

台湾东北部黑潮表层水入侵东海陆架的季节变化规律

赵瑞祥^{1,2}, 刘志亮^{1,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点开放实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 基于 1998~2011 年进入台湾东北部的 WOCE-SVP(World Ocean Circulation Experiment -Surface Velocity Programme)计划的 Argos 浮标运行轨道数据, 分析了台湾东北部的环流特征、黑潮表层水入侵东海陆架的季节变化规律。结果表明: 在春夏季, 黑潮表层水入侵仅限于陆架外缘, 而在秋冬季, 黑潮表层水可深入东海陆架或进入台湾海峡。自黑潮区入侵至 100 m 和 150 m 等深线的浮标数量在秋冬季较多, 春夏季较少。台湾海峡的浮标轨迹在春夏季几乎皆为北向, 在秋冬季皆为南向。在秋季, 东海中部和南部陆架会在黑潮西侧出现逆流和涡旋。可见, 台湾东北部环流具有显著的季节特征; 黑潮表层水入侵东海陆架在秋冬季较强, 春夏季较弱。本研究采用最新的 Argos 浮标数据, 揭示了台湾东北部黑潮入侵东海陆架的季节变化规律。

关键词: Argos 浮标; 台湾东北部; 黑潮表层水; 入侵

中图分类号: P733.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)07-0118-06

doi: 10.11759/hyqx20130423006

黑潮是北太平洋副热带环流的一支著名的强西边界流。中国台湾东北部, 黑潮由于受陡峭的大陆坡限制而被迫向东转向。在此转向区域, 观测表明黑潮水和陆架水在此区域产生强烈的相互作用^[1-2]: 不仅有陆架水夹卷进入黑潮, 并且有大量的黑潮水入侵陆架。Isobe^[3]估计出黑潮入侵东海陆架的流量约为 1.4Sv, 而台湾东北部的黑潮入侵贡献了相当大的一部分。黑潮的入侵不仅改变了陆架海域的温盐分布, 而且对于营养物质以及其他生物化学物质通量和分布非常重要^[4-6]。

黑潮表层水是位于黑潮最上层的水团, 具有高温高盐的特征。黑潮表层水的入侵历来为人们所关注。苏纪兰和潘玉球^[7]曾根据温盐断面资料, 认为台湾以北黑潮表层水入侵东海陆架常年存在, 并提出黑潮表层水入侵有冬季强而夏季弱的特点。在 Kondo^[8]描绘的东海海流图上, 常年存在一支几乎正北流向的黑潮入侵流 KBCNT(Kuroshio Branch Current to the North of Taiwan), 它源自台湾东北黑潮, 大致沿着 123°E 北上可达杭州湾外 123.5°E 左右。翁学传和王从敏^[9]认为台湾东侧的黑潮表层水是台湾暖流上层水的主要来源, 即黑潮表层水可通过台湾暖流的形式向北入侵深入陆架。苏纪兰和潘玉球^[10]将台湾暖流分为向岸分支(inshore branch)和离岸分支(offshore branch), 认为离岸分支的上层水则主要来自于台湾东北部的黑潮入侵水。Qiu 和 Imasato^[11]研究东海黑潮分支的形成机制时提到, 当黑潮通过

台湾东岸后即分离出一个分支, 它入侵至台湾以北的陆架上时转向东与黑潮主干汇合。他们将之称为黑潮分支流(KBC, Kuroshio Branch Current)。

台湾东北部黑潮与陆架水强烈的相互作用使得该地区环流情况较为复杂。Tang 等^[12]分析了一个航次的船载 ADCP 数据, 提出了台湾东北部的中尺度环流形式, 该环流形式由以下特征要素组成: 向东偏离的黑潮主干, 黑潮在北棉花谷(NMHC, North Mien Hua Canyon)附近向陆架的入侵, 以棉花谷(MHC, Mien Hua Canyon)为中心的气旋式环流, 深处的西南向逆流, 以及陆架水沿台湾岛北端的离岸流。Tang 等^[1]提出在各个季节台湾北部皆主要为北向流, 并且该区流态显著地受黑潮主轴的移动影响。在冬季随着黑潮主轴向陆移动, 该海区的环流主要表现为黑潮向陆入侵, 并导致气旋式冷涡和冷水上涌现象的消失或变弱。

随着卫星遥感技术的发展和越来越多的卫星跟踪浮标的布放, Argos 浮标数据越来越得到人们的重视。利用 Argos 浮标进行测流是一种典型的拉格朗日测流方法, 相对于传统的定点测流方法, 更有利

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41276026); 中国科学院战略先导专项(XDA11020301)

作者简介: 赵瑞祥(1989-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 从事中国近海环流研究; 刘志亮(1977-), 通信作者, 男, 山东潍坊人, 副研究员, E-mail: zhlliu@qdio.ac.cn

于研究海洋环流和物质输送。国内外已有很多学者对 Argos 浮标数据进行处理和分析, 并得到较好的结果。于非等^[13]利用 WOCE-SVP 中的 157 个浮标资料以及中国近海环流项目中的一些浮标资料, 分析了黑潮入侵东海陆架及陆架环流的一些特征。Uchida 等^[14]通过融合浮标数据和卫星高度计数据, 得到了北太平洋的表层欧拉流场。刘增宏等^[15]分析了布放在南海和西北太平洋海域的 Argos 浮标资料, 分析了浮标流经海域的表层海流特征以及浮标路径上的温度变化。胡筱敏等^[16]利用 323 个卫星跟踪浮标资料, 得到黑潮及其邻近海域的全年平均及季节平均的浮标轨迹和表层流场, 并对研究海区表层流场的季节分布特征做了分析。马超等^[17]结合浮标数据及卫星高度计数据, 分析了黑潮及毗邻水域的表层流场季节特征。冯颖等^[18]利用 1979~2008 年的浮标数据, 分析了位于东海黑潮的 3 个特征断面的表层流速结构。

但是, 从空间分布来看, 以上研究关注的区域范围都较大, 对于台湾东北部表层流场以及黑潮表层水的入侵现象, 缺乏进一步的深入分析。从资料的时间跨度来看, 这些研究多采用 2008 年甚至 2002 年以前的数据。1998~2011 年, 随着大量 Argos 浮标的布放, 进入台湾东北部的浮标的累计数量有了较快的增长(如图 1, 以 WOCE-SVP 项目的 Argos 浮标数量为例)。因此, 结合最新的浮标数据来研究台湾东北部表层流场是必要的。本文利用近些年来进入台湾东北部的 Argos 浮标资料, 研究台湾东北部黑潮表层水入侵东海陆架的季节变化规律, 并揭示了该地区的一些环流特征。

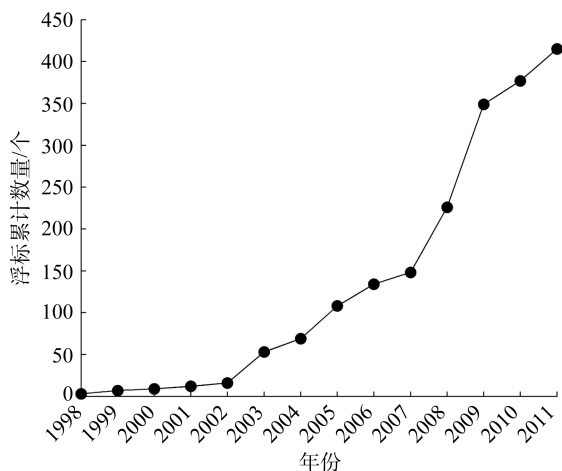


图 1 1998 年以来进入研究区域 WOCE-SVP 项目 Argos 浮标的累计数量

Fig. 1 The accumulative quantity of the Argos drifters from WOCE-SVP entering the research region since 1998

1 资料概述

本文所用数据来自 WOCE-SVP(世界大洋环流实验-表面流速项目)项目于 1998~2011 年的 Argos 浮标资料。该计划与大西洋海洋气象实验室(AOML)的全球漂流浮标中心(GDC)以及加拿大海洋环境资料服务中心(MEDS)合作进行。为了研究台湾东北部的环流特征, 本文摘取了经过 122°~126°E, 25°~28°N 区域的所有浮标, 取其经纬度位置和运行的时间等信息。得到了符合条件的共 415 个浮标的资料。本文还对浮标资料进行了初步的质量控制, 如剔除了运动时间过短的浮标以及明显错误和异常的数据。

2 结果分析

2.1 台湾东北部的基本环流特征

图 2 为途径台湾东北部海域(122°~126°E, 25°~28°N)浮标的运动轨迹。由于某些浮标运行状态不好, 得到的时间序列中某些相邻数据点时间间隔过长。为了更好地显示浮标轨迹, 图中则对该类浮标轨迹进行分段显示。从图中可以看到, 进入研究海区的所有浮标的轨迹大部分体现黑潮的流径, 并有大量浮标在台湾东北部入侵至东海陆架, 另有一部分浮标途径台湾海峡。此外, 还有一部分浮标在台湾东北部呈气旋式移动。以上现象表明: 黑潮是影响台湾东北部表层流场的主要因素, 黑潮表层水通过台湾东北部可向西入侵至台湾海峡北部, 也可进一步入侵至东海的中部和北部, 台湾海峡的水和黑潮表层水之间存在一定的相互作用。

2.2 黑潮表层水入侵东海陆架的季节变化规律

本文将浮标能否自台湾东北部黑潮区到达 150 m 等深线作为台湾东北部黑潮表层水是否入侵东海陆架的标志, 而将浮标能否进一步到达 100 m 等深线作为黑潮表层水是否深入东海陆架的标志。所有的资料中, 共有 179 个浮标通过台湾东北部入侵东海陆架, 共有 51 个浮标深入入侵东海陆架。为了讨论方便, 本文将季节划分如下: 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12~2 月为冬季。那么, 根据统计, 各个季节通过台湾东北部入侵至东海陆架的浮标数如表 1 所示。而各个季节, 深入入侵东海陆架(100 m 等深线)的浮标数占入侵东海陆架(150 m 等深线)的浮标数的比例, 分别为春季 25.0%, 夏季 3.4%, 秋季 31.3%, 冬季 41.2%。可以看出, Argos 浮标入侵

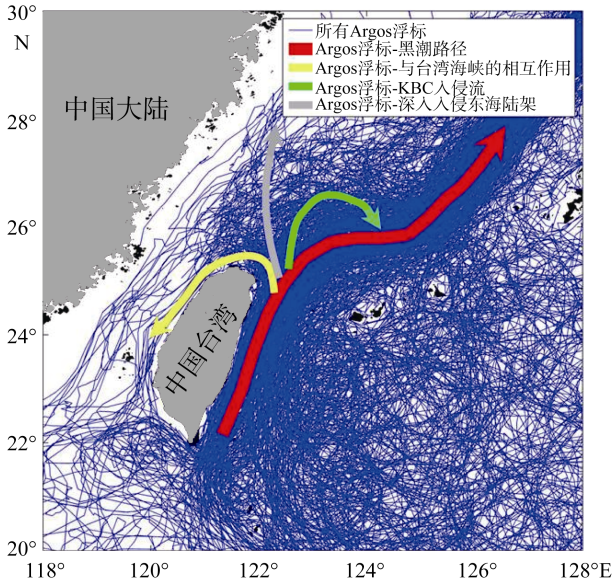


图2 1998~2011年进入研究区域415个Argos浮标的运动轨迹

Fig. 2 The trajectories of the 415 Argos drifters entered from 1998 to 2011

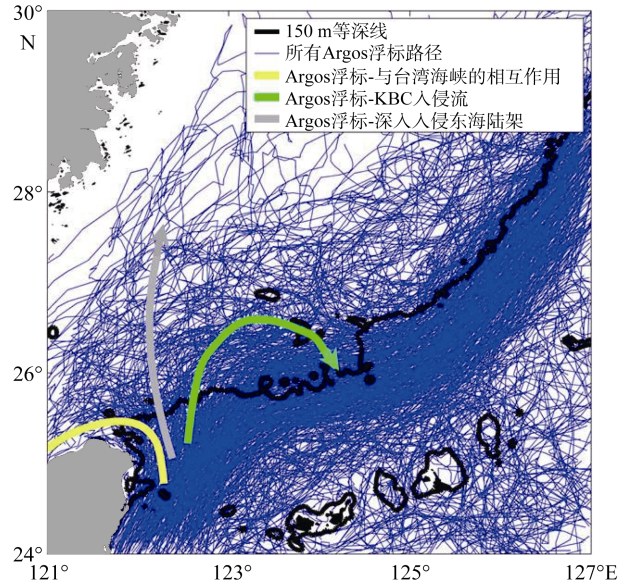


图3 体现台湾东北部黑潮入侵陆架的浮标路径

Fig. 3 The drifter trajectories which show the Kuroshio intrusion onto the East China Sea continental shelf northeast of Taiwan

陆架的现象在各个季节皆可发生，在秋冬季该现象的发生次数高于春夏季；Argos浮标深入东海陆架的浮标绝大多数发生在秋冬季；在冬季，入侵的Argos浮标更易于进一步深入东海陆架。以上对Argos浮标的数量统计表明，台湾东北部黑潮表层水向东海陆架的入侵呈现秋冬季强，春夏季弱的特点。

分析浮标的流路(图3)可发现：浮标自台湾东北部进入150 m等深线后，大多在27°N以南很快重新加入黑潮，部分浮标可沿约50 m等深线继续向北入侵至29°N，123°E左右，再向东转向。以上浮标路径大致分别对应着KBC的流径和源自台湾东北部的台湾暖流的流径。部分浮标离开或进入台湾海峡，说明台湾海峡的流态可影响黑潮表层入侵流。

表1 各个季节入侵至150和100 m等深线的Argos浮标数量

Tab. 1 The quantity of the Argos drifters intruded to the 150 m and 100 m isobaths in each season

季节	入侵至150, 100 m等深线的浮标数量(个)(比例(%))	
	150 m	100 m
春季	32(17.9)	8(15.6)
夏季	29(16.2)	1(2.0)
秋季	67(37.4)	21(41.2)
冬季	51(28.5)	21(41.2)

注：括号中数据是各个季节的入侵陆架的浮标数占全部入侵陆架的浮标数的比例

图4是春夏秋冬四个季节里入侵至陆架(150 m)的浮标轨迹。春季，入侵的浮标集中在150 m等深线附近，而在122°~123°E, 25.5°~26°N可见部分浮标进一步向北入侵至100 m等深线后折向东重新加入黑潮，另有一个浮标在台湾东北部向西入侵。夏季，入侵的浮标轨迹更远离陆架，集中在150 m等深线附近，仅有1个浮标可越过100 m等深线。部分浮标从台湾海峡西岸进入台湾东北部并向北入侵陆架。秋季，浮标可大规模深入陆架，有较多的浮标可越过100 m等深线。该季节入侵陆架的浮标轨迹呈现三种形态：大部分浮标入侵陆架后很快在27°N以南折向东并加入黑潮；一部分浮标在台湾北部向西入侵并向南进入台湾海峡；余下的浮标可沿122.5°E向北入侵至29°N附近并折向东偏北方向移动。冬季，浮标运动轨迹和秋季类似，但入侵的浮标数有所减少，特别是向台湾海峡的入侵有所减弱。以上分析说明，台湾东北部黑潮表层水在各个季节的入侵，不仅强度和范围上存在显著的差异，而且形态也不相同。

2.3 其他环流特征

在经过台湾东北部的浮标资料中，除了大多数浮标路径集中体现黑潮流轴和黑潮表层水入侵路径(主要是KBC和台湾暖流)，一些浮标路径可体现台湾周围海区的一些其他的重要环流特征。一是在本

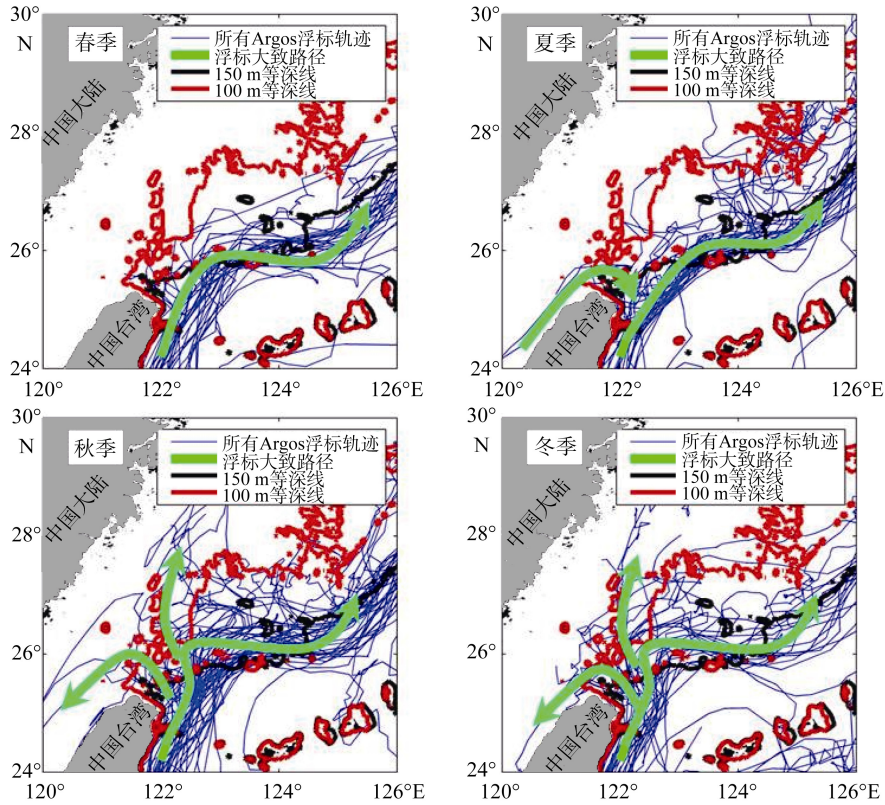


图4 各个季节入侵至东海陆架的浮标的轨迹

Fig. 4 The drifter trajectories intruded onto the East China Sea continental shelf in each season

文所搜集的 415 个 Argos 浮标资料中, 有 34 个浮标体现了台湾东北部的一个气旋式冷涡, 主要位于 121.8°~122.7°E, 24.8°~25.8°N, 中心经纬度大约为 122.2°E, 25.5°N, 在各个季节皆有分布(图 5)。这个冷涡的存在被大量研究所证明^[4, 19-21]。

除此之外, 还有 22 个浮标的路径与台湾海峡内的表层流向相关。这些浮标在台湾海峡内的运动时间主要集中在夏季: 共有 13 个浮标, 其中有 12 个浮标在运动方向完全为北向。春季、秋季和冬季在台湾海峡内运动的浮标数量较少, 分别为 2 个, 3 个和 2 个。其中春季的浮标运动方向都为北向, 而秋季和冬季的浮标运动方向都为南向。

有趣的是, 上述浮标资料中, 41260号浮标的路径比较怪异(图6): 它先沿着台湾西岸向东北移动, 到达台湾海峡的东北端后又折向西南, 几乎回到了起点处, 接着又沿台湾西岸向东北运动离开台湾海峡。此过程中该浮标的路径体现了台湾西北部的一个气旋式涡旋。这个浮标在秋季运动到126°E, 29°N附近时, 又完全反向移动, 几乎沿原来的路径, 期间还做了一个反气旋式的流动。浮标在123°E, 26.5°N附近又向东转向, 加入黑潮。这一过程表明秋季时东

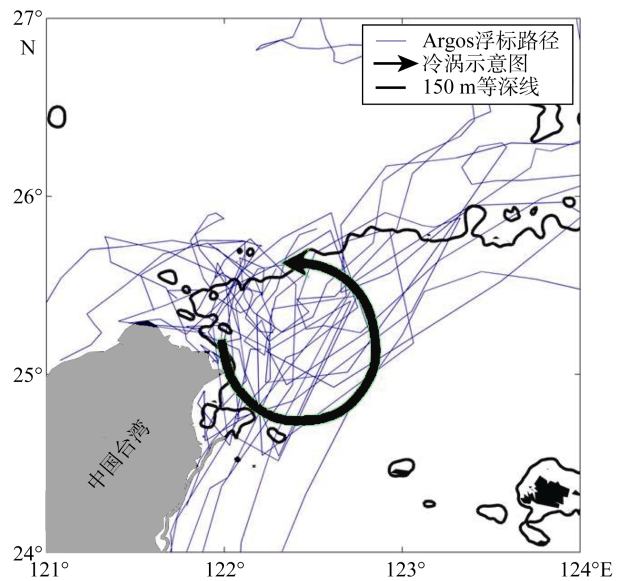


图5 体现台湾东北部冷涡的浮标路径

Fig. 5 The drifter trajectories which show the cold eddy northeast of Taiwan

海陆架有黑潮西侧逆流的存在。于非^[12]曾报道于 11~12 月份, 在东海南部外陆架有浮标沿大致沿 100 m 等深线向西南方向移动, 并认为该处可能存在一与黑潮反向的逆流。41260 号浮标的路径支持了秋季时

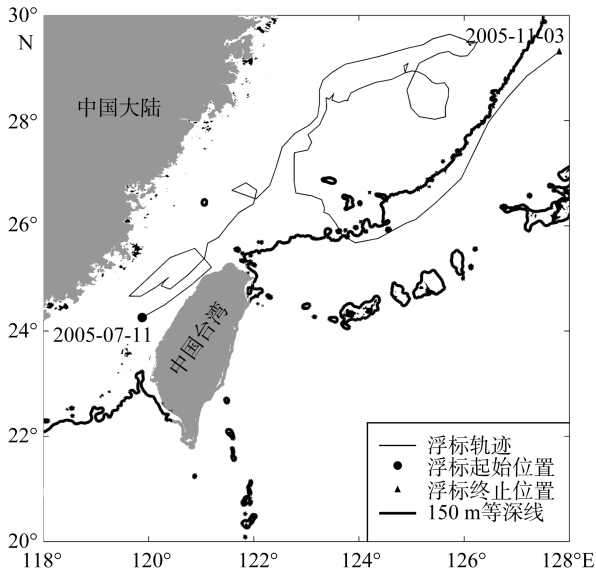


图 6 41260 号浮标的漂流轨迹

Fig. 6 The trajectory of the No.41260 drifter

黑潮西侧逆流的存在，并表明该逆流可能伴随涡旋的出现。该浮标路径的突然折向发生在 9 月份，提示季风的转换可能与逆流的形成相关。

3 结论

1) 进入研究区域的浮标绝大多数和大部分运动时间内主要体现黑潮的流径，说明黑潮是影响台湾东北部的主要因素。在该区域，有大量浮标入侵东海陆架。入侵陆架的大部分浮标在 27°E 以南很快重新加入黑潮，体现 KBC 的流路；部分浮标可沿台湾北岸向西入侵或进入台湾海峡；其余的浮标则进一步向北深入陆架，体现台湾暖流的流路。

2) 自台湾东北部黑潮区入侵至东海陆架的浮标数目，秋冬季的浮标明显较春夏季多。春夏季入侵至东海陆架的浮标多沿陆架的外缘移动，而秋冬季可有相当数量的浮标进一步入侵东海陆架。以上现象说明台湾东北部黑潮表层水入侵的季节变化规律是秋冬季较强，而春夏季较弱。

3) 有一定数量的浮标路径体现台湾东北部常年存在一个冷涡。该冷涡中心约位于 122.2°E, 25.5°N。

4) 途经台湾海峡的浮标中，有较多的浮标运动时间在夏季，且这些浮标的漂流轨迹几乎全为北向；而运动在春季、秋季和冬季的浮标较少，春季浮标的漂流轨迹都为北向，但秋冬季的都为南向。以上现象表明夏季台湾海峡内表层有很强的北向流，春季台湾海峡表层流为北向，而秋冬季台湾海峡的表层流为南向。

5) 41260 浮标的轨迹表明：在 2005 年 7 月份出现在台湾西北部出现了一个冷涡。另外，该浮标体现黑潮西侧会在秋季出现逆流，可伴随涡旋的出现。该逆流的出现或许与季风的转换相关。

参考文献：

- [1] Tang T Y, Tai J H, Yang Y J. The flow pattern north of Taiwan and the migration of the Kuroshio[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(4): 349-371.
- [2] Liang W D, Tang T Y, Yang Y J, et al. Upper-ocean currents around Taiwan[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(6): 1085-1105.
- [3] Isobe A. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(4): 569-584.
- [4] Liu K K, Gong G C, Lin S, et al. The year-round upwelling at the shelf break near the northern tip of Taiwan as evidenced by chemical hydrography[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1992, 3(3): 243-275.
- [5] Chen C T A. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf[J]. *Oceanologica Acta*, 1996, 19(5): 523-528.
- [6] Gong G C, Shiah F K, Liu K K, et al. Effect of the Kuroshio intrusion on the chlorophyll distribution in the southern East China Sea during spring 1993[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(1): 79-94.
- [7] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北黑潮入侵陆架途径的探讨 [C]//国家海洋局海洋科技司. 黑潮调查研究论文选(二). 北京: 海洋出版社, 1990: 187-197.
- [8] Kondo M. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea. I. Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near the bottom[J]. *Bull Seikai Reg Fish Res Lab*, 1985, 62: 19-66.
- [9] 翁学传, 王从敏. 台湾暖流水(团)夏季 TS 特征和来源的初步分析 [C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(21). 北京: 科学出版社, 1984: 113-133.
- [10] Su Jilan, Pu Yuqiu. On the shelf circulation north of Taiwan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 6: 1-20.
- [11] Qiu B, Imasato N. A numerical study on the formation of the Kuroshio Counter Current and the Kuroshio Branch Current in the East China Sea[J]. *Continental*

- Shelf Research, 1990, 10(2): 165-184.
- [12] Tang T Y, Hsueh Y, Yang Y J, et al. Continental slope flow northeast of Taiwan[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(6): 1353-1362.
- [13] 于非, 臧家业. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 21-28.
- [14] Uchida H, Imawaki S. Eulerian mean surface velocity field derived by combining drifter and satellite altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(5): 1229.
- [15] 刘增宏, 许建平, 朱伯康. Argos 表面漂流浮标在黑潮区的若干观测结果[J]. 东海海洋, 2004, 22(4): 1-10.
- [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): 116.
- [17] Ma Chao, Wu Dexing, Lin Xiaopei. 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.
- [18] 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.
- [19] Yin F. Preliminary study of cold water mass near NNE of Taiwan[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1973, 3: 157-180.
- [20] 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷水块的特征[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1): 1-10.
- [21] 修树孟, 王克闾, 孙培光. 台湾东北海域冷涡及其变异的遥感信息研究 [J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(2): 57-64.

The seasonal variability of the Kuroshio surface water intrusion onto the East China Sea continental shelf derived from Argos drifter data

ZHAO Rui-xiang^{1, 2}, LIU Zhi-liang^{1, 3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Apr., 23, 2013

Key words: Argos drifter; northeast of Taiwan; the Kuroshio surface water; intrusion

Abstract: In this paper, based on the trajectory data of the Argos drifters from WOCE-SVP (World Ocean Circulation Experiment – Surface Velocity Programme) which once entered the northeast of Taiwan, we analyzed the circulation pattern of northeast of Taiwan and the variability of the Kuroshio surface water intrusion onto the East China Sea continental shelf. The result showed that: in spring and summer, the Kuroshio surface water intrusion is restricted to the outer continental shelf, but in fall and winter, the Kuroshio surface water intrudes further onto the East China Sea continental shelf or enters the Taiwan Strait. The number of the drifters which intrude to the 100 m and 150 m isobath from the Kuroshio region is large in fall and winter, and is little in spring and summer. The trajectories of the drifters in Taiwan Strait move northward in spring and summer, but southward in fall and winter. In fall, inverse flow and eddy can be found in the central and southern continental shelf. As mentioned above, the circulation of northeast of Taiwan exhibits prominent seasonal feature: the Kuroshio surface water intrusion onto the East China Sea continental shelf is strong in fall and winter, and weak in spring and summer. This paper utilizes the latest Argos drifter data to reveal the seasonal variability of Kuroshio surface water intrusion onto the East China Sea continental shelf.

(本文编辑: 刘珊珊)