

黄海暖流区 SST 年际变化分析

于华明^{1,2,3}, 李冀¹, 于海庆⁴, 李松霖¹

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572024; 3. 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266003; 4. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003)

摘 要: 基于 2003—2019 年黄渤海冬季(1月)微波遥感 SST, 分析其年际变化特征和黄海暖流对 SST 年际变化的影响, 进一步分析黄海暖流流轴摆动与强弱的年际变化。分析结果表明: 冬季黄海暖流区 SST 整体处于上升趋势(0.07 °C/a), 黄海暖流对黄海中部 SST 具有一定的稳定作用; 该区域 SST 年际变化是在北太平洋年际震荡背景下, 主要受黄海暖流、大陆气候和地表径流等近岸过程影响, 黄海暖流流轴年际变化与 ENSO 显著相关, 受纬向风作用明显, 而黄海暖流强弱年际变化与经向风关系显著。

关键词: 黄海暖流; 年际变化; 流轴; SST; 风速

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0034-08

1 引言

黄海和渤海(如图 1 中虚线框所示)具有独特的自然气候环境和复杂的海洋动力学特征, 拥有丰富的渔业、港口、石油、旅游等海洋产业和资源。海洋环境的变化通过对海上运输、海水养殖、海岸工程和海滨旅游等多方面作用而影响社会经济发展^[1]。冬季高温高盐的黄海暖流作为黄渤海唯一的规模化外海环流水源, 其消长对黄渤海海水交换变化乃至海洋生态环境与资源的整体变化产生一定的影响。因此, 阐明黄海暖流的路径、强弱及其年际变化规律具有十分重要的现实意义。但是黄海暖流整体上的观测存在一定的困难。

对黄海暖流的研究历史悠久。在实测数据缺乏且观测方式单一的黄海暖流研究早期, 黄海暖流是对马暖流的一个分支这一结论被广大学者认同^[2-4]。随着观测技术提高和数值模拟的广泛应用, 海洋学家们开始对黄海暖流理论产生质疑。Beardsley 等^[5]认为黄海暖流是台湾暖流到达济州岛西南海域后产生的分支, 而国内学者多认为黄海暖

流是由对马暖流与陆架水混合而成, 不是直接由对马暖流产生^[6-8]。王辉^[9]基于数值模拟认为黄海暖流上层来源于对马暖流, 下层是东海混合水。邓健等^[10]指出对马暖流是黄海暖流的主要来源, 但在流动过程中混合了黑潮分流与台湾暖流, 经由黄海上, 指向渤海海峡。现在学界普遍认为黄海暖流并非直接来源于对马暖流, 而是由对马暖流、台湾暖流和黄海当地水团混合产生^[11]。

关于黄海暖流路径, 起初的观点认为黄海暖流流向常年稳定且严格沿黄海槽北上^[2,12]。连展^[8]分析了模式数据后认为黄海暖流流轴处于黄海海槽西侧偏北上, 大约位于 123°E 附近。许一等^[13]认为流轴位于黄海槽 60~70 m 等深线, 部分学者认为其流轴位于黄海槽西侧 50~60 m 等深线处^[14-15]。乐肯堂等^[16]基于 1986 年中美韩联合调查结果, 认为黄海暖流并非只存在单一流轴, 而是存在分支。鲍献文等^[17]认为黄海暖流存在分成左右两支的情况。现在学界普遍认为黄海暖流流轴并非严格与黄海槽重合, 其流轴位于黄海槽西侧偏北; 且有可能存在分支, 流轴位置和到达的范围受到多种因素影响, 并

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-05-22。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401800、2016YFC1401400、2018YFB1502800、2016YFC1402000); 国家自然科学基金(41930534)。

作者简介: 于华明(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事近海动力学研究。E-mail: hmyu@ouc.edu.cn

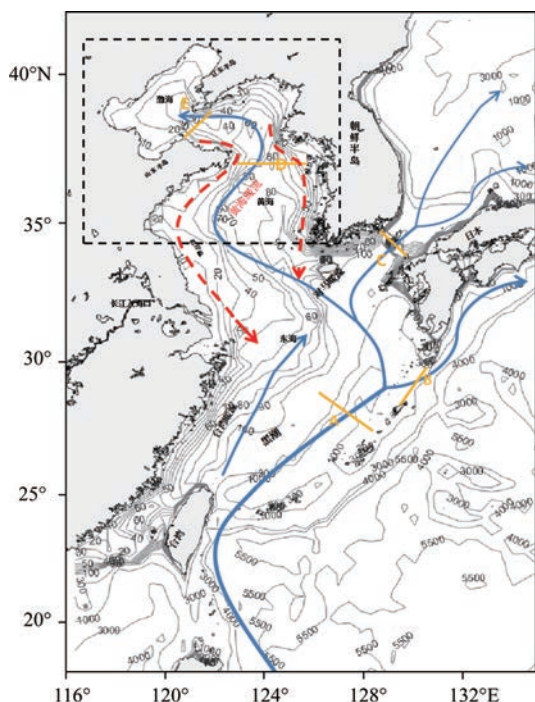


图1 黄海冬季流系简图

(虚线框为研究范围,黄色线为选定的断面,其中A为PN断面,B为TK断面,C为对马海峡断面,D为37°N断面,E为渤海断面)

非一成不变。

对于黄海暖流形成机制仍存在不少争议,主流的观点有:黄海暖流是受局地风作用形成的间歇补偿流^[18]、准地转流^[13]和射形流^[3-4]等。目前影响黄海暖流的主要因素有局地风、海水堆积引起的压强梯度力、垂向摩擦力和柯氏力^[11]。关于黄海暖流的季节变化研究则较多,如苏育嵩^[4]指出黄海暖流随季节变化明显。Park^[19]认为黄海暖流夏季最弱,冬季达到最强。基于卫星红外遥感以及中韩合作调查资料,郭炳火等^[20]指出黄海暖流只在冬季发生。汤毓祥等^[14]根据温盐深仪观测结果,认为黄海暖流只存在于12月一次年4月。许一等^[13]采用ECOMSED模式,发现黄海暖流为季节性流动并于12月形成,次年2月黄海暖流最强,之后快速减弱。王辉武^[21]利用潜标数据,发现黄海暖流在秋季出现、冬季发展成io熟、春季减弱、夏季消亡。

由于现场观测困难,数值模拟误差较大,目前对于黄海暖流的分析仍存争议。冬季海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)可有效整体反映黄海暖流流态,利用卫星遥感SST对黄海暖流进行分

析具有合理性和优势^[22],尤其是微波遥感SST。

本文采用遥感系统(REMote Sensing Systems, REMSS)提供的10 km分辨率的微波遥感SST,对黄海暖流区SST年际变化特征进行研究,并分析黄海暖流与SST年际变化的联系;在此基础上,结合风场数据对黄海暖流的基本路径、流轴摆动与强度的年际变化进行研究。研究结果可为后续黄海暖流的相关研究提供更加坚实可靠的基础。

2 数据与方法

2.1 数据简介

卫星遥感SST主要可以通过红外辐射计和微波辐射计两种方法获得。红外辐射计观测的SST分辨率可达4 km,而微波辐射计SST分辨率仅为25 km。由于云阻断红外观测,导致有云的海域红外辐射计SST缺失。而微波辐射计可穿透云层测量SST,极大地改善了SST测量范围。红外辐射计和微波辐射计所提供的SST数据集各有优缺点。

由于红外辐射计测量SST历史较长,前人多用其对黄海暖流进行分析^[23-24]。但是红外辐射计测量的SST仅为海气交界面20 μm 厚的“皮温”,而对黄海暖流温度的有效观测至少在水深20 cm以下,因此红外辐射计测量的SST不能精准的反映黄海暖流(见图2a)。微波遥感SST则能很好地反演海表0~10 m内的温度(网址:http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/sst_definitions/)。通过对比研究区域内红外辐射计AVHRR SST(见图2a)与微波辐射计REMSS SST 2003年1月—2019年1月气候态分布(见图2b),可以直观看出REMSS SST较好的反演了黄海暖流流态特征,而AVHRR SST由于受云的干扰及其仅测皮温(受冬季海面热力过程对皮温影响大)的影响,代表黄海暖流流态效果欠佳。

基于上述分析,本文采用REMSS SST数据集用于分析。该数据同时结合了红外辐射计和系泊浮标等测量数据生成的平均最优插值(Optimal Interpolation, OI)10 km \times 10 km SST四级产品。

本文采用REMSS的CCMP风场,空间分辨率为0.25° \times 0.25°。产品在处理中使用了变异分析法,结合了Version-7 RSS辐射计风速数据、QuikSCAT和ASCAT散射计风向矢量数据、系泊浮标风速数据

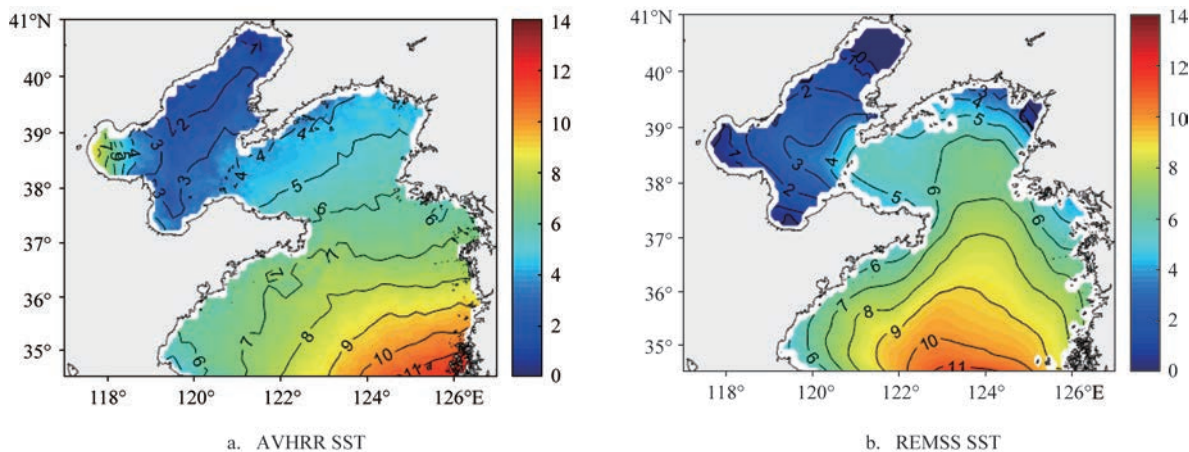


图2 黄渤海 SST 气候态分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

以及 ERA-Interim 模型风场。CCMP 的风速、风向数据作为众多卫星遥感风场资料中的理想数据集被学者们广泛应用于相关科学研究^[25]。如詹思琦等^[26]基于 CCMP 资料对西北太平洋海面风场特征进行分析,认为西北太平洋海面风场具有明显的季、月变化特征。

2.2 方法介绍

2.2.1 EOF

经验正交函数分解(EOF)可以将随时间变化的变量场分解成不随时间变化的空间函数和不随空间变化的时间函数达到降维的目的,用于分析场的主要影响因子及其变化的主要周期。本文对黄渤海($34.5^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\sim 127^{\circ}\text{E}$) 2003—2019 年 1 月 SST 距平场进行 EOF,对其空间模态进行分析并将其时间序列与太平洋年代际震荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)进行相关性分析,分析黄渤海 SST 年际变化特征,探究黄海暖流对该区域 SST 年际变化的影响。

2.2.2 黄海暖流主轴判定方法

黄海暖舌在一定程度上可以表示黄海暖流。从黄渤海冬季 SST 气候态分布可以看出(见图 2b),在 $35^{\circ}\sim 35.5^{\circ}\text{N}$ 黄海暖舌西北向停止,继而北伸经由南黄海进入北黄海。该范围内黄海暖舌主轴东西向摆动的研究对于分析黄海暖流年际变化规律具有一定的指示意义。据此,将该区域内 SST 气候态分布在 35°N 上以及最东经度 122.9°E 作为黄海暖流主轴定常位置,考虑多年主轴相对于定常位置的

东西向摆动来研究其变化规律及其影响因子^[23]。

2.2.3 黄海暖流强度判定方法

目前对于黄海暖流的强度并未有明确的定义,本文根据研究区域内 1 月 SST 的气候态分布(见图 2b),发现 7°C 等温线贯穿整个南黄海且其暖舌位置位于黄海暖流主轴上。因此,本文将 7°C 等温线在气候态分布中抵达的最高纬度 38.06°N 作为参考指标,根据每年 7°C 等温线到达的最高纬度作为该年黄海暖流强弱的指标。

3 黄海暖流区 SST 年际变化特征分析

3.1 黄海暖流区 SST 年际变化趋势

对研究区域 2003—2019 年 1 月 SST 求空间平均,结果如图 3 黄色实线所示。图中可以看出 2011 年出现最低值,约为 4.1°C ; 2017 年出现最高值,约为 6.4°C ; 近 20 a 来黄海暖流区 1 月 SST 整体呈上升趋势,整体变率约为 0.07°C/a 。将黄渤海 SST 年际变化时间序列与黄海暖流各截面 SST 年际变化时间序列进行对比分析,断面位置见图 1。其中断面 A、B 和 C 分别表示 PN 断面、TK 断面和对马海峡断面,断面 D 为 37°N 断面,断面 E 为渤海海峡断面。各个断面平均 SST 年际变化见图 3。图中可以发现各断面之间有强相关性,断面 D、E 的 SST 平均值与 PN 断面 SST 平均值的相关系数分别为 0.76 和 0.72 (置信水平为 99%),说明黄海暖流与黑潮流系存在强相关关系。

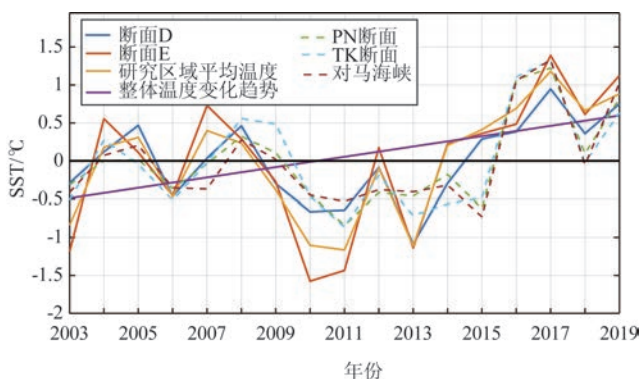


图3 黄海暖流区1月不同断面SST平均值及整体变化趋势

SST标准差分布可以很好地反映SST变化幅度的空间变化。从图4a可以看出冬季SST在近岸的标准差较大,基本超过 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。例如西朝鲜湾、辽东湾、渤海湾和莱州湾等由于水浅,受大陆气候和径流等因素的影响,变化幅度均较大。而在黄海中部的黄海暖流区域SST年际变化幅度最小,小于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明黄海暖流相比近岸具有稳定海温的作用,SST年际差较小。

与SST标准差分布类似,SST增长趋势也是近岸大而黄海中部黄海暖流区域相对较小(见图4a)。近岸SST的增长趋势基本超过 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,而黄海中部的黄海暖流区域SST增长趋势较小,约为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,小于研究区域整体SST变化趋势 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。研究区域SST标准差与增长趋势的空间分布表明,黄海暖流对黄海暖流区SST的变化具有一定的稳定作用。

3.2 黄渤海SST年际变化特征分析

为进一步探究黄海暖流对该区域SST年际变化规律的影响与联系,本文对2003—2019年1月SST数据进行EOF分析。其前两个模态的贡献率及其显著性检验情况如表1所示。

表1 EOF前两个模态方差贡献率与显著性检验表

模态	1	2
显著性检验	通过	通过
方差贡献率/%	69.5	10.9
累计方差贡献率/%	69.5	80.4

由表1可知,前两个模态均通过显著性检验。一般认为累计方差贡献率达到80%就可以代表原始场的主要特征,因此本文主要分析前两个模态(见图5)。

EOF的第1模态解释了总方差的69.5%,是黄渤海SST年际变化的最主要形态。图5a为黄渤海区域SST第一模态的空间分布,整体上均为正值,说明SST整体上同步变化。南黄海振幅值较大处位于区域中部,呈左右对称分布,且西部区域(青岛东南侧)振幅更大,北黄海振幅较大处也位于北黄海中部区域。振幅较大处与黄海暖流区基本一致,说明黄海暖流是影响黄渤海冬季SST年际变化的重要因子,该结论与宋德海等^[23]通过东中国海的SST数据得出的结论一致。而渤海区域振幅较大处位于莱州湾与渤海湾。莱州湾与渤海湾是受外界

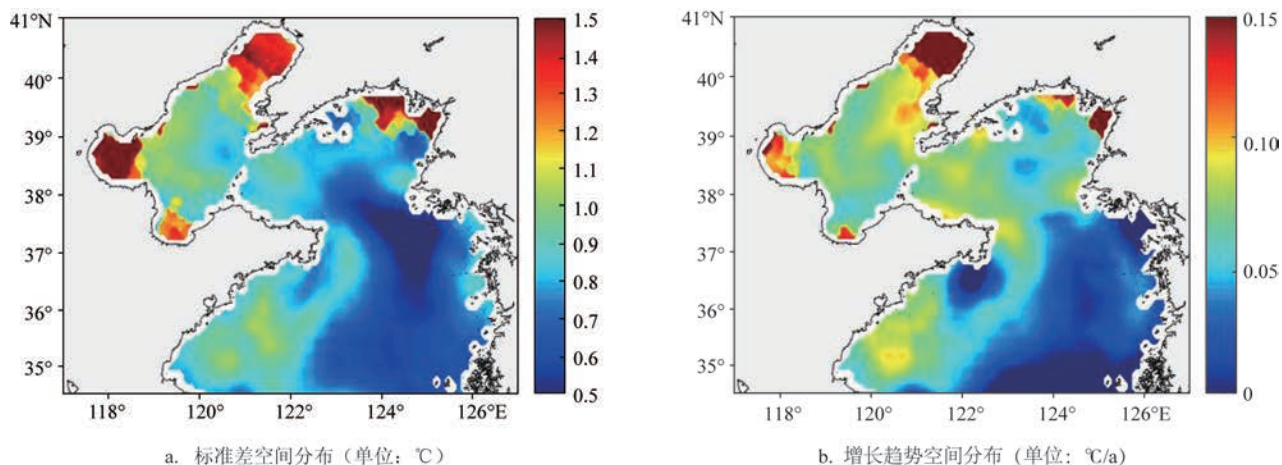


图4 黄海暖流区SST分布

因素影响较大的区域有黄河、海河等陆地径流入海,是海水与淡水混合区域。地表径流入海可能是导致该区域振幅较大的重要因子。

PDO是对我国近海气候变化有很大影响的气候因子。通过多因子筛选发现第一模态时间序列与PDO指数正相关性高。当时间序列滞后于PDO 1 a时,其相关系数达到0.47,置信水平为99%(见图6)。这表明黄海暖流区SST年际变化可能主要是在北太平洋年际震荡背景下,受黄海暖流与地表径流影响的综合结果。

EOF第二模态解释了总方差的10.9%。图5b显示西北区振幅为负值,东南区振幅为正值,呈反相位分布,表明空间上两个区域具有相反的变化趋势。将其时间序列分别与nino3.4指数与南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI)进行相关性分析,结果见图7。由图可见第二模态时间序列与nino3.4指数有着很好的正相关性,相关系数为0.62,置信水平为99%,当滞后时间为22 M时相关性最强;第二模态时间序列与SOI指数有着很好的

负相关性,相关系数为0.54,置信水平为99%,当滞后时间为21 M时相关性最强。该结果表明EOF第二模态是对ENSO事件的响应,其滞后时间约为21 M。

4 黄海暖流路径与强度变化分析

4.1 黄海暖流路径分析

将黄渤海区域内2003—2020年1月SST气候态平均,如图8a所示(根据暖舌顶点确定黄海暖流的主轴位置,如图中红线所示)。黄海暖流由南海南部中间海域进入黄海内部,在进入南海内部后先往西北方向流动,在 $35^{\circ}\sim 35.5^{\circ}\text{N}$ 范围内存在拐点,经过该区域后黄海暖流向东北方向流动进入北黄海,再经由北黄海指向渤海海峡。渤海海峡温度比渤海内部温度高,存在暖舌,因此认为1月的黄海暖流可以由北黄海经渤海海峡进入渤海内部。结合研究区域水深分布(见图8b)黄海暖流进入黄

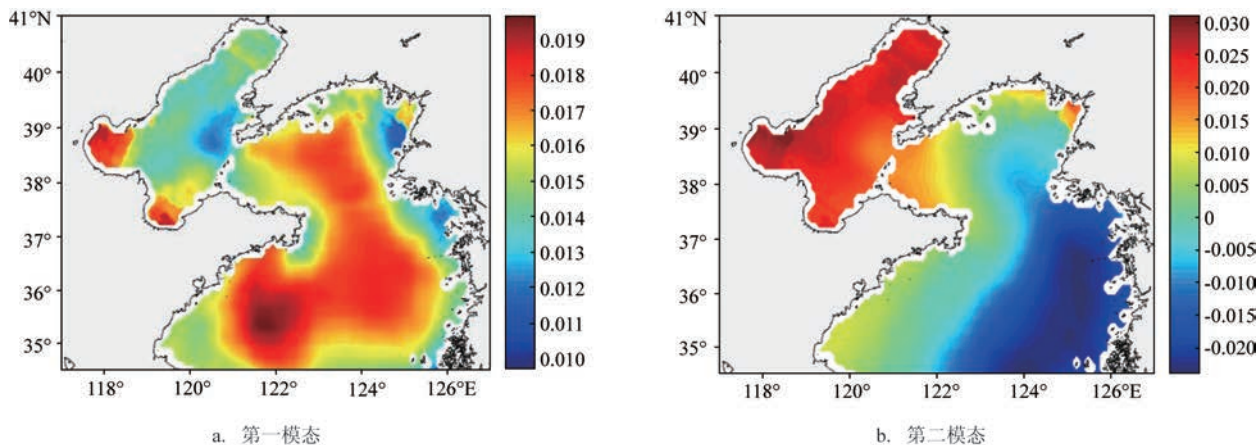


图5 EOF两个模态空间分布

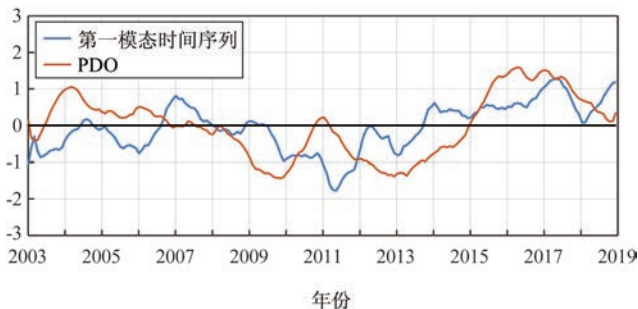


图6 第一模态时间序列与PDO指数对比图

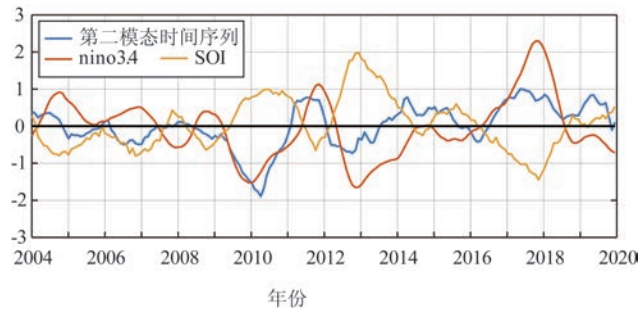


图7 第二模态时间序列与nino3.4、SOI指数对比图

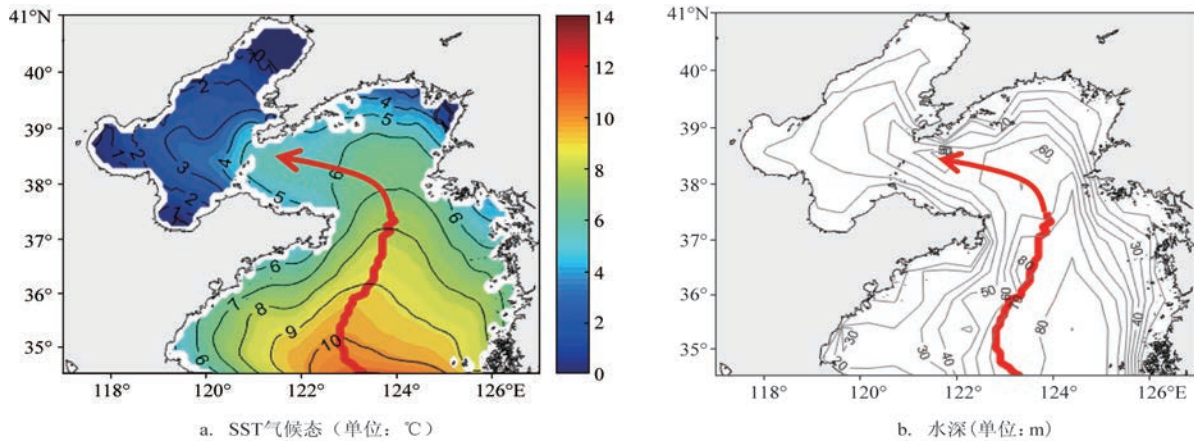


图8 黄渤海 SST 气候态、水深分布与黄海暖流路径

海后先沿着 60~70 m 的等深线向西北流动,之后北进,其流轴位于黄海槽的西侧偏北,并非严格沿着黄海槽北上。该结果与许一等^[13]得出的结论相一致,且由 8 °C 等温线可以明显发现南黄海南部存在另一暖舌,说明黄海暖流确实可能存在分支现象。

4.2 黄海暖流主轴的年际变化

通过分析 SST 在 35°N 1 月 SST 的分布,发现黄海暖流主轴发生明显的东西向摆动。考虑局地风可能会对流轴偏移产生影响,因此进一步将黄海暖流主轴东西向摆动与月平均风场数据进行相关分析。图 9 表明黄海暖流主轴的东西向摆动与纬向风速正相关,当滞后时间为 1M 时相关性最好,相关系数为 0.41,置信水平为 90% (如图 9 中蓝线与红线所示)。因此可以推断纬向风是流轴偏移的重要影响因素之一。12 月纬向风较大时,会使次年 1 月黄海暖流流轴向东偏移;反之风速较小时,会使次年 1 月黄海暖流的流轴向西偏移。其中 2009 年黄海暖流流轴达到经度最大,为 124.67°E;2017 年黄海暖流流轴达到经度最小,为 121.82°E。

考虑到厄尔尼诺-南方涛动(El Niño Southern Oscillation, ENSO)事件可能是影响黄海暖流主轴东西向摆动的因子之一,本研究进一步对黄海暖流流轴东西向摆动与 nino3.4 指数进行相关分析。图 9 表明黄海暖流流轴的东西向摆动与 nino3.4 指数成负相关,且当流轴偏移滞后于 nino3.4 指数 1 a 时相关性达到最强,相关系数为 0.48,置信水平为 95% (如图 9 红线与黄线所示)。同样将黄海暖流流轴东

向西摆动与 SOI 进行相关分析,发现两者呈正相关。当流轴偏移指数滞后于 SOI 指数 1 a 相关性达到最强,相关系数为 0.42,置信水平为 90% (见图 9)。

该结果表明,黄海暖流主轴的东西向摆动与 ENSO 事件有着较好的相关性。当厄尔尼诺事件发生时,受其影响,次年的黄海暖流主轴将会向西偏移;而当拉尼娜事件发生时,次年的黄海暖流主轴

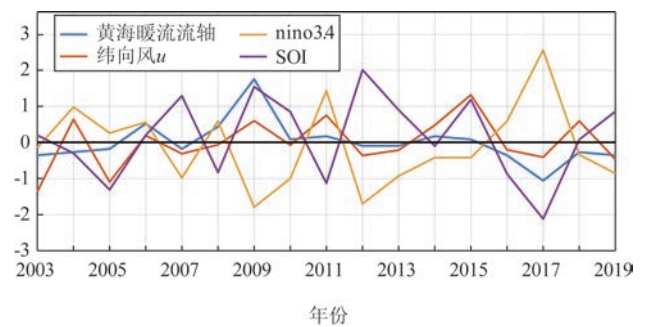


图9 黄海暖流流轴摆动与纬向风(单位:m/s)、nino3.4 与 SOI 指数对比图

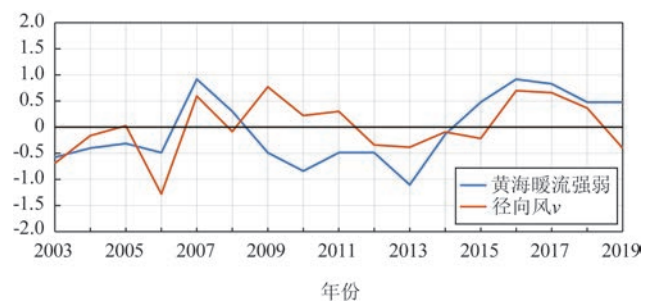


图10 黄海暖流强弱与经向风(单位:m/s)对比图

将会向东偏移, ENSO事件是影响黄海暖流主轴东西向摆动的重要因子。

4.3 黄海暖流强度的年际变化

如图10所示, 2007年、2016年 7°C 等温线抵达的纬度最高(约为 38.9°N), 2013年 7°C 等温线抵达的纬度最低(约为 36.9°N), 黄海暖流强弱年份 7°C 等温线抵达的最高纬度差异约为170 km。考虑局地风可能会对黄海暖流强弱产生影响, 对黄海暖流强度的年际变化与该区域内风场的经向风进行相关分析, 发现黄海暖流的强度与区域内经向风的大小成正相关。当滞后时间为1 M时相关性最高, 相关系数为0.46, 置信水平为93%。由此可见, 区域内经向风的大小是影响黄海暖流强弱的重要因子。当12月的经向风较大时, 会使次年1月黄海暖流变强; 反之经向风较小时, 次年黄海暖流减弱。该结论表明冬季黄海暖流是一支受季风控制的补偿流, 当季风较强时, 沿岸流增强, 导致作为补偿流的黄海暖流也相对较强, 具体表现为暖舌向高纬度区域的延伸。

5 结论

本文采用REMSS提供的SST数据针对黄海暖流相关问题进行研究分析, 主要取得了以下研究成果:

黄海暖流区1月SST整体上处于上升的趋势, 其变化趋势约为 0.07°C/a , 黄海暖流SST变化趋势约为 0.03°C/a , 黄海暖流对该区域SST变化具有一定的稳定作用; 黄海暖流区相关断面SST与黑潮主要断面SST的相关性显著, 表明黄海暖流与黑潮流系存在一定关系; EOF第一模态分析结果表明黄渤海区域SST年际变化主要是在北太平洋年际震荡背景下, 综合黄海暖流与地表径流影响的结果, 第二模态是对ENSO事件的响应, 其滞后时间约为21 M。

黄海暖流基本流动路径主轴位于黄海槽的西侧偏北, 并非严格沿着黄海槽北上, 并且可能存在分支现象; 黄海暖流主轴的东西向摆动与ENSO事件相关性显著, 纬向风的大小是影响黄海暖流流轴偏移的主要因子之一; 黄海暖流的强度与该区域内

经向风的大小成正相关, 当滞后时间为1 M时相关性最高。该结论证实了冬季黄海暖流是一支受季风控制的补偿流, 当季风较强时, 沿岸流增强, 导致作为补偿流的黄海暖流也相对较强, 具体表现为暖舌向高纬度区域的延伸。

参考文献:

- [1] 冯士筵, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] Niino H, Emery K O. Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea[J]. GSA Bulletin, 1961, 72(5): 731-762.
- [3] 管秉贤. 有关我国近海海流研究的若干问题[J]. 海洋与湖沼, 1962, 4(3-4): 121-141.
- [4] 苏育嵩. 黄东海地理环境概况、环流系统与中心渔场[J]. 山东海洋学院学报, 1986, 16(S1): 12-27.
- [5] Beardsley R C, Limeburner R, Yu H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 57-76.
- [6] 乐肯堂. 冬季黄海暖流水的起源[J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 9-19.
- [7] 周旭波, 孙文心. 东中国海拉格朗日环流数值模拟 II. 环流模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 7-12.
- [8] 连展. MITgcm模式在中国近海环流研究中的应用[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
- [9] 王辉. 东海和南黄海夏季环流的斜压模式[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(1): 73-78.
- [10] 邓健, 黄立文, 吴国雄, 等. 完全强迫下冬季黄东海环流三维高分辨数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(2): 161-165.
- [11] 万凯. 冬季大风过程下渤海海水位低频波动及黄海暖流机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [12] Guan B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[M]//Zhou D, Liang Y B, Zeng C K. Oceanology of China Seas. Dordrecht: Springer, 1994: 17-26.
- [13] 许一, 于非, 张志欣, 等. 冬季黄海暖流的诊断计算[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 398-407.
- [14] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 南黄海环流的若干特征[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 1-16.
- [15] 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥, 等. 1996年春季南黄海水文特征和水团分析[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 17-26.
- [16] 乐肯堂, 毛汉礼. 南黄海冬季温盐结构及其流系[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(6): 505-515.
- [17] 鲍献文, 苏洁, 郭心顺, 等. 黄、渤海热结构及环流季节变化的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(4): 513-522.
- [18] 朱耀华, 方国洪. 陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤、黄、东海的应用[J]. 海洋学报, 1994, 16(6): 11-26.
- [19] Park Y H. A simple theoretical model for the upwind flow in the southern Yellow Sea[J]. Journal of the Korean Society of Oceanography, 1986, 21: 203-210.

- [20] 郭炳火, 邹娥梅, 熊学军, 等. 黄海、东海水交换的季节变异[J]. 海洋学报, 2000, 22(S1): 13-23.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 宋德海, 于华明, 鲍献文. 东中国海及毗邻海域 SST 年际变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(S1): 21-28.
- [24] Wang F, Liu C Y, Meng Q J. Effect of the Yellow Sea warm current fronts on the westward shift of the Yellow Sea warm tongue in winter[J]. Continental Shelf Research, 2012, 45: 98-107.
- [25] 韩玉康, 周林, 赵艳玲, 等. 3 种海面风场资料在吕宋海峡的比较与评估[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 44-52.
- [26] 詹思琦, 齐琳琳, 卢伟. 基于 CCMP 资料和现场观测资料的西北太平洋海面风场特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 10-20.

Analysis of the interannual variation of the SST in the Yellow Sea Warm Current area

YU Hua-ming^{1,2,3*}, LI Ji¹, YU Hai-qing⁴, LI Song-lin¹

(1. College of Ocean and Atmosphere, Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 2. Sanya Ocean Research Institute, Ocean University of China, Sanya 572024 China; 3. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Qingdao 266003 China; 4. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003 China)

Abstract: Based on the microwave remote sensing SST data over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter from 2003 to 2019, this paper analyzes the characteristics and the influence of the Yellow Sea Warm Current on the interannual variation of the SST. Meanwhile, we further analyze the interannual variation of the stream axis and intensity of the Yellow Sea Warm Current. The results show that the SST in the Yellow Sea Warm Current area reveals an increasing trend of 0.07 °C/a in winter, and the Yellow Sea Warm Current helps in stabilizing the SST in the middle of the Yellow Sea. The interannual variation of SST in this area is mainly affected by the coastal processes of the Yellow Sea Warm Current, continental climate and river runoff under the background of the Pacific Decadal Oscillation. The interannual variation of the axis of the Yellow Sea Warm Current is closely correlated to ENSO and significantly influenced by meridional winds, while the interannual variation of the intensity of the Yellow Sea Warm Current is significantly affected by zonal winds.

Key words: Yellow Sea Warm Current; interannual variation; stream axis; SST; wind speed