

吕宋海峡黑潮表层形态 EOF 模态分析

姚玉娟, 江毓武*, 王 佳

(近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

摘要: 应用 Argos 表层漂流浮标资料所指示的浮标轨迹图以及基于卫星高度计资料和三维水动力模型海面高度场数据的经验正交函数(EOF)模态分析, 探讨了黑潮在吕宋海峡形变的时空分布特征. 结果表明: 吕宋海峡黑潮的形态呈现明显的季节变化, 其中跨隙形态为其最基本的形态; 秋冬两季, 部分黑潮水会以流套和分支的形式入侵南海, 流套最西可延伸至 118°E ; 春夏季节则几乎不出现流套或者分支的结构, 相反会有一部分南海水汇入黑潮主干. 模型数据模态分析结果还再现了冬季黑潮水沿着南海北部陆坡向西入侵的形态.

关键词: 吕宋海峡; 黑潮形态; Argos 表层漂流浮标; 海面高度; 经验正交函数模态分析

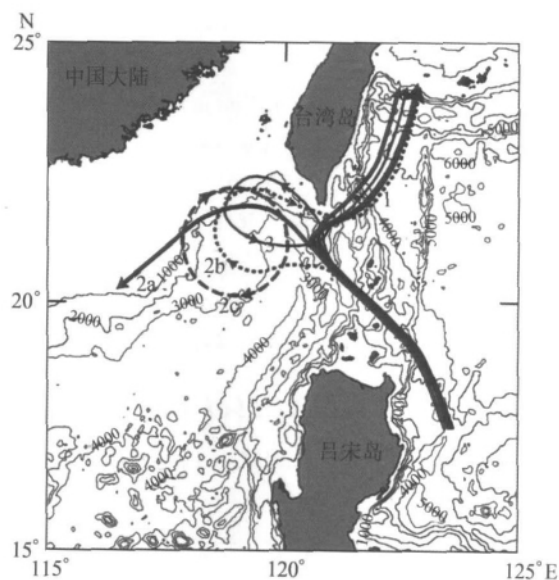
中图分类号: P 731. 21

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2012)04-0740-06

吕宋海峡位于台湾岛和吕宋岛之间, 大致以 121°E 为中心, 跨度为 $18.5^{\circ}\sim 22.0^{\circ}\text{N}$, 最大水深超过 3 000 m, 自北向南包括巴士海峡、巴林塘海峡和巴布延海峡 3 个海峡, 水道宽阔, 是南海水与太平洋水相互交换的最主要通道. 黑潮起源于北赤道流的北向分支, 为太平洋最强的一支西边界流, 具有高温、高盐、高流速的特征, 其携带的大量的水量、热量、盐量对流经区域的气候以及生物地球化学循环影响深远. 吕宋海峡作为黑潮沿边界北上途中的一个豁口, 黑潮流经该区域时由于失去陆坡支持发生形变与南海水进行交换, 对于南海北部环流以及整个南海海盆的质量和能量平衡都有着重要的影响作用. 因此, 吕宋海峡黑潮入侵南海的研究是当今边缘海与大洋相互作用研究中的一个重要课题^[1]. 但受到复杂的地形、多变的风场、黑潮源头位置等多方面制约因素的共同作用, 吕宋海峡黑潮的形态是复杂多变的^[2](图 1), 再加之实测资料的缺乏以及模型精度的不足, 使得各研究得到的结论不尽相同.

1972 年, Nitani^[3] 根据 GEK (geomagnetic electro kinetograph) 观测资料及海面动力高度分布图指出, 当黑潮流经吕宋海峡时, 约在 20°N 有一分支向西流动, 以反气旋流动的形式经台湾岛西南侧返回至黑潮主轴. 李立和伍伯瑜^[4] 通过对历史水文资料的分析, 提出了“黑潮南海流套”的设想, Metzger 和 Hurlburt^[5]、Liang 等^[6] 均用模型证实了反气旋流套的存在. 之后



1. 黑潮跨隙形态; 2a. 黑潮南海分支; 2b. 黑潮南海流套;
2c. 反气旋涡从流套中脱落; 3. 黑潮气旋式环流.

图 1 吕宋海峡黑潮各种形态^[2]

Fig. 1 Different Kuroshio patterns in the Luzon Strait^[2]

的研究表明有中尺度的反气旋涡从黑潮流套中脱落并不断西移, 并称之为“黑潮分离流环”^[7-10]. 仇德忠等^[11]于 1984 年根据水文观测资料证实南海陆坡存在一支西向流, 推断其来源于黑潮水并称之为“黑潮南海分支”, Qu 等^[12]、Yuan 等^[13]、Hong 等^[14]通过实测资料与模型结果再现了黑潮分支形态. 同时, 一些水文观测结果表明黑潮主要以黑潮锋的形式入侵吕宋海峡^[15-17].

对于吕宋海峡黑潮形态随时间的变异特征, 越来越多的学者倾向于认为黑潮入侵南海呈现显著的季节

收稿日期: 2012-02-24

* 通信作者: ywjiang@xmu.edu.cn

变化. Wyrski^[18]于1961年最早提出:冬季,在强大的东北季风作用下,表层黑潮水通过吕宋海峡进入南海,并一直向西深入南海腹地;夏季,黑潮入侵逐渐衰退,受西南季风的影响表层海水从南海流向太平洋. 后来的水文观测资料、数值模拟结果以及遥感资料同样得到类似的结论,并认为入侵以分支或者流套的形式存在,也可以两种形态兼有^[19-22].

综上所述,到目前为止,对于吕宋海峡黑潮的形变特征的结论仍有不同,从而成为众多研究学者们关注的焦点之一. 本文结合浮标轨迹图,基于12年的卫星高度计资料 and 三维水动力模型海面高度场数据的经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)模态分析结果,试图探讨黑潮在吕宋海峡的季节变化特征.

1 Argos 表层漂流浮标资料分析

Argos 表层漂流浮标(以下简称为 Argos 浮标)是一种利用卫星系统定位、传送数据的海洋观测设备,以拉格朗日法观测表层15 m深度以浅的温、盐数据. 随着 WOCE(world ocean circulation experiment)、TOGA(tropical oceans and global atmosphere program)、ARGO(array for real-time geostrophic oceanography)等计划的实施以及完成,积累了大量的浮标资料,成为研究黑潮的重要手段之一. 本文选用的浮标资

料来源于美国 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration),该资料已经通过资料同化中心处理以及质量控制,并经过克里金法插值. 本文选取资料的空间范围为 $113^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$, $17^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$,时间范围为1979—2010年,重点统计了由黑潮源区(吕宋岛东侧)北上的 Argos 浮标数据,绘制了春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12—2月)各个季节的浮标轨迹图(图2),图中清晰地显示了黑潮跨隙、流套、分支这3种形态. 统计以上3种形态的浮标分别出现的个数如表1所示. 分析以上图表可以得出,黑潮形态呈现明显的季节变化特征. 春夏两季,黑潮在吕宋海峡以跨隙形态为主,几乎不存在流套或者分支的结构;而秋冬季节黑潮会以流套和分支的形式入侵南海,黑潮流套最西可达到 118°E 左右,分支则可一直深入至南海腹地. 浮标轨迹图所显示的流套的影响范围与贾英来^[1]根据POCM(parallel ocean climate model)模拟结果和SODA(simple ocean data assimilation)气候平均海面高度场资料分析所得到的结论一致. 但由于有效的浮标个数十分有限,每个季节的浮标个数均不超过20个,就统计学意义而言,不足以充分说明黑潮的季节变化特征,因此为了验证上述分析的可靠性,下文中还将采用 EOF 模态分析方法对卫星高度计资料以及 ROMS (regional ocean modeling system)模型计算得到的海面高度数据予以分析,进行更

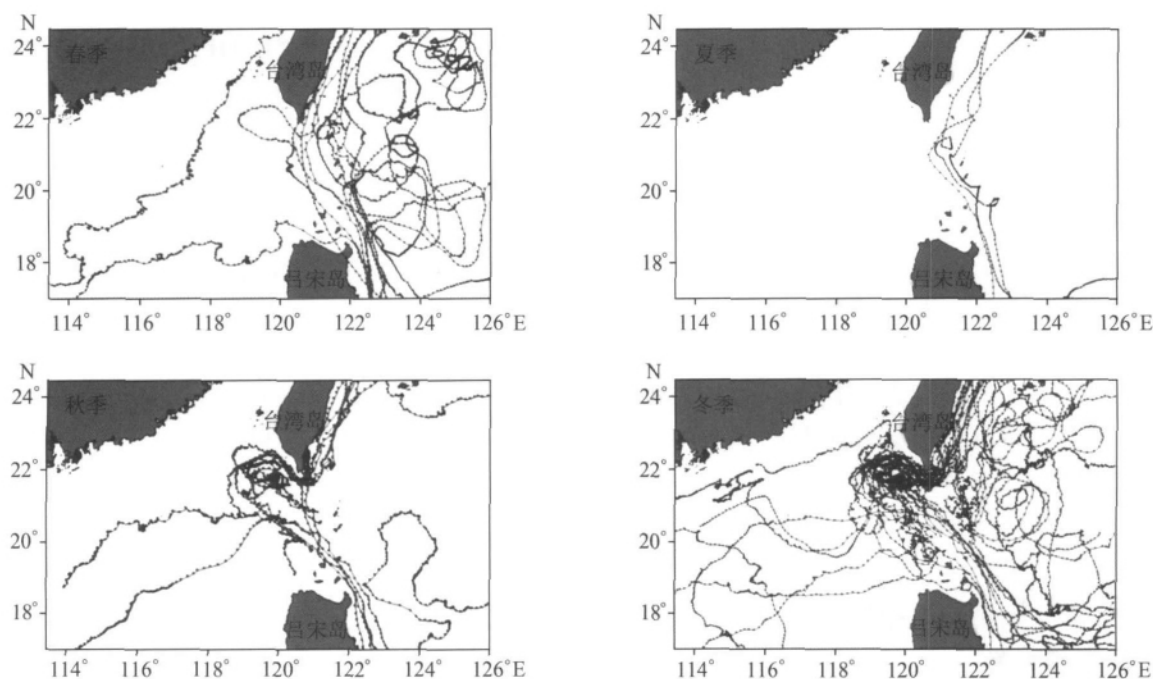


图2 吕宋海峡各个季节 Argos 浮标轨迹图

Fig. 2 Trajectories of Argos buoys in the Luzon Strait in different seasons

表 1 3 种形态 Argos 浮标个数统计
Tab.1 Number of Argos buoys of the three patterns

黑潮形态	浮标个数			
	春季	夏季	秋季	冬季
跨隙	9	3	2	5
流套	1	0	6	9
分支	1	0	2	4
总计	11	3	10	18

为深入的探讨。

2 EOF 模态分析

2.1 资料介绍

本文使用的卫星高度计资料由法国 AVISO(Archiving, Validation and Interpolation of Satellite Oceanography)数据计划提供,为 Topex/Poseidon、ERS-1、ERS-2 和 Jason-1 高度计数据融合后的网格化海面绝对动力高度场资料(下文简称为 T/P 资料,来源为: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/index.html>)。该资料的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 7 d。本文选取的空间范围为 $117^{\circ} \sim 124^{\circ}\text{E}$, $18^{\circ} \sim 23^{\circ}\text{N}$,时间范围为 1999 年 1 月至 2010 年 12 月,将以上不同年份的资料按时间段(每个月份各分为 4 个时间段)做平均化处理,同化为多年准周平均数据,近似表征气候态结果。此外,本文还使用了课题组基于 ROMS 模型建立的台湾海峡业务化温盐流预报系统(<http://www.fjmf.gov.cn/NumPrediction/NumericalPrediction.aspx>)计算得到的气候态平均的海面高度场数据,所取数据的空间范围同上。ROMS 模型基于三维非线性的斜压原始方程,是一个三维水动力模型,由 Rutgers University 和 UCLA(University of California at Los Angeles)两所高校共同开发完成,采用地形拟合 S 坐标系、先进的湍流闭合模式以及内外模态分裂算法,大大提高了模型的精度与计算的效率,更详细的介绍参见文献[23]。该模型应用时采用曲线正交网格,最高空间分辨率为 $(1/20)^{\circ} \times (1/20)^{\circ}$,垂直方向分为 31 层且在表底层加密,模型由气候态的初始场和边界场驱动。

2.2 分析方法介绍

本文采用 EOF 模态分析方法对多年准周平均的 T/P 资料以及 ROMS 模型结果进行分析。EOF 模态

分析,也称特征向量分析或者主成分分析,是一种分析矩阵数据的结构特征、提取主要数据特征量的方法。EOF 模态分析可将要素场分解为若干重要的正交的空间和时间模态的乘积,并包含尽可能多的原始要素场的信息,能较客观定量地反映要素场的时空变化特征。在海洋科学研究和预报服务中,譬如海洋与大气相互作用的研究、海洋水文的研究等,EOF 模态分析方法已日益得到广泛的应用[24]。EOF 模态分析方法根据预处理方法的不同,可以分为时间 EOF(或协方差 EOF)和空间 EOF(或梯度 EOF)模态分析方法[25]。Lagerloef 和 Bernstein[26]分析圣巴巴拉海峡的海表温度分布趋势时发现,对于诸如锋面或者地形涡旋的持久现象,空间 EOF 模态分析方法更为适用。在吕宋海峡,黑潮水与南海水交汇处呈现显著的锋面特征,因此本文采用空间 EOF 模态分析方法,将上文中的海面高度场做距平化处理,扣除各时刻的空间平均值,以进行空间 EOF 模态分析,探讨吕宋海峡区域高度场的时空分布特征。

2.3 EOF 模态分析结果

用空间 EOF 模态分析方法分析 T/P 资料、ROMS 模型海面高度场数据,所得前两个模态的空间分布图及对应的时间系数曲线图分别如图 3~5 所示。根据等高线与地转流场的关系可知,图 3 和图 4 中的等高线就是海表地转流线,绕高值中心的流动方向为顺时针,绕低值中心的流动方向为逆时针;等高线密集处流速大,等高线稀疏处流速小。

2.3.1 卫星高度计资料 EOF 模态分析结果

用 EOF 模态分析方法分析多年准周平均的 T/P 资料,得到的前两个模态共占有约 97.52% 的方差。其中,第一模态解释了总方差的 92.21%,包含了吕宋海峡高度场最主要的信息。图 3(a)为该模态空间分布图,显示吕宋海峡东侧为正距平区,西侧为负距平区;在吕宋海峡,等高线略微向西凸出,并有等高线自吕宋岛东侧一直延伸至台湾海峡;时间系数(图 5)均为正值,夏季大于冬季。此模态表征了黑潮沿着吕宋岛东侧北上经过吕宋海峡时,黑潮锋略微往南海方向弯曲,有极少量的黑潮水从台湾岛西南侧北上汇入台湾海峡。由以上分析可见,第一模态实际上主要体现了黑潮的跨隙形态,且该形态于夏季出现的频率更高。

第二模态的方差贡献率为 5.31%。图 4(a)为其空间分布图,显示了吕宋海峡北侧为正距平区,南侧为负距平区,且在台湾岛西南角出现一高值中心,吕宋岛的西北侧呈现一低值中心。结合时间系数曲线可以得出,

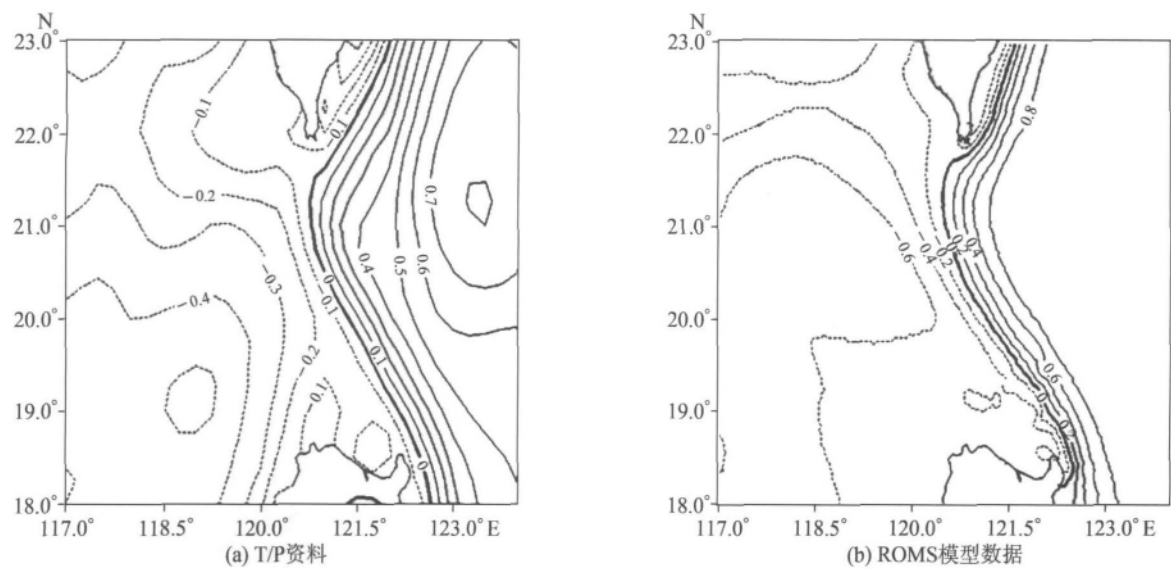


图 3 海面高度场 EOF 第一模态空间分布图(单位: 10^{-2} m)
Fig. 3 Spatial patterns of the first EOF mode of the sea surface height(unit: 10^{-2} m)

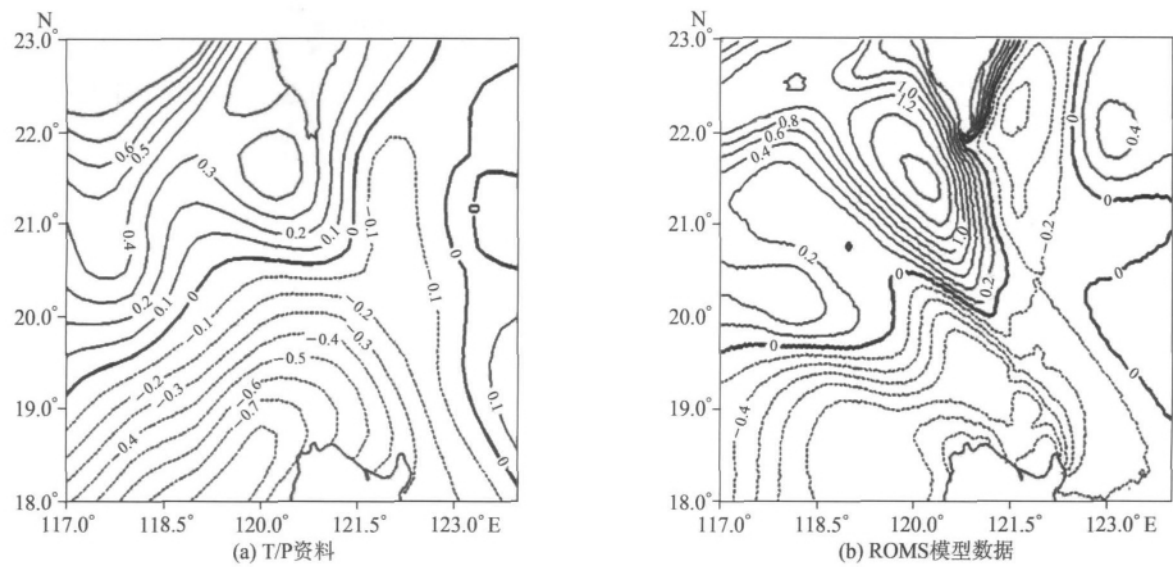


图 4 海面高度场 EOF 第二模态空间分布图(单位: 10^{-2} m)
Fig. 4 Spatial patterns of the second EOF mode of the sea surface height(unit: 10^{-2} m)

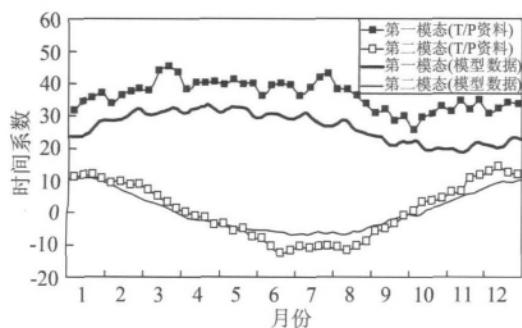


图 5 海面高度场 EOF 前两个模态的时间系数曲线图
Fig. 5 Time series of the first two EOF modes of the sea surface height

该海区海面高度变化具有显著的季节变化特征,春

夏季节时间系数基本为负值,吕宋海峡海面高度场南高北低,秋冬季节则刚好相反,体现了海面高度场对东亚季风的响应.根据等高线与地转流场的关系,具体分析第二模态得到:秋冬两季,吕宋海峡南侧呈现气旋式流动,黑潮以分支的形式沿着等高线入侵南海;在吕宋海峡北侧,黑潮以反气旋流套的形式流入、流出吕宋海峡,流套最西达到 119°E 左右,相比于浮标资料结果入侵程度较弱.春夏两季吕宋海峡南侧则为反气旋式流动,没有黑潮分支进入南海,相反会有部分南海水汇入黑潮主流中,这与 Wyrki^[18] 用实测资料所得出的结论大体一致,也同陈飞等^[22] 用 ADCP(acoustic doppler current profiler)测流结果相同. Yuan 等^[27] 结合水文

观测资料以及模型结果也证实了 8—9 月期间,有一股流从吕宋岛西侧北上,之后往东北(或东)流动,汇入西北向的黑潮水中。

第二模态显示的黑潮形变的季节性变化特征与第一模态时间系数的季节变化相匹配:秋冬季节有黑潮水以分支、流套的形式入侵南海,因此跨隙形态出现频率较低,表现为第一模态时间系数较小,春夏两季则刚好相反。上述季节变化特征与上文中用浮标资料所得结果基本一致。

2.3.2 ROMS 模型数据 EOF 模态分析结果

用 EOF 模态分析方法分析 ROMS 模型模拟的气候态平均海面高度场数据,前两个模态共占有约 56.94% 的方差。其中,第一、二模态分别解释了总方差的 46.68% 和 10.26%,而第三、四模态所占方差均在 5% 以下,且所显示空间分布形态与本文所讨论的黑潮路径无明显相关机制,因此本文只对第一、二模态予以分析。对比两种资料的结果可知,两者第一模态空间分布图(图 3)和时间序列变化(图 5)趋势均基本一致,进一步证实了跨隙形态为吕宋海峡黑潮的基本形态。第二模态空间分布图(图 4)与时间序列变化(图 5)趋势也大致相同,台湾岛西南角的高值中心范围有所扩大,且一部分等高线沿着南海北部陆坡一直延伸至南海内部。结合时间系数曲线图可知,秋冬两季部分黑潮水从吕宋海峡中部($\sim 20.5^{\circ}\text{N}$)入侵,反气旋流动至吕宋海峡北侧(118°E , 22°N),一部分黑潮水以分支的形式沿着南海北部陆坡向西入侵,一部分绕过台湾浅滩沿着澎湖水道进入台湾海峡,大部分沿着台湾南侧岸线流出吕宋海峡继续北上,该结果与 Liang 等^[28]根据 ADCP 测流所得结果基本一致。黑潮南侧分支仍然沿着吕宋海峡南侧顺时针汇入南海,春夏季节则流出南海汇入黑潮水中。

3 结论与讨论

本文利用浮标资料以拉格朗日方法描述了黑潮的运动轨迹,并进一步对卫星高度计资料和 ROMS 模型数据进行 EOF 模态分析,得到了黑潮在吕宋海峡形变的季节变化特征。这 3 种数据的结果均揭示了跨隙形态为黑潮在吕宋海峡最基本的形态,秋、冬两季存在分支、流套形态的黑潮。浮标轨迹图和 ROMS 模型数据模态分析结果均显示流套可西伸至 118°E 左右,而 T/P 资料显示的流套影响范围较小。春夏季节几乎不出现流套或者分支的形态,相反会有一部分南海水汇入黑潮主干。另外,ROMS 模型数据模态分析结果还再

现了黑潮水沿着南海北部陆坡入侵的形态。

参考文献:

- [1] 贾英来. 吕宋海峡黑潮形变的时空分布特征和形成机制[D]. 青岛:青岛海洋大学,2002.
- [2] Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2006, 62(4): 559-575.
- [3] Nitani H. Beginning of the Kuroshio[C]//Kuroshio—Its Physical Aspects. Seattle: University of Washington Press, 1972: 129-163.
- [4] 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨[J]. 台湾海峡, 1989, 8(1): 89-95.
- [5] Metzger E J, Hurlburt H E. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea and the Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(C5): 12331-12352.
- [6] Liang W D, Yang Y J, Tang T Y, et al. Kuroshio in the Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, C08048, doi:10.1029/2007JC004609.
- [7] Li L, Nowlin W D, Su J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998, 45(9): 1469-1482.
- [8] 李薇, 刘秦玉, 杨海军. 吕宋海峡海洋环流的基本特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(3): 345-351.
- [9] Jia Y L, Liu Q Y. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon Strait[J]. Journal of Oceanography, 2004, 60(6): 1063-1069.
- [10] Wang D X, Xu H Z, Lin J, et al. Anticyclonic eddies in the Northeastern South China Sea during winter 2003/2004[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64(6): 925-935.
- [11] 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信. 夏季南海北部一支向西流动的海流[J]. 热带海洋, 1984, 3(4): 65-73.
- [12] Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C3): 6415-6424.
- [13] Yuan D L, Han W Q, Hu D X. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, C11007, doi:10.1029/2005JC003412.
- [14] Hong B, Wang D X. Sensitivity study of the seasonal mean circulation in the Northern South China Sea[J]. Advance in Atmospheric Science, 2008, 25(5): 824-840.
- [15] Xu J P, Su J L, Chou D Z. Hydrographic analysis on the intrusion of Kuroshio Water into the South China Sea [C]// Proceedings of the Symposium on Oceanography

- of the Taiwan Strait and Adjacent Seas. Beijing: China Ocean Press, 1995: 30-44.
- [16] 许建平, 苏纪兰. 黑潮水入侵南海的水文分析 II: 1994 年 8-9 月期间的观测结果[J]. 热带海洋, 1997, 16(2): 1-23.
- [17] 苏纪兰, 许建平, 蔡树群, 等. 南海的环流和涡旋[C]// 南海季风暴发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999: 66-72.
- [18] Wyrtki K. Physical oceanography of the Southeast Asian water[R]. California: University of California, 1961: 1-195.
- [19] Wang J, Chen C S. On the Kuroshio branch in the Taiwan Strait during wintertime[J]. Progress in Oceanography, 1988, 21(3/4): 469-491.
- [20] Shaw P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine sea water into the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C1): 821-827.
- [21] Centurioni L R, Niiler P P, Lee D K. Observations of inflow of Philippine sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(1): 113-121.
- [22] 陈飞, 杜岩, 王东晓, 等. 2008 年 8—9 月份吕宋海峡西南侧锚定 ADCP 的斜压海流观测[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 66-71.
- [23] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [24] 陈上及, 马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [25] Paden C A, Abbott M R, Winant C D. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California; Part 1: sea surface temperature variability [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(18): 18333-18359.
- [26] Lagerloef G S, Bernstein R L. Empirical orthogonal function analysis of advanced very high resolution radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(C6): 6863-6873.
- [27] Yuan Y C, Liao G H, Yang C H. The Kuroshio near the Luzon Strait and Circulation in the Northern South China Sea during August and September 1994[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64(5): 777-788.
- [28] 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.

EOF Mode Analysis of Surface Pattern of the Kuroshio in the Luzon Strait

YAO Yu-juan, JIANG Yu-wu*, WANG Jia

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The temporal and spatial variations of Kuroshio patterns in the Luzon Strait were studied with the use of the Argos surface drifter data, as well as empirical orthogonal function (EOF) mode analysis of the satellite altimeter data and the sea surface height data resulting from a three-dimensional hydrodynamic model. Both trajectories of Argos surface drifting buoys and EOF mode analysis results reveal that the Kuroshio patterns in the Luzon Strait have significant seasonal variations. Kuroshio leaps across the Luzon Strait all around the year. During fall and winter, Kuroshio also loops and branches into the South China Sea (SCS) through the Luzon Strait, the loop can intrude as far as 118°E, but it seldom happens in the other two seasons when SCS water joins into the Kuroshio in reverse. Model data EOF mode analysis results also indicate that one branch of Kuroshio intrudes into SCS along the continental slope of northern SCS in winter.

Key words: Luzon Strait; Kuroshio pattern; Argos surface drifting buoys; sea surface height; empirical orthogonal function mode analysis