苏北浅滩及长江口海域春季海表面温度长期升温机制分析

孙 凡^{1,2,3}, 于 非^{1,2,3,4,5}, 司广成^{1,2,3}, 潘 俊^{1,2,4,6}

(1. 中国科学院海洋研究所,山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流 与波动重点实验室,山东 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心,山东 青岛 266071; 5. 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 266237; 6. 中国科学院海洋研究 所海洋环境工程中心,山东 青岛 266071)

摘要:在1982—2016年,苏北浅滩及长江口海域春季海表面温度主要呈现出从南至北、从近岸至离岸 升温趋势逐渐减小的特征,其中长江口附近海域升温速率最大。研究显示,苏北浅滩及长江口附近海 域春季海表面温度的长期升温趋势主要与该海域经向热输送及长江平流热输送的增强有关。进一步的 研究发现,春季经向风速的增强导致该海域经向热输送的增加,而春季经向风速的年际及年代际变率 又受到太平洋年代际振荡、北极涛动的调控,其中,太平洋年代际振荡指数与经向风速呈负相关,北极 涛动指数与经向风速呈正相关,北极涛动指数的年际增加以及太平洋年代际振荡指数的年际降低使得 春季南风增强,进而南向的冷平流减弱,北向的热平流增强,使该海域春季海表面温度长期升温。在此 过程中,净热通量对其升温过程起到抑制作用,而前冬海温主要是对春季海表面温度的年代际振荡产 生重要影响,其主要体现为1982—1999年的升温及2000—2016年的降温过程。

关键词:苏北浅滩;SST;升温趋势;经向风速;太平洋年代际振荡(PDO);北极涛动(AO) 中图分类号:P722.5 文献标识码:A 文章编号:1000-3096(2019)01-0015-13 DOI:10.11759/hykx20181104001

苏北浅滩位于江苏省琼港以东海域,其形态似 三角洲状^[1], 平均水深小于 20 m, 由于水深很浅且 靠近大陆, 故苏北浅滩海水的温盐性质主要受到季 风及大陆气候的影响。苏北浅滩北部海水主要是由 江苏北部的灌河、射阳河、灌溉总渠等入海径流与沿 岸海水混合而形成的低盐水^[2-3], 而淮河流域的径流 与该区域的降水有重要的关系, 王然等^[4]的研究指出, 2000-2010 年, 淮河流域 5-6月降水呈现增加趋势, 其中,太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数、印度洋偶极子指数(Dipole Mode Index, DMI)对淮河流域 5-6 月降水异常的年代际、长期 变化具有明显的指示作用。另一方面,长江冲淡水 能够影响至 33°N 以南的苏北浅滩南部海域^[3, 5-6], 周晓英等^[7]的研究发现,春季,特别是三四月份,长 江口海域海表面温度(Sea Surface temperature, SST) 与长江径流呈现正相关关系,长江径流量大的年份, 长江口年平均 SST 亦会偏高。因此, 苏北浅滩的海水 性质受陆地径流的影响很大;近几年的研究认为,苏 北浅滩是黄海浒苔暴发的主要发源地^[8-11],由于春季 是浒苔孢子开始生长繁殖的季节, 而浒苔孢子的繁殖 和海水温度、营养盐等具有重要联系,故在全球变暖的背景下,研究苏北浅滩春季 SST 的升温趋势及产生机制对研究近几年浒苔暴发的原因具有重要意义。

作为大陆相接的黄海西南部边缘海, 苏北浅滩 及长江口附近海域 SST 的长期变化既与黄海 SST 变 化息息相关, 又具有其独有的特征。关于黄东海的升 温趋势分布特征, 前人已经做了大量的研究工作, Yeh 等^[12]利用经验正交函数分析方法(empirical orthogonal function, EOF)发现冬季黄东海的大部分海

收稿日期: 2018-11-04; 修回日期: 2018-12-22

基金项目: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(U1406401);国家重点研发计划项目(2016YFC1402501); 国家自然科学基金项目(41806164);国家自然科学基金委员会-创新研 究群体科学基金(41421005)

[[]Foundation: NSFC- Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, No.U1406401; The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC1402501; National Natural Science Foundation of China, No. 41806164; NSFC- Innovative Group Grant, No. 41421005]

作者简介:孙凡(1994-),山东济宁人,硕士研究生,主要从事海洋环 流与海洋环境效应研究, E-mail: sunfaniocas@163.com; 于非,通信 作者,研究员,主要从事海洋调查与区域海洋学研究工作,电话: 0532-82898187, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

域呈现出增温趋势, 谭红建等^[13]发现自 1958 年以来中 国近海的升温趋势可分为变暖加速期(1958—1998 年) 和变暖暂缓期(1998—2014 年)。Park 等^[14]的研究结 果显示中国近海的增温呈现出明显的时间和区域分 布特征,在春夏两季中国东部沿海升温显著,而在 夏秋两季在黄海南部及东海地区升温明显,蔡榕硕 等^[15]结合 1955—2006 年 HadISST 等海洋大气再分析 资料发现中国近海冬季的主要升温区位于东海,而 夏季则位于黄海,其中,冬季升温明显强于夏季。

对于黄东海的升温机制, 前人形成了不同的认 识:一类观点从海气相互作用的角度解释,蔡榕硕 等^[16]通过对 ERA-40 再分析的风场资料以及 HadISS 和 SODA 等海洋高分辨率再分析资料进行分析后发 现,1976年之后中国近海和邻近海上空冬、夏季风的 减弱,以及大气环流辐散的增强引起了海表面温度 的上升;谭红建等^[13]认为,大气可通过海气界面的 感热和潜热通量来影响 SST 的变化。同时,黄东海 上空的大气温度、海表面风速又受到厄尔尼诺及南 方涛动(ENSO)、北极涛动(Arctic Oscillation, AO)、 北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)及与之 对应的太平洋年代际振荡(PDO)的影响: Zhou 等^[17] 发现不同的时期 ENSO 与东亚冬季风呈现不同的相 关性, 20世纪 20年代中期之前为明显的正相关, 20 世纪 30-40 年代转变为负相关, 20 世纪 50 年代前期 又重新变为正相关, 20世纪 70-80 年代为负相关。 朱益民等^[18]的研究指出, 对应于 PDO 暖位相期(即 中纬度北太平洋异常冷、热带中东太平洋异常暖), 中国东北、华北和西北地区冬季气温异常显著偏高, 而西南和华南地区气温偏低;而对应于 PDO 冷位相 期,上述形势相反。该论文中还指出,处于不同阶段 的 ENSO 事件对中国夏季气候异常的影响明显受到 PDO 的调制。PDO 在大气方面对应的是 NPO, Yeh 等^[12]的研究发现, 经9年平滑后的 NPO 指数与黄东 海冬季 SST 具有很好的对应关系; 董仕等^[19]指出, 冬季 AO 正位相时东亚大槽减弱,西伯利亚高压减 弱,低层风场异常偏南,东亚冬季风减弱,东亚冬季 风区温度升高,而负位相时情况相反。此结论与 Park 等^[14]结论一致,故AO正位相时,西太平洋海温和东 亚表面温度均有所升高,由于海洋运动和变化具有 缓慢性和持续性, 西太平洋海温可以承载长达 4 个 月的 AO 信号, 西太平洋海温可持续影响东亚地区 温度,导致 AO 持续影响东亚表面温度。Wang 等^[20] 的研究提出,当 PDO 正相位时,在年际尺度上 ENSO 对东亚冬季风的影响不大,而当 PDO 负相位时, ENSO 对东亚冬季风会产生明显的影响。陈文等^[21]的 研究认为,当 El Niño 和 AO 负异常或者 La Nina 和 AO 正异常相互配置时,我国北方气候异常主要受 AO 影响,南方气候异常主要受 ENSO 影响。

另一类观点认为,河流径流及外来流系的平流 热输送对黄东海的升温起重要作用,齐庆华等^[22]通 过动力计算方法对 1945—2006 年源区黑潮热输送进 行了估算,发现源区黑潮具有线性增强的变化趋势, 认为其是影响中国近海 SST 异常变化的重要因素之 一;Wei等^[23]认为冬季黄海 SST 的长期变化趋势与黄 海暖流的平流热输送有关,Park 等^[24]通过模式计算 后提出,长江冲淡水对黄东海夏季 SST 的升温具有 重要影响,长江冲淡水的增加会使海水的层结性加强, 阻止了其垂直混合,进而促使了夏季黄东海的升温, 另外,宋德海等^[25]通过对 1985—2005 年东中国海 SST 进行 EOF 分解后认为,东中国海域 SST 长期变化 趋势主要与该海区的地形和水平环流相关。

在全球变暖的大背景下,苏北浅滩及长江口附 近海域是春季 SST 升温的大值区,同时,该区域也 是近几年黄东海浒苔暴发的主要发源地,研究苏北 浅滩及长江口海域春季 SST 的升温机制对研究近几 年浒苔暴发的原因具有重要意义。 因此本文在前人 工作的基础上,结合黄渤海海表面温度距平场(SSTA), 经向风速及 PDO、AO 等大尺度海气指数,对苏北浅 滩及长江口海域春季 SST 的升温特征及机制进行了 分析。

1 数据与方法

SST 资料采用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的最优插值海表面温度(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, OISST)的月平均数据, OISST 数据始于 1981 年 9 月,延续至今,采用最优 插值方法最大程度同化了甚高分辨率扫描辐射计 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 卫星遥感数据,水平分辨率 1/4°×1/4°。本文研究时 段为 1982 至 2016 年。

净热通量采用的是美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的气候预 报系统再分析资料(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)及客观分析海气热通量项目(Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes, OAFlux)的月平均数据。CFSR 再分析

资料使用了 GEOS-5(Goddard Earth Observing System) 的大气模式与资料同化系统,资料同化应用的是 NCEP 发展的以 6 h 为周期的格点统计插值系统 (GSI),数据始于 1979年延续至 2011年,数据精度为 0.312°×0.312°(经度/高斯纬度)。OAFlux 数据来自美 国伍兹霍尔海洋研究所正在进行的一个项目,气象 参数主要来源于卫星遥感观测资料和再分析资料的 融合数据,将两者按照权重进行了最优插值,感热 与潜热资料始于 1958年1月至今,为了计算得到净热 通量,本数据集采用的海表面向下/向上的太阳辐射 和长波辐射来自于国际卫星云气候计划(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP)海表面辐 射场,全球分辨率为 1°×1°,时间跨度从 1983 年 7 月 至 2009 年 12 月。本文净热通量的研究的时段为从 1984—2009 年。

经向风速采用美国国家环境预报中心的 NCEP-DOE Reanalysis 2 的日平均数据及欧洲中期天气预 报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称 ECMWF)的 ERA-interm 的月平均数 据。NCEP-DOE Reanalysis 2 数据始于 1979 年 1 月, 采用的是全球 T62 高斯格点(192×94)。ERA-interm 数据起始于 1979 年并由欧洲中期天气预报中心进行 实时更新, 空间分辨率约为 1/8°, 该资料的同化基于 2006 年发布的 IFS 系统, 包含了 4 维变分模式以及 12 小时的分析窗。本文经向风速的研究时段为 1982 至 2016 年。

两米处的大气温度采用 NCEP 及 OAFlux 的月平 均数据, NCEP 的大气温度数据始于 1979 年至 2016 年, 采用的是全球 T62 高斯格点(192×94)。OAFlux 的大气温度数据始于 1958 年至今, 全球分辨率为 1°×1°, 本文大气温度的研究时段为 1982 至 2016 年。

PDO 指数定义为 20°N 以北太平洋海温的 EOF 第一模态及其时间系数, AO 指数反映的是极区与中 纬度地区气压的反相位变化,是北半球热带外大气 低频变率的主要模态。PDO, AO 指数的下载地址为 https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos wgsp/Timeseries/。

长江径流以大通水文站的径流资料代替,数据 主要来自中华人民共和国水利部提供的水情年报, 研究时段为1982至2016年,下载地址为http://www. mwr.gov.cn/sj/tjgb/sqnb/。

本文选取 30°~41°N, 117°~127°E 为研究区域, 其中重点研究区域为苏北浅滩及长江口附近海域 (30°~35°N, 119°~124°E),本文采用回归分析研究数 据的长期变化趋势,采用滞后相关系数研究两变量 之间的相关程度。

2 苏北浅滩及长江口 SST 升温趋势 分析

采用线性回归的方法,对黄渤海春季 SSTA长期 变化趋势作整体分析,得到图 1a 所示分布,其中, 点状阴影部分代表回归系数通过了置信度为 95%的 显著性检验。结果表明,黄渤海春季 SSTA 整体呈现 从南至北、从近岸至离岸升温趋势逐渐减小的特征, 升温的大值区域分布在苏北浅滩及长江口附近,最 大超过了 0.07℃/a,而朝鲜半岛西岸海域升温趋势很 小,甚至出现降温的现象,且未通过置信度为 95%的 显著性检验。

对苏北浅滩及长江口附近海域(30°~35°N, 118°~ 124°E)SSTA 作空间平均, 得到如图 1b 所示时间序列, 由图中可以看出, 该海域春季整体升温趋势超过 0.04℃/a, 为全球近表层海温上升速率(0.011℃/a)^[26]的 近 4 倍。由此可以看出, 苏北浅滩特别是长江口附近 海域, 在全球变暖的大背景下, 其升温速率比其他海 域明显得多, 同时, 由图中还可以发现, 1982—2000 年 期间升温较快, 而 2000 年以后升温速率减缓甚至出现 降温趋势, 在整体升温的同时也呈现出年代际振荡的 特征, 该结果与谭红建等^[12]的研究所得结论一致。

3 苏北浅滩及长江口海域升温机制 分析

苏北浅滩作为陆架边缘海所具有的独特的自然 条件,由于其靠近大陆,且水深较浅,其受水深,季 风,水平平流等因素得影响很大,故在考虑其 SST 升温机制时,应综合考虑多种因素的综合影响,考 虑上层海洋的热收支方程(来自文献[27]):

$$\frac{\partial t_{\rm m}}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_{\rm p} h_{\rm mld}} Q_{\rm net} - \overline{u_{\rm m}} \nabla t_{\rm m} - w \frac{\Delta t}{h_{\rm mld}}, \qquad (1)$$

其中, ρ 为海水的密度, C_p 为海水的定压比热容, h_{mld} 为混合层厚度, t_m 为混合层温度, $\left| \overline{u_m} \right|$ 为混合层水平 速度的垂向平均, w 为混合层垂向夹卷速度, ∇ 为水 平平流算子 ($\nabla \equiv \partial/\partial x, \partial/\partial y$), Δt 为混合层与混合层以 下海水的温度差; Q_{net} 为净热通量, 其表示为 $Q_{net} = Q_{sw}+Q_{lw}+Q_{l}+Q_{s}$, 其中, Q_{sw} 为净短波辐射通量, Q_{lw} 为 净长波辐射通量, Q_l 为潜热通量, Q_s 为感热通量, 这 里规定向下为正,表示海洋吸热。由热收支方程可以

研究论文 • <u>Iim</u> ARTICLE

看出,表层海水温度随时间的变化主要受到净热通量 Q_{net} ,水平平流 $\overline{u_m} \nabla t_m$,及垂直夹卷 $w \frac{\Delta t}{h_{\text{mld}}}$ 影响,其中第三项相对于前两项为小量,可以忽略,故表

层海水温度主要由净热通量和水平热输送的控制。 同时,前冬海温也会对其产生重要影响,因此,在考 虑苏北浅滩及长江口海域春季 SST 长期变化趋势的 机制研究时,主要分析此三项因素的影响。



图 1 黄东海春季 SSTA 年际升温趋势(a, 阴影代表通过置信度为 95%的显著性检验); 苏北浅滩及长江口海域春季 SSTA 时间序列及回归趋势(b)

Fig. 1 (a) Distribution of long-term warming trend of spring SSTA in the Yellow and East China Seas (the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level); (b) time series and linear trends of spring SSTA in Subei bank and Changjiang estuary

3.1 前冬海温的影响

利用 OISST 资料,对 1983—2016 年春季与前冬 SST 作相关系数分布(图 2a),发现黄东海的大部分海 域春季 SST 均与前冬海温呈现非常明显的正相关,且 通过了置信度为 95%的显著性检验,只有苏北浅滩南 部,长江及黄河口附近部分海域相关性较小,考虑到 该区域水深较浅,加之有长江、黄河等大型水系的注入, 因此该区域 SST 的年际变率可能受到大气,热平流及 河流径流的影响较大,以至于抵消了前冬海温的影响。

对苏北浅滩及长江口附近海域春季及前冬 SST 作空间平均后得到如图 2b 所示时间序列,可以看出 无论是年际还是年代际尺度,春季与前冬 SST 均存 在非常好的对应关系。其中 1983—2000 年存在一个 非常明显的升温过程,而 2000—2016 年呈现较为明 显的降温,说明该海域春季 SST 的这种年代际振荡 来源于前冬 SST 的信号。而整体来看,苏北浅滩及 长江口附近海域冬季 SST 并未表现出明显的长期变 化趋势,说明该海域春季 SST 的长期升温趋势不是 来自于前一年冬季,而是可能由同期净热通量、平流 热输送等因素导致。

3.2 净热通量的影响

为了解净热通量对苏北浅滩及长江口 SST 升温 趋势的影响,首先分析春季黄渤海净热通量的分布 特征,对 1984—2010 年 OAFlux 及 CFSR 春季的净 热通量作年际平均(如图 3),发现两套数据净热通量 分布状态相似,春季黄渤海净热通量整体为正,说 明该海域在春季整体吸热;近岸海域向下的净热通 量大于黄渤海中部海域,说明近岸海域春季吸热较 多,而黄渤海中部吸热较少,这可能是因为,受黄海 暖流的影响,黄海海槽区域 SST 较高,海气温差较 小,导致向下的净热通量较小。

由公式 1 可以看出净热通量的长期变化趋势会 对海水温度的年际变率产生直接的影响,当向上的 净热通量年际增加时,海洋得热减小,失热增加,此 时净热通量起到降温的作用,反之亦然。

利用 OAFlux 及 CFSR 数据,对 1984—2009 年 黄渤海春季距平化后的净热通量分别作回归分析, 得到其净热通量长期变化趋势分布及全域平均时间 序列(如图 4,图 5)。结果发现黄渤海全域基本表现 为净热通量逐渐减小的特征,且均通过了置信度为

研究论文 · ┃:胍 ARTICLE

95%的显著性检验,说明在年际尺度上春季黄渤海 大部分区域的得热在减小,失热在增加,即净热通 量对黄渤海特别是苏北浅滩及长江口海域 SST 的长期升温趋势起到降温的作用。



图 2 1983—2016 年春季 SSTA 与前冬海温相关系数(a, 阴影部分代表通过置信度为 95%的显著性检验); 1983—2016 年春季及前冬 SSTA 时间序列及线性趋势(b)

Fig. 2 (a) Distribution of correlation coefficient between spring SSTA and the previous winter SSTA from 1983 to 2016 (the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level); (b) time series and linear trends of the spring and the previous winter SSTA from 1983 to 2016







为进一步探讨苏北浅滩及长江口附近海域春季 净热通量减小的形成机制,我们对黄渤海海气温差 的长期变化趋势及其时间序列进行了分析。利用 1982—2010 年 OAFlux 与 NCEP 的大气温度数据(距 海面以上 2 m,在本文中记为 temp2m)及 NOAA 的 OISST 数据,两者相减得到该海域海气温差: Δ*T*= SST-temp2m 的时间序列。对其作回归分析,得到如 图 6 所示分布,发现在苏北浅滩南部特别是长江口 附近海域春季海气温差呈现逐渐增大的长期变化 趋势。对苏北浅滩及长江口附近海域的 ΔT 作空间 平均后得到如图 7 所示时间序列,由图中可以看出 该海域春季海气温差在 1982—2000 年表现为负异常,





图 4 春季净热通量长期变化趋势

Fig. 4 Distribution of linear trend of net heat flux in spring (a. data from CFSR; b. data from OAFlux; the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level)





图 5 1984—2010年期间苏北浅滩及长江口附近海域春季净热通量异常时间序列

Fig. 5 Time series and linear trends of net heat flux in Subei bank and Changjiang estuary from 1984 to 2010 (a. data from CFSR; b. data from OAFlux)



图 6 1982—2016 年春季海气温差长期变化趋势分布

Fig. 6 Distribution of long-term trend of ΔT from 1982 to 2016 in spring(a. data from NCEP; b. data from OAFlux; the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level)

注: a: NCEP, b: OAFlux, 阴影部分代表超过置信度为 95%的显著性检验



图 7 1982—2016 年春季苏北浅滩及长江口附近海域海气温差时间序列

Fig. 7 Time series and linear trends of ΔT in Subei bank and Changjiang estuary from 1982 to 2016 (a. data from NCEP; b. data from OAFlux)

而 2000—2016 年表现为正异常, 整体表现为上升趋势, 说明该海域海洋的升温速率大于大气的升温速率, 海气温差逐渐增大使得向上的感热通量与潜热 通量增加, 进而使得向下的净热通量减小, 海区得 热减小, 失热增加, 从而解释了该海域春季净热通 量逐渐减小的形成机制。

3.3 经向热输送的影响

苏北浅滩平均水深小于 20 m,由于水深很浅且 靠近大陆,故苏北浅滩海水的温盐性质受到季风及 大陆气候的影响很大,风应力主要通过三种方式影 响苏北浅滩 SST:一是通过影响净热通量,进而对 SST 产生影响;二是通过产生平流热输送对 SST 产 生影响;三是通过加强垂向混合而影响到该海域的 SST。由于苏北浅滩深度很浅,加之潮汐混合严重, 因此可以认为该海域在春季时海水垂向混合的变化可 以忽略不计;同时经前述的分析看出净热通量对春 季苏北浅滩 SST 的年际升温起到了抑制作用,因此 该小节主要考虑风应力产生的热平流对苏北浅滩及 长江口海域春季 SST 长期趋势的的影响。

由风速计算平流热输送的方法如下:

首先,利用欧洲中心的 ERA-interm 的风速资料 计算相应的风应力:

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_d \sqrt{W_x + W_y (W_x, W_y)}, \qquad (2)$$

其中, ρ_a 为空气密度, 取为 1.2 kg/m³, C_d 为风拖曳系数, 采用 Large 和 Pond^[28]的公式确定:

$$C_{\rm d} = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3} & |\overline{W}| < 11 \,{\rm m/s} \\ (0.49 + 0.065 \,|\overline{W}|) \times 10^{-3} & 11 \,{\rm m/s} \le |\overline{W}| < 25 \,{\rm m/s} , (3) \\ 2.115 \times 10^{-3} & |\overline{W}| \ge 25 \,{\rm m/s} \end{cases}$$

注: a: NCEP; b: OAFlux

其中, | W | 为风速大小。

其次,由风应力计算的 Ekman 层中表层流速可 由如下公式获得:

$$V_0 = \frac{\tau}{\sqrt{\rho_{\rm w}^2 f A_z}},\tag{4}$$

其中, τ 为风应力, ρ_w 为表层海水密度,此处取 1.025× 10³ kg/m³, f为科氏参数(f=2 Ω sin ψ), Ω 为地球自转角速度,此处取 7.292×10⁻⁵ rad/s, ψ 为纬度,此处取苏北浅滩所在的 33°N, A_z 为涡黏性系数,此处取 0.02 m²/s。

最后, 平流热输送项由如下公式计算:

$$T_{\rm adv} = \rho_{\rm w} C_{\rm p} \overline{V_0} \cdot \nabla T , \qquad (5)$$

其中, C_p为定压比热容, ρ_wC_p取常数 398 7250 J/(℃·m³)。

由此计算出的该海域经向热输送与 SST 的相关 系数分布如图 8 所示,从图中可以看出:在苏北浅滩 南部特别是长江口附近海域,经向热输送与春季 SST 存在较为明显的正相关关系,最大相关系数超 过了 0.7,而黄渤海其他部分相关系数较小,说明北 向热输送的增强能够使得苏北浅滩特别是长江口附 近海域温度升高。图 8b 显示的为该海域春季经向热 输送及 SST 的时间序列,可以看出,在 1982—2016 年,经向热输送呈现出明显的增强趋势,增强趋势 为 0.0116 W/(m²·a),且与春季 SST 时间序列吻合度 较好,说明经向热输送的增强是造成该海域春季 SST 年际升温的重要原因之一。

3.4 长江径流的影响

从第 3.1 节的讨论中可以看出,在长江、黄河、 淮河等入海口处,春季 SST 较冬季 SST 变异较大, 由于河流深度浅,长度大,故受其流域上空的大气 温度影响更为明显;同时,由于受海陆差异的影响, 研究论文 • <u>linn</u> ARTICLE



图 8 1982—2016年春季苏北浅滩及长江口附近海域平流热输送与 SST 相关系数分布(a), 平流热输送与 SST 时间序列(b) Fig. 8 (a) Distribution of correlation coefficient between spring SST and meridional heat transport from 1982 to 2016 (the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level); (b) the time series and linear trends of the spring SST and meridional heat transport

在冬季时,海上气温高于陆地气温,而在夏季时,陆 地气温高于海洋上空气温,因此,河流径流在冬季 时往往以冷源的形式输入到海中,而在夏季时则以 热源的形式输入,故河流径流在把大量的泥沙,无 机盐等输入到海洋的同时,其对河流入海口附近的 海水温度也能产生重要的影响。周晓英等^[7]的研究发 现,长江口春季 SST 与大通水文站春季流量呈现明显 的正相关,说明长江径流对春季长江口海域 SST 具有 重要的影响。因此,在讨论该海域春季 SST 长期变化 趋势的机制时,需考虑长江径流的影响。

河流径流产生的热输送通过如下公式计算:

$$Q_{\rm t} = C_{\rm w} \cdot \rho_0 \cdot T \cdot Q_{\rm v} \,, \tag{6}$$

其单位为 J/s, C_w 为淡水的定压比热, 此处取 4 180 J/(kg· \mathbb{C}), ρ_0 为河水密度, 此处取 1 000 kg/m³, *T* 为入海口处长江水的温度,由于缺少相应的观测数据,此处用河流入海口处的 SST 代替,为河流径流,单位为 m³/s。

图 9 为计算得出的春季由长江径流而产生的平 流热输送时间序列,可以看出其整体亦表现出长期 增加的趋势,长江平流热输送的增强会使长江口附 近海域温度升高。另外一方面,Wu等^[29]的研究指出, 长江冲淡水能够在潮致 Stokes 漂流的作用下向北伸 展至苏北浅滩南部(~33.5°N),因此,长江径流对该 区域春期长期升温的影响主要是局限于 33.5°N 以南 的海域。



图 9 1982—2016 年春季长江平流热输送时间序列及其线 性趋势



4 讨论

经向热输送的增加是苏北浅滩特别是长江口海 域春季 SST 长期升温趋势的主要原因之一,而经向 热输送又与经向风速的大小密切相关,本节将在前 文的基础上,从大气环流及 PDO, AO 指数等海气因 子的角度,探究经向热输送变化的原因。

4.1 经向热输送的影响因素分析

利用 NCEP 及欧洲中心 ERA-interm 的风速资料, 做出春季的风速矢量分布图(图 10),可以看出春季 渤海及黄海西岸基本盛行偏南风,而黄海东岸盛行 偏北风,整体呈现出一个反气旋式环流,其中苏北 浅滩海域盛行东南风,风速约为 1 m/s,由于苏北浅

研究论文 • <u>Iim</u> ARTICLE

滩水深很浅,偏南风会使水体向北流动,进而将南

部的暖水带到苏北浅滩,使其 SST 升高。



图 10 1982-2016 年黄渤海春季风速

Fig. 10 Distribution of wind speed in spring from 1982 to 2016 (a. data from NCEP; b. data from ERA-Interim) 注: a: NCEP; b: ERA-Interim

同时, 做出 1982—2016年风速的长期变化趋势, 然后乘以年数 34, 得到其在此 34 年见风速异常的变 化总量(如图 11), 由图中可以看出 1982—2016 年, 黄海大部分海域整体表现为偏南风异常, 其中, 大 值区分布在长江口及苏北浅滩海域, 最大变率超过 了 1 m/s, 南风增强使北向的平流热输送增强, 从而 使苏北浅滩及长江口海域春季 SST 呈现出长期升温 的趋势。另一方面, 经向风速的增强也使得该海域向 上的感热及潜热增加, 亦使该海区向下的净热通量 减小,得热减小,这也是该海域净热通量呈现长期 减小趋势的一个原因。

综上所述,苏北浅滩及长江口附近海域春季 SST 的升温趋势主要与春季经向风速长期的增强趋 势有关:南风异常的出现使南向的冷平流减弱,北向 的热平流增强,从而使该海域 SST 温度升高,在此过 程中,风速的增强与海气温差的增大使向下的净热通 量减小,故净热通量抑制了 SST 的升温过程,而前冬 海温主要是对春季 SST 的年代际振荡产生重要影响。



图 11 1982—2016 年黄渤海春季风速异常变化总量

Fig. 11 Distribution of integrated wind speed anomaly in spring from 1982 to 2016 (a. data from NCEP; b. data from ERA-Interim) 注: a: NCEP; b: ERA-Interim

Marine Sciences / Vol. 43, No. 1 / 2019

研究论文 • ┃ ____→ ARTICLE

4.2 大尺度海气指数的影响

黄渤海的经向风速受到大尺度海气指数的调控, 其中,影响欧亚大陆最重要的海气指数之一是PDO。 对春季黄渤海经向风速与PDO指数做滞后相关,发现PDO指数超前春季经向风速 5 个月(即 11 月份 PDO 指数与来年春季 SST)达到了最大负相关(如图 12),最大负相关系数小于-0.4,且通过置信度为 95%的显著性检验,说明当 PDO 负相位时,对应黄海西岸经向风速增强;对1981—2016年11月份PDO 指数作时间序列发现(图13),在1981—2016年,11月 PDO 指数存在长期降低的变化趋势,说明 PDO 指数 的降低导致了春季经向风速的增强,从而增强了北向的平流热输送,使苏北浅滩及长江口海域 SST 温 度升高。



图 12 PDO 指数超前春季经向风速 5 个月相关系数

- Fig. 12 Distribution of correlation coefficient between meridional wind speed and PDO index that lead wind speed five months (a. wind speed data from NCEP; b. wind speed data from ECMWF; the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level)
- 注: a: PDO 指数与 NCEP 春季经向风速相关; b: PDO 指数与 ECMWF 春季经向风速相关, 阴影部分超过置信度为 95%的显著性检验





同时,将 1981—2016 年春季经向风速与 AO 指数作滞后相关后发现(图 14),AO 指数超前春季经向风速 5 个月(即 11 月份 PDO 指数与来年春季 SST)达到最大正相关,最大相关系数超过了 0.4,且通过置信度为 95%的显著性检验,说明当 AO 正相位时,对应黄海西岸经向风速的增强;做出 1981—2016 年

AO 指数的时间序列(如图 15),发现期间 AO 指数表现出线性增加的趋势,说明促使苏北浅滩及长江口海域春季 SST 年际升温的另一重要因素是 AO 指数,AO 指数的增加导致了春季经向风速的增强,从而增强了北向的平流热输送,使该区域 SST 温度升高。

5 总结

在 1982—2016 年, 苏北浅滩及长江口海域春季 SST 主要呈现出从南至北、从近岸至离岸升温趋势 逐渐减小的特征, 其中长江口附近海域升温速率最 大。进一步研究发现, 苏北浅滩及长江口附近海域春 季 SST 的长期升温趋势主要与该海域春季南风的增 强有关:南风增强使南向的冷平流减弱, 北向的热平 流增强, 从而使该海域 SST 升温;同时,由长江径流 所产生的平流热输送亦呈现出长期增加的趋势, 其可 通过潮致 Stokes 漂流影响至 33.5°N 以南海域, 故长江 径流对该海域春季 SST 长期变化趋势的影响主要局 限在长江口附近海域及苏北浅滩南部部分海域。





- Fig. 14 Distribution of correlation coefficient between meridional wind speed and AO index that lead wind speed six months (a. wind speed data from NCEP; b. wind speed data from ECMWF; the shading denotes regions that are statistically significant at 95% confidence level)
 - 注: a: AO 指数与 NCEP 春季经向风速相关; b: AO 指数与 ECMWF 春季经向风速相关, 阴影部分超过置信度为 95%的显著性检验





进一步的研究发现,春季经向风速的年际及年 代际变率又与 PDO、AO 指数有关,其中,PDO 指数 与经向风速呈现为负相关,AO 指数与经向风速呈现 正相关,AO 指数的增加及 PDO 指数的降低趋势使得 春季南风增强。

对苏北浅滩及长江口附近海域的净热通量进行 分析后发现,在 1984—2010 年,净热通量表现为逐 渐降低的趋势,即海洋得热趋于减少,失热趋于增 加,故其对该海域的长期升温趋势起到了抑制作用; 进一步的分析后认为,经向风速的增加主要是通过 两种方式影响该区域净热通量的长期变化趋势,一 是风速的增强使得向上的潜热通量增加,造成向下 的净热通量减少,海洋得热减少;二是经向风速的 增加使北向的平流热输送增强,造成该海域 SST 升 高,海气温差增大,从而造成向上的潜热通量增加,向下的净热通量减小,海洋得热减少。此外,对该海域前冬海温进行分析后发现,其主要是对春季 SST的年代际振荡产生重要影响,主要体现为 1982—1999 年的升温及 2000—2016 年的降温过程,然而, 其对来年春季的长期升温过程并未产生明显的影响。

本文选取 1982 年至 2016 年作为研究苏北浅滩 及长江口海域 SST 长期变化趋势的时间窗口,在该 时间段内该海域呈现出明显的升温趋势,由于研究 时段较短,故并不代表其在更长的时间窗口内亦呈 现出如此明显的升温特征,其有可能只是某一年代际 振荡的某一组成部分,而更长时间尺度的升温趋势特 征还需要结合更长时间序列的 SST 数据进行分析。

由于缺少苏北浅滩及长江口附近海域海流长时间 序列的记录数据,本文只能基于风应力计算出对应的 海流,进而计算出该海域的平流热输送,由于在此计 算过程中应用了很多经验公式,因此其对于平流热 输送的估算必定存在较大误差,关于该区域海流具 体的长期变化特征,还需要在以后的工作中加强该海 域海流的长期观测,进而对本文的结论加以分析验证。

参考文献:

 赵松龄.苏北浅滩成因的最新研究[J].海洋地质与 第四纪地质, 1991, 11(3): 105-112.
 Zhao Songling. The latest study on origin of the north Jiangsu shoal[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(3): 105-112.

 [2] 韦钦胜,于志刚,冉祥滨,等.黄海西部沿岸流系特 征分析及其对物质输运的影响[J].地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156.
 Wei Qinsheng, Yu Zhigang, Ran Xiangbin, et al. Charcontrainties of the number of the number of the number.

acteristics of the western coastal current of the yellow sea and its impacts on material transport[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 145-156.

- [3] 张志欣,郭景松,乔方利,等.苏北沿岸水的去向与 淡水来源估算[J].海洋与湖沼,2016,47(3):527-532.
 Zhang Zhixin, Guo Jingsong, Qiao Fangli, et al. Whereabouts and freshwater origination of the Subei coastal water[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(3): 527-532.
- [4] 王然,于非,司广成.淮河流域 5—6 月降水的年际及年代际变化[J].海洋科学,2014,38(2):1-5.
 Wang Ran, Yu Fei, Si Guangcheng. Inter-annual and inter-decadal variations of precipitation anomalies during May to July in the Huaihe River Valley[J]. Marine Sciences, 2014, 38(2): 1-5.
- [5] 吴晓丹,宋金明,李学刚.长江口邻近海域水团特征 与影响范围的季节变化[J].海洋科学,2014,38(12): 110-119.

Wu Xiaodan, Song Jinming, Li Xuegang. Seasonal variation of water mass characteristic and influence area in the Yangtze Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 110-119.

- [6] Dongliang Yuan, Yao Li, Bin Wang, et al. Coastal circulation in the southwestern Yellow Sea in the summers of 2008 and 2009[J]. Continental Shelf Research, 2017, 143(2017): 101-117.
- [7] 周晓英, 胡德宝, 王赐震, 等. 长江口海域表层水温的季节、年际变化[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 357-362.

Zhou Xiaoying, Hu Debao, Wang Cizhen, et al. Seasonal and Interannual SST Var iations in the Changjiang Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(3): 357-362.

- [8] Naihao Ye, Zhimeng Zhuang, Xianshi Jin, et al. China is on the track tackling Enteromorpha spp forming green tide[J]. Nature Precedings, 2008, 2352(1): 1-11.
- [9] Chuanmin Hu, Daqiu Li, Changsheng Chen, Jianzhong Ge, et al. Recurrent ulva prolifera blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C5): C05017.
- [10] 刘峰,逢少军. 黄海浒苔绿潮及其溯源研究进展[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(3): 441-449.
 Liu Feng, Pang Shaojun. Research advances on green tides in the Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(3): 441-449.
- [11] Xu Q, Zhang H Y, Ju L, et al. Interannual variability of Ulva prolifera blooms in the Yellow Sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12): 4099-4113.
- [12] Sang-Wook Yeh, Cheol-Ho Kim. Recent warming in the

Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(13): 1428-1434.

- [13] 谭红建,蔡榕硕,黄荣辉.中国近海海表温度对气候变暖及暂缓的显著响应[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 500-507.
 Tan Hongjian, Cai Rongshuo, Huang Ronghui. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus[J]. Climate Change Reasearch, 2016, 12(6): 500-507.
- [14] Kyung-Ae Park, Eun-Young Lee, Eunmi Chang, et al. Spatial and temporal variability of sea surface temperature and warming trends in the Yellow Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2015, 143(2015): 24-38.
- [15] 蔡榕硕,陈际龙,谭红建. 全球变暖背景下中国近海 表层海温变异及其与东亚季风的关系[J]. 气候与环 境研究, 2011, 16(1): 94-104.
 Cai Rongshuo, Chen Jilong, Tan Hongjian. Variations of the Sea Surface Temperature in the Offshore area of China and their relationship with the east asian monsoon under the global warming[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(1): 94-104.
- [16] 蔡榕硕,陈际龙,黄荣辉. 我国近海和邻近海的海洋 环境对最近全球气候变化的响应[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1019-1033.

Cai Rongshuo, Chen Jilong, Huang Ronghui. The Response of marine environment in the offshore area of China and its adjacent ocean to recent global climate change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 1019-1033.

- [17] W Zhou, X Wang, T. J. Zhou, et al. Interdecadal variability of the relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO[J]. Meteorol Atmos Phys, 2007, 98(3): 283-293.
- [18] 朱益民,杨修群.太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 641-654.
 Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China[J]. Acta Meteologica Sinica, 2003, 61(6): 641-654.
- [19] 董仕,肖子牛.冬季北极涛动对东亚表面温度的持续 异常影响[J]. 应用气象学报, 2015, 26(4): 422-431.
 Dong Shi, Xiao Ziniu. The persistent impact of winter arctic oscillation on the east asia surface air temperature[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(4): 422-431.
- [20] Wang Lin, Chen Wen, Huang Ronghui. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the east Asian winter monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(L20702): 1-4.
- [21] 陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 634-641.

Chen W, Lan X Q, Wang L, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia[J]. Chin Sci Bull, 2013,



58(8): 634-641.

- [22] 齐庆华, 蔡榕硕, 张启龙. 源区黑潮热输送低频变异 及其与中国近海 SST 异常变化的关系[J]. 台湾海峡, 2010, 29(1): 106-113.
 Qi Qinghua, Cai Rongshuo, Zhang Qi-long. Low-frequency variability of the heat transport in source area of Kuroshio and its relation to SST in China seas[J]. Jornal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, 29(1): 106-113.
- [23] Wei hao, Shi Jie, Lu Youyu, et al. Interannual and longterm hydrographic changes in the Yellow Sea during 1977-1998[J]. Deep-Sea Research II, 2010, 57(11-12): 1025-1034.
- [24] Taewook Park, Chan Joo Jang, Johann H, et al. Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(1): 15-22.
- [25] 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(增刊): 21-28.

Song Dehai, Yu Huaming, Bao Xianwen. Analysis of interannual variability of the eastern China seas and its adjacent seas surface temperature[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(Sup.): 21-28.

- [26] Stocker, T F, D Qin, et al. IPCC, Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge University Press, 2014: 261-262.
- [27] Liu Na, Wu Dexing, Lin Xiaopei, et al. Seasonal variations of air-sea heat fluxes and sea surface temperature in the northwestern Pacific marginal seas[J]. Acta Oceanol Sin, 2014, 33(3): 101-110.
- [28] Large, W G, S Pond. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong Winds[J]. J Phys Ocean, 1981, 11(3): 324-336.
- [29] Wu Hui, Shen Jian, Zhu Jianrong, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast[J]. Continental Shelf Research, 2014, 76(2014): 108-123.

Long-term warming trend of sea surface temperature in spring in the Subei Bank and the Changjiang Estuary

SUN Fan^{1, 2, 3}, YU Fei^{1, 2, 3, 4, 5}, SI Guang-cheng^{1, 2, 3}, PAN Jun^{1, 2, 4, 6}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. Laboratory for Ocean Dynamic and Climate, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 6. Center for Marine Environmental Engineering, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 6. Center for Marine Environmental Engineering, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Nov. 4, 2018

Key words: the Subei Bank; SST; warming trend; meridional wind; Pacific decadal oscillation (PDO); Arctic oscillation (AO)

Abstract: During the spring of 1982 to 2016, the sea surface temperature (SST) in the Subei Bank and the Changjiang Estuary featured the following characteristics: the warming trend in the south was larger than that in the north, while the warming trend in the coastal sea was larger than that in the sea basin, with the Changjiang Estuary exhibiting the largest warming. The long-term warming trend in the Subei Bank and the Changjiang Estuary was closely associated with the strengthened meridional heat transport and the strengthened heat transport by the Changjiang River. Moreover, the inter-annual and inter-decadal variations of the southern wind speed was positively correlated with the Arctic oscillation (AO) index and negatively correlated with the Pacific decadal oscillation (PDO) index. The increase of AO index and the decrease of PDO index strengthened the south wind and then caused the increase of SST in the Subei Bank and the Changjiang Estuary. During this process, the net heat flux played an inhibitory role, and the temperature in the previous winter primarily influenced the inter-decadal oscillation of SST in spring, which primarily appeared as the increase of SST from 1982 to 1999 and the decrease from 2000 to 2016.

(本文编辑:丛培秀)