

黄海海表温度与冷水团年际变化关系的分析研究

褚芹芹¹, 于华明^{2,3}, 李松霖², 于海庆⁴, 葛晶晶⁵

(1. 国家海洋局秦皇岛海洋环境监测中心站, 河北 秦皇岛 066002; 2. 中国海洋大学 海洋与大气学院/三亚海洋研究院, 山东 青岛/海南 三亚 266100/572024; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266003; 4. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266100; 5. 31110 部队, 江苏 南京 210016)

摘 要: 基于 NOAA 提供的 1982—2016 年日平均 OISST.V2 数据、大面站观测数据以及 FVCOM 数值模拟数据, 在分析黄海冷水团的年际变化规律以及 SST 变化特征的基础上, 确定了黄海 SST 和冷水团特征参数, 采用相关分析方法, 探究黄海 SST 与冷水团的相关关系。结果表明: 黄海冷水团 8℃ 等温线包围面积年际变化幅度最大, 9℃ 等温线次之, 10℃ 等温线包围面积年际变化幅度最小; 北黄海冷水团冷中心大小和位置均比南黄海冷水团更稳定; 受到地形限制, 冷水团冷中心虽然每年位置变化较大, 但活动范围较为固定。通过对黄海 SST 和冷水团特征参数的相关分析, 发现冬季 9℃ 等温线到达的纬度与黄海暖流流量和冷水团面积之间均存在较好的相关关系, 尤其是冷水团与前一年冬季表层 9℃ 等温线到达纬度相关程度更高, 这说明冬季黄海 SST 不仅能够反映黄海暖流的强弱, 也能够反映第二年夏季黄海冷水团的强弱。

关键词: 黄海冷水团; 海表温度; FVCOM; 数值模拟; 相关分析

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)02-0021-10

1 引言

黄海冷水团是夏季存在于黄海底部的低温高盐水体, 其鼎盛时期, 水温垂向会出现上均匀层、中间跃层和下均匀层 3 层结构, 水团体积约为 $5 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 占据黄海总体积的 1/3。黄海冷水团冷中心一般为 2 个或 3 个, 部分年里冷水团分为北黄海冷水团和南黄海冷水团两个冷中心, 部分年里南黄海冷水团又分为东西两个冷中心。黄海冷水团作为我国近海重要的水文现象, 已有不少学者对其形成机制和结构等做了大量的研究。我国最早由赫崇本等^[1]根据 1930—1940 年间温盐平均资料提出黄海冷水团冬季在黄海本地形成, 并且认为黄海冷水团在垂直和水平方向都存在季节性变化; 随后, 管秉贤^[2]对黄海冷水团的环流特征进行了分析; 袁业立^[3]通过建立物理模型对冷水团中心部分的热结构和环流特征进行了分析, 从理论上得出黄海冷水团的一些参

数, 且与实测值较为接近; 翁学传等^[4]利用“相似系数”法, 通过计算各年夏季黄海各站层和断面上的相似系数, 对 8 月黄海冷水团的分布范围、低温中心位置、体积和温盐性质的多年变化特征进行了分析; 苏纪兰等^[5]通过定性分析和数值模拟对黄海冷水团的垂向环流结构展开探讨, 并指出黄海冷水团的垂向环流结构为双环结构。近年来, 江蓓洁等^[6]借助断面和测站数据资料, 利用线性回归方法分析变化趋势, 指出北黄海冷水团温度主要受冬季气温影响, 同时, 黑潮现象使温度变异。

相较于黄海冷水团形成机制和结构的研究, 目前对于黄海海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 和黄海冷水团年际变化的研究较少。汤明义等^[7]采用站点数据, 借助能谱分析方法分析了黄海 SST 的准周期变化, 并指出黄海 SST 具有高频准周期变化。曾广恩^[8]采用 TRMM/TMI (Tropical Rainfall Measuring Mission/TRMM Microwave Imager, 热带

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-05-29。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1401406); 北海分局海洋科技项目 (2017B13)。

作者简介: 褚芹芹 (1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋预报与近海数值模拟。E-mail: 526077242@qq.com

通讯作者: 于华明 (1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事近海动力学及其生态效应研究。E-mail: hmyu@ouc.edu.cn

测雨卫星/微波成像仪)卫星遥感 SST 资料,采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)法分析了东海和黄海 SST 季节内变化的空间分布特征,并指出东海北部、东海近岸和黄海近岸 SST 季节内变化最为显著。宋德海等^[9]基于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 Pathfinder V5.0 系列产品,使用低通滤波消除季节变化影响后,利用协方差(Covariance)EOF 和梯度(Gradient)EOF 方法分析了中国近海及毗邻海域 SST 的年际变化特征,并指出东中国海 SST 除了太阳辐射外,还与平流热量运输、厄尔尼诺(El Niño)现象以及海流与水团的混合有关。刘伊格^[10]分析了 1982—2017 年渤海和黄海 SST 的气候特征,得出黄海存在 12~13 a、17~18a 和准 4a 的周期变化特征。宋新等^[11]基于三维区域海洋模式(Regional Ocean Modeling System, ROMS)的分析,指出黄海冷水团存在着 5 a 的周期变化特征,与厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)现象相关;厄尔尼诺年时,滞后 17 M 的黄海冷水团的分布范围一般会较小;而拉尼娜年时,滞后 17 M 的黄海冷水团的分布范围会比较大。李昂等^[12]基于 1976—2006 年国家标准断面(大连—成山头)的调查资料,分析发现:前冬海温、当地气温、经向风场以及辐射通量都对来年北黄海冷水团的强度存在影响。

由于黄海冷水团在近海产生,其形成原因与水体的垂向混合和层结有关,近海中较强的潮汐现象会在一定程度上影响水体的垂向状态,而传统再分析数据往往不包含潮汐潮流信息。因此本研究基于无规则网格有限体积海岸海洋模型(Finite-Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)模型,通过构建环流模型对黄海底层温度进行模拟,同时借助 NOAA 提供的 35 a(1982—2016 年)的 SST 高分辨率卫星数据和多年大面站观测数据,在总结黄海 SST 及冷水团的季节和年际变化规律的基础上,采用寻找特征参数和相关分析的方法,分析黄海 SST 与冷水团的关系,希望为黄海海温年际变化研究提供参考。

2 数据资料来源

为了尽可能准确地模拟黄海冷水团,本研究所

建模型及所用数据基本信息如下:

模拟范围:模型起止范围 117.5°~151.0°E, 18.8°~52.2°N,空间上包含渤海、黄海、东海及黑潮流经海域,能够实现对冬季黄海暖流的模拟。模型采用无结构三角网格,并在渤海、黄海、东海、朝鲜海峡及黑潮流经海域进行网格加密,近岸分辨率约为 10 km,垂向均匀分为 21 个 Sigma 层;对于平均水深 44 m 的黄海,该模型在此区域的垂向分辨率约为 2 m。水深数据集采用美国国家地学测量中心(National Geodetic Center)提供的 DBDB5 (Digital Bathymetric DataBase Version 5.2)数据,使用双线性插值将其插值到网格点上。

驱动力:模型大气强迫数据采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)发布的气候预报系统再分析数据^[13],主要包括风、蒸发、降水、气压、净热通量及净短波辐射通量。径流(长江和黄河)信息来自《水资源公报》提供的月平均径流数据。温盐和环流采用全球简单海洋资料同化分析系统(Simple Ocean Data Assimilation, SODA)月平均数据。开边界水位采用俄勒冈大学(University of Oregon)研发的 TMD(Tidal Model Driver)^[14],在此基础上加入 SODA 平均水位。

同化:为使模拟结果尽可能准确,模型采用 NOAA 提供的 35 a(1982—2016 年)高分辨率最优插值海温分析(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, OISST.V2)数据作为同化信息,数据类型为网格数据,空间分辨率 0.25°,同化方法采用增量分析更新法^[15]。

为了验证 FVCOM 数值模拟数据的有效性,本文将底层水温模拟数据与大面站观测数据进行对比。由于模型采用 Sigma 坐标,因此对于不同水深格点处,垂向间隔也有所不同。为使模拟数据与观测数据进行对应,采用距离水底 2 m 处作为底层。以 2010 年 7 月模拟数据为例,将 FVCOM 模拟得到的底层温度数据与夏季气候态大面站数据进行对比,结果如图 1。

图 1 可以看到模拟的 2010 年 7 月底层温度数据与夏季气候态大面站数据。通过对比等温线范围及形态来判断数据有效性,我们发现:8℃等温线在空间位置上存在一定差异,但大致可分为南北两块冷中心;10℃等温线无论在大小还是形态上都较为

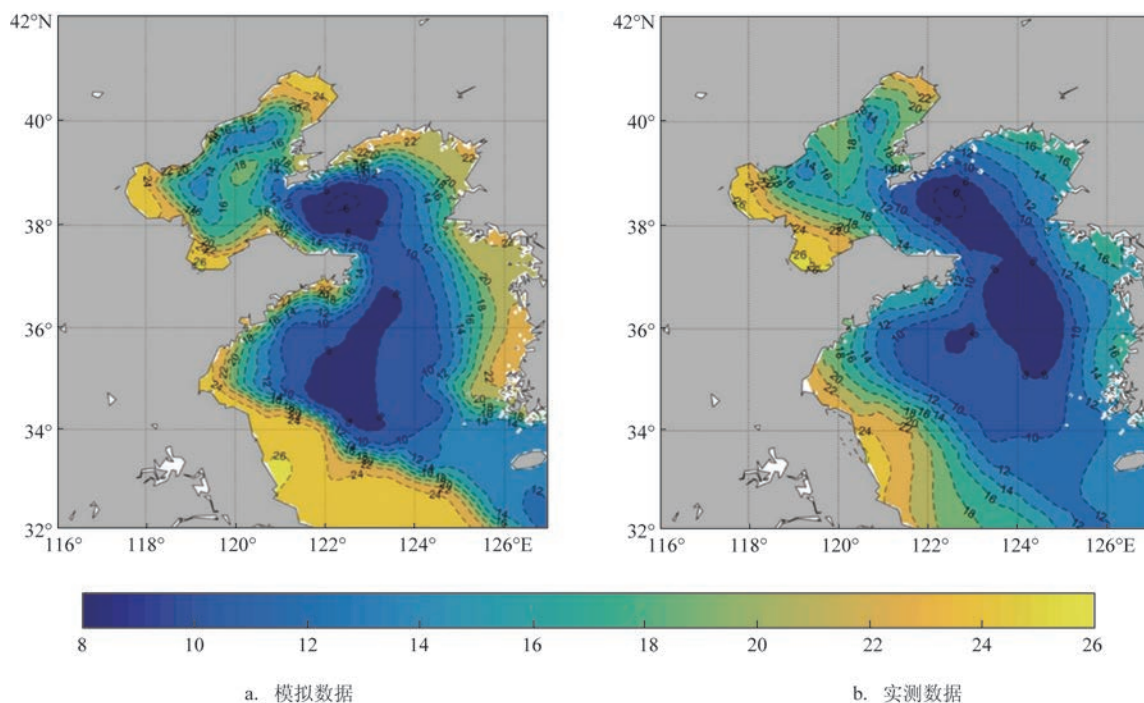


图1 FVCOM数值模拟数据有效性验证(单位:℃)

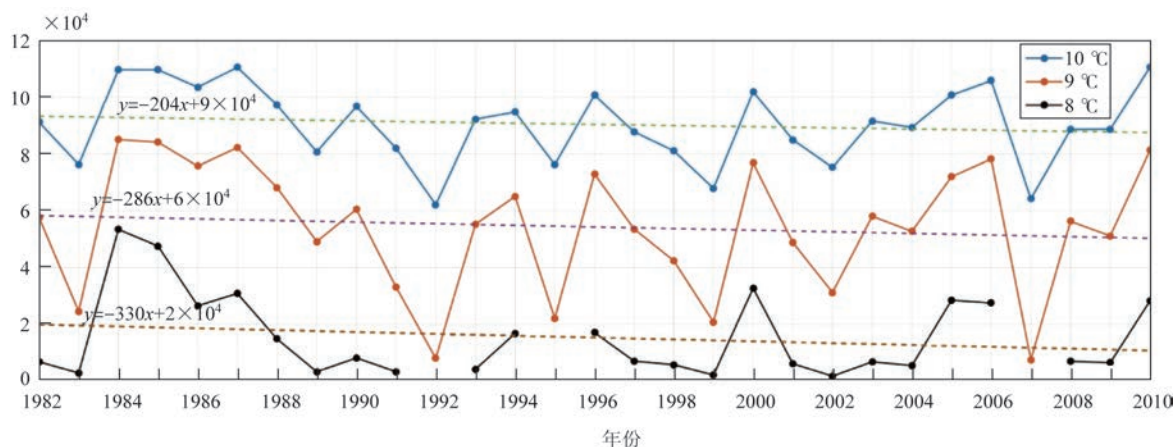


图2 3种等温线包围面积

相似。由于管秉贤^[2]指出8℃等温线对气温的响应较强,而10℃等温线则相对稳定,因此从底层温度来看,FVCOM模拟得到的温度数据能够满足研究需求。

3 黄海冷水团年际变化分析

由于FVCOM模型输出结果为三角网格,为便于数据处理及分析,采用双线性插值方法,将模型

输出结果插值到等经纬矩形网格。每个网格点所占面积可用以下方法简单计算:在纬度 θ 处,单位弧度经度对应的长度为: $R \cdot \cos(\theta) / (2\pi)$ 。式中: R 为地球半径,单位纬度对应长度为 $R / (2\pi)$,单个格点所占区域可视近似矩形,通过求出等温线内各格点所占小矩形面积,进行求和即可计算得到等温线所包含面积的近似值。基于该方法,利用FVCOM数值模拟得到的东中国海底层水温数据,计算出1982—2010年底层冷水团区域内各等温线的包围

面积。从图2可以看出,各等温线包围区域面积在各年间变化趋势基本一致,而部分年里底层温度均大于 8°C 。我们对这3类面积曲线进行线性回归以分析冷水团面积的年际变化趋势。结果表明:冷水团强度在20世纪80年代以来总体呈下降趋势,且 8°C 等温线包围面积下降最快, 9°C 次之, 10°C 下降最慢,这可能与近年来全球气候变暖有关。通过各等温线包围面积最大/最小年的分布(见图3),也可以推断出 8°C 等温线包围面积年际变化幅度最大, 9°C 等温线次之, 10°C 变化幅度最小。

为了分析冷水团各温度水体空间上的年际变化规律,我们绘制了1982—2010年3种等温线空间分布(见图4)。整体来看 8°C 等温线中心位置年际变化较大, 9°C 等温线中心位置与 8°C 等温线相比

变化较小, 10°C 等温线中心位置变化与前两者相比最小,且其等温线中心位置基本不变。局部来看,北黄海内各等温线中心位置基本不变,等温线包围面积变化也较小;南黄海内各等温线中心位置变化较大,等温线包围面积变化也较大。因此,从数值模拟结果来看,北黄海冷水团无论是大小还是低温中心的位置都比南黄海冷水团稳定,这一点与前人分析得到的结果类似^[4,16]。

1982—2010年3种等温线组成的外廓线图可以在一定程度上反映冷水团多年间的空间活动范围(见图5)。由外廓线图可以看出,尽管各等温线在多年间空间变动较大,但各等温线外廓线却较为接近。这说明冷水团的冷中心位置尽管每年有所差异,但由于受到地形限制,其能够到达的区域是受到限制的。

4 冷水团与黄海 SST 关系分析

4.1 冷水团形成机制及影响因素

为了更好地分析黄海冷水团与黄海 SST 之间的相关关系,我们首先根据之前学者的研究,对黄海冷水团的形成机制和影响因素进行简单总结。

对于黄海冷水团的形成原因,目前主要观点认为与黄海暖流水有关。冬季渤海受季风影响,表层海水向南流动,底层海水以补偿流的形式从黑潮区延伸至黄海,其携带的高温高盐水形成黄海暖流。冬季的强季风促进了黄海区域水体的垂向混

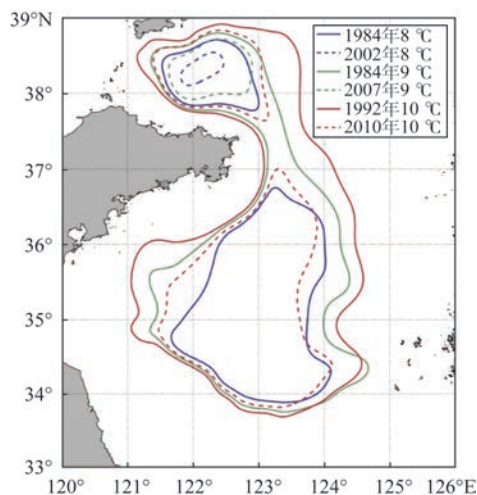


图3 不同等温线最大/最小年分布图

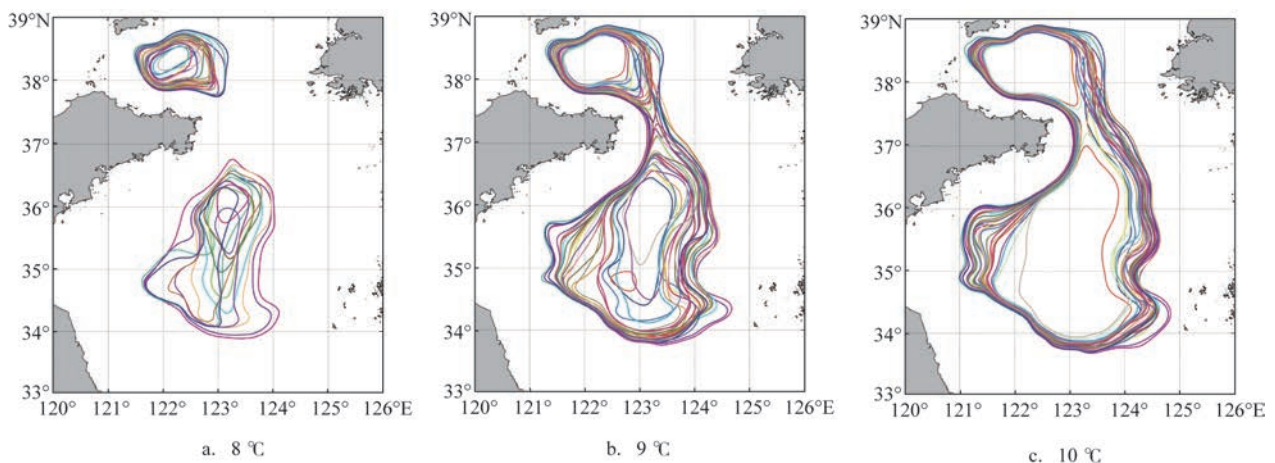


图4 1982—2010年3种等温线分布图

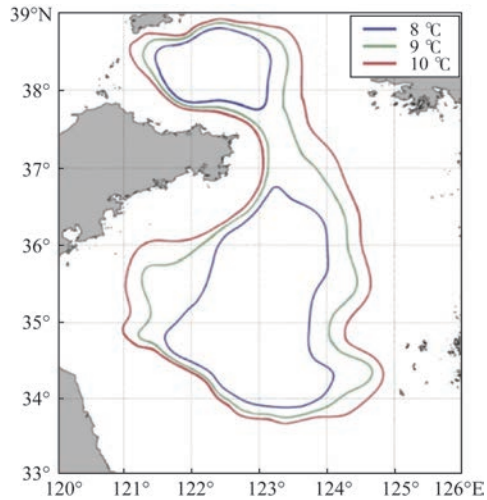


图5 1982—2010年3种等温线外廓线图

合,使得黄海暖流在流动过程中逐渐与当地冷水发生混合变性,温度逐渐降低并接近周围海水温度,盐度变化较小,仍保持高盐状态;夏季时,夏季风与冬季风相比较弱,使得海水整体稳定,底层留下稳定的冷水团,所以黄海冷水团实质上是黄海本地的冬季残留水^[1]。

对于黄海冷水团的影响因素,李昂^[17]的研究表明:北黄海冷水团温度存在明显的年际变化特征,

冬季海温、气温、辐射通量以及经向风速都对北黄海冷水团的温度存在影响;南黄海冷水团两个核心的温度长期趋势不同^[14,16],西部核心温度升高,东部核心温度降低,西部核心的升温趋势主要受到冬季黄海暖流入侵、冬季气温以及冬季经向风的影响,东部核心的降温趋势主要受到夏季过程影响。

因此,基于之前的研究学者对冷水团形成机制以及影响因素的探讨,以下将通过分别确定黄海 SST 和冷水团特征参数的途径,采用相关分析方法,进一步探究黄海 SST 与冷水团的相关关系。

4.2 冷水团特征参数

通过分析冷水团底层水温的年际变化,发现个别年份底层 8 °C 等温线几乎不存在(见图6)。对于此现象,我们收集了混合坐标海洋模式(HYbrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)再分析数据作为参考。结果发现2007年8月底层月平均温度模拟结果均大于 8 °C, HYCOM 再分析数据中虽然出现了 8 °C, 但范围极小,只在北黄海存在,而 10 °C 等温线在南北黄海均存在,且习惯上我们通常取 10 °C 等温线作为冷水团边界,因此选用 10 °C 等温线包围的面积作为冷水团强度的特征参数。

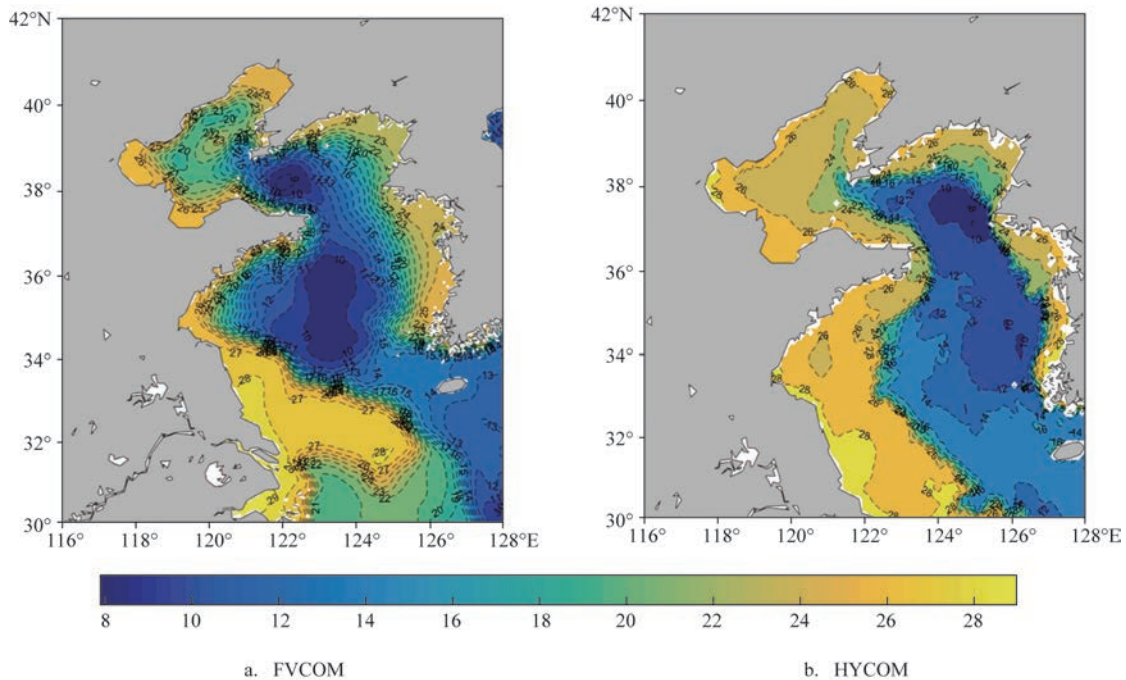


图6 2007年8月底层温度模拟数据(单位:°C)

4.3 黄海 SST 特征参数

由于日平均 OISST.V2 已作为观测数据源加入模型同化,且本研究采用月平均 SST 数据进行分析,因此,在月平均尺度上,对于 SST 而言模型结果与观测结果基本一致。为了尽可能保证数据分析的可靠性,在 SST 分析中将采用观测数据进行分析。为了分析黄海 SST 与黄海暖流之间的表征关系,我们对 $30^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$ 海域的 SST 作 35 a 逐月平均,绘制了气候态 1—4 月的月平均 SST

分布。由图 7a—c 可以明显看出,冬季至初春东海北部存在 18°C 左右的高温区域,该区域即东海北部的黑潮区;此外还可看到一明显的暖水舌由黑潮区延伸至黄海,在 34°N 附近形成两个分支,一支向海州湾方向延伸,另一支向渤海方向延伸,与黄海暖流路径相似。4 月之后(见图 7d),该暖水舌开始减弱直至消失,符合黄海暖流“冬强夏弱”的特征。此前已有学者的研究表明,冬季期间,尽管黄海暖流主要从深层进入黄海,但除了深底层外,表层也能显示黄海暖流的存在^[18],且将该暖水舌作为黄海暖

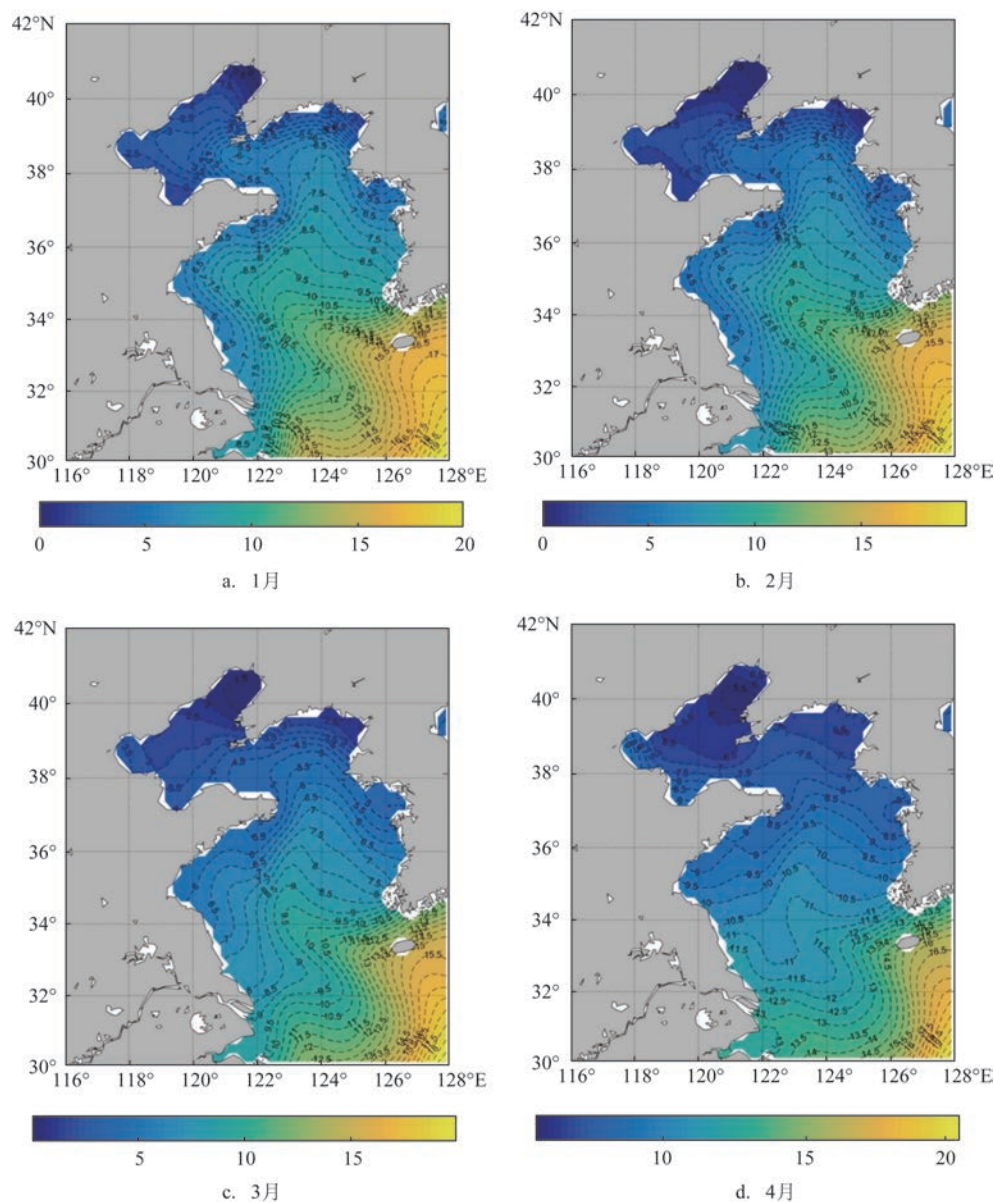


图7 气候态1—4月月平均SST分布(单位:℃)

流路径的定性指标具有一定的合理性^[19-20],因而该暖水舌可作为黄海暖流在黄海表层的反映特征。下文中我们选取冬季黄海表层9℃等温线(暖水舌边界)向北延伸达到的最大纬度(以下称“9℃等温线到达纬度”)作为黄海暖流强弱的特征参数。考虑到黄海暖流与冷水团之间的关联,为了确定黄海SST的特征参数,我们首先确定冬季黄海表层9℃等温线到达纬度与黄海暖流流量之间的相关关系。

黄海与东海以长江入海口北岸到韩国济州岛作为划界。为了在计算冬季流入黄海流量时包含济州岛北部海域,本研究以长江入海口北岸至朝鲜半岛南部为断面(见图8),计算了冬季通过该断面流入黄海的平均流量,以该流量作为黄海暖流流量的参考指标。由于近岸地形复杂,且易受到沿岸流的影响,因此未将断面边界延伸至岸线上。

我们计算了1982—2008年冬季流过该断面的

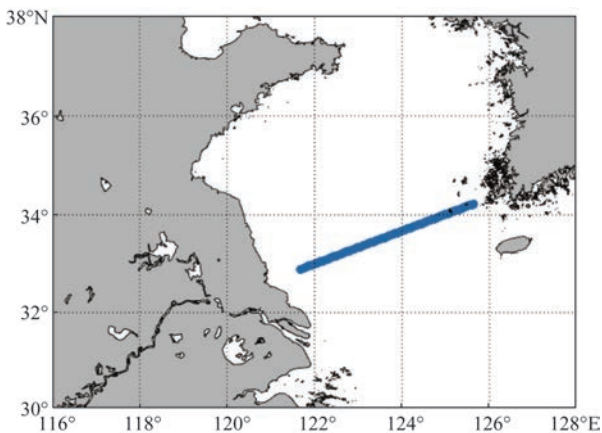


图8 断面设置

平均流量,并将其与冬季黄海表层9℃等温线到达纬度做相关分析。结果表明两者之间存在较好的负相关关系(见图9),相关系数达到-0.51,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。这说明冬季黄海暖流流量较大的年份,冬季黄海表层9℃等温线所能到达的纬度反而较低。

为解释造成这一现象的原因,我们利用数值模拟数据,计算了冬季1月的断面流量。从断面流量剖面图可以看出(见图10),在冬季风作用下,表层流向为流出黄海,底层则以补偿流的形式流入黄海,形成黄海暖流。底层补偿流流量越大则相应的冬季风越强,冬季风驱使表层海水的流向与冬季表面暖水舌方向相反,阻碍了黄海表层9℃等温线向北延伸,因此,冬季风越强,底层补偿流流量越大,黄海表层9℃等温线向北延伸能够到达的纬度就越小,呈现负相关关系。

通过以上的分析,说明用黄海冬季表层9℃等温线向北延伸达到的最大纬度作为黄海暖流强弱的特征参数具有一定合理性,同时该参数也可作为黄海SST的特征参数用来对冷水团与黄海SST进行相关性分析,从而将黄海SST与底层海水活动联系起来进行分析。

4.4 冷水团与黄海SST相关性分析

通过前两节的分析,我们确定了黄海冷水团特征参数为夏季10℃等温线包围的面积,黄海SST特征参数为黄海冬季表层9℃等温线到达纬度。

我们选取1月(冬季)和8月(夏季)两个具有代表性的月份,对黄海SST和冷水团特征参数做相关

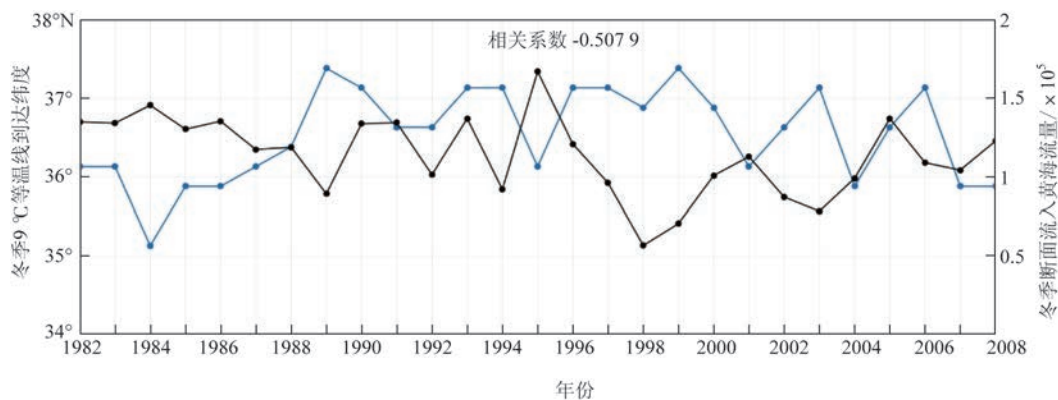


图9 冬季9℃等温线到达纬度和冬季黄海暖流流量

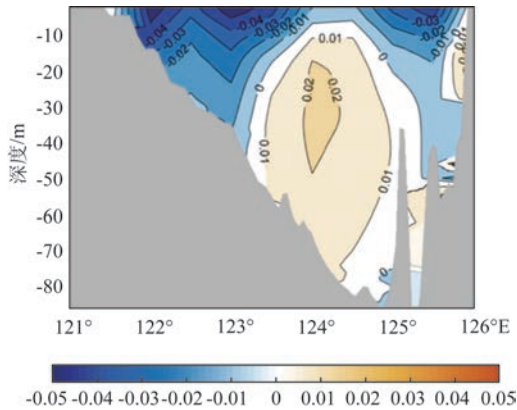


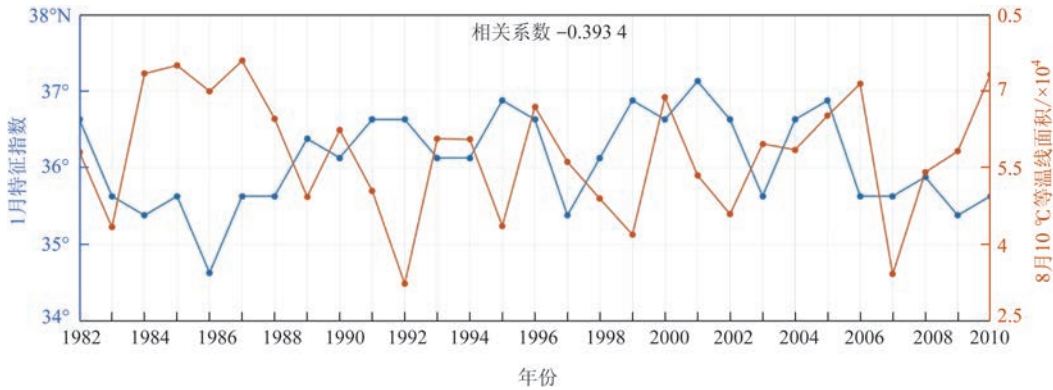
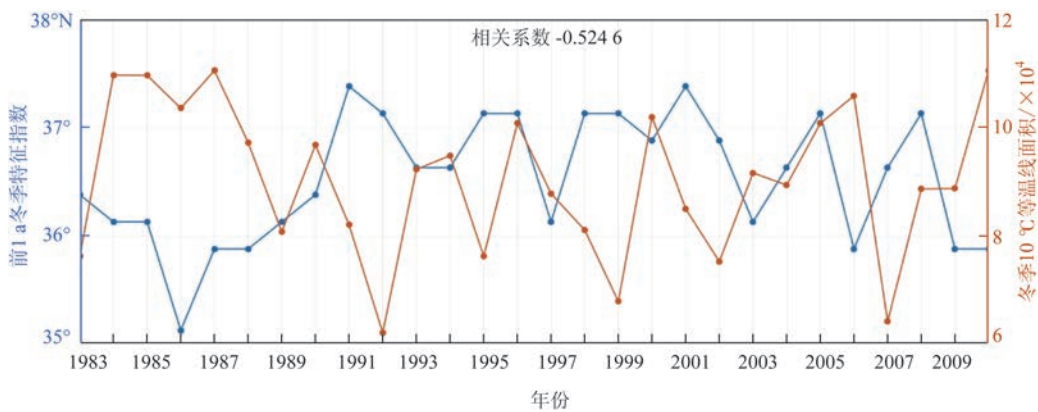
图10 断面流量剖面图(流入黄海为正)

性分析,发现两者存在一定的负相关,相关系数达到 -0.39 ,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

同理,我们对夏季 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线包围面积和前一年冬季表层 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线到达纬度做相关分析,发现两者同样存在负相关关系,且相关程度更高,达到了 -0.52 ,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。这说明黄海冷水团强弱与前一年冬季黄海暖流有关,因此,我们可以根据黄海SST中暖水舌的分布情况,在一定程度上判断第二年夏季冷水团面积大小。将两者线性拟合得到线性变化关系,即:

$$y = ax + b \quad (1)$$

式中: y 为第二年冷水团面积, x 为前一年冬季

图11 1月黄海表层 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线到达纬度和8月 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线包围面积图12 前1a冬季 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线到达纬度和夏季 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线包围面积

$9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线到达纬度, a 、 b 为待求拟合参数。用此方法求出的第二年冷水团面积与模拟得到的冷水团面积对比结果如图13所示。

对比结果表明除个别年份外(如1992年和2007

年),该方法预测得到的冷水团面积与模拟得到的面积比较接近,采用平均偏差(Bias)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)两类指标对预测结果进行评估:

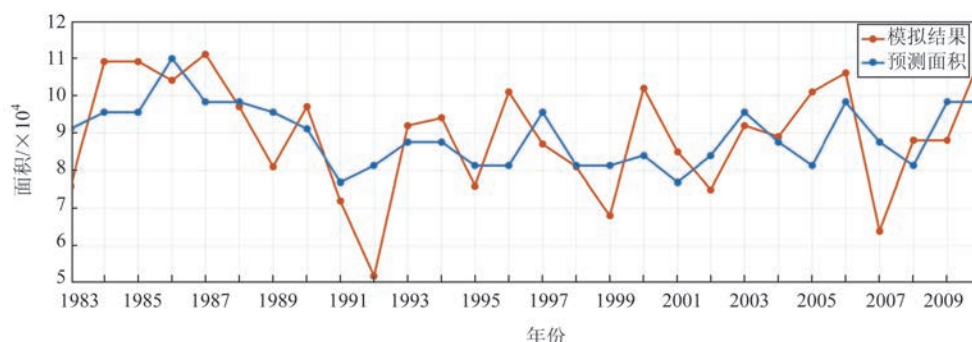


图13 预测冷水团面积与模拟面积

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2} \quad (3)$$

式中: A 和 B 分别为预测面积和模拟得到的面积, 结果表明两者平均偏差为 $-0.017 \times 10^4 \text{ m}^2$, 均方根误差为 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。以上结果表明借助前一年冬季 9°C 等温线到达纬度能够较好地预估第二年冷水团强弱。

5 结论

本文基于 NOAA 提供的 1982—2016 年日平均 OISST.V2 数据、大面站观测数据以及 1982—2010 年 FVCOM 数值模拟数据, 在分析黄海冷水团的年际变化规律以及黄海 SST 特征的基础上, 确定了黄海 SST 和冷水团特征参数, 采用相关分析的方法, 探究黄海 SST 与冷水团的相关关系, 得出以下结论:

(1) 黄海冷水团 8°C 等温线包围面积年际变化幅度最大, 9°C 等温线次之, 10°C 等温线包围面积年际变化幅度最小。北黄海冷水团冷中心大小和位置均比南黄海冷水团更稳定。受地形限制, 冷水团冷中心虽然每年位置变化较大, 但活动范围较为固定。

(2) 通过数据分析, 确定了黄海冷水团特征参数为夏季 10°C 等温线包围的面积, 黄海 SST 特征参数为黄海冬季表层 9°C 等温线到达纬度。相关分析表明冬季 9°C 等温线到达的纬度与黄海暖流流量和冷水团面积之间均存在较好的相关关系, 尤其是冷水团与前一年冬季表层 9°C 等温线到达纬度相关程度更高。使用线性拟合方法, 利用前一年冬季

表层 9°C 等温线到达纬度计算第二年冷水团面积, 预测结果与模拟结果之间平均偏差为 $-0.017 \times 10^4 \text{ m}^2$, 均方根误差为 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。以上结果说明冬季黄海 SST 不仅能够反映黄海暖流的强弱, 也能够反映第二年夏季黄海冷水团的强弱。

参考文献:

- [1] 赫崇本, 汪园祥, 雷宗友, 徐斯. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(1): 11-15.
- [2] 管秉贤. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(4): 255-284.
- [3] 袁业立. 黄海冷水团环流 I. 冷水团中心部分的热结构和环流特征[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(3): 187-196.
- [4] 翁学传, 张以愚, 王从敏, 张启龙. 黄海冷水团的变化特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 119-131.
- [5] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构[J]. 海洋与湖沼增刊, 1995, 26(5): 1-7.
- [6] 江蓓洁, 鲍献文, 吴德星, 许建平. 北黄海冷水团温、盐多年变化特征及影响因素[J]. 海洋学报, 2007, 29(3): 1-10.
- [7] 汤明义, 李洪海. 黄海表面水温场的准周期变化分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1989, (s1): 370-376.
- [8] 曾广恩. 东、黄海海面温度季节内变化的特征研究 [D]. 硕士学位论文. 河海大学, 2006.
- [9] 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, (s1): 21-28.
- [10] 刘伊格. 渤海和黄海海面温度变化及成因分析[D]. 硕士学位论文. 南京大学, 2019.
- [11] 宋新, 林霄沛, 王悦. 夏季黄海冷水团的多年际变化及原因浅析[J]. 广东海洋大学学报, 2009, (03): 59-63.
- [12] 李昂, 于非, 刁新源, 司广成. 北黄海冷水团温度年际变化研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 30-42.
- [13] Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1015-1058.
- [14] Padman L, Erofeeva S. Tide Model Driver (TMD) Manual[Z].

- 2005.
- [15] Bloom S C, Takacs L L, da Silva A M, et al. Data assimilation using incremental analysis updates[J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(6): 1256-1271.
- [16] S.W.Zhang, Q.Y.Wang, Y.Lv, et al. Observation of the Seasonal Evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998 [J]. *Continental Shelf Research*. 2008,28:442-457.
- [17] 李昂. 黄海冷水团年际变化研究[D]. 博士学位论文. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [18] 孙湘平. 中国近海及毗邻海域水文概况[M]. 北京: 海洋出版社. 2016.5. 第一版: 205-206, 258-260.
- [19] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 26-34.
- [20] Yu Fei, Zhang Zhixin, Diao Xinyuan, et al. Observational evidence of the Yellow Sea warm current [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2010, 28(3): 677-683.

Study of the correlation between SST and inter-annual variation of the cold water mass in the Yellow Sea

CHU Qin-qin¹, YU Hua-ming^{2,3}, LI Song-lin², YU Hai-qing⁴, GE Jing-jing⁵

(1. QHD Marine Environmental Central Station of SOA, Qinhuangdao 066002 China; 2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences/Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Qingdao/Sanya 266100/572024 China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266003 China; 4. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 5. 31110 Army, Jiangsu 210016 China)

Abstract: Based on the NOAA daily OISST.V2 dataset from 1981 to 2016, CTD observations and FVCOM numerical simulation results, this paper analyzes the inter-annual variation of the Yellow Sea cold water mass (YSCWM) and the variation characteristics of the SST, and quantifies the characteristic parameters of the SST and YSCWM. Moreover, the correlation analysis method is used to explore the correlation between SST and YSCWM in the Yellow Sea. The results show that the area enclosed by the 8 °C isotherm of the YSCWM reveals the largest inter-annual variation, followed by the 9 °C isotherm, and the 10 °C isotherm has the smallest inter-annual variation. The size and location of the cold center of the northern YSCWM are more stable than those of the southern YSCWM. Limited by the topography, the location of the cold center of YSCWM varies greatly from year to year, while the range of its activities is relatively fixed. Based on the correlation analysis between characteristic parameters of SST and YSCWM, it is found that there is a good correlation between the latitude reached by the 9 °C isotherm in winter and the flow of Yellow Sea Warm Current (YSWC) and the area of YSCWM. Especially, the YSCWM has a higher correlation with the latitude reached by the 9 °C isotherm of the surface layer in the previous winter, which indicates that the SST of the Yellow Sea in winter can not only reflect the intensity of the YSWC, but also the intensity of the YSCWM in the next summer.

Key words: Yellow Sea cold water mass; sea surface temperature; FVCOM; numerical simulation; correlation analysis