

基于Aqua/MODIS数据研究黄海暖流的强度及其时空变化

曹友华¹, 朱乾坤²

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 自然资源部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)

摘要: 基于Aqua卫星的中分辨率成像光谱仪获取2003—2019年的海表温度遥感数据, 利用各月的特征等温线表征黄海暖舌, 研究黄海暖流的强度和时空变化, 探讨黄海暖流的年际变化对ENSO事件的响应。结果表明: 月际变化中, 黄海暖流只出现在11月—翌年4月, 其余月份不存在, 1月黄海暖流的强度和势力最大, 影响最北可至38.83°N; 年际变化中, 区域A(34°~36°N, 123°~126°E)的平均温度和黄海暖流7℃等温线到达的最北位置密切相关, 相关系数 $r=0.836\ 2$ ($p<0.05$), 两者均可用于分析黄海暖流强度的年际变化, 线性关系 $N=0.759\ 6T+30.361\ 8$, 即区域A的平均海表温度可以很好地预测1—3月黄海暖流影响的最北位置; 黄海暖流的年际变化可能受ENSO事件的影响, 且受拉尼娜事件的影响更为明显。

关键词: MODIS; 海表温度; 黄海暖流; 强度; 时空变化

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)06-0093-10

1 引言

黄海是一个半封闭的浅海, 北起鸭绿江, 南迄长江口北, 西北部与渤海相通, 南部与东海相连^[1], 深度70~100 m, 平均深度44 m^[2-3], 渔业资源丰富, 在我国海洋捕捞业中占据重要地位^[4]。黄海海域的水系包括黄海沿岸水、长江冲淡水、朝鲜西岸沿岸水和黄海暖流水等^[5]。黄海暖流是影响冬季黄海的重要海流之一, 其特点是高温高盐和低溶解氧^[1], 对黄海海域的生态系统和渔业有重要影响^[6]。

国内外学者对黄海暖流进行了多方面的研究。1934年, Uda^[7]利用水文数据和漂流瓶轨迹最早提出和命名了黄海暖流, 他认为: 对马暖流是黑潮的分支, 而黄海暖流是对马暖流的分支。黄海暖流发源于济州岛附近, 沿西北方向进入黄海^[8-11], 其影响可达山东半岛甚至渤海^[2, 12-13]。Yu等^[12]利用声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers,

ADCP)和温盐深仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)的实测数据, 证实冬季黄海暖流的稳定存在。随着卫星遥感技术的发展, 遥感数据也应用于黄海暖流的研究。赵胜等^[13]利用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)卫星的高级甚高分辨率辐射计(Advanced Very-High-Resolution Radiometer, AVHRR)反演的海表温度数据对黄海暖流的路径及机制进行研究。

前人的研究大多以黄海暖舌作为黄海暖流的指标, 利用特征等温线研究黄海暖流的季节变化、路径和分布范围等, 但不同的研究用于表征黄海暖流的特征等温线不同。乐肯堂^[5]用10°~17℃表征冬季黄海暖流, 并指出表征冬季对马暖流的水温指标为18.6℃; 宋新^[14]利用冬季5℃等温线到达最高纬度的变化来分析黄海暖水的南北变动; 汤毓祥等^[9]用10℃特征等温线确定了黄海暖流的路径和范

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-02-05。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603004)。

作者简介: 曹友华(1994-), 男, 硕士, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: 610671903@qq.com

通讯作者: 朱乾坤(1974-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: zhuqiankun@sio.org.cn

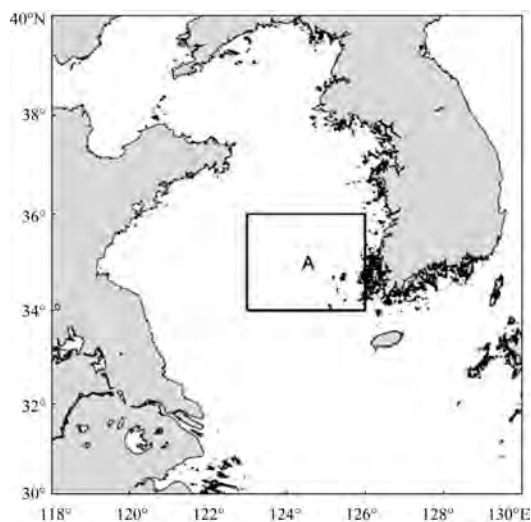


图1 研究区域

围,并指出冬季黄海暖流的温度范围为 $8.1^{\circ}\sim 11.6^{\circ}\text{C}$,初春黄海暖流的温度范围为 $8.2^{\circ}\sim 9.8^{\circ}\text{C}$;Guo等^[2]利用ASCAT散射计(Advanced SCATterometer)、快速散射计(Quick SCATterometer, QuikSCAT)和中分辨率成像光谱仪(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)遥感数据,把海表温度不低于 6.76°C 作为黄海暖流入侵渤海的判断条件之一;于华明等^[15]利用 7°C 等温线到达的最高纬度作为黄海暖流强弱的指标。总之,表征冬春季黄海暖流特征等温线的温度范围在 $5^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{C}$,而用于表征黄海暖流各月的特征等温线目前没有统一的标准。

黄海暖流的强度及其时空变化对黄海海域环境与渔业资源的时空分布有重要影响。前人对黄海暖流的季节变化研究较多,对其逐月变化和年变化的研究较少,而且近年来对黄海暖流的研究总体偏少。为此,本文基于MODIS传感器获取的长时间序列和较高时空分辨率的海表温度遥感数据,以黄海暖舌作为黄海暖流的指标,利用特征等温线研究黄海暖流时空上的月变化和年际变化,并探讨黄海暖流的年际变化与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño Southern Oscillation, ENSO)事件的响应,以求更新近年来对黄海暖流的认识和了解,为利用遥感数据动态监测黄海暖流的时空变化和黄海海域的海洋环境,以及利用遥感长期数据分析黄海暖流年际波动特征和影响年际波动的变化机制提供科学依据。

2 材料和方法

2.1 数据来源

2003年1月—2019年10月的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)遥感数据来自美国NOAA(网址:<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/files/>)。该数据由Aqua卫星上的MODIS传感器获取的热红外波段数据(第31—32波段,白天)反演而来,空间分辨率 4 km ,时间分辨率为月。2017年11月—2018年4月SST遥感数据的时间分辨率为 8 d 。

2003年1月—2019年10月的Nino3指数来自中国气象局国家气候中心(网址:https://cmdp.ncc-cma.net/pred/cnenso.php?product=cnenso_nino_indices),时间分辨率为月。

2.2 方法

2.2.1 黄海暖流的月际变化分析

为保证遥感数据的质量,先剔除海表温度值范围不在 $-2^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的异常值,并采用中值滤波消除数据噪音的影响^[16],然后将2003年1月—2018年12月相同月份的海表温度数据进行平均,以获取各月多年平均影像。根据前人的研究经验^[9,17],若等温线变成舌状,且由南向北凸现出来,即可判断黄海暖舌的存在,进而判断黄海暖流的存在。利用黄海暖舌各月的特征等温线到达最高纬度的变化来分析黄海暖流的南北变动,并用其表征黄海暖流各月的强度,以定量地分析黄海暖流的强度和位置分布变化。

2.2.2 黄海暖流的年际变化分析

(1)相较于其他月份,每年1—3月黄海暖流成熟且较为稳定,所以将1—3月黄海暖舌特征等温线到达最高纬度的平均值作为黄海暖流影响的最北位置,也以此作为黄海暖流的年强度,用来分析黄海暖流的年际变动。

(2)为了便于分析黄海暖流强度的年际变化,根据前人的经验^[10,13],将黄海暖流源区^[5,8]附近 $34^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $123^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 的区域定义为A区(见图1),将1—3月区域A平均海表温度的大小作为黄海暖流的年

强度强弱,分析黄海暖流强度的年际变化。

(3)探讨黄海暖流影响的最北位置与A区平均温度的关系。

(4)将每年1—3月Nino3指数的平均值作为当年ENSO事件的指数,探讨黄海暖流强度的年际变化与ENSO事件的关系。相关分析的显著性水平检验 p 为0.05。

3 结果分析

3.1 黄海暖流的月际变化分析

3.1.1 特征值提取

由各月多年平均海表温度的影像可以看出(见图2),11月在济州岛东南侧($32^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $124^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 附近),黄海暖流开始从对马暖流中衍生出来;随后,其强度和势力不断增强;翌年1月,黄海暖流的强度达到最大,势力最强,影响范围最大;翌年2—4月逐渐衰退。5月之后,等温线形状不再是由南向北凸现出来的舌状,且海表温度也不属于黄海暖流的范围之内,所以认定其余月份黄海暖流不存在(见图2,5—10月)。

由于黄海暖流只出现在11月—翌年4月(见图2),考虑到冬季海水的降温效果和春季太阳辐射导致海水增温效果的影响,并综合前人的研究经验^[2,5,9,18],本文分别将 7°C 、 12°C 、 19°C 作为1—3月、4月和12月及11月份黄海暖舌的特征等温线,以此定量地分析黄海暖流的强度和位置变化。

3.1.2 黄海暖流各月强度和南北位置变化

由图2和图3可以看出,11月 19°C 等温线出现在济州岛西北侧,等温线开始由南向北呈舌状分布,黄海暖流开始出现,此时黄海暖流的强度和向北影响范围最小, 19°C 等温线只能影响至 33.36°N 附近。随后,其强度和势力不断增强,影响范围不断向北延伸,12月,黄海暖流向西北方向延伸扩大, 12°C 等温线可影响至 36.42°N 左右。翌年1月,黄海暖流的强度达到最大,势力最强,影响范围最大;暖流呈现分叉形状,东南—西北向分支的 7°C 等温线向西北方向可延伸至 36.50°N 附近;南—北向分支的 7°C 等温线向北可延伸至 38.83°N 附近。翌年2月,黄海暖流的形状与1月相似,但强度和南北延

伸范围有所减小, 7°C 等温线沿东南—西北向退至 35.30°N 左右,另一支 7°C 等温线沿南—北向退至 37.20°N 左右。之后黄海暖流的强度和势力继续衰退,翌年3月,东南—西北向的 7°C 等温线仍停留在 35.30°N 左右,而南—北向的 7°C 等温线向南退至 36.90°N 附近。翌年4月黄海暖流的强度和势力继续衰退,从等温线的舌状分布中还能找到黄海暖流的存在,但其强度和位置范围明显缩小, 12°C 等温线向北可影响至 34.00°N 。

总之,黄海暖流存在的时间只有6个月,相较11月、12月和4月,黄海暖流在1—3月的强度和势力较大,其南北位置的变动和影响范围较大,但东西位置变动较小。

3.2 黄海暖流强度与时空变化的特点

时间分布上,黄海暖流开始于11月,一直持续至翌年4月后完全消失。空间分布、势力和强度方面,1—3月黄海暖流存在明显的分叉形状,1月黄海暖流的势力和强度最强,影响黄海的海域最大,西北方向的黄海暖流可延伸至 36°N 附近,南北方向的黄海暖流可影响至 38.83°N (见图2和图3)。

选取2009年11月—2010年4月的数据进行分析,将黄海暖流每月的最北位置与赵胜等^[13]的结果进行比较,两者总体变化趋势基本相同。黄海暖流在1月和3月向北延伸的位置相近,相关性分析中两者相关系数为0.8844,通过相关性检验($p<0.05$)(见图4),但在其余月份,两者的位置相差较大。

3.3 黄海暖流的年际变化分析

3.3.1 黄海暖流最北位置的年际变化

不同年份中,黄海暖流的强度和南北影响范围不同。2003—2019年,1—3月黄海暖流 7°C 等温线所到达最北位置的平均值在 $36.15^{\circ}\sim 38.53^{\circ}\text{N}$ 之间,波动范围为 2.38° ,其均值为 37.52°N 。2006年、2009—2014年和2018年,黄海暖流的向北延伸纬度小于平均值;2003—2005年、2007—2008年、2015—2017年和2019年,黄海暖流南北影响范围大于平均值。2007年黄海暖流的南北延伸范围最大,影响可达 38.53°N ,黄海暖流在该年的年强度最大;而2011年黄海暖流的南北延伸范围最小,只影响到 36.15°N (见图5a),黄海暖流在该年的年强度最小。

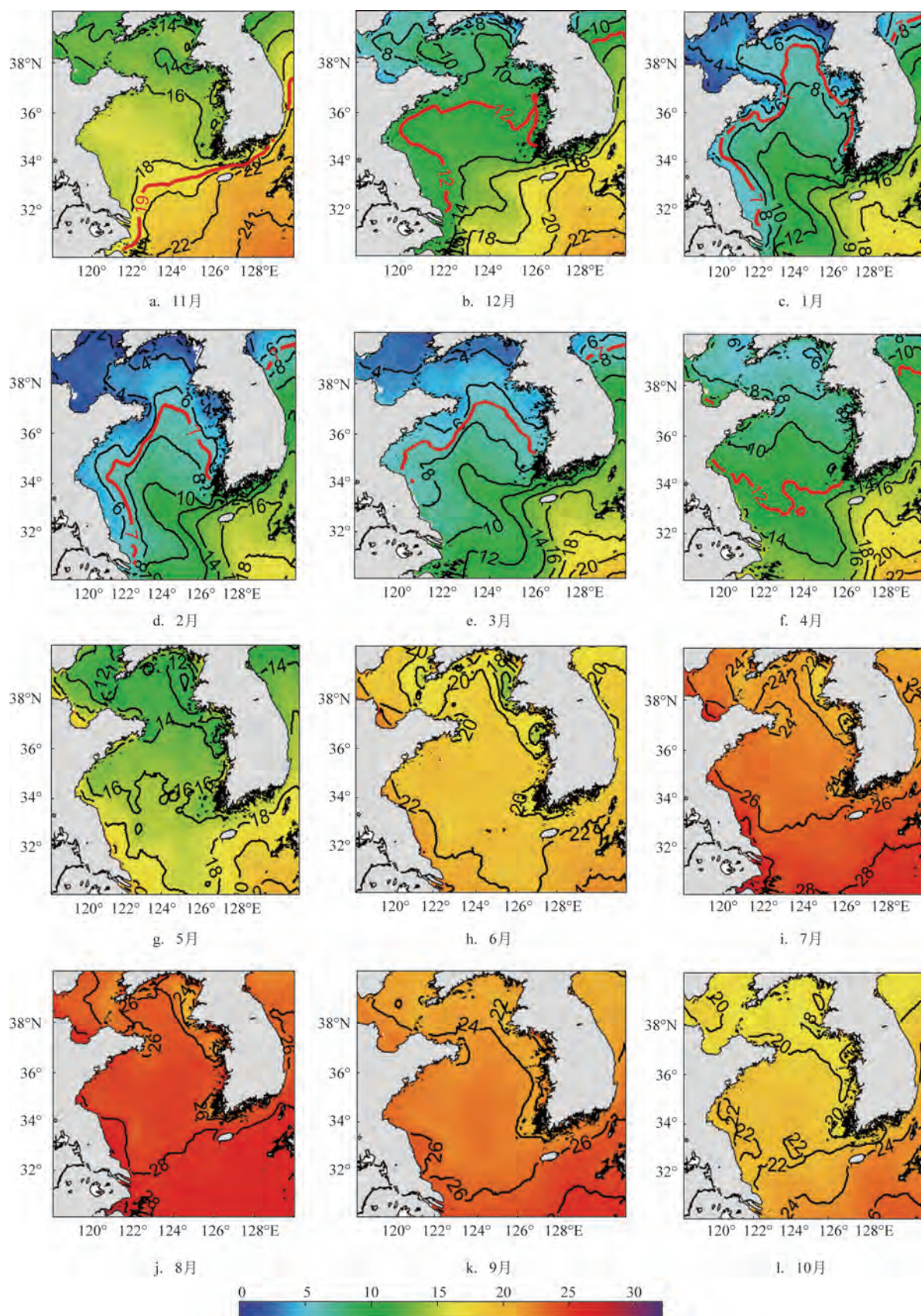


图2 2003—2019年各月多年平均的海表温度分布(单位:°C)

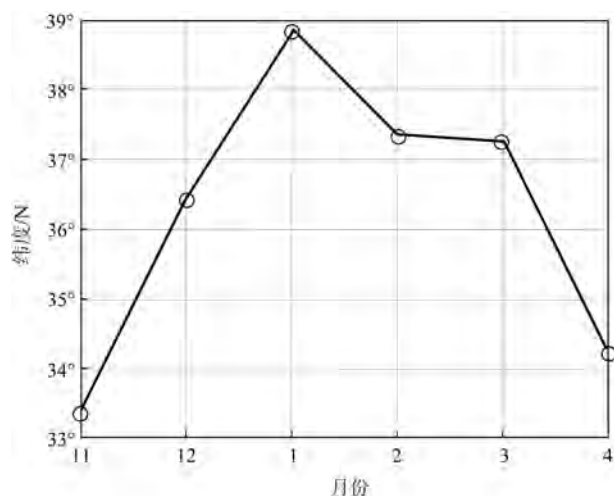


图3 黄海暖流各月特征等温线到达的最高纬度

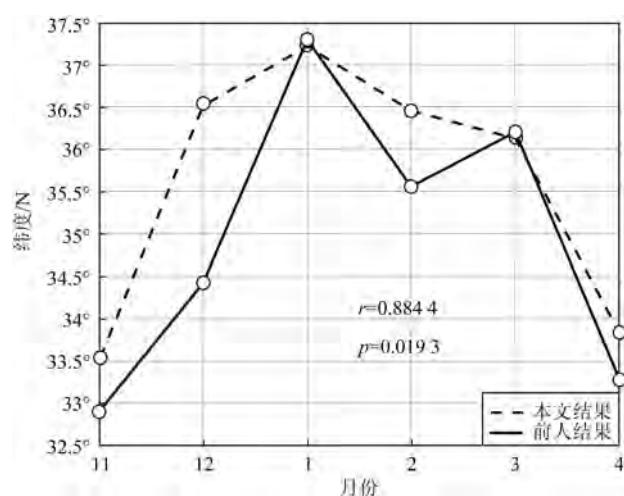


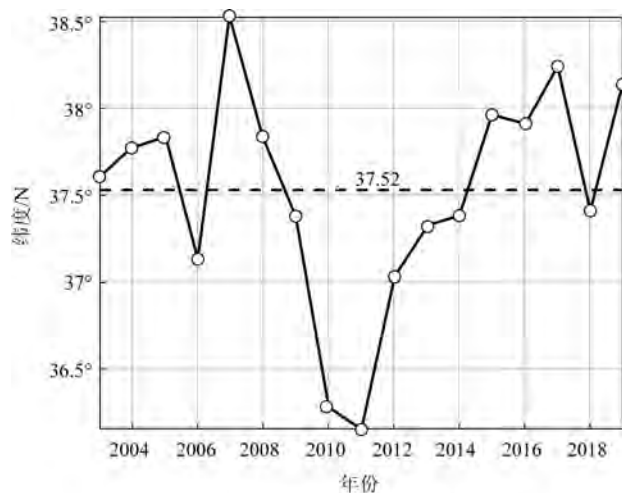
图4 2009年11月—2010年4月黄海暖流到达的最高纬度的比较

3.3.2 黄海暖流A区平均温度的变化

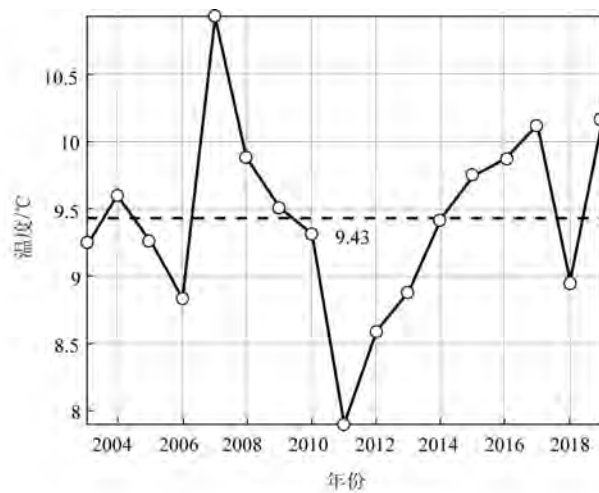
2003—2019年,区域A1—3月的平均温度范围在7.9~10.94℃,温度波动范围为3.04℃,其均值为9.43℃。2003年、2005—2006年、2010—2013年和2018年区域A的温度小于平均值;2004年、2007—2009年、2015—2017年和2019年区域A的温度大于平均值。2011年区域A的平均温度最小,为7.9℃,黄海暖流在该年的年强度最小;2007年区域A的温度最高,为10.94℃(见图5b),黄海暖流在该年的年强度最大。

3.3.3 黄海暖流强度的变化

A区平均温度与黄海暖流的最北位置均能反映黄海暖流的强度。若将2003—2019年区域A的温度和黄海暖流最北位置的年际变化标准化为0~1的数,发现两者的年际变化趋势基本同步,黄海暖流的年强度呈现先增加后减小再增加的反复波动变化趋势,经相关性分析,两者的相关系数为0.8362,并通过相关性检验($p < 0.05$)(见图6)。这两种方法都表明,黄海暖流强度的最小值出现在2011年,黄海暖流强度的最大值出现在2007年,其次是2017



a. 7℃等温线到达的最北位置



b. 区域A的海表温度

图5 黄海暖流强度的年际变化

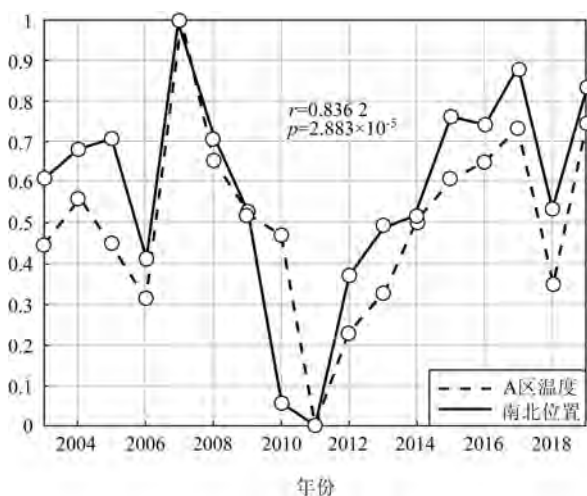


图6 两种表征黄海暖流强度年际变化方法的结果比较

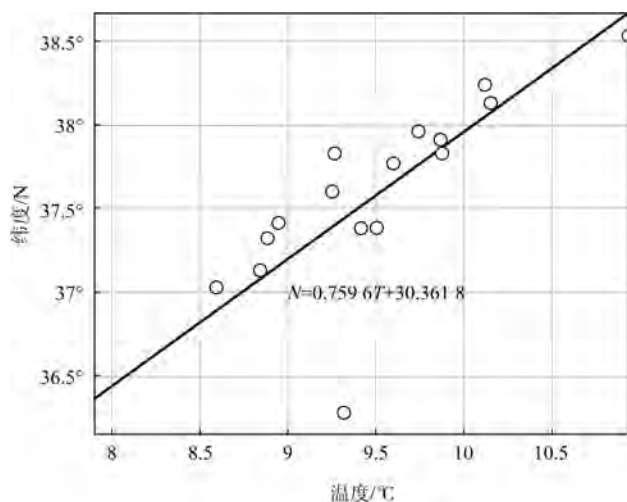


图7 黄海暖流的最北位置和区域A温度的线性关系

年和2019年。

由图7中的散点图可以看出,黄海暖流的最北位置和区域A温度的年际变化呈明显的线性关系,利用最小二乘法拟合得到两者的关系(见图7):

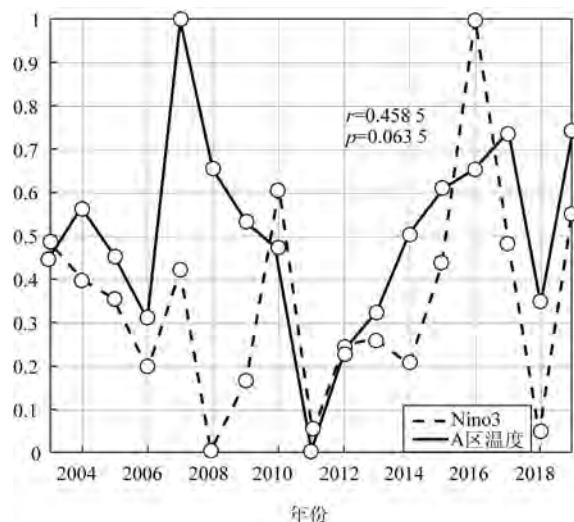
$$N = 0.7596T + 30.3618$$

式中, T 是区域A的平均温度; N 是黄海暖流最北位置的纬度。

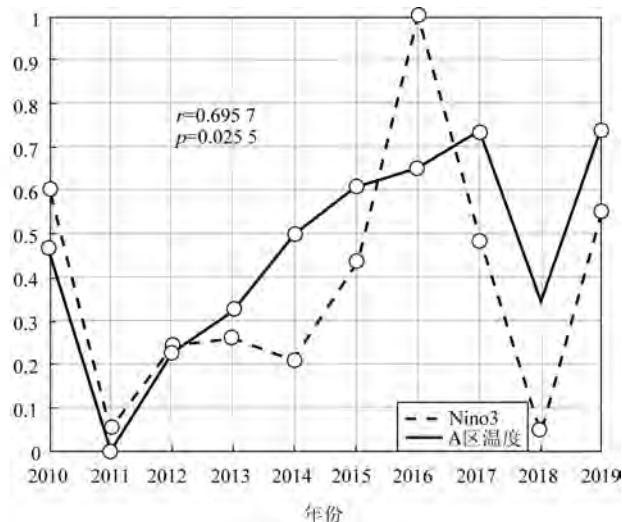
3.3.4 黄海暖流年际变化对ENSO的响应

除2004年、2009年、2010年、2014年和2017年这5 a外,黄海暖流的年际变化和Nino3指数基本呈

同增同减的趋势变化,其余年份两者的变化趋势不同。将区域A平均温度的变化作为黄海暖流强度的年际变化,并标准化为0~1的数,将其时间序列与Nino3指数做相关性分析,两者的相关系数为0.4585,相关性检验 p 值为0.0635(见图8a)。由于相关系数较低,黄海暖流的年际变化与ENSO事件的相关关系不明显。但2010—2019年这10 a间,黄海暖流的年际变化与ENSO事件的相关关系明显,两者的相关系数为0.6957,并通过相关性检验($p < 0.05$)(见图8b)。



a. 2003—2019年



b. 2010—2019年

图8 Nino3指数和区域A平均温度的年际变化

4 黄海暖流变化的机制分析

4.1 利用特征等温线表征黄海暖流的优缺点

前人对黄海暖流研究的结果表明,黄海暖流水是一种混合水^[5,9],包含东海陆架水、对马暖流水、东海混合水和朝鲜西岸沿岸水等。由于黄海暖流不是简单的单一水团,因此利用温度锋面很难将其与其他水团分开。遥感数据的海表温度具有高精度、高分辨率和高时效性优点,且冬季黄海暖流温度和盐度在垂直方向上混合均匀^[12,19]。利用海表温度遥感数据和特征等温线表征黄海暖流,在一定程度上可以反映黄海暖流的真实状态,使遥感数据海表温度可用于快速动态监测黄海暖流的强度与时空变化。

为进一步验证这一观点的可靠性,本文选取11 a中1月平均遥感数据,按照前人的方法计算其梯度和确定锋点^[8,20-21],将利用特征等温线表征黄海暖流的结果与利用温度锋面的表征结果进行比较分析。由图9可以看出,1月利用特征等温线表征的黄海暖流南北延伸可达38.1°N附近,而利用温度锋面的表征仅局限于33°~34°N,123°~126°E范围内,属于黄海暖流的源区^[5,8],前者更接近于前人的研究成果^[2,13]。

总之,利用特征等温线,可以简单明了地将黄

海暖流的区域圈画出来,避免了利用温度锋面表征黄海暖流而导致结果范围偏小的问题。目前的缺点在于,用于表征黄海暖舌各月的特征等温线没有统一的标准,只有冬春季的温度范围在5°~17℃。在此温度范围内,本文11月用19℃特征等温线作为对马暖流衍生成黄海暖流的临界温度^[5]、12月和4月用12℃特征等温线表征黄海暖舌、1—3月用7℃特征等温线表征黄海暖舌^[2]来研究黄海暖流。12月和4月用12℃特征等温线主要考虑到冬季海水的降温效果和春季太阳辐射导致海水增温的影响。这些特征等温线的选择具有一定的代表性,在一定程度可用于表征黄海暖流。

4.2 探讨黄海暖流强度与区域A海表温度的关系

目前,对于黄海暖流的强度并未有明确的定义。于华明等^[15]以特征等温线到达的最高纬度作为黄海暖流强度强弱的指标,而王辉武等^[17]以黄海暖流流经区域温度强弱作为黄海暖流的强度。区域A不仅靠近黄海暖流的发源地^[5,8],也是前人研究关注和实测调查黄海暖流的重要海域^[5,9,17],因此便于进行结果比较。本文认为特征等温线到达的最高纬度越北,黄海暖流的强度越强;区域A的平均温度越高,黄海暖流的强度越强。综合这两种方法,以相互验证并增加结果的合理性,但哪种方法能更好地反映黄海暖流强度的真实状态仍有待进一步探讨。

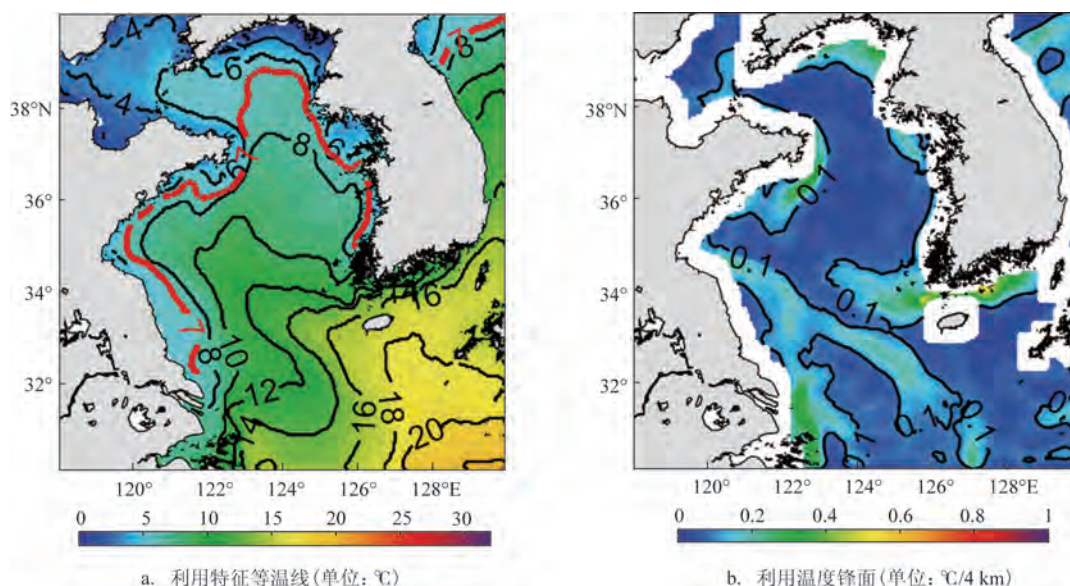


图9 1月黄海暖流两种表征方法的结果比较(注:图b中因为近岸陆地和岛屿的存在,造成计算梯度时缺少数据而出现露白)

黄海暖流的强度与特征等温线到达的最高纬度和区域A的温度密切相关。区域A的海表温度越大,特征等温线到达的最高纬度越北,即黄海暖流影响的位置越北,黄海暖流的强度越大;反之,如果区域A海表温度偏小,特征等温线到达的最高纬度偏南,即黄海暖流影响的位置偏南,则黄海暖流的强度偏小。为了进一步验证上述关系的正确性,选取2017年11月—2018年4月和2018年11月—2019年4月的月平均数据,2017年11月13日、2017年12月23日、2018年1月29日、2018年3月2日、2018年3月10日和2018年4月29日的时间分辨率为8 d的平均数据,其余时间受天气和云等因素影响,数据缺失较多,不予考虑。采用以上18个时间段的区域A温度,用本文得到的线性关系 $N = 0.759 6T + 30.361 8$ 去预测每月黄海暖流影响的最北位置,并与真实值对比。结果表明,在黄海暖流存在期间,4月、11月和12月黄海暖流影响最北位置的预测值与真实值误差较大,这可能是由于春季太阳辐射导致海水增温的影响和选择不同特征等温线导致的结

果。尽管如此,利用区域A的海表温度也可以很好地预测1—3月黄海暖流到达的最北位置,相对误差均小于 $\pm 2.2\%$ (见表1)。

4.3 黄海暖流时空变化的原因探讨

黄海暖流存在明显的季节变化。黄海暖流开始于秋季^[13],随后强度和势力逐渐增强,冬季达到全年最大^[22]。黄海暖流最北可入侵渤海海域^[2, 13],春季开始减弱,夏季完全消失^[17]。黄海暖流的时空变化除了与季节变化有关,还与年际变化有关。在年际变化方面,黄海暖流的强弱存在4~7 a的年际变化周期^[14],并与ENSO的影响有关^[12, 22-23]。由于本文遥感数据的时间跨度为2003—2019年(共17 a),时间跨度较短,看不出其年际变化周期,但黄海暖流的年强度确实呈现波动变化趋势。在最近17 a中,除了2004年、2009年、2010年、2014年和2017年,其余12 a黄海暖流的年强度变化与Nino3指数的值呈相同的变化趋势;在2010—2019年这10 a间,黄海暖流的年际变化与ENSO事件的相关关系较为明显,

表1 2017年11月—2018年4月各时间段黄海暖流最北位置预测值与真实值的比较

日期	温度/℃	真实值/°N	预测值/°N	误差/°N	相对误差/%
2017年11月	17.54	33.69	43.68	10.00	29.67
2017年11月13日	18.39	33.69	44.33	10.64	31.58
2017年12月	13.87	35.85	40.90	5.05	14.08
2017年12月23日	12.31	36.46	39.71	3.25	8.92
2018年1月	10.00	38.80	37.96	-0.84	-2.17
2018年1月29日	9.12	37.22	37.29	0.07	0.19
2018年2月	8.11	36.15	36.52	0.37	1.03
2018年3月	8.74	37.27	37.00	-0.27	-0.72
2018年3月2日	8.71	36.92	36.98	0.06	0.16
2018年3月10日	8.85	37.54	37.08	-0.46	-1.21
2018年4月	12.45	34.40	39.82	5.42	15.75
2018年4月29日	13.04	36.15	40.27	4.12	11.39
2018年11月	17.81	33.50	43.89	10.39	31.02
2018年12月	14.32	36.97	41.24	4.27	11.55
2019年1月	11.04	39.20	38.75	-0.45	-1.15
2019年2月	9.47	37.40	37.56	0.16	0.42
2019年3月	9.95	38.02	37.92	-0.10	0.26
2019年4月	13.66	35.40	40.74	5.34	15.08

两者的相关系数为0.695 7,并通过相关性检验($p < 0.05$)。另外,2006年、2011年和2018年为拉尼娜年^[24-26],黄海暖流的年强度和Nino3指数都较低,而在厄尔尼诺年期间,两者的关系并不明显。因此,黄海暖流的年际变化可能受ENSO事件的影响,且受拉尼娜事件的影响更为明显。

黄海暖流的年际变化除了与ENSO事件有关外,还与当年冬季风场^[9, 17, 19]、太平洋年代际振荡^[15](Pacific Decadal Oscillation, PDO)和黑潮^[23]等有关。利用卫星遥感数据长期监测研究黄海暖流的强度与时空变化是一种有效的手段。

5 结论

本文基于Aqua卫星的MODIS传感器获取的2003—2019年遥感海表温度数据,利用各月的特征等温线表征黄海暖舌,以此研究黄海暖流的强度和时空变化,探讨了黄海暖流的年际变化与ENSO事件的响应。结果表明,在月际变化方面,黄海暖流只出现在11月—翌年4月,其余月份不存在,黄海暖流的最北位置和区域A海表温度关系密切,利用区域A的海表温度可以很好地预测1—3月黄海暖流到达的最北位置,相对误差小于 $\pm 2.2\%$ 。

在黄海暖流强度的年际变化方面,本文认为区域A的平均温度和利用特征等温线表征黄海暖流到达的最北位置均可用于分析黄海暖流强度的年际变化。由于遥感数据时间跨度的限制,看不出其具体年际变化周期,但是黄海暖流的年强度确实呈现波动变化趋势。另外,ENSO事件可能是影响黄海暖流年际变化的重要原因之一,因为在2003—2019年这17 a的时间跨度中,有12 a黄海暖流的年际变化与Nino3指数的值呈相同的变化趋势,尤其是2010—2019年这10 a间,黄海暖流的年际变化与ENSO事件的相关关系明显,且受拉尼娜事件的影响更为明显。未来,随着遥感数据时间跨度的增长,利用遥感数据进一步探讨黄海暖流的年际变化、周期性变化及其对ENSO和PDO等事件的响应仍有待进一步研究。

致谢:感谢自然资源部第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室的卫星地面工作站、卫星数据处理与分享中心以及海洋卫星数据在线分享平台(SatCO2)在数据收

集和处理上提供的帮助!

参考文献:

- [1] 杨纪明. 黄海西部渔业资源状况[J]. 海洋科学, 1988(4): 70-71.
- [2] Guo J, Zhang H, Cui T W, et al. Remote sensing observations of the winter Yellow Sea warm current invasion into the Bohai Sea, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016, 2016: 8170296.
- [3] Sun J C, Yang D Z, Yin B S, et al. Onshore warm tongue and offshore cold tongue in the western Yellow Sea in winter: the evidence[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(5): 1475-1483.
- [4] 化成君, 张衡, 张胜茂. 东黄海表层水温与叶绿素分布分析及其与围网船位分布关系研究[J]. 渔业信息与战略, 2015, 30(2): 128-136.
- [5] 乐肯堂. 冬季黄海暖流水的起源[J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 9-19.
- [6] 陈聚法, 马绍赛, 王文兰. 秋冬季黄东海区影响鲈鱼行动分布的三大水系变化特征[J]. 海洋水产研究, 1997, 18(1): 54-59.
- [7] Uda M. Results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters during October and November 1933[J]. *Journal of the Imperial Fisheries Experimental Stations*, 1934, 7(5): 91-151.
- [8] 刘传玉, 王凡. 黄海暖流源区海表面温度锋面的结构及季节内演变[J]. 海洋科学, 2009, 33(7): 87-93.
- [9] 汤毓祥, 邹娥, Lie H J. 冬至初春黄海暖流的路径和起源[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 1-12.
- [10] 胡放, 于非, 王建丰, 等. 黄海暖流源区附近温盐结构及其季节变化[J]. 海洋科学, 2016, 40(7): 160-169.
- [11] 蓝淑芳. 黄海暖流水的调查研究[J]. 海洋科学, 1993(1): 38-40.
- [12] Yu F, Zhang Z X, Diao X Y, et al. Observational evidence of the Yellow Sea warm current[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(3): 677-683.
- [13] 赵胜, 于非, 刁新源, 等. 黄海暖流的路径及机制研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(11): 73-80.
- [14] 宋新. 渤海盐度年际变化与黄海暖流、黄海冷水团年际变化的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [15] 于华明, 李冀, 于海庆, 等. 黄海暖流区 SST 年际变化分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(5): 34-41.
- [16] 刘丽梅, 孙玉荣, 李莉. 中值滤波技术发展研究[J]. 云南师范大学学报, 2004, 24(1): 23-27.
- [17] 王辉武, 于非, 吕连港, 等. 冬季黄海暖流区的空间变化和年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 140-148.
- [18] 李晓, 赵宪勇, 张涛, 等. 黄海鳀鱼越冬洄游分布及其与物理环境的关系[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(2): 104-112.
- [19] 沈建华, 周甦芳, 董玉来, 等. 2003年度东海暖流的分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(4): 14-19.
- [20] 刘鹏, 张永刚, 刘建斌. 阿拉伯上升流温度锋面时空分布特征分析[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(3): 13-17.
- [21] 郑义芳, 丁良模, 谭铎. 黄海南部及东海海洋锋的特征[J]. 黄渤

- 海海洋, 1985, 3(1): 9-17.
- [22] 王辉武. 黄海暖流季节和年际变化研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
- [23] Song D H, Bao X W, Wang X H, et al. The inter-annual variability of the Yellow Sea Warm Current surface axis and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(3): 607-613.
- [24] 宿春鹏, 赵鸿彬, 邱春洪. 利用卫星测高数据研究 ENSO 现象[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(5): 160-162, 166, 170.
- [25] Yuan Y, Yan H M. Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(3): 406-415.
- [26] 赵剑波, 尚继涛. 1970—2018 年拉萨市气温与 ENSO 事件的关联性分析[J]. 高原科学研究, 2019, 3(1): 27-34.

Study on the intensity and temporal and spatial variation of Yellow Sea Warm Current based on Aqua/MODIS data

CAO You-hua¹, ZHU Qian-kun²

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306 China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, the Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012 China)

Abstract: Based on the remote sensing data of Sea Surface Temperature (SST) from 2003 to 2019 obtained by the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) of Aqua satellite, this paper analyzes the intensity and temporal and spatial variations of the Yellow Sea Warm Current (YSWC) and discusses the response of its annual variation to ENSO events using monthly characteristic isotherms to indicate the warm tongue of the Yellow Sea. The results show that the YSWC only appears between November and April of the following year with the maximum intensity in January and the influence reaching as far as 38.83°N. In terms of interannual variation, the average SST of area A (34°~36°N, 123°~126°E) is closely related to the northernmost position of 7 °C isotherm of the YWSC with a correlation coefficient of 0.836 2 ($P < 0.05$), which can be used to analyze of interannual intensity variability of the YSWC. The northernmost position affected by Yellow Sea Warm Current from January to March can be well predicted by using the linear relationship $N = 0.759 6T + 30.361 8$ and the average SST of region A. The interannual variation of the YSWC might be influenced by ENSO events and is more significantly affected by La Nina events.

Key words: MODIS; SST; Yellow Sea Warm Current; intensity; temporal and spatial variation