

DOI: [10.3724/j.1007-6336.2025-0077](https://doi.org/10.3724/j.1007-6336.2025-0077)

# 北黄海夏季表层冷水时空变化特征及影响机制

师凌媛<sup>1,2</sup>, 赵 蹇<sup>2</sup>

(1.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 本研究基于 1982—2023 年超高分辨率 OSTIA 海表温度 (SST) 数据, 揭示了北黄海夏季 SST 时空演变特征, 为北黄海生态环境演变评估提供量化依据。结果显示: 研究区域 SST 以  $(0.28 \pm 0.10) ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  的速率显著升高, EOF 分析表明主模态 (81.57% 方差) 呈全域同相变化, 次模态 (6.77%) 表征为内部-沿岸反相振荡。北黄海夏季表层冷水现象稳定分布于西朝鲜湾、长山群岛、成山角锋面区及渤海海峡, 其中西朝鲜湾冷水区最为显著。基于温度阈值法的统计表明, 1982—2023 年该区域冷水面积呈显著年代际缩减趋势  $[(-4\,497.90 \pm 9.59) \text{ km}^2/10 \text{ a}]$ 。驱动机制解析表明, 除潮混合与潮致上升流的主导作用外, 北黄海夏季净热通量的衰减  $[-4.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$  是导致表层冷水呈缩减趋势的重要因素, 而经向风应力减弱无法有效调控表层冷水面积。

**关键词:** 北黄海; SST; 表层冷水; EOF

中图分类号: P731.11

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)01-0136-09

## Temporal and spatial variation characteristics and influence mechanism of surface cold water in the North Yellow Sea in summer

Shi Lingyuan<sup>1,2</sup>, Zhao Qian<sup>2</sup>

(1.College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** This study investigates the spatial and temporal evolution characteristics of summer sea surface temperature in the North Yellow Sea using ultra-high-resolution OSTIA SST data from 1982 to 2023, providing quantitative basis for the assessment of regional ecological environment evolution. Results show that SST in the study area increased significantly at a rate of  $(0.28 \pm 0.10) ^\circ\text{C}$  per decade. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis indicates that the primary mode (81.57% variance) exhibits homogeneous warming across the entire region, while the secondary mode (6.77%) is characterized by an inland-coastal anti-phase oscillation. The summer surface cold water phenomenon in the North Yellow Sea is stably distributed in the West Korea Bay, the Changshan Archipelago, the Chengshanjiao frontal area and Bohai Strait. Among these, the cold water area in West Korea Bay is the most significant, and the statistics based on the temperature threshold method demonstrates a significant interdecadal shrinkage of the cold water area in this region from 1982 to 2023  $[(-4\,497.90 \pm 9.59) \text{ km}^2/10 \text{ a}]$ . Analysis of the driving mechanisms indicates that, alongside the dominant effects of tidal mixing and upwelling, the reduction in summer net heat flux across the North Yellow Sea  $[-4.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$  plays a critical role in driving the contraction of the surface cold water area. In contrast, the declining meridional wind stress component fails to significantly modulate the spatial extent of these cold

收稿日期: 2025-04-27, 修订日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42450181)

作者简介: 师凌媛 (2000—), 女, 河北张家口人, 硕士, 主要研究方向为近海环境动力学, E-mail: [sly121902a@163.com](mailto:sly121902a@163.com)

通信作者: 赵 蹇 (1978—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士, 主要研究方向为环境动力学, E-mail: [qzhao@nmemc.org.cn](mailto:qzhao@nmemc.org.cn)

water features.

**Key words:** North Yellow Sea; SST; surface cold water; EOF

海表温度(sea surface temperature, SST)是重要的海洋环境参数,也是了解海气相互作用的关键变量。作为气候变化的敏感区域,1980年以来中国近海各海区 SST 均呈现显著线性上升趋势,平均每 10 年增加 0.29 °C,其中 20 世纪 90 年代增温趋势最为显著,进入 21 世纪后增温趋势减弱<sup>[1-4]</sup>。过去几十年间,黄海 SST 呈现显著的年代际变化与上升趋势,特别是相对较浅的北黄海区域升温速率远超深水区域<sup>[5]</sup>,在此升温背景下,北黄海夏季表层冷水现象仍稳定存在。作为北黄海重要的海洋学现象之一,其局地低温特性可部分抵消气候变暖的生态影响,对海洋生态系统保护具有重要意义。

近几十年来,黄海夏季表层冷水现象的形成机制研究从观测数据分析到数值模拟,逐步构建起潮动力主导的多尺度耦合驱动理论框架。Lie<sup>[6]</sup>基于 CTD 剖面首次发现朝鲜西南沿岸表层冷水现象,得出该现象成因为潮汐混合效应的结论;赵保仁<sup>[7]</sup>通过卫星遥感影像进一步确认潮混合锋区与陆架锋面对表层冷水分布的调控作用;苏育嵩和苏洁<sup>[8]</sup>利用卫片资料分析了表层冷水现象的分布特征,初步完善了渤、黄海表层冷水中心的移动规律及其形成机制,并强调混合作用是朝鲜半岛一侧形成表层冷水的主要原因。21 世纪以来,随着数值模拟技术的发展,吕新刚<sup>[9]</sup>利用浪-潮-流耦合模型揭示了西朝鲜湾表层冷水是上升流与混合效应协同作用的产物;之后 Ren 等<sup>[10]</sup>基于潮汐强迫对比实验进一步定量解析了黄海潮致上升流和潮混合对表层冷水形成的贡献大小;利用经遥感 SST 数据检验的 HYCOM 模式数据研究结果表明,夏季黄海西南海域沿岸上升流的垂向流速对表层冷水也存在一定影响<sup>[11]</sup>。

北黄海位于成山角至朝鲜半岛长山岛北侧、渤海海峡东侧,该海域以浅水陆架为主,整体呈现北隆南凹的地形特征,海底地形从北、东、西 3 个方向向黄海的中央及东南方向倾斜。在复杂的地形框架下,夏季黄海暖流残余分支、沿岸

流与潮汐混合作用相互叠加构成流场结构,使得北黄海夏季 SST 场具有独特的空间特征。前人研究通过数值模型量化了潮混合与潮致上升流对北黄海表层冷水生成的主导作用,但其时空演变机制仍存在两个关键科学问题:其一,夏季北黄海表层冷水面积的长期演变规律尚未研究;其二,太阳辐射非均匀衰减与动力响应(经向风应力减弱)对冷水面积变化的定量权重尚未明晰。本研究整合卫星遥感及再分析数据资料,系统研究北黄海 SST、净热通量、风应力场等关键参数的时空分布特征,阐明夏季北黄海表层冷水面积的长期演变规律及其调控机制,为该海域各类海洋活动的开展以及应对气候变化政策的制定提供技术支持。

## 1 材料与方法

本研究使用的海表温度数据来自哥白尼海洋数据中心的 OSTIA(全球高分辨率业务化海表温度及海冰分析)数据集<sup>[12]</sup>。该数据集通过融合卫星遥感数据和现场实测数据构建,涵盖从 1982 年至今全球范围内的 SST 和海冰再分析数据,空间分辨率高达 0.05° × 0.05°。同时本研究还采用欧洲航天局海温气候变化计划(ESA SST CCI)与哥白尼气候服务计划(C3S)联合再处理的全球海表温度产品(空间分辨率为 0.05° × 0.05°),该数据集融合 (A)ATSR、SLSTR 及 AVHRR 系列卫星观测数据,具有长期稳定性。

风场及海表净热通量数据源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range weather forecasts,ECMWF)的 ERA5 再分析数据集<sup>[13]</sup>,空间分辨率为 0.25° × 0.25°。海表净热通量可近似表示为:

$$Q = Q_{ns} + Q_{nl} + Q_{lh} + Q_{sh} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为净热通量;  $Q_{ns}$  为海面净短波通量;  $Q_{nl}$  为海面净长波通量;  $Q_{lh}$  为潜热通量;  $Q_{sh}$  为感热通量,其中  $Q$  正值表示海面净得热,负值表示海面净失热。

风应力是风在海表单位面积上施加的平行

于海表的力。通过驱动海洋表层的埃克曼层流动,风应力旋度会引发埃克曼输运的辐聚或辐散,进而影响海洋的垂向运动(如上升流或下沉流)。本文选取海面 10 m 风速作为参考,单位接触面积上的风应力大小由以下经验公式进行估算:

$$\tau = \rho_{\text{air}} C_D |U_h| U_h \quad (2)$$

式中:  $\rho_{\text{air}}$  是大气的密度;  $C_D$  是无量纲拖曳系数;  $U_h$  是海面上方高度  $h$  处的风速;  $|U_h|$  是矢量的模。风应力旋度计算公式如下:

$$\text{curl}_z \tau = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \quad (3)$$

式中:  $\text{curl}_z \tau$  为绕  $z$  轴的旋度,其中正值表示气旋性风应力旋度,其作用下的 Ekman 抽吸可引起次表层冷水上涌,有利于上升流现象的形成;负值则表示反气旋性风应力旋度,可使表层海水向下运动从而抑制上升流现象的产生。

本研究垂向流速的计算基于哥白尼海洋数据中心的 GLORYS 再分析数据集<sup>[14]</sup>,该数据集空间分辨率为  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ 。基于质量守恒原理,忽略密度时间变化项( $\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx 0$ )的连续性方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为海水密度,由位温  $\theta$  和盐度  $S$  数据通过海水状态方程计算得到;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量;垂向流速  $w$  通过逐层垂直积分水平质量通量散度  $\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y}$  求解得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 北黄海 SST 时空变化特征

基于 OSTIA 数据集图 1a 和 SST CCI/C3S 数据集图 1b 得到 1982—2023 年北黄海夏季平均 SST 空间分布,结果显示两组数据集在北黄海区域的海温时空特征具有高度一致性( $r=0.99$ ,  $p<0.05$ ),42 年间北黄海夏季 SST 变化范围为  $18^\circ\text{C} \sim 23.8^\circ\text{C}$ ,空间分布差异特征显著:黄海中部海域稳定维持夏季高温核心区( $\text{SST}>22.5^\circ\text{C}$ ),其海表温度分布均匀,表现出较强的空间一致性;而西朝鲜湾( $124.5^\circ\text{E} \sim 126^\circ\text{E}$ ,  $38^\circ\text{N} \sim 39.5^\circ\text{N}$ )、长山群岛海域( $122.5^\circ\text{E} \sim 123.5^\circ\text{E}$ ,

$38.7^\circ\text{N} \sim 39.5^\circ\text{N}$ )、成山角锋面区( $122^\circ\text{E} \sim 123^\circ\text{E}$ ,  $37^\circ\text{N} \sim 37.5^\circ\text{N}$ )以及渤海海峡( $120.5^\circ\text{E} \sim 121.5^\circ\text{E}$ ,  $38^\circ\text{N} \sim 39^\circ\text{N}$ )等近岸海域,则存在多个特征性低温中心( $\text{SST}<21^\circ\text{C}$ ),北黄海夏季 SST 场整体表现为中部海域温度高、周边近岸温度低的空间分布特征。通过分析夏季北黄海 SST 标准偏差场发现,OSTIA 数据集图 1c 和 SST CCI/C3S 数据集图 1d 在研究区域内分别有 86.92% 和 86.42% 的网格点通过显著性检验( $p<0.05$ )。考虑到 OSTIA 数据集在时空覆盖的完整性(SST CCI/C3S 数据集仅覆盖 1982—2022 年)和数据质量控制方面的优势,本研究决定将 OSTIA 数据集作为后续研究的主要数据来源,以保障后续分析结果的准确性和稳定性。北黄海 SST 变异性呈现出明显的“近岸低—离岸高”(  $0.49^\circ\text{C} \sim 1.32^\circ\text{C}$  )梯度特征,中部海区的标准偏差普遍较大( $>0.8^\circ\text{C}$ ),而沿岸区域的标准偏差较小( $<0.7^\circ\text{C}$ ),异常高值区则位于朝鲜半岛大同江口附近(最大值  $1.32^\circ\text{C}$ )。

基于 1982—2023 年夏季(6—8 月)SST 气候态空间分布(图 2)分析,发现北黄海表层冷水呈现显著的季节内演化特征:6 月,随着太阳辐射增强,研究海域整体升温,西朝鲜湾、长山群岛海域、成山角锋面区以及渤海海峡等区域开始出现孤立冷水区;7—8 月,表层冷水区与周围暖水之间逐渐形成热力锋面,水平温度梯度最大达  $0.08^\circ\text{C}/\text{km}$  ( $p<0.05$ ),其空间形态与强度存在显著空间差异,其中西朝鲜湾表层冷水核心区( $124.4^\circ\text{E} \sim 124.7^\circ\text{E}$ ,  $38^\circ\text{N} \sim 39.1^\circ\text{N}$ )与周边海域温差超过  $-3.0^\circ\text{C}$ 。6—8 月,北黄海表层冷水边界温度阈值随季节进程变化不断升高,但其不规则斑状空间分布特征始终维持稳定,且各月间表现出高度的相似性,这种空间稳定性与海洋环流和地形密切相关:北黄海簸箕状地形形成天然的水动力屏障,能够直接约束冷水的空间分布,同时夏季黄海暖流残余暖水从东南向西北侵入,包裹冷水斑块,其水平平流热通量抑制冷水向外扩散。

对 1982—2023 年夏季北黄海 SST 场逐网格点进行线性回归分析,得到 42 a 间北黄海由这种线性趋势决定的 2023 年相对于 1982 年的 SST

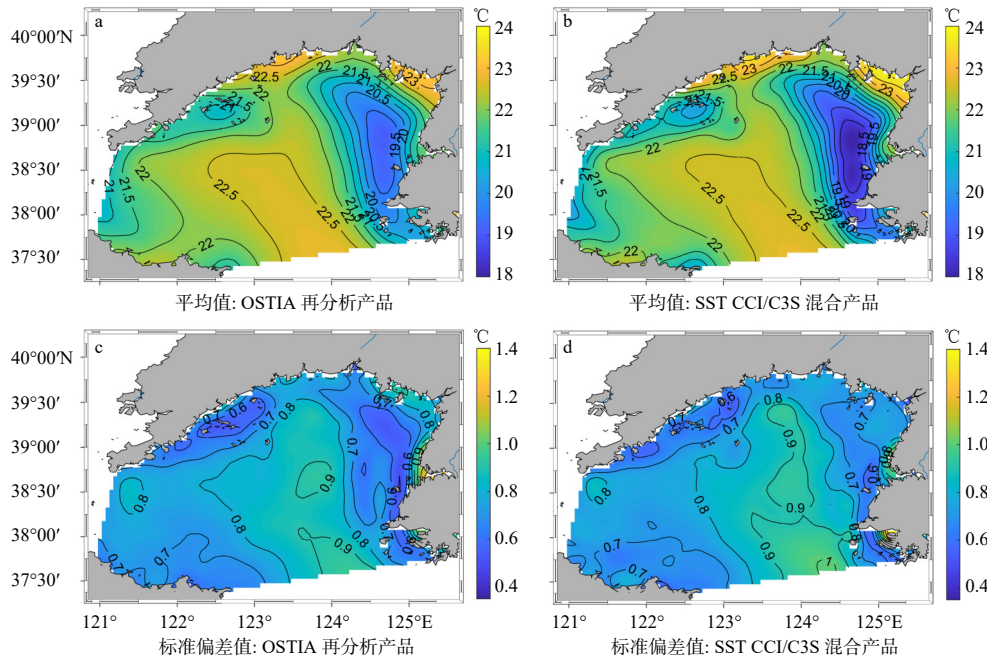


图 1 不同数据集 1982—2023 年北黄海夏季 SST 气候态空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of summer SST climatology in the Northern Yellow Sea from 1982 to 2023 based on different datasets

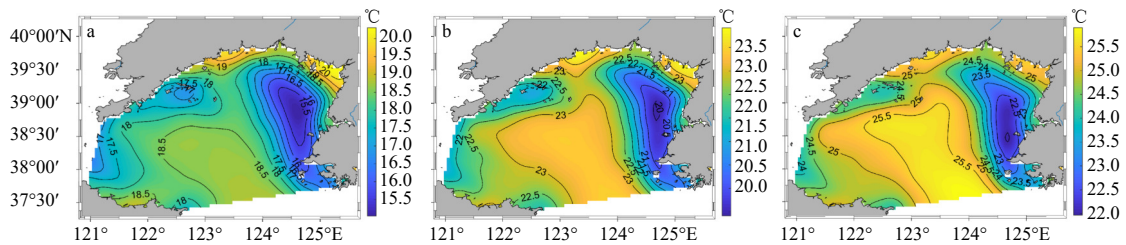


图 2 1982—2023 年北黄海 6 月(a)、7 月(b)、8 月(c) SST 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of SST in the Northern Yellow Sea in June (a), July (b), and August (c) from 1982 to 2023

改变量图 3a。结果显示,北黄海夏季 SST 长期变化呈现显著的空间分异特征,研究区域内 88.2% 的网格点通过显著性检验( $p < 0.05$ )。42 a 间北黄海 SST 变化幅度为  $-1.12^{\circ}\text{C} \sim 3.5^{\circ}\text{C}$ ,其中黄海中部海域升温最为显著,而西朝鲜湾表层冷水核心区呈现显著降温趋势。

由分区域时间序列图 3b 可知,1982—2023 年北黄海夏季 SST 平均值以  $(0.28 \pm 0.10)^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$  的速率显著上升( $p < 0.01$ ),超同期全球海洋升温平均速率( $0.15^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ )约 86.7%<sup>[15]</sup>;西朝鲜湾 SST 呈  $(0.20 \pm 0.10)^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$  ( $p < 0.01$ ) 的升温趋势,印证了海洋中大尺度热力强迫的主导作用;而表层冷水核心区 SST 变化速率为  $(-0.13 \pm$

$0.10)^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$  ( $p = 0.20$ ),说明该区域降温趋势在统计意义上并不显著,可能由自然变率主导。42 a 间北黄海夏季 SST 平均值范围为  $19.7^{\circ}\text{C} \sim 23.2^{\circ}\text{C}$ ,最高值出现在 2017 年,可能与该海域同期黑潮流速增强、热平流输送过程强化有关<sup>[16]</sup>,最低值则出现在 1993 年,与全球变暖的气候背景紧密相关。

本研究通过多种统计方法揭示了北黄海夏季 SST 的时空演变规律,基于网格点线性回归方法构建的 SST 线性趋势场(图 3)揭示了该海域长时间尺度下的热力分布特征。为了进一步解析北黄海夏季 SST 的主导变异模态,对 SST 场进行 EOF 分解,结果显示:前两个模态方差贡献

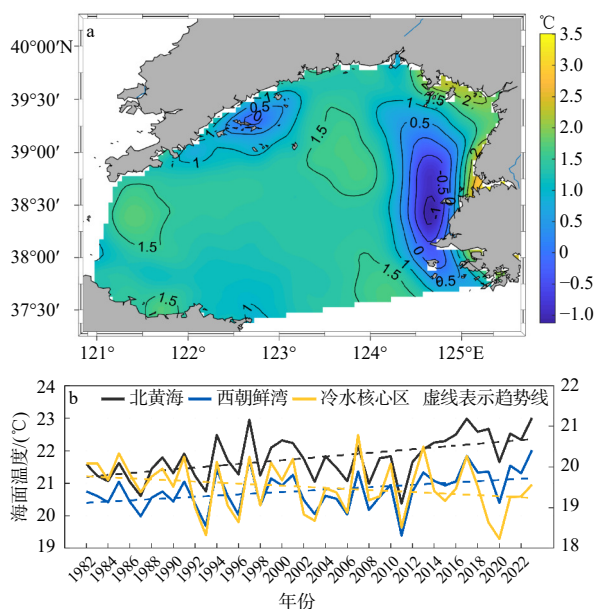


图 3 1982—2023 年北黄海夏季 SST 按线性趋势变化的改变量的空间分布(a)和时间序列及其线性变化趋势(b)

Fig. 3 Spatial distribution of changes in summer SST in the Northern Yellow Sea from 1982 to 2023 based on linear trends (a) and time series and their linear trends (b)

率达 88.34% ( $p < 0.05$ ), 其中第一模态贡献率为 81.57%, 主导区域热力变异格局, 第二模态贡献率为 6.77%, 表征次要信号。第一模态空间分布图 4a 呈现全域同相的正值分布特征, 表明 42 a 间北黄海全域的 SST 变化趋势具有很好的一致性, 该空间分布模式印证了全球变暖背景下北黄海热力响应的整体一致性。第一模态空间分布最大正值中心 ( $>0.7$ ) 位于北黄海中部, 说明该区域 SST 变化相对剧烈, 是热力变化的敏感区; 而西朝鲜湾和长山群岛海域表现为弱正值区, 说明其 SST 变化相对稳定, 表现出较强的热力稳定性。

第一模态时间系数图 4b 表明, 42 a 间北黄海夏季 SST 线性升温速率为  $(0.44 \pm 0.12) ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  ( $p < 0.01$ ), 伴随显著的年际振荡特征, 共检测到 1994 年、1997 年、1999—2000 年、2010 年、2012—2013 年、2016—2017 年及 2023 年 7 个暖相位峰值时段和 1987 年、1993 年、2003 年、2006 年、2008 年、2011 年、2020 年 7 个冷相位谷值时段,

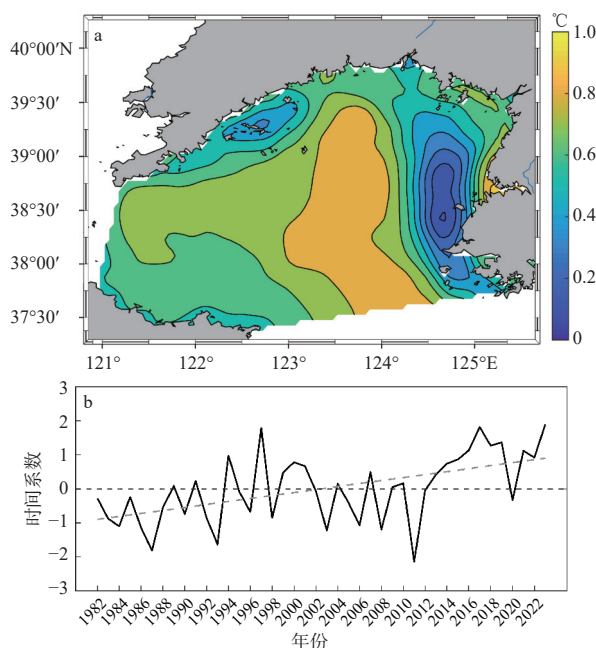


图 4 北黄海夏季 SST 第一模态空间分布(a)和时间系数(b)

Fig. 4 First spatial mode (a) and temporal mode (b) of summer SST in the Northern Yellow Sea

其中 1997 年和 2016 年极端暖异常事件分别对应强 El Niño 事件衰减年和超强 El Niño 事件爆发年, 而 2008 年和 2011 年冷相位谷值恰与拉尼娜事件及东亚冬季风增强期吻合<sup>[17]</sup>。

图 5 为第二模态空间分布及其对应的时间系数, 表征了北黄海 SST 变率的次主导模态。第二模态空间分布图 5a 虽保留与第一模态相似的纬度梯度特征, 但呈现出显著的经向偶极子结构: 以表层冷水核心区 ( $124.6^\circ\text{E}$ ,  $38.4^\circ\text{N}$ ) 为中心的正值区 (最大值为 0.70) 向外围递减, 在沿岸海域形成负值带 (最小值为 -0.66), 揭示了海区内部—近岸热力变异的反相位耦合关系。第二模态时间系数图 5b 整体上呈现显著的线性递减趋势 [ $(-0.41 \pm 0.12) ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $p < 0.01$ ], 与图 3b 中表层冷水核心区 42 a 降温趋势在时间维度上呈现同步性, 但后者未通过显著性检验。这种矛盾表明冷水核心区的微弱降温本质上是局地扰动信号 (第二模态方差贡献仅 6.77%), 其统计显著性易受大尺度升温背景 (第一模态方差贡献 81.57%) 的压制。

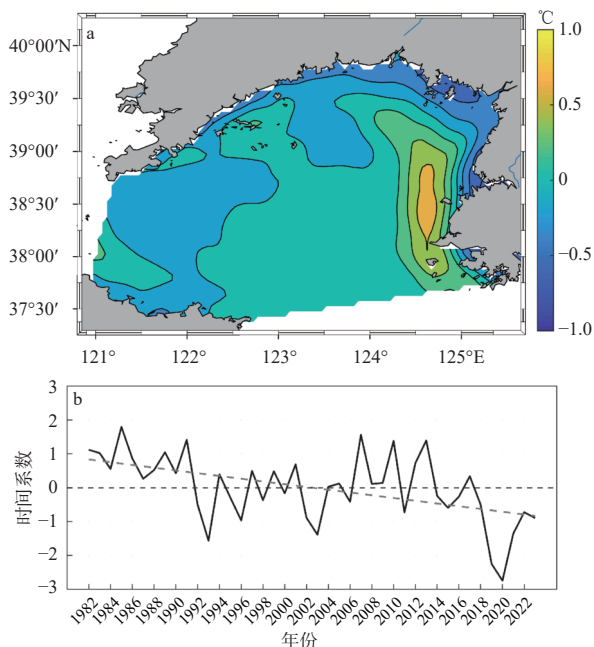


图 5 北黄海夏季 SST 第二模态空间分布(a)和时间系数(b)

Fig. 5 Second spatial mode (a) and temporal mode (b) of summer SST in the Northern Yellow Sea

## 2.2 北黄海表层冷水时空变化特征

夏季北黄海西朝鲜湾、长山群岛海域、成山角及渤海海峡(图 1)4 片海域均存在表层冷水现象,但其热力稳定性存在差异。判定稳定表层冷

水区的标准为:区域温度较沿岸和中部海区的温度低  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,尤其是冷水中心的最低温度比周围低  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>,4 片海域中仅西朝鲜湾冷水区同时满足上述双阈值条件,表明其热力稳定性最强,其他 3 个海域核心温差未达到显著水平。基于上述条件,本研究选取西朝鲜湾冷水区作为典型研究对象,采用温度梯度阈值法进行表层冷水区域界定:在  $123.5^{\circ}\text{E}$ — $125.7^{\circ}\text{E}$ 、 $37.7^{\circ}\text{N}$ — $40.0^{\circ}\text{N}$  范围内,以最低海温网格点为中心,向外扩展至  $\Delta\text{SST}\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为表层冷水边界,基于 1982—2023 年夏季及逐月(6—8 月)数据,生成表层冷水面积时间序列(图 6)。结果显示,夏季北黄海表层冷水面积演变具有显著的年代际相位转换特征,42 a 可划分为 4 个阶段:1982—1991 年 [ $(33550.75\pm 2\ 362.86)\text{ km}^2$ ] 和 1999—2013 年 [ $(27625.25\pm 4\ 706.04)\text{ km}^2$ ] 两个冷水面积较大的阶段;1992—1998 年 [ $(21525.54\pm 3\ 222.26)\text{ km}^2$ ] 和 2014—2023 年 [ $(13333.58\pm 3\ 288.99)\text{ km}^2$ ] 两个冷水面积偏小的阶段。夏季北黄海表层冷水面积年代际变化整体呈显著递减趋势,变化速率为  $(-4\ 727.00\pm 9.82)\text{ km}^2/10\text{ a}$  ( $p<0.01$ ),与北黄海全域 SST 年代际变化趋势具有较强的负相关关系 ( $r=-0.61$ ,  $p<0.05$ ),印证了热力平衡系统的内在关联性。

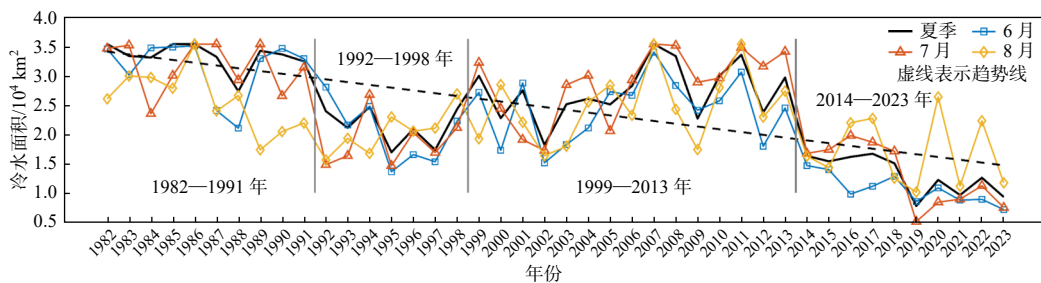


图 6 西朝鲜湾夏季 6 月、7 月、8 月表层冷水面积时间序列

Fig. 6 Time series of surface cold water area in the West Chosun Bay during June, July, and August

逐月分析表明,1982—2023 年夏季北黄海表层冷水面积呈季节内演化特征,6 月、7 月、8 月均值分别为  $(22\ 367.63\pm 8\ 771.44)\text{ km}^2$ 、 $(24\ 239.72\pm 9\ 011.88)\text{ km}^2$ 、 $(22\ 683.12\pm 6\ 365.64)\text{ km}^2$ ,季节内变幅较小,空间覆盖面积保持稳定,证实冷水空间形态稳定性非季节性因素主导。而冷水面积缩减速率呈现显著的月份依赖性:6 月消减速率

最大 [ $(-5\ 111.30\pm 10.03)\text{ km}^2/10\text{ a}$ ,  $p<0.01$ ],7 月次之 [ $(-3\ 809.06\pm 11.24)\text{ km}^2/10\text{ a}$ ,  $p<0.01$ ],8 月最缓 [ $(-1\ 834.678\pm 9.884)\text{ km}^2/10\text{ a}$ ,  $p<0.01$ ]。

## 2.3 表层冷水时空演变机制

### 2.3.1 净热通量

对 1982—2023 年夏季北黄海净热通量场逐网格点进行线性回归分析,得到 42 a 间北黄海由

这种线性趋势决定的2023年相对于1982年的净热通量改变量(图7a)。结果表明,北黄海夏季净热通量变化呈现显著的空间差异:北黄海42 a净热通量变化范围为 $-42.36 \sim 10.13 \text{ W/m}^2$ ,其中中部海域变化范围为 $-36.1 \sim 0.00 \text{ W/m}^2$ ,而西朝鲜湾与江华湾之间岬角处存在局地弱正异常,变化范围为 $0.00 \sim 5.49 \text{ W/m}^2$ 。夏季北黄海净热通量线性衰减趋势与同期SST升温速率( $0.28 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ )呈现长期解耦特征,说明净热通量并非驱动北黄海SST升高的主控因子。已有研究表明,近几十年北黄海SST的升高更多受控于海洋平流过程(如黄海暖流输送变异)而非局地辐射强迫<sup>[18]</sup>。

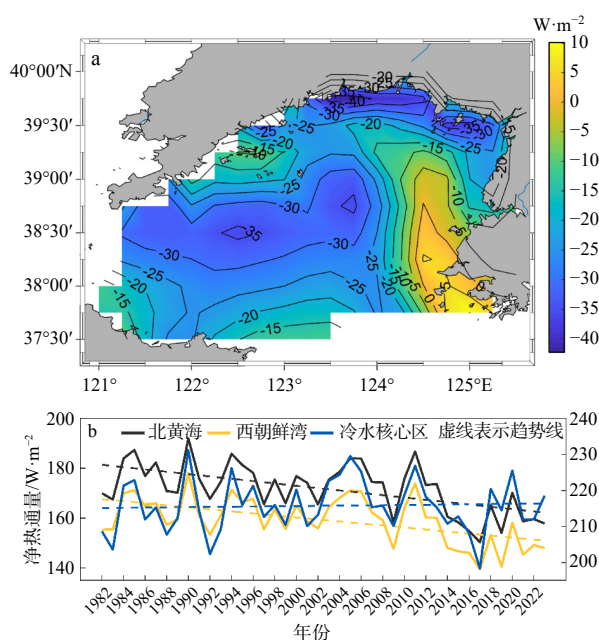


图7 1982—2023年北黄海夏季净热通量按线性趋势变化的改变量的空间分布(a)、时间序列及线性变化趋势(b)

Fig. 7 Spatial distribution of changes in summer net radiation flux in the Northern Yellow Sea from 1982 to 2023 based on linear trends (a) and time series and their linear trends (b)

由1982—2023年夏季北黄海表层净热通量分区时序分析(图7b)可知,北黄海和西朝鲜湾净热通量分别以 $(-4.68 \pm 0.37) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$ 、 $(-4.05 \pm 0.36) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$  ( $p < 0.01$ )的速率下降,而表层冷水核心区呈现微弱增加趋势 $[(0.30 \pm 0.35) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$ ,  $p = 0.39$ ,表明其局地热力异常难以抵消区域尺度辐射背景的衰减。通过EOF分解发现,净热通

量场前3个模态方差贡献率分别为82.24%、4.46%和3.22%,其中只有第一模态(图8)通过显著性检验( $p < 0.01$ ),其模态空间分布呈现“四低三高”特征:西朝鲜湾近岸、长山群岛、渤海海峡西口及成山角锋面区构成的四边形低值区,其净热通量( $3.88 \sim 8.74 \text{ W/m}^2$ )明显低于中部海区( $14.85 \text{ W/m}^2$ )、铁山郡近岸( $15.27 \text{ W/m}^2$ )和鸭绿江口( $14.61 \text{ W/m}^2$ )形成的高值核心区。第一空间正模态对应时间系数的显著负趋势 $[-0.50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$ ,  $p < 0.05$ 与北黄海净热通量线性递减趋势耦合,印证了全海域净热通量的整体衰减。

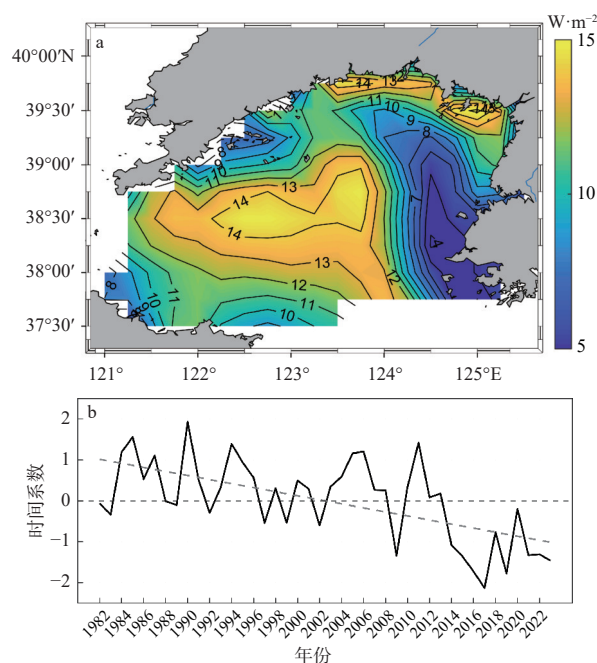


图8 北黄海夏季净热通量第一模态空间分布(a)和时间系数(b)

Fig. 8 Spatial first mode (A) and temporal mode (B) of net heat flux in the Northern Yellow Sea during summer

北黄海西朝鲜湾夏季表层冷水的形成与维持依赖于海洋垂向层化结构,其由太阳辐射升温与风混合共同作用形成的上均匀暖层和中部温度跃层,以及下层冷水共同组成,若此垂向热结构遭破坏(如跃层强度减弱或混合层加深),表层冷水将难以稳定存在<sup>[8]</sup>。研究时段内表层冷水面积与北黄海整体海域净热通量呈正相关关系( $r = 0.66$ ,  $p < 0.05$ ),揭示净热通量衰减导致北黄海夏季海水层化结构衰退,通过动力路径抑制冷水发展:一方面是热存储机制的改变,即海洋将吸

收的太阳热量贮存在海洋表层, 形成上均匀暖层, 太阳热输入的减少削弱了海洋表层暖水层<sup>[19]</sup>, 导致垂向热再分配效率的降低; 另一方面是层化稳定性下降, 即温度跃层强度减弱抑制了表层冷水与周边水体的隔离效应, 加速其热耗散<sup>[20]</sup>, 不利于表层冷水面积扩大, 北黄海海表净热通量的减弱通过动力机制能够抑制表层冷水的扩展。

### 2.3.2 风应力

基于 ERA5 再分析数据获取的 1982—2023 年夏季北黄海气候态风场(图 9)表明: 该海域夏季盛行偏南风, 平均风速呈显著海陆梯度分布, 变化范围为 0.67~6 m/s, 北黄海中部海域风力较大(>4.5 m/s), 沿岸海域风速一般在 3.5 m/s 以下。1976 年气候跃变后, 东亚夏季风指数呈现持续衰减趋势<sup>[21]</sup>, 由 ERA 再分析数据得到的 1982—2023 年夏季经向风场时间序列(图 10a)也呈微弱下降趋势 [ $-0.07 \pm 0.08$  m/s,  $p=0.36$ ], 但下降趋势并不显著, 与先前的研究结果相符合<sup>[22]</sup>。1982—2023 年, 夏季北黄海西朝鲜湾的表层冷水面积以  $-4\ 727.0\ \text{km}^2/10\ \text{a}$  的速率缩减, 与经典埃克曼输运理论预期(风应力减弱应驱动冷水扩张)相悖。这一反常现象的核心机制在于: 一方面夏季北黄海受太阳辐射加热, 叠加黄

海暖流残留的暖水通过水平平流侵入西朝鲜湾, 直接覆盖局地可能的冷水上涌信号, 即便底层存在弱上升流, 其低温特性也会被表层暖水迅速稀释; 另一方面夏季北黄海温跃层抑制海水垂向混合, 阻碍底层冷水突破层结到达表层。42 a 间表层海水升温效应量级远超风应力驱动的潜在冷却作用, 北黄海西朝鲜湾表层冷水面积的缩减更多地反映热平流与层结的联合作用, 而非单纯的风应力响应。

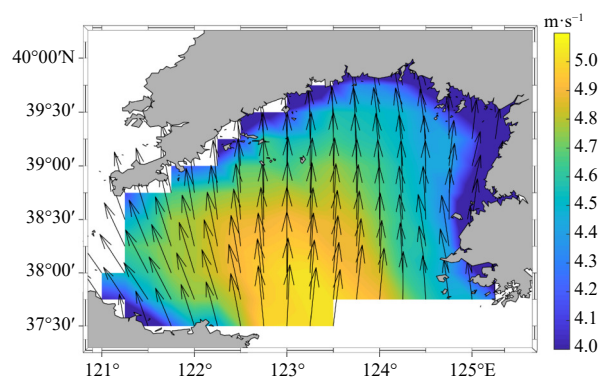


图 9 1982—2023 年北黄海夏季平均风场空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of average wind fields in the Northern Yellow Sea during summer from 1982 to 2023

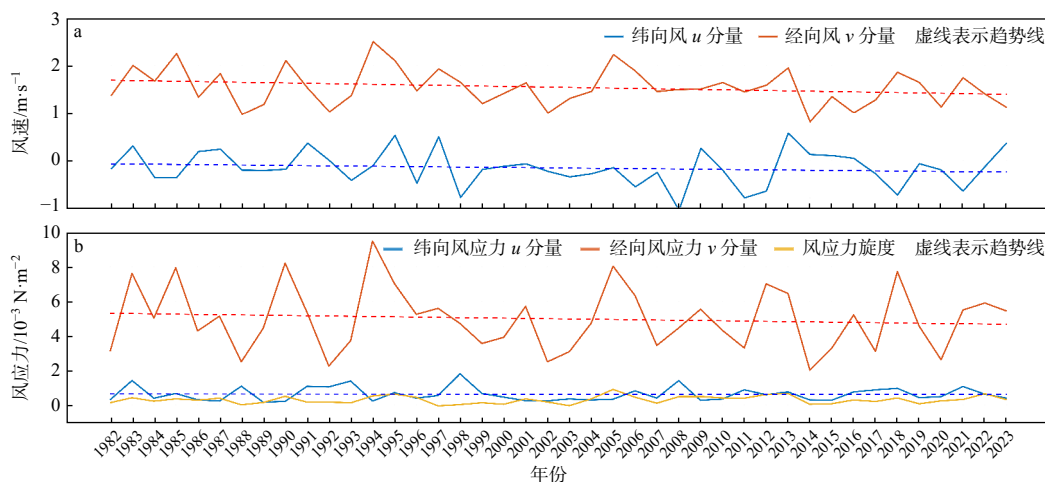


图 10 北黄海夏季风场时间序列(1982—2023 年)

Fig. 10 Time series of the summer wind field in the northern Yellow Sea (1982—2023)

上述分析表明, 尽管风应力减弱(图 10b)作为动力因子理应驱动冷水面积扩张, 但热力过程

(暖平流侵入与层结抑制)通过直接覆盖底层冷水上涌信号, 并借助温跃层抑制垂向混合。为厘

清动力过程在热力压制背景下的潜在调控作用,本研究基于 GLORYS 再分析流场数据,沿 124.6°E 经向断面(37.25°N—39.5°N)给出了垂向流速剖面图(图 11),发现 37.5°N、38.4°N、38.7°N 及 39.3°N 等纬度带存在 4 个持续性上升流,其最大流速(量级约为  $10^{-5}$  m/s)均位于次表层,而 38°N 与 38.5°N 纬度带附近出现两支下沉流,特别是 38°N 纬度带流速达  $6 \times 10^{-5}$  m/s,垂向流速量级与前人数值模拟结果一致<sup>[23]</sup>。这一现象表明了夏季层结强化对冷水动力过程的调控:上升流区受温跃层抑制,深层冷水上涌被限制在混合层底部,无法有效抵达海表补充低温水体;而下沉流区则通过暖水垂向输送与层结正反馈机制,进一步压缩冷水空间并削弱垂向混合效率。这种空间结果反映了暖平流侵入与背景环流的协同作用:南部暖水沿地形辐合下沉形成热屏障,不仅直接覆盖残余冷水核,还通过增强层结稳定性抑制湍流能量的垂向传递,使得风应力减弱后本应激发的动力冷却效应被热力过程完全压制。

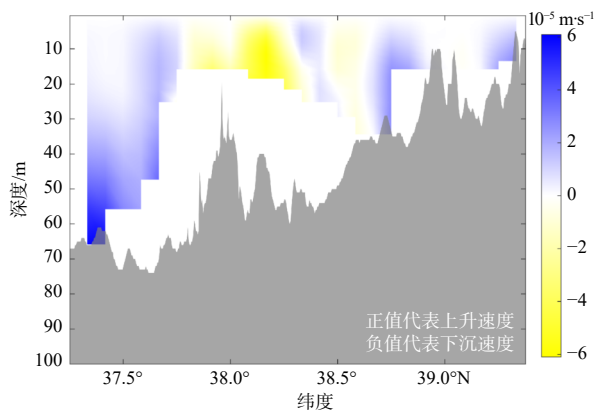


图 11 西朝鲜湾表层冷水中心 124.6°经向断面的多年平均垂向流速剖面

Fig. 11 Long-term mean vertical velocity profile along the 124.6°E meridional section across the surface cold water center in the West Korea Bay

### 3 结论

(1) 1982—2023 年,北黄海夏季平均 SST 以  $(0.28 \pm 0.10) ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  的速率显著上升,西朝鲜湾、长山群岛海域、成山角锋面区及渤海海峡存在

稳定的表层冷水现象,其中西朝鲜湾冷水现象最显著。EOF 第一模态显示全海域一致升温(方差贡献率为 81.57%),第二模态揭示内部—沿岸反相位变化。

(2) 1982—2023 年,北黄海西朝鲜湾夏季表层冷水面积呈年代际收缩趋势  $(-4\,497.90 \text{ km}^2/10 \text{ a})$ ,且存在明显的月份差异:6 月衰减速率最大  $[(-5\,111.30 \pm 10.03) \text{ km}^2/10 \text{ a}]$ ,8 月最小  $[(-1\,834.678 \pm 9.884) \text{ km}^2/10 \text{ a}]$ 。

(3) 北黄海夏季净热通量衰减  $[-4.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$  是导致表层冷水缩减趋势的重要因素 ( $r=0.66$ ),一方面削弱表层热存储能力,降低垂向热交换效率;另一方面减弱温跃层屏障效应,加速冷水热耗散。经向风应力分量减弱调控冷水面积的动力效应被暖平流和层结抑制掩盖,无法有效调控表层冷水面积。

### 参考文献:

- [1] 冯琳,林霄沛. 1945—2006 年东中国海海表温度的长期变化趋势 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 13-18.
- [2] 伍玉梅,徐兆礼,樊伟,等. 1985—2005 年东海海表温度时空变化特征分析 [J]. 海洋学报, 2011, 33(6): 9-18.
- [3] 张琪,龙景超. 东中国海海温在增暖停滞期的变化特征及成因分析 [J]. 海洋预报, 2021, 38(1): 78-82.
- [4] 张秀芝,袁越芳,吴迅英. 近百年中国近海海温变化 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 799-807.
- [5] Park K A, Lee E Y, Chang E, et al. Spatial and temporal variability of sea surface temperature and warming trends in the Yellow Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 143: 24-38.
- [6] Lie H J. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae [J]. *Progress in Oceanography*, 1986, 17(3/4): 229-242.
- [7] 赵保仁. 黄海潮生陆架锋的分布 [J]. 黄渤海海洋, 1987, 5(2): 16-23.
- [8] 苏育嵩,苏洁. 渤海、黄海夏季低温带及其形成机制初析 [J]. 海洋学报(中文版), 1996, 18(1): 13-20.
- [9] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [10] Ren S H, Xie J P, Zhu J. The roles of different mechanisms related to the tide-induced fronts in the Yellow Sea in summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(5): 1079-1089.

(下转第 155 页)