

根据漂流浮标资料对黑潮 15 m 层流路及流轴特征的分析^{*}

于 龙^{1,2}, 熊学军^{1,2,3*}, 郭延良^{1,2}, 郭永青^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 利用 1979-02—2012-03 共 33 a 的水帆位于 15 m 层的 Argos 漂流浮标资料, 绘制黑潮流系 15 m 层的多年年平均和月平均流场, 运用特征线方法计算得到黑潮流轴, 定义黑潮流动路径的边界为流速大小 20~30 cm/s 的过渡性区域。结果显示: 黑潮多年年平均流路大致是一个以 (13°30'N, 142°00'E) 为圆心、2 235 km 为半径的直角弧段, 其在吕宋海峡、台湾东北、九州西南及伊豆海岭附近海区发生气旋式弯曲前先进行反气旋式弯曲调整, 弯曲处出现的路径开口主要是支流的并入或分支的流出; 黑潮流轴整体性偏向黑潮左边界, 其中在吕宋岛东北至台湾以东海域最为显著, 在本州岛以南海域次之, 而在东海段基本居中; 黑潮流路上的流速在总体上由南向北呈增大趋势, 但并非沿流路持续性逐渐增加, 而是呈现出较平直流段的大流速区和弯曲调整流段的低流速区相互交错的情况, 其中四国岛以南至伊豆诸岛以西流段的流速为最大。多年月平均流场显示, 2 月, 5 月, 8 月和 11 月这 4 个月份是黑潮流路和流轴发生变化的重要转折期, 而 1 月, 4 月, 7 月和 10 月这 4 个月份则是各季节的代表月份。其中, 冬季月份的黑潮流路和流轴最为曲折, 向边缘海发生显著入侵; 夏季月份的黑潮流路和流轴最为平直, 左侧伴随有北向流动; 春、秋两季的过渡性特征则比较明显。

关键词: 漂流浮标; 黑潮; 流路; 流轴

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2014)03-0316-08

在东中国海与西北太平洋的交汇处, 有一条黑色的水带如奔腾的江河穿行在第一岛链之间, 这就是黑潮。黑潮是中国海区及邻域环流系统的主动脉, 作为大洋对陆缘浅海区环流的一个驱动力, 持续不断地将外洋信息传递到中国近海, 对它的水文要素场和生态要素场有着决定性的影响^[1]。

对黑潮的认知是一个不断丰富和深化的过程, 胡筱敏等^[2]利用卫星跟踪海表面漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域的多年年平均和季节平均表层流场分布特征进行了系统分析, 指出在反气旋式弯曲处均发生分支或入侵现象; 马超等^[3]采用 Argos 漂流浮标资料分析了黑潮入侵南海问题, 得出黑潮向南海入侵主要发生在秋、冬两季, 春、夏两季基本上不发生; LIU 等^[4]应用卫星高度计资料研究了东海黑潮近表层流场的时空变化; 王海龙等^[5]应用 TOPEX/Poseidon 卫星高度计海表面测高资料计算分析了日本以南黑潮主轴的摆动特性以及流速的分布与变化特征。

基于卫星通讯的自主式观测资料越来越多, 观测质量也逐渐提高, 对黑潮流路进行整体性研究并达到月份尺度的可能已经成熟。本文采用 1979-02—2012-03 共 33 a 的水帆位于 15 m 层的 Argos 漂流浮标资料,

^{*} 收稿日期: 2014-04-08

资助项目: 国家自然科学基金——黄海暖流的多时相特征及其发生机制研究(41376038); 国家海洋局科技司专项子课题——黑潮结构时空变化特征对中国近海环流的影响分析(GASI-03-01-01-02); 国家重大科学研究计划——太平洋印度洋对全变暖的响应及其对气候变化的调控作用-热带太平洋印度洋海洋观测(2012CB955601); 科技部公益性行业科研专项——常用海底声纳测量仪器计量检测关键技术与示范应用(201305034); 基金委山东省海洋科学研究中心联合资助项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1406404)

作者简介: 于 龙(1988-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: yulong@fio. org. cn

*** 通讯作者,** E-mail: xiongxi@fio. org. cn

(李 燕 编辑)

对整个黑潮流系 15 m 层的多年年平均和月平均流路与流轴特征进行了系统分析。

1 资料与方法

1.1 资料来源与处理

Argos 漂流浮标来源于 NOAA 大西洋实验室,该实验室已对原始数据进行整合、质量控制和插值,得到时间间隔为 6 h 的空间位置资料。我们选取了 1979-02—2012-03 海域($10^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)内的 4 710 个浮标资料,将研究区域(图 1)按 $(1/4)^{\circ}\times(1/4)^{\circ}$ 划分网格,对每个网格内的海流数据进行正态分布检验,去掉大于 2 倍方差的数值,仅将包含 3 个及以上数据的网格视作有效网格,然后进行网格平均。该类 Argos 漂流浮标为三段式结构,上部浮球主要用于在海面与卫星通讯,中部缆线用于上下部连接,下部位于 15 m 水层的水帆用于被海流随体拖拽,故由其位置数据计算得到的流速矢量位于 15 m 水层。因受到风应力、波浪、水阻力等影响,浮标的漂移速度与海流流速的观测误差约为 $2\text{ cm/s}^{[6-7]}$,而由 Argos 定位系统对浮标的定位偏差所引起的流速误差约为 $5\text{ cm/s}^{[8]}$,故由此资料所得到的 15 m 层流场是基本可信的,并可用作表层流场的参考。

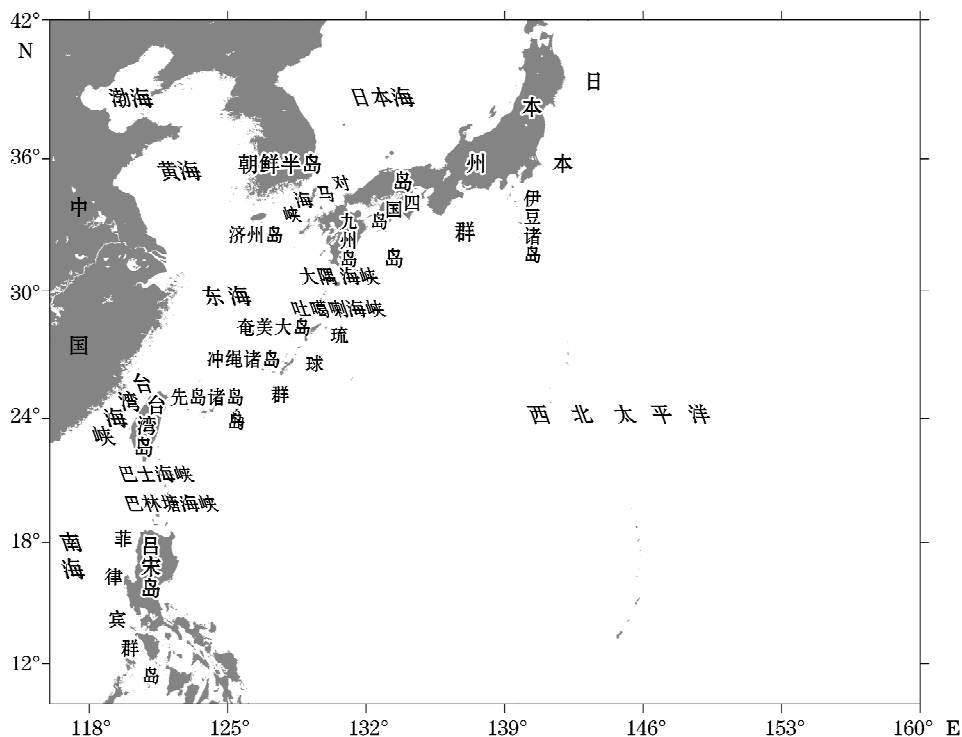


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 研究方法

关于黑潮 15 m 层流轴的确定,本研究采用 Ambe 等^[9]所使用的特征线法,并结合马超等^[10]使用该方法确定黑潮流轴的思路。

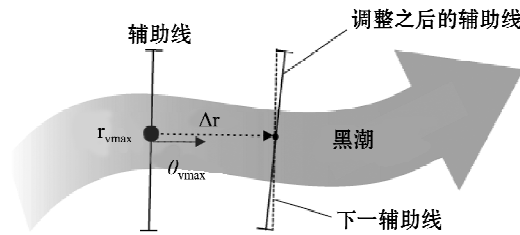


图2 特征线方法计算黑潮15 m层流轴示意图(Ambe等^[9], 2004)

Fig. 2 Schematic diagram showing the characteristic line method used to calculate the Kuroshio axis at the depth of 15m (Ambe et al^[9], 2004)

如图2所示:1)在黑潮主流区内选取和黑潮流向大体一致的定点;2)因黑潮流幅一般为74~130 km^[11],故在所选取的定点处作一条与该点流向垂直且长度为140 km的辅助线;3)在辅助线上每隔7 km进行插值,求得所有插值点的流向平均;4)之后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,流轴位置则被定义在新辅助线上70 km内流速最大的点;5)然后沿平均流向向下游移动10 km到达下个位置,重复步骤2)~4)得到新的流轴位置,如此反复求得整个黑潮流系的流轴。

如同河流都有自己的岸界,大海中穿行的黑潮与途经的周围水体之间也存在较为明显的分界。对黑潮整个流动路径的系统研究发现,黑潮边界处的流速除了与主流流向较为一致外,流速大小主要在20~30 cm/s。也就是说,黑潮边界不是仅以某一流速为特征的极薄层,而是以流速段为特征的过渡性区域,并和水文特征中称谓的“锋面”相对应。本文将黑潮流动路径的边界定义为流速大小在20~30 cm/s的过渡性区域。

2 黑潮15 m层多年平均流路及流轴特征

流速大小在20~30 cm/s的黑潮边界流线如图3中黑色虚线所示,由其可以看出,多年平均的黑潮流动路径清晰而稳定。黑潮源于吕宋岛东侧海区,续接了北赤道流的北上分量,向北到吕宋海峡及台湾东南海区,仍然有北太平洋水进入到黑潮主流,顺台湾东侧流动的黑潮,主流经苏澳—与那国水道进入东海,总体顺东海陆架坡折向东北流动,接近30°N附近开始折向东偏转,经吐噶喇海峡离开东海返回太平洋,然后顺日本列岛东南侧继续向东北流动,大约在(35°N, 141°E)附近海域离开日本海岸蜿蜒东去,并逐渐散开,整个流程约4 000 km。总体上看,黑潮流动路径大致呈弧线形,且基本是一个以(13°30'N, 142°00'E)为圆心、2 235 km为半径的直角弧段(图4)。其次,黑潮的流动路径在吕宋海峡、台湾东北、九州西南及伊豆海岭附近海区都发生显著调整,主要表现有二,其一是路径弯曲,并且表现为发生气旋式弯曲前先进行反气旋式弯曲调整;其二是路径开口,主要是支流的并入或分支的流出。

由特征线方法确定的黑潮流轴如图3中的黑色实线所示,由其可以看出,相对于黑潮两侧的边界,黑潮流轴整体性偏左,且在吕宋岛东北至台湾以东海域最为显著,在本州岛以南海域次之,而在东海段基本居中。

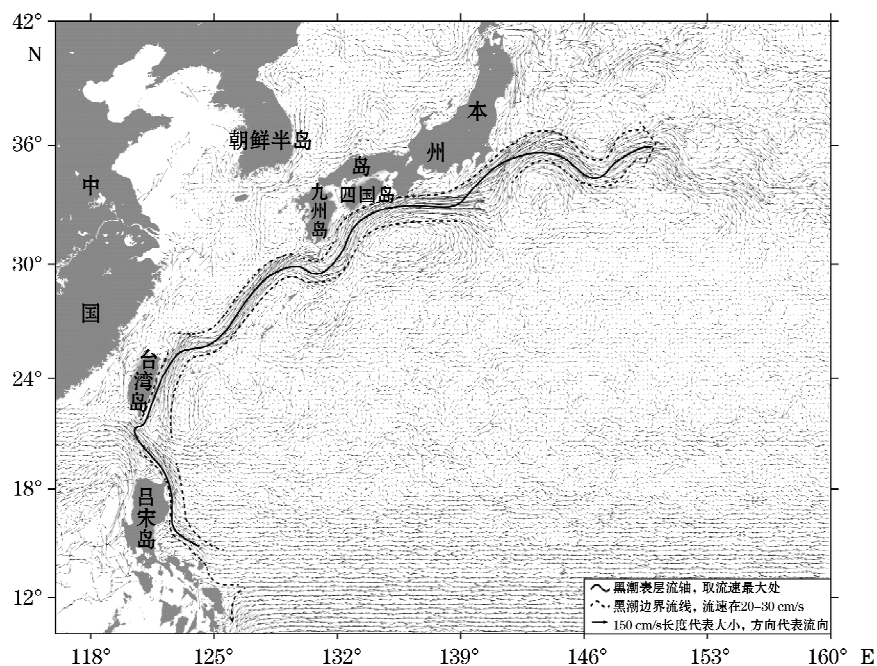


图 3 黑潮 15 m 层多年平均流路

Fig. 3 The Kuroshio annual mean flow path at the depth of 15 m

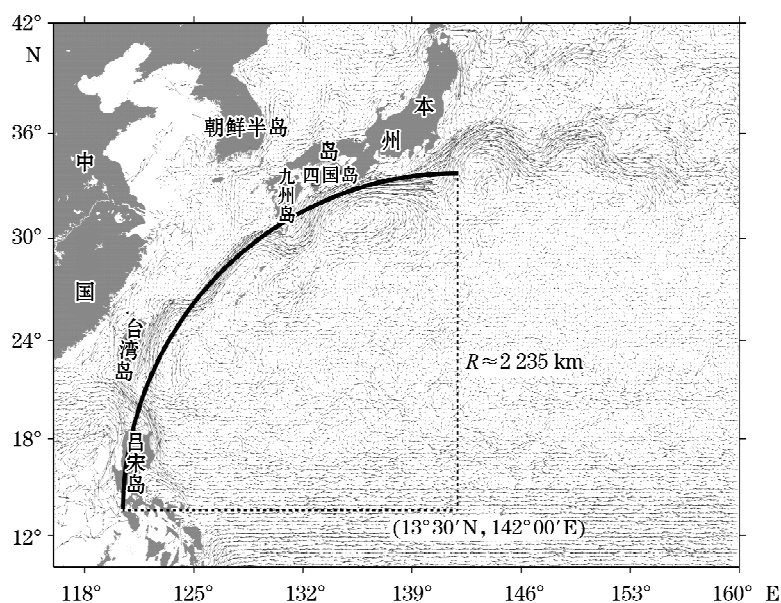


图 4 黑潮 15 m 层多年平均流路示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the annual mean flow path of the Kuroshio at the depth of 15 m

为了方便看出黑潮流路上流速的变化情况,画出黑潮流区 15 m 层多年平均的流速等值线分布如图 5 所示,由其可见,黑潮流路上的流速较周围海区明显偏大,但是顺黑潮流路方向黑潮流速并不是持续稳定的,而是呈现出较平直流段的大流速区和弯曲调整流段的低流速区相互交错的情况,黑潮流路上吕宋岛东北、台湾岛以东、冲绳诸岛西北、四国岛以南至伊豆诸岛以西和本州岛东南是流速相对较大的流段,其中四国岛以南至伊豆诸岛以西流段的流速为最大,这些大流速区段的相接处流速则相对较小。换句话说,黑潮流速在总

体上由南向北呈变大趋势,但并非沿流路持续性逐渐增加,而是在吕宋海峡、台湾东北、九州以南和伊豆海岭等黑潮流动路径发生弯曲或过渡性的海域发生流速增加持续性的断裂,流速明显弱于流路相对平直的流段。

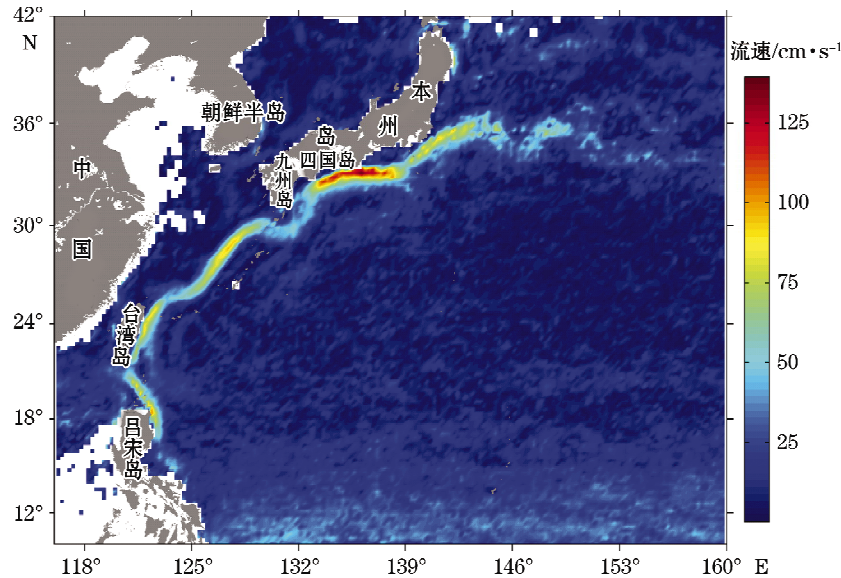


图5 黑潮 15 m 层多年平均流速分布

Fig. 5 Distribution of annual mean velocity of the Kuroshio at the depth of 15 m

3 黑潮 15 m 层多年平均的各月流路及流轴特征

根据黑潮边界定义和特征线方法绘出的黑潮 15 m 层多年平均的各月流路及流轴特征如图 6 所示:1 月份,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南都发生向边缘海的入侵,其中黑潮流路在巴士海峡的开口较大,流轴西伸南海,说明本月份黑潮在该水层向南海的入侵较强;2 月份,黑潮流路在巴士海峡的开口向北缩小、流轴连续,显示其在该海区向边缘海的入侵变弱,但在台湾东北海区,流轴显著西伸(图 7),反映向陆架入侵势强,在伊豆海岭处的流路比 1 月份平直;3 月份,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南的流路和流轴都较为平直,向边缘海的入侵较弱;4 月份,黑潮向边缘海的入侵趋势仍较弱,流轴在伊豆海岭发生较大弯曲(图 8);5 月份,黑潮向边缘海的入侵趋势和边缘海水体外压的趋势相当;6 月份,低纬度海区的黑潮流路较 5 月份有北移趋势,且边缘海水体外压的趋势较为明显,黑潮流路和流轴较 5 月份整体性向东偏移且比较平直,在其左侧出现了与其伴随的北向流,特别是在东海,黑潮左侧出现了较为系统的来自台湾海峡的外陆架流动;7 月份,黑潮流路在低纬度海区的北移最为明显、吕宋岛东北不够明显、至台湾东南才比较稳定,由于边缘海水体外压势强,黑潮流路在东海也最为平直,左侧有来自台湾海峡的外陆架流动;8 月份,低纬度海区的黑潮流路开始南伸,东海黑潮左侧的外陆架流动减弱,来自台湾海峡的流动在近岸海区较为明显;9 月份,低纬度海区的黑潮流路继续南伸,黑潮左侧与其伴随的北向流动消失,边缘海水体外压的趋势和黑潮向边缘海的入侵趋势相当,浙闽沿岸出现南向流;10 月份,低纬度海区的黑潮流路继续南伸,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南都开始向边缘海入侵,台湾海峡内最为显著的是南向流;11 月份,低纬度海区的黑潮流路继续南伸,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南向边缘海的入侵开始显著,黑潮流路和流轴较夏季更为弯曲;12 月份,低纬度海区的黑潮流路继续南伸,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南向边缘海的入侵较 11 月更显著,其中黑潮流轴在巴士海峡发生断裂而西伸南海,发生显著的向南海入侵,在九州以南和伊豆海岭海区,黑潮流轴也发生较大弯曲。

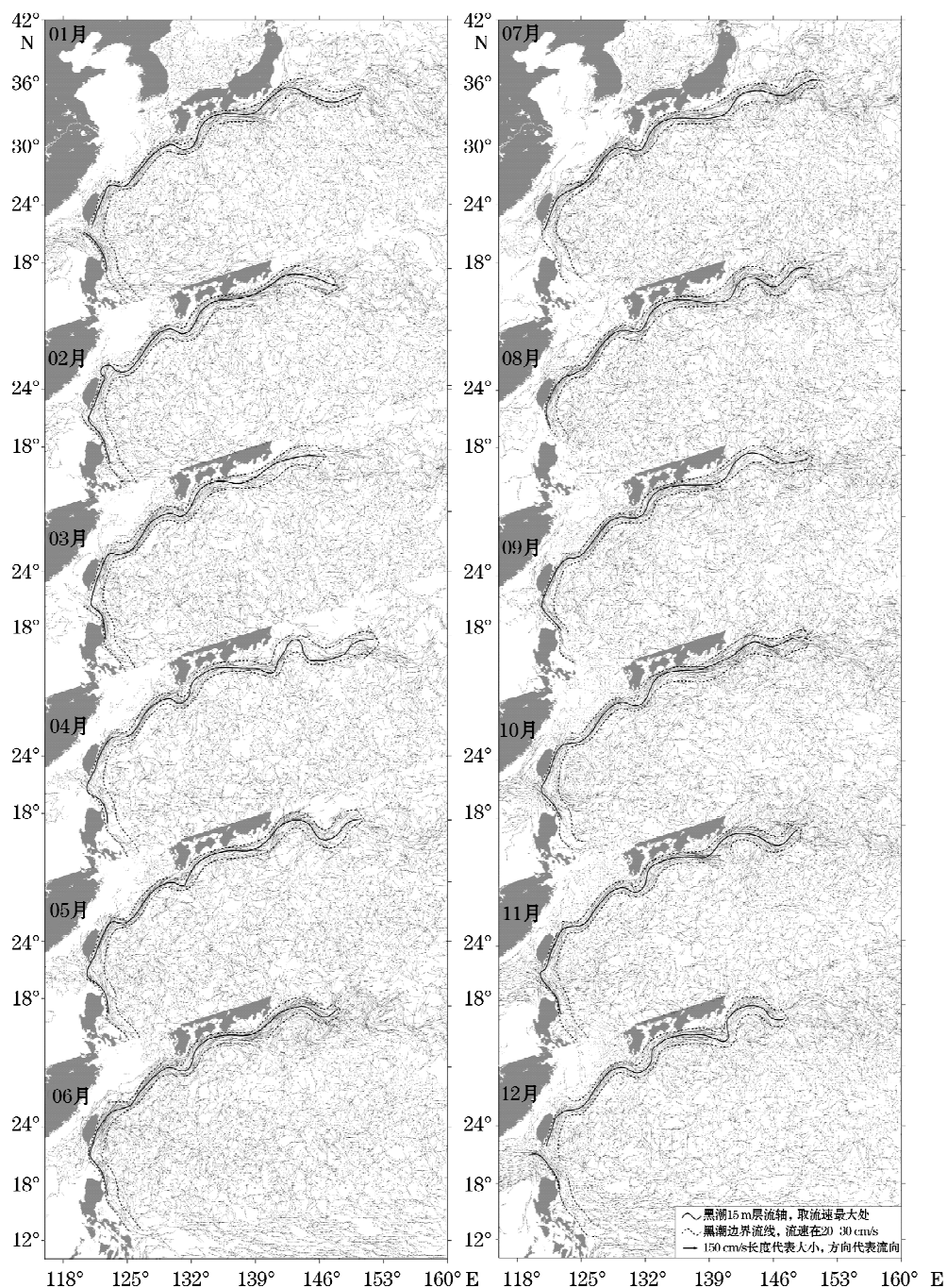


图 6 黑潮流系 15 m 层多年月平均流路

Fig. 6 Monthly mean flow path of the Kuroshio at the depth of 15 m

从以上分析可以看出,2月,5月,8月和11月这4个月份是黑潮流路和流轴发生变化的重要转折期,而1月,4月,7月和10月这4个月份则是各季节的代表月份,易将本文的季节划分确定为:12月,1月和2月为冬季,3月,4月和5月为春季,6月,7月和8月为夏季,9月,10月和11月为秋季。其中,冬季特征是黑潮流路和流轴最为曲折,黑潮在巴士海峡、台湾东北和九州西南向边缘海发生显著入侵;夏季特征是黑潮流路和流轴最为平直,东海黑潮的左侧伴随有来自台湾海峡的外陆架流动。

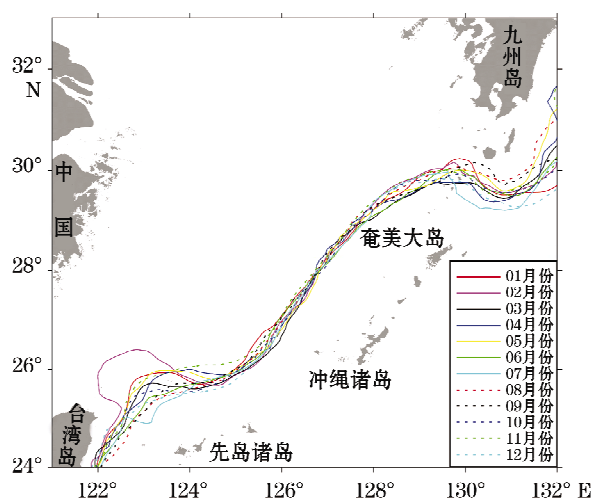


图7 东海黑潮 15 m 层多年月平均流轴曲线
Fig. 7 Mean axis of the Kuroshio of each month in the East China Sea at the depth of 15 m

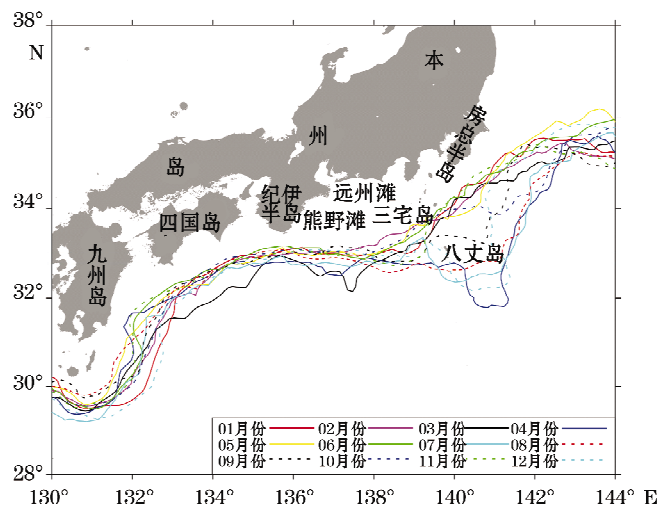


图8 本州岛以南黑潮 15 m 层多年月平均流轴曲线
Fig. 8 Mean axis of the Kuroshio of each month in the South of the main Honshu island at the depth of 15 m

4 结 论

我们利用 33 a(1979-02—2012-03)的水帆位于 15 m 层的 Argos 漂流浮标资料绘制黑潮流系 15 m 层多年年平均和月平均流场,运用特征线方法计算得到黑潮流轴,定义黑潮流动路径的边界为流速大小为 20~30 cm/s 的过渡性区域,系统分析表明:

黑潮多年年平均流动路径大致呈弧形,且基本是一个以(13°30'N,142°00'E)为圆心、2 235 km 为半径的直角弧段,其在吕宋海峡、台湾东北、九州西南及伊豆海岭附近海区都发生显著调整,主要表现为发生气旋式弯曲前先进行反气旋式弯曲调整和路径开口处支流的并入或分支的流出;黑潮流轴整体性偏向黑潮左边界,其中在吕宋岛东北至台湾以东海域最为显著,在本州岛以南海域次之,而在东海段基本居中;黑潮流路上的流速在总体上由南向北呈增大趋势,其中四国岛以南至伊豆诸岛以西流段的流速为最大,但并非沿流路持续性逐渐增加,而是在吕宋海峡、台湾东北、九州以南和伊豆海岭等黑潮流动路径发生弯曲或过渡性的海域发生流速增加持续性的断裂,流速明显弱于流路相对平直的流段。

多年月平均流场显示,2月,5月,8月和11月这4个月份是黑潮流路和流轴发生变化的重要转折月份,而1月,4月,7月和10月这4个月份则是各季节的代表月份。其中,冬季月份特征是黑潮流路和流轴最为曲折,在巴士海峡、台湾东北和九州西南向边缘海发生显著入侵;夏季月份特征是黑潮流路和流轴最为平直,在吕宋海峡黑潮左侧和东海黑潮左侧伴随有明显的北向流动;春秋两季月份作为冬夏两季之间的过渡月份,过渡性特征显著。

参考文献(References):

- [1] XIONG X J. The circulaion structure and mechanism studies on the China seas[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. 熊学军. 中国近海环流及其发生机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [2] IJU 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. 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 利用漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域表层流场及其季节分布特征的分析研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 1-16.
- [3] MA C, WU D X, JU X. The analysis of the Kuroshio intrusion to the South China Sea using argos drifting buoys data [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(2): 1-5. 马超, 吴德星, 鞠霞. 利用 Argos 浮标资料对黑潮入侵南海问题的分析[J]. 海洋湖沼通报, 2010(2): 1-5.

- 2010(2): 1-5.
- [4] 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 Research Papers, 2012, 59: 25-36.
- [5] WANG H L, GUO P F, QIAN C C, et al. Kuroshio meander south of Japan detected by altimeter[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(4): 84-92. 王海龙, 郭佩芳, 钱成春, 等. 高度计资料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.
- [6] PATTERSON S L. Surface circulation and kinetic energy distributions in the southern hemisphere oceans from FGGE drifting buoys[J]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15(7): 865-884.
- [7] ISHIKAWA Y, AWAJI T, AKITOMO K. Global surface circulation and its kinetic energy distribution derived from drifting buoys[J]. Journal of Oceanography, 1997, 53: 489-516.
- [8] Service Argos, Inc. Basic description of the argos system [EB/OL]. (2004-03-18)[2014-01-15]. <http://www.argosinc.com/system-overview.htm>.
- [9] 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.
- [10] MA C. The variability of the Kuroshio and its effects on the current in the Taiwan Strait[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006; 10. 马超. 黑潮变化及其对台湾海峡流动的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006; 10.
- [11] SUN X P, WANG Y P, YUAN Q K. Preliminary analysis the surface path (route) of the downstream section of the Kuroshio flow [C]//The Kuroshio Survey Research Papers(1). Beijing: Ocean Press, 1990: 287-299. 孙湘平, 王元培, 袁启科. 黑潮下游段表层流路(途径)的初步分析[C]//黑潮调查研究论文选(一). 北京: 海洋出版社, 1990: 287-299.

Analysis of the Path and Axis Features of the Kuroshio at the Depth of 15 m Based on Drifting Buoy Data

YU Long^{1,2}, XIONG Xue-jun^{1,2,3*}, GUO Yan-liang^{1,2}, GUO Yong-qing^{1,2}

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

2. Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China;

3. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the 33-year data of Argos drifting buoy whose sail located at depth of 15 m from February 1979 to March 2012, we plotted annual mean and monthly mean current fields at 15 m depth. The axis of the Kuroshio is derived using the characteristic line method by defining the boundary of the Kuroshio as the transition region where velocity is between 20~30 cm/s. The results showed that: the annual mean path of the Kuroshio is roughly a quarter of a circle whose center is at (13°30'N, 142°00'E) and radius is about 2235 km. and it makes anticyclonic adjustment before turning cyclonically at the Luzon Strait, northeast of Taiwan, southwest of Kyushu, and the Izu Ridge coast with inflow merging into or outflow separating off the Kuroshio occurring at the opening where the path bends; the Kuroshio axis overall deviate to the Kuroshio's left boundary, and this feature is most obvious from the northeast of Luzon to the east of Taiwan and is secondary in the south of Honshu Island, while the axis is basically in the middle of Kuroshio's boundaries in the East China Sea; the Kuroshio velocity in general to increase from south to north, but the increase is not continuously stable, it shifts alternatively between relatively flat path with higher velocity and curvy path with lower velocity and the maximum velocity appears in the area south of Shikoku Island to west of Izu Islands. Monthly mean current fields showed that the months of 2, 5, 8 and 11 are important transition periods of the Kuroshio's path and axis, and the months of 1, 4, 7 and 10 are representative month of the four seasons. The Kuroshio's path and axis are curviest during winter months and its intrusion to marginal seas is obvious; While, during summer months, the Kuroshio's path and axis are relatively straight with northward flow along left side of the Kuroshio; Spring and autumn are transitional periods.

Key words: drifting buoy; Kuroshio; current path; current axis

Received: April 08, 2014