

殷明, 肖子牛, 黎鑫, 等. 2016. 东海黑潮暖舌的演变及其对我国气温的影响 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 333–345. Yin Ming, Xiao Ziniu, Li Xin, et al. 2016. Evolement of the Kuroshio warm tongue in the East China Sea and its relationship with temperature in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 333–345, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15245.

东海黑潮暖舌的演变及其对我国气温的影响

殷明¹ 肖子牛² 黎鑫¹ 李崇银^{1,2}

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用高分辨率的海温分析资料模式资料, 分析了黑潮暖舌与我国气温的关系, 初步探讨了太平洋年代际振荡 (PDO) 等造成黑潮暖舌变化的可能原因。结果表明, 冬季和春季东海黑潮暖舌存在明显的年际和年代际变化。暖舌在 1996/1997 年发生了一次突变, 此前暖舌处在偏冷的状态, 之后转为偏暖的状态。我国冬季和春季气温存在一定的年代际变化, 1997 年之后, 冬季除东北和新疆外, 气温有所偏高, 而春季气温全国表现为一致的显著偏高。冬季和春季气温对黑潮暖舌存在邻 (域) 响应。冬季东海黑潮暖舌指数与冬季我国东部气温存在正相关, 并且这一相关性能够延续到次年春季。冬季黑潮暖舌指数与我国 4 月海陆热力差异指数也存在显著的正相关。当冬季暖舌偏强 (弱) 时, 4 月海陆热力差异指数偏高 (低), 即东亚地区海陆热力差异偏大 (小)。春季黑潮暖舌指数与春季我国中部及南方地区气温也存在正相关, 当春季黑潮暖舌偏强 (弱) 时, 上述地区气温将偏高 (低)。PDO 和黑潮暖舌之间的相互作用存在一个反馈机制。西风的增强, 可通过使海洋向大气释放热量增加和向南的埃克曼 (Ekman) 输送, 降低北太平洋中部的 SST, 而这一地区 SST 的降低对应着 PDO 的暖位相。增强的负风应力旋度在北太平洋副热带流涡中强迫出的向南斯维尔德鲁普 (Sverdrup) 流也偏强, 而向北流动的东海黑潮的增强正是补偿了这一向南的海流。黑潮增强后经过两个月将大量热量输送至北太平洋中部, 增强了这一地区的 SST, 而这对应着 PDO 的冷位相。

关键词 东海黑潮 暖舌 气温 突变 太平洋年代际振荡 (PDO)

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0333-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15245

Evolement of the Kuroshio Warm Tongue in the East China Sea and Its Relationship with Temperature in China

YIN Ming¹, XIAO Ziniu², LI Xin¹, and LI Chongyin^{1,2}

¹ Institute of Meteorology and oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the high-resolution analysis data and the sea surface temperature derived from LASG/IAP (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Sciences) Climate systems Ocean Model 2.0 (LICOM2.0), the relationship

收稿日期 2015-11-02; 网络预出版日期 2016-03-04

作者简介 殷明, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 目前主要从事中纬度海气相互作用研究。E-mail: ymeffie@foxmail.com

通讯作者 李崇银, E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB956200, 国家自然科学基金项目 41490642、41375069

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB956200), National Natural Science Foundation of China (Grant 41490642 and 41375069)

between the Kuroshio warm tongue in the East China Sea and temperature in China is analyzed using correlation and composite analysis methods. Possible reasons for the Kuroshio warm tongue changes are discussed. The results show that the interannual and interdecadal variations in the warm tongue during the winter and spring are significant. There was an abrupt change from cold to warm in the warm tongue in the winter of 1996. Besides, the warm tongue underwent a similar abrupt change in the spring of 1997, when it changed from cold to warm as well. Accordingly, the variability of temperature in winter and the following spring on the time scales from interannual to interdecadal has been detected in China. Temperature in winter after 1997 was higher compared with that before 1997, and the temperature increase is more significant in spring than in winter. In this paper, the border zone response of East-Asia circulation and climate to the SSTA in the Kuroshio region is mainly reflected in the positive correlation between the index of Kuroshio warm tongue (I_{KWT}) and temperature in East China in winter. The high correlation can maintain until the following spring. The significant positive correlation can also be detected between the I_{KWT} and the index of land-sea thermal difference (I_{LSTD}) in April. When the warm tongue is strong (weak) in winter, the I_{LSTD} is high (low). The positive correlation between the I_{KWT} and temperature can be found in the central and southern regions of China in spring as well. When the springtime warm tongue is strong (weak), the temperature is high (low) in these regions. There is possibly a feedback mechanism for the interaction between PDO (Pacific Decadal Oscillation) and the warm tongue. The enhancement of the westerly winds can lead to decreases in the SST in the central Pacific by increasing the heat release from the ocean to the atmosphere and displacing isotherms southwestward by Ekman drift. The central Pacific cooling corresponds to a PDO warm phase. Enhanced negative wind-stress-curl forces stronger southward Sverdrup flow in the subtropical North Pacific gyre, which is compensated by a stronger Kuroshio in the East China Sea. Two months later, the heat carried by the Kuroshio arrives in the central North Pacific, leading to increases in SST in this region. This period corresponds to a cold PDO phase.

Keywords Kuroshio in the East China Sea, Warm tongue, Temperature, Abrupt change, PDO

1 引言

作为北太平洋西边界流的代表,黑潮具有流速大、流幅狭窄、高温、高盐等特征,它终年将大量热量从低纬度输送至中高纬度气温较低的地区,流经海域海洋向大气释放大量热量,这种热量损失将导致海洋和大气之间的深对流(Hu et al., 2015),因此黑潮在中纬度海气相互作用中发挥着至关重要的作用。作为黑潮暖流的一个独特而重要的热力学属性,海表温度(SST)由于通过热通量交换来与大气发生相互作用而受到了广泛的关注。关于黑潮海温与亚太地区大气环流及我国天气异常的关系,已经有很多学者进行了研究。如张天宇等(2007)认为当春季黑潮区域海表温度偏高时,中高纬度地区的槽脊加深,西北太平洋副热带高压加强、西伸,导致副热带高压西侧的暖湿气流输送到长江中下游及华南地区,从而使长江中下游及华南地区降水增多。蔡榕硕等(2012)通过观测分析认为当东中国海及其邻近海域夏季海温为暖(冷)异常,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);数值试验结果也支持了这一结论。袁杰等(2013)认为当冬季黑潮区SST年代际异常处于正位相时,大气环流配置有利

于我国东部夏季多雨带出现在长江中下游地区。这些研究多通过定义黑潮海域内区域平均的海表温度为黑潮海温指数,然后利用这一指数与其他气象要素场或指数进行分析而得到结果,这一方法是否可靠的关键在于所选取的海温资料能否真实反映黑潮海域的海温特征。由于前人对东海黑潮SST的探讨大多受到观测资料空间分辨率的限制,对于流幅狭窄的黑潮暖流自身海温变化的探讨是非常有限的(王兴智和李崇银,2013)。

借助高分辨率的海温资料,可以发现黑潮暖流与其邻近的陆架冷水之间存在很大的温度梯度,这个海洋锋区(类似于大气中的锋区,表现为海表水平温度梯度大的狭窄区域)通常被称为黑潮锋(Xie et al., 2002; Xu et al., 2011)。同时,由于黑潮暖流的存在,黑潮海域的海温要明显高于东西两边海域的海温,往往会在黑潮锋和琉球群岛(约26.3°N, 127.7°E)之间形成了一条强而窄的海温暖舌,图1给出了这一海域季节平均的SST分布,可以看到,暖舌(图1黑色平行四边形包围的区域)首先出现于冬季,在春季达到最强,随后减弱,秋季最弱(王兴智和李崇银,2013; Xu and Xu, 2015)。因此,本文拟利用高空间分辨率、长时间序列的黑潮海表温度资料,对黑潮暖舌的变化特征进行分析。

前人多关注的是黑潮海温与我国夏季降水的

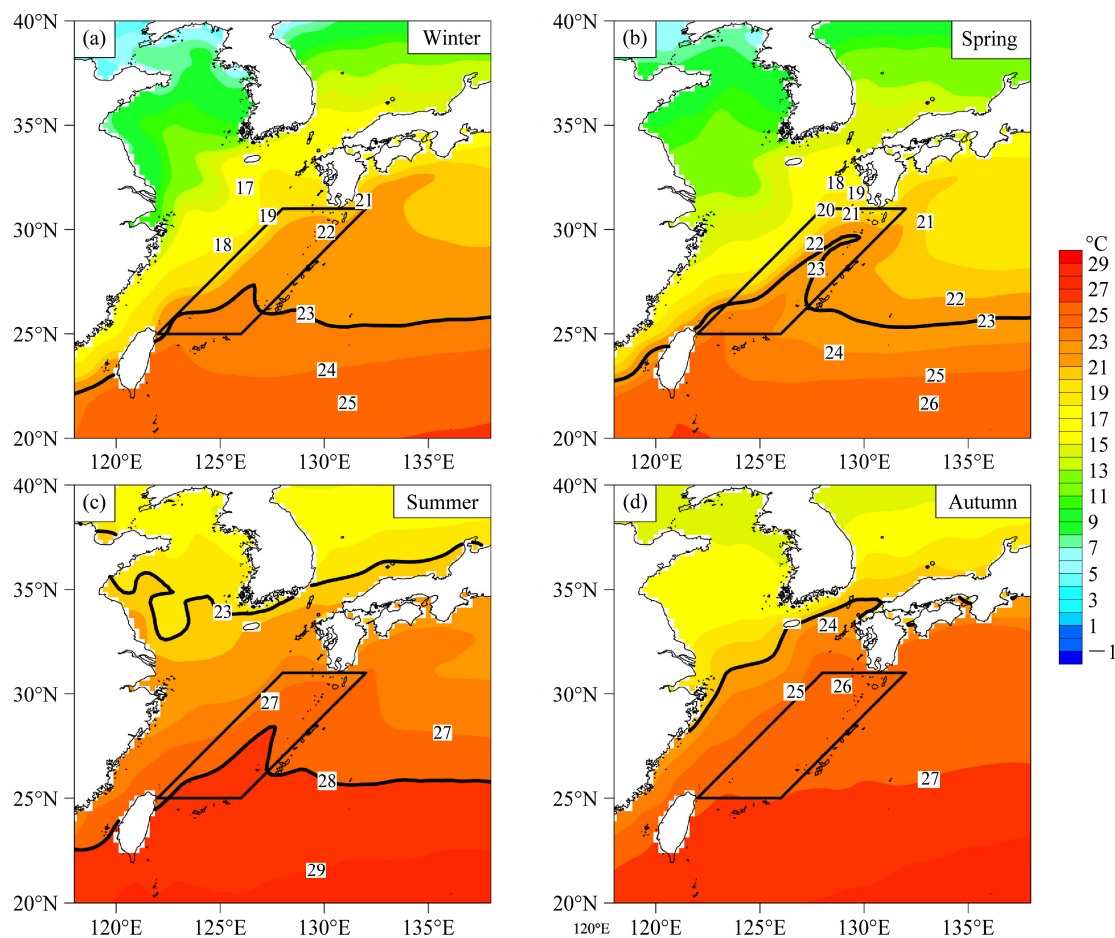


图1 1982~2014年东海黑潮海区季节平均的SST(填色值, 间隔为1°C)。图a、b、d中粗实线为23°C等温线, 图c中粗实线为28°C等温线
Fig. 1 Seasonal mean SST in the East China Sea Kuroshio regions from 1982 to 2014 (shading at interval of 1°C). The thick solid line stands for the 23°C isotherm in Figs. a, b, and d, and 28°C isotherm in Fig. c

关系, 对海温与我国气温的研究较少, 但事实上, 气温的变化对我国的经济社会发展有十分重要的影响, 如春季正是我国南方早稻播种育秧的大忙季节, 此时过于频繁的冷空气活动会造成该地区出现低温烂种烂秧, 对农业生产造成严重损失(刘传凤和高波, 2001); 同时春季气温也与我国北方沙尘天气的爆发有密切的关系(范可和王会军, 2007), 此外, 我国处在东亚季风区, 气温的变化在海陆热力差异的转换过程中也有重要的作用。因此本文将黑潮暖舌与我国气温的联系展开研究, 并重点分析冬季黑潮暖舌对我国4月(海陆热力差异转换时间)海陆热力差异的影响。

太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)是太平洋年代际变化的一种反映, 其指数一般用20°N以北太平洋海表温度异常(SSTa)经验正交分解后第一模态的时间系数来表

征, 是海洋对阿留申低压(Aleutian Low, AL)这一大气强迫的响应。近年来研究发现, PDO只能部分地反映北太平洋的低频变化, 北太平洋环流振荡(North Pacific Gyre Oscillation, NPGO)是一个很好的补充。它是海洋对北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)这一大气强迫的响应, 其指数定义为东北太平洋(25°N~62°N, 180°~110°W)区域内海表高度异常(SSHa)经验正交分解后第二模态的时间系数。PDO和NPGO都是海盆尺度的变化, 能够捕捉到北太平洋洋流(North Pacific Current, NPC)和黑潮—亲潮及其延伸体(Kuroshio—Oyashio Extension, KOE)强度的改变(王闪闪等, 2012)。目前国内外已有一些关于黑潮及其延伸体与PDO、NPGO以及ENSO等关系的研究(Andres et al., 2009; 王闪闪等, 2012), 这有助于我们理解黑潮变化机制及其与大气环流的相互作

用,因而本文也对黑潮暖舌与 PDO、NPGO 的相互作用进行了初步分析。

2 资料与方法

本文所使用的数据有:(1)美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的第2代最优插值海表温度(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2, OISST V2)数据。该数据集使用了改进的高分辨率雷达(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)红外卫星海温数据和船舶、浮标的原位观测数据,也包括了卫星观测误差的大尺度调整。空间分辨率为 0.25° (纬度) $\times 0.25^{\circ}$ (经度),时间分辨率为1d(本文将其处理成逐月资料),时间范围为1982年1月至2014年12月。(2)国家气候中心提供的1982~2014年中国160个站逐月降水和气温资料。(3)<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>[2015-06-05]网站提供的1982~2014年的逐月PDO指数;(4)<http://www.o3d.org/npgo/npgo.php>[2015-06-05]网站提供的1982~2014年的逐月NPGO指数。

由于OISST V2资料的时间长度有限,为更好揭示年代际变化特征,本文还用了中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG/IAP)发展的气候系统海洋模式LICOM2.0(LASG/IAP Climate systems Ocean Model 2.0)的模拟结果进行了分析。该版本的基本框架与前一版本大体相同,但对上层海温的不确定性以及许多关键物理过程进行了改进,关于模式的详细介绍可参见文献(Liu et al., 2012)。本文分析取1949年1月至2007年12月(59年)的模式输出结果,其模拟是参照Yu et al. (2012)和Liu et al. (2014)的方案,采用CORES(Coordinated Ocean-ice Reference Experiments)强迫场资料(Griffies et al., 2009)作为外强迫进行数值积分,时间分辨率为逐月。

本文所使用的研究方法主要有滑动 t 检验、相关分析、对比分析以及合成分析等。

3 东海黑潮暖舌的变化特征及其与我国气温的关系

3.1 东海黑潮暖舌的变化特征

东海黑潮暖舌出现于冬季,在随后的春季达到

最强,夏季已经减弱,故本文选择了最为典型的冬季和春季暖舌作为研究对象。从图1可以看到,在表征春季和冬季暖舌时, 23°C 等温线具有良好的代表性,因此本文采用王兴智和李崇银(2013)提出的方法,将东海黑潮海域[图1中黑色平行四边形包围的区域,从左下角起,按逆时针方向格点经纬度分别为 $(25^{\circ}\text{N}, 122^{\circ}\text{E})$ 、 $(25^{\circ}\text{N}, 126^{\circ}\text{E})$ 、 $(31^{\circ}\text{N}, 132^{\circ}\text{E})$ 、 $(31^{\circ}\text{N}, 128^{\circ}\text{E})$]季节平均的海温大于 23°C 的格点数经标准化后定义为相应季节的东海黑潮暖舌指数(I_{KWT} , the index of Kuroshio warm tongue)。图2和图3分别给出了1982~2014年冬季和春季东海黑潮暖舌指数的逐年演变及相应的10年滑动 t 检验序列。可以看到,冬季黑潮暖舌存在明显的年际和年代际变化。就年代际变化而言,其在1996年发生了一次突变(通过了95%的信度检验),在此之前,海温以负距平为主,暖舌处在较冷的状态,而1997年以后的海温以正距平为主,暖舌从冷状态转为暖状态。值得注意的是,暖舌在1998~1999年达到最强,之后呈现逐渐减弱的趋势,在2005年发生的明显转变,滑动 t 检验表明已达到95%的置信水平,这预示着黑潮暖舌的状态将再次发生转换,从之前的暖状态转变为冷状态。春季黑潮暖舌同样也存在着明显的年际和年代际变化,在1997年发生了一次气候突变(通过了95%的信度检验),暖舌从冷状态转变为暖状态,由于冬季与次年春季的连续性,冬季和春季暖舌发生突变的时间其实是一致的,可以统一于1996/1997年,而在1998年达到最强后,春季暖舌也呈现逐渐减弱的趋势,滑动 t 检验在2005年已逼近90%的置信水平,是否再次发生突变还要对未来几年的数据资料进行进一步分析后才能确信,这一结果与王兴智和李崇银(2005)对1982~2012年春季东海黑潮暖舌指数序列的分析结果相一致。黑潮暖舌出现于冬季,在春季能够继续维持,也就使得冬季的黑潮暖舌对春季的大气环流乃至我国气候产生影响成为可能。

最近很多研究都认为,20世纪90年代中后期,气候发生了年代际位相的转变。如索马里急流的垂直结构在1995年前后发生了年代际位相转变(邱金晶和孙照渤, 2013; 谢磊等, 2013; 邱金晶等, 2014), Xiao et al. (2015)将这一转变归因于南印度洋海温的三极子结构导致的赤道附近经向热力差异异常。北大西洋的海温和欧洲夏季大气环流也

在这一时间表现出年代际转换 (Honda et al., 2009; Wu et al., 2013)。20 世纪 90 年代中后期发生年代际转换的气象要素很多, 分布也很广, 但是由于气候资料长度的限制, 这种气候突变是否确实存在还存在一定的争议, 值得进一步的研究。高分辨率的全球海温分析数据 (OISST V2) 时间长度只有 33 年, 在研究年代际尺度变化中稍显不足, 所以本文使用 LICOM2.0 模式模拟的水平分辨率为 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度) 的海温资料计算了长时间序列 (1949~2007 年, 共 59 年) 的黑潮暖舌指数。图

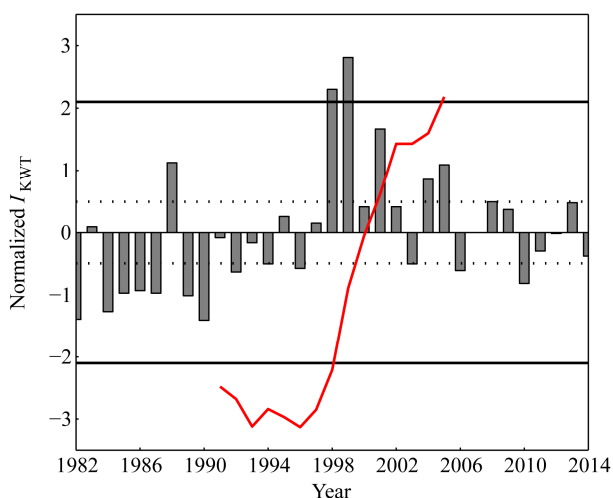


图 2 1982~2014 年标准化后的冬季东海黑潮暖舌指数 I_{KWT} 的逐年演变 (直方图) 及其 10 年滑动 t 检验序列 (红色实线)。虚线为指数 0.5 倍标准差线, 黑色实线为 95% 置信水平

Fig. 2 Time series of normalized I_{KWT} in the winter from 1982 to 2014 (bar) and its series of 10-year moving t test (red solid line). Dashed lines denote 0.5 standard deviation, black solid lines denote the 95% confidence level

4 首先给出了 LICOM2.0 模式模拟的黑潮海区冬季 (图 4a) 和春季 (图 4b) 季节平均的 SST 分布, 与图 1a、1b 对比可以看出, 该模式成功地模拟出了冬季和春季的黑潮海温暖舌, 只是强度略微偏强, 这说明使用 LICOM2.0 海温数据对来对黑潮暖舌进行研究是可行的。图 5 为冬季黑潮暖舌指数的序列演变及其 10 年滑动 t 检验, 在长时间序列上, 冬季黑潮暖舌存在两次位相的转换。第一次突变出现在 1961 年, 1961 年之前黑潮暖舌指数以正距平为主, 暖舌处在偏暖的状态, 而 1962 年之后至 1997 年, 黑潮暖舌指数以负距平为主, 暖舌处在偏冷的状态, 1998 年黑潮暖舌发生了第二次突变, 1998 年之后又开始以正距平为主, 暖舌转为偏暖的状

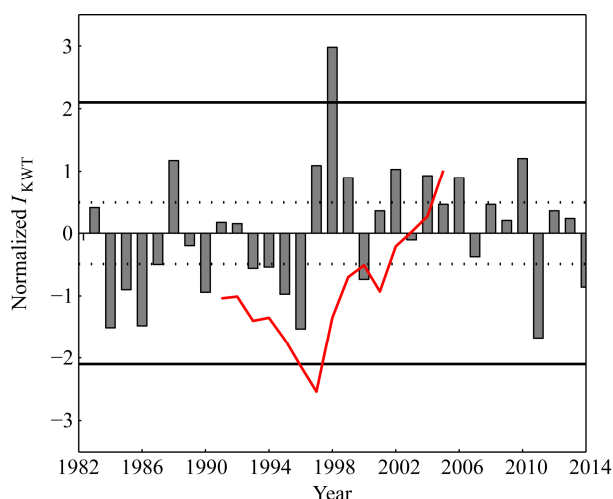


图 3 同图 2, 但为春季的情况

Fig. 3 Same as Fig. 2, but in spring

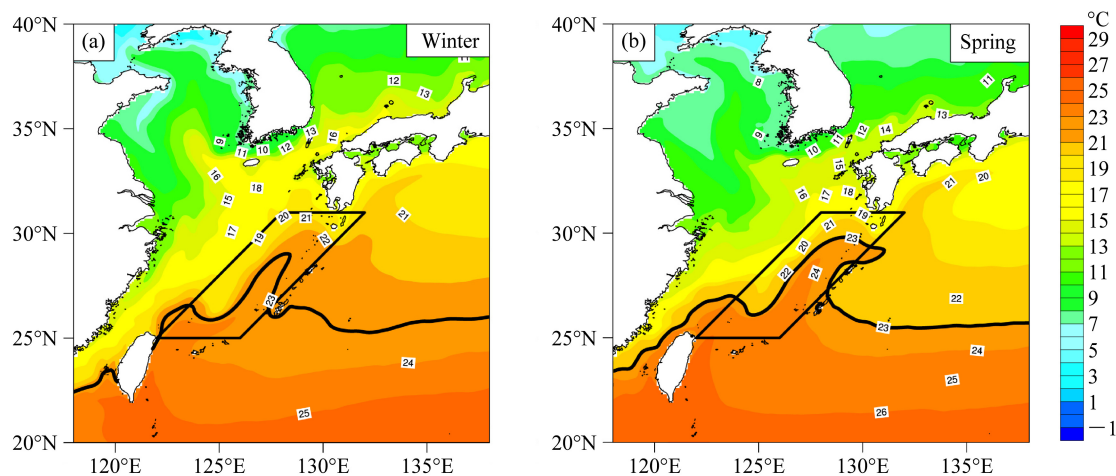


图 4 1949~2007 年 LICOM2.0 模式模拟的东海黑潮海区 (a) 冬季和 (b) 春季季节平均的 SST (填色值, 间隔为 1°C , 粗实线为 23°C 等温线)

Fig. 4 Seasonal mean SST derived from LICOM2.0 [LASG/IPA (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Sciences) Climate systems Ocean Model 2.0] in the East China Sea Kuroshio region from 1949 to 2007 (shading at interval of 1°C ; the thick solid line stands for the 23°C isotherm)

态。1998 年发生的突变与前文的分析结果相似。图 6 为春季黑潮暖舌指数序列演变及其相应的 10 年滑动 t 检验, 春季黑潮暖舌同样存在两次位相的转换。第一次突变发生在 1961 年, 1961 年之前的黑潮暖舌以正距平为主, 暖舌处在偏暖的状态, 其后直到 1996 年, 黑潮暖舌指数以负距平为主, 暖舌处在偏冷的状态, 之后的 1997 年发生了第二次突变, 暖舌指数开始转为正距平为主, 黑潮重新开始处在偏暖的状态。第二次突变发生在 1997/1998 年, 与前文的结果也十分相近。

3.2 东海黑潮暖舌与我国气温的关系

相关性分析表明, 冬季东海黑潮暖舌指数(若无特殊标明, 本节所给出的计算结果均基于 OISST V2 资料)与冬季我国东部气温存在正相关, 且大部分区域达到了 99% 的置信水平(图 7)。其原因可以想见, 是因为我国东部地区毗邻海洋, 与黑潮海域相距较近, 相应的二者温度存在较大的相关性。对春季气温而言, 前一季节黑潮暖舌的影响得到了延续, 冬季暖舌指数与春季气温同样呈正相关, 图 7b 与图 7a 相比较, 东海黑潮暖舌指数与冬季我国东部气温的相关性有所减弱, 但在我国中部及东南沿海地区, 相关系数依然达到了 95% 的置信水平。这是由于海洋的热容量很大, 热力惯性使得海洋的强迫信号得以延续, 因此前一季节的海温异常能够影响随后季节的大气环流(Xiao et al., 2015)。

春季黑潮暖舌指数与我国春季及夏季气温的相关性分析表明, 春季黑潮暖舌与我国中部及南方地区气温存在较好正相关(图 8a), 置信水平为 95%, 浙江、福建及广东部分沿海地区及台湾省置信水平更是达到了 99%。这表明春季黑潮海温偏高、暖舌偏强时, 上述地区气温将偏高, 而黑潮海温偏低、暖舌偏弱时, 那里气温也将偏低。春季黑潮暖舌指数与夏季气温的相关性较弱(图 8b), 只在我国西北地区存在一个正相关区域, 置信水平为 95%。

我们同样使用了 LICOM2.0 模式模拟的黑潮暖舌指数与我国相应季节的气温进行了相关分析, 计算发现模拟的黑潮暖舌指数同样与我国气温呈正相关, 相关系数的分布与分析资料得到的结果相近(图略), 只是显著性略低, 能够达到 90% 的置信水平, 这表明从较长时间的资料来看, 黑潮暖舌与我国气温的相关性同样存在。

李崇银和龙振夏(1997)的研究认为, 黑潮海

域邻近中国, 如果将那里的海温异常视为一种外强迫, 那么从大尺度海气相互作用的角度, 可以将相应的东亚大气环流和气候(如华北汛期降水)的异常视为对 SSTa 的一种邻域响应, 这里东海黑潮暖舌与同期及后期我国气温较为显著的相关关系也是这种邻域响应的一种表现。

3.2.1 冬季东海黑潮暖舌与我国 4 月海陆热力差异的关系

在东亚季风的爆发及我国气候的转变过程中, 4 月是一个十分关键的时间。因为从本质上来说, 季风系统是由海陆热力差异的季节变化导致的风系变化所形成的(陈隆勋等, 2007), 许多研究都已经表明, 4 月是海陆热力差异发生转换的时间(孙秀荣等, 2002; 祝从文等, 2004), 如祝从文等(2004)通过谐波分析发现, 季节循环过程中我国最大降水最早出现在华南地区, 时间大概为 4 月初, 同时达到最大的还有该地区的西南风, 二者的加强与东亚东西向海陆热力差异最早翻转存在联系, 降水依赖于大尺度海陆热力条件。冬季黑潮暖舌与我国气温关系密切, 那么它是否会对我国的海陆热力差异转换产生影响呢? 本文将冬季黑潮暖舌指数与各月份我国陆地及海洋表面气温进行了相关性分析, 结果表明, 冬季黑潮暖舌指数与 4 月我国陆地南方大部分地区以及南海、东海、黄海的表面气温相关性最大(图 9)。陆地上, 长江流域所在省份以及台湾岛的相关系数达到了 99% 的置信水平, 华南大部分地区则达到了 95% 的置信水平; 海洋上, 南海东部、东海、黄海以及黑潮、黑潮延伸体流域的相关系数均达到了 95% 甚至以上的置信水平。在其他月份, 黑潮暖舌指数与我国陆地气温并未表现出明显的相关性(图略)。这是一个十分有趣的现象, 源自冬季的外强迫信号由于储存在海洋中而得以延续至后一年的春季, 却跳过 3 月, 而在 4 月在大气中显著地表现出来, 这其中的物理机制还不清楚, 可能的原因之一是黑潮暖舌的尺度并不是很大, 虽然其向大气的热量释放强度很大, 但要产生对我国东部陆地及海洋广大地区上空大气环流的影响力还需要一定时间量的积累。

根据图 9 中高相关性区域的分布, 本文直接选取大陆地表气温和海洋表面温度来代表热力差异, 提出了一个东亚海陆热力差异指数(I_{LSTD} , the index of land-sea thermal difference), 该指数的计算公式为

$$I_{\text{LSTD}} = T_{\text{Land}} - T_{\text{Sea}}, \quad (1)$$

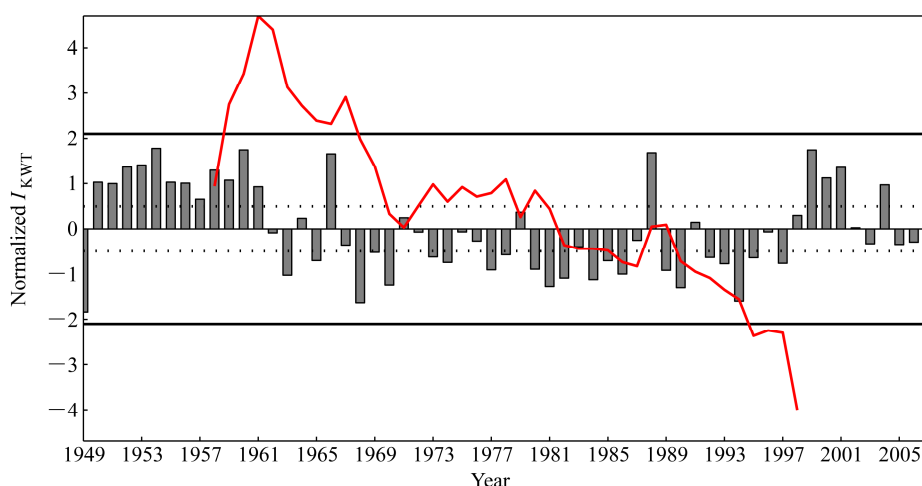


图5 LICOM2.0 模式模拟的 1949~2007 年标准化后的冬季东海黑潮暖舌指数的逐年演变(直方图)及其 10 年滑动 t 检验序列(红色实线)。虚线为指数 0.5 倍标准差线, 黑色实线为 95% 置信水平

Fig. 5 Time series of normalized I_{KWT} derived from LICOM2.0 in the winter from 1949 to 2007 (bar) and its series of 10-year moving t test (red solid line). Dashed lines denote 0.5 standard deviation, black solid lines denote the 95% confidence level

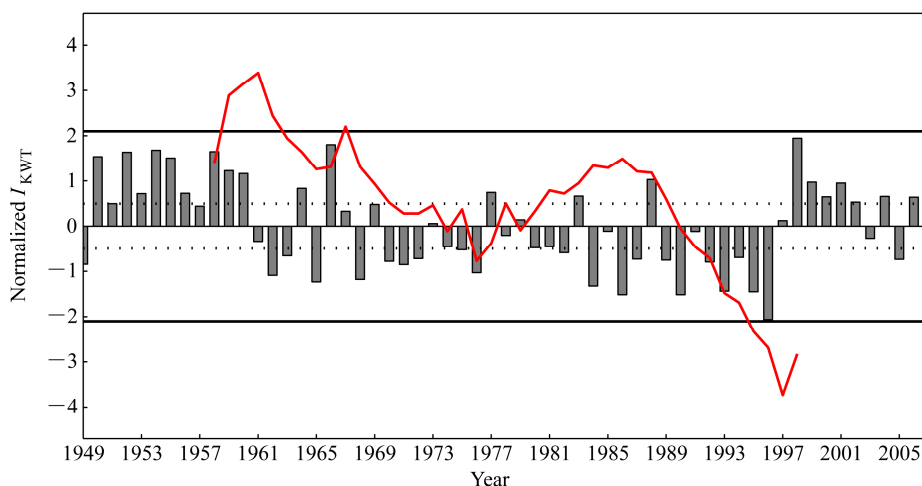


图6 同图 5, 但为春季

Fig. 6 Same as Fig. 5, but in spring.

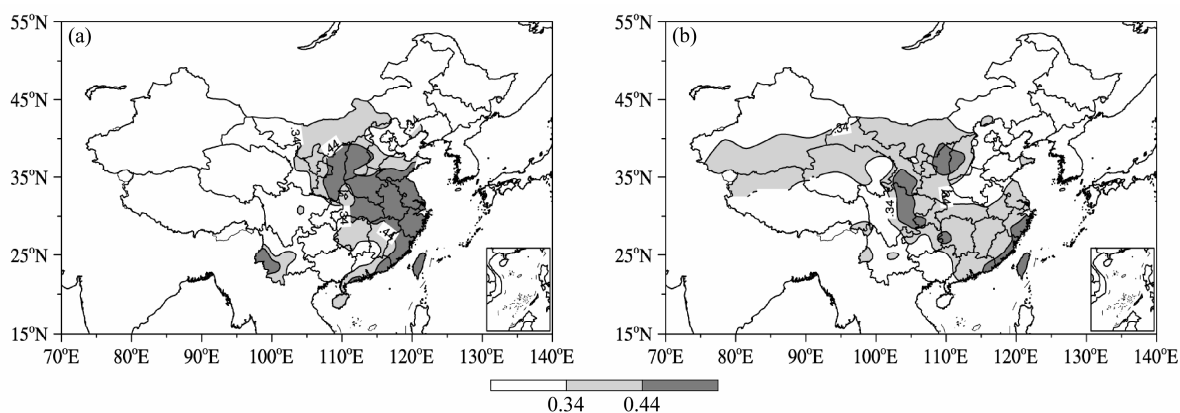


图7 冬季东海黑潮暖舌指数与我国 (a) 冬季和 (b) 春季平均气温的相关性分布。浅灰色阴影区表示相关系数达到 95% 的置信水平, 深灰色阴影区表示相关系数达到 99% 的置信水平

Fig. 7 Distributions of correlation coefficient between winter I_{KWT} and mean temperature in China in (a) winter and (b) spring. The light gray shaded areas indicate where the correlation coefficient is at the 95% confidence level and the heavy gray shaded areas are for values at the 99% confidence level

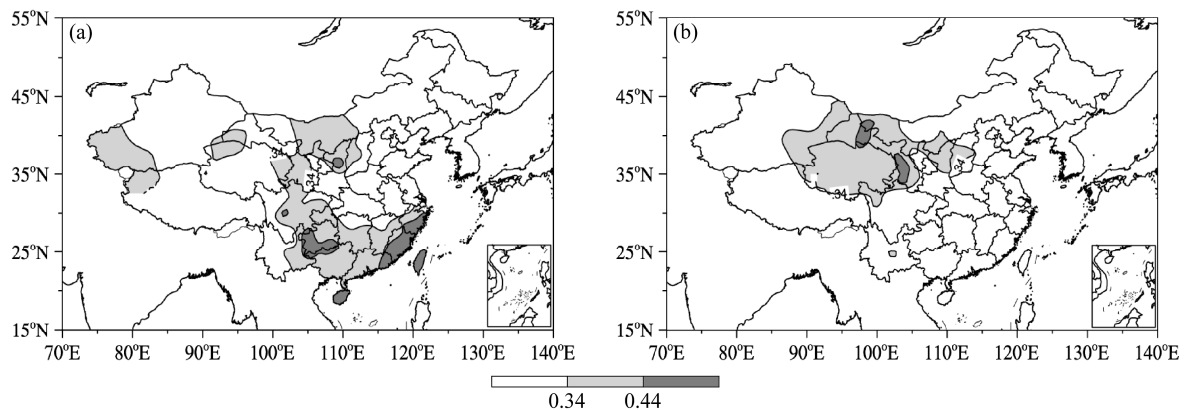


图 8 春季东海黑潮暖舌指数与我国 (a) 春季和 (b) 夏季平均气温的相关性分布。浅灰色阴影区表示相关系数达到 95% 的置信水平, 深灰色阴影区表示相关系数达到 99% 的置信水平

Fig. 8 Distributions of correlation coefficient between spring I_{KWT} and mean temperature in China in (a) spring and (b) summer. The light gray shaded areas are for values at the 95% confidence level and the heavy gray shaded areas are for values at the 99% confidence level

其中, T_{Land} 为东亚季风区 ($22^{\circ}N \sim 35^{\circ}N$, $105^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$) 的区域平均气温, T_{Sea} 为我国东部邻近海域 (包括东海黑潮流域) ($22^{\circ}N \sim 35^{\circ}N$, $115^{\circ}E \sim 130^{\circ}E$) 区域平均的海温, 二者之差表示东西向海陆热力差异, 各区域的分布见图 9。由于经向热力差异与纬向热力差异相比较小 [孙秀荣等 (2002) 将东西向和南北向海陆热力差异的比例系数确定为 4:1], 同时经向热力差异所涉及的区域也不是本文的研究对象, 故本文所定义的指数只考虑纬向也即东西向的海陆热力差异。当 I_{LSTD} 偏大时, 表明海陆热力差异较大, 而 I_{LSTD} 偏小时, 表明海陆热力差异偏小。图 10 给出了气候平均态下东亚海陆热力差指数的时间演变和东亚季风区多年平均逐月降水量同年平均月降水量的偏差, 可以看到指数从 4 月开始从负值变为正值, 说明海陆热力情况发生了翻转, 而我国南方的降水量也从 4 月开始超过全年月平均值, 均与前人的研究一致。表 1 计算了冬季黑潮暖舌指数与各月份东亚海陆热力差异指数的相关系数, 可以看到, 除 8 月外, 黑潮暖舌指数与海陆热力差异指数呈正相关, 4 月、6 月和 9 月的热力差异指数与黑潮暖舌指数的相关系数达到了 95% 的置信水平, 而 4 月的相关系数为 0.50, 是一年中最大的, 达到了 99% 的置信水平。这个结果证实了我们的猜测, 即冬季黑潮暖舌与我国海陆热力差异的翻转存在一定联系。当冬季暖舌偏暖 (处于高指数) 时, 4 月东亚海陆热力差指数偏高, 即东亚地区海陆热力差异偏强, 而当冬季暖舌偏冷 (处于低指数) 时, 4 月东亚海陆热力差指数偏低, 即东亚地区海陆热力差异偏弱。图 11 给出了 1982~

2014 年冬季黑潮暖舌指数和 4 月东亚海陆热力差指数的逐年演变。4 月的海陆热力差指数的变化趋势与冬季暖舌指数十分相似, 同样存在着年代际变化, 在 1997 年发生了气候突变, 在 1996 年之前, 海陆热力差指数以负距平为主, 在 1997 年之后指数以正距平为主, 在 1998 年达到最大, 后呈逐渐减小的趋势。本文同样计算了 LICOM2.0 模式模拟的海温代替分析资料海温后的海陆热力差异指数, 发现得到的指数与分析资料的计算结果具有相近的性质 (图略), 在 4 月发生了热力差异的翻转。

表 1 冬季黑潮暖舌指数与各月份东亚海陆热力差异指数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between winter I_{KWT} and I_{LSTD} in different months

月份	I_{KWT} 和 I_{LSTD} 相关系数
1 月	0.07
2 月	0.30
3 月	0.19
4 月	0.50**
5 月	0.16
6 月	0.36*
7 月	0.25
8 月	-0.20
9 月	0.44*
10 月	0.24
11 月	0.10
12 月	0.20

*表示达到 95% 的置信水平, **表示达到 99% 的置信水平。

3.2.2 我国气温的年代际变化

上面的分析已经表明, 黑潮暖舌在 1996~1997 年发生一次突变, 那么在黑潮暖舌发生突变前后,

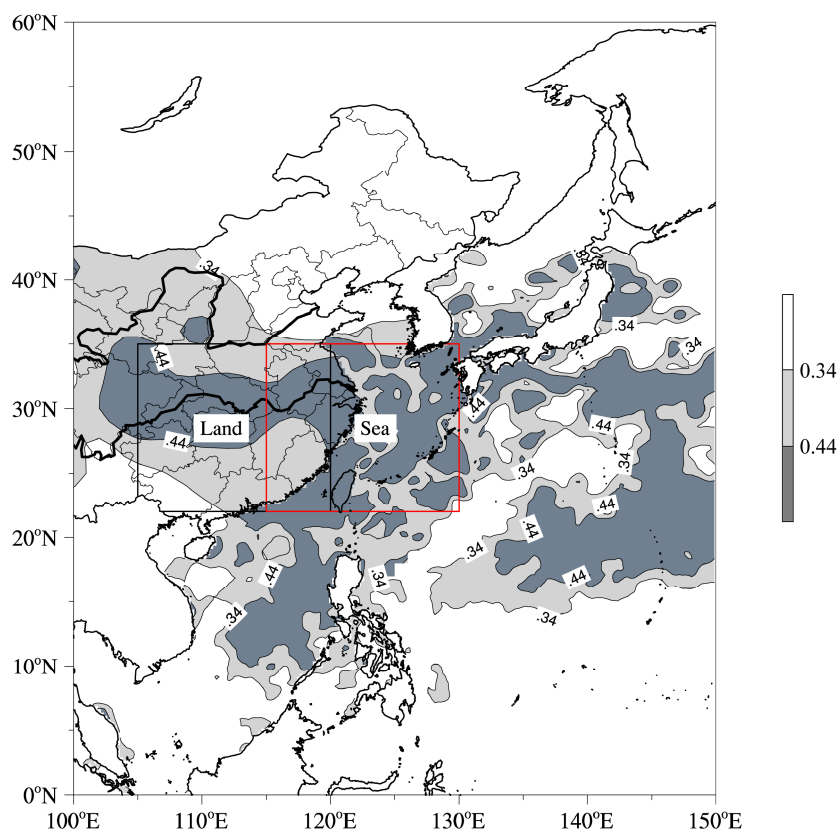


图 9 冬季黑潮暖舌指数与 4 月陆面气温 (SAT) 或 SST 相关系数分布。浅灰色阴影区表示相关系数达到 95% 的置信水平, 深灰色阴影区表示相关系数达到 99% 的置信水平。黑色矩形表示陆地选区范围, 红色矩形表示海洋选区范围

Fig. 9 Distributions of correlation coefficient between winter I_{KWT} and mean SAT (Surface Air Temperature) or SST in East Asia. The light gray shaded areas are for values at the 95% level and the heavy gray shaded areas are for values at the 99% level; the black rectangle represents the range of the selected land area, and the red one represents the range of the ocean area.

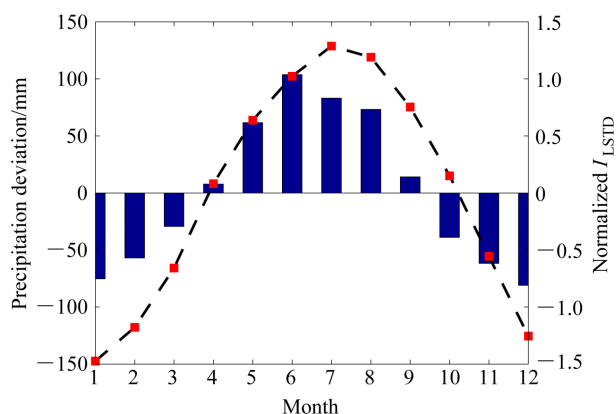


图 10 东亚海陆热力差指数 (标准化) 的时间演变 (虚线) 和东亚季风区 (图 9 中黑色矩形区域) 多年平均逐月降水量偏差 (直方图)

Fig. 10 Time series of climatologically mean I_{LSTD} (normalized; dashed line) and climatologically mean monthly precipitation deviation (bar, units: mm) in East Asian monsoon region (the black rectangle in Fig. 9)

我国冬季和春季气温是否也相应发生了变化呢? 前文关于冬季黑潮暖舌与我国春季海陆热力差异翻转之间联系的分析已经暗示了这一点, 下面将对

此作进一步的分析。图 12a 给出了 1997~2014 年与 1982~1996 年两个时段我国平均的冬季气温的差值场, 可以看到我国呈南正北负的特征, 与 1996 年之前相比, 1997 年以后我国东北、新疆气温降低, 而其他大部分地区气温偏高, 西藏东南部、云南西南部、陕西中部和台湾西南部达到了 99% 的置信水平, 这表明我国冬季气温存在一定的年代际变化, 1997 年之后, 气温有所偏高。杨柳妮和武炳义 (2013) 将我国气温年代际变化归因于欧亚大陆中高纬度的环流系统异常 (图略), 1997 年之后, 东亚北部海平面气压偏高, 北方冷空气进入东北地区, 导致该地区降温; 贝加尔湖地区的气旋式环流异常加强了来自高纬的北风气流, 使东亚北部 (包括新疆地区) 降温; 而东亚急流偏强、位置偏北, 不利于冷空气南下入侵东亚中低纬地区, 导致东亚南部气温偏高。大气环流的年代际变化是多种因素相互作用的结果, 外强迫 (如 SST、海冰等) 在其中起着重要作用 (Wu et al., 2004)。黑潮暖舌的增

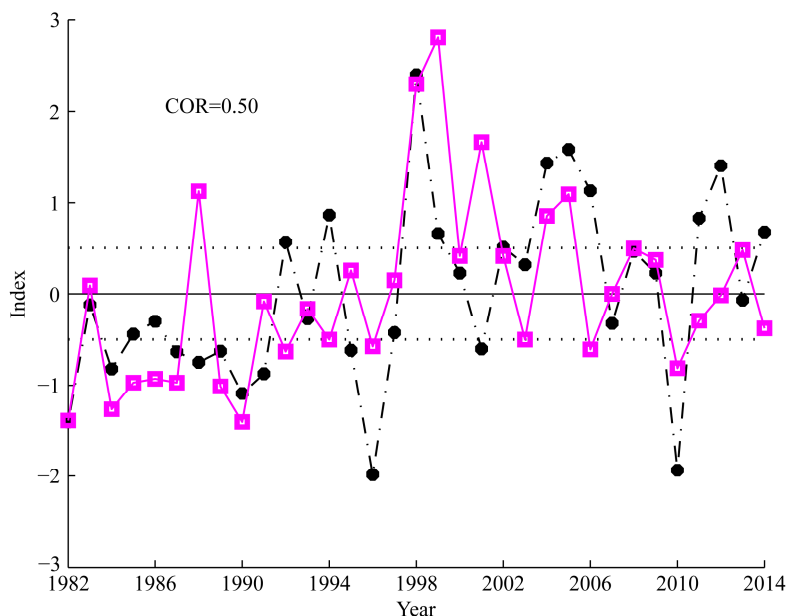


图 11 1982~2014 年冬季黑潮暖舌指数 (红色实线) 和 4 月东亚海陆热力差指数 (黑色点划线) 的逐年演变, 虚线为指数 0.5 倍标准差线
Fig. 11 Time series of winter I_{KWT} (red solid line) and I_{LSTD} in April (black dash-dotted line), dashed lines denote 0.5 standard deviation

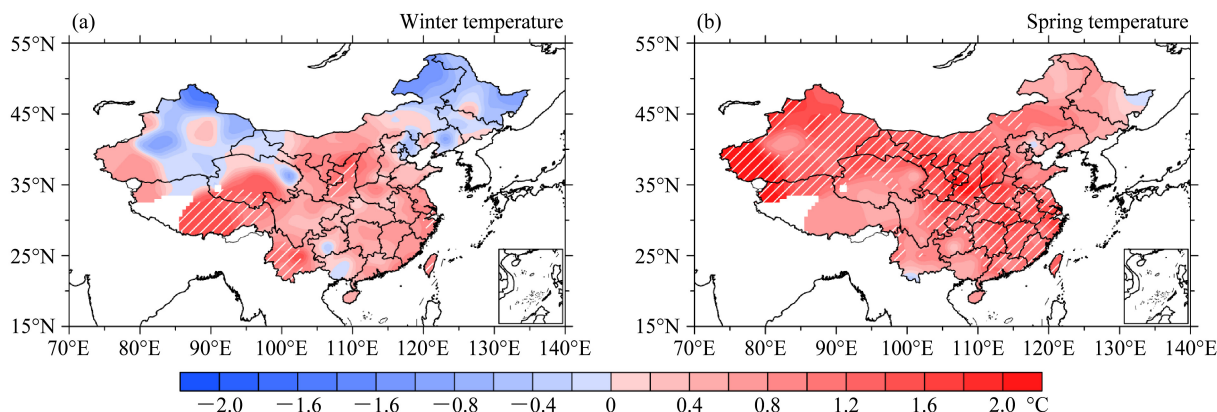


图 12 1997~2014 年与 1982~1996 年我国 (a) 冬季、(b) 春季气温的差值场, 白色斜线表示达到了 99% 的置信水平
Fig. 12 Composite differences in (a) winter temperature and (b) spring temperature between 1997~2014 and 1982~1996 in China. The white-line shaded areas are for values at the 99% confidence level

强可增大我国冬季的海陆热力差异, 有利冬季北风增强。这种黑潮暖舌的的强迫与中高纬大气环流演变的作用可能使我国冬季较高纬度地区温度偏低, 而中低纬度地区气温偏高。

图 12b 给出了 1997~2014 年与 1982~1996 年两个时段我国平均的春季气温的差值场, 与冬季相比, 全国表现为一致的正异常, 春季气温的年代际突变表现的更加明显, 除东北和西南小部分地区外, 均达到了 99% 的置信水平, 这说明, 我国春季气温同样存在一定的年代际变化, 1997 年之后, 气温显著偏高。

4 东海黑潮暖舌发生变化的可能原因初步分析

肖栋和李建平 (2007) 发现全球海表温度场经历的最近的年代际突变发生在 1997 年, 并且太平洋上, 海温各个时期的年代际模态均表现为 PDO 特征, PDO 在 1997 年也发生了年代际的突变, 这表明 PDO 对海温场的年代际变化有重要影响。图 13a 给出了冬季东海黑潮暖舌指数进行 7 年低通滤波前后与 PDO 指数 (3 月滑动平均) 的超前滞后相

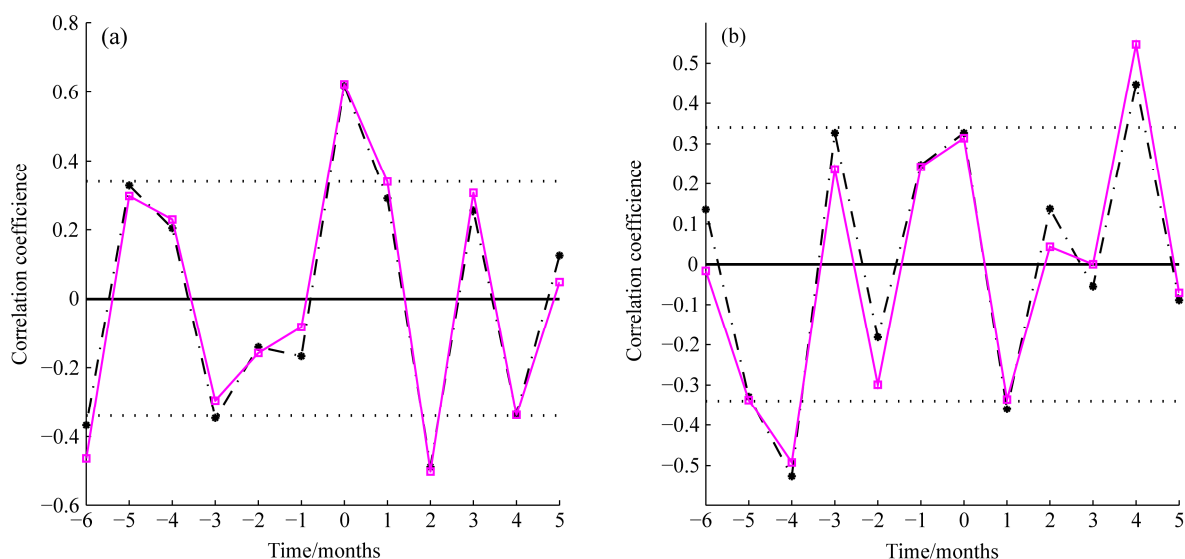


图 13 冬季东海黑潮暖舌指数与 (a) PDO 指数 (3 月滑动平均) 和 (b) NPGO 指数 (3 月滑动平均) 的超前—滞后相关。点划线为暖舌指数原始序列, 红实线为暖舌指数 7 年低通滤波后的序列, 虚线为 95% 的置信水平, 横坐标为负 (正) 数表示 PDO 或 NPGO 指数超前 (滞后) 黑潮暖舌指数

Fig. 13 Lag correlations of winter I_{KWT} with (a) PDO index (3-month moving average) and (b) NPGO (North Pacific Gyre Oscillation) index (3-month moving average). The dash-dotted line indicates using the raw I_{KWT} and the red solid line indicates using the 7-year-low-pass I_{KWT} , dash lines denote the 95% confidence level; the positive horizontal axis represents the Kuroshio warm tongue index lags other indices, and the negative represents the Kuroshio warm tongue index leads other indices

关。可以看到, 冬季黑潮暖舌指数与相同时段的 PDO 指数呈显著的正相关, 相关系数达到了 95% 的置信水平。Andres et al. (2009) 发现 1993 年以来年平均的 PDO 指数与东海黑潮中部主要断面的年流量输送呈正相关并达到了 99% 的置信水平。PDO 指数与西边界流流量输送的正相关在长时间的资料中也存在 (Kawabe et al., 2001)。这其中可能的机制为: 西风的增强, 可通过增加海洋向大气释放的热量和向南的埃克曼 (Ekman) 输送, 降低北太平洋中部的 SST (Seager et al., 2001), 这一地区 SST 的降低对应着 PDO 的暖位相, 即 PDO 指数的正值, 增强的负风应力旋度在北太平洋副热带流涡中强迫出的向南斯维尔德鲁普 (Sverdrup) 流也偏强 (Sverdrup, 1947), 而向北流动的东海黑潮的增强正是补偿了这一向南的海流 (Andres et al., 2009)。PDO 指数滞后黑潮暖舌指数两个月存在显著的负相关, 相关系数也达到了 95% 的置信水平, 这可能是因为黑潮暖舌增强表明黑潮流量输送也同时增强, 按黑潮主轴流速平均为 0.5 m/s 计算 (温娜和刘秦玉, 2007), 两个月后输送的热量将达到黑潮延伸体甚至更加以北的地区, 从而增强了北太平洋中部的 SST, 这对应着 PDO 的冷位相, 即 PDO 指数的负值, 这样就与同时的正相关的过程一起构

成了一个完整的反馈机制。对春季东海黑潮暖舌指数和 PDO 指数进行超前滞后相关分析发现 (图略), PDO 指数超前春季黑潮暖舌两个月存在显著的正相关, 相关系数达到了 95% 的置信水平。我们注意到, 春季前两个月正是在冬季之中, 这与图 13a 所得到的结论并不矛盾, 也同时说明 PDO 自冬季开始作用于东海黑潮, 这一影响能够延续到随后的春季。

为进一步说明 PDO 影响的重要性, 图 13b 也给出了冬季东海黑潮暖舌指数进行 7 年低通滤波前后与 NPGO 指数 (3 月滑动平均) 的超前滞后相关。可以看到, NPGO 指数超前冬季黑潮暖舌 4 个月存在最大负相关, 相关系数达到了 95% 的置信水平, 除了超前负相关, NPGO 指数滞后冬季黑潮暖舌指数 4 个月存在最大正相关, 相关系数达到了 95% 的置信水平。而春季黑潮暖舌指数与 NPGO 指数的相关性并不十分显著 (图略), 这表明在年代际尺度上, 春季黑潮暖舌受到 NPGO 的调制, 但这种影响并不是主要的。

5 结论与讨论

本文选择黑潮暖舌最为典型的冬季和春季作

为研究的时段,使用分辨率的海温资料(OISST V2)定义了一个黑潮暖舌指数,并利用这一指数分析了黑潮暖舌与我国气温的关系,初步探讨了PDO、NPGO等造成黑潮暖舌变化的可能原因。同时,为进一步验证分析资料所得结果,我们还比较分析了使用LICOM2.0海洋模式模拟得到的海温资料计算得到的暖舌指数,得到如下主要结论:

(1) 冬季东海黑潮暖舌存在明显的年际和年代际变化,在1996年发生了一次突变,在此之前暖舌处在偏冷的状态,1996年之后转为处在偏暖的状态。春季东海黑潮暖舌的年际和年代际变化也很明显,其突变发生在1997年,与冬季相似,暖舌从冷状态转变为暖状态。这一气候态的转变在LICOM2.0模式模拟的长时间的黑潮暖舌序列中也存在,与分析资料有较好的一致性。

(2) 我国冬季和春季气温对黑潮暖舌存在邻域响应。冬季东海黑潮暖舌指数与冬季我国东部气温存在正相关,并且由于海洋巨大的热惯性,这一相关性能够延续到次年春季。进一步的研究发现,冬季黑潮暖舌指数与我国4月海陆热力差异指数也存在显著的正相关。当冬季暖舌偏强(弱)时,4月海陆热力差异指数偏高(低),即东亚地区海陆热力差异偏大(小)。春季黑潮指数与春季我国中部及南方地区气温也存在正相关,当春季黑潮暖舌偏强(弱)时,上述地区气温将偏高(低),但春季黑潮暖舌与夏季气温相关性较弱,只在我国西北地区存在一个较显著的正相关区域。我国春季气温在1997年前后发生的明显转折,可能与东海黑潮暖舌的状态转变有关。

(3) PDO和黑潮暖舌之间的相互作用存在一个反馈机制。西风的增强,可通过使海洋向大气释放热量增加和向南的埃克曼(Ekman)输送,降低北太平洋中部的SST,而这一地区SST的降低对应着PDO的暖位相,即PDO指数的正值。增强的负的风应力旋度在北太平洋副热带流涡中强迫出的向南斯维尔德鲁普(Sverdrup)流也偏强,而向北流动的东海黑潮的增强正是补偿了这一向南的海流。黑潮增强后经过两个月将大量热量输送至北太平洋中部,增强了这一地区的SST,而这对应着PDO的冷位相,即PDO指数的负值。在年代际尺度上,黑潮暖舌也受到NPGO的调制,但这种影响不及PDO的影响显著。

需要指出的是,由于资料长度的限制黑潮暖舌

在1996/1997年发生的年代际转换还需要进一步研究;特别是中纬度的海气相互作用是一个非常复杂的过程,需要研究各种类型的相互作用及其影响。

参考文献 (References)

- Andres M, Park J H, Wimbush M, et al. 2009. Manifestation of the Pacific Decadal Oscillation in the Kuroshio [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (16): L16602, doi: 10.1029/2009GL039216.
- 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*, 26 (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.
- 陈隆勋, 张博, 张瑛. 2007. 东亚季风研究的进展 [J]. *应用气象学报*, 17 (6): 711–724. Chen Longxun, Zhang Bo, Zhang Ying. 2007. Progress in research on the East Asian monsoon [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17(6): 711–724.
- 范可, 王会军. 2007. 北京沙尘频次的年际变化及其全球环流背景分析 [J]. *地球物理学报*, 49 (4): 1006–1014. Fan Ke, Wang Huijun. 2007. Interannual variability of dust weather frequency in Beijing and its global atmospheric circulation [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49 (4): 1006–1014.
- Griffies S M, Biastoch A, Böning C, et al. 2009. Coordinated ocean-ice reference experiments (COREs) [J]. *Ocean Modelling*, 26 (1–2): 1–46, doi: 10.1016/j.ocemod.2008.08.007.
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (8): L080707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 522 (7556): 299–308, doi: 10.1038/nature14504.
- Kawabe M. 2001. Interannual variation of sea level at the Nansei Islands and volume transport of the Kuroshio due to wind changes [J]. *J. Oceanogr.*, 57 (2): 189–205, doi: 10.1023/A:1011195224933.
- 李崇银, 龙振夏. 1997. 东亚夏季大气环流和气候对冬季海温异常的邻响应和遥响应 [J]. *气候与环境研究*, 2 (1): 39–47. Li Chongyin, Long Zhenxia. 1997. The border and remote responses of the summer circulation and climate in East Asia to SSTA in winter [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2 (1): 39–47.
- 刘传凤, 高波. 2001. 我国南方春季低温冷害气候及其大气环流特征 [J]. *热带气象学报*, 17 (2): 179–187. Liu Chuanfeng, Gao Bo. 2001. Climate of chilling damage in spring in southern China and its atmospheric circulation features [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 17 (2): 179–187.
- Liu H L, Lin P F, Yu Y Q, et al. 2012. The baseline evaluation of LASG/IAP Climate system Ocean Model (LICOM) version 2.0 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26 (3): 318–329, doi: 10.1007/s13351-012-0305-y.
- Liu H L, Yu Y Q, Lin P F, et al. 2014. High-resolution LICOM[M]/Flexible

- Global Ocean–Atmosphere–Land System Model. Berlin Heidelberg: Springer, 321–331, doi: 10.1007/978-3-642-41801-3_38.
- 邱金晶, 孙照渤. 2013. 夏季索马里越赤道气流垂直结构的变化特征及其与东亚夏季风活动的关系 [J]. 大气科学, 37 (5): 1129–1142. Qiu Jinjing, Sun Zhaobo. 2013. Variation characteristics of the vertical structure of the summer Somali cross-equatorial flow and its relationship with East Asian summer monsoon activity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1129–1142, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12174.
- 邱金晶, 孙照渤, 邓伟涛. 2014. 夏季索马里越赤道气流垂直结构的年代际变化 [J]. 气象学报, 72 (2): 318–336. Qiu Jinjing, Sun Zhaobo, Deng Weitao. 2014. The interdecadal variations of the vertical structure of the summer Somali cross-equatorial flow [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (2): 318–336, doi: 10.11676/qxxb2014.005.
- Seager R, Kushnir Y, Nair 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: 4249–4265, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<4249:WDSITL>2.0.CO;2.
- 孙秀荣, 陈隆勋, 何金海. 2002. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系 [J]. 气象学报, 60 (2): 164–172. Sun Xiurong, Chen Longxun, He Jinhai. 2002. Index of land–sea thermal difference and its relation to interannual variation of summer circulation and rainfall over East Asian [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 164–172.
- Sverdrup H U. 1947. Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the eastern Pacific [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 33 (11): 318–326, doi: 10.1073/pnas.33.11.318.
- 王闪闪, 管玉平, Li Zhijin, 等. 2012. 黑潮及其延伸区海表温度变化特征与大气环流相关性的初步分析 [J]. 物理学报, 61 (16): 169201. Wang Shanshan, Guan Yuping, Li Zhijin, et al. 2012. Preliminary analyses on characteristics of sea surface temperatures in Kuroshio and its extension and relations to atmospheric circulations [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (16): 169201.
- 王兴智, 李崇银. 2013. 春季东海黑潮海表温度与风场的年代际变化特征 [J]. 海洋学研究, 31 (4): 10–16. Wang Xingzhi, Li Chongyin. 2013. Decadal variation of spring SST and wind field in the East China Sea Kuroshio [J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 31 (4): 10–16.
- 温娜, 刘秦玉. 2007. 台湾以东黑潮流量变异与冬季西北太平洋海洋—大气相互作用 [J]. 海洋与湖沼, 37 (3): 264–270. Wen Na, Liu Qinyu. 2007. Winter ocean–atmosphere interaction in the Northwest Pacific [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 37 (3): 264–270.
- Wu B Y, Wang J, Walsh J. 2004. Possible feedback of winter sea ice in the Greenland and Barents Seas on the local atmosphere [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1868–1876, doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1868:PFOWSI>2.0.CO;2.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia [J]. J. Climate, 26 (15): 5523–5536, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00524.1.
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态 [J]. 大气科学, 31 (5): 839–853. Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 839–853, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.08.
- Xiao Z N, Shi W J, Yang P. 2015. Possible causes of the interdecadal transition of the Somali Jet around the late 1990s [J]. J. Meteor. Res., 29 (2): 214–227, doi: 10.1007/s13351-015-4103-1.
- 谢磊, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2013. 夏季索马里越赤道气流垂直结构特征及其与南亚夏季风的关系 [J]. 气象科学, 33 (1): 37–42. Xie Lei, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2013. Vertical structure of summer Somali cross-equatorial flow and its relationship with South Asian monsoon [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33 (1): 37–42, doi: 10.3969/2012jms.0125.
- Xie S P, Hafner J, Tanimoto Y, et al. 2002. Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (24): 81–1–81–4, doi: 10.1029/2002GL015884.
- 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: 4959–4972, doi: 10.1175/JCLI-D-10-05034.1.
- Xu M M, Xu H M. 2015. Atmospheric responses to Kuroshio SST front in the East China Sea under different prevailing winds in winter and spring [J]. J. Climate, 28 (8): 3191–3211, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00675.1.
- 杨柳妮, 武炳义. 2013. 东亚冬季气温的年代际变化及其可能成因分析 [J]. 科学通报, 58 (26): 2728–2736. Yang Liuni, Wu Bingyi. 2013. Interdecadal variations of the East Asian winter surface air temperature and possible causes [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (32): 3969–3977, doi: 10.1007/s11434-013-5911-2.
- Yu Y Q, Liu H L, Lin P F. 2012. A quasi-global $1/10^\circ$ eddy-resolving ocean general circulation model and its preliminary results [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (30): 3908–3916, doi: 10.1007/s11434-012-5234-8.
- 袁杰, 魏凤英, 巩远发, 等. 2013. 关键区海温年代际异常对我国东部夏季降水影响 [J]. 应用气象学报, 24 (3): 268–277. Yuan Jie, Wei Fengying, Gong Yuanfa, et al. 2013. Effects of key regional SST inter-decadal anomaly on summer precipitation in Eastern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (3): 268–277.
- 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]. 热带气象学报, 23 (2): 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 (2): 189–195.
- 祝从文, 陈隆勋, 何金海. 2004. 春夏季节转换中西太平洋副热带高压东移与大尺度环流和温度场变化关系 [J]. 热带气象学报, 20 (5): 493–504. Zhu Congwen, Chen Longxun, He Jinhai. 2004. The eastward propagating western Pacific subtropical high and its relationships with large-scale circulation and temperature during spring to summer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (5): 493–504.