

# 北太平洋晚冬海表温度持续异常现象的机制分析\*

陈 儒 刘秦玉 胡海波

(中国海洋大学 物理海洋实验室 海洋-大气相互作用与气候实验室 青岛 266100)

**提要** 依据再分析的海洋温度、盐度月平均资料和观测的热通量资料,确定了北太平洋中纬度晚冬海表温度(SST)持续异常现象较明显的海域是位于  $38^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $158^{\circ}$ E— $172^{\circ}$ W 的西部海域和位于  $35^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $172^{\circ}$ W— $145^{\circ}$ W 的东部海域。分析结果表明,西部海域,晚冬 SST 持续异常现象的主要机制是海洋上混合层的“再现机制”;而东部海域晚冬 SST 的持续异常现象主要是海面净热通量的持续异常所致。由于冬季北太平洋西风异常导致的上混合层深度季节的差异在 1976 年前后的不同,1976 年后晚冬混合层深度深,“再现机制”的作用明显, SST 持续异常现象更容易出现。

**关键词** 海表温度,再现机制,热通量,年代际变化

**中图分类号** P731.21

北太平洋海面温度异常具有明显的年代际变化信号,其主要特征之一是海面温度(SST)异常在连续几年内具有相同符号。北半球冬季是北太平洋加热大气最明显的季节, Namias 等(1970, 1974)发现中纬度某些海域冬季海表面温度异常(SSTA)倾向于在下一年冬季重现,但是并不在之间的夏季出现(本文中称该现象为晚冬 SST 持续异常现象)。为解释这一海洋现象,他们提出了有关 SSTA 的再现机制(Reemergence Mechanism):冬季 SSTA 信号存在于第一年冬季混合层内,而在接下来的夏季,某些异常信号保存在季节性跃层之下与表层海洋-大气相互作用过程隔离,因而得以保持冬季 SSTA 的性质。当下一年秋、冬季混合层又加深时,位于夏季季节性跃层以下的保留有前一年冬季 SSTA 性质的水体,通过夹卷作用重新进入混合层,从而影响此时的海表温度。他们认为该机制能够解释部分海域冬季 SSTA 的持续性,并称该机制为“再现机制”。在某一海域,当该机制存在时,会出现晚冬 SST 持续异常的现象。

Alexander 等(1994)选择了几个站点的实测资料,进一步证实了再现机制的存在。Alexander 等(1999)使用(扩展)经验正交分解、相关、回归等多种

统计方法在中纬度海域发现了西、中、东三个再现机制存在的海区。Michael 等(2002)对北大西洋作了类似的研究,并指出再现机制在海洋平流作用较弱且混合层深度冬、夏季差别较大的海域更容易发挥作用。Hanawa 等(2004)在全球范围内确定了一些再现机制作用活跃的海区。考虑了平流作用以后,他们将再现区域分为局地再现(co-located reemergence)和遥再现(remote reemergence)区域,并研究了遥再现随时间变化的特性(Sugimoto *et al.*, 2005)。

Namias(1986)和 Namias 等(1988)发现了冬季 SST 持续异常现象受海面净热通量持续异常影响的观测证据, Ting 等(1993)、Graham 等(1994)和 Lau(1997)证明,年际信号的大气环流的持续异常也可以形成冬季 SST 的持续异常现象,而此时季节性跃层以下并不保留前一年冬季 SSTA 性质的水体。因而,晚冬 SST 持续异常现象的形成有两种主要的机制:冬季净热通量的持续异常及“再现机制”,有时候某一海域这两种机制同时存在。当然, SSTA 的持续性还与其它海洋动力过程(例如地转平流, Ekman 平流)有关,在本文中只讨论在 SST 持续异常现象明显海域,冬季净热通量的持续异常及“再现机制”哪个更重要,这也正

\* 国家自然科学基金项目, 40830106 号和 40676010 号;国家重点基础研究发展规划(973)项目:北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响, 2007CB411803 号。陈儒, E-mail: ruchen@mit.edu

通讯作者: E-mail: liuqy@ouc.edu.cn

收稿日期: 2008-08-15, 收修改稿日期: 2009-04-12

是前人研究中所缺乏的。

另外,北太平洋海洋-大气耦合系统在 1976 年前后有明显的转型(Nakamura *et al*, 1997; Mantua *et al*,1997; Zhang *et al*,1997),但是目前还没有见到有关气候转型对再现机制影响的报道。

本文中作者利用新的再分析海洋同化资料,针对以下问题开展了研究:北太平洋晚冬 SST 持续异常现象较为明显的海区有哪些?再现机制和冬季净热通量持续异常对晚冬 SST 持续异常现象的相对重要性在不同海区有无不同?1976 年前后气候年代际的变迁对 SST 持续异常现象是否有影响?对这些问题的回答,将对研究中纬度海域海洋-大气的相互作用有重要的意义。

### 1 资料介绍

本文的研究使用了 SODA 的温度、盐度月平均资料,版本是 1.4.2,分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,时间范围为

1958 年 1 月—2001 年 12 月。为了研究热通量对温度晚冬 SST 持续异常现象的影响,使用了 Woods Hole 海洋研究所的热通量资料(OAflux),分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间范围为 1983 年 1 月—2001 年 12 月。OAflux 资料的单位是  $Wm^{-2}$ ,规定海洋得热为正。注意,本文分析研究过程中使用的温度异常和净热通量异常均扣除了长期趋势项。前人曾经用 SODA 的温度、盐度月平均资料在北太平洋中纬度海域海洋做过许多的研究工作,研究结果表明,该资料还是有一定可信度的。例如,用 SODA 资料定量地确定了太平洋中纬度通向热带太平洋的“内部通道”和“西边界通道”的论文发表在 J. Physical Oceanography 2001 年和 2005 年(Huang *et al*, 2001; Wang *et al*,2005)。

### 2 晚冬 SST 持续异常现象明显区域

为了确定北太平洋晚冬 SST 持续异常现象较为明显的海区,首先对 3 月 SST 异常场做了经验正交分

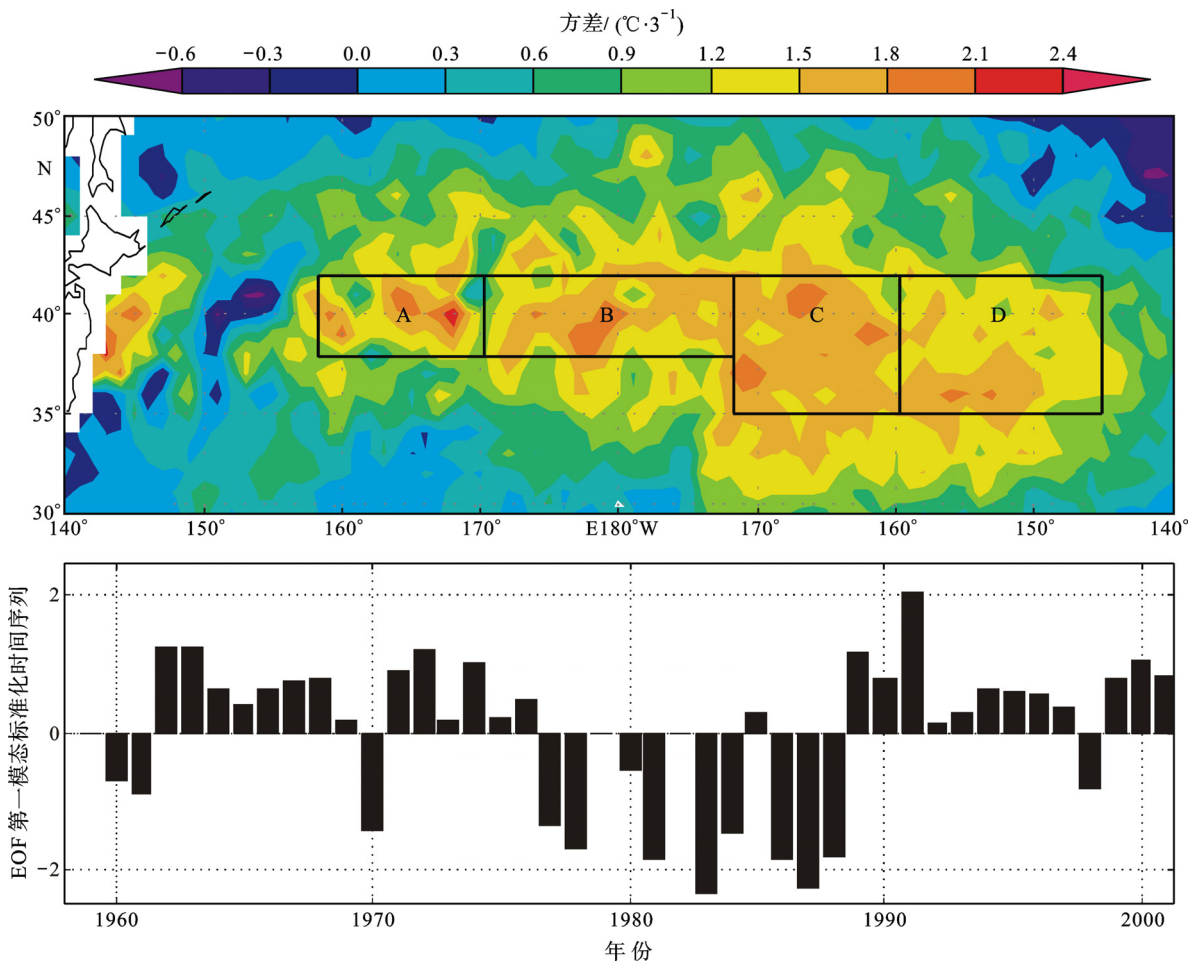


图 1 3 月 SST 异常的经验正交分解主模态的空间分布(上图)主模态对应的时间序列(下图)(方差贡献为 18.59%)

Fig.1 The pattern of the first EOF mode (upper) and its associated time series (below) for March SSTA during 1958—2001(the squared covariance fraction is 18.59%)

解分析。图 1(上)为 3 月 SST 异常场经验正交分解的主模态的空间分布, 可以发现, 该分布实际上是北太平洋海盆尺度 SST 异常“马蹄型”分布, 即中纬度 SST 正(负)异常, 周围为 SST 负(正)异常(Liu *et al*, 2006); 位于 35°—42°N, 160°E—145°W 的海域基本上是 3 月 SST 正(负)异常大值区。Alexander 等(1999)确定的 SSTA“再现”现象经常出现的“西区”(38°—42°N, 160°E—180°)和“中区”(26°—42°N, 164°—148°W)的绝大部分海域也位于本文图 1 指出的年际变化大值区, 但该文中的东区(26°—42°N, 132°—116°W)不在本文图 1 指出的异常大值区内。3 月 SST 异常第一模态对应的时间序列[图 1(下)]具有十分明显的年代际变化, 正、负异常信号持续 10 年以上: 1963—1977 年几乎都为正值, 1978—1989 年几乎都为负值, 1990—2001 年又恢复为正值。根据第一模态的空间分布型, 选取 A(38°—42°N, 158°E—170°E)、B(38°—42°N, 170°E—172°W)、C(35°—42°N, 172°—160°W)、D(35°—42°N, 160°—145°W)区作为本文重点研究的晚冬 SST 持续异常现象的区域。上述四个海域位于黑潮延伸体的北侧, 是北太平洋中纬度海洋-大气相

互作用的关键海域。这四个海区 3 月 SST 异常的时间序列也表明, 四个海区 SST 异常均有很好的持续性: 1976—1990 年基本上都是负异常, 1960—1976 年基本上都是正异常(图略)。

### 3 晚冬 SST 持续异常现象的机制分析

为了确定“再现机制”和“冬季海面净热通量的持续异常”这两种性质不同的物理过程在各个海区晚冬 SST 持续异常现象形成中的相对重要性, 作者运用统计方法, 对 A、B、C、D 四个海区的晚冬 SST 持续异常现象进行了分析。

使用与 Alexander 等(1999)类似的做法, 将当年 1 月到次年 5 月的各深度处的温度异常分别与当年 3 月 SSTA 做相关分析, 得到了逐月相关系数的垂直结构(图 2 左上)。从图 2 中可以看出, 当年 1—5 月 0—200 m 海温异常与当年 3 月 SSTA 的相关系数都超过了 0.6, 6—11 月份 80 m 以上海温异常与 3 月的 SSTA 的相关系数很小, 高相关系数出现在 80 m 之下。这与夏季混合层深度变浅、80 m 以上海温的年际变化受海面夏季净热通量年际变化影响, 而混合层之下

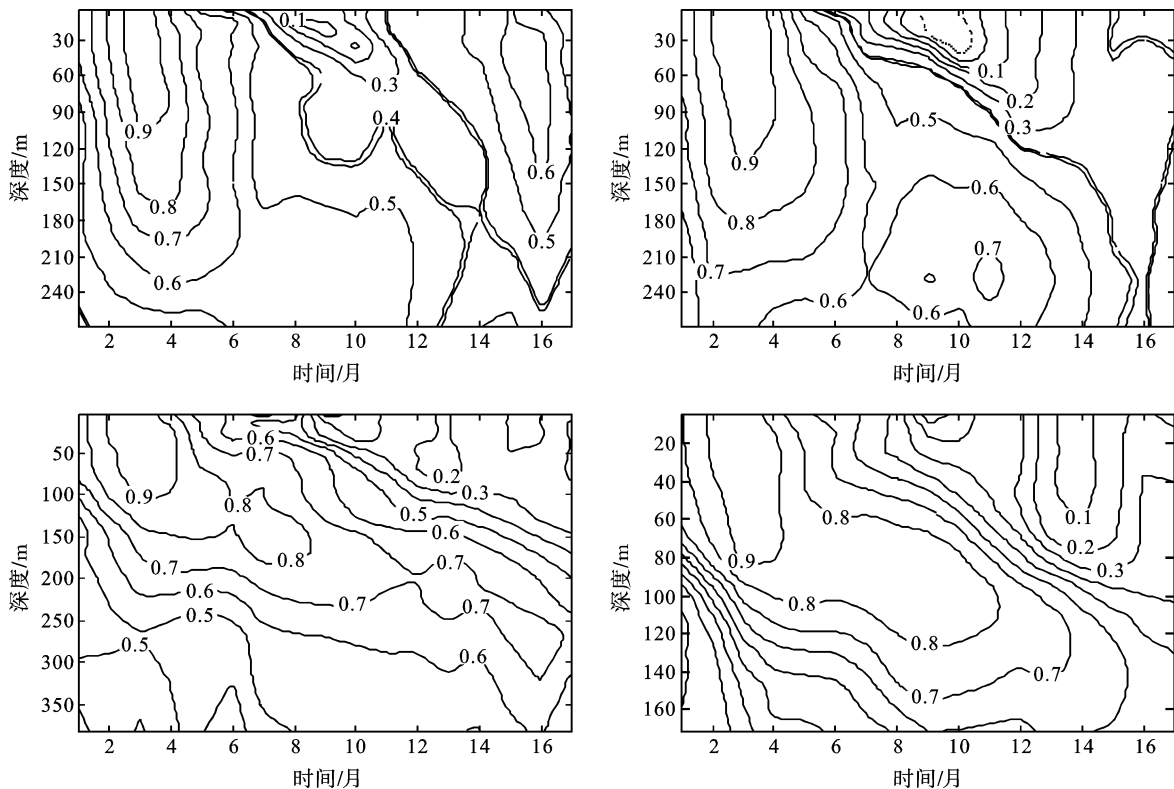


图 2 以 3 月 SSTA 为基准的相关系数垂直结构(左上,右上,左下和右下分别对应图 1 中 A、B、C 和 D 区)

Fig.2 Lead-lag correlations between SST anomaly in March and temperature anomalies in the certain depth from the previous January to the following May in the selected regions. The upper left, upper right, lower left, and lower right parts panel are the vertical structures of correspond to Areas A and B, C and D area in Fig.1, respectively

的海温则继续保留上一个冬季的特性有关。11月之后0—80 m海温异常与3月SSTA的相关系数开始增加,12月海表温度的相关系数超过0.3。这说明再现机制在A区晚冬SSTA持续中可能起重要作用,因此第二年的冬天海表温度的年际变化与第一年晚冬(3月)混合层温度的年际变化有很好的相关性。B区也具备类似的特征,只是到第2年的2、3月海表温度的相关系数才超过0.3(图2右上)。

那么A区晚冬SSTA持续异常现象与冬季海面净热通量的持续异常是否有关呢?用1984—2001年11—3月的海面净热通量(正异常为海洋失热减小)与3月SSTA的时间序列进行相关分析(图3黑实线),如果两者之间存在较高的正相关(海洋失热减小,SSTA正异常),则3月SSTA的持续性与冬季海面净热通量异常的持续可能有关。可以发现,只有1月份的海面净热通量异常与3月SSTA有超过信度(0.4)的负相关,其它月份的海面净热通量与3月SSTA的相关系数不大,且基本上都是负相关(海洋失热减小,后期的SSTA却负异常)。这意味着海面净热通量异常与该海区的晚冬SSTA的持续异常现象关系不大,即使有关系也是SSTA正异常与海洋失热增加(海面净热通量负异常)相对应。因而,A区SSTA的持续异常现象的主要形成机制还是再现机制。B区冬季海面净热通量异常与晚冬SSTA的相关同样为负异常(没有超过显著信度)。可见,B区的情况与A区类似,海面净热通量对该海区的晚冬SSTA持续异常现象影响不大。因此,可以推断再现机制为A、B区晚冬SSTA的持续现象的主要机制。

而C、D区与A、B区的情况不同。C区海温的相关系数垂直分布图(图2左下)中基本上不存在高相关系数在第二年冬天重新在海表出现的现象,这说明该海域晚冬SSTA的持续异常现象与海温的“再现机制”关系不大。图3的点线和点虚线表明:12月的热通量持续异常与接下来3月的SSTA有显著正相关(超过了0.40),因而C区SSTA的持续异常现象与热通量持续异常有关。D区的情况与C区类似,并不出现次年表层温度异常信号在次年冬季又一次出现的状况。因此,这两个海域晚冬SSTA的持续现象与再现机制关系不大。

一个值得注意的现象是,在C、D区表层到300 m的温度异常与3月的SSTA相关系数高值区(超过0.6)随着时间的推移,一直在不断向深处扩展(图3)。C区的高相关系数区的底部在3月份处于220 m深度处,

可是到了次年3月,已经到达了320 m深度处。D区也有类似现象:高相关系数在1月处于80 m深度处,7个月之后已经在160 m的位置上出现。Deser等(1996)曾发现中部太平洋(与C、D区位置相近)晚冬(3月)上层海洋温度的冷信号在1970年之后具有向下传播的现象,发现冷信号1年之内可以向下运动100 m,与图2中高相关系数区域不断向深处扩展的速度基本相当。

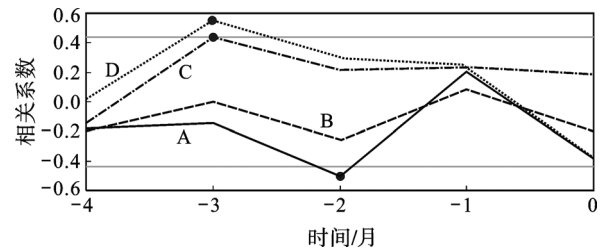


图3 A、B、C、D区3月SSTA异常与净热通量异常的相关。横坐标的绝对值代表净热通量异常的超前月份

Fig.3 Correlation coefficient between the lead net heat flux anomaly and the SSTA anomalies in March for Areas A, B, C and D area. The absolute value of the value on x-axis the abscissa represents the leading month of heat flux anomaly

为了进一步研究这一现象,针对20°—45°N之间不同深度、不同时段纬向平均的温度异常分别与B区和D区3月的SSTA异常做相关分析,得到同期(3月)、后期(12月)和次年3月的相关系数(图4)。可以看出,B区的3月混合层深度为200 m,是D区的2倍;3月B区相关系数高值区位于35°N以北,相关系数超过0.4的海域不仅在混合层内,还位于混合层下深达400 m处,直保持到后期(12月),而次年3月相关系数高值区才重新回到B区(虚线以北)的上混合层。D区的情况不同,相关系数高值区在当年的12月和次年的3月都没有回到D区的上混合层。当年12月份相关系数高值区几乎全部位于12月混合层之下。A、C区则分别与B、D区类似。这再一次证实A、B区晚冬SSTA持续异常现象是由再现机制引起,而在C、D区晚冬SSTA持续异常现象形成中,前一年混合层的异常信号再现的可能性不大,这可能与这两个海域“潜沉”的混合层水,很快被温跃层环流输送到其它地方有关(胡海波等,2006)。

以上4个海区对比分析表明:在混合层季节差异较大的A、B区(本文称为西部区域),再现机制对晚冬SSTA持续异常现象的贡献比较大;在混合层季节差异较小的C、D区(本文称为东部区域),再现机制

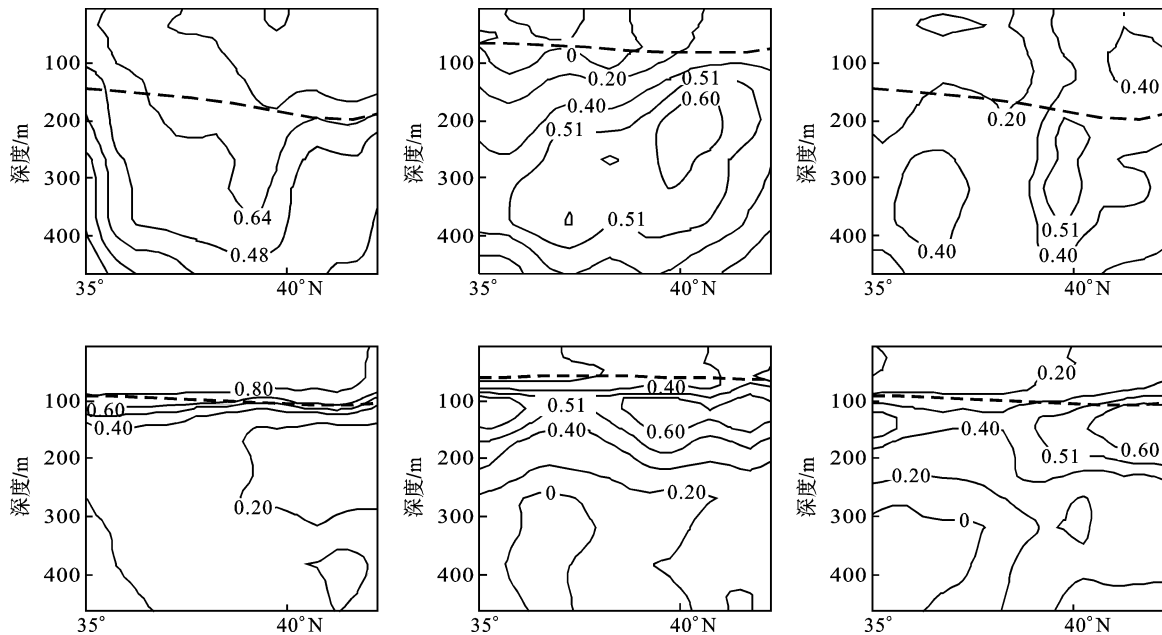


图 4 以 3 月各海域纬向平均的经向断面 SST 异常为基准, 分别与各月(3 月(左), 12 月(中)和次年 3 月(右))各深度温度异常的相关图(上排是 B 区, 下排是 D 区)。虚线代表 12 月混合层深度

Fig.4 The correlation coefficient between March SST anomaly in Area B (D) and zonal mean of temperature anomaly in Area B (D) respectively in March (left), December (middle), and the March in of the second next year (right) (upper : Area B, below: Area D area). The dashed line is the mixed layer depth in December

对晚冬 SST 持续异常现象的贡献比较小。

#### 4 SST 持续异常现象的年代际变化

混合层深度的季节变化具有不同年代之间的差异, 因而猜测由于混合层深度的季节变化形成的“再现机制”同样有年代际变化, 进而会使晚冬 SSTA 持续特征有所变化。仿照 Sugimoto 等 (2005) 的做法, 本文中作者对  $172^{\circ}\text{W}$  以西(东)的 3 月 SST 异常在  $38^{\circ}\text{--}42^{\circ}\text{N}$  和  $35^{\circ}\text{--}42^{\circ}\text{N}$  范围内分别进行了经向平均, 然后对各经度处 1958—2001 年的时间序列进行 15 年的滑动相关。在 C、D 区(东部区域), 除了 20 世纪 70 年代早期相关系数可以达到 0.4 以外, 其它时段相关系数接近于零; 而在 A、B 区, 1976 年气候转型之后相关系数比之前更大。由此可见, 1976 年气候转型后, A、B 区的“再现机制”比 1976 年前更加明显, 因此 SST 持续异常现象更显著。为了扣除 1976 年前后气候转型对温度异常可持续性的影响, 在 A、B 两个海区针对 1958—1975 年和 1976—2001 年两个不同的时间段温度异常的时间序列, 将 1 月到次年 5 月的各深度处的温度异常分别与 3 月 SST 异常做相关分析, 得到了对应的相关系数垂直结构分布。可以发现, 1976 年以前, 次年冬天 0—300 m 海温异常与 3 月 SST 异

常的相关系数几乎都小于 0.4; 1976 年之后, 该相关系数都超过 0.4, 这是由于 1976 年之后北太平洋气候背景西风加强, 混合层有所加深, 且保留在季节性温跃层中具有前一年冬季特征的水体增多, 有利于混合层温度的“再现”。

北太平洋年代际变化的特征是在 1976 年以前海面温度持续正异常, 之后又持续负异常, 尽管对 1958—1975 年和 1976—2001 年两个不同的时间段内晚冬温度异常分析时, 扣除了不同时段平均温度, 但是从 3 月 SST 持续异常现象的特征来看, 1958—1975 年间 SST 异常的持续性不明显, 而 1976—2001 年间冬季 SST 异常的持续性较好(图略)。这是由于在 1976 年以后, 在北太平洋冬季西风加强的气候背景下冬季混合层深度明显加深, 夏季混合层下保留有晚冬性质的水体增多, 从而更容易通过再现机制的作用重返混合层并影响上层海温。1976 年前, 冬季西风较小(东风异常), 混合层浅, 夏季混合层下保留有晚冬性质的水体较少, 则不容易出现“再现”现象。因此, A、B 两个海域(西部海域)SST 持续异常现象有年代际变化的主要原因是冬季上混合层深度的年代际变化, 混合层深度越深, “再现机制”的作用越明显, 西部海域 SST 持续异常现象更容易出现。

## 5 结论和讨论

作者根据 SODA 和 OAflux 两种资料, 确定了北太平洋中纬度晚冬 SST 持续异常现象明显的区域为 A(38°—42°N, 158°—170°E)、B(38°—42°N, 170°E—172°W)、C(35°—42°N, 172°—160°W)、D(35°—42°N, 160°—145°W)四个海域, 然后对所选各个海区(A、B、C 和 D 区)的持续现象的机制进行了初步分析, 讨论了基于海洋过程的海温再现机制和由于海面净热通量的持续异常对晚冬 SST 持续异常现象的贡献。研究发现: 位于中纬度西部海域(A、B 两海区)晚冬 SST 持续异常现象的主要机制是再现机制; 而东部海域(C、D 两海区)净热通量异常持续是该海区晚冬 SSTA 持续的主要机制, 而再现机制在这两个海区作用不大。A、B 和 C、D 海区晚冬 SST 持续异常现象机制不同的原因还有待于进一步深入研究。

由于混合层深度等各种因素的年际变化, 1976 年之后, A、B 两区晚冬温度异常信号可以更好地通过再现机制影响到第二年海表温度异常。A、B 两个海域 SST 持续异常现象有年代际差异的主要原因是冬季上混合层深度的年代际差异, 混合层深度越深, “再现机制”的作用越明显, A、B 两个海域 SST 持续异常现象更容易出现。

从以上分析还可以得到以下推论: 以 40°N 为中心的西部海域, 次表层海洋的异常信号可以通过“再现机制”影响 SST 异常, 进而影响海面热通量; 而 38°N 为中心的东部海域则是海面热通量的变化影响 SST 异常。

**致谢** 在成文过程中, 黄瑞新教授、刘征宇教授和贾英来博士提出了宝贵的建议, 海洋-大气相互作用与气候实验室其他成员给予热情的帮助, 谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 胡海波, 刘秦玉, 刘 伟, 2006. 北太平洋副热带模态水形成区潜沉率的年际变化及其机制. 海洋学报, 28(2): 22—28
- Alexander M A, Deser C, 1994. Mechanism for the Recurrence of Wintertime Midlatitude SST Anomalies. *J Physical Oceanography*, 25:122—137
- Alexander M A, Deser C, Michael T S, 1999. The Reemergence of SST Anomalies in the North Pacific Ocean. *J Climate*, 12:2419—2432
- Deser C, Alexander M A, Michael S T, 1996. Upper-Ocean Thermal Variations in the North Pacific during 1970—1991. *J Climate*, 9: 1840—1855
- Graham N E, Barnett T P, Wilde R, Ponater M *et al*, 1994. On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing annual to interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation. *J Climate*, 7: 1416—1442
- Hanawa K, Sugimoto S, 2004. “Reemergence” areas of winter sea surface temperature anomalies in the world’s oceans. *Geophys Res Lett*, 31: L10303
- Huang R X, Wang Q, 2001. Interior Communication from the Subtropical to the Tropical Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 31: 3538—3550
- Lau N-C, 1997. Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 21—33
- Liu Qinyu, Wen Na, Liu Zhengyu, 2006. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 33: L18611, doi:10.1029/2006GL026082
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y *et al*, 1997. Francis, A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 1069—1079
- Michael S T, Alexander MA, 2002. NOTES AND CORRESPONDENCE on the Reemergence of North Atlantic SST Anomalies. *J Climate*, 15:2702—2712
- Nakamura H, Lin G, Yamagata T, 1997. Decadal climate variability in the North Pacific during recent decades. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 2215—2225
- Namias J, Born R M, 1970. Temporal coherence in North Pacific sea-surface temperature patterns. *J Geophys Res*, 75: 5952—5955
- Namias J, Born R M, 1974. Further studies of temporal coherence in North Pacific sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 79: 797—798
- Namias J, 1986. Persistence of flow patterns over North America and adjacent oceans. *Mon Wea Rev*, 114: 1368—1383
- Namias J, Yuan X, Cayan D R, 1988. Persistence of North Pacific sea surface temperature and the atmospheric flow patterns. *J Climate*, 1: 682—703
- Qiu B, Huang R X, 1995. Ventilation of the North Atlantic and North Pacific: Subduction Versus Obduction. *J Physical Oceanography*, 25:2374—2390
- Sugimoto S, Hanawa K, 2005. Remote reemergence areas of winter sea surface temperature anomalies in the North Pacific. *Geophys Res Lett*, 32: L01606
- Ting M, Lau N-C, 1993. A diagnostic and modeling study of the monthly mean wintertime anomalies appearing in a 100-year GCM experiment. *J Atmos Sci*, 50:2845—2867
- Wang Q, Huang R, 2005. Decadal Variability of Pycnocline Flows from the Subtropical to the Equatorial Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 35: 1861—1875
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900—1993. *J Climate*, 10:1004—1020

## ANALYSIS OF FORMATION MECHANISM ABOUT SST ANOMALY PERSISTENCE DURING LATE WINTER IN THE NORTH PACIFIC

CHEN Ru, LIU Qin-Yu, HU Hai-Bo

*(Physical Oceanography Laboratory & Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, 266100)*

**Abstract** Based on the reanalysis data (monthly mean of temperature and salinity) and observation data (monthly mean of heat flux), it is detected that in the west area ( $38^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $158^{\circ}$ E— $172^{\circ}$ W) and the east area ( $35^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $172^{\circ}$ — $145^{\circ}$ W), the late winter Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) persists quite well. The formation mechanism for persistence phenomenon of SSTA is analyzed in both areas. It is found that the “reemergence mechanism” of the mixed layer is dominating formation mechanism of the SSTA persistence phenomenon in west area; while the contributes of heat flux persistence anomalies is dominating for the persistence of late winter SST anomalies in east area. In addition, in west area, considering the decadal variability of the seasonal different of the mixed layer depth, the role of “reemergence mechanism” is more important after the 1976 climate shift due to the increase of the seasonal different of mixed layer depth by the intensification of the westerly in the North Pacific.

**Key words** Sea Surface Temperature, Reemergence mechanism, Heat flux, Decadal variability