

余广昌, 陈文, 徐霏强, 等. 2015. 东海黑潮区潜热变化对中国春季降水的影响及其影响过程 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 600–610. Yu Guangchang, Chen Wen, Xu Peiqiang, et al. 2015. Mechanistic analysis of the influence of the latent heat associated with the Kuroshio Current on Chinese rainfall anomalies in spring [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 600–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15050.

东海黑潮区潜热变化对中国春季降水的影响及其影响过程

余广昌^{1,2} 陈文¹ 徐霏强^{1,2} 马音¹

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 本文利用美国 NCEP/NCAR 再分析资料、哈德来 (Hadley) 中心海温数据、国家气候中心的观测站降水和客观分析海气通量 (OAFlux) 潜热感热通量资料, 研究了 1960~2010 年春季黑潮区潜热输送对中国春季降水的影响及其影响过程。本文以黑潮流经的中国东部海域及邻近海域为研究对象, 该区域是黑潮的主体区域, 在文中简称为东海黑潮区。对中国东海以及邻近海域海温与降水的分析表明, 在夏季该区域可能以大气强迫海洋为主, 而在春冬两季可能主要为海洋强迫大气为主, 秋季则可能为不明显的海气相互作用。在春季西北太平洋区域中感热和潜热都对黑潮流经的区域有比较好的敏感性, 黑潮流经区域感热和潜热的气候平均值分别约为 30 W m^{-2} 与 120 W m^{-2} ; 春季的感热通量标准差大值区主要集中在日本以西区域, 潜热通量标准差主要集中在东海区域与日本东南区域 (即东海黑潮区域)。春季潜热 EOF 第一模态的主要变化就集中在东海黑潮流域。相关分析与合成分析的结果表明, 当黑潮潜热指数为正时, 华南地区春季降水偏多, 长江以北地区偏少, 反之亦然。在物理过程分析中, 黑潮潜热指数大于 0.8 时, 长江以南的中国大陆有比较强盛的异常北风, 使得水汽无法输送到更北的地区, 导致在华南地区水汽的积累, 并且在海面出现有利于降水的垂直运动异常延伸到大陆上, 使华南地区降水增多, 而长江以北的东部地区由于水汽输送偏弱, 导致水汽积累偏少, 从而降水减少。当黑潮指数小于 -0.8 时, 有较强盛的异常南风, 有利于水汽输送到北方地区, 水汽在华北地区积累, 导致长江以北出现降水正异常, 而华南地区由于南风偏强, 水汽输送加强, 导致水汽无法在此区域积累, 并且出现不利于降水的垂直运动异常, 从而导致降水偏少。

关键词 黑潮 潜热输送 中国春季降水 大气环流异常 水汽输送

文章编号 1006-9585(2015)05-0600-11

中图分类号 P47

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15050

Mechanistic Analysis of the Influence of the Latent Heat Associated with the Kuroshio Current on Chinese Rainfall Anomalies in Spring

YU Guangchang^{1,2}, CHEN Wen¹, XU Peiqiang^{1,2}, and MA Yin¹

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Using NCEP/NCAR reanalysis data, Hadley Centre SST data, station precipitation data, and Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) latent and sensible heat flux data, the impacts of Kuroshio Current latent heat flux on Chinese precipitation anomalies in spring during 1960–2010 are investigated. Firstly, the results of air–sea interaction in

收稿日期 2015-03-11; 网络预出版日期 2015-04-08

资助项目 国家自然科学基金项目 41230527、41461144001

作者简介 余广昌, 男, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事亚洲季风和海—气相互作用方面的研究。E-mail: yuguangchang12@mails.gucas.ac.cn

the Kuroshio region indicate a forcing of the atmosphere to the ocean in the summer, and a forcing of the ocean to the atmosphere in the winter and spring. There is no clear signal for the air-sea interaction in the autumn. In spring, the sensible heat and latent heat fluxes in the Northwest Pacific are sensitive to the Kuroshio Current, and the maximum of both the sensible and latent heat appears in the region of the Kuroshio Current. The climate mean sensible and latent heat fluxes in the Kuroshio Current area are 30 and 120 W m⁻², respectively. Large standard deviation values of latent heat flux in spring are mainly distributed in the East China Sea and to the southeast of Japan, which is the Kuroshio Current region. However, large standard deviation values of sensible heat flux are mainly distributed to the west of Japan. The spatial pattern of the first EOF mode for the latent heat flux in the East China Sea and surrounding areas shows a large-value area located just inside the Kuroshio Current region. Further linear correlation analysis and composite studies confirm that the spring rainfall is above normal in South China and below normal in central China when the Kuroshio Current Latent Index (KLI) is larger than 0.8. The atmospheric circulation associated with the KLI indicates a significant change in the wind anomaly over China. When the KLI is larger than 0.8, northerly wind anomalies occur over China. The southwesterly wind in the northwest of the subtropical high is mainly distributed in southern China. Hence, water vapor cannot be transported northward, resulting in accumulation of water vapor in southern China. In this case, more rainfall is observed in southern China and less rainfall in central China. The situation is roughly the opposite when the KLI is smaller than -0.8.

Keywords Kuroshio Current, Latent heat flux, Spring precipitation in China, Atmospheric circulation anomalies, Water vapor transport

1 引言

在全球气候的热量平衡中,大气热量输送主要是通过海洋与大气的共同作用。研究表明,如果没有海洋的水汽供给大气,中纬度地区的大气对于热量的输送将会比同条件下的湿空气大大降低 (Trenberth and Solomon, 1994; 杨海军, 2013)。黑潮流经的区域为亚洲东部的大部分沿海区域,承担着海洋经向热力输送的主要部分,对东亚的气候以及中国的气候起着重要作用。黑潮发源自赤道北侧,紧贴着台湾东侧流入东海,在日本南侧分两支并继续北行,一支沿日本向东北流动,另一支海流进入黄海区域 (Mizuno and White, 1983)。由于本文着重考虑黑潮在中纬度的热力输送作用,所以本文关注的区域为中国东部海域及其邻近海域的黑潮流经区域,该区域为黑潮在中纬度的主体区域,在下文中简称为东海黑潮区域。黑潮是一支连接着赤道与中纬度的重要的经向输送海洋环流 (Seager et al., 2001),能把赤道的海洋信号带到中纬度的海洋中。黑潮对赤道的 ENSO 效应有很强的响应,并在不同季节有不同的影响 (梅士龙等, 2006)。黑潮对气候的影响作用主要体现在中纬度海洋影响中纬度大气的变化 (穆松宁等, 2004)。

黑潮东海区域海温与中国沿海地区、长江中下游、华北区域等的降水有很好的相关关系,尤其

是夏季黑潮东海区域海温与长江流域降水有所对应,主要表现为夏季黑潮海温正异常对应着长江中下游的降水偏少 (陈文等, 2006; 倪东鸿等, 2004),在气候与黑潮的延迟响应表现上,冬季黑潮对后续环流以及降水情况有明显的影 响,其中冬季黑潮海温与我国东部地区汛期降水的关系密切,主要表现在前冬季黑潮区域海温正异常会导致后期夏季副高的位置偏北,从而导致长江流域多洪涝 (殷永红等, 2001)。黑潮区海温异常分布与夏季 7 月黄河中下游地区洪涝的相关分析表明,冬季黑潮区域异常增暖对应华南的夏季干旱 (徐海明, 1997)。此外,1 月份黑潮异常信号通过影响阻塞高压进而影响到副热带高压和东亚夏季风,从而影响到长江中下游地区夏季降水 (李忠贤和孙照渤, 2004)。

虽然中国降水对中国东海的海温有比较好的响应关系,但是黑潮海温与中国气候之间是一个间接的对应关系。本文使用热通量进行分析的原因是:热通量的计算利用了海面温度和海表温度、海面比湿和海表空气的饱和比湿 (Da Silva et al., 1994),所以热通量作为连接大气和海洋的桥梁作用,更直接地反映出黑潮流域对于中国气候的影响作用。在中纬度的海洋影响大气的过程中,直接影响气候的因素主要是海洋热通量潜热释放、感热释放和长波辐射,通过这三者的作用共同影响着中纬度气候状况的变化 (Cayan, 1992)。黑潮热量和其表面对应物理量场有较好的相关关系,主要表现为

黑潮表面热量偏高时对应的海洋表面风速会上升,反之亦然;并且黑潮表面热量的增加降低了近海面大气中的静态稳定度、加强垂直混合效应(Qiu and Kelly, 1993; Qiu, 1995; Nonaka and Xie, 2003),黑潮海区除了会影响到其表面物理量的变化外,也会对中国地区气候状态造成一定的影响。黑潮东海海区的海洋热通量对长江中下游地区梅雨有着重要影响,其表现为黑潮东海海区海面热通量对于长江中下游 6、7 月间的梅雨降水有一定影响,海面热通量对均匀型的梅雨降水影响较大(丁良模, 1992)。李翠华等(2010, 2013)的研究也表明,黑潮东海区域的潜热通量和感热通量对中国东部夏季降水年际变化有着重要影响,黑潮东海区域夏季潜热通量的正异常,中国东部长江以南地区上空盛行偏东北,这将不利于水汽由南向北的输送,从而可能使到达长江中下游流域及以北地区的水汽偏少,对应降水偏少;华南地区为上升气流和低层水汽辐合正异常,降水偏多;东北地区和华北地区为下沉气流正异常,降水偏少。前人的研究中主要集中考虑了夏季或冬季的黑潮海温对于夏季降水或者是冬季气温的影响,而对转换季节的关注极少。中国春季降水在不少地区是年降水中重要的一部分,特别在华南地区,春季降水量与夏季几乎一样(Chen et al., 2009)。并且由于东海黑潮区域位于中国东部沿岸,对中国沿海区域带来大量的水汽和热量,对沿海的降水影响极大。事实上,春季降水的异常对于中国经济特别是农业的影响十分严重(黄荣辉等, 2006)。在全球变暖的大背景下,灾害天气和气候事件频繁发生,而且随着人们的生活水平的上升,灾害性天气和气候造成的经济损失也越来越大(张庆云等, 2008)。因此研究黑潮区域的热通量变化对于春季中国降水的影响甚为重要。

2 数据与方法

本文使用的资料为:(1)国家气候中心全国 549 站观测资料中的 1960~2010 年降水资料;(2)英国气象局哈德莱中心(Met Office Hadley Center)的海温数据集 HadISST 资料,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;(3)全球降水气候计划(The Global Precipitation Climatology Project, GPCP)综合性降水资料(Rudolf et al., 1994);(4)OAFlux (Objectively Analyzed Air-sea Fluxes) 海气通量再分析资料,资料中的潜

热与感热向上输送为正,向下输送为负(Jin et al., 2008);(5)SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 海洋要素再分析资料(Carton and Giese, 2008);(6)1960~2010 年 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/The National Center for Atmospheric Research)再分析资料中的风场、比湿、位势高度场资料和降水百分比资料(Kalnay et al., 1996)。

本文选用 1960~2010 年共计 51 年的资料进行统计分析,采用春季的定义为 3、4、5 月。采用的方法主要有经验正交分解(EOF)以及合成和回归等统计方法,并利用 t 检验验证其显著性。对于格点不一致的数据资料均采用双线性插值方法插入到统一格点中进行计算。由于近几十年内各种资料往往出现与全球气候变暖相关的线性趋势,本文对所有数据均使用 9 年以下的高通滤波滤去了长期趋势与长周期的变化,只考虑其年际变化,来研究黑潮潜热通量的年际变异对于中国春季降水的年际变化的可能作用。

3 中国东海黑潮区域春季热通量时空分布特征

3.1 黑潮区域海气相互作用初步分析

Cayan (1992) 提出了一种判断局地海气相互作用的基本方法,论证了在两大洋 $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间的副热带区域在冬季是海洋强迫大气为主。由于 Cayan (1992) 方法在数据的应用上达不到本文需要的时间长度,在此基础上,本文根据 Wang et al. (2005) 的海气相互作用的判断依据,使用降水超前海温一个月的相关值作为判据,其正相关的意义是:当海温为正值时,海面因为热量积累导致辐合产生,在海面携带大量水汽至高空,使得在同一个区域中的降水与之对应为正值,所以正相关表征海洋强迫大气为主;负相关的意义是:当降水偏多时,这个区域的云量相对较多,而海表受到的太阳辐射减少,导致海温的下降,所以负相关表征大气强迫海洋为主。据此,使用 GPCP 降水资料与 HadISST 海温资料对西北太平洋区域各个季节进行分析,采用 2 月 SST 与 3 月降水、3 月 SST 与 4 月降水、4 月 SST 与 5 月降水相关,然后进行加权平均的计算方法。图 1 的结果表明,春季与冬季在中国东海及邻近海域为正相关,主要集中在东海及邻近海

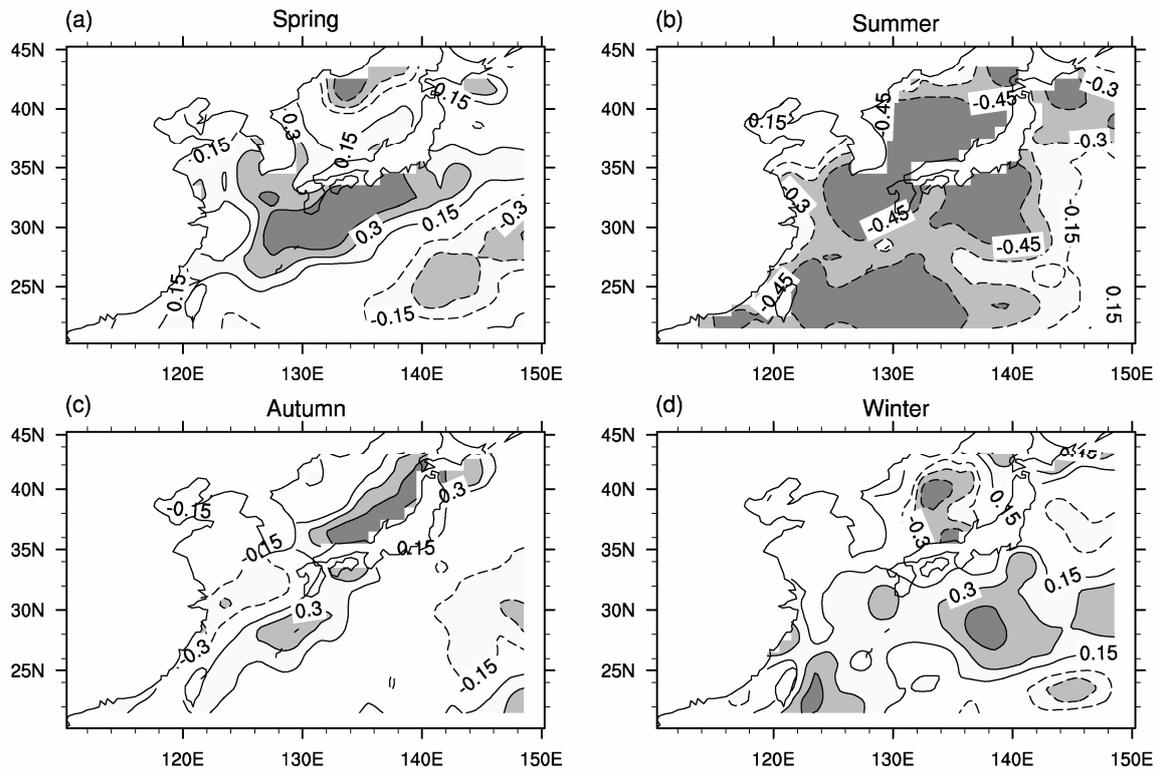


图1 中国东海 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季和 (d) 冬季降水落后海温一个月的降水量和海温的相关系数分布
Fig. 1 Distribution of correlation coefficients between the SST and precipitation in the East China Sea in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter when SST leads the precipitation by one month

域；秋季中国东海及邻近海域以南为负相关，而在日本以北区域以及日本以南区域部分的条带状为正相关，总体相关性并不明显；夏季在中国东海及邻近海域主要为较强的负相关。这说明中国东海以及邻近海域在夏季可能以大气强迫海洋为主，而在春冬两季可能主要为海洋强迫大气为主，秋季则可能为不明显的海气相互作用。同时由于在春季正好是华南前汛期发生的时间，因此，本文着重分析中国东海及邻近海域中的黑潮区域春季的热通量变化对于中国春季降水的影响。

3.2 黑潮区域热通量变化空间分布

黑潮发源自赤道北侧，紧贴着台湾东侧流入东海，在日本南侧分两支并继续北行，一支沿日本向东北流动，另一支海流进入黄海区域 (Mizuno and White, 1983)。本文关注的区域为黑潮流经的中国东部海域及邻近海域，该区域也是黑潮的主体区域，在下文中简称为东海黑潮区域。而且考虑到在非热带区域海洋中，潜热与感热通量相对于长波和短波辐射更重要 (张学洪等, 2012)。该区域包括渤海、黄海和东海到台湾南部海域以及日本周边海

域和太平洋西北海域。下面选取区域 (20°N~45°N, 110°E~150°E) 计算 1960~2010 年间黑潮区域的海洋物理量的变化规律。

图 2 是中国东海及其邻近海域海气热输送的多年平均春季气候态特征与对应的方差，其中潜热与感热向上输送为正，向下输送为负，而潜热只存在向上输送。从图 2a、2b 知道，在春季中国东海及其邻近海域中感热和潜热的极值区都出现在黑潮流经的区域，感热和潜热的气候平均值分别大约在 30 W m^{-2} 与 120 W m^{-2} ；在图 2c、2d 中，春季的感热通量标准差大值区主要集中在日本以西区域，均相对于潜热通量偏北，潜热通量标准差主要集中在东海区域与日本东南区域，亦即感热通量在年际变化过程中主要集中在东海及其邻近海域的偏北区域，而潜热通量变化主要集中在黑潮流经区域。因此在后面的分析中主要考虑在黑潮区域中潜热变化对于中国气候的影响。

潜热通量的变化在春季与黑潮区域对应关系较好，为了表征黑潮区域的潜热的年际变化，本文采用了 EOF 分析对其时间与空间进行分解。图 3a

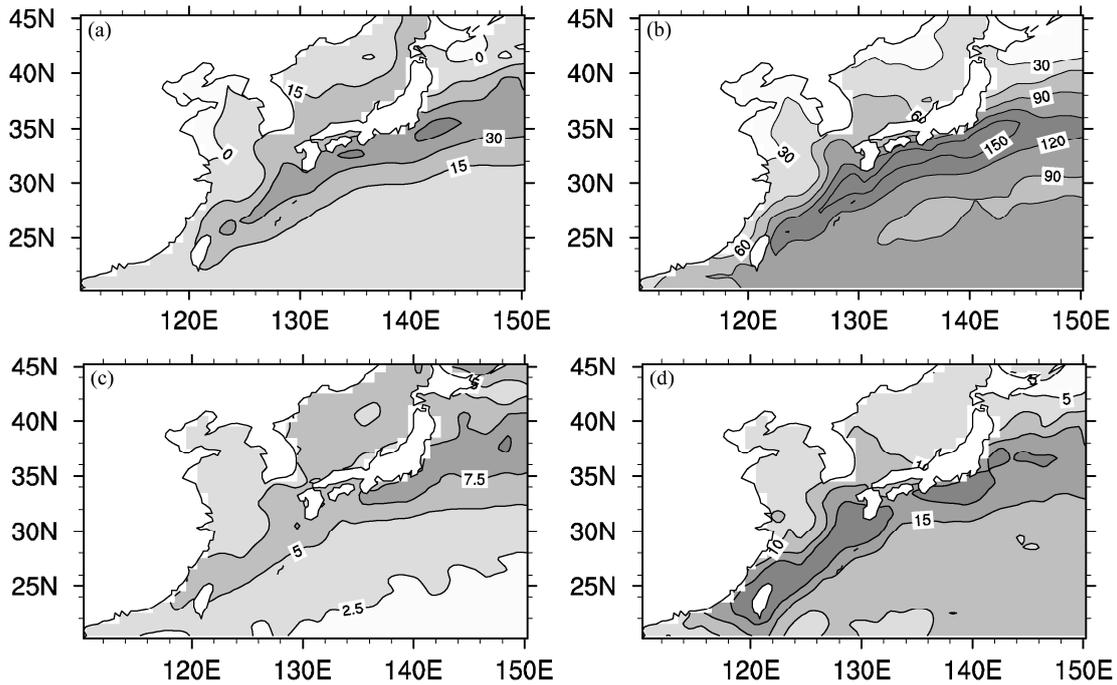


图2 1960~2010年中国东海及其邻近海域海气热输送通量的多年平均 (a) 感热、(b) 潜热的春季气候态特征及其 (c)、(d) 对应的方差。单位: $W m^{-2}$
 Fig. 2 Climatology of the (a) sensible and (b) latent heat fluxes in the East China Sea and its surrounding areas in spring, averaged for 1960–2010, and (c, d) their variances ($W m^{-2}$)

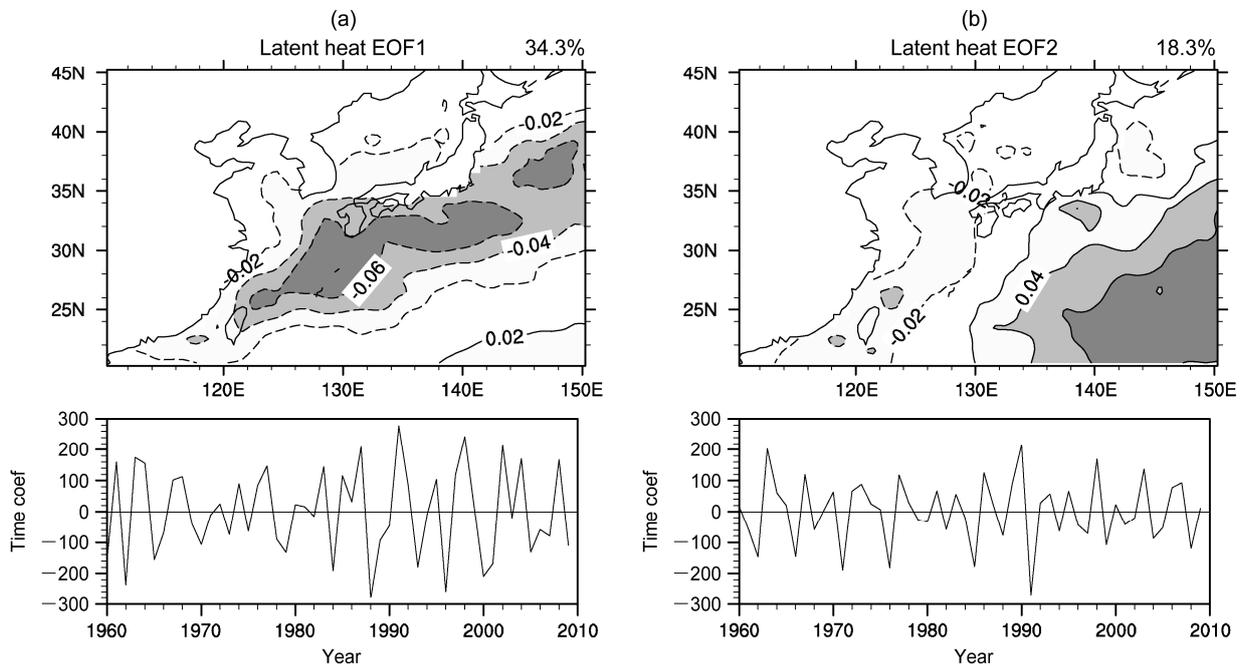


图3 中国东海及其邻近海域的春季潜热输送通量的 EOF 分析: (a) 第一模态及其对应时间序列; (b) 第二模态及其对应的时间序列
 Fig. 3 (a) Spatial pattern (upper panels) and time series (lower panels) of the first EOF mode of spring latent heat flux in the East China Sea and its surrounding areas. (b) As in (a), except for the second EOF mode

中春季潜热 EOF 第一模态主要变化集中在黑潮流经区域, 与潜热通量的气候态与方差分布有比较好的对应关系。而在图 3b 第二模态主要集中在离岸

较远的西北太平洋区域。第一和第二模态方差贡献率分别为 34.5%和 18.3%, 因此 EOF 第一模态可以反映黑潮区域的潜热主要的空间和时间变化。

3.3 黑潮潜热指数的定义

为了更好地表征潜热通量在西北太平洋的黑潮区域中的年际变化, 并且考虑黑潮的特点为流速快、输送量大、流路蜿蜒盘旋, 使得其在东海以及邻近海域形成了一个高速度流的区域, 本文定义了黑潮潜热指数作为黑潮区域潜热通量变化的表征方式。根据 Andres et al. (2008) 中双截面多季节分析了关于黑潮的流速气候状态, 可以清楚看到在黑潮流速极大值区域主要从海表到深海延伸, 其边缘速度为 0.2 m s^{-1} , 所以本文定义西北太平洋区域 ($20^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 中海洋表层以下 5 m 深度流速超过 0.2 m s^{-1} 的潜热总量标准化序列作为黑潮潜热指数。当黑潮潜热指数处于高值时, 表征黑潮区域内在该年潜热输送偏多, 而处于低值时, 表征黑潮区域内在该年潜热输送偏少。在图 4

中通过对比春季潜热 EOF 第一时间序列与黑潮潜热指数, 可以发现两者除了极细微的变化差别外, 年际变化基本一致, 两者的相关系数也达到了 0.96。而且黑潮潜热指数有明显的物理意义, 因此本文利用该黑潮潜热指数来表征黑潮区域潜热的年际变化。

4 中国大陆春季降水与同期黑潮潜热通量的关系

利用上述定义的春季黑潮潜热指数对中国春季降水进行相关分析得到图 5, 从图中可以看到, 长江以北的东部广大地区的降水与黑潮潜热指数呈显著的负相关, 而长江以南, 特别是华南地区呈显著的正相关。为了进一步确认黑潮潜热对于中国春季降水的影响, 定义大于 0.8 时候黑潮作为高

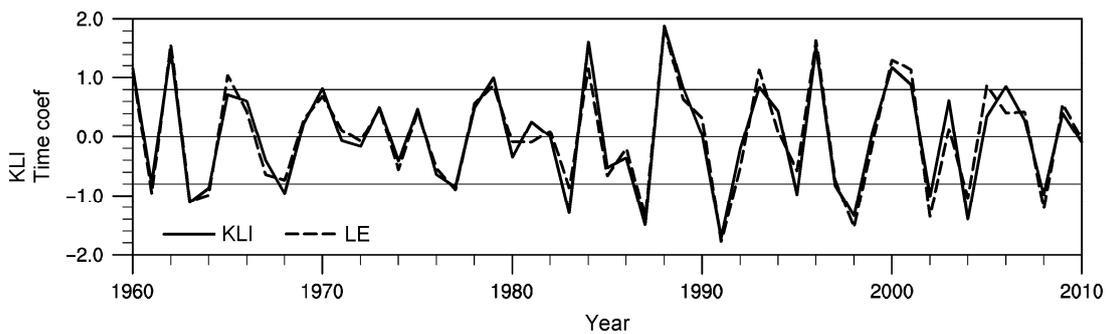


图 4 春季黑潮潜热指数 (KLI) 与春季潜热输送通量 EOF 第一模态的时间序列 (LE) 的对比

Fig. 4 Time series of the spring latent heat flux index of the Kuroshio Current (KLI) and the first EOF mode of the spring latent heat flux (LE) in the East China Sea and its surrounding areas

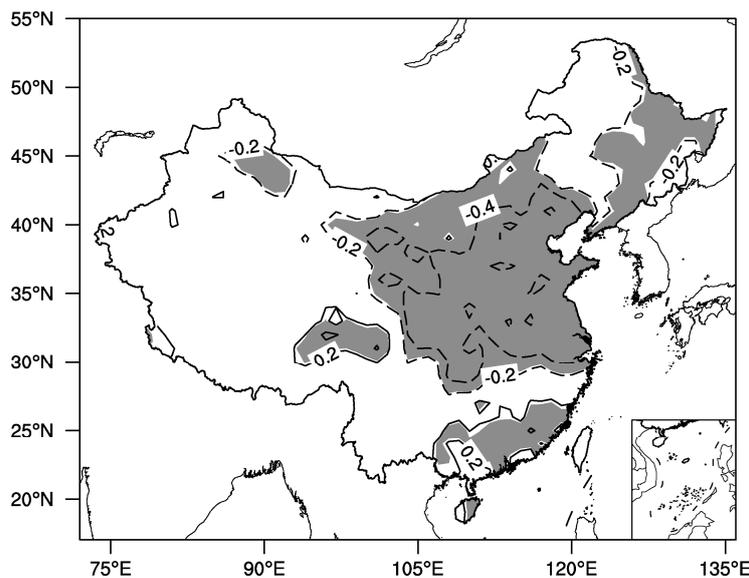


图 5 中国春季降水量与春季黑潮潜热指数的相关系数分布。图中阴影部分为达到 95% 信度水平的区域

Fig. 5 Correlation patterns between the spring KLI and the precipitation in spring (shaded areas are above 95% confidence level)

值年，小于-0.8 时作为低值年，选取 1960、1962、1970、1979、1984、1988、1989、1996、2000、2001、2003、2006 年作为高值年，共 12 年；选取 1963、1964、1968、1976、1977、1983、1985、1987、1991、1995、1997、1998、2004 年作为低值年，共 13 年。合成的春季降水差异也表现出以长江为界的南北偶极子型分布（图 6）。因此，当黑潮潜热指数大于 0.8 时，华南地区春季降水偏多，而长江以北地区显著偏少；反之，当黑潮潜热指数小于-0.8 时，华南地区春季降水则偏少，长江以北地区显著偏多。

5 春季黑潮潜热通量异常与同期东亚大气环流的关系

图 7 为春季 850 hPa 风场对于黑潮潜热指数的合成分析。在气候平均状态下，华南地区春季降水主要由副热带高压西北侧的西南风带来的水汽输

送，而长江以北地区主要是地面南北气流对峙，气旋及锋面活动频繁，导致降水出现。在图 7a 中，当黑潮指数大于 0.8 时，长江以南的中国大陆有比较强盛的异常北风，表明副高偏弱，有利于副高西北侧的西南风停留在华南地区，使得水汽无法输送到更北的地区，导致华南地区降水增多，而长江以北的东部地区降水减少。而在图 7b 中，当黑潮指数小于-0.8 时，有较强盛的异常南风，表明副高偏强，有利于水汽输送到北方地区，导致长江以北的东部地区出现降水增多。

为了进一步说明水汽输送的效应，对水汽输送从 1000 hPa 积分到 600 hPa 得到图 8，可以看到在高低值不同状态时，在中国大陆形成一个与图 7 非常相似的异常环流，同样在高值时不利于水汽的北推，在低值时有利于水汽的向北推进。结合图 7 可以知道，异常风的形成是水汽输送异常的主要原因，从而导致降水的异常。

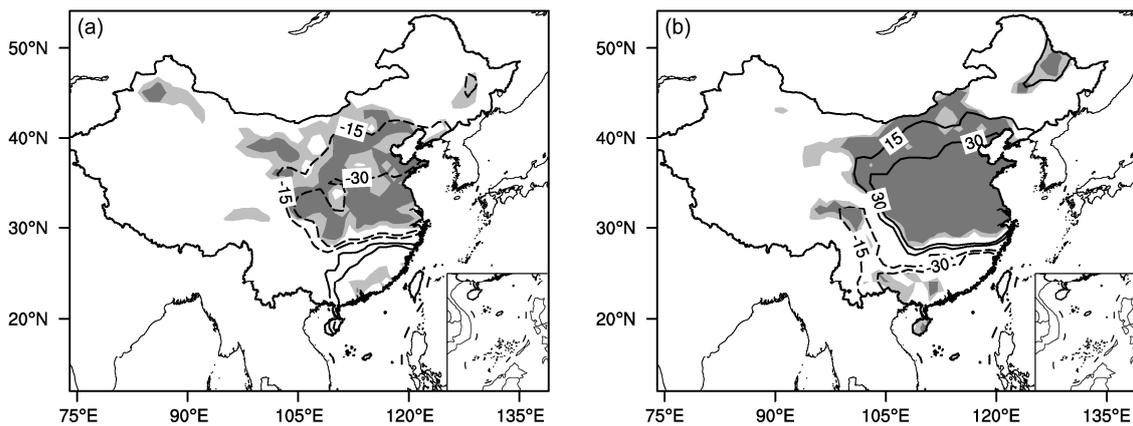


图 6 黑潮潜热指数 (a) 高、(b) 低值年合成的中国春季降水异常 (单位: mm month^{-1}) 的分布。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度检验的区域

Fig. 6 Composite spring precipitation anomalies (mm month^{-1}) in China for (a) high- and (b) low-KLI years (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

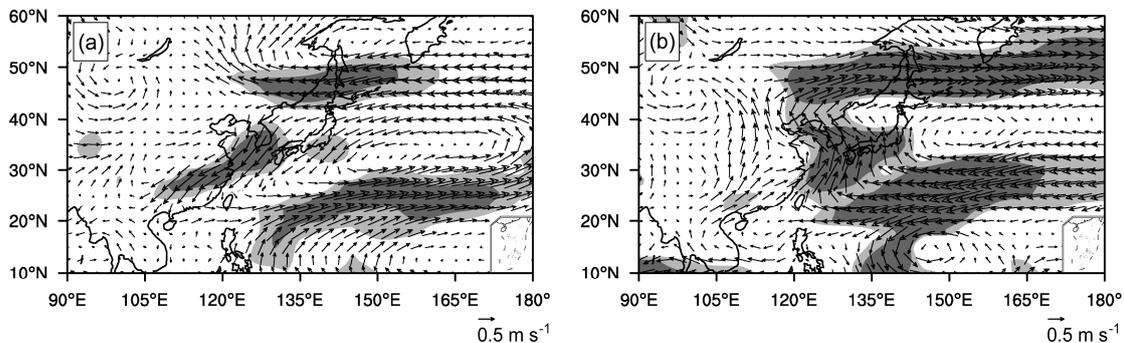


图 7 黑潮潜热指数 (a) 高、(b) 低值年合成的春季 850 hPa 风场 (单位: m s^{-1})。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度检验的区域

Fig. 7 Composite wind anomalies (m s^{-1}) at 850 hPa in spring for (a) high- and (b) low-KLI years (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

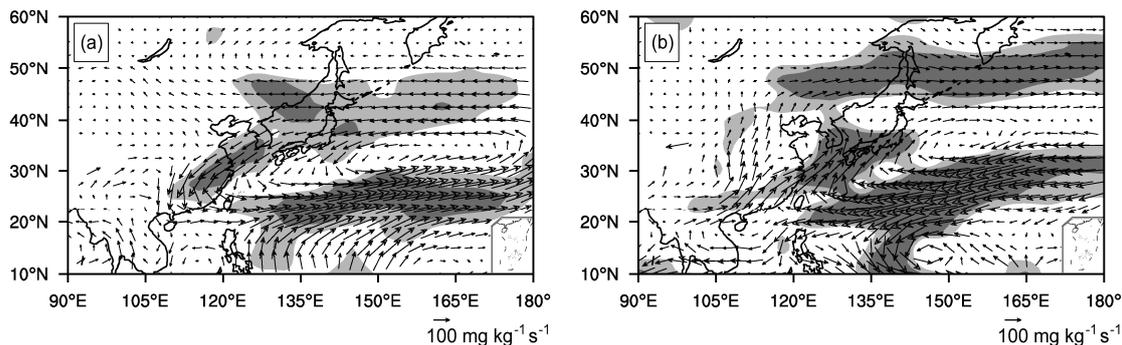


图 8 根据黑潮潜热指数对春季水汽输送通量的垂直积分距平的合成 (单位: $\text{m g kg}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) 高值合成; (b) 低值合成。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度检验的区域

Fig. 8 Composites of vertically integrated water vapor transport flux anomalies ($\text{m g kg}^{-1} \text{s}^{-1}$) for (a) high and (b) low KLI (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

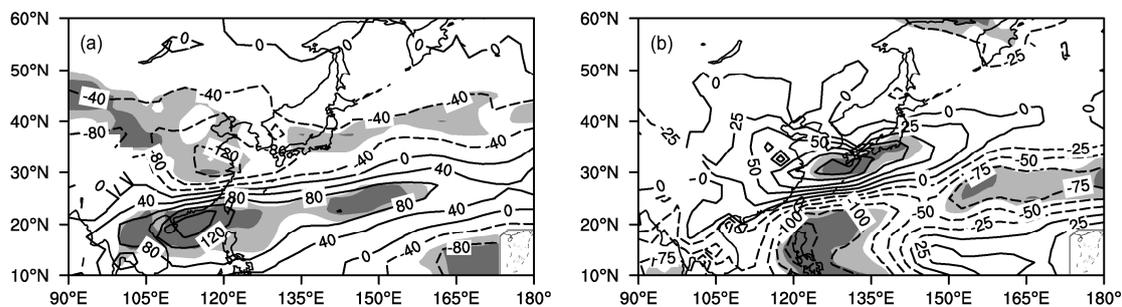


图 9 根据黑潮潜热指数对春季水汽总量垂直积分距平的合成 (单位: g kg^{-1}): (a) 高值合成; (b) 低值合成。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度检验的区域

Fig. 9 Composite vertical integration of total water vapor content anomalies (g kg^{-1}) for (a) high and (b) low KLI (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

图 9 进一步给出了从 1000 hPa 积分到 600 hPa 的水汽总量。由图 9a 可见, 当黑潮潜热指数大于 0.8 时, 华南地区水汽总量偏多, 而长江以北地区水汽总量偏少, 正负值区域均呈纬向带状分布, 且通过显著性检验; 而在图 9b 中当黑潮潜热指数小于 -0.8 时, 华南地区水汽总量趋向于平均水平, 其南侧为主要的负值区域, 而其北方地区水汽总量为正值。由黑潮潜热指数合成得出的此水汽分布形态结合前述的风场异常, 是导致在黑潮潜热指数正值年, 我国华南降水偏多, 长江以北降水偏少, 而在黑潮潜热指数负值年有大致相反的降水分布。

徐蜜蜜等 (2010) 研究表明黑潮区域海温能影响到黑潮两侧边界层的稳定度以及垂直混合强弱, 参考徐蜜蜜等 (2010) 文章中垂直剖面的方法, 同时根据文中图 6 在同降水中心的纬度 25°N 和 32.5°N 做两个垂直剖面。 ω (p 坐标系下的垂直风速) 场 (向下为正) 在 25°N 处的垂直剖面 (图 10),

当黑潮潜热指数大于 0.8 时, 可以看到在 120°E 附近, 低空是一个向下气流异常为主而高空则是向上的气流异常为主, 而且此上升气流是从海洋延伸到陆地, 从而出现在大陆上方造成不稳定状况出现, 导致大陆区域容易出现降水状况。同理在黑潮潜热指数小于 -0.8 时, 有稳定的下沉气流从海洋延伸到大陆。

图 11 是 ω 场 (向下为正) 在 32.5°N 处的垂直剖面。在黑潮潜热指数大于 0.8 时, 在 120°E 出现较稳定的弱的上升气流, 而且延伸 300 hPa 上仍然是上升气流, 对降水有促进作用, 但是只有高层通过了显著性检验。当黑潮潜热指数小于 -0.8 时, 在 125°E 出现弱上升气流异常, 而且没有通过显著性检验, 并不能其对降水的抑制作用。

所以在此大胆的猜想, 在中国中纬度地区主要受到黑潮流域的影响主要为水汽输送方面, 而在低纬度地区主要受到水汽输送与上升气流的共同影

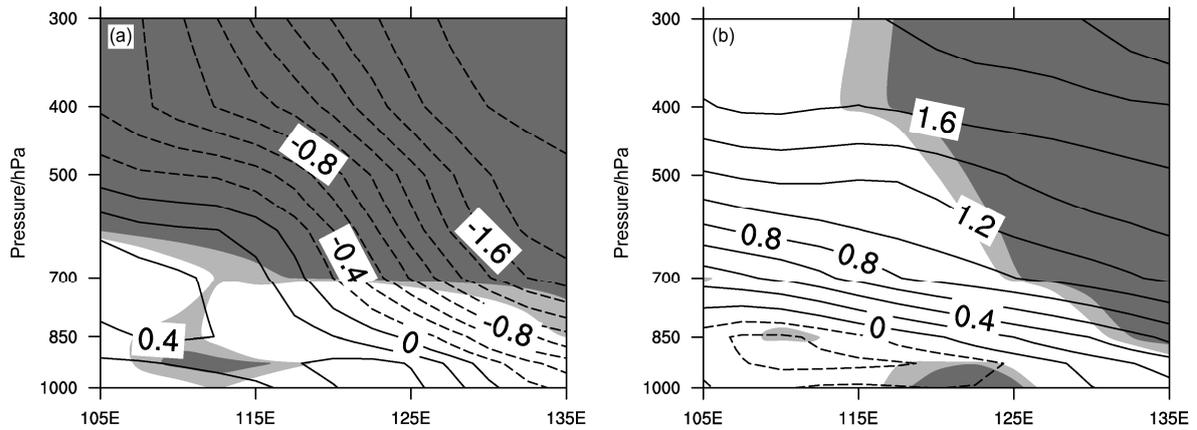


图 10 根据黑潮潜热指数合成的春季 ω 场距平场 (单位: Pa s^{-1}) 在 25°N 处的垂直剖面: (a) 高值合成; (b) 低值合成。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度检验的区域

Fig. 10 Vertical cross sections of composite ω anomalies (Pa s^{-1}) along 25°N for (a) high and (b) low KLI (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

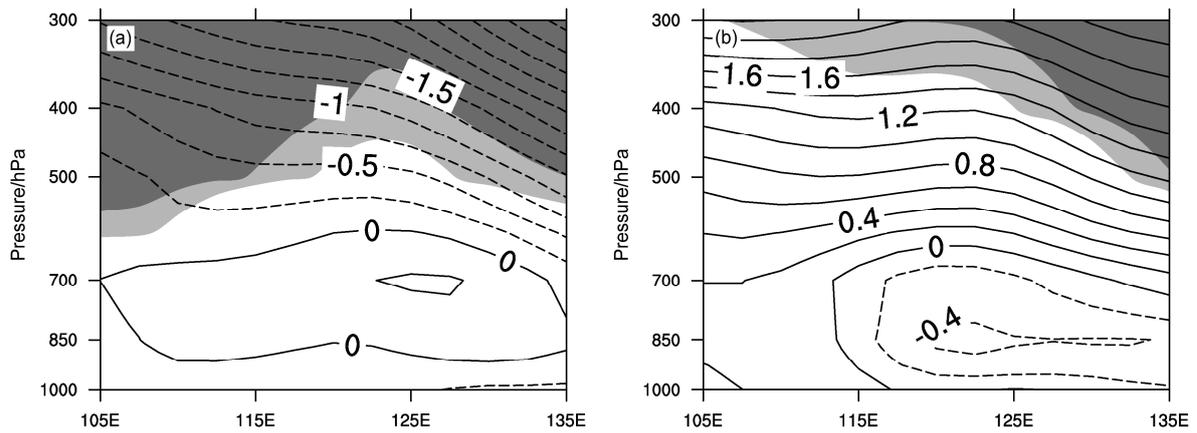


图 11 根据黑潮潜热指数合成的春季 ω 场 (单位: Pa s^{-1}) 在 32.5°N 处的垂直剖面: (a) 高值合成; (b) 低值合成。深、浅阴影分别为通过 99%、95% 信度水平的区域

Fig. 11 Vertical cross sections of composite ω anomalies (Pa s^{-1}) along 32.5°N for (a) high and (b) low KLI (light and dark shaded areas are above 95% and 99% confidence levels, respectively)

响,但是由于在此方面的工作仍然没有完善,有待继续深究。

6 结论与讨论

本文在讨论了黑潮区域海气相互作用以及黑潮区域热通量时空变化的基础上,分析了春季黑潮区域潜热对于中国春季降水的影响,并定义了黑潮潜热指数进行了定量分析,结合大气环流异常研究了黑潮区域潜热影响中国春季降水的过程,得到如下主要结论:

(1) 对中国东海以及邻近海域海温与降水的逐

点滞后相关结果表明,在夏季可能以大气强迫海洋为主,而在春、冬两季可能主要为海洋强迫大气为主,秋季则可能为不明显的海气相互作用。而在春季正好为华南前汛期的发生时间,在春季西北太平洋区域中感热和潜热都对黑潮流经的区域有比较好的敏感性,极值区都出现在此区域,黑潮流经区域感热和潜热的气候平均值分别为 30 W m^{-2} 与 120 W m^{-2} 左右;春季的感热通量标准差大值区主要集中在日本以西区域,潜热通量标准差主要集中在日本以东区域与日本东南区域(即黑潮区域)。并且春季潜热 EOF 第一模态的主要变化就集中在黑潮流域。

(2) 华南地区春季降水与黑潮潜热指数呈显著的正相关, 而长江以北的东部地区则为显著的负相关。合成分析的结果表明, 当黑潮潜热指数大于 0.8 时, 华南地区春季降水偏多, 长江以北地区偏少; 而当黑潮潜热指数小于 -0.8 时, 华南地区春季降水偏少, 长江以北地区则偏多。

(3) 黑潮区域潜热通量与中国大陆上空的异常风有比较好的对应关系。黑潮潜热指数大于 0.8 时, 长江以南的中国大陆有比较强盛的异常北风, 使得水汽无法输送到更北的地区, 导致在华南地区水汽的积累, 并且在海面出现有利于降水的垂直运动异常延伸到大陆上, 使得在华南地区降水增多, 而长江以北的东部地区由于水汽输送偏弱, 导致水汽积累偏少, 从而降水减少。当黑潮指数小于 -0.8 时, 有较强盛的异常南风, 有利于水汽输送到北方地区, 水汽在华北地区积累, 导致长江以北出现降水正异常, 而华南地区由于南风偏强, 水汽输送加强, 导致水汽无法在此区域积累, 并且在海面出现不利于降水的垂直运动异常延伸到大陆上, 从而导致降水偏少。

由此可见, 黑潮区域春季潜热通量的异常与中国东部降水和东亚地区上空大气环流的异常变化有密切关系。上述的结果表明, 黑潮区域春季潜热通量的年际变化很可能是通过东亚上空的大气环流和水汽的积累与输送导致的中国东部春季降水年际变化异常。但是由于中国季风区在春季是处于季风将要爆发的时期, 对应降水的年际变化影响因素较多, 而本文仅着重研究了春季黑潮关键区潜热通量年际变化与同期中国东部春季降水变异的关系, 故仅通过黑潮潜热通量研究降水的年际变化, 仍显不足。此外, 在文章的最后提出大胆的猜想, 在中国中纬度地区受到黑潮流域的影响主要为水汽输送方面, 而在低纬度地区主要受到水汽输送与上升气流的共同影响, 但是由于在此方面的工作仍然没有完善, 所以有待继续研究。

参考文献 (References)

- Andres M, Wimbush M, Park J H, et al. 2008. Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: C05013, doi:10.1029/2007JC004200.
- Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (8): 2999–3017.
- Cayan D R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 22 (8): 859–881.
- 陈文, 康丽华, 王玓. 2006. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 259–269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 259–269.
- Chen W, Wang L, Xue Y K, et al. 2009. Variabilities of the spring river runoff system in East China and their relations to precipitation and sea surface temperature [J]. *Int. J. Climatol.*, 29 (10): 1381–1394.
- Da Silva A M, Young C C, Levitus S. 1994. Atlas of Surface Marine Data, Algorithms and Procedures, NOAA Atlas NESDIS 6 [M]. California: US Department of Commerce, 74pp.
- 丁良模. 1992. 黑潮关键区的海面放热量对长江地区梅雨降水的影响 [J]. *海洋学报*, 14 (3): 47–54. Ding Liangmo. 1992. The impact of heat release over Kuroshio key area on Meiyu rainfall in Changjiang basin [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 14 (3): 47–54.
- 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 (5): 730–743. Huang Rong hui, 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.
- Jin X, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables lisan yu [R]. OAFlux Project Tech. Rep. OA-2008-01.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- 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. Temporal and spatial characteristics of latent heat flux in the East China Sea and its association with summer rainfall in East China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 1485–1492.
- 李翠华, 蔡榕硕, 谭红建. 2013. 中国东部夏季降水年际变化与同期东海潜热通量的关系 [J]. *海洋学研究*, 31 (1): 26–34. Li Cuihua, Cai Rongshuo, Tan Hongjian. 2013. The relationship between inter-annual variations of summer precipitation in eastern China and latent heat flux in East China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 26–34.
- 李忠贤, 孙照渤. 2004. 1 月份黑潮区域海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (3): 374–380. Li Zhongxian, Sun Zhaobo. 2004. Relation between January Kuroshio SSTA and summer rainfall in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 374–380.
- 梅士龙, 闵锦忠, 孙照渤. 2006. 黑潮 SSTA 与赤道太平洋风场及 ENSO 关系初探 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (3): 385–389. Mei Shilong, Min Jinzhong, Sun Zhaobo. 2006. Relationships of Kuroshio SSTA and tropical Pacific wind field as well as ENSO [J]. *Journal of Nanjing*

- Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (3): 385–389.
- Mizuno K, White W B. 1983. Annual and interannual variability in the Kuroshio Current system [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 13 (10): 1847–1867.
- 穆松宁, 江志红, 闵锦忠, 等. 2004. ENSO 对黑潮海区风应力异常影响的初步探讨 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (2): 258–266. Mu Songning, Jiang Zhihong, Min Jinzhong, et al. 2004. Relationship between evolution of wind stress anomalies in the Kuroshio region and ENSO [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 258–266.
- 倪东鸿, 孙照渤, 陈海山, 等. 2004. 夏季黑潮区域 SSTA 及其与中国夏季降水的联系 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (3): 310–316. Ni Donghong, Sun Zhaobo, Chen Haishan, et al. 2004. Spatial temporal features of summer SSTA in the Kuroshio Current region and its relation to summer precipitation in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 310–316.
- 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.
- Qiu B. 1995. Variability and energetics of the Kuroshio Extension and its recirculation gyre from the first two-year TOPEX data [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (8): 1827–1842.
- Qiu B, Kelly K A. 1993. Upper-ocean heat balance in the Kuroshio Extension region [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 23 (9): 2027–2041.
- Rudolf B, Hauschild H, Rueth W, et al. 1994. Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements [M]// Desbois M, Désalmond F. *Global Precipitations and Climate Change*, NATO ASI Series Volume 26. Berlin, Heidelberg: Springer, 173–186.
- Seager R, Kushnir Y, Naik N H, et al. 2001. Wind-driven shifts in the latitude of the Kuroshio-Oyashio extension and generation of SST anomalies on decadal timescales [J]. *J. Climate*, 14 (22): 4249–4265.
- Trenberth K E, Solomon A. 1994. The global heat balance: Heat transports in the atmosphere and ocean [J]. *Climate Dyn.*, 10 (3): 107–134.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15), doi: 10.1029/2005GL022734.
- 徐海明. 1997. 华南夏季降水与全球海温的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 20 (3): 392–399. Xu Haiming. 1997. Relationship between South-China summer precipitation and global SST [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 20 (3): 392–399.
- 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 Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 1071–1087.
- 杨海军. 2013. 估计变动气候中大气和海洋经向热量输送 [J]. *科学通报*, 58 (18): 1706–1710. Yang Haijun. 2013. Estimation of atmospheric and oceanic climate meridional heat transport [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 58 (18): 1706–1710.
- 殷永红, 倪允琪, 史历. 2001. 江淮流域夏季降水异常及与全球中低纬海温异常关系的诊断研究 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 37 (3): 358–365. Yin Yonghong, Ni Yunqi, Shi Li. 2001. Diagnostic study of summer rainfall anomaly in Changjiang–Huaihe valley and its relationship with the global mid-low latitude sea surface temperature anomaly [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 37(3): 358–365.
- 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 2008. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 815–825. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Peng Jingbei. 2008. The studies of meteorological disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 815–825.
- 张学洪, 俞永强, 周天军, 等. 2012. 大洋环流和海气相互作用的数值模拟讲义 [M]. 北京: 气象出版社: 79–86. Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Zhou Tianjun, et al. 2012. *Numerical Simulation on Ocean Circulation and Air-Sea Interaction [M] (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 79–86.