

# 基于 20 a 卫星高度计数据的黑潮变异特征

赵新华, 杨俊钢, 崔 伟

(国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 黑潮作为一支典型的西边界流, 其路径变化特征及其相关的物理现象对于渔业和航海有着不可忽视的影响。本文基于改进的特征线方法, 利用 1992~2012 年的高度计绝对动力地形数据提取了整个黑潮流区逐月的黑潮主轴和边界位置, 并对沿轴速度、主流宽度、表层水体输运以及路径标准差等黑潮特征量进行了分析研究。结果表明, 黑潮整体的沿轴速度在夏秋季较大, 最大值可达 0.95 m/s, 而在冬季的速度较小; 黑潮主流宽度在 10、11 月份达到最大值; 黑潮表层水体输运在夏季最大, 春秋两季次之, 冬季最小。沿黑潮流路分区对黑潮特征进行分析, 结果表明, 越往黑潮下游, 其沿轴速度、主流宽度和表层水体输运越大, 同时沿轴速度和表层水体输运量最大值出现的时间也越晚, 黑潮主轴位置相对于其多年平均的偏离程度越大, 且随时间波动也越强烈。

**关键词:** 高度计; 黑潮; 主轴

中图分类号: P731 文献标识码: A

doi: 10.11759/hyqx20150108002

文章编号: 1000-3096(2016)01-0132-06

黑潮是沿着北太平洋西部边缘向北流动的一支强西边界海流, 与大西洋的湾流齐名, 它具有高盐高温、流速强、流量大、厚度大等特征。与湾流相似, 黑潮也是一支斜压性很强的海流, 同样处于准地转平衡之中。黑潮从低纬度地区向中高纬度地区进行巨大的能量和物质输送, 从而对东亚区域乃至全球的海洋环境与气候带来重要的影响<sup>[1-2]</sup>。

对黑潮的路径及其特征量变异的研究一直以来都是国内外学者研究的热点问题<sup>[3-4]</sup>。过去采用的现场观测数据由于空间覆盖率有限, 无法准确地反映出黑潮路径整体的时空变化特征。随着卫星测高技术不断发展, 长时间序列和高分辨率的海洋遥感数据得到了广泛应用, 一些学者也将其应用于黑潮主轴的研究<sup>[5-6]</sup>。Ambe 等<sup>[7]</sup>利用高度计和浮标数据首先提出了特征线法来确定黑潮主轴, 此后不断有学者利用该方法对黑潮流轴进行分析研究<sup>[8-11]</sup>。刘广平等<sup>[8]</sup>利用该方法探究了热带气旋过境期间吕宋海峡黑潮主轴的变化, 于龙等<sup>[9]</sup>采用漂流浮标资料利用该方法提取了黑潮 15 m 层流路的时空变化。此外, Liu 等<sup>[12]</sup>基于高度计数据进一步对东海黑潮路径变化进行了分析研究。

目前对于黑潮主轴的研究主要集中在东海黑潮和日本以南区域中尺度涡旋较少的区域, 由于整个黑潮流域尤其是黑潮延伸区附近存在大量中尺度涡

旋, 采用特征线法在黑潮延伸区内提取的黑潮主轴位置容易陷入中尺度涡旋的影响区域内, 从而无法准确提取出该区域内黑潮的主轴和边界位置。对于黑潮流路的整体性研究更能反映出黑潮真实的变化情况, 从而加深我们对于黑潮的进一步认识。本文利用 20 a 的高度计数据, 基于改进的特征线方法, 提取整个黑潮流域内(22°~40°N, 120°~160°E)黑潮的主轴和边界位置, 并对黑潮主流沿轴速度、宽度和表层水体输运等特征量及其变化进行研究。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本文主要采用的高度计数据是法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供的绝对动力地形(ADT)资料, 该资料是由 T/P 及其后继卫星 Janson-1/2, ERS-1/2 和 ENVISAT 的观测数据融合得到的产品, 并进行了仪器误差、海况误差和

收稿日期: 2015-01-08; 修回日期: 2015-05-11

基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA122803); 中欧合作龙计划项目(ID.10466)

[Foundation: the National High Technology Research and Development Program, No. 2013AA122803; ESA-MOST Dragon Cooperation 3 Program, No.ID.10466]

作者简介: 赵新华(1990-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋与海洋遥感方面研究, 电话: 0532-88966694, E-mail: wdnzxhh@163.com; 杨俊钢, 通信作者, 副研究员, 主要从事高度计数据海洋应用研究, 电话: 0532-88966694, E-mail: yangjg@fio.org.cn

潮汐干扰等影响因素的校正。本文采用的数据时间是 1992 年 10 月~2012 年 12 月, 数据时间间隔为 7 d, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。进而根据地转平衡关系, 得到研究区域内的地转流速数据。

## 1.2 分析处理方法

本文采取 Ambe 等<sup>[7]</sup>所使用的特征线法来确定黑潮主轴, 并在此基础上加以改进。该方法的基本步骤如图 1 所示: (1)根据多年观测结果在黑潮主流区内选取黑潮主轴常年经过的点作为起始点; (2)在所选取的定点处作一条与该点流向垂直且长度为  $x=140$  km 的辅助线; (3)在辅助线上每隔  $\Delta x=7$  km 进行插值, 计算所有插值点的流向平均值; (4)调整辅助线使其垂直于平均流向, 再在调整之后的辅助线上进行第二次插值, 主轴位置被定义在新辅助线上流速最大的点, 边界被定义为沿流速度分量大于主轴处速度的 30% 的区域; (5)然后沿平均流向向下游移动  $\Delta r=10$  km 到达下个位置, 重复步骤(2)~(4), 得到新的主轴位置。

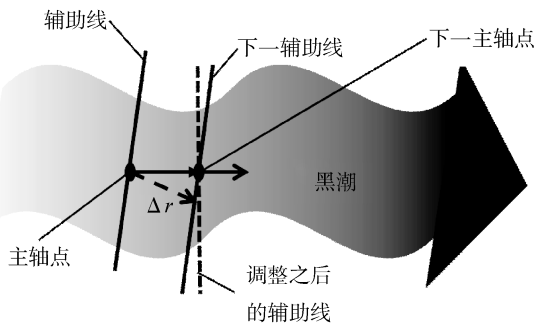


图 1 特征线法计算黑潮主轴示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram showing the characteristic line method used to calculate Kuroshio axis<sup>[7]</sup>

但是对于整个黑潮流域, 尤其在  $143^\circ\text{E}$  以东的黑潮延伸区附近, 因为该区域内存在强烈的中尺度涡旋, 提取的主轴位置通常会陷入中尺度涡旋中, 故使用该方法无法很好地提取出黑潮主轴位置。本文对于该方法进行了改进, 提出了基于相邻时刻提取结果剔除涡影响的黑潮主轴提取方法, 参考上一时刻的主轴位置和流向来剔除涡旋对于黑潮主轴提取的影响。具体改进方法如下:

由于黑潮延伸区主流平均宽度在 150~170 km, 所以首先将 Ambe 方法中  $x$  修改为 200 km,  $\Delta x$  修改为 10 km, 为了除去黑潮延伸区小尺度涡旋的影响, 将  $\Delta r$  修改为 50 km。

当提取的主轴位置点数  $k$  大于 20 时(认为离开东

海黑潮流路稳定的区域), 求得提取到的主轴位置点与此前提取到的  $1\sim(k-2)$  点的所有主轴点的距离差, 如果检测到最小距离差小于  $0.4^\circ$  则认为它陷入涡旋中, 由于黑潮随时间变化不太强烈, 我们参考上一时刻提取的主轴线, 重新计算  $(k-5)\sim(k-3)$  点的主轴位置, 如图 2 所示。

首先找到该  $(k-5)$  点的主轴位置与上一时刻的主轴点位置最近的点, 作为参考主轴点  $a$ , 在  $a$  点处作一条与该点流向垂直且长度为 200 km 的辅助线, 并在辅助线上每隔 10 km 进行插值,  $(k-5)$  点的主轴位置被重新确定为该辅助线上流速最大的点; 然后用上一时刻主轴点为  $(a+1)$ ,  $(a+2)$  的位置作类似的辅助线并进行插值求得  $(k-4)$ ,  $(k-3)$  的主轴位置,  $(k-2)$  的位置利用沿新的  $(k-3)$  的主轴点处的流向向下游移动 50 km, 到达下个位置, 重复步骤(2)~(4)得到。

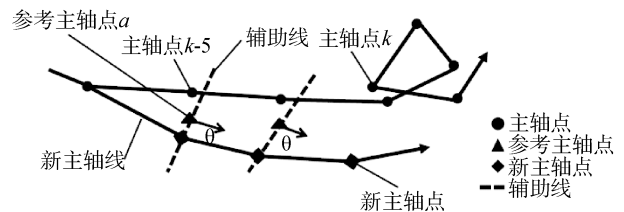


图 2 改进的特征线法示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the improved characteristic line method

表层水体输运( $S$ )定义为黑潮主流区域内流速的叠加:

$$S = \sum_{i=1}^n v_i \times \Delta r \quad (1)$$

其中  $n$  为黑潮主轴提取过程中落入主轴断面上黑潮主流的数据点个数,  $v_i$  为第  $i$  个数据点的沿流速度,  $\Delta r$  为数据点的距离间隔 50 km。定义路径标准差( $D_s$ )表示黑潮偏移  $20a$  主轴位置的程度:

$$D_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2)}{n}} \quad (2)$$

其中  $x_i$ ,  $y_i$  分别为第  $i$  个主轴点的经纬度, 标准差越大, 表示黑潮主轴位置相对于其多年平均的偏离程度越大。

## 2 黑潮变异特征提取与分析

将计算得到的每隔 7 d 的地转流速数据进行月平均, 得到 20 a 逐月的地转流速数据。对于个别未能正确提取到黑潮主轴位置的月平均数据, 我们采用 7 d 数据有效提取的平均值作为该月份的提取结果, 由此提取得到 20 a 间每个月的黑潮主轴和边界

位置, 并得到黑潮特征量的逐月结果。图 3 为 2002 年黑潮主轴和边界逐月提取结果, 其中选取 130°E

和 144°E 两个截面将黑潮分为东海、日本以南和黑潮延伸区 3 个子区域。

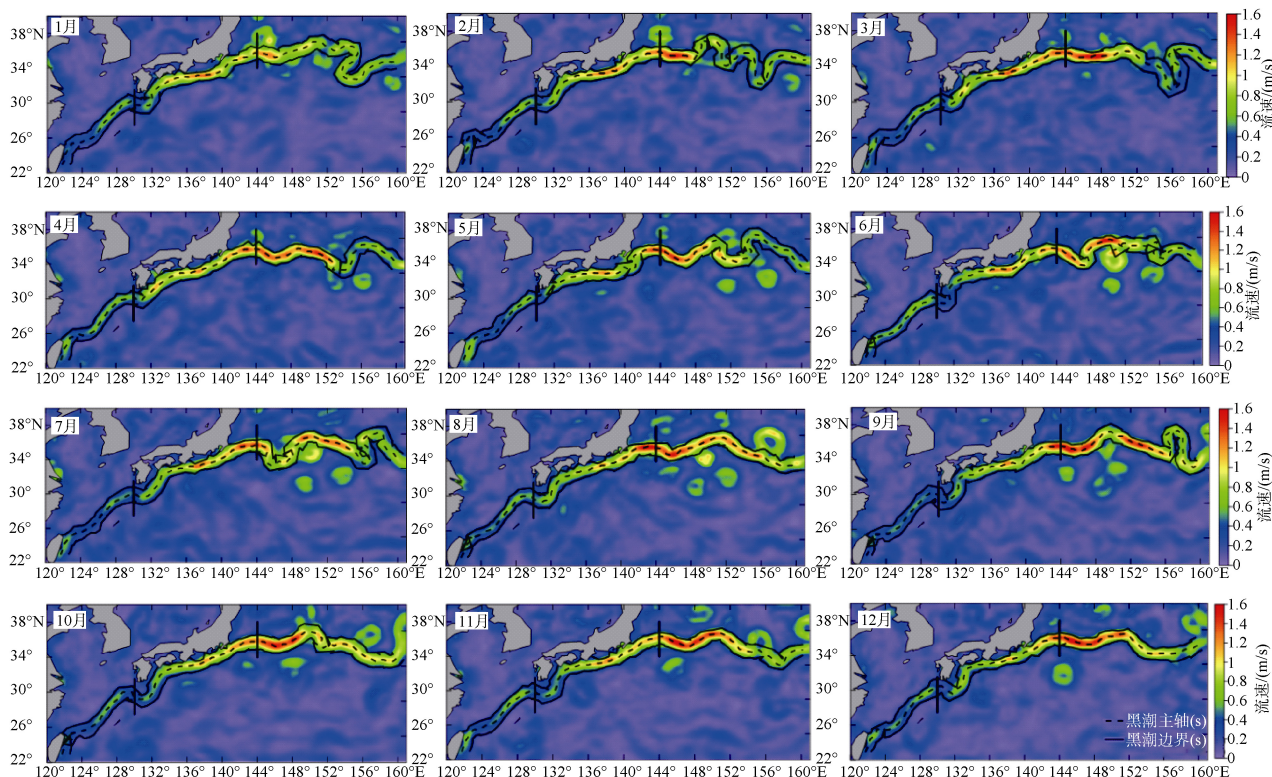


图 3 2002 年 1~12 月提取的黑潮主轴和边界

Fig. 3 Kuroshio axis (red lines) and boundary (black line) detected from January to December, 2002

从图 3 中可以看出, 基于改进的特征线法能准确地提取出整个黑潮流域内黑潮主轴和边界的位置。结果表明, 在黑潮东海区域和日本以南区域黑潮位置随时间变化较为稳定, 而在黑潮延伸区附近黑潮流路变化较为剧烈。

基于上述提取结果, 对 1992~2012 年黑潮的平均沿轴速度、主流宽度、表层水体运输和路径标准差进行空间算术平均, 分别获得黑潮沿轴速度、主流宽度、表层水体运输和路径标准差平均值的时间序列, 结果如图 4 所示。进行五次多项式拟合后, 结果表明整个黑潮区域的沿轴速度和表层水体运输变化较为一致, 从 1992 年开始减小, 到 1996 年为最小值, 此后开始不断增长, 在 2004~2005 年左右到达最大值, 此后又开始减小, 表明整个黑潮区域的沿轴速度和表层水体运输都存在一个周期约为 6 a 的年际振荡。而整个黑潮区域的宽度在 1996 和 2005 年左右达到极大值, 在 1992 年、2002 年和 2011 年达到极小值。黑潮路径标准差从 1992 年开始增加, 在 1996 年到达最大值, 随后变化趋势较为平缓, 在

2011 年后又开始迅速减小。

进一步将黑潮整个流域分为东海、日本以南和黑潮延伸区三个子区域, 对其 20 a 间月平均黑潮特征量的变化进行了研究, 结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 黑潮整体的沿轴速度在夏秋季(7~9 月)较大, 最大值可达到 0.95 m/s; 而在冬季(12~2 月)较小, 这之前冯颖等<sup>[13]</sup>采用 Argos 浮标分别对于台湾东北 SS、东海中央 PN、日本九州与奄美群岛 TT 三个断面的观测结果基本一致。从各子区域来看, 日本以南区域和黑潮延伸区的沿轴速度明显大于黑潮东海区域。黑潮东海区域沿轴速度在 6、7 月达到最大, 而日本以南区域沿轴速度在 7、8 月份达到最大, 黑潮延伸区沿轴速度在 9、10 月份达到最大; 各区域最小值点出现的位置也是如此。结果表明沿黑潮流路, 越往黑潮下游, 黑潮沿轴速度越大, 同时黑潮速度极大(小)值在一年中出现的月份越晚。

黑潮整体主流宽度在 10、11 月份达到最大值。从各子区域来分析, 越往黑潮下游, 黑潮的主流宽度越大。其中东海黑潮部分主流宽度在夏季最小, 冬

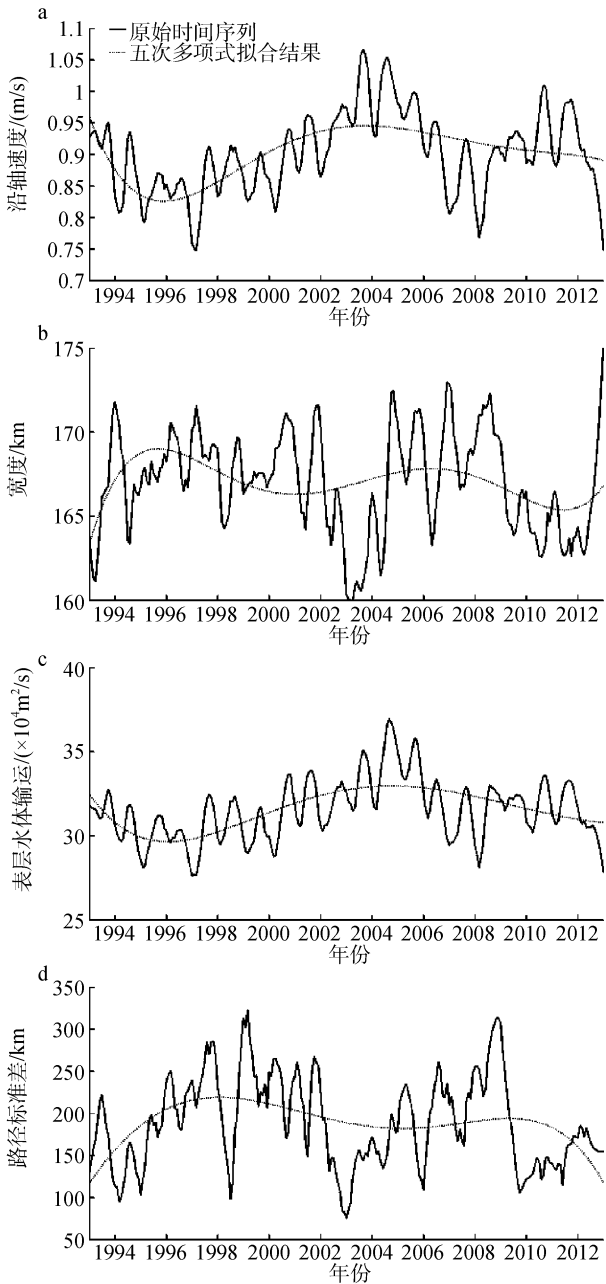


图 4 20 a 黑潮平均沿轴速度(a)、主流宽度(b)、表面水体运输(c)和路径标准差(d)的年际变化

Fig. 4 Time series of (a) along-stream velocity, (b) section width, (c) along-stream surface transport, and (d) path standard deviation of Kuroshio Current from 1992 to 2012

季最大，这与 Liu 等<sup>[12]</sup>的结果较为一致。

黑潮整体表层水体运输在夏季较大，在冬季最小。这与黑潮夏强冬弱的一般认识是相符合的。沿黑潮流路，越往黑潮下游，黑潮表层水体输运量越大，同时黑潮表层水体输运量最大值出现的时间越晚。

黑潮路径标准差反映了黑潮主流相对于其多年

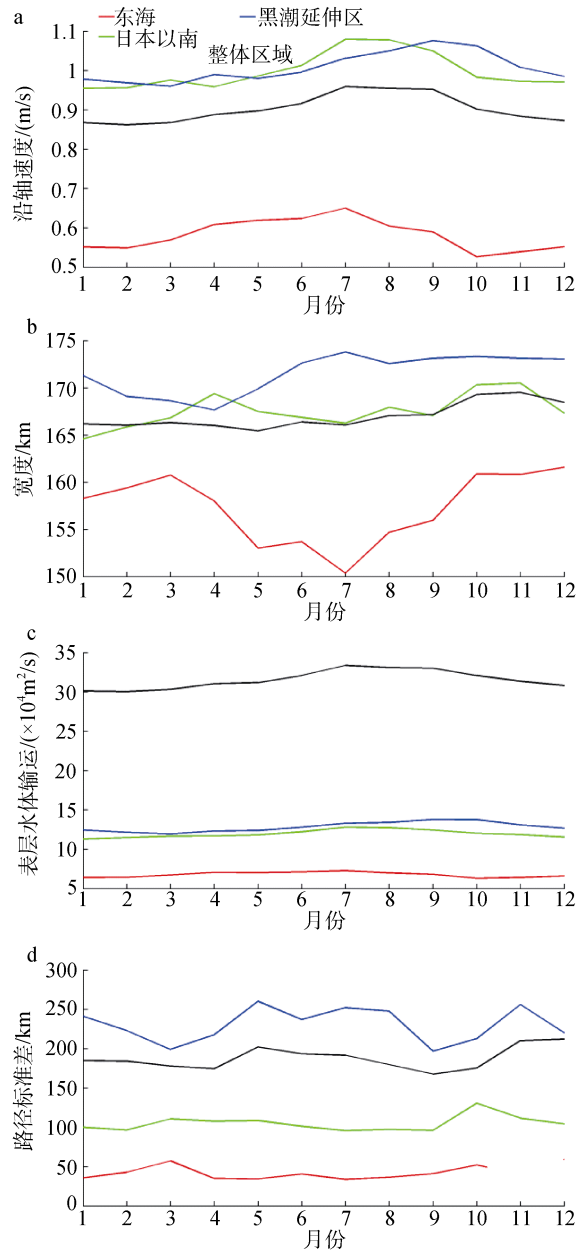


图 5 黑潮 20 a 月平均沿轴速度(a)、主流宽度(b)、表面水体运输(c)和路径标准差(d)的变化

Fig. 5 20-year month averaged: (a) along-stream velocity, (b) section width, (c) along-stream surface transport, and (d) path standard deviation of Kuroshio

平均的偏离程度，沿黑潮流路，越往黑潮下游，黑潮主轴位置相对于其多年平均的偏离程度越大，且随时间波动也越强烈。这可能是由于越往黑潮下游，尤其是在日本以南和黑潮延伸区附近，存在的中尺度涡旋的数量不断增多，对于黑潮流路的影响也愈发明显。

此外，为了进一步分析黑潮沿轴速度与主流宽度、表层水体运输的相关性，计算了整个黑潮区域的

沿轴速度与主流宽度、表层水体运输的超前滞后相关系数, 结果如图 6 所示。

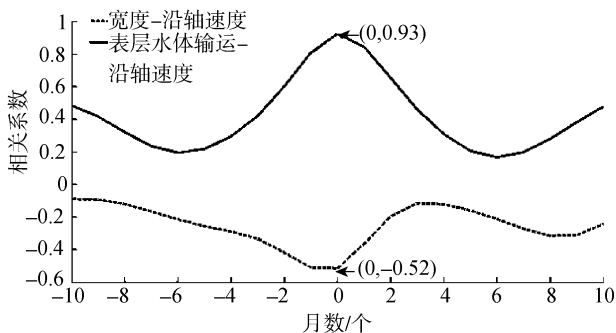


图 6 黑潮沿轴速度与主流宽度、表层水体运输的相关系数  
Fig. 6 Correlation coefficient of along-stream velocity with section width and along-stream surface transport

由图 6 可以看出, 随着黑潮沿轴速度的增加, 黑潮的主流宽度同相位减小, 而表层水体输运量在同相位增加。这与 Liu 等<sup>[12]</sup>对于东海黑潮的研究结果有所不同。

### 3 结论

本文基于改进的特征线提取黑潮主轴的方法, 利用 20 a 的高度计绝对动力地形数据提取了整个黑潮流区的黑潮主轴和主流边界, 并对黑潮沿轴速度、主流宽度、表层水体运输以及路径标准差等特征量进行了分析研究。提取结果表明, 对于整个黑潮流区, 尤其是在黑潮延伸区附近, 改进的特征线法能很好地提取出黑潮主轴和边界的位置, 并能有效提取黑潮的沿轴速度、主流宽度、表层水体运输以及路径标准差等特征量。

黑潮整体的沿轴速度在夏秋季(7~9 月)速度较大, 最大值可达 0.95 m/s, 而在冬季(12~2 月)的速度较小。整体主流宽度在 10、11 月份达到最大值。黑潮整体表层水体运输在夏季较大, 在冬季最小。沿黑潮流路分区域对于黑潮特征进行分析, 结果表明越往黑潮下游, 黑潮的沿轴速度、主流宽度和表层水体运输越大, 同时沿轴速度和表层水体运输最大值出现的时间也越晚, 黑潮主轴位置相对于其多年平均的偏离程度越大, 且随时间波动也越强烈。这可能是由于越往黑潮下游, 尤其是在日本以南和黑潮延伸区附近, 存在的中尺度涡旋的数量不断增多, 对于黑潮流路的影响也越发明显。

进一步对黑潮沿轴速度与主流宽度、表层水体运输的相关系数分析表明, 随着黑潮沿轴速度的增

加, 黑潮的主流宽度同相位减小, 而表层水体输运量在同相位增加。

致谢: 感谢法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供的高度计融合数据。

参考文献:

- [1] 潘丰, 张有广, 林明森. 黑潮延伸体区海平面异常和中尺度涡的时空特征分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 29-37.  
Panfeng, Zhang youguang, Lin mingsen. Spatial and temporal variability of the sea level anomalies and mesoscale eddies in the region of the Kuroshio Extension[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 29-37.
- [2] 高理, 刘玉光, 荣增瑞. 黑潮延伸区的海平面异常和中尺度涡的统计分析[J]. 海洋湖沼通报, 2007, 1: 14-23.  
Gao li, Liu yuguang, Rongzengrui. Sea level anomaly and mesoscale eddies in the Kuroshio extension region[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, 1: 14-23.
- [3] Uchida H, Imawaki S. Eulerian mean surface velocity field derived by combining drifter and satellite altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(5): 331-334.
- [4] Hu X M, Xiong X J, Qiao F L, et al. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite-tracked drifter data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(6): 1-16.
- [5] 潘家祎, 袁业立, 郑全安. 用 Geosat 高度计数据观测黑潮流系的低频变化——季节及年际变化分析[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 51-62.  
Pan jiawei, Yuan yeli, Zhengquan. The variation of the Kurishio at low frequencies detected by Geosat altimeter. Seasonal and interannual variability analysis[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(4): 51-62.
- [6] 王海龙, 郭佩芳, 钱成春, 等. 高度计监测日本以南黑潮主轴特性的变化[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 84-92.  
Wang hailong, Guopeifang, Qianchengchun, et al. Kuroshio meander south of Japan detected by altimeter[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(4): 84-92.
- [7] Ambe D, Imawaki S, Uchida H, et al. Estimating the Kuroshio Axis South of Japan Using Combination of Satellite Altimetry and Drifting Buoys[J]. Journal of Oceanography, 2004, 60(2): 375-382.
- [8] 刘广平, 胡建宇. 热带气旋过境期间黑潮流轴变化的初步分析[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(1): 35-41.  
Liu guangping, Hu jianyu. A preliminary analysis of variation of the Kuroshio axis during tropical cyclone[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(1): 35-41.
- [9] 于龙, 熊学军, 郭延良, 等. 根据漂流浮标资料对黑潮 15m 层流路及流轴特征的分析[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(3): 316-323.

- Yu long, Xiong xuejun, Guoyanliang, et al. Analysis of the path and axis features of the Kuroshio at the depth of 15m based on drifting buoy data[J]. *Advance in Marine Science*, 2014, 32(3): 316-323.
- [10] Ma C, Wu D X, Lin X P. Variability of surface velocity in the Kuroshio Current and adjacent waters derived from Argos drifter buoys and satellite altimeter data[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(2): 208-217.
- [11] 丁睿彬, 陈大可, 姜良红. 黑潮流轴在吕宋海峡的变化分析[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(2): 16-25.  
Ding ruibin, Chen dake, Jiang lianghong. Variability of Kuroshio axis at Luzon Strait[J]. *Journal of Marine Science*, 2009, 27(2): 208-217.
- [12] Liu Z Q, Gan J P. Variability of the Kuroshio in the East China Sea derived from satellite altimetry data[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic*, 2012, 59: 25-36.
- [13] 冯颖, 陈红霞, 袁业立. 基于 Argos 漂流浮标的东海黑潮特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(3): 275-284.  
Fengying, Chen hongxia, Yuan yeli. Analysis of Argos drifter data for Kuroshio characteristics in East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(3): 275-284.

## Variability of Kuroshio based on 20-year altimeter data

ZHAO Xin-hua, YANG Jun-gang, CUI Wei

(First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Received:** Jan., 8, 2015

**Key words:** altimeter; Kuroshio; current axis

**Abstract:** Based on 20-year (1991–2012) Absolute Dynamic Topography derived satellite altimetry data, the location of the axis and boundary of the Kuroshio Current are derived using the improved characteristic line method. In addition, the variability of the along-stream velocity, section width, along-stream surface transport, and path standard deviation of the Kuroshio Current are studied. The results show that the along-stream velocity of the Kuroshio increases from a minimum value during winter to a maximum of 0.95 m/s in summer and autumn, and a larger mainstream width occurs in October and November. The mean surface along-stream transport has a maximum value in summer; there is reduced transport in spring and autumn, and it is at a minimum in winter. Based on a study of different regions along the current, it was found that along-stream velocity, section width, and along-stream surface transport increase along the current, while the time when the maximum value of the along-stream velocity and surface transport occur is late. The location of the axis of the Kuroshio Current departs from the annual mean path further along the current, and fluctuations become stronger with time.

(本文编辑: 李晓燕)