

对北赤道流分叉纬度变化规律的研究分析

张绪东¹, 修义瑞¹, 刘金芳¹, 苏 戈¹, 王庆业²

(1. 海军海洋水文气象中心, 北京 100161; 广东海洋大学南海海洋环境研究所, 湛江 524088)

摘 要: 关于北赤道流分叉研究的两类方法, 即水文实测数据分析和数值模拟, 其本身都因存在突出的问题而引起估算结果的偏差, 致使相互结果差别很大。所以, 如何找到一种高时空分辨率的数据或提出一个比较符合物理实际并得到实测数据验证的数值模式是研究赤道流分叉的关键。本文将利用从 1992 年 10 月到 2004 年 12 月高时空分辨率(时间分辨率: 7 d; 空间分辨率: $1/3^\circ \times 1/3^\circ$) 的卫星高度计数据, 对北赤道流在表层的分叉进行研究, 包括确定分叉点, 求得其季节和年际变化的规律。

关键词: 北赤道流分叉; 北赤道流分叉轨迹; 卫星高度计

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2008) 2 - 0033 - 09

1 引言

目前, 对于北赤道流分叉的诸多研究结果还存在较大分歧。Qu and Lukas(2003 年)^[1]认为北赤道流分叉在接近表层(0 ~ 100 m)处出现在 14.2°N , 6 月份发生在最南端 13.4°N , 11 月份发生在最北端 14.8°N ; Kim et al.(2004 年)^[2]。根据 JAMSTEC 模式结果得出, 在年平均意义下, 北赤道流表层分叉出现在 14.3°N , 5 月份分叉发生在最南端 3.2°N , 9 月份发生在最北端 15.1°N 。

关于北赤道流分叉的季节变化, Qiu and Lukas(1996)^[3]基于线性的随时间变化的 Sverdrup 关系, 运用合成风场, 最早给出了分叉纬度季节变化的解析解, 结果指出, 北赤道流季节性分叉在 10 月份达到最北, 2 月份达到最南。

关于北赤道流分叉的年际变化, Qiu and Lukas(1996 年)用 1961 ~ 1992 年佛罗里达州立大学的月平均风场驱动一非线性的约化重力模式, 得出在 El Niño 发生前, 零风力旋度线向北移, 一年后分叉发生在较高纬度; 而在 La Niña 年分叉发生在较低纬度。

2 卫星高度计数据介绍和分叉轨迹确定的方法

采用的卫星高度计数据是来自网站 <http://www.aviso.oceanobs.com/> 的产品, 其中包括网格化的海表面高度异常(Gridded Sea Level Anomalies, SLA)和平均的动力地形(Mean Dynamic Topography, MDT)。网格化的海表面高度异常数据是从 1992 年 10 月 ~ 2004 年 12 月, 时间间隔是 7 d, 空间上采用 MERCATOR 网格, 精度是 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$, 该数据是通

过整合卫星 Topex/Poseidon, Jason-1 或 ERS-1/2, Envisat 得到的。平均的动力地形有着与网格化的海表面高度异常相同的分辨率,它对应着由于平均流而引起的海表面高度那一部分,也就是平均的海表面高度减去大地水准面(Geoid),它是由水文数据、漂流浮标以及卫星数据共同确定的。

首先我们将海表面高度异常数据进行每个月份平均,形成了从 1992 年 10 月 ~ 2004 年 12 月共 147 个月的长时间序列,然后又在 12 个月份上平均,形成了气候态的海表面高度异常。

根据地转关系,表层的地转流异常可以由海表面异常(h)计算:

$$u_g = \frac{g}{f} k \times \nabla h$$

其中 k 是垂向的单位向量, f 是科氏参数: g 是重力加速度。

表层平均的地转速度可以根均平均的动力地形(\bar{h} : 见图 1)来计算:

$$\bar{u} = \frac{g}{f} k \times \nabla \bar{h}$$

所以表层的地转速度, $u_g = \bar{u}_g + u_g' = \frac{g}{f} k \times \nabla h$, 其中 $h = \bar{h} + h'$ 是绝对动力地形。

3 确定北赤道流分叉纬度的方法

以前,人们定义北赤道流分叉纬度的标准是在岸边某一宽度范围内平均的经向流速等于零,比如 Qu and Lukas(2003 年)是在岸边 5 个经度范围内平均,而 Qiu and Lukas(1996 年)和 Kim et al(2004 年)都是在岸边 2 个经度范围内平均。由于表层的北赤道流的影响因素较多,变化大,加上在近岸卫星高度计数据误差较大,所以选择在不同宽度范围平均,因此得到的结果差别就较大(Kim et al, 2004 年)。

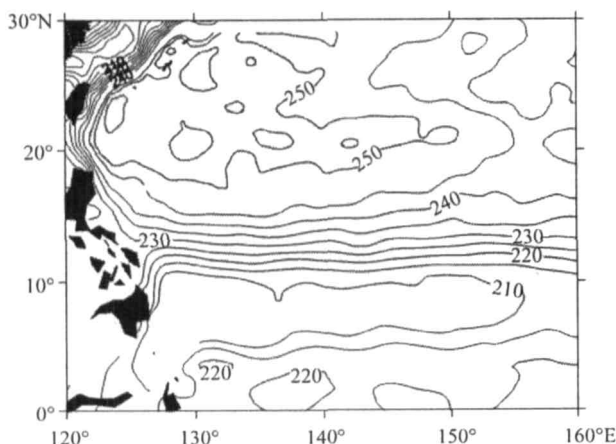


图 1 平均的动力地形(单位: cm)

本文充分利用卫星实测资料高分辨率($1/3^\circ \times 1/3^\circ$)的特点,试图获得低分辨率资料所得不到的信息。基于这种考虑,本文采用计算拉格朗日迹线的方法来确定北赤道流向岸边分叉的具体轨迹。具体做法如下,在网格点所在的每一条经线上寻找 1 个点,在该点开始出发的迹线最终所到达的位置,不偏南也不偏北,这样寻找的一系列点,我们称其为北赤道流分叉轨迹。

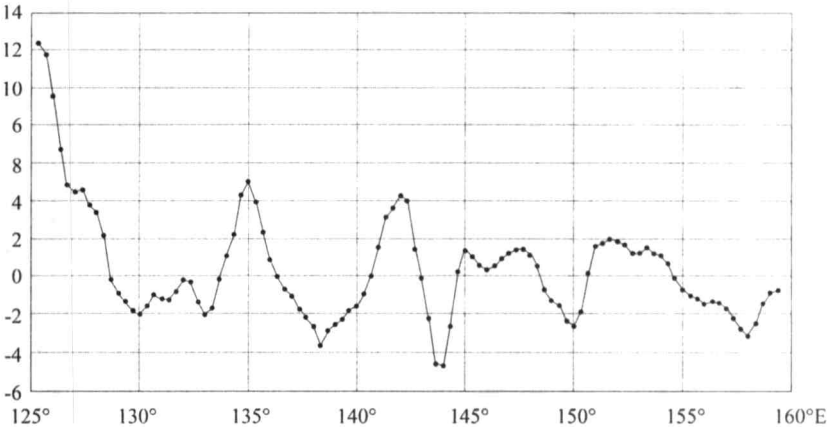
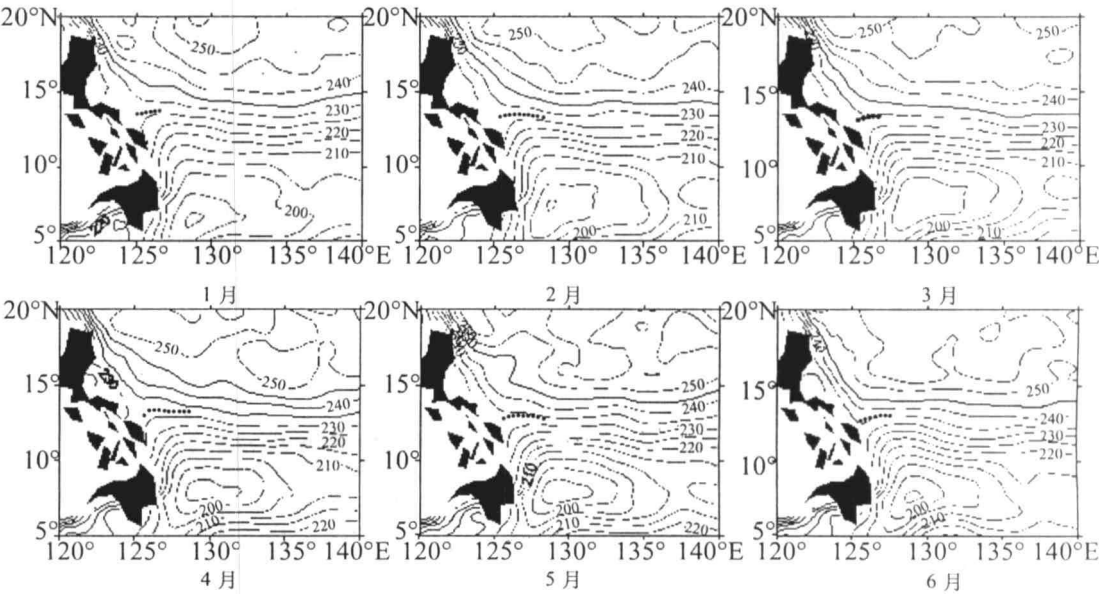


图 2 在分叉轨迹上, 纬向流速的梯度 (单位: cm/s/d)

由于北赤道流在快碰到岸边时, 纬向流速迅速减小, 所以在本文中, 我们把分叉的起始位置定义为沿着上述计算的北赤道流分叉轨迹。从岸边开始, 第一个北赤道流的纬向流速梯度等于 3 cm/s/d 的位置, 图 2 显示了在平均状态下, 北赤道流纬向流速梯度随经度的变化可以发现, 在北赤道流发生明显分叉之前, 纬向流速梯度几乎都小于 3 cm/s/d , 在北赤道流靠近岸边时, 梯度很快从 3 cm/s/d 增加到 10 cm/s/d 。所以我们选取了 3 cm/s/d 这个标准, 相应的北赤道流的分叉纬度就定义为从起始位置到岸边范围内分叉轨迹上各点纬度的平均。从网格化速度场来计算拉格朗日迹线, 大体可以分为四步(本文我们假定速度场是定常的): 第一, 在微团所在的格子里, 选取线性插值速度场; 第二, 通过一个微分方程计算在该格子里微团的迹线和离开该格子位置; 第三, 在微团达到的下



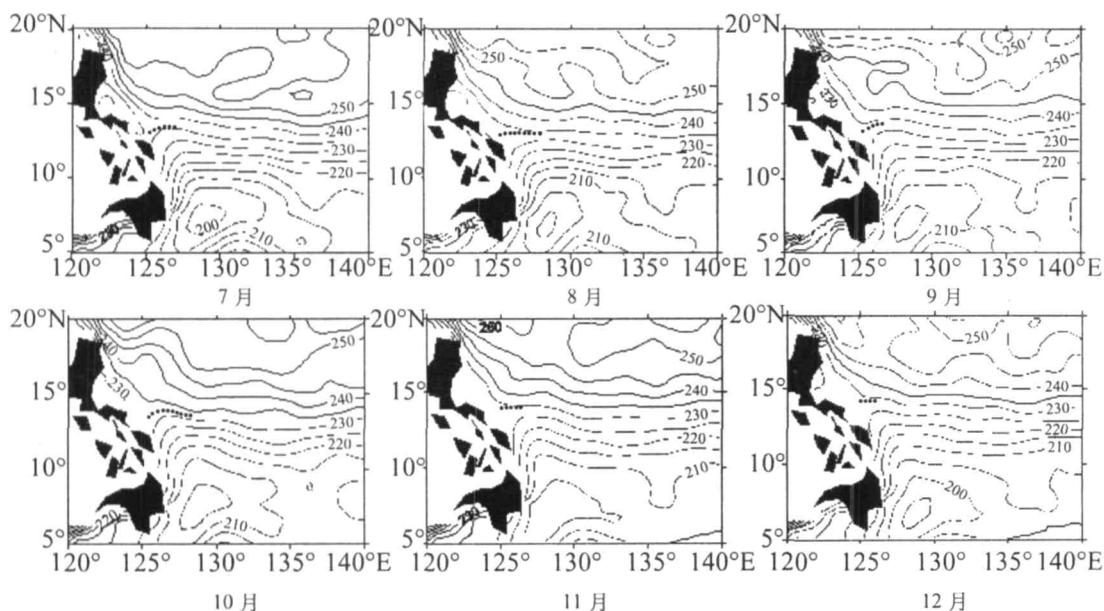


图3 月平均海表面的绝对动力地形(单位: cm)和北赤道流分叉轨迹(黑圆点)

一个格子里,重复步骤一和步骤二;最后,步骤一和步骤二在一系列格子里执行,于是得到了从某一位置开始微团的完整拉格朗日迹线。关于更详细的内容,可以参考文献 Döös 1995^[4], Blanke and Raynaud (1997 年)^[5]和 Vries and Döös(2001年)^[6]就是用这个方法,在卫星高度计网格点所在的每一条经线上都找到了1个点,在该点开始出发的迹线最终所到达的位置,不偏南也不偏北。

3.1 表层北赤道流分叉的季节变化

根据上述描述的计算拉格朗日迹线方法,我们计算了在1~12月各月份里北赤道流分叉的轨迹。图3给出了12个月份海表面的绝对动力地形和北赤道流分叉轨迹。为了表达更清楚起见,我们把各月份具体的轨迹绘制到一起(见图4),图4中圆圈左边的部分显示在图3中。从图4可以看出,北赤道流的轨迹有明显的经向摆动,在1、2、3月份和7、9、10月份北赤道流从分叉点向西,分叉纬度减小很快;而在其它的月份,北赤道流分叉纬度变化很小,甚至保持不变,猜测这可能与风场的变化有关。

本文我们把北赤道流的分叉纬度,定义为从北赤道流开始分叉处到岸边范围内纬度的平均,根据这个标准,图5给出了北赤道流分叉纬度的季节变化。我们发现,在6月北赤道流分叉发生在最南端(12.9°N),12月份发生在最北端(14.1°N),年平均发生在13.4°N。用以前作者确定北赤道流分叉纬度的方法,我们选取了宽度为1°、2°和5°,来确定分叉纬度的季节变化(见图6)。当选取宽度是1°和2°时,得到的结果与图5相差很小;当选取宽度为5°时,得到的结果与图5相差很大。

我们计算的分叉纬度变化幅度大约是1.2°,比 Qu and Lukas(2003 年)的结果小1.4°

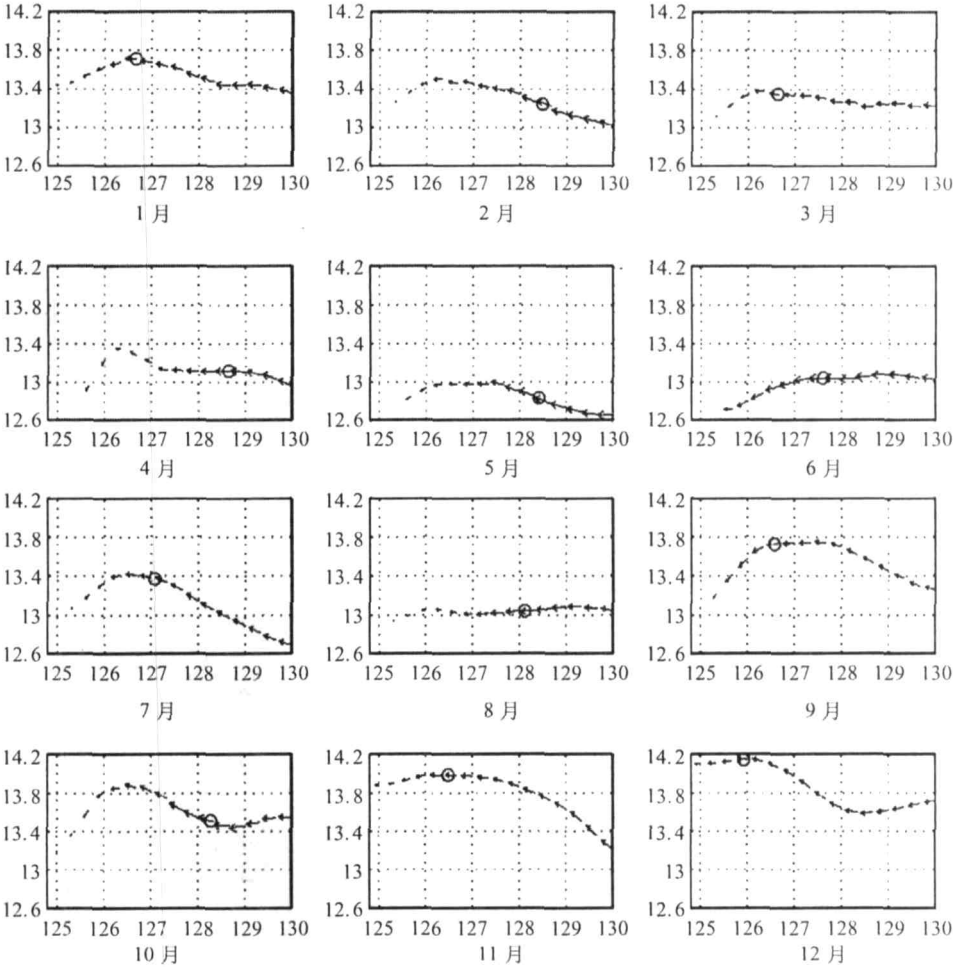


图 4 各月份北赤道流分叉轨迹, 图中的圆圈是北赤道流开始分叉的位置

($13.4^{\circ} \sim 14.8^{\circ}\text{N}$), 也比 Kim et al(2004)的 1.9° ($13.2^{\circ} \sim 15.1^{\circ}\text{N}$)小。具体的原因还需进一步研究。

值得指出的, 从图 5 上看, 7 月份的分叉纬度比 6 月份和 8 月份向北偏离大约 0.4° , 这在统计意义上是明显的。为了解释这个现象, 我们计算了与卫星高度计同期的风应力旋度。我们用了 1992 ~ 2001 年的 FSU 风场数据和 2002 ~ 2004 年期间的 Quikscat 与 NCEP 的混合风场。FSU 风场插值到 $1/2^{\circ} \times 1/2^{\circ}$ 网格上, 使其得到与混合风场相同的分辨率。图 7 显示了菲律宾沿岸 $124^{\circ} \sim 130^{\circ}\text{E}$, $11.5^{\circ} \sim 15.5^{\circ}\text{N}$ 区域内的风应力旋度的季节变化。局地风应力旋度在 11 月份和 5 月份(有最大值和最小值), 比我们计算的分叉纬度变化大约提前了 1 个月。另外, 7 月份的局地风应力旋度比 6 月和 8 月大, 因此, 我们认为局地风场的旋度可能导致 7 月份分叉纬度突然向北的主要原因, 因为较大的风应力旋度会引起北赤道流在较高的纬度发生分叉。

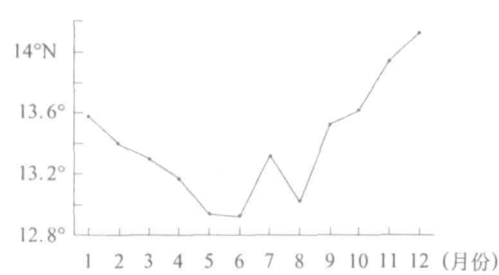


图 5 北赤道流分叉纬度的季节变化

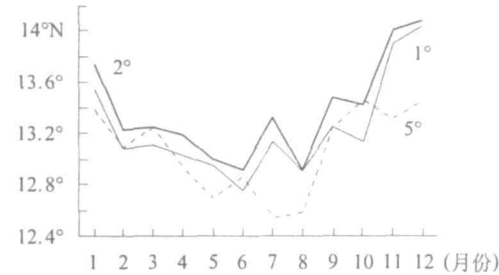


图 6 从菲律宾沿岸开始选取不同的宽度 1° (实线), 2° (粗实线) 和 5° (虚线) 计算的北赤道流分叉纬度

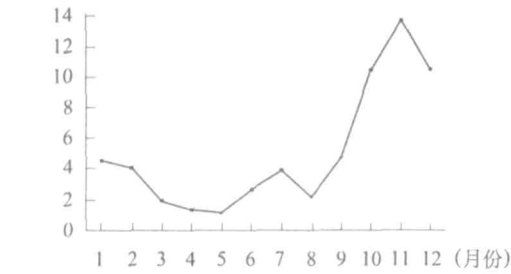


图 7 菲律宾沿岸 11.5°~15.5°N, 124°~130°E 范围内的风应力旋度 (10^{-4}Nm^{-3})

表 1 表层北赤道流分叉发生在最南端和最北端的月份

	最南端	最北端
Qiu and Lukas ^[31]	2 月	10 月
Qu and Lukas ^[11]	6 月(0~100m)	11 月(0~100m)
Kim et al ^[12]	5 月	9 月
本文	6 月	12 月

为清晰起见，我们把以往关于北赤道流在表层分叉季节变化作成表格(见表 1)。从表中可以看出，我们的结果更接近 Qu and Lukas(2003 年)得到的北赤道流在表层分叉的结果，在接近表层(0~100 m)出现在 14.2°N，6 月份发生在南端(13.4°N)，11 月份发生在最北端(14.8°N)。虽然我们的计算结果是 12 月份发生在最北端，而他们是在 11 月份，可能的原因是冬季海洋观测数据很少，不到夏季的 50%。但是从量值上看，我们的结果比他大约小 0.5°~0.7°，猜测可能的原因是他们给出的是从表层到 100 m 深度上平均的结果，因为北赤道流分叉随深度的增加而向北移动。但是我们的结果与 Kim et al.(2004)和 Qiu and Lukas(1996)在表层的结果差别较大。利用 JAMSTEC 模式结果，Kim et al.(2004 年)表明 5 月份分叉发生在最南端(13.2°N)，9 月份发生在最北端(15.1°N)。分析原因是数值模拟没有加入到观测资料进行同化。

3.2 北赤道流分叉的年际变化

利用同样方法，我们给出了从 1992 年 10 月到 2004 年 12 月共 147 个月份分叉纬度时间序列(见图 8)。从图 8 上可以看出，1992/1993 年，1997/1998 年和 2002/2003 年北赤道流分叉发生在 15°N 附近，而在 1996 年和 1999/2000 年，分叉发生在 11°N 附近，说明了北赤道流分叉存在明显的年际变化。

为了更集中研究北赤道流分叉纬度的年际变化，我们对分叉纬度的时间序列和南方

涛动指数都做了12 个月的滑动平均 ,同时去除各自的平均值 ,得到它们的异常(见图 9)。从图 9 可以看出,在拉尼娜年(1996 年,1999/2000 年),北赤道 流分叉出现较低纬度,相对应的南方涛动指数较大;在厄尔尼诺年(1992/1993 年,1997/1998 年,2002/2003 年),北赤道流分叉出现较高纬度,相对应的南方涛动指数很小;这两者的相关系数是-0.70。图 10 显示了 1992 年 10 月到 2004 年 12 月期间分叉纬度与南方涛动指数 的功率谱密度分布。比较可以看出,图 10a 中的谱峰(周期在 6、9、12 个月,32 个月)与图 10b 中的谱峰对应一致。也就是说,北赤道流分叉纬度与南方涛 动指数之间有很好的相互关系。这与最早 Qiu and Lukas(1996 年)的结果不同,他们认为厄尔尼诺发生一年后分叉发生

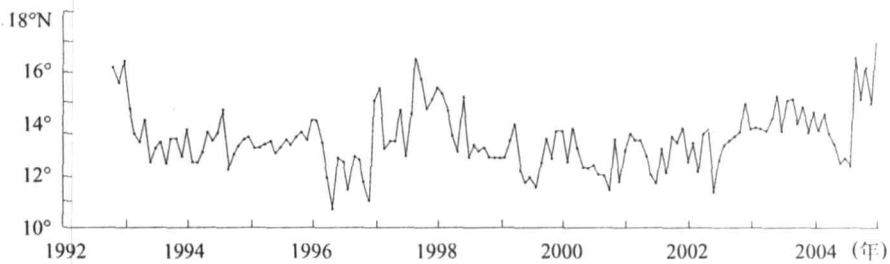


图 8 1992 年 10 月~2004 年 12 月期间北赤道流分叉纬度的时间序列

在较高纬度;而在拉尼娜年分叉发生在较低纬度。这可能主要是由于他们的约化重力模式的垂向分辨率很有限,而且模拟中缺少印度尼西亚贯通流。但是我们的结果与 Kim et al(2004 年)用 JAMSTEC 的模式数据得到的结果相同,所以用观测数据验证了 Kim et al(2004 年)的结果。

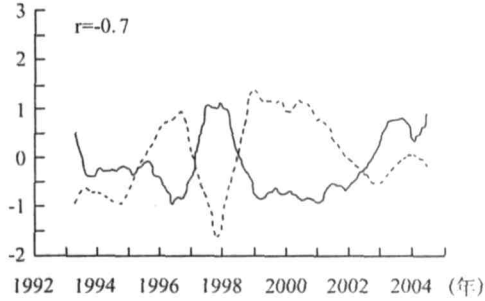


图 9 12 月滑动平均的北赤道流分叉纬度异常的时间序列(实线)与南方涛动指数(SOI)异常(虚线)

4 结果与比较

本章运用 1992 年 10 月到 2004 年 12 月高分辨率的卫星高度计数据,通过一个新的计算北赤道流分叉的方法-拉格朗日迹线的方法,来确定北赤道流分叉的纬度,研究了其季节变化和年际变化。在 6 月北赤道流分叉发生在最南端(12.9°N),12 月份发生在最北端(14.1°N),年平均发生在 13.4°N。我们结果支持 Qu and Lukas(2003)的结果,虽然在冬季差一个月,可能是冬季观测数据较少的原因。但是与 Qiu and Lukas(1996)和 Kim et al(2004)的结果有很大的不同。

分叉纬度变化幅度是 1.2°,与他人研究的结果(1.4°, Qu and Lukas, 2003;1.9°, Kim et al, 2004)相比是最小的。

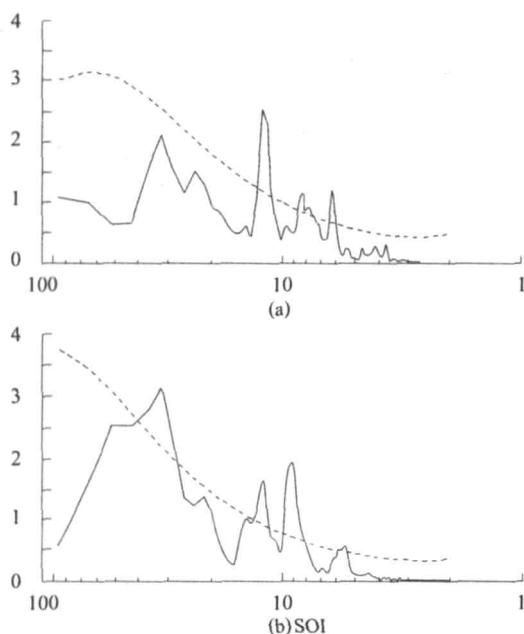


图 10 1992 年 10 月~2004 年 12 月期间(a)北赤道流分叉纬度与(b)南方涛动指数的功率谱密度分布

从统计意义上,7月份的分叉纬度比6月份和8月份的大,经过本文分析,我们认为局地风应力旋度是导致这种现象的主要原因。

分析年际的时间尺度上,在厄尔尼诺年,北赤道流分叉发生在较高纬度;而在拉尼娜年分叉发生在较低纬度。

参考文献:

- [1] QU T, LUKAS R. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific. *J Phys Oceanogr*, 2003,33 :5 ~ 18.
- [2] KIM Y Y, QU T, JENSEN T, et al. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM, *J Geophys Res*, 2004,109.
- [3] QIU B, LUKAS R. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary. *J Geophys Res*, 1996,101 :12315 ~ 12330.
- [4] DÖÖS K. Inter-ocean exchange of water masses. *J Geophys Res*, 1995,100 :13499 ~ 13514.
- [5] BLANKE B, RAYNAUD S. Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent :An Eulerian and Lagrangian approach from GCM results. *J Phys Oceanogr*, 1997,27 :1038 ~ 1053.
- [6] VRIES, DÖÖS K. Calculating Lagrangian Trajectories using time-dependent velocity fields. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001,18 :1092 ~ 1101.

The determination about The bifurcation latitude of the NEC and its variations

ZHANG Xu-dong¹, XIU Yi-rui¹, LIU Jin-fang¹, SU Ge¹, WANG Qing-ye²

(1. Navy Marine Hydrometeorological Center, Beijing 100161 China; 2. South China Sea Environmental Institute,
Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088 China)

Abstract : There are two kinds of studies on the bifurcation of the NEC, one based on observed hydrographical data and the other based on numerical modelling. The results derived from observational data, are more consistent with facts with significant errors owing to poor resolution of the data used. The results from numerical models have higher temporal and spatial resolution, while they deviate from observations due to certain defects of the models themselves. Up to now, these model results about bifurcation of the NEC, such as variation of bifurcation latitude, have great differences from each other. So it is the key to study bifurcation of the NEC how to find a data set with high enough resolution or to come up with a numerical model, which is based on real physical processes and can be validated by observations. In this thesis, altimetry data with high resolution (time resolution : 7 days ; space resolution : $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ latitude and longitude as statistical grids) from October 1992 through December 2004 are analyzed to determine the bifurcation latitude according Lagrangian trajectory method, and study its seasonal and interannual variations.

Key words : Bifurcation of the North Equatorial Current ; The bifurcation trajectory of the NEC ; Altimetry dat.