垂直对流有上升差异，进而导致低层大气表现为海洋吹向陆面的风差异，高层大气风异常则表现为陆面吹向海洋；反之，冬季时，hourly_SST 试验模拟的 T2 以陆面冷差异为主，500 hPa 气温在长江以北表现为冷差异，长江以南则差异较小，相应地，风场差异表现为低层陆面吹向海洋，高层海洋吹向陆面。

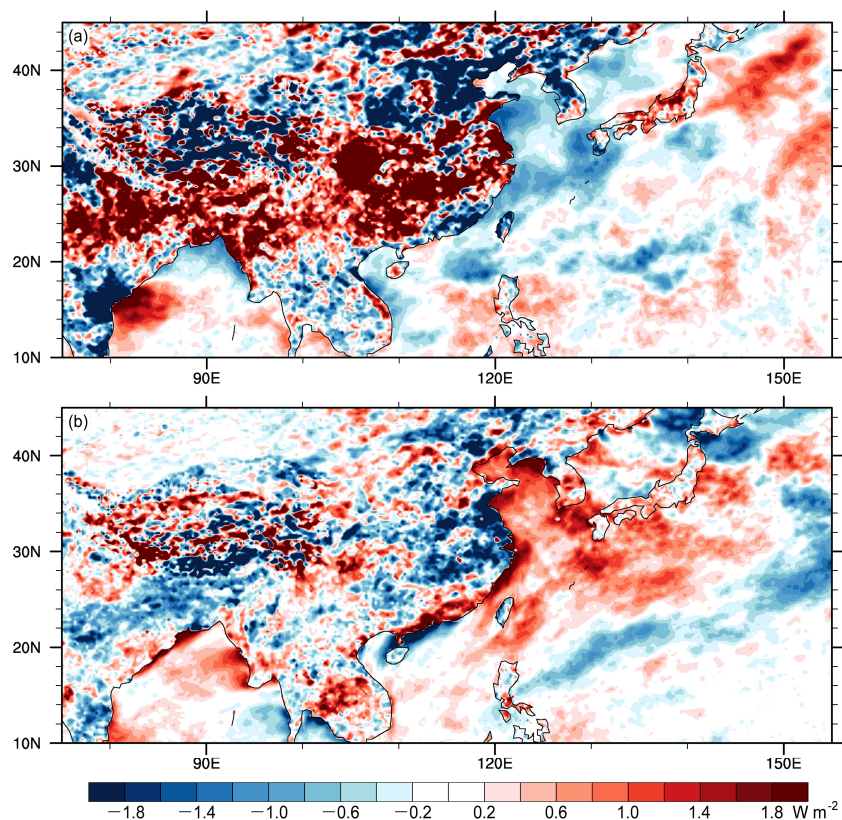


图4 hourly_SST 试验和 daily_SST 试验中感热通量的月气候态差异: (a) 7月; (b) 12月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 4 Climatological differences of sensible heat fluxes in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

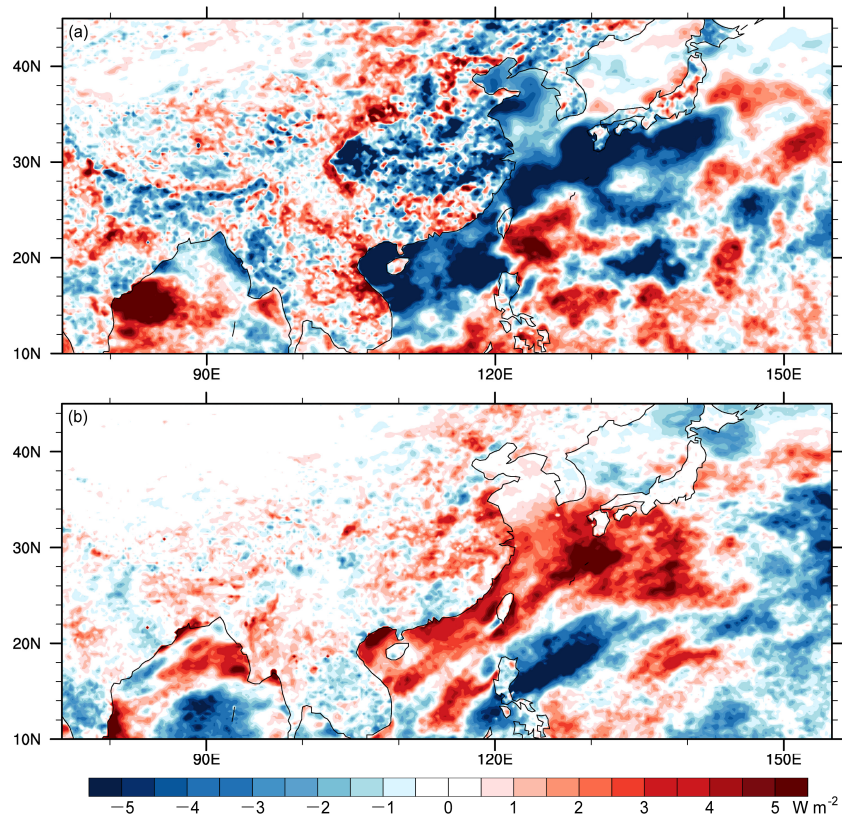


图5 hourly_SST 和 daily_SST 试验的潜热通量的月气候态差异: (a) 7月; (b) 12月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 5 Climatological differences of latent heat fluxes in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

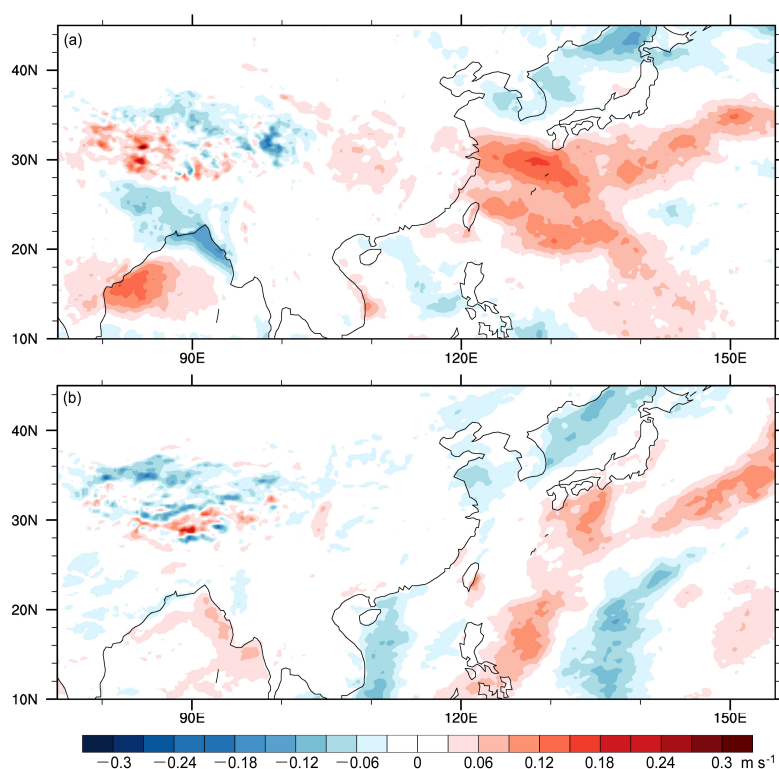


图6 hourly_SST 和 daily_SST 试验的 10 m (a) 纬向风场 (U10) 和 (b) 经向风场 (V10) 气候态差异 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 6 Climatological differences of 10-m (a) zonal wind (U10) and (b) meridional wind (V10) between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

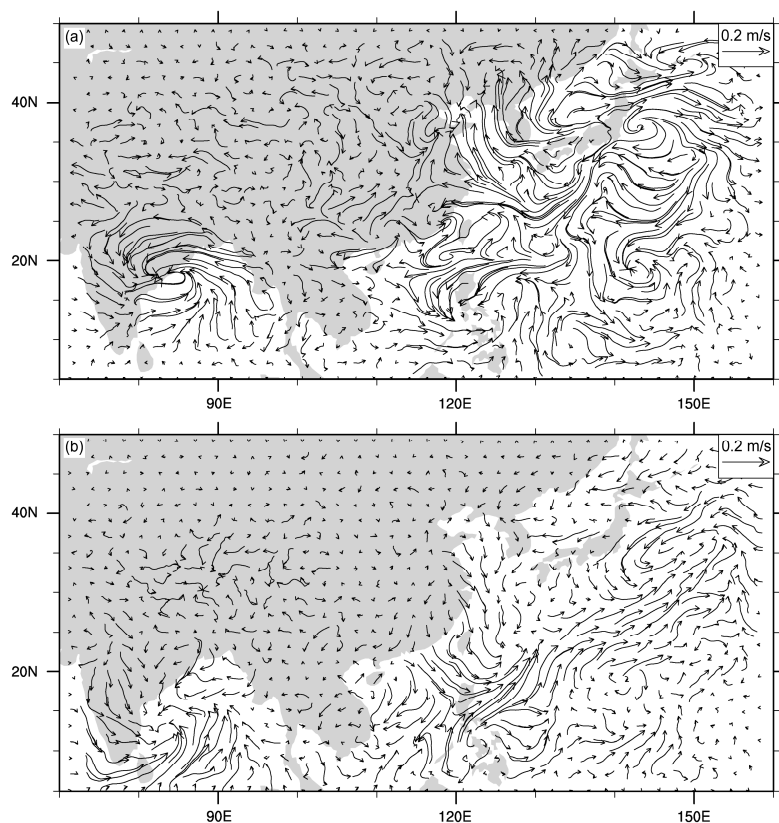


图7 hourly_SST 和 daily_SST 试验的 10 m 风场的月气候态差异: (a) 7 月; (b) 12 月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验; 阴影部分为陆地)

Fig. 7 Climatological differences of 10-m wind in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST; land areas are shaded)

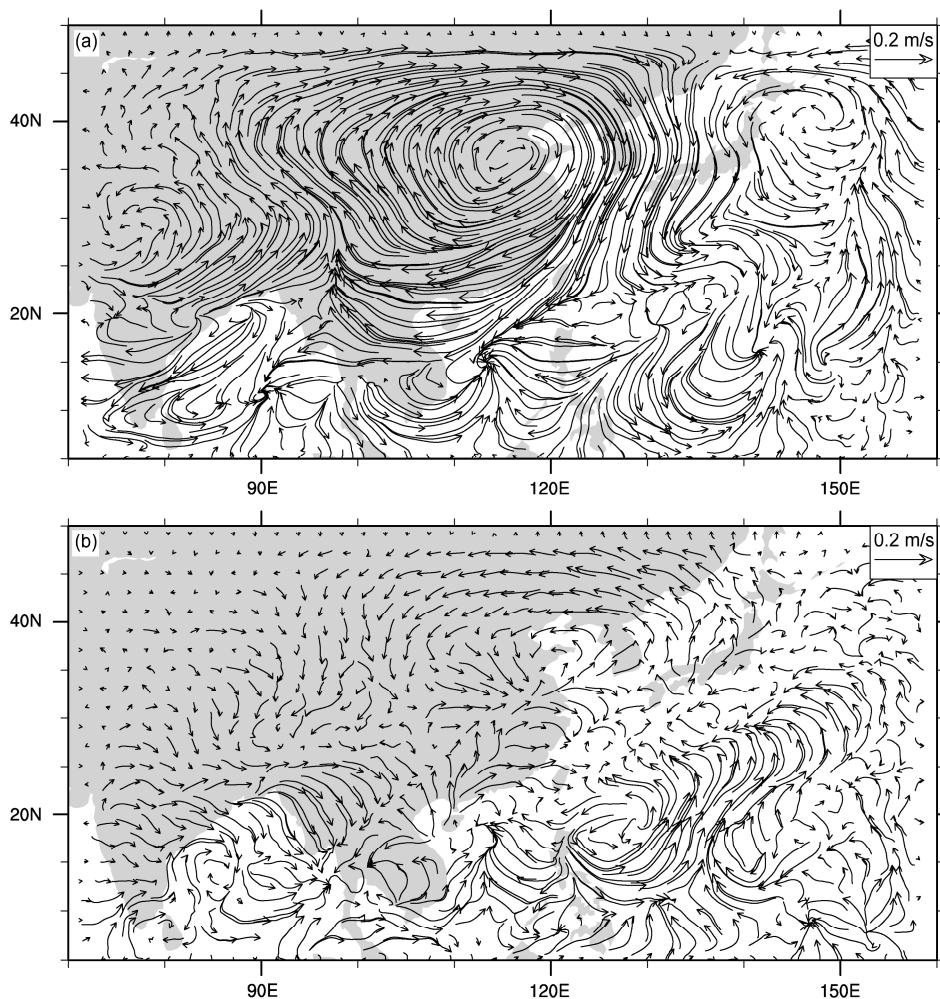


图8 hourly_SST 和 daily_SST 试验的高层风场(100 hPa 高度风场)的月气候态差异:(a) 7月;(b) 12月(hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验;阴影部分为陆地)

Fig. 8 Climatological differences of wind fields at 100 hPa in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST; land areas are shaded)

3.5 降水

包含 SST 日变化信息的 hourly_SST 和使用日均 SST 作为外强迫的 daily_SST 两组试验结果,也出现了降水气候态的差异,两组试验的降水差异最大可以达到 3.7 mm/month。无论 7 月还是 12 月,降水差异在陆面和海洋上最多均可以达到气候态的 10%以上。图 9 给出了两组试验中降水气候态差异的具体空间分布。从图中可以看出,7 月时,包含 SST 日变化之后,降水差异表现为“南旱北涝”的模式,即华南区域以降水负差异为主,华东华北区域则以正差异为主,结合 7 月的气候态降水(图略),华北地区的雨带上,降水增多。海上的降水差异大于陆面,其中,渤海地区为降水正差异,黄海上则以负差异为主,台湾岛北部有一个较大的正

差异中心。另外,在 15°N~20°N 之间,西至 115°E,东至 140°E 的区域上,从北向南依次存在着两个正负差异大值中心带。12 月时的降水差异则显著小于 7 月,并且陆面上的降水差异较小,降水差异大值区主要位于海面上,如台湾岛以东区域存在较大的降水正差异。

3.6 水汽输送

水汽输送对降水分布具有非常重要的影响,两组试验的水汽输送在垂直层上也存在差异,并且主要位于大气中低层。图 10 给出了两组试验模拟的 850 hPa 水汽通量在 7 月及 12 月的差异。从图中可以看到,无论在 7 月还是 12 月,两组试验水汽输送的差异与降水差异之间具有很好的对应关系。两组试验模拟的水汽输送差异为气旋式时,对应着

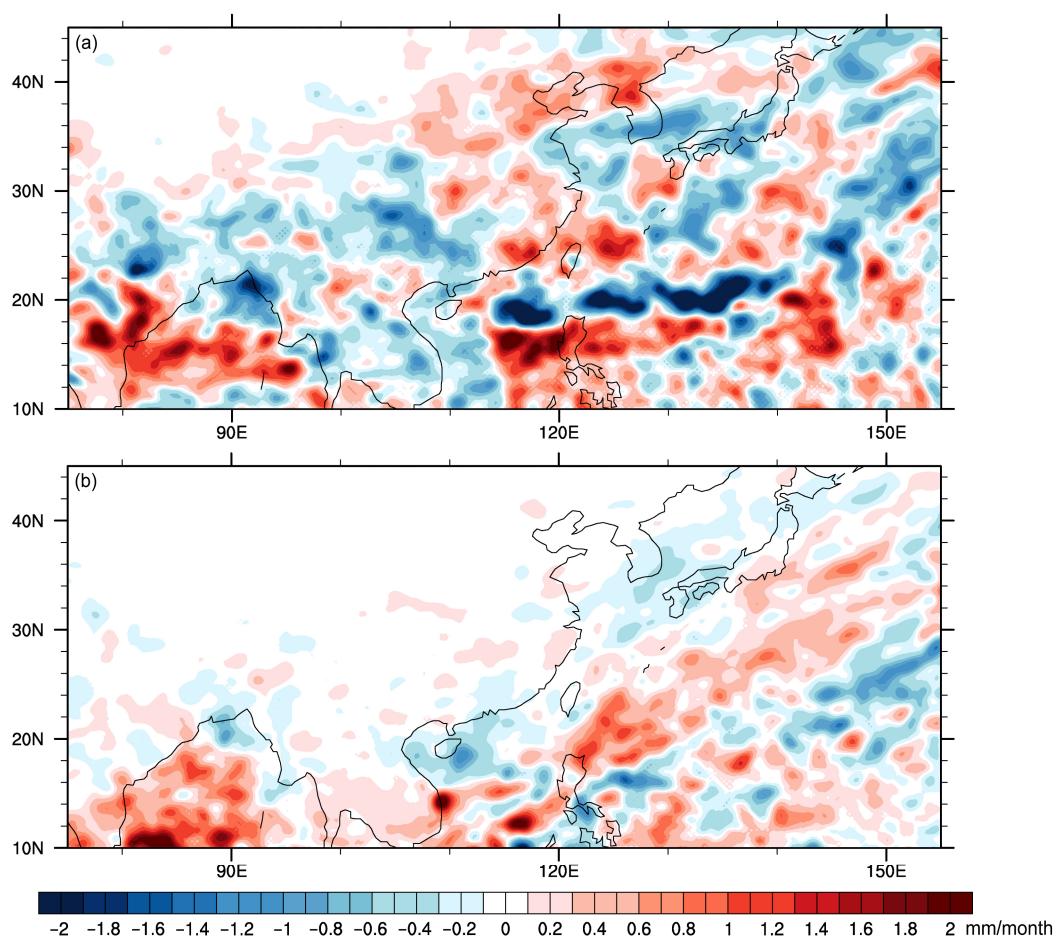


图9 hourly_SST 和 daily_SST 试验的降水月气候态之差的分布：(a) 7月；(b) 12月 (hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 9 Climatological differences of precipitation in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

正的降水差异，而当水汽输送为反气旋式差异时，与之对应的降水差异也呈现为负值。这主要是由于，气旋式的水汽输送差异导致垂直上升运动加强，产生更多的降水；反之，反气旋式环流抑制了水汽的垂直输送，降水减少。两组试验的差异中，水汽输送的差异也主要集中于海面上，这也就导致了降水的异常中心位于海面上。

4 结论和讨论

中国周边海域 SST 的日变化会影响我国的区域气候。考虑 SST 日变化的敏感性试验的结果对比分析表明，SST 日变化对研究区域内大气的热力及动力结构都会产生影响。

考虑 SST 日变化过程之后，T2 日变化增强，T2 的气候态也发生了相应变化。两组试验的 T2 差异主要位于我国东南沿海地区，考虑 SST 日

变化之后，夏季时，T2 差异以正差异为主，冬季则以负差异为主，并且夏季的差异要显著强于冬季。

SST 日变化的物理过程，也会导致感热通量和潜热通量的气候态差异。对于感热通量，中国周边海域的 SST 日变化导致我国东南沿海地区出现感热通量的正差异，逐月的感热通量差异则表现为夏季时陆面区域正差异，近海负差异；冬季时则与之相反。潜热通量的差异分布则与感热通量的相反，考虑 SST 日变化之后，气候态上，我国东南区域以负差异为主，近海地区则为正差异；此外夏季时我国近海地区以负差异为主，而冬季时的差异以正值为主。

中国周边海域的 SST 日变也会影响我国区域的风场。其 SST 日变化将导致低层的 10 m 风场夏季以海洋吹向陆面的东南风差异为主，冬季以陆面吹向海洋的西北风差异为主；而对于高层风场，夏季表现为反气旋异常，我国东部地区以北风差异为

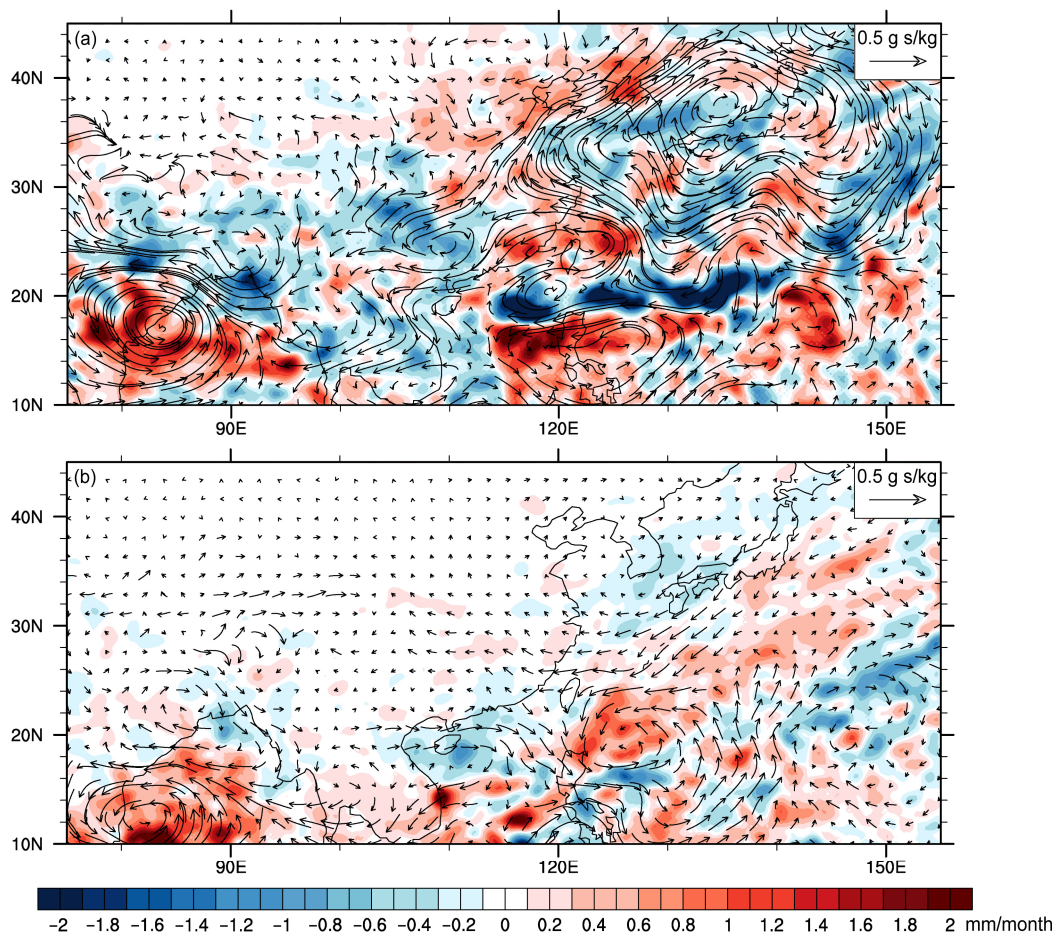


图 10 hourly_SST 和 daily_SST 试验中 850 hPa 高度场上的水汽通量(矢量)和降水(填色)的月气候态之差:(a) 7 月;(b) 12 月(hourly_SST 试验减去 daily_SST 试验)

Fig. 10 Monthly climatological differences of water vapor flux (vectors) and precipitation (shadings) at 850 hPa in (a) Jul and (b) Dec between hourly_SST and daily_SST experiments (Expt hourly_SST minus Expt daily_SST)

主, 冬季则东南风差异占主导。高低风场的配置, 可能与下垫面(T2 温度场)和中高层温度场的海陆差异分布有关。

中国周边海域 SST 的日变化还会影响我国的降水分布, 降水分布的差异主要是由于水汽输送差异导致的。水汽输送差异呈气旋式时, 降水出现正差异, 反之, 水汽输送差异呈反气旋式时, 降水差异则为负。

SST 日变化也引起了两组试验中感热通量和潜热通量的差异。其中, 感热通量计算公式为

$$H = \rho c_p C_H V (T_s - T_a), \quad (1)$$

其中, H 为感热通量, ρ 为大气密度, c_p 为定压比热, C_H 为整体交换系数, V 为 10 m 风速, T_s 为地表温度, T_a 为 10 m 气温。从公式中可以看到, 感热通量分别和 10 m 风速、地气温差成正比。图

4 表明, 陆面上的感热通量差异要大于海面上的感热差异, 而图 7 给出的风场差异中, 陆面上的风场差异, 即 V , 明显小于海面上的风场差异, 因此, 陆面上的感热差异很有可能来源于陆面的地气温差。

与感热通量类似, 潜热通量计算公式为

$$L_H = \rho L C_E V (q_s - q_a), \quad (2)$$

其中, L_H 为潜热通量, L 为蒸发潜热, C_E 为热量和水汽湍流的交换系数, q_s 为海表水汽湿度, q_a 为近海面空气比湿。同样地, 潜热通量也分别和 10 m 风速、海气水汽差成正比。从试验结果来看, 无论是 10 m 风速, 还是降水, 其海上的差异均大于陆地, 因此, 潜热通量的差异也主要位于海上。

本研究的试验区包含了西北太平洋至黑潮延伸体, 而从年际和年代际时间尺度上, 黑潮延伸体

区的 SST 变化对大气环流有非常重要的调整作用 (Qiu, 2002), 因此, 探讨黑潮延伸体区 SST 日变化对我国区域气候变化的影响, 也是未来可以展开的研究。

本研究在考察 SST 日变化对中国区域气候变化的影响时, 使用了 WRF 模式, 由于模式模拟的不确定性, 本研究的结论也仍然需要更多模式的敏感性试验结果来进行验证。另外, SST 日变化是海气相互作用的重要组成部分, 本研究中仅使用了大气模式进行模拟, 并不能充分体现海气相互作用, 未来可以考虑使用区域海气耦合模式开展 SST 日变化影响的相关研究。

参考文献 (References)

- Anderson C J, Arritt R W, Kain J S. 2007. An alternative mass flux profile in the Kain-Fritsch convective parameterization and its effects in seasonal precipitation [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (5): 1128–1140, doi:10.1175/JHM624.1.
- Bader D C, Covey C, Gutowski Jr W J, et al. 2008. Climate models: An assessment of strengths and limitations [R]. US Department of Energy Publications, 8pp.
- Bernie D J, Woolnough S J, Slingo J M, et al. 2005. Modeling diurnal and intraseasonal variability of the ocean mixed layer [J]. *J. Climate*, 18 (8): 1190–1202, doi:10.1175/JCLI3319.1.
- 陈长胜, 林开平, 王盘兴. 2004. 华南前汛期降水异常与水汽输送的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (6): 721–727. Chen Changsheng, Lin Kaiping, Wang Panxing. 2004. Relation between pre-flood season precipitation anomalies in South China and water vapor transportation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (6): 721–727, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2004.06.001.
- Chen D K, Rothstein L M, Busalacchi A J. 1994. A hybrid vertical mixing scheme and its application to tropical ocean models [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 24 (10): 2156–2179, doi:10.1175/1520-0485(1994)024<2156:AHVMSA>2.0.CO;2.
- Clayson C A, Chen A D. 2002. Sensitivity of a coupled single-column model in the tropics to treatment of the interfacial parameterizations [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1805–1831, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1805:SOACSC>2.0.CO;2.
- Dai A G, Trenberth K E. 2004. The diurnal cycle and its depiction in the community climate system model [J]. *J. Climate*, 17 (5): 930–951, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0930:TDCAD>2.0.CO;2.
- Denis B, Laprise R, Caya D, et al. 2002. Downscaling ability of one-way nested regional climate models: The big-brother experiment [J]. *Climate Dyn.*, 18 (8): 627–646, doi:10.1007/s00382-001-0201-0.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. *气象学报*, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (2): 129–145, doi:10.11676/qxxb2003.014.
- Durman C F, Gregory J M, Hassell D C, et al. 2001. A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127 (573): 1005–1015, doi:10.1002/qj.49712757316.
- Giorgi F, Hewitson B, Christensen J, et al. 2001. Regional climate information-evaluation and projections [M]// Houghton J T, et al eds. *Climate Change 2001. The Scientific Basis*, Cambridge University Press, 583–638.
- 何金海, 刘芸芸, 常越. 2005. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析 [J]. *干旱气象*, 23 (1): 10–16. He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. 2005. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in Northwest China [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 23 (1): 10–16, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2005.01.002.
- 何金海, 于新文. 1986. 1979 年夏季我国东部各纬带水汽输送周期振荡的初步分析 [J]. *热带气象*, 2 (1): 9–16. He Jinhai, Yu Xinwen. 1986. A preliminary analysis of the periodic oscillation in water vapour transportation crossing different latitudes over the East of China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2 (1): 9–16, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1986.01.002.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 300–313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 300–313, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.02.
- 黄荣辉, 蔡裕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 730–743, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02.
- Kawai Y, Otsuka K, Kawamura H. 2006. Study on diurnal sea surface warming and a local atmospheric circulation over Mutsu bay [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 84 (4): 725–744.
- Li W, Yu R C, Liu H L, et al. 2001. Impacts of diurnal cycle of SST on the Intraseasonal variation of surface heat flux over the western Pacific warm pool [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (5): 793–806.
- Li X, Ling T J, Zhang Y F, et al. 2018. A 31-year global diurnal sea surface temperature dataset created by an ocean mixed-layer model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35 (12): 1443–1454, doi:10.1007/s00376-018-8016-7.
- Ling T J, Xu M, Liang X Z, et al. 2015. A multilevel ocean mixed layer model resolving the diurnal cycle: Development and validation [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7 (4): 1680–1692, doi:10.1002/2015MS000476.
- Liu Q Y, Wu S, Yang J L, et al. 2006. A review of ocean-atmosphere interaction studies in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23 (6): 982–991, doi:10.1007/s00376-006-0982-5.
- Lorenz P, Jacob D. 2005. Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (18): L18706, doi:10.1029/2005GL023351.

- Noh Y, Joo Jang C, Yamagata T, et al. 2002. Simulation of more realistic upper-ocean processes from an OGCM with a new ocean mixed layer model [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 32 (5): 1284–1307, doi:10.1175/1520-0485(2002)032<1284:SOMRUO>2.0.CO;2.
- Pan Z, Christensen J H, Arritt R W, et al. 2001. Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D16): 17735–17751, doi:10.1029/2001JD900193.
- 乔方利. 2007. 海洋动力系统数值模式体系及海浪—环流耦合理论 [J]. *前沿科学*, (3): 81–86. Qiao Fangli. 2007. Ocean models system and the surface wave—circulation coupled theory [J]. *Frontier Science (in Chinese)*, (3): 81–86, doi:10.3969/j.issn.1673-8128.2007.03.013.
- Qiu B. 2002. The Kuroshio extension system: Its large-scale variability and role in the midlatitude ocean—atmosphere interaction [J]. *Journal of Oceanography*, 58 (1): 57–75, doi:10.1023/A:1015824717293.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (8): 1015–1058, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Shinoda T. 2005. Impact of the diurnal cycle of solar radiation on intraseasonal SST variability in the western equatorial Pacific [J]. *J. Climate*, 18 (14): 2628–2636, doi:10.1175/JCLI3432.1.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF Version 3 [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-475 +STR.
- Slingo J, Inness P, Neale R, et al. 2003. Scale interactions on diurnal to seasonal timescales and their relevance to model systematic errors [J]. *Annals of Geophysics*, 46: 139–155.
- Soloviev A, Lukas R. 1997. Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44 (6): 1055–1076, doi:10.1016/S0967-0637(96)00124-0.
- Stephens M Y, Oglesby R J, Maxey M. 2005. A one-dimensional mixed layer ocean model for use in three-dimensional climate simulations: Control simulation compared to observations [J]. *J. Climate*, 18 (13): 2199–2221, doi:10.1175/JCLI3380.1.
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征 [J]. *高原气象*, 25 (3): 375–381. Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping. 2006. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 375–381, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.003.
- 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子分析 [J]. *热带气象学报*, 20 (4): 401–408. Tian Hong, Guo Pinwen, 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, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.04.008.
- Vitar F, Woolnough S, Balmaseda M A, et al. 2007. Monthly forecast of the madden-Julian oscillation using a coupled GCM [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (7): 2700–2715, doi:10.1175/MWR3415.1.
- Walsh K J E, Nguyen K C, McGregor J L. 2004. Fine-resolution regional climate model simulations of the impact of climate change on tropical cyclones near Australia [J]. *Climate Dyn.*, 22 (1): 47–56, doi:10.1007/s00382-003-0362-0.
- Webster P J, Clayson C A, Curry J A. 1996. Clouds, radiation, and the diurnal cycle of sea surface temperature in the tropical western Pacific [J]. *J. Climate*, 9 (8): 1712–1730, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<1712:CRATDC>2.0.CO;2.
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (5): 1005–1017.
- Zhou T J, Yu Y Q, Liu H L, et al. 2007. Progress in the development and application of climate ocean models and ocean—atmosphere coupled models in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (6): 1109–1120, doi:10.1007/s00376-007-1109-3.