

蔡榕硕, 谭红建, 黄荣辉. 2012. 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系 [J]. 大气科学, 36 (1): 35–46. Cai Rongshuo, Tan Hongjian, Huang Ronghui. 2012. The relationship between interannual variations of summer precipitation in eastern China and the SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 35–46.

中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系

蔡榕硕^{1, 2} 谭红建^{1, 2} 黄荣辉²

1 国家海洋局第三海洋研究所, 国家海洋局海洋—大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘 要 本文首先利用 1979~2008 年中国 756 个站点和 GPCP2.1 的降水资料与 Hadley 中心的 HadISST 再分析海温资料以及应用合成和相关分析方法, 分析了中国东部夏季降水年际变化及其与东中国海及邻近海域海温异常的关系。分析结果表明: 当东中国海及邻近海域为暖(冷)异常时, 长江中下游、江淮地区夏季降水减少(偏多), 而东北南部的降水偏多(减少)。并且, 本文应用 RegCM3 区域气候模式对上述关系进行数值试验, 结果表明了东中国海及邻近海域的暖(冷)异常, 将使得我国长江、黄淮流域和华北大部分地区夏季降水的减少(增加), 而华南地区、东北南部和朝鲜半岛等地夏季降水的增加(减少)。此外, 本文还利用 NCEP/NCAR 再分析资料和数值模拟对上述关系的大气环流变异过程进行了分析, 分析结果揭示了上述海域的升温或降温对东亚地区上空的纬向和经向环流有较明显的影响。当东中国海及邻近海域升温时, 除了在该海域东部引起低空辐合, 高空辐散, 产生上升运动外, 还在其西部的长江、黄淮流域和华北地区引起低空辐散, 高空辐合, 产生下沉运动, 这将引起长江、黄淮流域和华北等地夏季降水的减少; 并在华南、东北南部和朝鲜半岛地区引起低空辐合, 高空辐散, 从而产生上升运动, 这使得华南地区、东北南部和朝鲜半岛夏季降水的增加。反之, 当东中国海及邻近海域降温时, 上述区域出现相反的现象。这些都说明东中国海及邻近海域的热力状态可能是影响我国东部夏季降水的重要因子之一。

关键词 降水 东中国海 海温 气候模式

文章编号 1006-9895 (2012) 01-0035-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Relationship between Interannual Variations of Summer Precipitation in Eastern China and the SST Anomalies in the East China Sea and Its Adjacent Seas

CAI Rongshuo^{1, 2}, TAN Hongjian^{1, 2}, and HUANG Ronghui²

1 Key Lab of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190

Abstract The relationship between the interannual variations of summer precipitation in eastern China and the SST

收稿日期 2010-12-15, 2011-06-17 收修定稿

资助项目 公益性行业科研专项经费项目 GYHY201006021、GYHY201005192, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB21400, 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金(海三科 2011009)

作者简介 蔡榕硕, 男, 1964 年出生, 研究员, 理学博士, 主要从事海洋环境和气候变化研究。E-mail: rscai@163.com

anomalies in the East China Sea and its adjacent seas is analysed by using the methods of composite and correlation analyses and the daily data of summer (June – August) precipitation at 756 stations of China, GPCP 2.1 and HadIS-ST datasets from 1979 to 2008. The results show that when the SST of the East China Sea and its adjacent seas is in warm (cold) anomalies in summer, there are less (more) rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Yangtze River/Huaihe River valley (Jianghuai valley) and more (less) rainfall in the southern part of Northeast China. Moreover, a regional climate model (RegCM3) is used to examine the above-mentioned relationship. The simulation results indicate that the warm (cold) SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas can contribute to less (more) rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the Yangtze River/Huaihe River valley (Jianghuai valley), and most of North China, and more (less) precipitation in South China, the southeast part of Northeast China, and the Korean Peninsula. Besides, the processes of atmospheric circulation variability over East Asia caused by the SST anomalies in these sea regions are explored based on the NCEP/NCAR reanalysis data and numerical simulation. The result shows that increase or decrease of SST in the above-mentioned seas has remarkable effect on zonal and meridional circulations over East Asia. When the SST of the East China Sea and its adjacent seas is above normal, a downward motion with a divergence at low levels and a convergence at upper levels can appear over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Yangtze River/Huaihe River valley (Jianghuai valley), and most of North China, which contributes to the decrease of summer rainfall in these areas, in addition to an upward motion with a strong convergence at low levels and a remarkable divergence at upper levels can be caused over the region to the east of these seas. And an upward motion with strong convergence at low levels and remarkable divergence at upper levels is caused in South China, the southern part of Northeast China, and the Korean Peninsula, thus, the summer precipitation increase obviously in these regions. When the SST of the East China Sea and its adjacent seas is below normal, the opposite phenomena appear in the above-mentioned areas. Consequently, it is suggested that the thermal state of the East China Sea and its adjacent seas may be one of the important factors affecting the summer precipitation in East China.

Key words precipitation, East China Sea, sea surface temperature, climate model

1 引言

中国东部由于受东亚夏季风的影响, 夏季气候异常的年际和年代际变化很明显, 并使得旱涝灾害频繁发生, 对国民经济和人民生活带来严重影响, 因此, 中国东部夏季降水的时空变化特征及成因历来是我国短期气候变化研究的重点。许多研究表明, 我国东部夏季降水变化的成因非常复杂, 影响因素众多 (黄荣辉等, 1999; 赵平和陈隆勋, 2001; 陆日宇, 2005; 彭京备等, 2005; 武炳义和张人禾, 2008; 陈际龙和黄荣辉, 2008; 邓伟涛等, 2009; Wu et al., 2009)。黄荣辉等 (2003, 2006)、Huang et al. (2007) 的研究揭示了影响我国夏季旱涝灾害的变化是受众多因子所控制, 既与包括海—陆—气各子系统的东亚季风气候系统的年际变化有关, 又与热带中、东太平洋海温的年际和年代际变化有密切关系。这些因子的变化引起了大气环流的异常, 从而导致我国东部夏季旱涝灾害具有明显的年际和年代际变化。

近年来, 蔡榕硕等 (2006, 2011)、蔡榕硕和谭红建 (2010) 的研究表明了从 20 世纪 70 年代中后期以来的中国近海 (渤海、黄海、东海和南海) 等西北太平洋边缘海有显著的持续变暖现象, 尤其以东中国海陆架 (渤海、黄海和东海, 简称东中国海) 及相邻海区的升温为显著。而东中国海及邻近海域的热力变异必然会引起东亚大气环流的异常, 进而影响到中国东部的气候异常, 尤其是影响降水的变化 (李翠华等, 2010)。并且, 研究还表明, 近 30 年来中国近海及邻近海域除了有持续变暖的现象外, 还有明显的年际变化特征 (蔡榕硕等, 2011)。虽然, 关于热带海洋或全球各海域等热力变异与我国夏季旱涝关系等方面已有许多研究 (翁学传等, 1996; 孙燕等, 2006; 张天宇等, 2007; 梁萍等, 2008), 但是, 对于全球变暖背景下中国近海及邻近海, 特别是东中国海及邻近海域的热力变异对东亚大气环流和中国降水异常影响的研究还不多。最近, 虽然祁莉等 (2007) 讨论了东亚纬向海陆热力差异及其与东亚副热带季风的关系, 但是, 有关东

中国海及邻近海域的热力变异在东亚季风气候系统的作用及其对中国夏季降水的可能影响尚未得到详细分析和研究。为此,本文利用观测资料和数值模拟着重分析中国东部夏季降水与东中国海及邻近海域热力变异的关系。

鉴于上述原因,本文首先应用了国家气象信息中心提供的 1979~2008 年中国 756 个台站降水资料与 Hadley 中心提供的分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 HadIS-ST 再分析海温资料 (Rayner et al., 2003), 利用相关和合成分析方法分析和讨论中国东部夏季降水与东中国海及邻近海域海温异常的关系, 并采用了 1979~2008 年 GPCP2.1 (Global Precipitation Climatology Project) 降水再分析资料 (Adler et al., 2003) 与海温的相关性分析结果作对比。其次, 鉴于意大利国际理论物理研究中心 (ICTP) 发展的区域气候模式 RegCM3 (Regional Climate Model 3) 有较高的分辨率和较强的物理过程等描述能力, 可较好地模拟中国东部降水的主要分布特征 (张冬峰等, 2007; 高学杰等, 2010), 因此, 本研究利用 RegCM3 模式来模拟和探讨中国东部夏季降水的年际变化与东中国海及邻近海域热力变异的关系, 并从大气环流的异常角度, 初步研究了东中国海及邻近海的热力变异对中国东部夏季降水变化的影响过程。

2 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的相关性

鉴于近 30 年来东中国海及邻近海域夏季海温 (以下均指海表温度, 简称 SST) 既有持续上升的趋势, 也有明显的年际变化特征 (蔡榕硕和谭红建, 2010; 蔡榕硕等, 2011), 为此, 本文首先选取了东中国海及邻近海域 (主要包括了我国的渤海、黄海、东海及邻近海域, 本文以下均简称东中国海, 简称 ECS) 夏季海温变化最显著的区域, 即 $22^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 135°E 以西海区 (蔡榕硕等, 2011), 并将该海域夏季 (6~8 月) 的 SST 平均, 形成了 1979~2008 年的 SST 变化指数 ECSI (East China Sea Index, 简称 ECSI) 序列 (见图 1a)。为了突出东中国海 SST 年际变异的因素, 本研究把图 1a 所示的海温序列先滤去该海域海温的长期变化趋势, 取得了去掉 30 年变化趋势后的 SST 指数 (见图 1b), 再对海温指数 (ECSI) 标准化后, 分别选取超

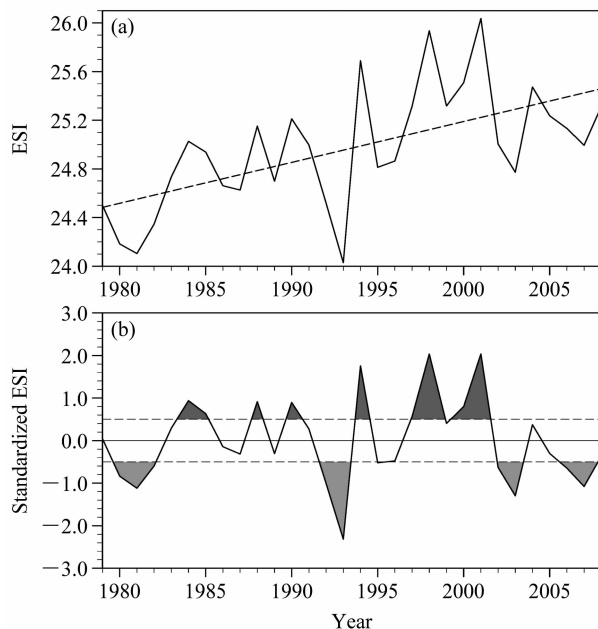


图 1 东中国海及邻近海域海温指数 ECSI (a) 和去掉线性趋势并进行标准化后的指数 (b, 深、浅阴影: 暖、冷年份)

Fig. 1 (a) The East China Sea SST index (ECSI) and (b) detrended and standardized ECSI. The warm (above) and cold (below) years are shaded in Fig. (b)

过正、负 0.5 个标准差为暖、冷年份。

本节首先利用上述去掉 30 年变化趋势的东中国海夏季 SST 指数与中国夏季降水进行相关分析 (见图 2), 从图 2 可以看到: 在长江中、下游和淮河流域出现负相关 (超过 90% 信度检验), 而在东北南部出现正相关 (超过 90% 信度检验), 这表明: 当东中国海为暖状态时, 长江中、下游地区及淮河流域夏季降水一般出现负异常, 而东北南部等地的夏季降水一般出现正异常; 相反, 当东中国海为冷状态时, 长江中、下游地区和淮河流域夏季降水一般出现正异常, 而东北南部夏季降水一般出现负异常。利用回归分析得到的结果也与图 2 基本相同 (图略)。

为了进一步分析中国东部夏季降水年际变化与东中国海海温的关系, 本研究还利用合成分析方法来分析当东中国海偏暖或偏冷时中国东部夏季降水的异常分布。图 3a 和图 3b (见文后彩图) 分别为根据图 1b 中所选取的东中国海处于暖、冷年份的中国东部夏季降水合成分析结果, 其分布形态呈现三极子分布特征, 从图 3a 可以看到: 当东中国海为暖状态时, 我国长江和淮河流域夏季降水一般出现

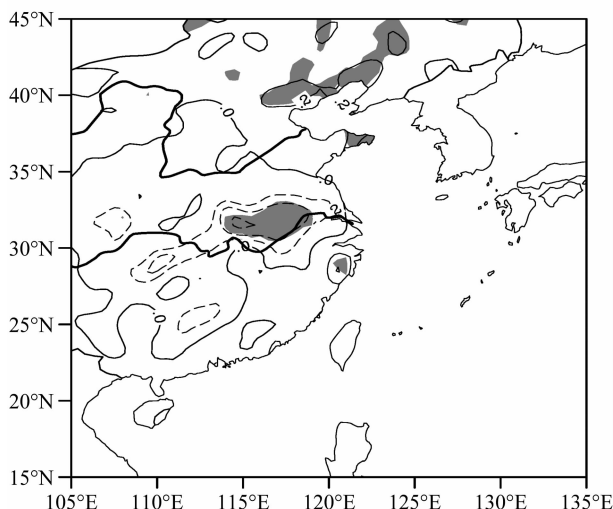


图2 中国东部夏季降水与 ECSI 的相关系数分布。实线为正, 虚线为负, 阴影表示通过 90% 信度检验的区域

Fig. 2 Distribution of correlation coefficients between the summer precipitation in eastern China and ECSI. The solid and dashed contours denote positive and negative values, respectively; the areas with the confidence level over 90% are shaded

负异常, 而我国南方的江西、福建和广东沿海等地区, 以及东北南部的夏季降水一般出现正异常; 反之, 如图 3b 所示, 当东中国海为冷状态时, 上述地区的夏季降水异常现象减轻, 或出现相反现象。例如, 淮河流域夏季降水为正异常, 东北南部的夏季降水为负异常。这种降水异常的三极子分布特征与许多研究结果相似 (Huang et al., 2007; 陈际龙和黄荣辉, 2008)。

图 4 为应用 1979~2008 年的 GPCP2.1 夏季降水资料与上述海温指数的相关分析结果。把图 4 所示的结果与图 2 所示的结果相比较可以发现两者基本相似, 这表明两者在一定程度上有相互印证的作用。因此, 图 2、4 的结果表明了东中国海的冷、暖状态与中国东部长江中下游、江淮流域和东北南部等地的夏季降水异常有较好的相关。

3 东中国海及邻近海域海温变化与东亚地区夏季上空纬向和经向环流的关系

为研究东中国海海温异常时我国东部上空夏季大气环流的异常情况, 本节利用 NCEP/NCAR 风场再分析资料, 对东亚地区夏季的纬向和经向环流状况进行合成分析。图 5a 和图 5b 分别为东中国海

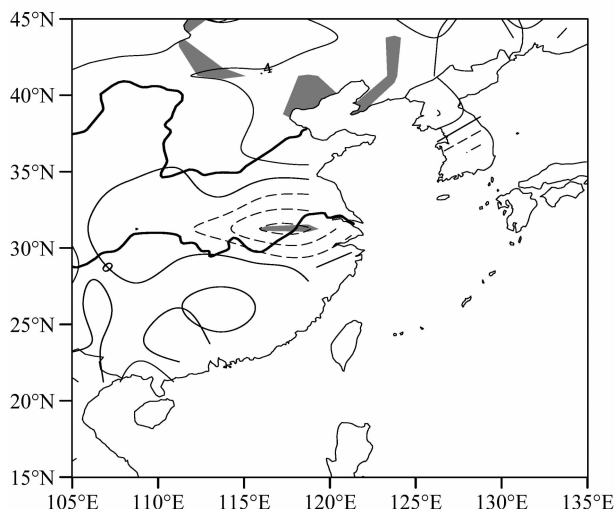


图4 同图2, 资料取自 GPCP2.1

Fig. 4 As in Fig. 2, except for the GPCP2.1 dataset

偏暖和偏冷状态时, 东亚地区夏季纬向环流异常的合成结果。由图 5a 可见, 当东中国海为暖状态时, 中国东部及中国近海上空盛行东风异常, 大约在 $120^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 地区有异常的上升运动, 而在 110°E 及其以西的区域则有下沉运动。这种纬向环流的异常与图 3a 所显示的上述区域降水异常相对应。由图 5b 可见, 当东中国海为冷状态时, 则基本上与图 5a 所示的纬向环流异常分布相反。

图 6a 和图 6b 分别为东中国海处于暖和冷状态时, 中国东部夏季经向环流的异常合成结果。由图 6a 可见, 当东中国海为暖状态时, 在我国东部 20°N 左右附近有很强的上升运动, 而在 30°N 附近有下沉运动。这种经向环流形势有利于我国华南地区降水的增多和长江中下游及江淮地区降水的减少; 相反, 当东中国海为冷状态时 (见图 6b), 情况与此相反。

以上分析表明, 东中国海的海温异常可以通过东亚地区上空的纬向环流和经向环流异常影响我国长江中、下游和华南地区等地的夏季降水。

4 中国东部夏季降水对东中国海及邻近海域海温的敏感性试验

为了验证上述观测事实, 本文进一步应用 RegCM3 数值模式对我国东部夏季降水与东中国海海温异常的相关性进行数值模拟。

相对于全球大气环流模式 (AGCM) 而言, 区域气候模式具有较高的分辨率, 它能更好地反映出

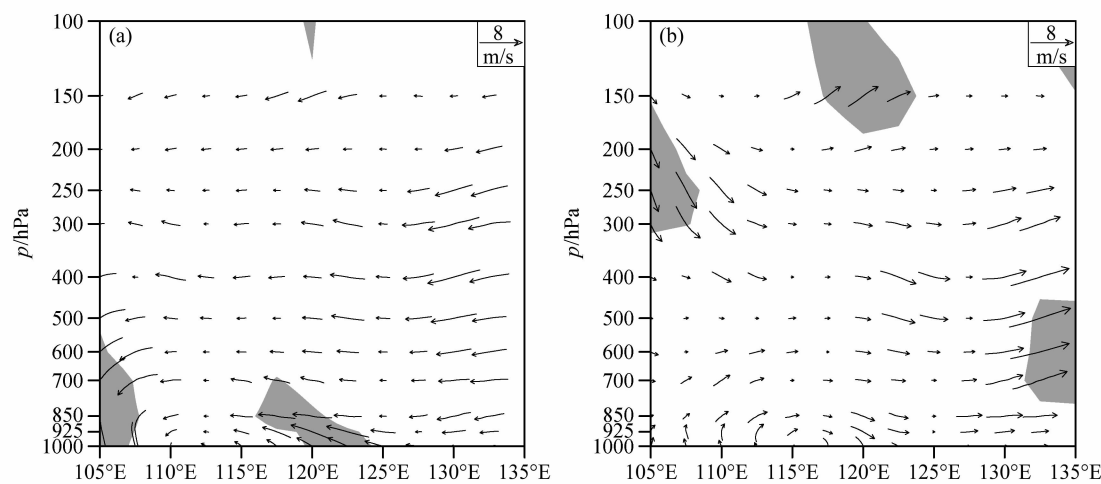


图 5 东中国海及邻近海域海温 (a) 偏暖和 (b) 偏冷状态时中国东部夏季沿 25°N~35°N 的平均纬向环流 (矢量) 异常的高度—经度剖面图。垂直速度：×1000；阴影：通过 90% 信度检验；资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996)

Fig. 5 Altitude – longitude cross sections of the zonal circulation (vector) anomalies averaged for 25°N – 35°N for the (a) warm and (b) cool cases of the East China Sea and its adjacent areas. The vertical velocity is multiplied by 1000, and shading indicates 90% confidence level; data is from the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay et al., 1996)

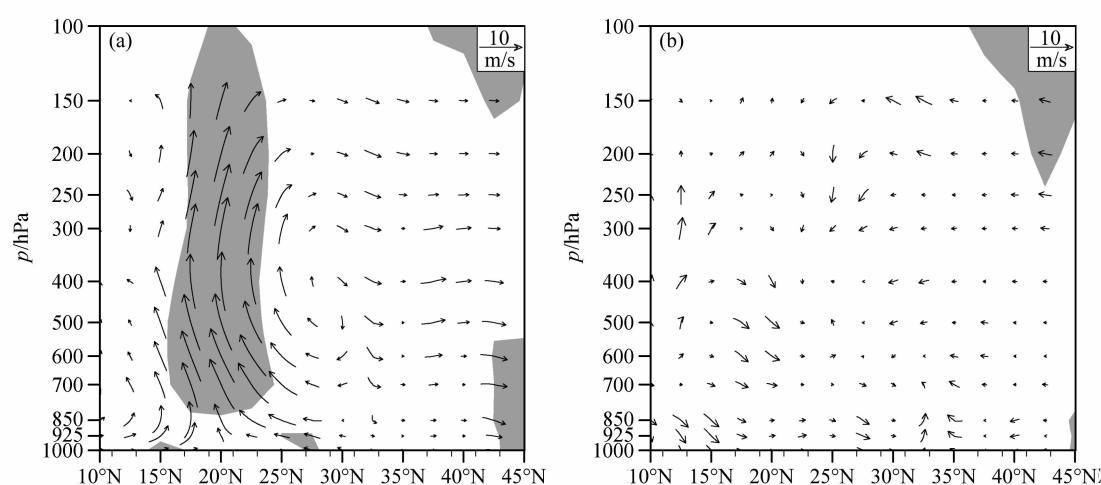


图 6 同图 5，为 105°E~120°E 平均经向环流

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for meridional circulation averaged for 105°E – 120°E

区域性海温对大气的强迫作用，并且，它对于物理过程的描述也更详细。由于区域气候模式 RegCM3 (Pal et al., 2007) 具备了上述区域气候数值模式的各种优点，因此，该模式在我国也得到了较为广泛的应用 (Ding et al., 2006; 张冬峰等, 2007)，特别是此模式可较好地模拟我国降水的年、季变化特征，并能反映出我国夏季雨带的主要位置及演变特征 (张冬峰等, 2007)，提供中国及东亚地区更详细的降水空间分布 (高学杰等, 2010)。因此，本文利用 RegCM3 模式来研究中国东部夏季降水年际变

化与东中国海海温异常的相关。

4.1 模式简介

本文采用 NCEP/NCAR 的 (Kalnay et al., 1996) 再分析资料作为模式的初始场和侧边界场，并使用全球海温资料 (OISST) (Reynolds and Smith, 1994) 作为模式海温强迫场，其水平分辨率为 1°×1°；并且，本文使用全球陆地覆盖特征 (GLCC) 数据库作为植被、陆地类型数据，利用全球 30 分高程数据 (GTOP30) 用来产生地形数据；模拟中心点位于 (29.5°N, 119°E)，水平分辨率为 20 km，

东西和南北方向分别有 104 和 112 个格点,垂直方向 18 层,模式顶气压为 5 hPa。模式中选用 Community Climate Model (CCM3) 大气辐射计算方案 (Kiehle et al., 1996)、次网格 SUBBATS 陆面生态模式 (Giorgi et al., 2003)、显式的高分辨边界层模式 Holtslag 方案 (Holtslag et al., 1990) 和松驰指数侧边界方案,海—气间感热、潜热、动量通量参数化采用 Zeng 方案 (Zeng et al., 1998),积云对流参数化方案采用 Fritsch-Chappell 方案 (Fritsch and Chappell, 1980)。积分时间从 1989 年 1 月 1 日 00 时到 2010 年 1 月 31 日 18 时,每 6 小时调用一次侧边界和海温强迫资料。

4.2 数值试验方案

为了考察中国东部夏季降水对东中国海夏季海温异常的敏感性,本研究设计了一组控制试验 (简称 CTL),和 3 组敏感性试验。它们分别为:

(1) 控制试验:积分时间从 1989 年 1 月到 2010 年 1 月,计算范围:13°N~45°N, 135°E 以西;采用 1982~2009 年的气候态海温 (OISST 的起始时间为 1981 年 12 月),并利用后 20 年积分的结果进行气候平均,其结果作为控制试验。

(2) 敏感性试验:针对东中国海 (22°N 以北, 135°E 以西) 增温的特点设计了 3 组敏感性试验 (见表 1)。每组试验的模拟时间均从 1989 年 1 月至 2010 年 1 月,并在气候态海温的基础上,分别增减海温进行数值试验,以考察该海域在偏冷和逐步升温的状态对中国东部夏季降水的影响,而南中国海及邻近海域 (22°N 以南) 的海温则取气候态,对东中国海与南中国海之间的边界海温采用线性增 (减) 方式以保持海温变化的连续性。敏感性试验的初始和侧边界条件的选择均与控制试验相同 (见表 1)。

4.3 中国东部夏季降水变化对东中国海及邻近海域海温异常的敏感性试验结果

考虑到模式积分达到稳定的时间,本文选取 1990 年 1 月至 2009 年 12 月的 20 年模式积分数据用于分析,并将每组敏感性试验的 20 年模式积分夏季 (6~8 月) 的平均值分别与控制试验的结果相减,得到了不同海域的海温变化对中国东部夏季降水的影响结果。

(1) 控制试验。图 7a (见文后彩图) 为中国近海及邻近海域取气候态海温条件下,由模式积分 20 年平均所得的中国东部夏季降水分布。从图 7a 可以看到,在东中国海的气候态海温状态下,中国东部夏季降水分布是由南向北逐渐减少,最大降水位于华南,最小降水位于内蒙地区,这与我国气候平均的夏季降水分布基本一致。

为了验证上述从观测资料所分析的东中国海海温状态与中国东部夏季降水的相关,本文进一步应用了 RegCM3 数值模式研究我国东部夏季降水与东中国海海温异常的相关。图 7b~d (见文后彩图) 分别为东中国海的海温相对气候态海温为 -1、+0.5、+1℃ 异常条件下,由模式所得的中国东部夏季降水与中国近海气候态海温强迫条件下中国东部夏季降水的平均差异 (异常),即敏感性试验结果。

(2) 中国东部夏季降水对东中国海海温降低的敏感性试验结果。图 7b 是由模式计算所得的当东中国海海温降低 1℃ 时的中国东部夏季降水的异常。如图 7b 所示,当东中国海的海温降低时,长江流域、江淮流域、华北东部的夏季降水增多,而华南、东北南部和朝鲜半岛等地的降水减少。这表明东中国海的海温降低将会使长江流域、江淮地区和华北地区夏季降水的增加,而引起华南、东北南部和朝鲜半岛夏季降水的减少。

表 1 中国东部夏季降水对东中国海及邻近海域海温的敏感性试验方案

Table 1 Experimental schemes of the sensitivity of summer precipitation in eastern China to the SST anomalies of the East China Sea and its adjacent seas

	控制性试验 CTL	敏感性试验		
		ECS-1	ECS+0.5	ECS+1
试验区域	中国近海及邻近海区 (13°N~45°N, 135°E 以西)	东中国海 (22°N~45°N, 135°E 以西)	同 ECS-1	同 ECS-1
海温设计	气候态海温	ECS 取气候态海温 -1℃, 其它为气候态海温	ECS 取气候态海温 +0.5℃, 其它为气候态海温	ECS 取气候态海温 +1℃, 其它为气候态海温
模拟时间	1989 年 1 月 1 日到 2010 年 1 月 31 日	同 CTL	同 CTL	同 CTL

(3) 中国东部夏季降水对东中国海海温升高的敏感性试验结果。图 7c 和图 7d 分别是当东中国海的海温升高 0.5°C 和 1.0°C 时中国东部夏季降水的异常。如图 7c 所示, 当东中国海的海温升高时, 长江中、下游地区、黄淮地区和华北大部份地区夏季降水减少, 而华南、东北南部和朝鲜半岛夏季降水增加。这表明了东中国海海温升高有利于华南、东北南部和朝鲜半岛夏季降水的增多, 而不利于长江中、下游地区、江淮流域和华北地区的夏季降水, 引起了这些地区夏季降水的减少。若把图 7d 与图 7c 相比较, 其结果表明东中国海愈暖, 则影响中国东部夏季降水变化愈明显。也就是说, 若东中国海的海温愈高, 则长江中、下游地区、黄淮地区和华北地区夏季降水减少愈多, 而华南、东北南部和朝鲜半岛夏季降水增加愈多。并且, 若把图 7c 和图 7d 与图 7b 相比较, 可以看到, 当东中国海变暖时中国东部夏季降水异常分布与东中国海变冷时中国东部夏季降水异常分布基本相反。这表明了东中国海海温的年际变化也是影响中国东部夏季降水年际变化的重要因子之一。

把在图 7b 和图 7d 所示的由区域模式计算所得的中国东部夏季降水异常对东中国海海温异常的响应分别与由观测资料分析的图 3a 和图 3b 相比较, 其结果可以表明, 利用 RegCM3 模式能够较好模拟出我国东部夏季降水异常与东中国海海温异常的关系。

5 东中国海及邻近海域热力异常对东亚上空纬向和经向环流影响的数值模拟

上述的统计分析和数值试验结果表明, 东中国海的海温异常与中国东部夏季降水有明显的相关。这可能是由于东中国海的热力异常改变了东亚地区上空大气环流的异常, 从而影响中国东部的夏季降水。为此, 本节利用数值模拟结果来分析东中国海热力异常影响中国东部夏季降水的可能途径。

5.1 对纬向环流的影响

鉴于季风是海陆热力差异所引起, 而东中国海的海温异常与中国大陆热力变化将会改变纬向海陆热力差异, 因此, 它将会有东亚季风的异常。由吴国雄等 (2008) 所提出的有关大气热力适应和上升运动的理论分析可知, 当大气被加热时, 加热区右侧会产生上升运动, 左侧则有下沉运动。就研究海

域而言, 当东中国海的海温升高时, 升温区东部低空辐合, 高空辐散, 产生上升运动, 而其西部低空辐散, 高空辐合, 从而产生下沉运动; 反之, 降温区东部上空大气低空辐散, 高空辐合, 产生下沉运动, 而其西部大气低空辐合, 而高空辐散, 则产生上升运动。由此推断, 当东中国海升温后, 其东侧海面上空将产生上升运动, 而在其西侧的长江中下游地区上空将产生下沉运动, 这将使得长江中、下游地区降水减少。

(1) 东中国海处于暖状态。为了验证上述理论, 利用 RegCM3 数值模式的 20 年积分结果来分析东中国海的海温变化对东亚地区纬向环流的影响情况。图 8a 为东中国海 ($120^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 的海温相对于气候态增加 1°C 后, 由数值模式所得的东亚地区夏季上空纬向 $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 区域平均的纬向环流与气候态海温条件下模拟的纬向环流的异常分布。由图 8a 可见, 当东中国海变暖时, 夏季东中国海的东部大约 131°E 处出现低层大气辐合中心, 形成上升气流, 并在约 300 hPa 以上高度转变为大气辐散, 向西辐散的水平气流与中纬度的高层西风气流相遇辐合, 从而在约 $105^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 形成下沉气流, 这可能是图 3a 所示的长江中下游地区及江淮流域附近在东中国海偏暖时降水减少的原因之一, 这个结果也与图 7c、d 的结果基本相符。这表明东中国海海温的升高将使得我国长江中下游地区和江淮地区的夏季降水减少。

(2) 东中国海处于冷状态。图 8b 为东中国海的海温相对于气候态减少 1°C 后, 由数值模式所得的东亚地区夏季上空纬向 $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 区域平均的纬向环流与气候态海温条件下模拟的纬向环流的异常分布。由图 8b 可见, 当东中国海变冷时, 与图 8a 所示的海温增加时的现象基本相反。并且, 这种异常的纬向环流情况与图 3b 和图 7b 中的降水特征相对应。

5.2 对经向环流的影响

由于中国东部地区属于东亚季风区, 其经向的水汽输送要大于纬向输送, 降水主要受夏季水汽经向输送的影响 (黄荣辉等, 1998; 马京津等, 2008; 黄荣辉和陈际龙, 2010)。因此, 有必要探讨东中国海的热力异常对东亚地区上空经向环流的影响。

(1) 东中国海处于暖状态。图 9a 为东中国海 ($120^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$) 的海温相对于气候态增加 1°C 后,

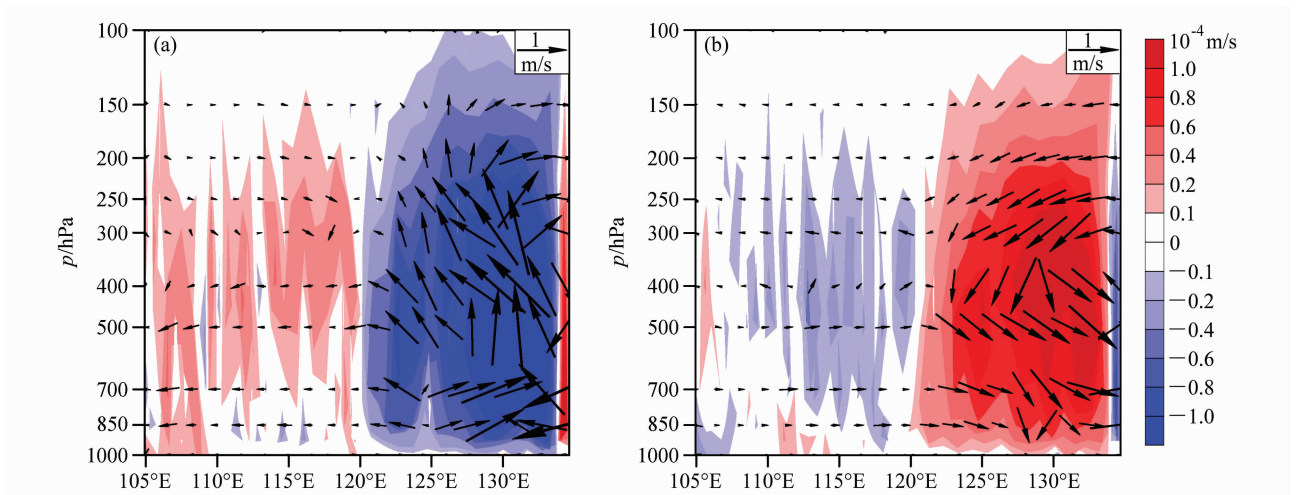


图 8 RegCM3 模拟东中国海及邻近海域海温升高 1℃ (a) 和海温降低 1℃ (b) 后沿 25°N~35°N 的平均纬向环流 (矢量, 垂直速度扩大了 10000 倍) 异常的高度—经度剖面图。彩色阴影: 垂直速度异常

Fig. 8 Altitude – longitude cross sections of the simulated zonal circulation (vector, vertical velocity is multiplied by 10000) anomalies averaged for 25°N~35°N corresponding to (a) +1℃ and (b) -1℃ SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas. The colors denote vertical velocity anomalies

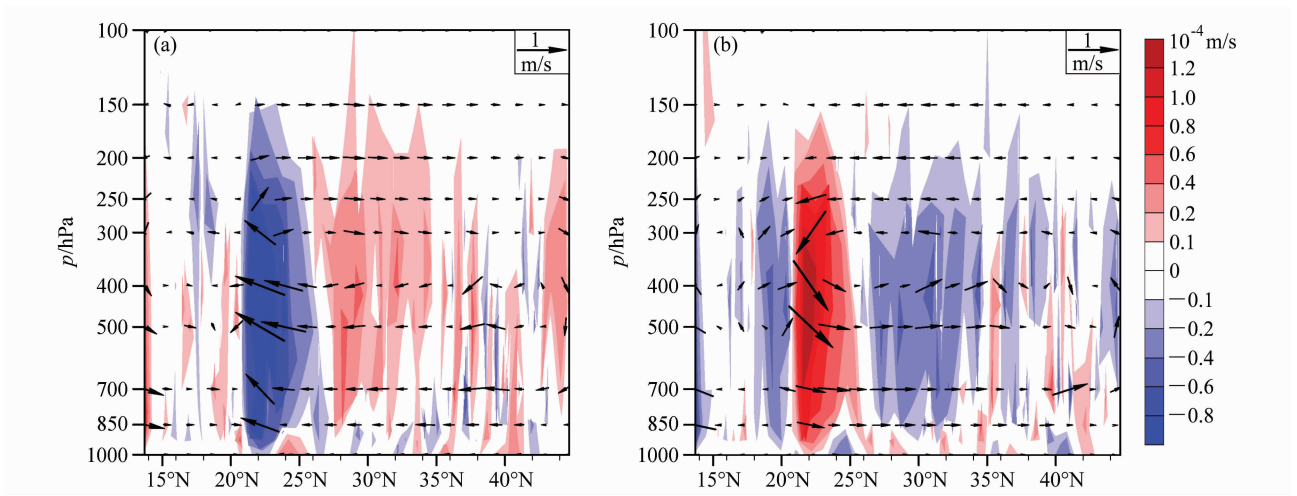


图 9 同图 8, 但为 105°E~120°E 平均的经向环流异常的分布

Fig. 9 As in Fig. 8, except for the simulated meridional circulation anomalies averaged for 105°E~120°E

东亚地区上空地区垂直经向 105°E~120°E 平均环流的模拟结果。由图 9a 可见, 在纬度约 22°N~25°N 的华南地区出现大气低空辐合, 高空辐散, 产生上升运动, 这有利于该地区夏季降水的增多, 而在纬度约 28°N~38°N 的长江流域和江淮流域等地产生下沉气流, 这将引起这些区域夏季降水的偏少; 并且, 在纬度约 40°N 以北的黄河流域和华北地区等地也出现高空 200~300 hPa 辐合, 并产生下沉气流, 这种经向环流不利于长江流域、黄淮地区和华北地区降水, 将会引起这些区域夏季降水的减少。

(2) 东中国海处于冷状态。图 9b 为东中国海的海温相对于气候态减少 1℃ 后, 由数值模式所得的东亚地区夏季上空经向 105°E~120°E 区域平均的经向环流与气候态海温条件下模拟的经向环流的异常分布。同样, 可以看到东中国海的海温减少时, 由 RegCM3 模拟的中国东部的经向环流情况与图 9a 所示的海温增加时基本相反。

本节应用的是一个区域气候模式, 模拟条件除了下垫面的海温情况不同外, 其他条件如侧边界、模拟时间等则完全相同, 在海温增加和减少情况下模拟得到了两种相反的纬向环流和经向环流异常分

布特征, 这说明了我国东部上空的大气环流情况对东中国海的海温异常具有一定的敏感性。即东中国海的海温异常会引起东亚地区大气环流的异常, 进而影响我国东部夏季的降水。

6 结论与讨论

本文利用中国 756 个站点的降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了中国东部夏季降水和东亚夏季环流异常与东中国海及邻近海域(简称东中国海)海温异常的关系, 并利用区域气候模式(RegCM3)模拟了中国东部夏季降水和东亚夏季环流异常对东中国海海温变化的敏感性, 得到以下几点结论:

(1) 由观测分析结果表明, 我国东部长江中、下游地区及江淮流域、东北南部的降水与东中国海的海温异常有明显相关。当东中国海为暖(冷)异常时, 长江中、下游地区、江淮流域的降水偏少(偏多), 而东北南部降水偏多(偏少)。并且, 数值试验结果也表明, 东中国海海温的异常对中国东部夏季降水有较明显的影响, 当东中国海偏暖时, 将引起我国长江中、下游地区、江淮流域、华北地区夏季降水的减少, 而使得华南地区、东北南部和朝鲜等半岛地区夏季降水的增加; 相反, 当东中国海偏冷时, 将引起我国长江中、下游地区、江淮流域和华北地区夏季降水的增加, 而使得华南地区、东北南部和朝鲜半岛等地区夏季降水的减少。

(2) 由再分析资料和大气热力适应理论的分析结果以及区域气候数值模式的数值试验结果表明, 东中国海升温后, 其东侧大气低空辐合, 高空辐散, 产生上升运动, 而在其西侧的长江中、下游、江淮流域和华北地区引起低空辐散, 高空辐合, 产生下沉运动, 这不利于这些地区夏季降水, 从而使这些地区夏季降水减少; 并在华南地区引起低空辐合, 高空辐散, 产生上升气流, 这有利于该地区夏季降水, 从而使这些地区夏季降水增加。并且, 数值试验还表明, 东中国海的海温异常还影响东亚地区夏季的经向环流, 当东中国海偏暖时, 华南地区有强的上升运动, 而在长江中、下游地区和江淮流域有下沉运动, 这将有利于华南地区夏季降水, 而不利长江中、下游地区和江淮地区的夏季降水。反之, 当东中国海降温后, 上述区域出现相反的现象。因此, 东中国海的热力异常通过影响东亚地区

上空纬向和经向环流来影响中国东部夏季降水。

然而, 应该看到, 中国东部处于东亚季风区, 其夏季降水是多种影响因子共同作用的结果, 尤其是热带地区海—气相互作用是影响东亚季风乃至全球大气环流的重要因子。本文的观测事实分析和数值试验初步表明了东中国海的热力变异也是影响我国东部夏季降水不可忽视的一个重要因子, 特别是对于长江流域、黄淮流域和华北地区等地区夏季降水的影响, 因此, 东中国海的热力异常对中国东部夏季降水的影响过程及其机理还应进一步深入研究。

致谢 感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见以及编辑认真细致的工作!

参考文献 (References)

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. *J. Hydrometeor.*, 4: 1147–1167.
- 蔡榕硕, 陈际龙, 黄荣辉. 2006. 我国近海和邻近海的海洋环境对最近全球气候变化的响应 [J]. *大气科学*, 30 (5): 1019–1033.
- Cai Rongshuo, Chen Jilong, Huang Ronghui. 2006. The response of marine environment in the offshore area of China and its adjacent ocean to recent global climate change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 1019–1033.
- 蔡榕硕, 谭红建. 2010. 东亚气候的年代际变化对中国近海生态的影响 [J]. *台湾海峡*, 29 (2): 173–183.
- Cai Rongshuo, Tan Hongjian. 2010. Influence of interdecadal climate variation over East Asia on offshore ecological system of China [J]. *Journal of Oceanography In Taiwan Strait (in Chinese)*, 29 (2): 173–183.
- 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 2011. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (1): 94–104.
- Cai Rongshuo, Chen Jilong, Tan Hongjian. 2011. Variations of the sea surface temperature in the offshore area of China and its relationship with the East Asian monsoon under the global warming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (1): 94–104.
- 陈际龙, 黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系 [J]. *地球物理学报*, 51: 352–359.
- Chen Jilong, Huang Ronghui. 2008. Interannual and inderdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 51: 352–359.
- 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 835–846.
- Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Inter-

- decadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835 – 846.
- Ding Y H, Shi X L, Liu Y M, et al. 2006. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC). Part I: Sensitivity study [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 23: 323 – 341.
- Fritsch J M, Chappell C F. 1980. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 37: 1722 – 1733.
- 高学杰, 石英, Giorgi F. 2010. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 40 (7): 911 – 922.
- Gao Xuejie, Shi Ying, Giorgi F. 2010. A high resolution simulation on Chinese climate changing [J]. Scientia Sinica (Terrae) (in Chinese), 40 (7): 911 – 922.
- Giorgi F, Bi X Q, Qian Y. 2003. Indirect vs. direct effects of anthropogenic sulfate on the climate of East Asia as simulated with a regional coupled climate – chemistry/aerosol model [J]. Climatic Change, 58: 345 – 376.
- Holtzlag A A M, De Bruijn E I F, Pan H L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting [J]. Mon. Wea. Rev., 18: 1561 – 1575.
- 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 460 – 469.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465 – 476.
- Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The Interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465 – 476.
- 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 2003. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究 [J]. 大气科学, 27 (4): 770 – 787.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. 2003. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 770 – 787.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 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: 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: 730 – 743.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24: 993 – 1023.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34 (6): 1035 – 1045.
- Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of summertime water vapor transports over eastern part of China and those over western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1035 – 1045.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437 – 471.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR community climate model (CCM3) [R]. NCAR Technical Report NCAR/TN-420+STR, 152pp.
- 李翠华, 蔡榕硕, 陈际龙. 2010. 东中国海夏季潜热通量的时空特征及其与中国东部降水的联系 [J]. 高原气象, 29 (6): 1485 – 1492.
- Li Cuihua, Cai Rongshuo, Chen Jilong. 2010. The temporal and spatial characteristics of latent heat fluxes in the East China Sea and its association with summer rainfall in East China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (6): 1485 – 1492.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海. 2008. 长江下游夏季降水与东亚夏季风及春季太平洋海温的关系 [J]. 高原气象, 27 (4): 772 – 777.
- Liang Ping, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Relations between summer rainfall over the lower reach of Yangtze River and East Asian summer monsoon as well as sea surface temperature over the Pacific in spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 772 – 777.
- 陆日宇. 2005. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温 [J]. 科学通报, 50: 1131 – 1135.
- Lu Riyu. 2005. Interannual variation of North China rainfall in rainy season and SSTs in the equatorial eastern Pacific [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50: 1131 – 1135.
- 马京津, 于波, 高晓清, 等. 2008. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响 [J]. 高原气象, 27 (3): 517 – 523.
- Ma Jingjin, Yu Bo, Gao Xiaoping, et al. 2008. Change of large scale circulation and its impact on the water vapor over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (3): 517 – 523.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCM3 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88: 1395 – 1409.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2005. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系 [J]. 高原气象, 24 (4): 366 – 377.
- Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2005. Multi-scale variations of snow cover over QXP and tropical Pacific SST and their influences on summer rainfall in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 366 – 377.
- 祁莉, 何金海, 张祖强, 等. 2007. 纬向海陆热力差异的季节转换与东亚副热带季风环流 [J]. 科学通报, 52: 2895 – 2899.
- Qi Li,

- He Jinhai, Zhang Zhuqiang, et al. 2007. Seasonal cycle of the zonal land-sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52: 2895-2899.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14), 4407, doi: 10.1029/2002JD002670.
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved global sea-surface temperature analyses using optimum interpolation [J]. J. Climate, 7: 929-948.
- 孙燕, 王谦谦, 钱永甫, 等. 2006. 华北地区夏季降水与全球海温异常的关系 [J]. 高原气象, 25 (6): 1127-1138. Sun Yan, Wang Qianqian, Qian Yongfu, et al. 2006. Relation between the summer rainfall anomalies in North China and the global SSTA [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (6): 1127-1138.
- 翁学传, 张启龙, 杨玉玲, 等. 1996. 东海黑潮热输送及其与黄淮平原区汛期降水的关系 [J]. 海洋与湖沼, 27 (3): 237-245. Weng Xuechuan, Zhang Qilong, Yang Yuling, et al. 1996. The Kuroshio heat transport in the East China Sea and its relation to the precipitation in the rainy season in the Huanghuai Plain area [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 27 (3): 237-245.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. J. Climate, 22: 2992-3005.
- 武炳义, 张人禾. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. 科学通报, 53 (12): 1422-1428. Wu Bingyi, Zhang Renhe. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (12): 1422-1428.
- 吴国雄, 刘屹岷, 字婧婧, 等. 2008. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. 大气科学, 32: 720-740. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Yu Jingjing, et al. 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 720-740.
- Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. J. Climate, 11: 2628-2644.
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 31: 327-332. Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 31: 327-332.
- 张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 等. 2007. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验 [J]. 热带气象学报, 23: 444-452. Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. 2007. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23: 444-452.
- 张天宇, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2007. 春季黑潮区海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. 热带气象报, 23: 189-195. Zhang Tianyu, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2007. Relation between spring Kuroshio SSTA and summer rainfall in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23: 189-195.

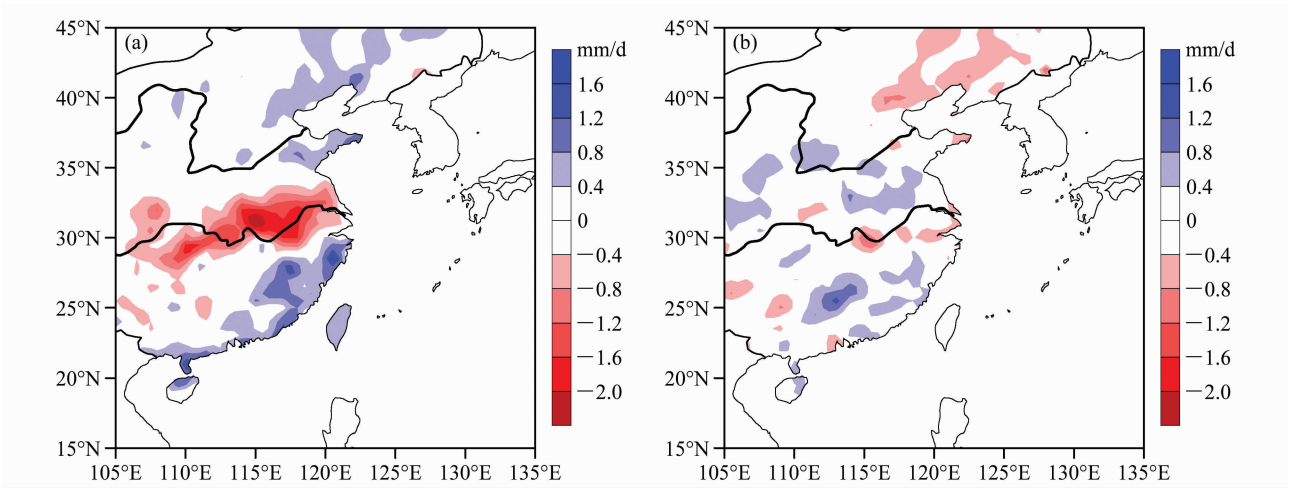


图 3 当东中国海及邻近海域 (a) 偏暖和 (b) 偏冷状态时中国东部夏季降水的异常合成分布 (单位: mm/d)

Fig. 3 Composite distributions of summer rainfall anomalies for the (a) warm and (b) cool cases of the East China Sea and its adjacent areas

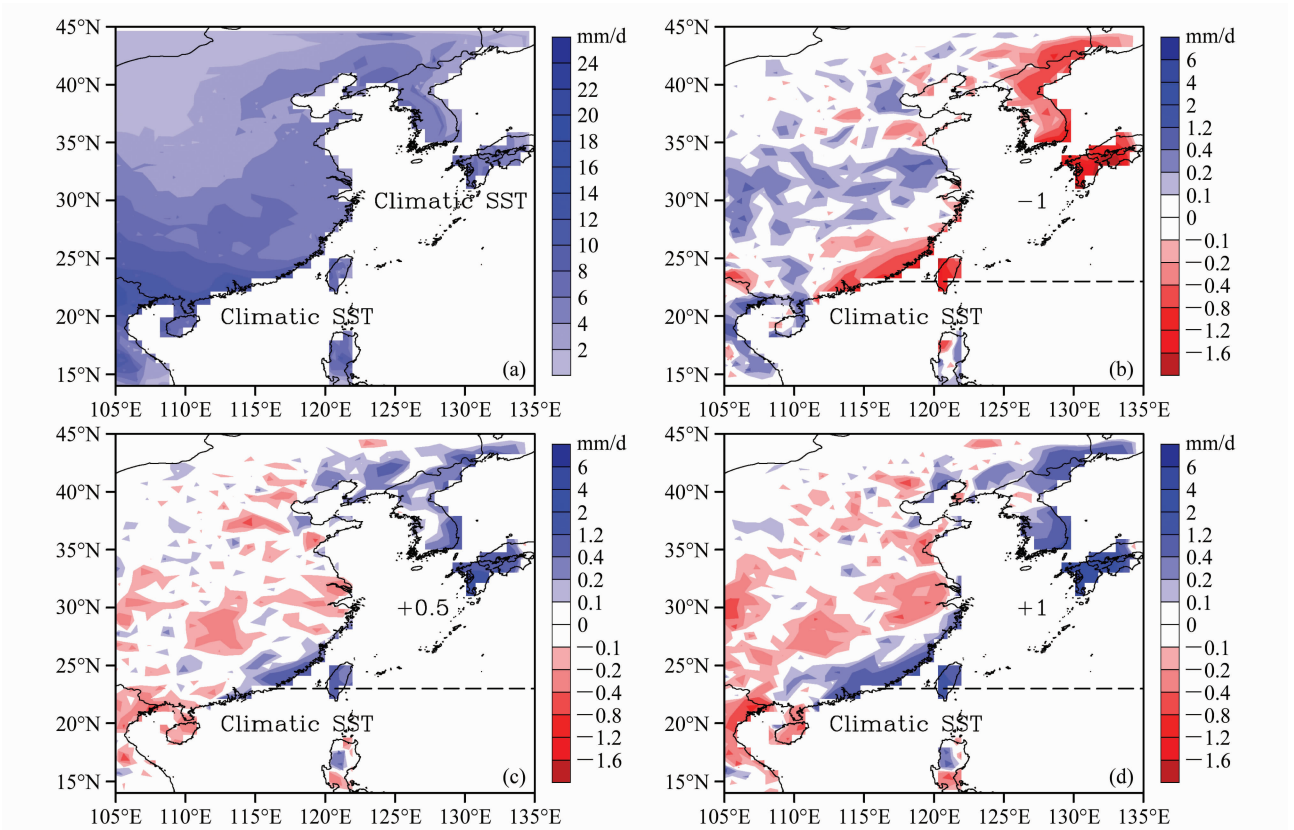


图 7 RegCM3 模拟东中国海及邻近海域不同海温条件下的中国东部夏季降水异常 (单位: mm/d): (a) 气候态海温; (b、c、d) 相对于气候态的海温异常为 -1 、 $+0.5$ 、 $+1^{\circ}\text{C}$

Fig. 7 Summer rainfall anomalies in eastern China responding to different SST conditions in the East China Sea and its adjacent seas simulated by RegCM3 model (units: mm/d): (a) Climatological mean SST; (b–d) -1 , $+0.5$ and $+1^{\circ}\text{C}$ SST anomalies to climatological mean SST, respectively