

台湾暖流变化特征及机制研究进展

王建丰^{1,2,3,4}, 司广成^{1,2,3,4}, 于非^{1,2,3,4,5}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266003; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 台湾暖流携带高温高盐的大洋水体入侵到东海陆架区, 其向岸分支可入侵到长江口外, 对我国近海温、盐与环流产生重要影响。前人针对台湾暖流上游区域开展了大量研究, 对其来源、温盐特征及入侵机制取得重要研究成果, 而对台湾暖流下游, 即向岸分支流轴及前锋的变化认识模糊。台湾暖流向岸分支入侵流轴及前锋的变化可能对长江口海域低氧和藻华等生态灾害的发生和分布具有重要影响, 因此, 开展台湾暖流向岸分支路径变化的研究具有重要的物理和生态学意义。通过分析积累的温、盐数据和潜标长时间观测, 我们初步发现, 台湾暖流向岸分支存在季节尺度和天气尺度的变化, 流轴存在摆动, 前锋的北界也存在变化, 但对其详细特征和变化机制尚不清楚, 需要通过进一步调查和研究予以阐明。

关键词: 台湾暖流; 入侵路径; 变化机制

中图分类号: P722.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)05-0141-08

DOI: 10.11759/hyxx20181019002

台湾暖流是由南向北流经我国闽、浙沿岸的海流, 在冬季逆风运动, 具有高温高盐的特点^[1-2]。台湾暖流携带高营养盐的外海水途径台湾岛到长江口附近, 它的输运和变化对我国近海的水文、气候和渔场位置都有着重要的作用^[3-5]。因此, 台湾暖流深受国内外科学家的关注, 前人对其特征^[6-8]、来源^[6, 9-11]、路径^[10, 12-13]以及季节变化开展了大量的研究^[4, 7, 14-17]。这些研究的主体集中于台湾暖流的上游区域, 迄今为止, 台湾暖流入侵前锋的范围及变化研究较少, 对其变化特征认识不够详细, 对其变化机制尚不明确。

因为台湾暖流携带外海水具有高温、高盐、高营养盐、低氧的特征, 其路径和前锋的变化对长江口以及邻近海域的生态灾害存在重要影响^[18-22]。赵亮等^[22]研究发现长江口、苏北近岸, 夏季水母的暴发受当年底层水温和上一年夏秋季底层水温控制。春季底层水温 10~18℃持续时间长, 有利于当年夏季水母暴发, 夏秋季底层水温 18~25℃持续时间长, 则有利于来年夏季水母暴发, 因此, 台湾暖流入侵前锋及变化对长江口外底层水温的影响, 可能会改变水母暴发的程度和位置。台湾暖流携带的外海水具有低氧的特征, 入侵的位置和范围也会影响局地的水

团结构^[19], 因此, 台湾暖流向岸分支可能是影响长江口外低氧区分布的潜在因素。杨德周^[20]通过数值模拟提出, 在长江口区域, 台湾暖流输运的磷酸盐总量比长江径流输运的磷酸盐总量高一个量级。Dai等^[21]研究表明, 台湾暖流携带的高磷酸盐是造成东海藻华的重要原因。因此, 台湾暖流前锋和路径的变化会对我国近海的生态灾害有重要影响。我们通过分析课题组积累的温、盐数据和测流资料初步发现台湾暖流由底层穿越长江口, 可以达到 32.5°N 以北, 其前锋和路径存在季节变化, 因此, 研究台湾暖流前锋和路径的变化, 对长江口及邻近海域生态灾害的预测和机理研究具有重要意义。

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(41706012); 中国科学院先导专项(XDA11020301); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目—物理海洋与气候(U1406401)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41706012; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11020301; NSFC- Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, No. U1406401]

作者简介: 王建丰(1984-), 男, 辽宁盖州人, 助理研究员, 博士, 主要从事物理海洋学研究, 电话: 0532-82898537, E-mail: jfwang2013@qdio.ac.cn; 于非, 通信作者, 电话: 0532-82898187, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

东海大陆架位于东亚季风区,在冬季受到强烈的东北季风控制,在夏季受到较弱的西南季风影响。季风以及太阳辐射的季节变化对东中国海环流和水文特征季节变化的产生重要影响。在东海大陆架存在几支重要的流系包括:黑潮、对马暖流、台湾暖流、闽浙沿岸流和黄海暖流等(图1)。台湾暖流起源于台湾东北和台湾海峡,跨过陆坡穿越到东海陆架,并与沿岸水体混合,有研究表明台湾暖流的向岸分支能够入侵到长江口外^[23]。台湾暖流是引起外海水影响东海陆架的一个重要流系。

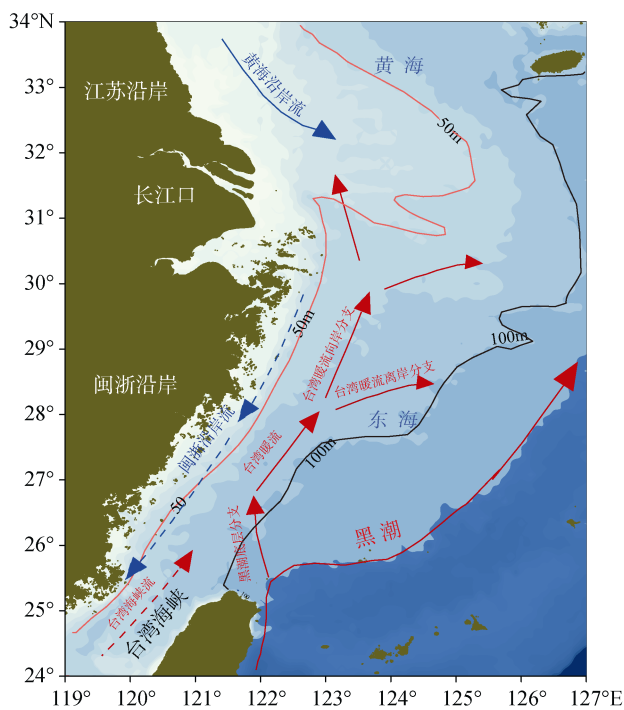


图1 东中国海环流示意图

Fig. 1 Schematic map of the major aspects of the shelf current system in the East China Sea in winter

传统的台湾暖流指的是具有高温高盐特征,由南向北流经我国闽、浙沿岸的海流^[1]。Su和Pan^[24]提出台湾暖流在28°N附近分成两支,其中一支为台湾暖流向岸分支,它沿着50m等深线经过闽浙沿岸向北流动到达长江口外水下峡谷并转向东北;另外一支为台湾暖流离岸分支,它首先逆时针旋转然后顺时针流动,最终汇入黑潮。Zhu等^[23]通过ADCP定点观测提出台湾暖流可以跨越水下峡谷到达长江口外。这一观测结果也被东海的数值模拟所证实^[10, 13, 25-26]。现在关于台湾暖流的研究主要集中台湾暖流来源、特征、季节变化和入侵机制,下文将开展详细论述。

1 台湾暖流来源的研究

台湾暖流的来源一直以来是一个热点问题,已有研究认为台湾暖流水源自于台湾海峡水^[6, 27]和台湾东北黑潮分支^[9-12, 28-29]。由于东海大陆架处于东亚季风区,夏季和冬季风向相反,台湾暖流在不同季节的存在性曾有争议^[14, 30-31]。前人的观点一致认为在夏季,台湾暖流是存在的,但是对于夏季台湾暖流水的来源还存在争议。部分学者认为,在夏季,台湾暖流水主要来自于台湾海峡,台湾东北黑潮分支无法抵达东中国海^[3, 6, 32-33]。但是有研究认为,在夏季,台湾东北黑潮分支携带着黑潮次表层水入侵到东海陆架底层^[10, 13, 34]。翁学传等^[7]认为无论是在夏季还是在冬季,台湾暖流向岸分支主要来源于台湾海峡,而离岸分支在夏季主要来源于台湾海峡,而在冬季来源于台湾东北黑潮分支。

与夏季台湾暖流的共识相反,对于冬季台湾暖流的存在与否曾存在争议。表层流的观测和模拟结果认为台湾暖流在冬季是不存在的^[35-36]。Qiu等^[35]基于1953—1984年气候态模拟结果,刻画出东中国海表层的流场,该模拟并没有展现出台湾暖流在冬季能够入侵到东中国海;此外,Naimie等^[36]根据气候态平均水文资料开展研究,表层没有发现台湾暖流在冬季入侵到中国近海的迹象。Kondo^[12]建立了东中国海冬季的环流图,认为台湾暖流在冬季没有从表层入侵到东海陆架,而是沿50m等深线从底层入侵到东海陆架。考虑到台湾暖流的定义,台湾东北黑潮分支入侵到东中国海后也成为台湾暖流的一部分。其他一些学者也认为台湾暖流在冬季是存在的^[3, 6, 23, 32, 34, 37-39]。林葵等^[38]分析表层流认为台湾暖流在冬季是存在的,但是在27°N附近发生分叉有一支北上形成台湾暖流向岸分支,另外一支转向东离岸运动。Chern等^[40-41]应用走航ADCP、Liang等^[42]应用锚系ADCP、Zhu等^[23]应用ADCP开展观测,分别在台湾附近和闽浙沿岸以及长江口外验证了台湾暖流在冬季是存在的。也有其他研究认为台湾暖流在冬季逆风时和夏季顺风时一样强^[43-44]。

综上所述,Guan等^[4]对台湾暖流的历史研究进行了详尽的总结,认为台湾暖流是常年存在的。夏季台湾暖流主要由台湾海峡水和台湾东北的黑潮水所共同组成^[45],冬季台湾暖流主要来自于台湾东北黑潮分支^[9, 11, 43]。

2 台湾暖流特征和范围的研究

台湾暖流的温盐特征和扩展范围关系到其流经海域的物理、化学特性,因此,很多学者对台湾暖流温盐特征和扩展范围开展研究。由于测流资料有限,大部分前人的研究主要基于温盐资料应用相关的水团分析方法如相关系数法^[46],聚类分析方法^[6, 14, 47-48]和以盐度为指示变量等方法^[44]。

翁学传等^[46]通过温-盐图分析提出台湾暖流应该分为表层水和深层水,其中表层水的温度为 23~29°C,盐度为 33.3~34.2,而深层水的温度为 17~23°C,盐度为 34.2~34.7。Su 等^[6]应用聚类分析方法提出台湾暖流深层水的温度和盐度相对稳定,温度特征值为 19°C,盐度特征值为 34.4,盐度的年变化范围 34.1~34.7;台湾暖流上层水的温度和盐度范围在夏季分别是 23~29°C 和 33.3~34.2,在冬季温度降低,盐度略有增大。杨红等^[47]采用模糊聚类的方法计算得到台湾暖流水、黑潮表层水和黑潮次表层水的温盐特征值分别为 27.1°C 和 33.82、28.9°C 和 33.89、15.8°C 和 34.45。Qi 等^[14]应用聚类分析方法对东中国海的水团进行分析,给出了不同季节的典型温盐值。

不同的分析方法导致对台湾暖流入侵范围的认识有所不同。翁学传等^[7]认为在夏季台湾暖流上层水可以到达 31°N,台湾暖流底层水可以到达 32°N。而 Su 等^[6]提出台湾暖流上层水在夏季可以到达 32°N,台湾暖流底层水可以到达 28°N,在冷半年,由于混合强烈,台湾暖流上层水和底层水性质比较均匀可以达到 28°N。以盐度为指示变量,白虹等^[44]发现台湾暖流以高盐核的形式出现在水下 15 m 以深,并能够到达 32°N。Zhou 等^[49]通过观测和数值模拟证实,2016 年夏天台湾暖流所携带的高盐水可以到达 32°N。除了基于温盐观测的研究,还有其他基于卫星遥感^[50],数值模拟^[10, 13, 51]的研究。Yuan 等^[50]应用通过分析海表面温度和水质色遥感资料,认为台湾暖流在冬季入侵到苏北沿岸;Yang 等^[10, 13]通过数值模拟提出夏季台湾东北黑潮分支入侵到闽浙沿海形成台湾暖流(图 1,黑潮底层分支)。

3 台湾暖流的入侵机制研究

为了深刻认识台湾暖流的入侵特征,学者们开展了台湾暖流入侵机制的研究^[49, 51-56]与台湾海峡流

的入侵机制研究。其中,黑潮在台湾东北的向岸入侵机制已成为研究热点^[52-53]。海底地形是被普遍认可的导致黑潮入侵形成台湾暖流的主要因素,Hsueh 等^[52]应用一个两层约化重力模型模拟了一支斜压流动撞上陡峭陆坡的情形,认为黑潮由于浮力驱动而跨越等深线入侵到东海陆架,这个理论很好的解释了黑潮如何入侵东海陆架形成台湾暖流,但是很难解释为何会形成台湾暖流的近岸以及离岸分支。Guo 等^[53]也通过数值模拟证实了地形斜压项(JEBAR 项)在台湾暖流跨陆架过程中起到的作用。此外,通过高分辨率数值模拟,Yang 等^[13]认为在台湾东北的宜兰海脊使流动产生涡管伸缩效应,引发黑潮对陆架的入侵。由于东海大陆架处于季风区,局地风场被认为是引起台湾暖流入侵的重要机制,Chao^[57]通过理想海洋模式模拟了黑潮在台湾东北的入侵,提出季风通过 Ekman 输送影响黑潮对东海陆架的季节性入侵形成台湾暖流。Yuan 等^[51]认为台湾暖流的近岸分支和离岸分支主要是冬季风旋度导致海表面高度调整引起的。此外,Wu^[54]提出非均一的潮混合可能是台湾暖流跨越等深线入侵的重要机制。Huang 等^[55]基于锚系 ADCP 观测研究了 27.5°N 以南台湾暖流的季节变化,季节外变化以及天气尺度变化,认为台湾暖流的变化主要受风场,海表面高度和海表面高度差影响。Wang 等^[56]应用漂流浮标数据证明台湾暖流向岸分支至少可以入侵到 30°N 附近的海区,并认为南北海表面高度差导致的地转效应是引起台湾暖流能够入侵的重要机制。Zhou 等^[49]通过数值模拟和观测研究认为台湾暖流的入侵范围受到台湾海峡流量和台湾东北黑潮分支流量控制。综上所述,前人的研究认为地形变化,斜压效应、风场、海表面高度差以及台湾海峡流量和台湾东北黑潮分支流量是影响台湾暖流入侵到东海陆架的主要因素。

4 需要进一步研究的科学问题

综上所述,前人对台湾暖流的特征、起源以及入侵机制进行了深入的研究,其研究目光多聚焦于台湾暖流上游,而对台湾暖流下游即台湾暖流向岸分支流轴和前锋的变化研究较少。近年来一些学者提出台湾暖流可以入侵到长江口外海域并就其来源和入侵机制开展了初步研究^[11, 21, 49, 56]。Zhu 等^[23]通过 ADCP 观测提出台湾暖流在冬季可以从底层入侵到长江口外。随后 Zhou 等^[49]通过观测和数值模拟发现

2006 年夏季台湾暖流携带的高盐水可以入侵到长江口外, 并提出这主要是由于跨陆坡以及通过台湾海峡的流量在当年显著升高导致的。Lian 等^[11]通过观测数据应用水团分析方法探讨了长江口外入侵的台湾暖流的来源, 认为台湾暖流向岸分支主要来自于黑潮次表层水。Wang 等^[56]应用漂流浮标数据证明台湾暖流水至少可以入侵到 30°N 附近。由于观测数据有限、研究方法存在差异等问题, 现有的研究认识到了台湾暖流向岸分支可以入侵到长江口海域, 但是对于台湾暖流向岸分支的范围以及路径的变化特征和变化机制缺乏系统的认识。

我们通过分析 2009—2015 年黄东海调查资料发现台湾暖流从底层入侵到长江口以北地区并存在季节变化和天气尺度变化。2014 年在台湾暖流向岸分支路径上布放的潜标(图 2)在底层观测到了向北的台湾暖流分支。2014 年夏季 ADCP 观测结果显示(图 3), 底层台湾暖流以北向流为主, 并且存在天气尺度的振荡。受台风影响(2014 年 7 月 10—13 日, 2014 年 8 月 7—10 日)底层流转向南。其中 DH3(图 3c, 122°50.684'E, 28°54.826'N)以北向流为主, 从 8 月初开始减弱, 这可能是由于台湾暖流入侵减弱, 也有可能是 8 月之后台湾暖流向岸分支的流轴发生了离岸方向的摆动, 导致该站位置偏离台湾暖流向岸分

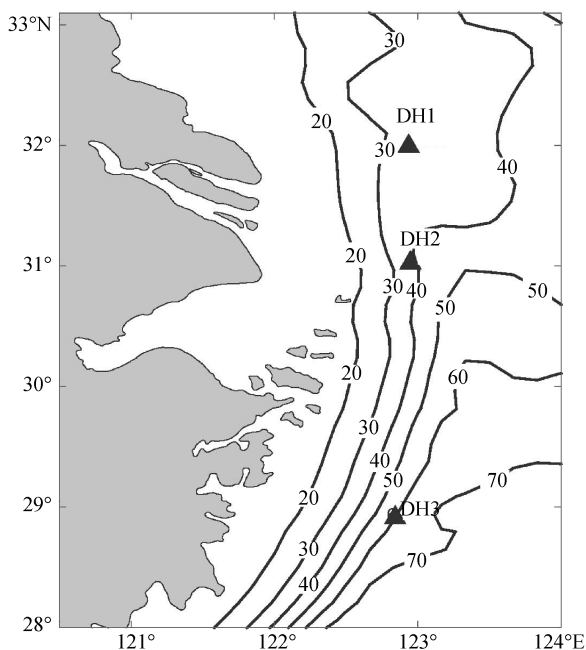


图 2 台湾暖流向岸分支水深(单位: m)变化及潜标站位分布
Fig. 2 Topography near the inshore branch of the Taiwan Warm Current

注: 黑色三角形: 潜标站位 DH1、DH2、DH3

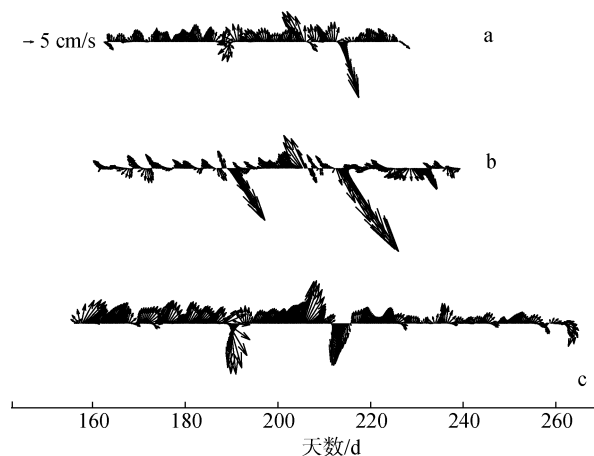


图 3 2014 年锚系潜标底层余流矢量时间变化
Fig. 3 Time series of bottom residual current and salinity in 2014

注: a: DH1 站; b: DH2 站; c: DH3 站; 箭头: 底层流矢量

支流轴, 所以观测到的北向余流减弱。DH2(图 3b, 122°56.882'E, 31°01.450'N)以北向流为主, 但是南向流出现的频率提高, 这可能是因为 DH2 站所处位置不是台湾暖流向岸分支的核心区域, 因而易受到其他流系影响。DH1(图 3a, 122°56.149'E, 31°59.803'N)虽然是最北的锚系站, 但是与 DH4 站位不同, 其流向以北向流为主, 这可能是因为 DH1 站位于台湾暖流向岸分支前锋的主轴上。潜标观测显示, 观测潜标站位底层流变化存在不同步的现象, 这可能是受到台湾暖流向岸分支流轴的摆动影响。

通过分析 2009—2015 年的黄海、东海大面调查资料, 我们初步发现台湾暖流向岸分支在不同季节的入侵路径和范围有所不同, 其流轴存在季节性摆动(图 4), 台湾暖流向岸分支存在如下特征: 1、台湾暖流向岸分支存在不同形态, 分为转向型(由南向北入侵, 在长江口外水下峡谷转向长江口, 如图 4a、图 4b、图 4d)和非转向型(由南向北不转向入侵, 如图 4c); 2、台湾暖流向岸分支跨越长江口外水下峡谷的位置也存在差异, 分为中心跨越(跨越点在峡谷中心)和东侧跨越(跨越点在峡谷东侧); 3、台湾暖流向岸分支前锋位置存在变化, 处于 31.5°N(图 4b、图 4d)—32.5°N(图 4a、图 4c)。前人的研究多基于个别航次的调查或者气候态平均结果, 不利于研究台湾暖流向岸分支流轴和前锋的变化, 因此, 对于这些变化特征缺乏详细研究。为解决这些问题, 在未来的研究中以观测数据为主, 结合数值模拟详细研究台湾暖流的前锋和主轴变化特征及变化机制。

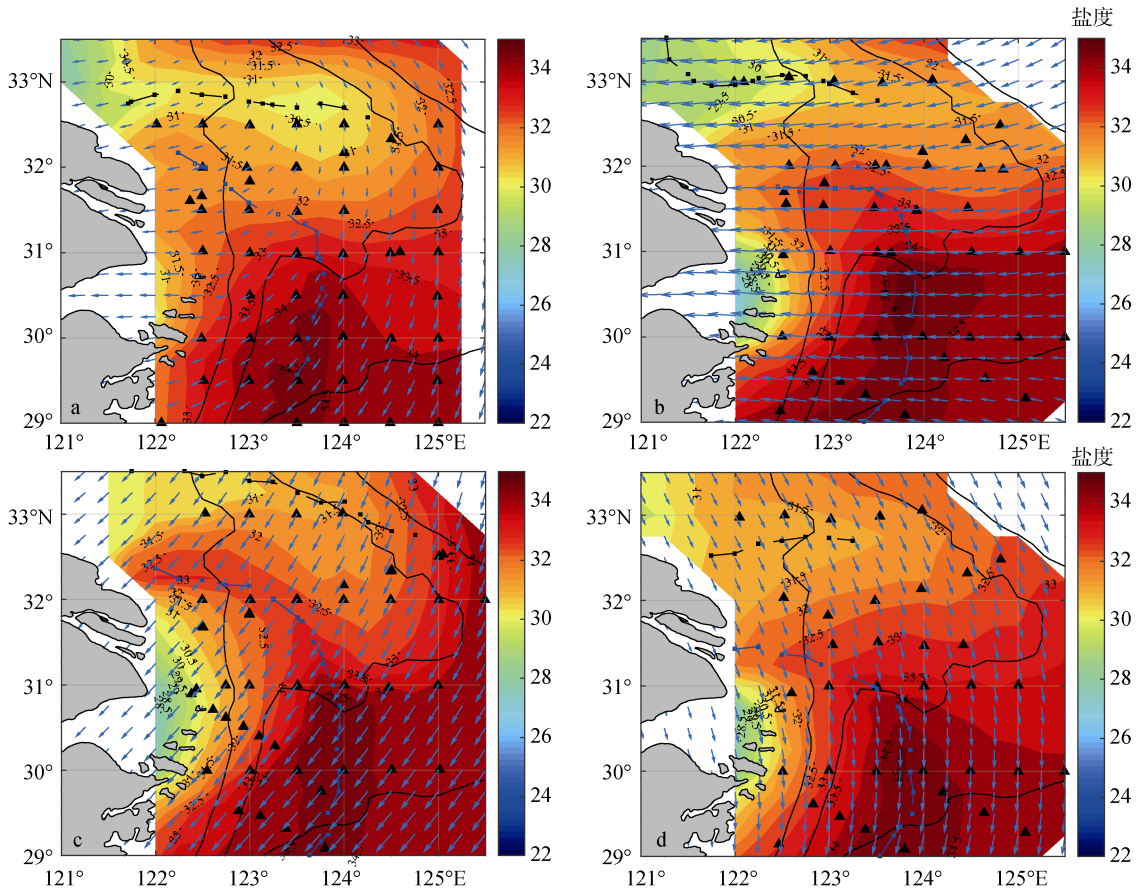


图4 台湾暖流向岸分支入侵底层盐度分布的季节变化

Fig. 4 The seasonal variation of intrusion path of TWCIB

注: a: 2009年5月; b: 2015年8月; c: 2011年10月; d: 2015年12月; 黑色三角: 观测站位; 蓝色点线: 台湾暖流向岸分支流轴; 黑色点线: 黄海沿岸流; 蓝色箭头: 月平均风矢量

参考文献:

- [1] 管秉贤, 陈上及. 中国近海的海流系统. 全国海洋综合调查报告第五册第六章[R]. 北京: 国家科委海洋组海洋综合调查办公室编, 1964.
Guan Bingxian, Chen Shangji. The current systems in the near-sea area of China Seas[R]. Technical Report, Beijing: Institute of Oceanology, 1964.
- [2] 管秉贤. 中国东南近海冬季逆风海流[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2002.
Guan Bingxian. Winter Counter-wind Current off the Southeastern China Coast[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2002.
- [3] Fang G, Zhao B, Zhu Y. Water volume transport through the Taiwan Strait and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters[J]. Elsevier oceanography series, 1991, 54: 345-358.
- [4] Guan B, Fang G. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: A review[J]. Journal of oceanography, 2006, 62(1): 1-24.
- [5] Chen C. Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas[J]. Journal of Marine Systems, 2009, 78(3): 394-410.
- [6] Su Y, Weng X. Water masses in China seas, in Oceanology of China Seas[M]. Netherlands: Kluwer Academic, 1994: 3-16.
- [7] 翁学传, 王从敏. 关于台湾暖流水的研究[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 1989, 19(1): 159-168.
Weng Xuechuan, Wang Congmin. A study on Taiwan Warm Current water[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1989, 19(1): 159-168.
- [8] Liu K, Tang T, Gong G, et al. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20: 493-523.
- [9] Ichikawa H, Beardsley R. The current system in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of oceanography, 2002, 58(1): 77-92.
- [10] Yang D, Yin B, Liu Z, et al. Numerical study of the

- ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2011, 116: C05015.
- [11] Lian E, Yang S, Wu H, et al. Kuroshio subsurface water feeds the wintertime Taiwan Warm Current on the inner East China Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(7): 4790-4803.
- [12] Kondo M. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea, 1: Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50m and near the bottom[J]. *Bulletin of the Seikai Regional Fisheries Research Laboratory*, 1985, 62: 19-55.
- [13] Yang D, Yin B, Liu Z, et al. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2012, 117: C02014.
- [14] Qi J, Yin B, Zhang Q, et al. Analysis of seasonal variation of water masses in East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32: 958-971.
- [15] Qi J, Yin B, Zhang Q, et al. Seasonal variation of the Taiwan Warm Current Water and its underlying mechanism[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(5): 1045-1060.
- [16] 赵瑞祥, 刘志亮. 台湾东北部黑潮表层水入侵东海陆架的季节变化规律[J]. *海洋科学*, 2015, 39(7): 118-123.
Zhao Ruixiang, Liu Zhiliang. The seasonal variability of the Kuroshio surface water intrusion onto the East China Sea continental shelf derived from Argos drifter data[J]. *Marine Science*, 2015, 39(7): 118-123.
- [17] 赵瑞祥, 刘志亮. 台湾东北部黑潮次表层水入侵的季节变化规律[J]. *海洋学报*, 2014, 36(1): 20-27.
Zhao Ruixiang, Liu Zhiliang. The seasonal variation of the Kuroshio subsurface intrusion northeast of TaiWan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*(in Chinese), 2014, 36(1): 20-27.
- [18] Qiao F, Yang Y, Lü X, et al. Coastal upwelling in the East China Sea in winter[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(C11): 2209-2223.
- [19] Wei H, He Y, Li Q, et al. Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 67(3): 292-303.
- [20] 杨德周. 东海陆架黑潮入侵及生态响应数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.
Yang Dezhou. Numerical study on the Kuroshio intrusion on the East China Sea shelf and its influence on the biological process [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2011.
- [21] Dai X, Lu D, Guan W, et al. The Correlation between *Prorocentrum donghaiense* Blooms and the Taiwan Warm Current in the East China Sea - Evidence for the “Pelagic Seed Bank” Hypothesis[J]. *Plos One*, 2013, 8(5): e64188.
- [22] 赵亮, 李夏, 张芳, 黄海水温与沙海蜃丰度年际变化的相关分析[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(3): 564-571.
Zhao Liang, Li Xia, Zhang Fang. On Relationship between inter-annual variation in water temperature regime and *Nemopilema Nomurai* abundance in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(3): 564-571.
- [23] Zhu J, Chen C, Ding P, et al. Does the Taiwan warm current exist in winter?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L12302.
- [24] Su J, Pan Y. On the shelf circulation north of Taiwan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 6(Supplement 1): 1-20.
- [25] Liang X, Su J. A two-layer model for the summer circulation in the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 13(3): 325-344.
- [26] Zhu J, Qi D, Xiao C. Simulated circulations off the Changjiang (Yangtze) River mouth in spring and autumn[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 286-291.
- [27] Guan, B. Major Features of the Shallow Water Hydrography in the East China Sea and Huanghai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 1984, 39(4): 1-13.
- [28] Uda M. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932[J]. *Imp Fish Exp Sta*, 1934, 5: 57-190 (in Japanese).
- [29] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1964, 6(1): 1-22.
Mao Hanli, Ren Yunwu, Wan Guoming. A Preliminary Investigation on the application of using T-S Diagrams for a quantitative analysis of the water mass in the shallow water area[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(1): 1-22.
- [30] Hur H, Jacobs G, Teague W. Monthly Variations of Water Masses in the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(2): 171-184.
- [31] Li G, Han X, Yue S, et al. Monthly variations of water masses in the East China Seas[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(16): 1954-1970.
- [32] Guan B, Mao H. A note on circulation of the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1982, 1(1): 5-16.

- [33] Guo X, Hukuda H, Miyazawa Y, et al. A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio-Roles of horizontal resolution on JEBAR[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(1): 146-169.
- [34] Beardsley R, Limeburner R, Yu H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 57-76.
- [35] 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.
- [36] Naimie C, Blain C, Lynch D. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea—a model-generated climatology[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21: 667-695.
- [37] Chen C, Beardsley R, Limeburner R, et al. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Seas and adjacent Kuroshio during 1986[J]. *Continental Shelf Research*, 1994, 14(7): 909-929.
- [38] 林葵, 汤毓祥, 郭炳火. 黄海、东海表、上层实测流分析[J]. *海洋学报*, 2002, 24(2): 9-19.
Lin Kui, Tang Yuxiang, Guo Binghuo. An analysis on observational surface and upper layer current in the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 2002, 24(2): 9-19.
- [39] Zhu J, Hu D, Xiao C. Observed residual currents off the Changjiang (Yangtze) River mouth in wintertime of 1959 and 1982[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 244-249.
- [40] Chern C, Wang J. On the Kuroshio branch current north of Taiwan[J]. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1990, 25: 55-64.
- [41] Chern C, Wang J. On the water masses at northern offshore area of Taiwan[J]. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1989, 22: 14-32.
- [42] Liang W, Tang T, Yang Y, et al. Upper-ocean currents around Taiwan[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(6): 1085-1105.
- [43] 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.
- [44] 白虹, 王凡. 台湾暖流水和长江冲淡水在 32°N 断面和 PN 断面上的分布及其变化[J]. *海洋科学集刊*, 2010, 50: 11-22.
Bai H, Wang F. Distributions and variations of the Taiwan Warm Current water and Changjiang diluted water along 32°N and PN sections[J]. *Studia Marina Sinica*, 2010, 50: 11-22.
- [45] Guan B. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas, in *Oceanology of China Seas*[M]. Netherlands: Kluwer Academic, 1994, 17: 26.
- [46] 翁学传, 王从敏. 台湾暖流水的研究[J]. *海洋科学*, 1985, 9(1): 7-10.
Weng Xuechuan, Wang Congmin. A Study on Taiwan Warm Current Water[J]. *Marine Sciences*, 1985, 9(1): 7-10.
- [47] 杨红, 章守宇, 戴小杰, 等. 夏季东海水团变动特征及对鲈鲶渔场的影响[J]. *水产学报*, 2001, 25(3): 209-214.
Yang Hong, Zhang Shouyu, Dai Xiaojie, et al. Characters of water masses and its influence on mackerel scad fishery in the East China Sea in the summer[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, 25(3): 209-214.
- [48] Zhang J, Liu S, Ren J, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 74(4): 449-478.
- [49] Zhou F, Xue H, Huang D, et al. Cross-shelf exchange in the shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(3): 1545-1572.
- [50] Yuan D, Zhu J, Li C. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1): 134-149.
- [51] Yuan D, Hsueh Y. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(19): 1745-1761.
- [52] Hsueh Y, Wang J, Chern C. The intrusion of the Kuroshio across the continental shelf northeast of Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(C9): 14323-14330.
- [53] Guo X, Miyazawa Y, Yamagata T. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: the origin of the Tsushima Warm Current[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(12): 2205-2231.
- [54] Wu H. Cross-shelf penetrating fronts: A response of buoyant coastal water to ambient pycnocline undulation[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(7): 5101-5119.
- [55] Huang D, Zeng D, Ni X, et al. Alongshore and cross-shore circulations and their response to winter monsoon in the western East China Sea[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2015, 124: 6-18.
- [56] Wang J, Oey Y. Seasonal Exchanges of the Kuroshio and Shelf Waters and Their Impacts on the Shelf Currents of the East China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(5): 1615-1632.
- [57] Chao S. Circulation of the East China Sea, a numerical study[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1990, 46(6): 273-295.

Progress in studies of the characteristics and mechanisms of variations in the Taiwan Warm Current

WANG Jian-feng^{1, 2, 3, 4}, SI Guang-cheng^{1, 2, 3, 4}, YU Fei^{1, 2, 3, 4, 5}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266003, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Oct. 19, 2018

Key words: Taiwan Warm Current; intrusion path; variation mechanisms

Abstract: Carrying warm and saline water, the Taiwan Warm Current (TWC) intrudes onto the continental shelf of the East China Sea (ECS), with its inshore branch arriving at the mouth of the Changjiang river. The TWC plays a significant role in the hydrographic structure and circulation of the ECS. Substantial study has been conducted regarding the TWC's source, hydrographic structure, and intrusion mechanisms. However, few studies focus on the path and front of the TWC because of the lack of observational data. As reported in recent studies, variations in the position of the north end and intrusion path of the TWC may influence the hypoxia and phytoplankton blooms occurring at the Changjiang river mouth. Therefore, study on the variations in the path and front of TWC has physical and ecological significance. In our analyses of observed hydrographic and current data, we obtained preliminary findings regarding the seasonal and synoptic variations in the path and front of the TWC. In particular, we found that the front may undergo a meridional shift such that the path makes a zonal swing. However, details regarding the characteristics and mechanisms of these variations are still unclear. Further investigation is needed to improve our understanding of variations in the TWC, which can also facilitate studies of the mechanisms of relevant ecological disasters.

(本文编辑: 李晓燕)