

杨明浩, 王丽琼, 左瑞亭. 2018. 冬季黑潮延伸体海温异常结构及其与热带太平洋海温变化关系分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (1): 113–123. Yang Minghao, Wang Liqiong, Zuo Ruiting. 2018. Analysis on SST anomaly structure in the Kuroshio Extension in winter and its relationship to tropical Pacific SST variation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (1): 113–123, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17007.

# 冬季黑潮延伸体海温异常结构及其与热带太平洋海温变化关系分析

杨明浩<sup>1</sup> 王丽琼<sup>1,2</sup> 左瑞亭<sup>1</sup>

1 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

2 南京雨后地软环境技术有限公司, 南京 210013

**摘要** 基于 NASA 遥感系统提供的 2003~2015 年全球高分辨率海表温度资料, 应用经验正交函数分析、时滞相关分析等方法, 对北太平洋冬季黑潮延伸体区海温异常特征及其与热带海表温度的可能关系进行了初步分析。研究发现, 冬季延伸体区的海温异常主要表现为两类结构特征, 其一为上游区域发展型, 包括海盆尺度一致性变化的季节模态和纬向反位相的收缩型结构; 其二为纬向延展型, 包括分叉东扩结构和通道东扩结构, 且该两结构型在 2010 年前反位相, 使得 2006 年前暖异常东扩路径基本控制在 36°N 以南, 其后至 2010 年期间, 暖异常东扩路径偏北, 而 2010 年后结构型转为同位相, 暖异常东扩路径偏北。分叉东扩结构表现为与热带海温变化紧密相关, 进一步的时滞相关分析与合成分析表明, 热带太平洋不同地区对中纬度海温分叉东扩的影响存在差异, Niño3 区海温异常超前延伸体区分叉东扩模态约 1~2 个月, 而 Niño3.4 区及 Niño4 区则与延伸体区海温分叉东扩保持前后各约 3 个月的宽谱同期负相关, 或可表明 El Niño 的东部型和中部型对中纬度延伸体暖流分叉东扩存在超前和同期相关影响, 且中部型影响更显著。

**关键词** 黑潮延伸体 El Niño 经验正交函数分析 (EOF) 相关分析 海温异常

**文章编号** 1006-9585 (2018) 01-0113-11

**中图分类号** P732.5

**文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17007

## Analysis on SST Anomaly Structure in the Kuroshio Extension in Winter and Its Relationship to Tropical Pacific SST Variation

YANG Minghao<sup>1</sup>, WANG Liqiong<sup>1,2</sup>, and ZUO Ruiting<sup>1</sup>

1 Institute of Meteorological and Oceanographic, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

2 Nanjing Star-jelly Environmental Consultants Co. Ltd, Nanjing 210013

**Abstract** Based on the high-resolution SST dataset from 2003 to 2015 provided by the remote sensing system of NASA, the possible relationship between wintertime SST anomaly (SSTA) characteristics over the Kuroshio Extension in the North Pacific and tropical SST is investigated in this study. The methods used include empirical orthogonal function analysis and time-lagged correlation analysis, etc. The results show that the wintertime SSTA over the Kuroshio Extension presents two types of structural characteristics, i.e., the type of upstream area development and the type of zonal extension. The latter involves two zonal expansion modes with the bifurcation structure and the channeling

收稿日期 2017-01-10; 网络预出版日期 2017-10-27

作者简介 杨明浩, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 气候数值模拟与预测。E-mail: minghaoyoung@126.com

通讯作者 左瑞亭, E-mail: ratinzuo@126.com

资助项目 国家自然科学基金 41490642

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41490642)

structure, respectively. The two expansion modes are in opposite phase and in the same phase before and after 2010, respectively. The eastward extension of the warm anomalies was limited to the south of 36°N before 2006, whereas the extension shifted to the northern path during 2006 to 2010 and after 2010. The bifurcation extending mode are closely related to tropical SST variation. Further studies by time-lag correlation analysis and composite analysis indicate diverse impacts on the bifurcation mode of SST over different regions in the tropical Pacific. Niño3 SST index led the bifurcation mode over the Kuroshio Extension SSTA by 1–2 months, while Niño3.4 and Niño4 indexes are correlated with the bifurcation mode at a lead and lag of 3-month respectively, which indicates that the eastern type and central type of El Niño may have the lead and concurrent correlation relationships with the bifurcation mode, respectively, and the latter is more remarkable.

**Keywords** Kuroshio extension, El Niño, Empirical orthogonal function (EOF), Correlation analysis, SST anomaly

## 1 引言

黑潮作为具有强斜压性的太平洋西边界暖流(冯士筰等, 1999), 是北太平洋上涡动动能最大的区域(Wyrki et al., 1976)。黑潮延伸体在从日本南部海域向东出流到太平洋的过程中, 不仅伴随着大量的蜿蜒流和中尺度涡(Qiu and Chen, 2005), 而且它本身的热力和动力性质也在发生着显著变异。其中热力变异是延伸体出流过程最为显著的特征之一, 并且北太平洋热传递主要集中在黑潮及其延伸体区(Kwon et al., 2010)。由于热力变异尤其是海表温度异常是直接影响大气热力动力状态的关键因素(Joyce et al., 2009; Tokinaga et al., 2009), 延伸体区也因此成为中纬度海气相互作用的强信号区(赵永平等, 1997; Scharffenberg and Stammer, 2008)。相关研究表明, 延伸体系统存在纬向延展型和收缩型两种基本状态(Qiu, 2000), 前者对应延伸体流轴偏北及海表暖异常, 后者则相反, 两基本型存在年代际尺度的震荡转换。不少学者指出, 延伸体海温异常会显著影响风暴轴与急流的位置和强度、气旋的数量、东亚季风爆发强度。如冯劭华(2014)、冯劭华等(2015)指出黑潮延伸体增强时北太平洋急流和斜压不稳定率增强, 有利于大气风暴轴强度的加强, 而当黑潮延伸体位置偏北(南)时则大气风暴轴偏北(南), 但当黑潮延伸体位置偏东(西)时则北太平洋风暴轴西退(东移)。慈航和罗德海(2007)研究表明, 延伸体海表温度正异常年份在北太平洋的气旋频数要略小于负异常年份, 气旋活动区域明显偏北。王晓丹等(2011)发现冬季黑潮延伸体海温异常增暖将导致东亚夏季风增强北推。

中纬度延伸体海温异常引起的海气相互作用机制与热带地区存在很大差异, 不同于热带洋面海温异常的热对流影响机制(Bjerknes, 1966, 1972;

Shukla and Wallace, 1983), 越来越多的研究认为(Peng and Whitaker, 1999; An and Wang, 2005; 温娜, 2006), 中纬度海温异常对大气的作用主要通过影响大气的斜压性来实现, 因此下垫面的热力非均匀性即海温异常的结构至关重要。此外, 黑潮及中纬度延伸体海温异常与热带海气相互作用信号, 尤其是与 El Niño 的关系研究也是热点问题。梅士龙(2004)、梅士龙等(2006)研究指出 El Niño(La Niña)事件当年 11 月至次年 12 月期间黑潮海区海温多为正(负)异常。穆松宁等(2004)发现, El Niño 对黑潮海区经向风应力影响的“关键时段”为秋、冬季至次年初夏时期, 对纬向风应力则为冬季至次年春季。孙楠楠(2009)指出当 Niño3 区域海表温度出现较明显的正异常时, 黑潮海表温度则会出现滞后的升高, 二者相关系数为 0.6, 滞后时间为 5~9 个月。Zhang and Chen(2006)分析了黑潮的年际和季节变化, 认为由于北赤道流影响, 黑潮 SST 异常与 El Niño 存在正相关关系。这些研究多集中于黑潮及其中纬度延伸体海温异常与热带海气相互作用的讨论(赵永平和 McBean, 1995, 1996; 李忠贤, 2004; Nonaka et al., 2006; 王闪闪等, 2012), 然而黑潮延伸体区海温异常的分布结构并不十分清楚, 而且黑潮延伸体区海温异常分布结构与热带信号的关系也有待研究。

鉴于此, 本文将基于高分辨海温资料和经验正交函数, 获取冬季黑潮延伸体区的海温异常主要结构模态, 分析其空间结构和时间演变特征, 探寻可能影响这些模态结构的关键敏感海域, 并对热带太平洋海温异常与延伸体海温异常的可能关系进行初步讨论。

## 2 资料与方法

本文采用 NASA 遥感系统提供的基于云穿透星载微波辐射计和红外探测的最优插值全球海表

温度资料(MW\_IR)([www.remss.com/sst/microwave\\_oi\\_sst\\_data\\_description.html](http://www.remss.com/sst/microwave_oi_sst_data_description.html) [2016-12-30]), 选取该资料时段为2003~2015年全球逐日数据, 分辨率为9 km。相比大气中的天气系统, 海洋系统的空间尺度更小, 若用常规的海温资料很难对海温的异常结构进行研究, 与其他普通海温资料相比, MW\_IR资料具有更高的空间分辨率, 有助于更清晰地认识延伸体区海温异常结构。还有NOAA提供的同时段的逐月太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数、 $2.5^\circ$ (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)逐月海平面气压场, 以及Hadley Centre提供的 $1^\circ$ (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)逐月全球海温资料HadISST。

本文采用的研究方法有经验正交分解(EOF)分析、相关分析、时滞相关分析以及合成分析等。

### 3 冬季黑潮延伸体海温异常的EOF分析

#### 3.1 冬季黑潮延伸体海温异常的EOF模态分解

黑潮延伸体是太平洋高热西边界流的延续, 由于热力辐射作用, 太平洋海区海表温度纬向差异远小于经向差异, 因此纬向梯度较弱而经向梯度较大, 尤其是考虑到延伸体暖流与亲潮的交汇作用形成的海洋温度锋区, 将会使得经向海温梯度更为显著。为捕捉延伸体的水平温度分布特征, 本文计算了北太平洋海表温度的水平梯度强度:

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{r \cos \phi \partial \lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{r \partial \phi}\right)^2}, \quad (1)$$

其中,  $T$ 代表海温,  $r$ 代表地球半径,  $\lambda$ 为经度,  $\phi$ 为纬度。经公式(1)计算得到气候态冬季海温的梯度分布情况(图略), 海表温度梯度主要表现为显著的经向梯度, 冬季北太平洋海表温度梯度存在南北两个准纬向大值区, 北支约在 $36^\circ\text{N} \sim 42^\circ\text{N}$ , 南支较弱约在 $27^\circ\text{N}$ 附近, 该两大值区对应延伸体暖水区的南北边界, 而北侧强大的海温梯度区即对应海洋温度锋。为充分考虑海洋锋区影响, 本文设定研究的延伸体区域取为( $25^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ ,  $140^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{W}$ ), 该区域既完整包括了海洋温度锋南侧的延伸体暖水区, 也同时包括了北侧完整的海温锋区, 以反映延伸体暖水与亲潮冷流的交汇作用。

针对上述研究区域, 利用2003~2015年共13年全球9 km分辨率微波反演海温资料, 取其各

年份冬季12月、1月、2月的月平均海表温度距平, 去掉季节循环后进行EOF分解。表1给出了海温距平的分解结果, 前4个模态的累积方差贡献率已达46.8%, 可以代表海温异常的主要成分。

表1 冬季延伸体区海表温度异常EOF分解前4个模态的情况

Table 1 The four leading modes of the EOF of sea surface temperature anomaly (SSTA) in the Kuroshio Extension region during the winter

	方差贡献	累积方差贡献
模态1	15.1%	15.1%
模态2	14.2%	29.3%
模态3	11.0%	40.3%
模态4	6.5%	46.8%

#### 3.2 冬季黑潮延伸体海温异常的结构特征分析

图1给出了延伸体区海温异常第一模态的空间分布、对应的时间系数及5点平滑趋势线。从图1a中可以看出, 第一模态的空间分布反映的是研究区域的海温异常基本呈一致性变化, 即当模态一处于正位相时, 几乎整个黑潮延伸体区海温异常偏冷, 当处于负位相时则一致偏暖, 且在 $39^\circ\text{N}$ 附近有海温异常的高值区。由图1b可得, 时间系数在2006~2012年为负值, 其余年份为正值。通过与NOAA提供的PDO指数求同期相关, 得到相关系数为0.8[考虑到两个时间序列具有较强的自相关性, 采用了Bretherton et al.(1999)的方法, 重新计算了有效自由度, 并通过了0.01显著性检验], 且有研究(Kelly and Dong, 2004; Dawe and Thompson, 2007)表明, 该模态的变化往往与太平洋大范围的年代际变化有关, 即反映了太平洋年代际震荡PDO现象。

图2给出了模态二的空间分布及时演变。由空间模态可以看出, 该模态反映了约以 $150^\circ\text{E}$ 为界东西反位相型异常模态。相关研究表明, 该模态的分布正好对应太平洋中高纬地区的阿留申低压和副热带高压大气系统在洋面热力性质的变化差异, 即该模态往往由大尺度的太平洋天气系统变化所决定(Latif and Barnett, 1994; Chelton and Schlax, 1996; Ceballos et al., 2009; Qiu and Chen, 2010)。通过NOAA提供的逐月海表面气压资料, 按郭冬和孙照渤(2005)采用的北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)指数计算方法, 得到第二模态与NPO的相关性为0.35, 通过了0.05显著性检验, 即第二模态可能会受到NPO的影响。2003~2009年为

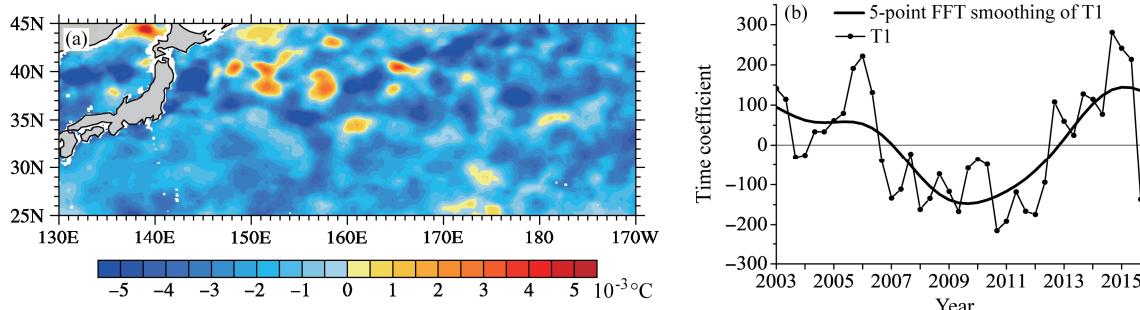


图 1 冬季黑潮延伸体区海温异常 EOF 分解 (a) 第一模态空间分布及其 (b) 时间系数序列 (图中曲线是其快速傅里叶变换)

Fig. 1 Distribution of (a) the first EOF mode of SSTA in the Kuroshio Extension region during the winter and (b) its time coefficient series [fast Fourier transform (FFT) result is represented by the curve]

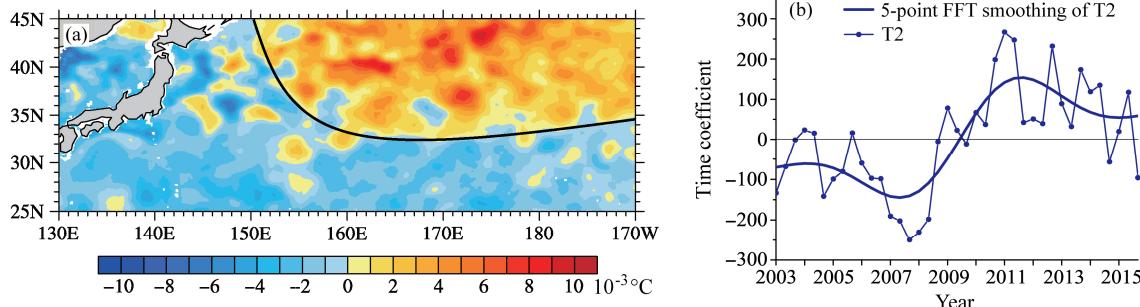


图 2 同图 1, 但为第二模态

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the second EOF mode

负位相期, 对应北太平洋中西部海域 $150^{\circ}\text{E}$ 以西为SST暖异常, 而 $150^{\circ}\text{E}$ 以东为冷异常。这种格局使得黑潮延伸体暖海流在日本列岛东侧至 $150^{\circ}\text{E}$ 范围内得到增温, 而在 $150^{\circ}\text{E}$ 以东的阿留申低压海域受到较大抑制, 海温迅速冷却, 不利于继续向太平洋中部出流。而在2009~2015年基本上以正位相为主, 表示延伸体高热海流在日本列岛南部海域向东出流时即被迅速冷却, 热量减少, 不利于其暖流的继续向东扩展。因此, 该模态总体反映了延伸体暖异常的上游区域发展特征。

由图 3a 可以看出, 冬季黑潮延伸体区海温异常第三模态的空间分布表现出明显的分叉东扩型特点, 在正位相年(实线), 高热延伸体自日本列岛东部离岸后沿 $36^{\circ}\text{N} \sim 38^{\circ}\text{N}$ 纬向向东进入太平洋, 到达 $150^{\circ}\text{E}$ 后分为两支继续东扩, 其中一支沿东南向扩展至约 $160^{\circ}\text{E}$ , 而另一支则向东北扩展至 $160^{\circ}\text{E}$ 后, 继续沿 $40^{\circ}\text{N}$ 左右向东扩, 可穿过 $180^{\circ}\text{E}$ 到达太平洋东部地区。在负位相年(虚线), 基本特征与正位相年类似, 但是扩展路径偏南, 且北支的东扩受到抑制, 约在 $160^{\circ}\text{E}$ 转向东南方向, 南支

在到达 $155^{\circ}\text{E}$ 后转向东北扩展与北支汇合, 向东扩展到 $172^{\circ}\text{E}$ 附近, 很难到达东太平洋地区。值得注意的是, Niiler et al. (1985) 推测黑潮延伸体中由湍涡驱动的深层环流会在 $152^{\circ}\text{E}$ 分叉, Joyce and Schmitz (1988) 认为其分叉的原因是由于 Shatsky 海脊对流轴的阻挡作用, Roemmich and McCallister (1989) 提出黑潮延伸体分叉的范围是 $152^{\circ}\text{E} \sim 165^{\circ}\text{E}$ 。冯劭华 (2014) 通过定义黑潮延伸体急流宽度指数, 研究发现延伸体急流轴在经向上分叉与否存在 10 年左右的年代际周期变化, Luo et al. (2016) 基于卫星测高数据, 提出了黑潮延伸体偶极子 (Kuroshio Extension dipole, KED), 并以此建立了黑潮延伸体区上游涡动动能与流轴强度以及分叉现象之间的联系。本文通过对冬季黑潮延伸体区海温异常进行 EOF 分解, 发现延伸体流轴分叉的形势与第三模态的空间分布有很好的对应关系, 由此, 可以猜想中纬度黑潮延伸体流轴分叉的现象可能与冬季黑潮延伸体区海温异常的分叉东扩模态有关。从位相上看, 除 2006 年、2008 年、2012 年、2013 年为正位相外, 其他年份均为负位相, 即大部分年

份均以图中虚线正位相路径传播。

图 3b 给出了第四模态的分布, 该模态明显表现出通道东扩型空间扩展特征。负位相时延伸体暖海流沿  $36^{\circ}\text{N} \sim 38^{\circ}\text{N}$  之间向东偏南方向扩展至  $170^{\circ}\text{E}$  附近, 其南北两侧各有两条冷海温变异区形成传播通道。而在正位相时, 延伸体的暖流东扩路径偏南, 取道负位相的南侧抑制通道, 而原负位相时的扩展通道则变为正位相东扩的北侧抑制流。图 3c 的时间变化表明, 该模态的年际变化类似模态三, 呈现明显的年际变化特征, 而年代际特征不明显。2006 年、2011 年 2013 年分别为 3 次明显的传播通道转换年, 其他年份传播通道较为稳定。

本文还使用了 Hadley Centre 提供的  $1^{\circ}$  (纬度)  $\times 1^{\circ}$  (经度) 逐月全球海温资料 HadISST 进行对比分析, 以增加结果的可信度。取 1910~2010 年每年冬季 12 月、1 月、2 月的月平均海表温度距平进行 EOF 分解, 图 4 给出了第一模态和第二模态的空

间分布, 可以看出长序列 HadISST 资料与高分辨率 MW\_IR 资料的太平洋冬季海温异常形势基本一致, 第一模态都显示出一致性变化的特点, 第二模态也反映了东西反位相的特点。利用 HadISST 资料时间覆盖度长的优势, 选取 1960~2010 年, 对第一、第二模态的时间系数序列进行小波分析 (图略), 得到第一模态存在 3 a 左右年际周期和 10 a 的年代际周期; 第二模态在 1980 年之前以 3 a 的年际周期为主, 之后以 5 a 的年际周期为主, 并且存在 12 a 左右的年代际周期。但该长序列海温资料的分辨率仍较粗 [ $1^{\circ}$  (纬度)  $\times 1^{\circ}$  (经度)], 难以刻画出例如第三和第四模态呈现的延伸体海温向东扩展的细致结构特征 (图略)。

由上述分析可知, 延伸体暖异常海温的东扩主要依赖于模态三和模态四。依据两模态时间系数的趋势线分布 (图 3c), 可以大体合成该两模态的海温东扩结构。尤其值得注意的是在 2010 年前, 该

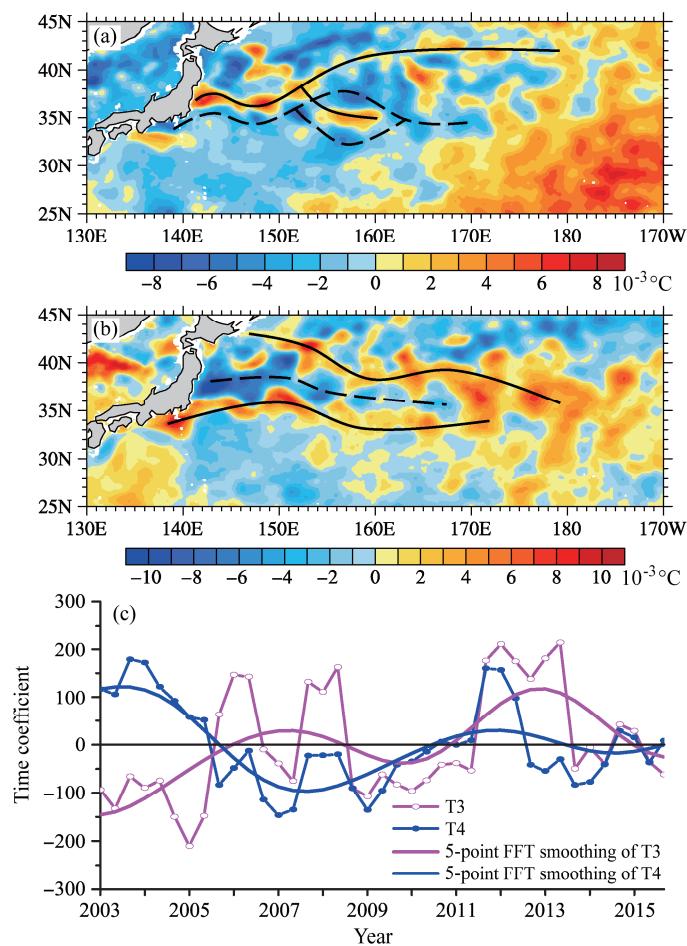


图 3 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解 (a) 第三模态、(b) 第四模态空间分布及 (c) 第三、第四模态的时间变化 (图中曲线是其快速傅里叶变换)

Fig. 3 Distributions of the (a) third and (b) fourth EOF modes of SSTA in the Kuroshio Extension region during the winter, and (c) their time coefficient series (FFT results are represented by the curves)

两模态始终反位相，而其后两者近似同位相。在 2006 年前的时段，第三模态为负位相，第四模态为正位相，两模态合成的暖异常东扩路径大体重合，即基本控制在 36°N 以南东扩（图 5a）；而在 2006~2010 期间，情况正好相反，第三模态为正位相而第四模态为负位相，反映出的暖异常传播路径均偏北，其中第四模态的通道路径与第三模态的南分支路径同位相叠加，可能是此情况下延伸体暖异常的主要东扩形式（图 5b）。在 2010 年后，该两模态近乎同以正位相为主，这表明此时模态四的北侧抑制通道

将会抵消模态三的南支通道，从而使得延伸体暖海流以模态四冷位相时的南侧通道东扩为主（图 5c）。

#### 4 冬季黑潮延伸体海温异常模态的敏感海域分析

延伸体海温异常的诱发因素很多 (Qiu and Kelly, 1993)，其中大洋环流的热输送是一个显著因子 (Tomita et al., 2002; 谷德军等, 2004; Kelly and Dong, 2004)，有必要探究太平洋其他海域海温变异

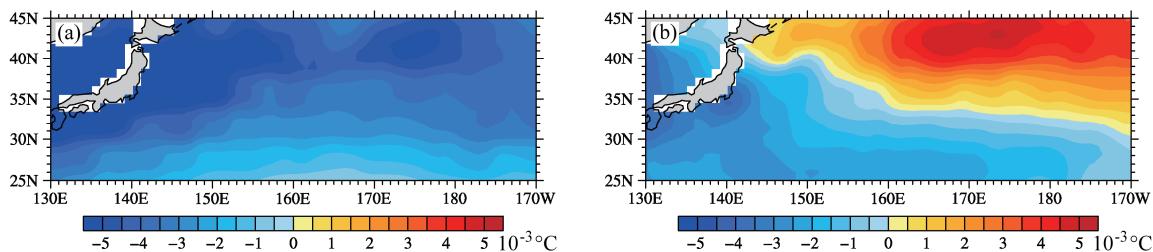


图 4 基于 HadISST 资料的冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解 (a) 第一模态和 (b) 第二模态分布

Fig. 4 Spatial distributions of the (a) first and (b) second EOF modes of the Kuroshio Extension SSTA during the winter based on the HadISST data

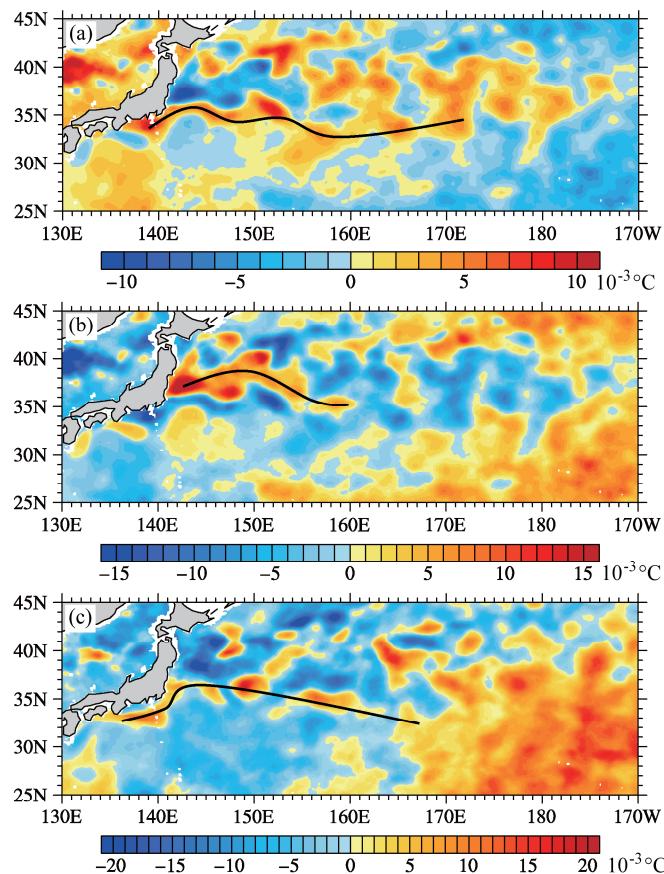


图 5 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解第三模态和第四模态合成分布：(a) 第三模态正位相，第四模态负位相；(b) 第三模态负位相，第四模态正位相；(c) 两模态同为负位相

Fig. 5 Composite distributions of the third and fourth EOF modes of Kuroshio Extension SSTA during the winter: (a) The third mode in positive phase and the fourth mode in negative phase; (b) the third mode in negative phase and the fourth mode in positive phase; (c) the two modes both in negative phase

与延伸体的影响关系。本文将各模态的时间系数分别与不同季节太平洋海域海表温度作相关分析, 可以方便地给出敏感海域的分布情况。图 6 给出了第一模态的敏感海域分布特征, 可以看出第一模态的敏感海域为全年的赤道中东太平洋地区和春冬季

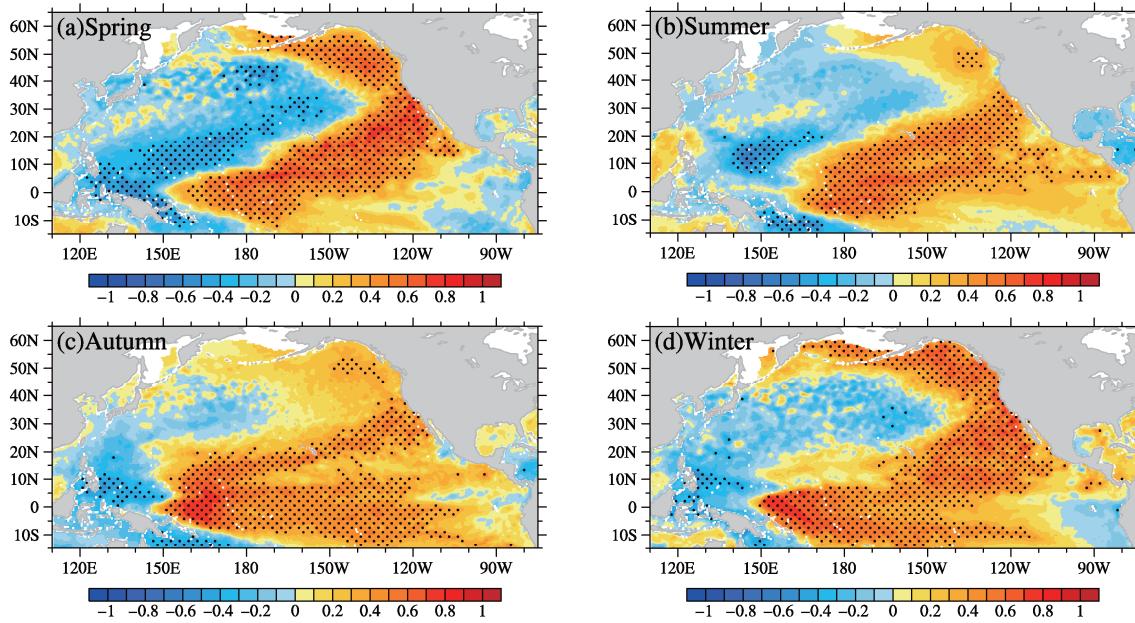


图 6 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解第一模态时间系数与 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季和 (d) 冬季平均太平洋海温的相关系数 (带点区域通过 0.05 显著性检验)

Fig. 6 Correlation coefficients between the time coefficients of the first EOF mode of Kuroshio Extension SSTA during winter and SST in the Pacific in all the seasons correspond to seasonal averages of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter, respectively (dotted area indicates 0.05 level significance)

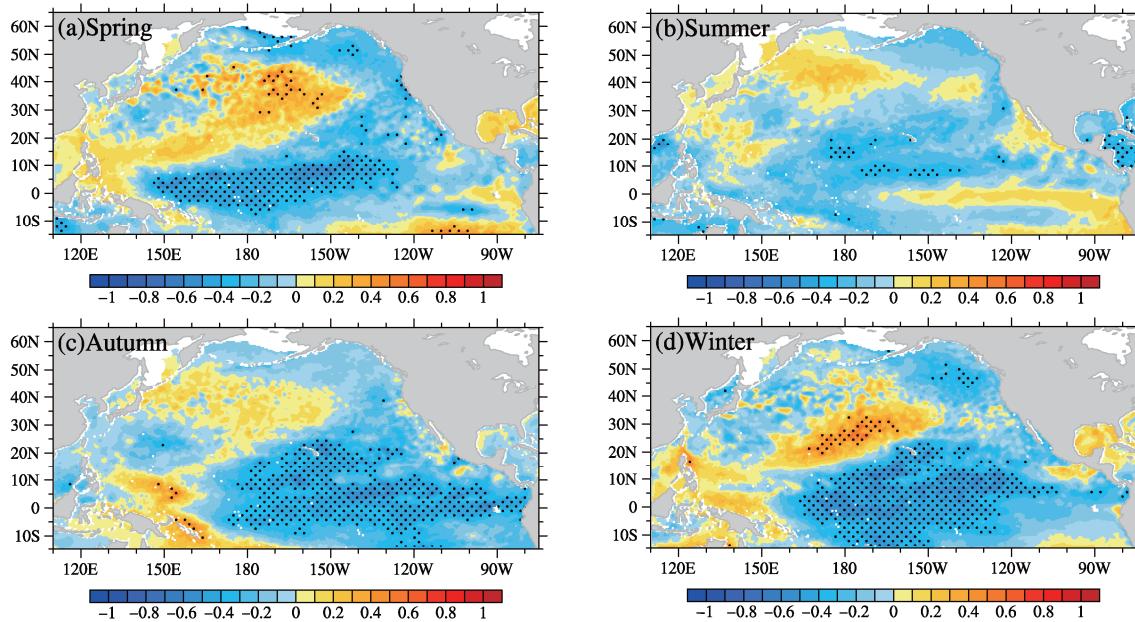


图 7 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解第三模态时间系数与 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季和 (d) 冬季平均太平洋海温的相关系数 (带点区域通过 0.05 显著性检验)

Fig. 7 Correlation coefficients between time coefficients of the third EOF mode of the Kuroshio Extension SSTA during winter and SST in the Pacific in all seasons. correspond to seasonal averages of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter, respectively (dotted area indicates 0.05 significance level)

东北太平洋地区, 且呈显著正相关, 相关系数达 0.8, 以及与春季赤道西太平洋地区呈显著负相关, 相关系数为 -0.7。第二与第四模态的敏感海域不明显且几乎未通过检验, 可认为不存在敏感海域 (图略)。

图 7 给出了第三模态的敏感海域相关性分布,

其敏感海域主要集中在热带中东太平洋海域，并且呈现明显的、稳定的负相关关系，且以冬季相关最强，最大相关系数在-0.6以上，而西太平洋海域虽呈现弱的正相关但大部分海域未通过显著性检验，与北半球太平洋中部呈较弱的正相关关系，且以冬季和春季相对强烈。这表明秋冬季热带中东太平洋海温的变化对中纬度延伸体海表温度异常结构存在显著影响，且使得延伸体海温呈现分叉东扩的异常分布结构。

## 5 冬季黑潮延伸体海温异常与 El Niño 的相互关系分析

由于第三模态反映的海温异常的分叉东扩结构可能与中纬度黑潮延伸体流轴分叉的现象有关，而第一模态主要反映的是海温异常的一致性变化，对黑潮延伸体海温异常东扩结构的影响不大，因此本文将重点讨论第三模态的敏感海域。上述冬季黑潮延伸体海温异常的敏感海域分析表明，模态三的分叉东延海温异常结构与热带中东太平洋海域呈现显著的相关性。众所周知，热带中东太平洋海域的海温异常往往对应 El Niño 事件，因此，冬季延伸体该模态异常可能与 El Niño 事件存在特定关联。为此，本文进一步将热带中东太平洋海域进行区域划分，即 Niño3 区 ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$ )、Niño3.4 区 ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $170^{\circ}\text{W} \sim 120^{\circ}\text{W}$ ) 和 Niño4 区 ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$ )，分别计算各区 Niño 指数并计算其与第三模态的超前滞后 1~10 个月的相关系数，藉此分析不同区域海温异常与延伸体特定异常结构的关系。

图 8 给出了各 Niño 指数与模态三的时滞相关系数，由图可见，Niño3 指数与模态三存在超前 1~2 个月的负相关，相关系数约为 -0.55，而 Niño4 指数与模态三保持较好的宽谱同期负相关，其超前和滞后近乎 5 个月的宽谱期中，相关系数均通过置信度 0.05 的显著性检验，尤其在超前和滞后各 3 个月的时段内均能保持 -0.5 以上的高相关性，且在该 6 个月内相关性始终较为稳定，只是在滞后 1 个月时相关性略有增加达到最强。Niño3.4 指数的时滞相关性与 Niño4 指数近似，也保持了较好的宽谱同期高相关性和稳定性，只是超前期的相关性略强，在超前 1 个月时相关性略有增加达到最强。

以上时滞相关表明，Niño3 区指示的初冬热带

东太平洋海温异常能够引起中纬度延伸体区滞后 1~2 个月（即隆冬）海温分叉东扩异常结构，即若 Niño3 区发生东部型 El Niño 事件，则会在滞后 1~2 月时诱发延伸体区海温异常增暖向东扩展且扩展路径沿模态三的分叉东扩结构。而 Niño4 区和 Niño3.4 区对应的热带太平洋中部海温异常基本与延伸体区海温异常的分叉东扩保持同步，且影响时段较宽，在该区海温异常的前期（超前 1~3 个月）、盛期和衰退期（滞后 1~3 个月）均会引起中纬度延伸体海温的异常，即若热带中太平洋发生中部型 El Niño 事件，则在其事件前期、盛期和衰退期均会诱发中纬度黑潮延伸体区异常增暖的分叉东扩。由此可见，热带中东太平洋的海温异常对中纬度黑潮延伸体的海温异常即东扩结构具有重要影响，热带洋面不同区域的海温异常对延伸体的影响时期存在差异，总体看，热带太平洋中部地区的海温异常影响较强且持续时间较长，也表明中部型 El Niño 事件与黑潮延伸体冬季的海温异常存在更密切的相互作用关系。

为了验证以上结论，按照 1 倍标准差选取第三模态正位相显著的月份，对其冬季海表温度异常除去季节循环后进行合成分析，看中纬度黑潮延伸体区分叉东扩结构与 El Niño 是否存在显著的负相关关系。如图 9 所示，热带太平洋海域存在显著的 La Niña 事件，而延伸体区则出现了海温异常第三模态正位相的分叉东扩结构，证明了上述结论。

## 6 结论与讨论

本文利用 2003~2015 年 NASA 遥感系统提供的全球高分辨率海表温度资料，对黑潮延伸体区域 ( $25^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $140^{\circ}\text{E} \sim 170^{\circ}\text{W}$ ) 海温异常，采用 EOF 分析、时滞相关分析等方法，研究分析了冬季黑潮延伸体区海温异常各模态的结构，探寻各模态的敏感海域，分析了冬季黑潮延伸体海温异常与 El Niño 的相互关系，主要结论如下：

(1) 冬季延伸体区海温异常的主要结构可分为上游区域发展型和纬向延展型。前者主要包括具有 PDO 背景调制的一致性季节变化模态和纬向反位相的收缩型模态。而后者是延伸体暖异常东扩的主要结构模态，反映了东扩的具体路径或结构差异，包括分叉东扩结构和通道东扩结构，该两结构模态存在相关的年际变化，2009 年前两者反位相，

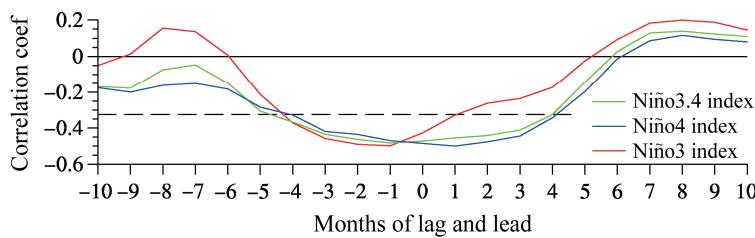


图8 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解第三模态与热带太平洋 Niño 指数的相关性（横坐标为滞后—超前的月数，虚线为 0.05 显著性检验）

Fig. 8 Relationship analysis between Niño index and the time coefficients of the third EOF mode of the Kuroshio Extension SSTA during winter (the value of horizontal ordinate is the number of months of lag—lead and the dotted line indicates 0.05 significance level)

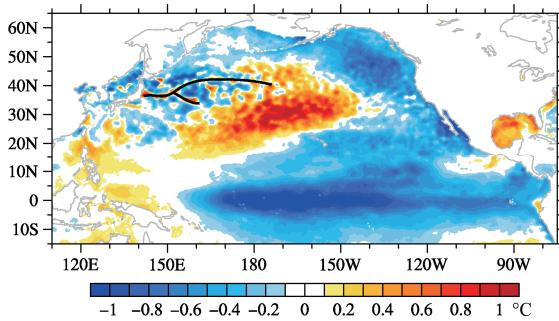


图9 冬季黑潮延伸体区 SSTA EOF 分解第三模态活动强年合成的海表温度异常

Fig. 9 Composite SSTA in the strong third EOF mode years of the Kuroshio Extension SSTA during winter

2009 年后两者同位相，共同决定着暖异常的东扩结构。

(2) 冬季黑潮延伸体海温异常的一致性变化模态与赤道中东太平洋地区、春冬季北半球东北太平洋地区以及与春季赤道西太平洋地区显著相关；分叉东扩结构模态与热带中东太平洋海域海温呈现明显的负相关敏感关系，且以同期秋冬季的相关最强，表明热带中东太平洋秋冬季的海温变化与中纬度延伸体区海温的分叉东扩之间存在显著作用关系。其他模态不存在敏感海域。

(3) 冬季中纬度延伸体区海温异常的分叉东扩结构与 El Niño 存在显著相互影响关系。Niño3 指数与其存在超前 1~2 个月的负相关，而 Niño4 和 Niño3.4 指数均呈现出明显超前和滞后各 3 个月的宽谱同期高相关性，表明东部型 El Niño 存在超前延伸体海温异常分叉东扩模态 1~2 个月的负相关关系，而中部型 El Niño 对延伸体分叉东扩结构的影响更为强烈和显著，在其事件的前期、盛期及衰退期均会导致中纬度延伸体海温暖异常分叉东扩结构的维持。

此前已有学者研究过黑潮区与 El Niño 的关系（王闪闪，2015），也有些研究表明黑潮延伸体与 El Niño 相对独立（Qiu, 2000；余沛龙，2014），通过以上研究分析，本文认为 El Niño 对冬季黑潮延伸体存在影响关系，这可能表明 El Niño 对黑潮延伸体区海表温度异常的影响具有季节和结构的选择性，但其影响机理尚不清楚，并且分叉东扩是延伸体海表温度异常东扩的重要结构，该结构应该与流轴的分叉存在紧密联系，具体联系机制尚待深入分析。另外，本文的高分辨率资料仅为 13 年，不排除恰好处于一个年代际过程中的可能，所得结论仍有待更长资料序列验证。

## 参考文献 (References)

- An S I, Wang B. 2005. The forced and intrinsic low-frequency modes in the North Pacific [J]. J. Climate, 18 (6): 876–885, doi:10.1175/JCLI-3298.1.
- Bjerknes J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. Tellus, 18 (4): 820–829, doi:10.3402/tellusa.v18i4.9712.
- Bjerknes J. 1972. Large-scale atmospheric response to the 1964–65 Pacific equatorial warming [J]. J. Phys. Oceanogr., 2 (3): 212–217, doi:10.1175/1520-0485(1972)002<0212:LSARTT>2.0.CO;2.
- Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P, et al. 1999. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field [J]. J. Climate, 12 (7): 1990–2009, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1990:TENOSD>2.0.CO;2.
- Ceballos L I, Di Lorenzo E, Hoyos C D, et al. 2009. North pacific gyre oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems [J]. J. Climate, 22 (19): 5163–5174, doi:10.1175/2009JCLI2848.1.
- Chelton D B, Schlax M G. 1996. Global observations of oceanic Rossby waves [J]. Science, 272 (5259): 234–238, doi:10.1126/science.272.5259.234.
- 慈航, 罗德海. 2007. 冬季黑潮延伸体区域海表温度异常对北太平洋气旋活动的影响 [J]. 中国海洋大学学报, 37 (S2): 49–54, 66. Ci Hang, Luo Dehai. 2007. Impacts of SSTA in the Kuroshio extension region on

- cyclone activity in the North Pacific in winter [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 37 (S2): 49–54, 66.
- Dawie J T, Thompson L A. 2007. PDO-related heat and temperature budget changes in a model of the North Pacific [J]. *J. Climate*, 20 (10): 2092–2108, doi:10.1175/JCLI4229.1.
- 冯士筈, 李凤岐, 李少菁. 1999. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 503pp. Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. 1999. An Introduction to Marine Science (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 503pp.
- 冯劭华. 2014. 黑潮延伸体的变化及其与北太平洋风暴轴的关系 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 66pp. Feng Shaohua. 2014. The variability of Kuroshio extension and its connection with storm track in North Pacific [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 66pp.
- 冯劭华, 罗德海, 钟霖浩. 2015. 黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系 [J]. *大气科学*, 39 (5): 861–874. Feng Shaohua, Luo Dehai, Zhong Linhao. 2015. The relationship between Mesoscale Eddies in the Kuroshio extension region and storm tracks in the North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (5): 861–874, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14142.
- 谷德军, 王东晓, 袁金南. 2004. 黑潮输送的异常及其与大尺度海气相互作用的关系 [J]. *热带海洋学报*, 23 (6): 30–39. Gu Dejun, Wang Dongxiao, Yuan Jinnan. 2004. Anomalous transport of Kuroshio and its relationship with large scale Atmosphere–Sea interaction [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 23 (6): 30–39, doi:10.3969/j.issn.1009-5470.2004.06.004.
- 郭冬, 孙照渤. 2005. 冬季NPO突变前后大气环流和我国天气气候的变化 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (2): 180–188. Guo Dong, Sun Zhaobo. 2005. Changes of general circulation and weather and climate in China before and after the wintertime North Pacific Oscillation jump [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 28 (2): 180–188, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.02.005.
- Joyce T M, Schmitz W J. 1988. Zonal velocity structure and transport in the Kuroshio extension [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 18 (11): 1484–1494, doi:10.1175/1520-0485(1988)018<1484:ZVSATI>2.0.CO;2.
- Joyce T M, Kwon Y O, Yu L S. 2009. On the relationship between synoptic wintertime atmospheric variability and path shifts in the Gulf Stream and the Kuroshio extension [J]. *J. Climate*, 22 (12): 3177–3192, doi:10.1175/2008JCLI2690.1.
- Kelly K A, Dong S. 2004. The relationship of western boundary current heat transport and storage to midlatitude ocean–atmosphere interaction [M]// Wang C, Xie S P, Carton J A, Eds. *Earth's Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction*. Washington DC: American Geophysical Union, 347–363, doi:10.1029/147GM19.
- Kwon Y O, Alexander M A, Bond N A, et al. 2010. Role of the gulf stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere–ocean interaction: A review [J]. *J. Climate*, 23 (12): 3249–3281, doi:10.1175/2010JCLI3343.1.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. *Science*, 266 (5185): 634–637, doi:10.1126/science.266.5185.634.
- 李忠贤. 2004. 黑潮区域海温异常与东亚季风之间相互关系的初步研究 [D]. 南京气象学院硕士学位论文, 65pp. Li Zhongxian. 2004. Preliminary study on the relationship between sea temperature in Kuroshio Region and East Asian Monsoon [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 65pp.
- Luo D H, Feng S H, Wu L X. 2016. The eddy-dipole mode interaction and the decadal variability of the Kuroshio Extension system [J]. *Ocean Dynamics*, 66 (10): 1317–1332, doi:10.1007/s10236-016-0991-6.
- 梅士龙. 2004. 黑潮海温异常的机制及其对我国降水影响的研究 [D]. 南京气象学院硕士学位论文, 74pp. Mei Shilong. 2004. Research on relationship between wind stress anomalies in the Tropical Pacific and SSTAs in Kuroshio Region [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 74pp.
- 梅士龙, 闵锦忠, 孙照渤. 2006. 黑潮 SSTAs 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 SSTAs and tropical Pacific wind field as well as ENSO [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 29 (3): 385–389, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.03.015.
- 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 Zihong, 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, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2004.02.016.
- Niiler P P, Schmitz W J, Lee D K. 1985. Geostrophic volume transport in high eddy-energy areas of the Kuroshio extension and Gulf stream [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 15 (7): 825–843, doi:10.1175/1520-0485(1985)015<825:GVTIHE>2.0.CO;2.
- Nonaka M, Nakamura H, Tanimoto Y, et al. 2006. Decadal variability in the Kuroshio-Oyashio extension simulated in an eddy-resolving OGCM [J]. *J. Climate*, 19 (10): 1970–1989, doi:10.1175/JCLI3793.1.
- Peng S L, Whitaker J S. 1999. Mechanisms determining the atmospheric response to midlatitude SST anomalies [J]. *J. Climate*, 12 (5): 1393–1408, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1393:MDTART>2.0.CO;2.
- Qiu B, Kelly K A. 1993. Upper-ocean heat balance in the Kuroshio Extension region [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 23 (9): 2027–2041, doi:10.1175/1520-0485(1993)023<2027:UOHBIT>2.0.CO;2.
- Qiu B. 2000. Interannual variability of the Kuroshio extension system and its impact on the wintertime SST field [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 30 (6): 1486–1502, doi:10.1175/1520-0485(2000)030<1486:IVOTKE>2.0.CO;2.
- Qiu B, Chen S M. 2005. Variability of the Kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 35 (11): 2090–2103, doi:10.1175/JPO2807.1.
- Qiu B, Chen S M. 2010. Eddy-mean flow interaction in the decadally modulating Kuroshio Extension system [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57 (13–14): 1098–1110, doi:10.1016/j.dsr2.2008.11.036.
- Roemmich D, McCallister T. 1989. Large scale circulation of the North Pacific Ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 22 (2): 171–204, doi:10.1016/0079-6611(89)90005-0.
- Scharffenberg M G, Stammer D. 2008. Annual variations of geostrophic currents and eddy kinetic energy inferred from TOPEX/Poseidon and Jason-1 tandem mission data [C]//Ocean Sciences Meeting. Orlando, FL:

ASLO.

Shukla J, Wallace J M. 1983. Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies [J]. *J. J. Atmos. Sci.*, 40 (7): 1613–1630, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1613: NSOTAR>2.0.CO;2.

孙楠楠. 2009. 东海黑潮海表温度变化及其与厄尔尼诺和全球变暖的关系 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 57pp. Sun Nannan. Variations of sea surface temperature over Kuroshio in the East Sea and its relationship with El-Nino and global warming [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 57pp, doi:10.7666/d.y1502102.

Tokinaga H, Tanimoto Y, Xie S P, et al. 2009. Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations [J]. *J. Climate*, 22 (16): 4241–4260, doi:10.1175/2009JCLI2763.1.

Tomita T, Xie S P, Nonaka M. 2002. Estimates of surface and subsurface forcing for decadal sea surface temperature variability in the mid-latitude North Pacific [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (5): 1289–1300, doi:10.2151/jmsj.80.1289.

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, doi:10.7498/aps.61.169201.

王闪闪. 2015. 黑潮、厄尔尼诺—南方涛动和太平洋年代际涛动的相互联系及对气候影响的研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 118pp. Wang Shanshan. 2015. The interaction of the Kuroshio, PDO and ENSO and their impacts on climate [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 118pp.

王晓丹, 钟中, 谭言科, 等. 2011. 冬季黑潮延伸体异常增暖对东亚夏季风影响的数值试验 [J]. *热带气象学报*, 27(4): 569–576. Wang Xiaodan, Zhong Zhong, Tan Yanke, et al. 2011. Numerical experiment on the effect of the warmer SST in the Kuroshio Extension in winter on the East Asian

summer monsoon [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 27 (4): 569–576, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.014.

温娜. 2006. 北太平洋、北大西洋中纬度海气相互作用的部分统计特征 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 69pp. Wen Na. 2006. Some statistical properties of the mid-latitude ocean-atmosphere interaction in the North Pacific and the North Atlantic [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 69pp, doi:10.7666/d.y988822.

Wyrki K, Magaard L, Hager J. 1976. Eddy energy in the oceans [J]. *J. Geophys. Res.*, 81 (15): 2641–2646, doi:10.1029/JC081i015p02641.

余沛龙. 2014. 黑潮延伸体海表温度与阿留申低压的多尺度变化关系研究 [D]. 解放军理工大学硕士学位论文, 81pp. Yu Peilong. 2014. The research about multi-scale relationships between Kuroshio Extension SST and Aleutian atmospheric low pressure system [D]. M. S. thesis (in Chinese), PLA University of Science and Technology, 81pp.

Zhang C Y, Chen G. 2006. SST variations of the Kuroshio from AVHRR observation [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 24 (4): 345–351, doi:10.1007/BF02842848.

赵永平, McBean G A. 1995. 黑潮海域海洋异常加热与北半球大气环流的相互作用 [J]. *海洋与湖沼*, 26 (4): 383–388. Zhao Yongping, McBean G A. 1995. Air-sea interaction between the Kuroshio region marine heating anomaly and Northern Hemisphere atmospheric circulation [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 26 (4): 383–388.

赵永平, McBean G A. 1996. 黑潮海域海洋异常加热对后期北半球大气环流影响的分析 [J]. *海洋与湖沼*, 27 (3): 246–250. Zhao Yongping, McBean G A. 1996. Influence of the Kuroshio region marine heating anomaly on the North Hemisphere atmospheric circulation in the following seasons [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 27(3): 246–250.

赵永平, 陈永利, 翁学传. 1997. 中纬度海气相互作用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 12 (1): 32–36. Zhao Yongping, Chen Yongli, Weng Xuechuan. 1997. Advances in the mid-latitude air-sea interaction Research [J]. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 12 (1): 32–36, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.1997.01.0032.