

台湾以东黑潮路径识别与变化规律*

王辉赞^{1,2} 魏林进^{2,3} 张全礼⁴ 刘磊² 刘科峰²

(1. 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 杭州 310012; 2. 国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073; 3. 海军福建基地航标测量队 福州 350500; 4. 陆军工程大学 南京 211101)

摘要 为研究对中国台湾以东海域黑潮路径及其变化, 本文基于法国空间局 AVISO 中心提供的 1993—2015 年的卫星遥感海表流场逐日资料, 对 121°—125°E, 22.4°—25°N 海域黑潮路径进行了逐日识别, 得到了共计 23 年累计 8400 天的台湾以东黑潮流轴的逐日路径, 并研究其不同纬度的流轴位置及其对应的表面黑潮流量的时空变化规律。主要结论如下: (1)采用模糊 C-均值聚类法对台湾以东黑潮流轴路径进行聚类分析, 发现台湾以东黑潮流轴在 24°N 以南出现明显摆动, 形成正常和偏东两种路径; 黑潮流轴存在明显的时间变化, 流轴偏东现象年平均大约出现 25 次, 大致每隔 3 年出现一次偏东较少的现象, 各月流轴偏东次数以 4、5 月最少, 10 月至次年 3 月较多; (2)台湾以东黑潮表面流量大小在 $6.2\text{—}8.3\times 10^4\text{m}^2/\text{s}$ 之间; 总体上来说, 纬度越高流量越大, 在 23.5°N 左右范围内存在一个流量低值中心; 在 24.3°N 以北流量总体较大, 且增长趋势稳定, 同时表面流量大小具有较强的季节和年际变化特征。

关键词 黑潮流轴识别; 台湾以东黑潮; 模糊 C-均值聚类; 黑潮表面流量

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20170700185

黑潮起源于菲律宾群岛东岸, 并沿着吕宋岛、台湾东岸向北流动进入东海, 之后沿东海大陆架外缘朝东北向流动, 从吐噶喇海峡流出东海, 最终在 35°N 附近离岸东流, 成为黑潮延伸体返回北太平洋(袁耀初等, 2000; 杨晓丹, 2013)。

黑潮作为西太平洋最重要的强西边界流, 尤其是中国台湾以东部分的黑潮, 它的强弱变化对其下游, 并对东海黑潮及其邻近海域的水文状况和海洋生态环境产生影响; 黑潮变化牵动沿海地区的气候变化(黄荣辉, 1996; 冯士筭等, 2004; 齐庆华等, 2012)。黑潮对我国近海区域的舰艇航行、渔业生产以及国防安全也具有重要意义。现今, 黑潮是物理海洋和海洋环境保障领域的研究热点问题。

黑潮表面流速最大的部分是表面黑潮流轴。目前关于黑潮流轴的识别方法主要依赖黑潮特殊的高温高盐强流特征, 归纳起来主要有以下三种类型: (1)基

于海流或流线识别: 黑潮作为一支强的西边界流, 流速大是其显著特征之一, 因此基于海流或流线的识别方法最直观; (2)基于等温线的识别: 由于黑潮高温的特性, 基于等温线对流轴的识别是较为有效的, 通常基于等温线识别方法在不同地段通常选取不同深度进行识别[称为“温度指数”, Kawai(1969)], 比如日本南部黑潮流轴通常用 200m 深度处的 16°C 等温线识别, 黑潮延伸体黑潮流轴通常用 300m 深度处的 12°C 等温线识别; (3)基于绝对动力高度识别: 绝对动力高度 ADT(Absolute Dynamic Topography)数据是海平面异常 SLA(Sea Level Anomaly)与平均动力地形 MDT(Mean Dynamic Topography)之和, 陈春涛(2010)基于 1993—2009 年法国空间研究中心 AVISO 中心的卫星高度计融合绝对动力高度数据认为该高度计产品 ADT 等于 240cm 的等值线可以较好地表征黑潮流轴所在处(对于不同版本的高度计资料, 黑潮流轴的

* 国家自然科学基金项目, 41206002 号, 41775053 号, 41706021 号; 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA1101010 号; 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目, 91428206 号; 中国博士后科学基金项目, 2014M551711 号; 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项项目, JG1416 号。王辉赞, 博士后, 讲师, E-mail: wanghuizan@126.com

收稿日期: 2017-07-14, 收修改稿日期: 2017-10-11

ADT 取值可能不一样)。以上黑潮流轴的主要识别方法主要基于等值线的识别,且总体而言主观性较强,特别是由于逐日资料相比逐月资料变化复杂,其自动识别的准确性尚可商榷,实现黑潮路径的准确自动识别是目前的难点之一。

目前,关于黑潮变化规律前人有很多研究,比如管秉贤(1985)基于1940年2—3月调查资料探讨了台湾以东黑潮深层流的途径;汤毓祥等(1994)基于1955—1990年G-PN断面资料,讨论了东海黑潮流量分布;贾英来等(2004)利用石垣-基隆两个验潮站间的海平面高度差,探讨了台湾以东黑潮流量的年际变化及其和风应力旋度的关系;温娜等(2006)基于验潮站资料研究了台湾以东黑潮流量的变异与其流经区域冬季海气相互作用间的关系;Hsin等(2008)基于数值模式研究了台湾以东黑潮规律;丁睿彬等(2013)基于区域海洋模式数据,分析了黑潮主流轴在吕宋海峡附近的变化;赵新华等(2016)基于卫星高度计资料分析了东海黑潮及黑潮延伸体的黑潮变异特征;孔彬等(2016)基于断面调查资料研究了东海黑潮PN断面流场核结构规律;Sun等(2016)基于卫星高度计和模式结果分析了黑潮分叉机制;Hsu等(2016)基于水下滑翔机和卫星高度计数据研究了冷涡对黑潮流轴的影响;王鼎琦等(2017)基于卫星高度计和同化资料分析了黑潮脱落涡旋与大尺度环流的关系;Qi等(2017)基于卫星高度计资料分析了表面黑潮的时空变化。总的来说,目前对于黑潮的研究一般侧重于将研究区域作为一个整体,而对于不同纬度位置黑潮的不同特征研究较少,且一定程度上受到资料时间分辨率(一般超过7天)和资料序列长度(一般不足10年)的限制,研究资料一般基于验潮站资料和卫星遥感海面高度资料。

本文拟基于1993—2015年卫星海洋海面高度计逐日流场资料,采用Ambe等(2004)提出的基于黑潮最大流速的逐点识别方法,对台湾以东的海域(121°—125°E, 22.4°—25°N)不同纬度位置的黑潮流轴进行较为准确的自动识别,并对识别路径进行聚类分析,从而得到该区域黑潮流轴的变化规律,并基于黑潮的流轴位置计算出黑潮的表面流量,以期探讨台湾以东黑潮路径及流量的变化规律。

1 数据与方法

1.1 卫星高度计数据

本文采用的卫星高度计海表流场资料是法国空

间海洋局的AVISO(Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)中心的经延时质量控制的绝对地转流速(MADT_UV)逐日资料,该资料融合了T/P、Jason-1/2和Geosat等多颗轨道卫星的数据,其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1天,时间跨度为1993年1月—2015年12月,共计23年累计8400天。研究区域为台湾以东海域(121°—125°E, 22.4°—25°N),如图1黑色虚线框内所示。

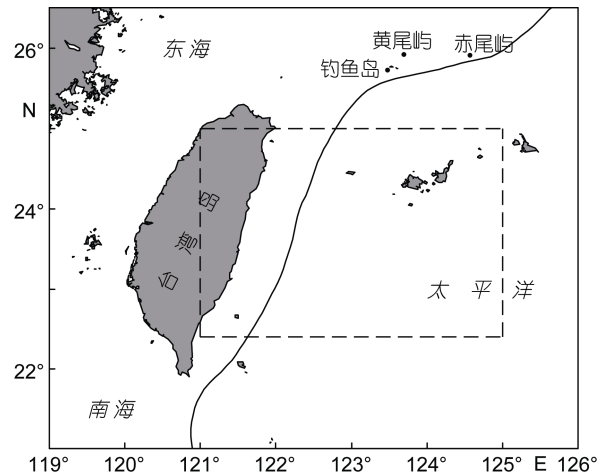


图1 研究区域

Fig.1 The study area

注:黑色实线为黑潮平均路径;虚线内为本研究区域

1.2 黑潮流轴识别方法

台湾以东部分的黑潮强而持续,有一定的规律性。本文通过Ambe等(2004)基于黑潮表层海流的方法,对台湾以东部分的黑潮流轴进行识别。

图2为某日黑潮流轴识别算法步骤示意图,识别算法描述如下所述:首先,在要识别黑潮流轴的始端适当位置选取一点作为起始点,即图2a中所示的红心实点,然后垂直于该点的流速方向做辅助线(红色),得到一个长为120km的断面,即该点左右辅助线各长60km。我们在左右两端辅助线上各选取100个位置点进行插值(图2中为便于显示,只选取了20个点),得出每个位置点的流速,并找到最大的流速的点位置 $r_{V_{max}}$,即图2a中所示的黑心实点,此黑心实点即为识别出黑潮流轴的一部分,再用上述方法构造的新断面,新断面则为调整后的断面,而红色的点部分只起辅助功能,与黑潮流轴并无直接关系。然后,沿黑心实点 $r_{V_{max}}$ 的流速方向 $\theta_{V_{max}}$ 向前推进 Δr (本文取5km),得到图2a中所示的绿点。绿点与我们选取的起始点是等价的,所以只要重复上述步骤,则可依次

得出黑潮流轴位置, 如图 2b 所示。最后, 识别选定区域后, 将识别的黑潮流轴的点连接起来(如图 2c),

并去掉识别过程中的辅助线, 就可以得出最终的流轴识别图, 如图 2d 所示。

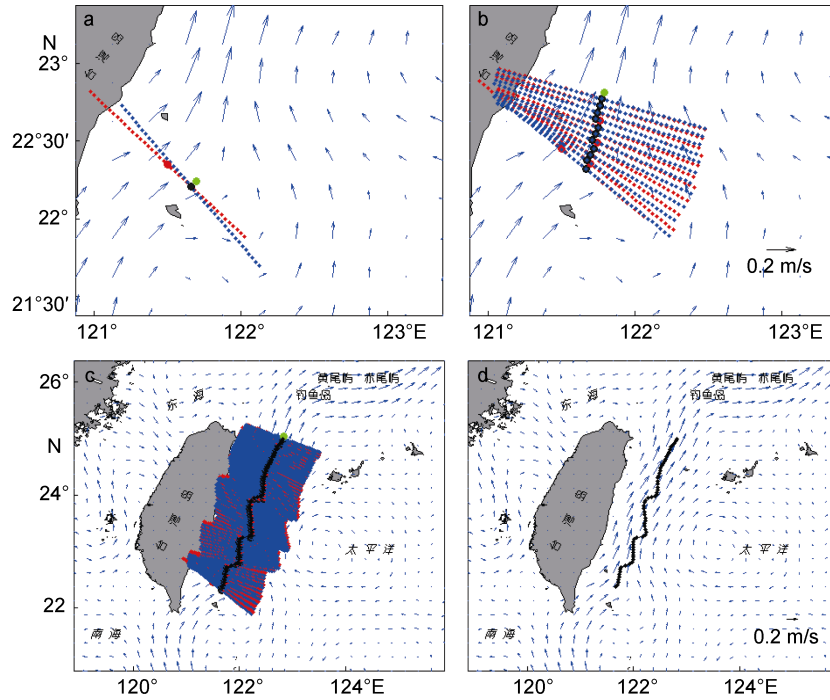


图 2 黑潮流轴识别步骤
Fig.2 Step of Kuroshio axis determination

基于上述 Ambe 等 (2004)方法可以识别出大部分的黑潮路径, 但是对于部分路径受中尺度涡旋等因素影响导致出现较大的分支的情况, 此时该方法识别出的路径可能存在错误(如图 3a 所示)。由于流场反向不影响黑潮路径识别, 因此本文在路径识别时通过将流场反向(即流速乘以-1), 黑潮路径识别由北向南, 可以部分解决流场分叉问题, 识别出如图 3b 黑潮流轴。此外, 还存在极少数黑潮路径识别极为困难的逐日资料, 此时需要借助人工辅助识别的办法,

先初估并点出黑潮流轴大致路径[类似 Ambe 等(2004)方法中的初始点估计], 然后通过寻找与初估路径点流速垂直的断面上最大的流速的点并将其连接起来, 得到识别出黑潮流轴。本文中的所有逐日黑潮流轴都是综合正、反向识别并部分辅助人工识别而得出的较优流轴路径, 因此得出的逐日黑潮流轴路径相对合理。

基于上述黑潮流轴识别方法, 可识别出 1993—2015 年共计 23 年累计 8400 天的台湾以东黑潮的所有流轴的逐日路径。

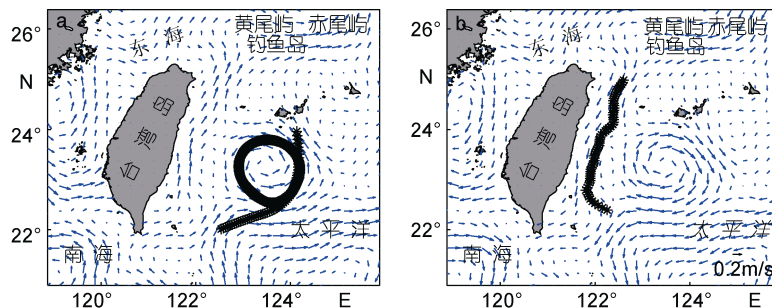


图 3 黑潮流轴的正向(a)与反向识别(b)
Fig.3 The identification of Kuroshio axes of forward (a) and reverse currents (b)

1.3 模糊 C-均值聚类法

为研究台湾以东黑潮流轴的变化规律,我们将对黑潮的逐日流轴进行聚类分析,从而将黑潮流轴路径进行归类。由于黑潮流轴路径之间的分类并非是泾渭分明的,而是模糊不清的,所以我们不能进行硬性的划分,将一个样本明确地归属为某一类。而模糊 C-均值聚类法(FCM)可以对数据进行模糊划分,使用隶属度表示一个样本属于某一类的程度。例如海洋水团的分类,应该分成几类,以什么为聚类中心,哪里是水团的分界,概念都很模糊,所以要引入隶属度来进行模糊划分。与 K-均值聚类(黄嘉佑等, 2015)类似,模糊 C-均值聚类算法也是一种基于划分的聚类算法,它的思想就是使得被划分到同一簇的对象之间相似度最大,而不同簇之间的相似度最小。

模糊 C-均值聚类步骤为(Bezdek *et al.*, 1977; 陈纳新, 2008): (a)确定类别数、参数、迭代停止误差和最大迭代次数; (b)初始化聚类中心; (c)计算初始的距离矩阵; (d)更新隶属度和聚类中心; (e)重新计算距离矩阵,并计算目标函数的值; (f)若达到最大迭代次数或者前后两次目标函数的绝对差小于迭代停止误差则停止,否则转(d),也可以使用前后两次隶属度矩阵的差来判断; (g)将样本点划分为隶属度最大的那一类。通过以上步骤,可以对黑潮路径进行聚类,方法与 Kim 等(2011)文献对台风进行聚类的方法类似。

1.4 黑潮表面流量计算方法

由于本文主要基于卫星高度计资料进行计算,流速限于表层,因此我们基于文献 Hsin 等(2012)和 Hsin 等(2013)的表面流量计算方法,并对东边界选取进行适当修改,计算黑潮表面流量。基于表面地转流速,黑潮表面流量的公式计算如下:

$$\text{INT}_{V_g} = \int_{X_W}^{X_E} v_g(x, y, t) dx$$

式中, X_E 和 X_W 为积分的东、西边界, v_g 为地转速度南北向分量。由于黑潮是稳定向北的流动,我们将 v_g 为负数(向南)时视为 0。将台湾东岸的海岸线作为积分的西边界;将黑潮流轴位置向东移 1 个经度作为东边界,因为东边界的范围大致与黑潮平均流轴相差 1 个经度(Hsin *et al.*, 2013)。值得一提的是, Hsin 等(2013)中计算黑潮流量时将黑潮流轴位置向东移 1 个经度作为东边界,但在台湾东水道 ETC(24.25°—24.75°N)范围内选取 124°E 固定边界作为东边界,该文献确定的黑潮东边界在 24.25°N 处可能不连续,所以本文中黑潮流量的东边界全部取东移 1 个经度的计算范围。

本文采用边界确定方法与文献 Hsin 等(2013)边界方法对表面流量计算结果数值上差异不大,但能使东边界连续,且不会显著影响黑潮表面流量时间规律特征。

2 台湾以东黑潮变化规律分析

2.1 台湾以东黑潮流轴月变化规律分析

基于 1993 年 1 月—2015 年 12 月逐日 AVISO 卫星资料,利用 1.2 节中所述的黑潮流轴识别方法,得到了 8400 天台湾以东黑潮流轴的路径。为了得到其月变化规律,我们将 23 年资料所得到各月份的流轴进行汇总,如图 4 所示。图中蓝线为逐日的流轴,我们将所有同一月份的流轴汇总到了一起,并计算出各月对应的平均流轴位置和流轴的标准差大小,图中红线则为各月份的平均流轴位置,绿线代表流轴的标准差变化情况,即反映了不同纬度上流轴东西变动幅度大小,即代表流轴东西移动的离散程度。

从图 4 中可以直观地看出,台湾以东的黑潮流轴存在一定的季节性变化。总体而言,流轴主要集中在经度为 121.2°—122.5°E,并沿着台湾的东岸,呈西南—东北走向,这一点在平均流轴中表现更为明显。但是,流轴也不时地超出这个范围,向东偏移。从月份上来看,4 月、5 月的逐日流轴较为集中稳定(标准差误差小),向东偏移的情况较少,而 10—12 月、2—3 月出现向东偏移的情况较多。为进一步分析这种变化规律,对标准差的分布图进行分析。

通过计算各月份同一纬度上的逐日流轴经度标准差,得到各月经度标准差分布图,可以表征不同纬度上流轴变化的幅度,各月份的流轴变化如图 5 所示。总体而言,标准差由南至北逐渐减小。从图中可以看出,标准差的分布在 24°N 以北的值较小且分布集中,且标准差的值均小于 0.25°,说明了 24°N 以北流轴的变化情况较小,流轴路径较为稳定;而在 24°N 以南(但在识别范围 22.4°N 以北,后面的范围也相同)时,标准差的波动增大,最大的时候可达 0.45°。4 月、5 月份的标准差值仍较小,说明了其流轴不仅在 24°N 以北较为稳定,在 24°N 以南的位置也相对稳定;其余月份的标准差大小都相对较大,以 2 月、11 月、12 月最为显著,表明了这几个月份的流轴在 24°N 以南的变动幅度较大,也就是说,这几个月份流轴偏东的幅度较大,这与从各月份流轴汇总图所得到的结论大致相同。

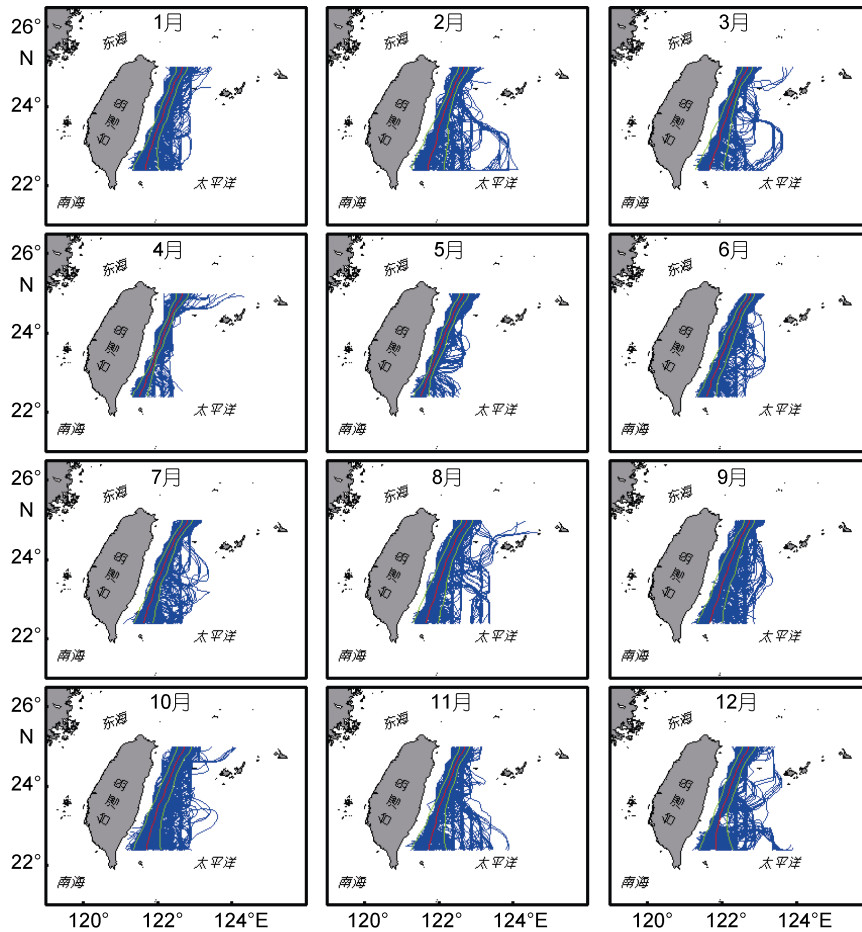


图 4 1993—2015 年台湾以东黑潮逐日流轴各月汇总
 Fig. 4 Daily Kuroshio axes of different months from 1993 to 2015

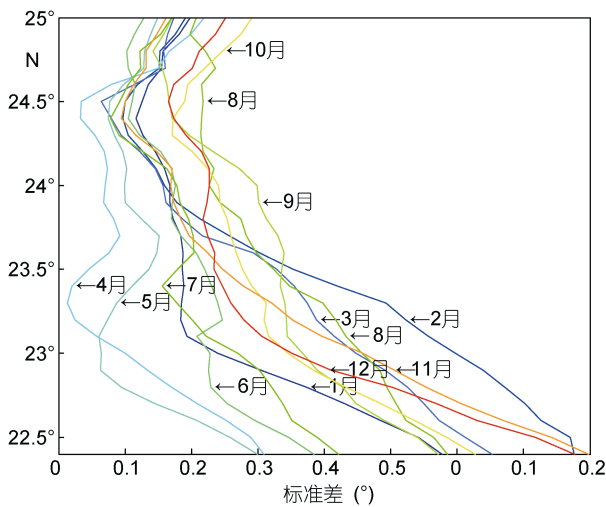


图 5 黑潮路径不同月份标准差随纬度分布图
 Fig.5 The root-mean-square variation of Kuroshio axes with latitude of different months

2.2 台湾以东黑潮流轴的聚类分析

从上一小节的分析可以初步得出, 台湾以东的

黑潮流轴路径并不是持续稳定不变的。总体而言, 流轴基本位于台湾东岸附近, 呈西南—东北走向, 但不时会出现东移。针对这一情况, 采用 1.3 节描述的模糊 C-均值聚类法, 对台湾以东的黑潮流轴进行分类, 进一步分析流轴东移的变化规律。

通过模糊 C-均值聚类法, 对台湾以东的黑潮流轴进行分类, 主要得到了两种类别。如图 6 所示, 图中显示的是通过聚类得出的两种不同路径, 可以大致得到以下规律: 两类路径在 24°N 以北, 流轴路径相距较近; 在 24°N 以南, 两类流轴从较为接近到逐渐分开, 形成了分叉的形状, 大致可将两类流轴归纳为正常(第一类)和偏东(第二类)两种路径类别。通过聚类, 我们得到了在 23 年 8400 天的流轴路径中, 属于第一类的正常路径共有 7808 天, 属于第二类的偏东路径共有 592 天, 这就表明了台湾以东的流轴的路径还是以正常的类型为主, 但存在偏东变化的可能, 并且这些偏东的流轴的现象具有一定的统计意义。

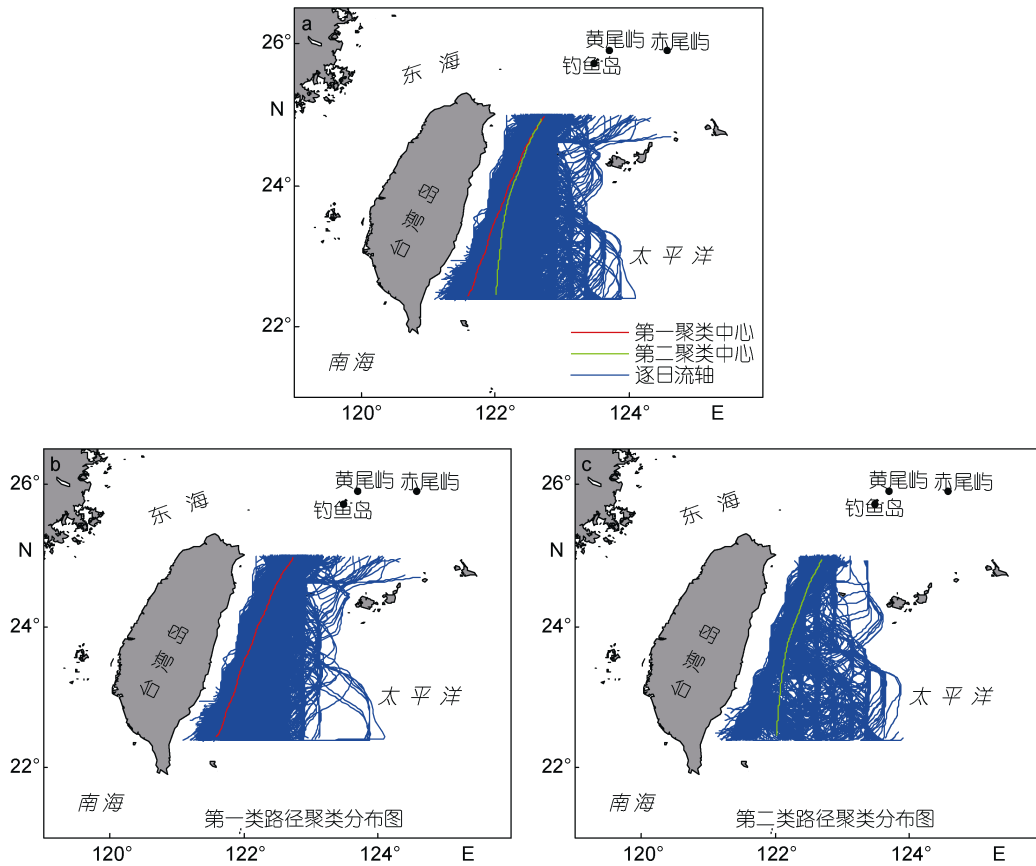


图 6 黑潮流轴聚类

Fig.6 Cluster diagram of Kuroshio axes

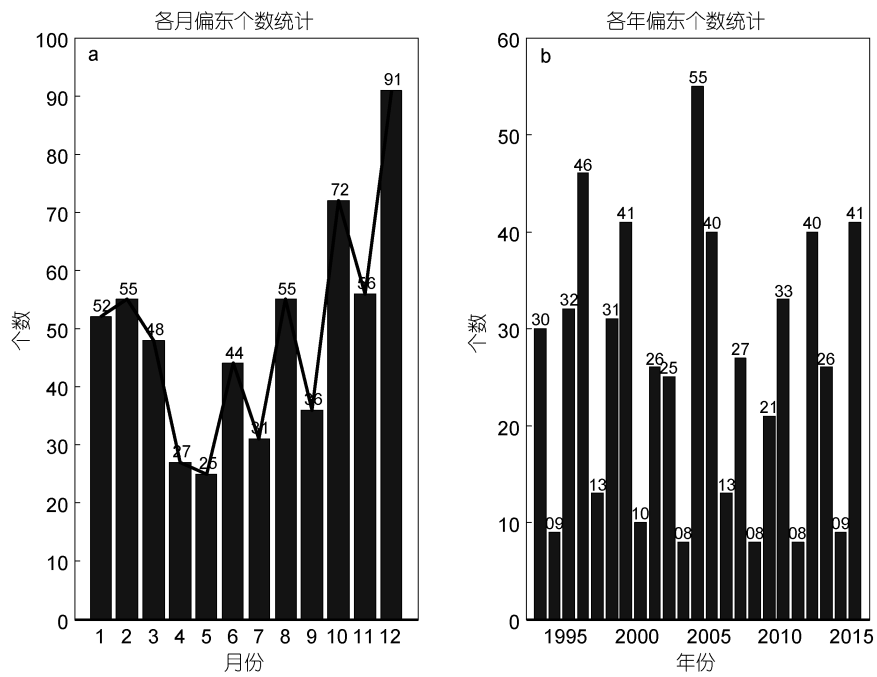


图 7 黑潮偏东流轴的统计(a: 按月统计; b: 按年统计)

Fig.7 Statistics of eastern Kuroshio axis(a. monthly; b. annually)

从图 6 还可以看出, 属于第一类的正常路径类似乎也存在偏东流轴。主要原因是本文为简化问题, 将模糊 C-均值聚类法中的聚类类别数设为两类(即正常和偏东两类), 但实际黑潮流轴存在极少部分流轴不属于严格意义上的正常或偏东路径类, 而被“强制”分类, 但出现该情况的数量较少。

图 7 为根据聚类得到的 1993—2015 年 592 次(日)黑潮流轴偏东(第二类路径)情况的月统计和年统计。从月统计的情况上来看(月平均出现 49.3 次), 出现最少的月份为 4 月、5 月, 出现次数分别为 27、25 次, 仅约平均值的一半。出现次数较多的月份为 10 月—次年 3 月, 其中以 10 月、12 月尤为显著, 分别出现了 72 和 91 次。而从年统计的分布图上来看(年平均出现次数为 25.7 次), 偏东次数较多的年份为 2004 年, 出现了 55 次; 偏东次数较低的年份较多。我们把出现偏东次数低于 15 次的年份归于次数较低的一类, 可以大致看出偏东次数较少现象的年规律, 大致每隔 3 年出现一次偏东次数较少的现象。值得一提的是, Hwang 等(2002)利用 1993—1999 年数据统计了黑潮流轴平均经度变化规律, 其经度偏东年份与本文图 7b 的结果较为一致, 但由于其数据较短, 未提到 3 年左右的规律。

综合月统计和年统计图, 台湾以东黑潮流的流轴出现情况大致如下: 流轴偏东现象年平均大约出现 25 次, 大致每隔 3 年左右出现一次偏东较少的现象; 月分布规律以 4、5 月最流轴偏东次数最少, 10 月—次年 3 月较多(10 月、12 月最多), 这与上节月规律分析结论相似。

2.3 黑潮表面流量

基于识别出 8400 天的逐日黑潮流轴路径, 我们采用 1.4 节的表面流量计算的方法对黑潮表面流量进行了计算。

图 8 为 23 年的平均流量图, 我们可以得出流量的大致分布情况。台湾以东(22.5°—25°N)的表面流量大小在 $6.2\text{—}8.3 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}$ 之间, 且各个纬度间流量大小不一, 变化情况较大; 总体上来说, 纬度越高的地方流量越大, 在 23.5°N 左右范围内存在一个流量低值中心; 在 24.3°N 以北流量总体较大, 且随纬度增加增长趋势稳定。

为进一步得到台湾以东表面流量年际变化和月变化规律, 我们对表面流量大小进行了月平均和年平均(如图 9 所示)。从月平均图中, 可以看出总体的流量趋势与总平均图 8 大致相同: 在 24.5°N 以北为流量大值区域, 在 23.5°N 左右范围内存在一个低值中

心, 整体上流量随纬度的增加而增加。流量较大的月份为 2、3、6、9 月, 其中 3 月份流量最大, 在同一纬度上 3 月份的流量较其他月份偏大; 而流量较小的月份为 5、8、11 月, 其 23.5°N 的低值中心较其他月份最为明显。年变化流量较大的年份为 1995、1997—1998、2003—2004 年。而流量较小的年份为 2000—2001 年、2005 年、2010 年和 2012 年, 在 24°N 以南低值中心明显, 但在 24°N 以北的低值区不明显。本文所得结论与 Hsin 等(2013)结果对应较好, 但后者未对黑潮流量根据不同纬度进行细分。值得一提的是, 年变化和月变化的流量高低值在不同纬度带对应略有区别。

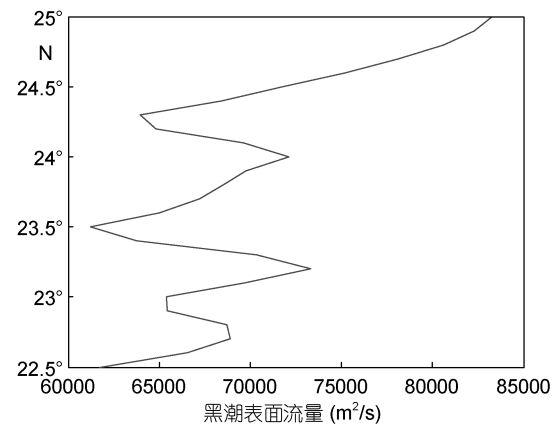


图 8 1993—2015 年平均表面流量图

Fig.8 Mean surface intensity of Kuroshio from 1993 to 2015

3 结论

本文基于法国空间局 AVISO 中心提供的卫星资料, 对台湾以东海域(121°—125°E, 22.4°—25°N)的不同纬度的黑潮流轴进行了逐日识别, 得到了 1993—2015 年共计 8400 天台湾以东黑潮流轴的路径, 并采用模糊 C-均值聚类法对台湾以东黑潮流轴路径进行聚类分析, 并结合平均流轴和流轴标准差的分布, 得到了以下结论:

(1) 台湾以东黑潮流轴主要分为正常流轴和偏东流轴两类, 正常流轴流轴主要集中在纬度为 121.2°—122.5°E 之间, 并沿着台湾的东岸, 呈西南—东北走向; 而偏东流轴在 24°N 以北时, 流轴路径与正常流轴相距较近, 在 24°N 以南时出现明显向东的分叉, 成为偏东正常流轴路径的分界。

(2) 流轴路径在 24°N 以北时较为稳定, 而在 24°N 以南时, 4 月、5 月份流轴也相对稳定, 而 10 月—次年 3 月流轴波动幅度大, 向东偏移程度大。

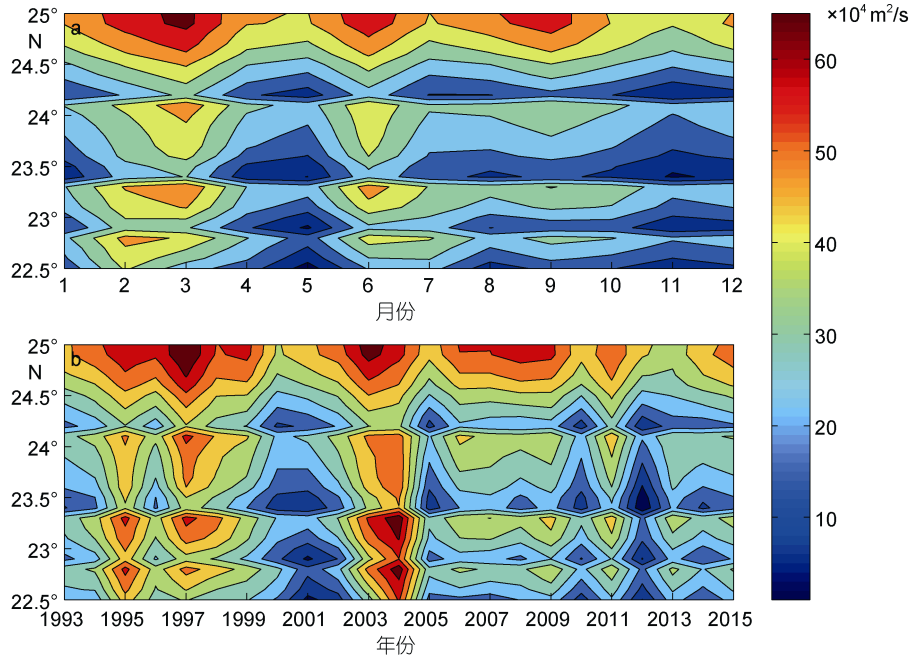


图9 1993—2015年黑潮平均表面流量随时间变化(a. 月平均图; b. 年平均图)

Fig.9 Temporal variation in mean surface intensity of Kuroshio from 1993 to 2015 (a. monthly; b. annually)

(3) 台湾以东黑潮流轴的偏东路径出现规律为: 流轴偏东现象年平均大约出现 25 次, 大致每隔 3 年出现一次偏东较少的现象, 而偏东较多现象的年变化无明显规律; 各月中流轴偏东次数以 4、5 月最少, 10 月—次年 3 月较多(10 月、12 月最多)。

(4) 台湾以东的表面流量大小在 $6.2\text{—}8.3(\times 10^4 \text{ m}^2/\text{s})$ 之间; 总体上来说, 纬度越高的地方流量越大, 但在 23.5°N 左右范围内存在一个流量低值中心; 在 24.3°N 以北流量总体较大, 且随纬度增加流量增长趋势稳定。流量较大的月份为 2、3、6、9 月, 其中以 3 月份流量最大, 流量较小的月份为 5、11 月。年变化流量较大的年份为 1995、1997—1998、2003—2004 年, 而流量较小的年份为 2000—2001 年、2010 年和 2012 年。

本文主要基于逐日卫星高度计资料对黑潮流轴进行识别, 并统计分析了流轴位置和表面流量大小的变化特征, 但对于导致该变化的原因还有待下一步深入分析。

致谢 所有作者对与复旦大学王桂华教授、国防科技大学张韧教授的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

丁睿彬, 陈大可, 姜良红, 2013. 黑潮流轴在吕宋海峡的变化分析. 海洋学研究, 31(2): 16—25

- 孔 彬, 陈红霞, 袁业立, 2016. 1991—2011 年东海黑潮 PN 断面流结构与季节变化分析. 海洋学报, 38(5): 14—26
- 王鼎琦, 方国洪, 邱 婷, 2017. 吕宋海峡黑潮脱落涡旋的特征分析. 海洋与湖沼, 48(4): 672—681
- 冯士筵, 李凤岐, 李少菁, 2004. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社
- 汤毓祥, 林葵, 田代知二, 1994. 关于东海黑潮流量某些特征的分析. 海洋与湖沼, 25(6): 643—651
- 齐庆华, 蔡榕硕, 张起龙, 2012. 台湾以东黑潮经向热输送变异及可能的气候效应. 海洋学报, 34(5): 31—38
- 杨晓丹, 2013. 黑潮的变化及其对东中国海物理环境的影响. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 陈纳新, 2008. 模糊聚类和模糊推理在评价海冰灾害中的应用. 大连: 大连海事大学硕士学位论文
- 陈春涛, 2010. 多传感器卫星数据黑潮变异研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 赵新华, 杨俊钢, 崔 伟, 2016. 基于 20a 卫星高度计数据的黑潮变异特征. 海洋科学, 40(1): 132—137
- 袁耀初, 苏纪兰, 2000. 1995 年以来我国对黑潮及琉球海流的研究. 科学通报, 45(22): 2353—2356
- 贾英来, 刘秦玉, 刘 伟等, 2004. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征. 海洋与湖沼, 35(6): 507—512
- 黄荣辉, 1996. 中国气候灾害的分布和变化. 北京: 气象出版社
- 黄嘉佑, 李庆祥, 2015. 气象数据统计分析方法. 北京: 气象出版社
- 温 娜, 刘秦玉, 2006. 台湾以东黑潮流量变异与冬季西北太平洋海洋-大气相互作用. 海洋与湖沼, 37(3): 264—270
- 管秉贤, 1985. 台湾以东黑潮深层流的途径——1940 年 2—3 月观测结果的分析. 海洋与湖沼, 16(4): 253—260
- Ambe D, Imawaki S, Uchida H *et al*, 2004. Estimating the Kuroshio Axis South of Japan Using Combination of

- Satellite Altimetry and Drifting Buoys. *Journal of Oceanography*, 60(2): 375—382
- Bezdek J C, Castelaz P F, 1977. Prototype classification and feature selection with fuzzy sets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7(2): 87—92
- Hsin Y C, Wu C R, Shaw P T, 2008. Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982—2005: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(C4): C04002
- Hsin Y C, Qiu B, 2012. Seasonal fluctuations of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) across the Pacific basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C6): C06001
- Hsin Y C, Qiu B, Chiang T L *et al*, 2013. Seasonal to interannual variations in the intensity and central position of the surface Kuroshio east of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9): 4305—4316
- Hsu P C, Lin C C, Huang S J *et al*, 2016. Effects of cold eddy on kuroshio meander and its surface properties, east of Taiwan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 9(11): 5055—5063
- Hwang C, Kao R, 2002. TOPEX/POSEIDON—derived space-time variations of the Kuroshio Current: applications of a gravimetric geoid and wavelet analysis. *Geophysical Journal International*, 151(3): 835—847
- Kawai H, 1969. Statistical estimation of isotherms indicative of the Kuroshio axis. *Deep-Sea Res*, 16: 109—115
- Kim Y S, Kim J H, Ho P S *et al*, 2011. Pattern classification of typhoon tracks using the fuzzy C-means clustering method. *Journal of Climate*, 24(2): 488—508
- Qi J F, Yin B S, Xu Z H *et al*, 2017. Spatiotemporal variations of the surface Kuroshio east of Taiwan Island derived from satellite altimetry data. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1—15, doi: 10.1007/s00343-018-6314-7
- Sun R L, Wang G H, Chen C L, 2016. The Kuroshio bifurcation associated with islands at the Luzon Strait. *Geophysical Research Letters*, 43(11): 5768—5774

IDENTIFICATION OF THE KUROSHIO PATH EAST OF TAIWAN AND ITS VARIATION

WANG Hui-Zan^{1,2}, WEI Lin-Jin^{2,3}, ZHANG Quan-Li⁴, LIU Lei², LIU Ke-Feng²

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Fujian Naval Base Command Beacon Survey Team, Fuzhou 350500, China; 4. Army University of Engineering, Nanjing 211101, China)

Abstract Based on the 23-year (1993—2015) satellite-derived daily surface current data (a total of 8400 days) available from the AVISO(Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data)center, we identified the daily path of the Kuroshio east of Taiwan (119°—126°E, 22.4°—25°N), and investigated the variation of the axis position and surface Kuroshio intensity in different latitudes. Fuzzy C-means clustering algorithm (FCM) was used to cluster the Kuroshio axes east of Taiwan. It is found that the Kuroshio axis east of Taiwan swang obviously at 24°N and formed two paths, i.e., normal and eastward ones. The Kuroshio axes presented a clear temporal variation. The frequent of the axis apt to be eastern is ~25 times per year on average. On the country, the less frequent of the phenomenon occurred approximately every three years. The frequent of the phenomenon was low in April and May, and high in October to March of next year. The surface Kuroshio intensity east of Taiwan was between 6.2—8.3×10⁴m²/s. In general whole, the higher the latitude, the greater the intensity. There was a low-flow center at about 23.5N°. In the north of 24.3N°, the intensity was large and grows steadily. Moreover, the surface Kuroshio intensity showed strong seasonal and interannual variations.

Key words Kuroshio axis identification; Kuroshio east of Taiwan; fuzzy C-means clustering algorithm; surface Kuroshio intensity