

# 137°E 断面北赤道流的结构特征和年际变化

杨青莹<sup>1,2,3</sup>, 王 凡<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环流与波动实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院 北京 100049)

**摘要:** 基于日本气象厅在 1967~2009 年间获得的温盐深仪(CTD)资料以及美国提供的卫星高度计资料, 分析了 137°E 断面北赤道流(NEC)的结构特征和年际变化, 并探讨了其年际变化的控制机制。结果表明, 在 137°E 断面, NEC 的平均位置位于 8°~18°N, 其流核出现在 10°~12°N 附近; 无论冬季还是夏季, NEC 的流速距平场都具有南、北向的反位相年际振荡特征, 而这种南、北向的反位相振荡可能是由热带西北太平洋的气旋性和反气旋性异常环流所控制; NEC 内部的流速对 El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 的响应也存在着明显的季节特征, 其中, 在 El Niño(La Niña)期间的夏季, NEC 中上部的流速增大(减小); 在 El Niño(La Niña)期间的冬季, NEC 中下部的流速减小(增大), 而 NEC 南、北两侧的流速则增大(减小)。

**关键词:** 北赤道流(NEC); 年际变化; 副热带环流; 海表高度; El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)12-0062-06

自 1967 年以来, 日本气象厅“凌风丸”海洋调查船每年沿着 137°E 断面进行定期海洋观测。该断面南起 1°S, 北至 34°N, 横穿黑潮、黑潮逆流、副热带逆流(STCC)、北赤道流(NEC)、北赤道逆流(NECC)和南赤道流 6 支主要的纬向海流。位于 8°~20°N 的 NEC 是一支自东向西流动的稳定的洋流, 它是由风应力和浮力通量驱动的浅层海流。NEC 作为北太平洋中的副热带环流和热带环流的组成部分, 在他们的水体交换中发挥着重要作用, 在很大程度上决定着海盆尺度的大洋环流结构, 在大洋环流动力学上具有非常重要的意义和地位。因此, 开展 NEC 的研究, 在海洋动力学上具有重要的科学意义。

由于海洋环流的强弱变化对其沿途海域的水文状况、生态环境和气候均有重要影响, 因此 137°E 断面的温盐结构和海洋上层热含量的时空变化已引起了人们的关注。Masuzawa<sup>[1]</sup>、Nagasaka<sup>[2]</sup>、Andow<sup>[3]</sup>、郭忠信和符淙滨<sup>[4]</sup>相继对该海域的温盐特征和年际变化进行了分析, 而邹娥梅等<sup>[5]</sup>、张启龙和翁学传<sup>[6]</sup>以及张启龙等<sup>[7]</sup>分别研究了 137°E 断面的海洋热状况和西太平洋暖池的变化特征。研究发现, 热带西太平洋热含量变化最显著的区域是在逆流槽附近的次表层, 该层的热含量可以作为研究 El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 的主要海洋参量, 而且该断面温度场和热含量的年际变化均与 ENSO 循环有密切的联系。

137°E 断面的环流结构及其变化特征一直是人

们所关注的热点之一。Qiu<sup>[8]</sup>研究发现, 在 El Niño 期间, NEC 的流量增加, 而且其位置向南偏移。王元培<sup>[9]</sup>、顾玉荷<sup>[10]</sup>、顾玉荷等<sup>[11]</sup>和孙湘平<sup>[12]</sup>分别讨论了该断面的环流结构及其变异特征。结果表明, NEC 和黑潮的变化能够反映出亚热带环流西部的辐合状况, NEC 的体积输送不仅具有夏强冬弱的特点, 还有显著的年际变化, 但其峰值并未出现在 ENSO 期间, 而是出现在 ENSO 事件的前后。

但是, 由于受观测资料的限制, 诸如资料的覆盖面不够广, 时间序列不够长, 而且资料本身可能有误或处理资料的方法有缺陷等问题, 有关 NEC 的内部结构及其年际变化方面的研究仍较少, 迄今尚未见到相关报道。鉴于此, 本文利用日本气象厅 1967~2009 年间的观测资料和卫星高度计资料, 研究了 137°E 断面 NEC 的内部结构和年际变化, 以期深入了解 NEC 的时空变化特征及其在西边界流系中的作用提供科学依据。

## 1 资料和方法

在 1967~2009 年间的冬季 (1~2 月) 和 1972~2009 年间的夏季 (6~7 月), 日本气象厅“凌风丸”海洋调查

收稿日期: 2012-05-15; 修回日期: 2013-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(40890152)

作者简介: 杨青莹(1985-), 女, 浙江湖州人, 硕士, 主要从事西北太平洋中低纬度洋流的研究, 电话: 0532-82898513, E-mail: qingying-0411@163.com; 王凡(1967-), 通信作者, 博士, 研究员, E-mail: fwang@qdio.ac.cn.

船沿137°E断面进行定期的海洋观测, 而从1997年开始又增加了春季(4~5月)、秋季(10~11月)的定期观测。在冬、夏两个季节的观测资料中, 冬季的观测时间比较长, 共有43 a(1967~2009年), 而夏季则略短, 为38 a(1972~2009年)。该断面的观测深度大都超过1 100 m。1967~2006年, 资料的垂直分辨率较低, 其中在0~300 m分辨率为10~50 m, 而在300 m分辨率为100 m。但从1997年开始, 资料的垂直分辨率提高到1 m。因此, 本文选用了1967~2009年冬季和1972~2008年夏季的观测资料。

为了得到高分辨率的资料, 本文对所用的数据进行了内插处理。对1996年之前的各站点资料进行垂向内插, 得到垂向分辨率为10 m的数据, 而对1997年之后的数据则采用分辨率为10 m的资料, 并将该断面各站点数据内插到整数纬度上。

此外, 本文还采用了美国提供的海平面绝对动力高度资料(AVIS0)。该资料的分辨率为 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ 。本文选用了1993~2009年的数据。

值得指出的是, 本文利用动力计算法计算了137°E断面上3°N以北海域的地转流速。在计算地转流速时, 将1 100 m作为动力零面。流速的正值为东

向流, 而负值则为西向流。

## 2 结果

### 2.1 137°E 断面流场的季节特征

图1为夏、冬季137°E断面多年平均流速分布。图中的负值为西向流, 而正值则为东向流, 等值线间隔为2 cm/s。由图1可以看到, 夏季, 在7°N以南的350 m以浅区域为东向流, 这便是NECC, 而在7°~18°N, 海表面以下500 m以内为西向流, 最大流速可达-20 cm/s, 这便是NEC, 随着深度的加深, 流轴向北倾斜。在NEC的北侧(20°~25°N), 从海表到50 m深处有一支向东的海流, 这是STCC。从图中还可看到, NEC南侧的速度梯度远大于北侧。再向北, 在29°N以北海域有一支强东向流, 最大流速为22 cm/s, 这便是黑潮。但应指出的是, 黑潮逆流并不明显, 这可能与所取的动力零面有关。

冬季, NECC向北扩展, 与此同时, NEC的南边界向北收缩, 而其北边界也随之北移。这使得NEC南侧的流速梯度增大, 但北侧的速度梯度却无明显变化。冬季, STCC的深度较之夏季变浅, 且流速亦减小, 而黑潮的位置基本未变, 但其流速有所减小, 最大流速为18 cm/s。

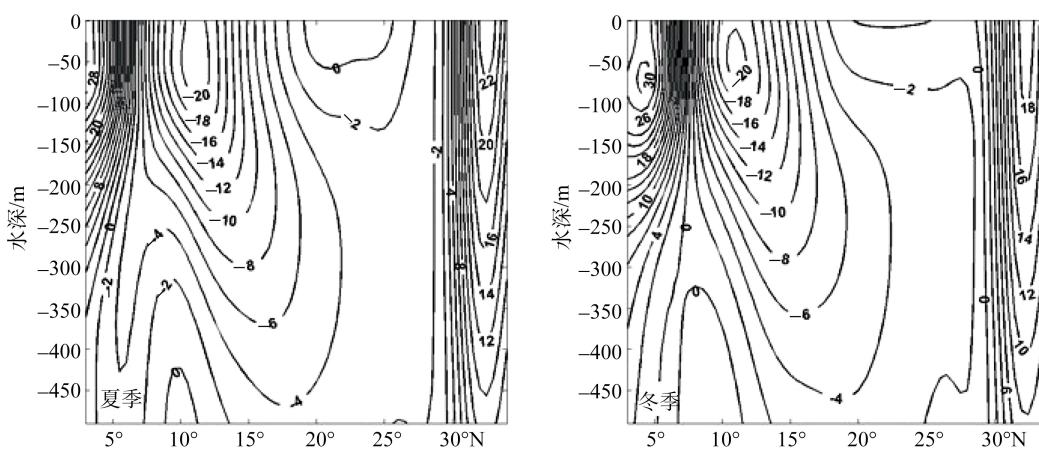


图1 夏季和冬季137°E断面多年平均流速(cm/s)分布

Fig. 1 Distributions of mean velocity (cm/s) over several years along the 137°E section in summer and winter

### 2.2 NEC 体积输送的年际变化

从前面的分析可知, NEC的位置存在着明显的季节变化。那么NEC体积输送的年际变化如何? 为此, 本节分别讨论了冬、夏季NEC体积输送的年际变化。

根据用温盐资料得到的地转流场, 按照以下步骤计算137°E断面上的NEC流量: 首先, 对7°~21°N海表到 $26.7 \text{ g/cm}^3$ 等位势密度面上的正、负流速值分别进行积分<sup>[13]</sup>, 得到东、西向流量; 然后, 再将西向

流量减去东向流量以消除中尺度涡的作用, 从而得到NEC的体积输送。

图2为冬、夏季NEC体积输送的年际变化。从图中可以看到, NEC的体积输送具有夏强冬弱的季节特征。其中, 夏季的平均体积输送为-55 Sv, 而冬季则为-49 Sv, 两者相差为6 Sv。

夏季, NEC的流量具有显著的年际变化, 并与ENSO有较好的联系。其中, 在大部分El Niño事件期

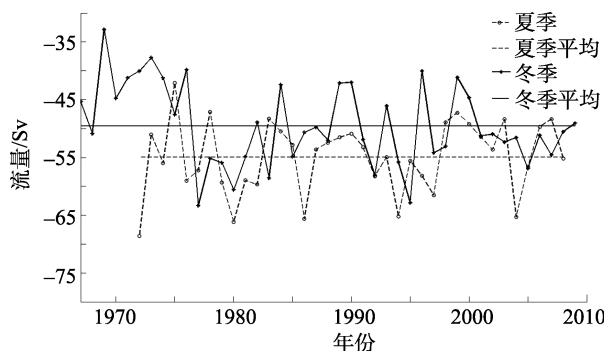


图2 冬、夏季 NEC 流量的年际变化

Fig. 2 Interannual variations of NEC flow in winter and summer

间(1972, 1976, 1980, 1982, 1986, 1992, 1994, 1997, 2002 和 2004 年), 流量偏大, 均大于其多年平均值, 而在大部分La Niña事件期间(1973, 1975, 1983, 1988, 1995 和 1999 年), 流量偏小, 均低于其多年平均值。

冬季, NEC的流量也有显著的年际变化, 而且与 ENSO也有一定的联系。在大部分El Niño事件期间(1976, 1979, 1982, 1987, 1991, 1993, 1994, 1997, 2002, 2004 和 2006 年), 流量较大, 均超过其多年平均值, 而在大部分La Niña事件期间(1971, 1975, 1983, 1988, 1995 和 1998 年), 流量较小, 均小于其多年平均值。

从图3中看出, 最大熵谱分析结果表明, 夏季NEC流量的显著周期依次为 2 a和 8 a, 而冬季NEC流量的显著周期依次为 3.2 a和 2.7 a。显然, 无论冬季还是夏季, NEC均有准两年的年际变化, 与ENSO的准两年周期相近。

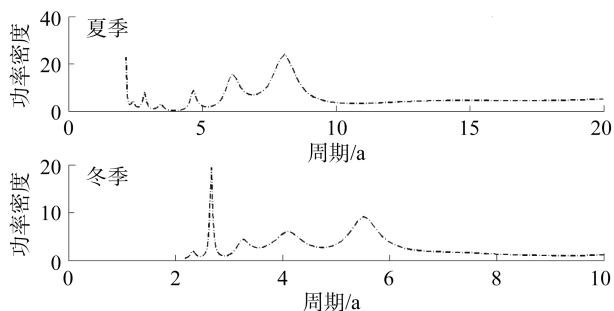


图3 夏季和冬季 NEC 流量的最大熵谱

Fig. 3 The maximum entropy spectra of the NEC flow in summer and winter

### 2.3 赤道流流场的时空变化及控制机制

为了能更好地揭示NEC流场的时空变化特征, 本文分别对夏、冬季 137°E断面NEC区域(7°~21°N, 0~500 m)流速距平场进行了EOF分解。结果表明, 夏季, 前三个模态的方差贡献率分别为 31.6%, 19.6% 和 18.1%, 而冬季前三个模态的方差贡献率分别为 33%, 22.1%和 15.1%。根据North准则<sup>[14]</sup>检验可知, 夏

季前两个和冬季前三个模态均通过了检验。但是, 在这里我们仅对夏、冬季的第一模态进行分析。

从图4中的夏季NEC流场EOF第一模态的空间分布可以看到, 第一模态大致呈现为正—负—正分布特征。在 11°N以南和 18.5°N以北为两个正值区, 其中南侧的信号强于北侧, 最大值为 0.09, 这对应于NECC和NEC的交界处以及NEC的南半部分。在 11°~18.5°N为负值区, 中心值为-0.06, 这是NEC的北半部分。这说明, 夏季, NEC南、北半部分的流速具有反位相变化特征, 即当NEC南半部分的流速增强时, 其北半部分的流速将减弱; 反之亦然。对时间系数进行最大熵谱分析发现, 该模态具有准 10 a的年代际变化。

冬季NEC流场EOF第一模态的空间结构与夏季基本一致, 但其正、负值区较夏季北移了约 1 个纬距。南侧正值区的强度依然较北侧正值区为强, 但略弱于夏季, 其最大值为 0.06。该区对应于NEC的南半部分, 甚至还包括了NEC的流核。在 12°~19.5°N为负值区, 其极值为 -0.04, 也较夏季为弱。由此可见, 冬季NEC南、北半部分流速的变化也是反向的。当南半部分的流速加强时, 北半部分的流速将减弱。时间系数的最大熵谱分析结果(图5)表明, 第一模态的显著周期依次为 2 a和 8 a。这说明, 冬季第一模态具有显著的准两年和 8 a的年际变化, 这与夏季不同。

无论冬季还是夏季, NEC的流场都表现出南、北向的反位相变化特征, 而且冬季正、负值区的位置比夏季北移一个纬距。那么, NEC流场的这种时空变化是由什么因素控制的? 下面将利用AVISO海面绝对高度(SSH)资料探讨这个问题。

为了避免年内甚者更小时间尺度信号的干扰, 我们对 1993 年 1 月~2009 年 12 月间的西北太平洋(0°~30°N, 120°~180°E)高度计资料进行月平均, 然后再对其进行 13 个月的滑动平均滤波处理。对该海域经滤波处理后的海面高度距平场进行了EOF分解。结果表明, 前三个模态的方差贡献率分别为 65.8%, 7.7%和 5.1%。可见, 第一个模态占有很大的比重, 是该海域海面高度距平场的主要模态。下面仅对第一模态的时空特征进行分析。

从第一模态的空间分布(图6)可以看到, 显著的负值区位于 0°~18°N, 120°~168°E区域, 而其核心区(<-0.016)则见于 10°~13°N, 127°~140°E范围内, 这是西北太平洋海面高度变化最为显著的区域, 它与NEC流核的位置相一致。由于海面高度的异常升高和降低分别对应于该海域中的反气旋和气旋性异常

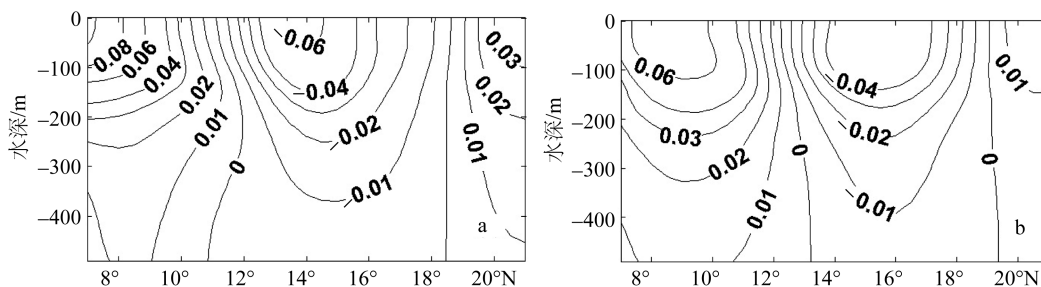


图4 夏季(a)和冬季(b)NEC流场 EOF 第一模态的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of first EOF mode pattern of the NEC velocity in summer(a) and winter (b)

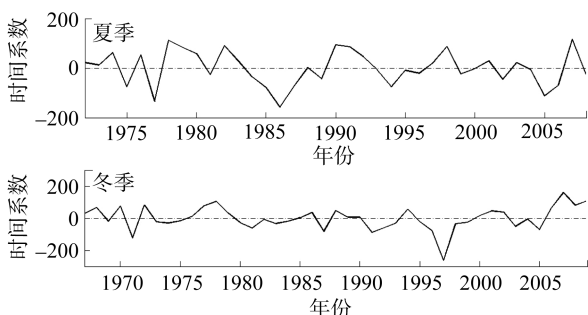


图5 夏季和冬季 NEC 流场的 EOF 第一模态时间系数  
Fig. 5 The time coefficient of first EOF mode of NEC velocity in summer and in winter

环流增强,因此可以认为,NEC南、北半部分流场的反位相变化可能是由热带西北太平洋的气旋和反气旋性异常环流所控制。当海面高度降低时,该海域中的气旋性异常环流增强,从而使得NEC的北半部分流速增大,而南半部分的流速则减小;反之,当海面高度升高时,反气旋性异常环流增强,因而导致NEC北半部分的流速减小,而南半部分的流速则增大。冬季,NEC流场正、负值区位置比夏季北移一个纬距,可能与风场的季节性南、北向移动有关。

为了进一步了解NEC流场与海面高度的对应关系,本文将137°E断面夏、冬季NEC流场的EOF第一模态时间系数绘于图7。由图7可以看到,在ENSO期间流场与海面高度时间系数的变化趋势较为一致,但

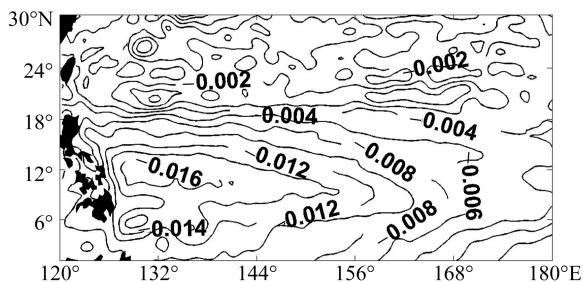


图6 海面高度距平场 EOF 第一模态空间分布

Fig.6 The spatial distribution of EOF<sub>1</sub> mode and time coefficient of SSH anomaly filed

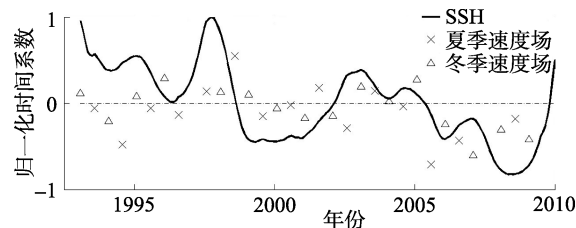


图7 海面高度距平场和流场 EOF 第一模态时间系数比较  
Fig. 7 Comparison of time coefficient of EOF<sub>1</sub> mode between SSH anomaly filed and velocity

在常年却存在着明显的差异。这很可能与计算 NEC 流速所用的观测资料拥有天气式尺度信号有关。

## 2.4 NEC 流场结构变异与 ENSO 循环的关系

根据 Niño3.4 指数(图8)可知,自1993年以来共发生了 7 次 El Niño 事件(1993, 1994~1995, 1997~ 1998, 2002~2003, 2004~2005, 2006~2007和2010年)和 4 次 La Niña 事件(1995~1996, 1998~2000, 2000~ 2001 和 2007~2008年)。由图9可以看到,在 El Niño 期间,热带西北太平洋海面高度距平场第一模态的时间系数均为较大的正值或较小的负值,而在 La Niña 期间,时间系数均为较大的负值或较小的正值。这意味着,在 El Niño 期间该海域的海面高度降低,而在 La Niña 期间则升高。海面高度变异与 ENSO 的这种对应关系也可从图10中得到左证。如图10所示,NEC 区域(8°~18°N)的平均海面高度异常与 ENSO 循环有着很好的对应关系。在 El Niño 期间,在 137°E 断面附近及其以西海域的海面高度基本为负距平,即海面高度降低,而在 La Niña 期间则为正距平,即海面高度升高。海面高度的这种年际变化可能是由中太平洋风场激发的第一斜压 Rossby 向西传播引起的。

结合 NEC 流场的时空变化特征与上面的分析可知,在 El Niño 期间,热带西北太平洋的海平面高度降低,出现负异常,该海域的气旋性异常环流加强,从而使得 NEC 北半部分的流速增大,而南半部分的流速减小;在 La Niña 期间,海面高度升高,出现正异常,该海域的反气旋性异常环流加强,这有助于 NEC

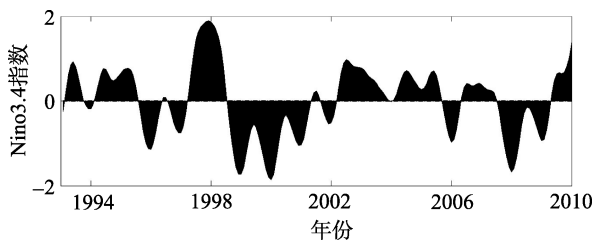


图8 5个月滑动平均的 Niño3.4 指数年际变化

Fig. 8 Interannual variations of Niño3.4 index of 5-month running mean

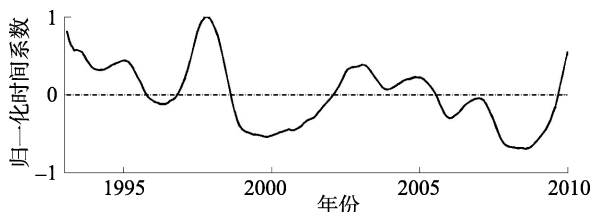


图9 海面高度场 EOF 第一模态时间系数

Fig.9 Time coefficient of EOF1 mode in SSH anomaly field

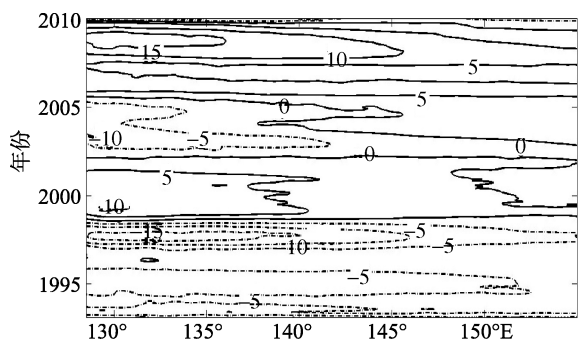


图10 8°~18°N 间的经向 SSH 距平

Fig. 10 The meridional mean anomalies of SSH between 8°~18°N

南半部分的流速增大, 而北半部分的流速减小。

为了进一步了解 NEC 流场与 ENSO 的关系, 图 11 给出了 137°E 断面流速与 Niño3.4 指数间的相关系数分布。由图 11 可以看到, 夏季, NEC 主流区的流速与 Niño3.4 指数之间存在着较密切的负相关, 其最大相关系数为-0.45(通过了 99%显著性检验)。这说明, 在 El Niño 期间, NEC 中心的流速增大, 而在

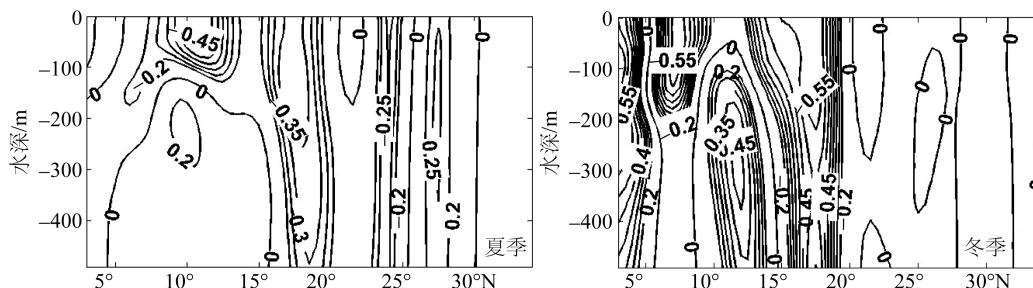


图11 Niño3.4 指数与 137°E 断面夏季和冬季流场的相关系数分布

Fig. 11 Distribution of correlation coefficients between Niño3.4 index and summer and winter velocity along 137°E section

La Niña 期间则流速减小。

冬季, 137°E 断面流速与 Niño3.4 指数间的相关场与夏季明显不同。在 NEC 的中下部有一个正相关区, 而在其南、北两侧则为负相关区。正相关区的最大相关系数为 0.45(通过了 99%显著性检验), 位于 12°N 附近的 300 m 处。两个负相关区的相关系数均高达-0.55, 但其分布范围却有所不同, 其中南侧的负相关区位于 5~10°N 的 250 m 以浅水层, 而北侧的负相关区则出现在 12°~20°N 的 0~500 m 水层, 但其范围随着深度的加深而变窄, 在 500 m 处, 它位于 15°~20°N。这说明, 冬季 NEC 内部的流速对 ENSO 的响应并不一致。其中, 在 El Niño 期间, NEC 中下部的流速减弱, 而 NEC 南、北两侧的流速则增强; 反之, 在 La Niña 期间, NEC 中下部的流速增强, 而 NEC 南、北两侧的流速则减弱。

由此可见, 北赤道流内部的流速对 ENSO 的响应也存在着显著的季节特征。其中, 冬季的响应情况较夏季复杂。

### 3 结论

本文利用 137°E 断面的温、盐度资料和卫星高度计资料, 分析了北赤道流流场的季节特征、时空变化及其与 ENSO 的关系。得到的研究结果主要如下。

1) 在 137°E 断面, 北赤道流的平均位置位于 8°~18°N, 其流核出现在 10°~12°N 附近。NEC 的体积输送不仅具有夏强冬弱的季节特征, 还有显著的年际变化。在 El Niño 期间, NEC 的流量基本都增大, 而在 La Niña 则基本都减小。

2) 无论冬季还是夏季, 137°E 断面的 NEC 流速距平场都具有南、北向的反位相年际变化特征。而且, 这种南、北向反位相变化的范围冬季比夏季偏北一个纬距。NEC 流场的南、北向反位相变化可能是由热带西北太平洋的气旋和反气旋性异常环流所控制。而 NEC 流场南、北向反位相变化的范围冬季比夏季偏北一个纬距, 这可能与风场的季节性南、北向移动有关。

3) 北赤道流内部的流速对 ENSO 的响应也存在着显著的季节特征。在 El Niño(La Niña)期间的夏季, NEC 中心的流速增大(减小); 在 El Niño(La Niña)期间的冬季, NEC 中下部的流速减小(增大), 而 NEC 南、北两侧的流速则增大(减小)。

## 参考文献:

- [1] Masuzawa J. An oceanographic section from Japan to New Guinea at 137°E in January 1967[J]. *Oceanogr Mag*, 1967, 19: 95 -118.
- [2] Nagasaka K. Long term variation of oceanographic condition along the 137°E[J]. *Marine Science*, 1977, 9(3): 18 -22.
- [3] Andow T. Year to year variations of oceanographic subsurface section along the meridian of 137°E[J]. *The Oceanogr Mag*, 1987, 379(1~2) : 47-73.
- [4] 郭忠信, 符淙滨. 热带西太平洋表层暖水和次表层冷水的年际变异[J]. *热带海洋*, 1989, 8(3): 52-59.
- [5] 邹娥梅, 王宗山, 徐伯昌. 沿 137° E 断面 (1967~1987 年)海洋热状况的变化及其与埃尔尼诺事件的关系[J]. *海洋学报*, 1991, 13 (6): 753-766 .
- [6] 张启龙, 翁学传. 热带西太平洋暖池的某些海洋学特征 [C]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(38). 北京: 科学出版社, 1997: 31-38.
- [7] 张启龙, 蔡榕硕, 齐庆华, 等. 西北太平洋 137° E 断面温度场和盐度场的时空特征[J]. *台湾海峡*, 2007, 26(4): 454-463.
- [8] Qiu Bo, Joyce T M. Interannual variability in the mid-and low-latitude western North Pacific[J]. *J Phys Oceanogr*, 1992, 22: 1062-1079.
- [9] 王元培. 137°E断面北赤道流、黑潮变异和黑潮大弯曲的关系[J]. *海洋科学*, 1995, 1: 42-47.
- [10] 顾玉荷. 西北太平洋 137°E 断面海流的纬向体积输送[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(1) : 79-85 .
- [11] 顾玉荷, 孙湘平, 许兰英. 137°E 经向断面上的副热带逆流[J]. *海洋学报*, 1999, 21(5) : 22-30 .
- [12] 孙湘平. 137°E 经向断面上的黑潮与黑潮逆流[J]. *黄渤海海洋*, 1999, 17(3): 1-9 .
- [13] Qu Tangdong, Mitsuder H, Yamagata T. On the western boundary currents in the Philippine Sea[J]. *J Geophys Res-Oceans*, 1998, 103: 7537-7548.
- [14] North G, Bell T, Cahalan R. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 699-706.

## The velocity structure and interannual variations of the North Equatorial Current along the 137°E section

YANG Qing-ying<sup>1,2,3</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: May, 15, 2012

**Key words:** the North Equatorial Current(NEC); interannual variability; subtropical gyre; sea surface height; El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

**Abstract:** The velocity structure and interannual variability of the North Equatorial Current (NEC) and its controlling mechanism were investigated based on the CTD data along the 137°E section obtained by Japan Meteorological Agency (JMA) from 1967 to 2009 and satellite altimetric sea surface height (SSH) data. The results show that the NEC is located between 8°N and 18°N, with a velocity core at 10°~12°N along the 137°E section. The EOF analysis revealed similar patterns in leading modes both in summer and winter, showing out-of-phase interannual variations for the southern and northern parts of the NEC. This phenomenon of the NEC may be controlled by abnormal cyclone and anticyclone circulation in the tropical western Pacific. The velocity field in the NEC had different response to ENSO in summer compared to that in winter. In El Niño (La Niña) summer, the velocities in the upper and central NEC were strong (weak), while in El Niño (La Niña) winter, the velocities in the central and deep NEC were weak (strong).

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)