



黄海冷水团季节性变化对悬浮泥沙输运的影响

彭佳程, 王厚杰, 吴 晓

Seasonal variation of the Yellow Sea cold water mass and its impact on suspended sediment transport

PENG Jiacheng, WANG Houjie, and WU Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素

Grain size distribution pattern and influencing factors of suspended matters in the Southern Yellow Sea during summer season
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 49–60

山东半岛东北部海域悬浮体季节分布及控制因素

Seasonal distribution of suspended sediments in the water northeast to Shandong Peninsula and its controlling factors
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 30–42

南黄海西部日照近海悬浮泥沙分布、输运及控制因素

Distribution, transport and controlling factors of suspended sediment near Rizhao in the west of South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 36–49

南黄海西部日照至连云港海域的春季温跃层和化学跃层

Late spring thermocline and chemoclines in the area off the RizhaoLianyungang coast, western South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 22–32

庙岛海峡周边海域表层沉积物再悬浮及悬浮泥沙输运机制

Surface sediment resuspension and suspended sediment transportation mechanism in the waters around Miaodao Strait
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 9–24

中国东部陆架海锋面的时空变化及其对细颗粒沉积物输运和沉积的影响

Temporal and spatial variations of oceanic fronts and their impact on transportation and deposition of fine-grained sediments in the East China Shelf Seas
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 25–42



关注微信公众号，获得更多资讯信息

彭佳程, 王厚杰, 吴晓. 黄海冷水团季节性变化对悬浮泥沙输运的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 58-69.

PENG Jiacheng, WANG Houjie, WU Xiao. Seasonal variation of the Yellow Sea cold water mass and its impact on suspended sediment transport[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 58-69.

黄海冷水团季节性变化对悬浮泥沙输运的影响

彭佳程¹, 王厚杰^{1,2}, 吴晓^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 黄海冷水团是夏季黄海海域典型的水文现象, 对区域的环流结构、物质输运和生态系统有重要影响。基于黄海海域不同季节的水文观测数据及悬浮体实测资料, 结合 HYCOM 模型数据, 研究黄海冷水团季节性变化对悬浮泥沙输运的影响。结果表明, 黄海冷水团存在显著的季节性变化, 春季开始形成, 夏季最为发育, 夏末秋初开始衰减, 冬季消失。伴随着冷水团在秋冬季节的衰减, 其水文结构也发生调整, 表现为垂向温度梯度减弱, 温跃层的深度由 20 m 增加至 40 m, 边界处的温度锋面由 121°E 向东移动至 123°E。冷水团区域温跃层以及其边界处温度锋面的存在, 限制了悬浮泥沙在垂向上跨跃层与水平方向上跨锋面的扩散与输运。黄海冷水团的季节性变化对悬浮泥沙输运产生了重要影响, 导致近岸悬浮泥沙向东扩散范围增加, 冷水团底部悬沙浓度增加。

关键词: 冷水团; 悬浮体; 温跃层; 温度锋面; 黄海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041401

Seasonal variation of the Yellow Sea cold water mass and its impact on suspended sediment transport

PENG Jiacheng¹, WANG Houjie^{1,2}, WU Xiao^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques (Ministry of Education), Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) is a typical hydrological phenomenon in the Yellow Sea in summer, it has significant impacts on regional circulation system, material transport, and ecosystem. Based on the observation data of hydrological and suspended sediment concentration (SSC) in different seasons in the Yellow Sea, combined with HYCOM model data, the seasonal variations of the YSCWM and its impact on suspended sediment transport were investigated. The findings indicate notable seasonal variations in the YSCWM: emerging in spring, reaching its peak in summer, weakening from late summer to early autumn, and disappearing in winter. The hydrographic structure of the YSCWM also experiences adjustments as manifested by the reduction in vertical temperature gradient, the increase in thermocline depth from 20 m to 40m, and the movement of temperature front at boundary from 121°E to 123°E. The presence of thermocline and temperature fronts restricts the vertical diffusion and horizontal transport of suspended sediments across layers and fronts. These seasonal variations of the YSCWM lead to the expansion of the nearshore dispersion area of suspended sediments, the increase in SSC at the bottom of the YSCWM, and the decrease in SSC above the YSCWM.

Key words: cold water mass; suspended sediment concentration; thermocline; temperature front; the Yellow Sea

黄海是半封闭的陆架浅海, 西接渤海、南连东海(图 1), 是中国东部陆架海物质输运和能量交换的重要枢纽, 在中国东部海域悬浮沉积物输运过程中扮演关键角色^[1]。在冬季, 受强烈的北风驱动, 黄

海表层水体由北向南运动, 底部形成低温水体; 在夏季, 太阳辐射增强, 河流淡水输入量增多, 同时海洋动力引起的垂向混合较弱, 因此黄海上层水体存在较强的温度跃层, 而底部稳定存在以高盐低温为

资助项目: 国家自然科学基金“黄河口关键过程及物质输运协同效应重大科学考察实验研究”(42149301); 山东省泰山学者项目(ZR2018BD028, TSQN202211054); 山东省高等学校“青创团队计划”团队项目(2022KJ045); 中央高校基本科研业务费专项“人新世河口海岸”(202241007)

作者简介: 彭佳程(1999—), 男, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: 17860726291@163.com

通讯作者: 王厚杰(1972—), 男, 教授, 从事海洋沉积动力学研究, E-mail: hjwang@mail.ouc.edu.cn

收稿日期: 2024-04-14; 改回日期: 2024-05-30. 周立君编辑

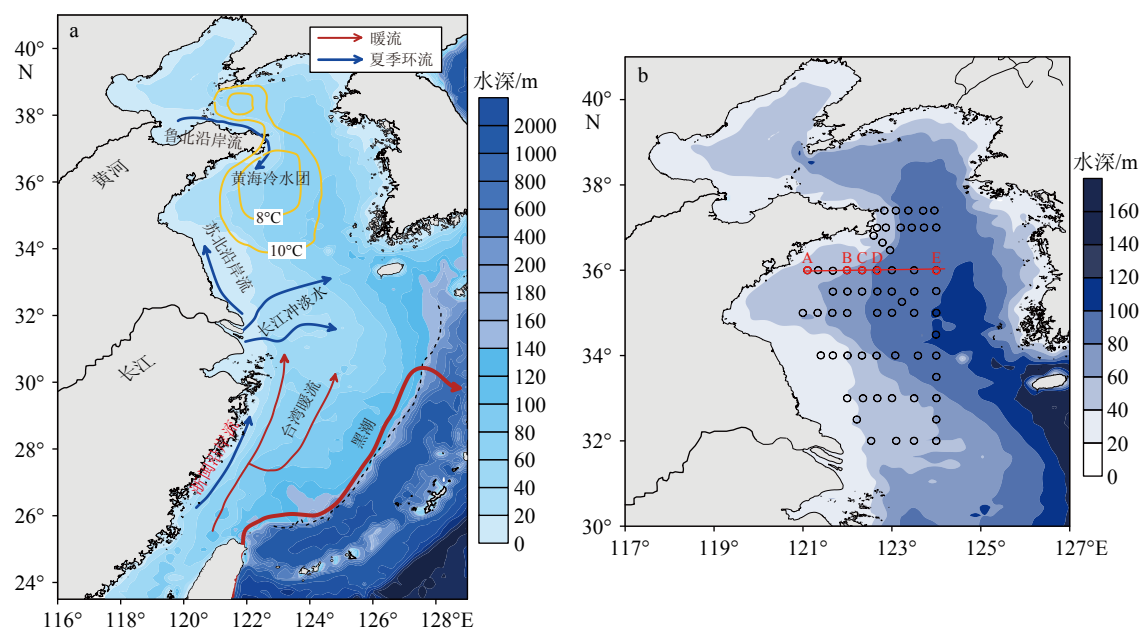


图1 研究区域地形 (a) 与观测站位及分析点位 (A-E) (b) 分布

a 图中黄色实线表示冷水团分布; b 图中黑色空心圆为 CTD 观测站位, 红色实线为 36°N 断面位置。夏季环流包括鲁北沿岸流、苏北沿岸流及长江冲淡水; 暖流包括台湾暖流和黑潮。

Fig.1 The distribution of terrain (a), observation stations, and analysis points (A-E) (b) in the study area

The deep yellow solid line represents the distribution of cold water masses; black hollow circles represent CTD observation stations; the red solid line indicates the position of the 36°N section. Circulation in summer includes: the coastal current of northern Shandong, the coastal current of northern Jiangsu, and the Yangtze River diluted water; warm currents include: the Taiwan Warm Current and the Kuroshio Current.

特征的冷水团^[2]。黄海冷水团是黄海海域典型的水文现象, 通常以 10℃ 等温线作为其边界范围^[2-3], 覆盖范围可达 13 万 km²。黄海冷水团的季节性变化显著, 一般在春季开始形成, 其强度和分布范围在夏季达到鼎盛, 在秋季逐渐衰弱直至完全消失^[3-7]。前人研究表明, 夏季温跃层的存在阻挡了热量的垂向传递, 是冷水团形成的热动力条件^[4]。同时, 冷水团的分布范围也受到潮混合的影响, 潮混合越强, 冷水团范围越小^[8]。此外, 数值模拟研究结果显示, 潮混合、地形、温跃层等对冷水团形成均有重要作用^[6-10]。

黄海中上层水体发育气旋型环流, 在气旋型环流的内部还存在反气旋型环流^[11-13]。由于夏季冷水团的存在, 黄海底层环流结构复杂, 目前仍未取得一致的认识。汤毓祥等^[14]认为底层环流是气旋型, 而 Yanagi 和 Takahashi^[9]认为底层是反气旋型环流。基于波浪-潮流耦合数值模拟结果, Xia 等^[15]指出黄海的水平环流存在 3 层结构, 上层为气旋式环流, 表层受夏季南风影响, 发育东北向流, 底层受余流影响发育较弱的南向流。针对夏季黄海海域气旋型环流的成因前人也开展了诸多研究, 赵保仁^[8]认为此气旋型环流是环绕黄海冷水团边界的地转

流。地转流由黄海海域海表高度差异引起^[16], 此时压强梯度力与科氏力平衡^[15]。Zhou 等^[17]认为气旋型环流具备准地转性质, 冷水团的存在引起水体密度的差异, 形成表层为气旋型、内部为反气旋型而跃层下方为反气旋型的涡流结构。

悬浮沉积物的输运、沉积与再悬浮过程对近海地貌演变具有十分重要的作用^[18-19]。基于现场观测、数值模型和卫星遥感等资料, 前人研究发现黄海悬浮体分布呈现显著的时空变化^[20-25]。从空间分布来看, 黄海悬浮体浓度的高值区域位于山东半岛成山头沿岸、苏北近岸以及长江口附近, 且悬浮体浓度由近岸向远海、由底层到表层逐渐降低。在时间分布上, 黄海悬浮体浓度具有显著的季节性变化, 冬季高夏季低。黄海悬浮体主要来自于动力作用下海底沉积物的再悬浮, 以及黄河、长江等沿岸河流的输入^[26-27], 受风浪和河流输入的季节性变化影响, 黄海悬浮体输运总体上呈现“夏储冬输”的特征^[28-30]。

冷水团作为黄海海域重要的水文现象, 影响着黄海夏季水体的环流结构, 进而影响夏季悬浮体的输运和沉积过程^[31]。研究结果证实, 夏季水体的强烈层化, 抑制了底层悬浮泥沙向上扩散, 导致南黄

海海域高浊度羽流基本消失^[32-33]。黄海冷水团的季节性变化,能够改变区域水体结构和动力环境,并将最终影响悬浮体的输运。虽然前人已经进行了相关的研究,但冷水团动力结构的调整如何影响悬浮体输运尚不明确,遥感反演手段对悬浮泥沙的研究也仅局限于表层,底部悬浮体输运以及冷水团的影响机制仍不清楚。本文在前人研究基础上,利用航次实测数据,结合 HYCOM(The Hybrid Coordinate Ocean Model)数值模式结果,揭示了不同季节黄海冷水团水文结构及动力的变化,探讨了黄海冷水团季节性变化对悬浮泥沙输运的影响。

1 数据和方法

1.1 观测数据

2015 年夏季和 2022 年秋季国家自然科学基金委渤海海洋综合考察航次在黄海开展了大面站调查,站位分布见图 1b。每个站位通过 Seabird 911 plus CTD 进行了海洋水文观测,获取了垂向温度、盐度、密度、压力等剖面数据,根据站位水深情况,每个站位设置 3~6 个采水层,采集了分层海水样品。

在实验室,采用直径为 47 mm、孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维双滤膜对分层采集的水体样品开展现场抽滤实验。滤膜需要预先进行处理,将上膜与下膜称重并记录。每次根据水体的浑浊程度用量筒称量 0.5~3 L 体积的水进行抽滤,抽滤时用蒸馏水洗盐 3 次。抽滤的滤膜在温度为 45°C 的烘箱内烘干 24 h,采用精度为十万分之一克的电子天平进行称重。根据称重所得的悬浮体质量与抽滤水样体

积计算悬浮体浓度。

悬浮体浓度计算公式如下:

$$\text{SSC} = \frac{(W_{a2} - W_{a1}) - r}{V} \quad (1)$$

$$r = W_{b2} - W_{b1} \quad (2)$$

其中,SSC 为悬浮体浓度,单位是 mg/L; V 为抽滤水样体积,单位为 L; W_{a1} 、 W_{b1} 分别为抽滤前上、下滤膜的质量,单位为 mg; W_{a2} 、 W_{b2} 分别为抽滤后上、下滤膜的质量,单位为 mg; r 为校正系数。

1.2 模型数据和再分析数据集

HYCOM 数值模式是美国海军研究实验室开发的全球混合坐标海洋模型,目前被广泛应用于全球和区域尺度的海洋环流数值预报,预报要素包括海面高度、二维正压流场和三维流场、温度、盐度等,水平空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$,时间分辨率为 1 h。HYCOM 模型的数值预报数据结合观测数据,利用资料同化技术,可形成再分析数据产品。本文获取了航次执行期间的 HYCOM 再分析数据,并与 CTD 水文观测数据进行比对,结果显示,HYCOM 模式温度与 CTD 测量温度基本一致(图 2a)。CTD 的浊度参数与实测悬浮体浓度具有较好的一致性(图 2b),利用实测悬浮体浓度与浊度关系,建立了悬浮体浓度反演模型。本文利用 CTD 浊度反演的水体悬沙浓度,结合 HYCOM 再分析数据,探讨温度锋面及水体跃层变化对悬浮泥沙输运的影响。

悬浮体浓度与浊度反演公式如式(3)所示:

$$\text{SSC} = 1.18 \times \text{CTD_tu} + 1.37 \quad (3)$$

其中,CTD_tu 是 CTD 的浊度参数。

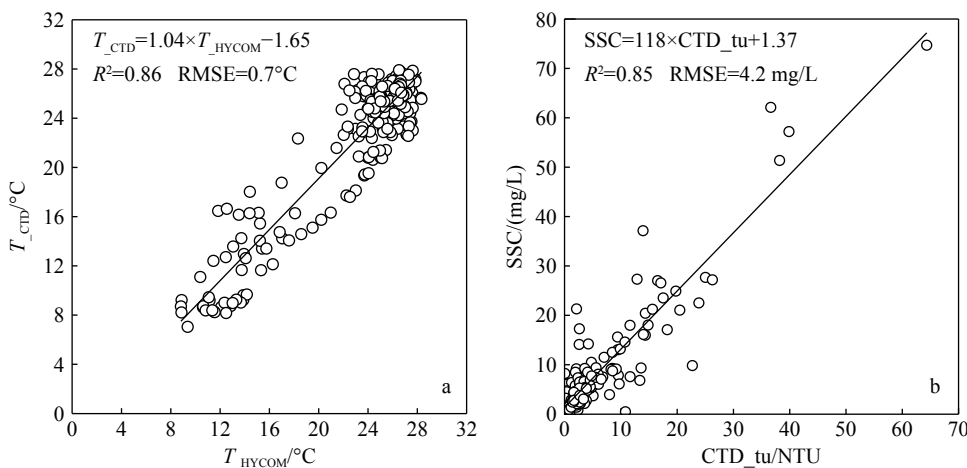


图 2 HYCOM 温度与 CTD 温度及实测悬沙浓度与 CTD 浊度拟合结果

Fig.2 The fitting results of HYCOM temperature vs CTD temperature, and measured suspended sediment concentration (SSC) vs CTD turbidity

1.3 研究方法

(1) 海水水平温度梯度的计算

海水水平温度梯度^[34]计算公式如下:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

其中, G 为海水水平温度梯度^[34], T 为海水温度 ($^{\circ}\text{C}$), x 表示东西方向的距离, y 表示南北方向的距离, 将温度锋面的位置定义为海水温度梯度最大值处。

(2) 地转流的计算

本文采用动力高度法, 利用 CTD 断面实测数据来计算黄海冷水团引起的地转流, 计算公式如下^[35]:

$$v = v_0 - \frac{g}{f\rho_0} \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (5)$$

其中, $\rho = \rho(T, S, P)$ 为密度, v 为动力高度法所求地转流速, 地转流速向北为正, 向南为负, 单位是 m/s ;

v_0 为参考面 z_0 处的水平速度分量; ρ_0 密度均值取 $1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 科氏力参数 $f = 2\Omega \sin\theta$, 其中 Ω 为地转角速度, θ 为站点所在纬度。此为科氏力和水平压强梯度相平衡的地转方程, x 方向为断面方向, 沿断面向东为正; 取最深测站的底层深度为动力零面。

2 结果

2.1 黄海冷水团水文结构

2.1.1 黄海海域温度分布特征

1—4 月份, 黄海海域底层水体整体呈现出低温的特征, 尤其是近岸区域, 最高温度低于 10°C , 中部深水区域的水体温度高于近岸区域, 形成了一个自黄海经渤海海峡进入渤海的温水舌 (图 3)。4 月份开始, 黄海近海海域底层温度升高, 温水舌逐渐衰

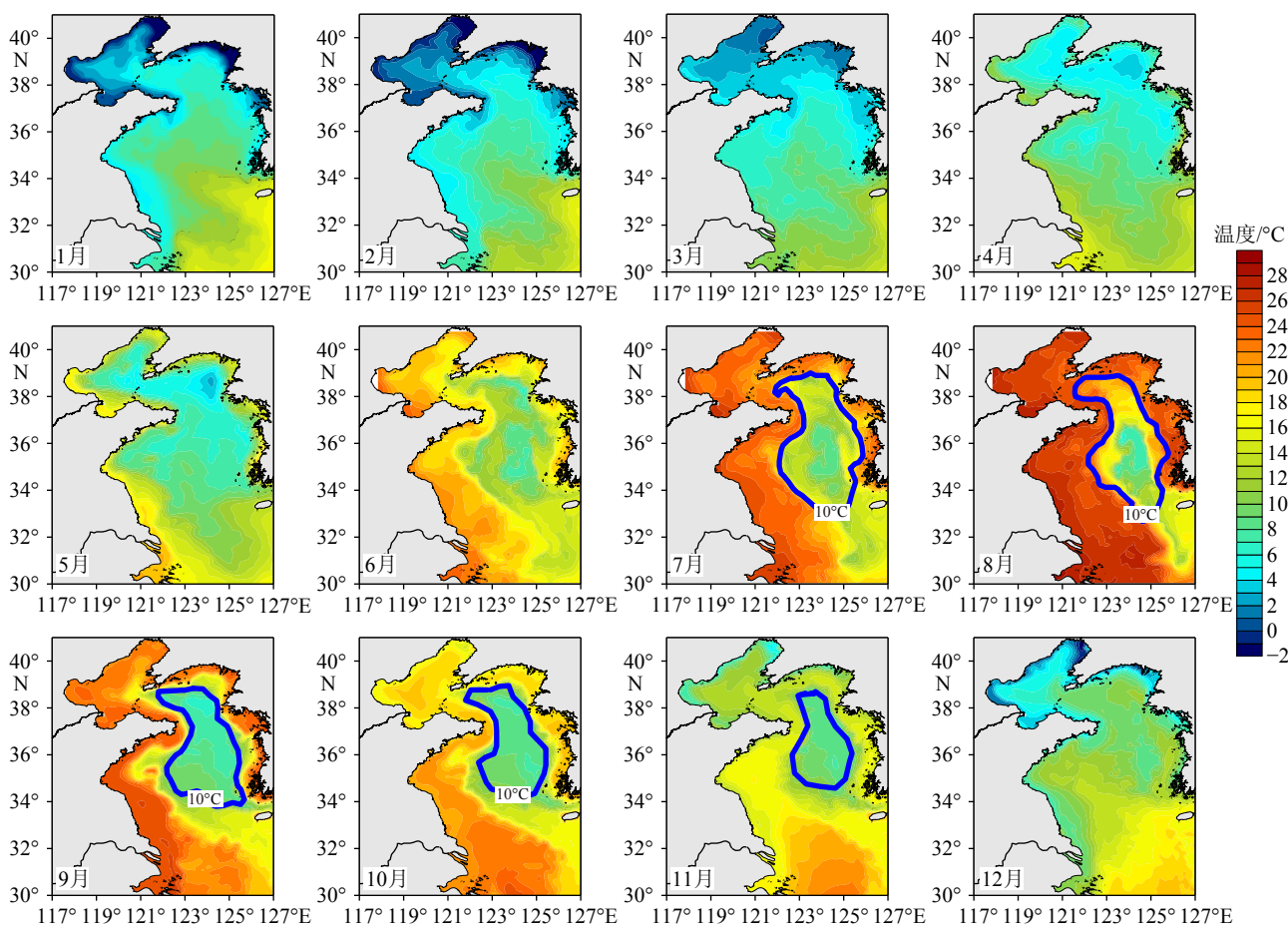


图 3 基于 HYCOM 数据的 2015 年黄海底层水体温度的月均分布

图中蓝色实线为冷水团分布范围。

Fig.3 Monthly average distribution of bottom water temperature in the Yellow Sea in 2015

The blue solid line represents the distribution range of cold water mass.

退。随着太阳辐射的加强,5—8 月份近岸水体温度继续升高且在 8 月份到达峰值(图 4),此时黄海冷水团达到鼎盛时期。黄海冷水团与近岸高温区域交界处等温线密集,冷水团分布范围达到最大,大致覆盖 34°~39°N、122°~126°E 的海域。9、10 月份冷水团分布范围缩小(图 4),覆盖区域萎缩至 35°~38°N、123°~125.5°E,11—12 月份冷水团逐渐消失(图 3)。

2015 年 36°N 断面的年内表底层水体温度差(图 5)显示,5 月份表底层水体温度差逐渐增大,黄海冷水团开始出现;8 月份最大温度差出现在 124°E

附近,可达 20°C,冷水团分布范围最大,达到鼎盛时期;秋季表底层水体温度差减小,温度差大于 4°C 范围自 121.5°~125.5°E 缩小至 123.5°~124.5°E;11 月份,表底层水体温差小于 2°C,冷水团消失。

2.1.2 黄海海域温度梯度对冷水团季节性变化的响应

夏秋季节黄海温跃层的梯度分布特征显示,夏季沿岸区域水深较浅,垂向混合较为均匀,温度梯度小于 0.2°C/m(图 6a),不存在温跃层结构。从近岸至黄海中部,温度梯度逐渐增大,温跃层出现且跃层强度逐渐增大,温度梯度最大值出现在黄海冷水团中部,可达 0.75°C/m。温跃层的位置与冷水团边界相吻合(图 3),温跃层强度的高值区域主要分布于 35.5°~37°N、123°~125°E 深水区域。在秋季,近岸水体混合增强,整个黄海地区水体温度梯度减小(图 6b),温跃层分布范围缩小,仅在南黄海中中部深水区域存在,黄海中部温跃层强度由 0.75°C/m 减小到 0.4°C/m,近岸浅水区域水体温度梯度进一步缩小。

冷水团的季节性变化,不仅导致了垂向上水体层化结构的变化,而且改变了底层温度锋面的位置和强度。本文利用 HYCOM 模式的底层月均温度计算了黄海水体底层温度梯度来表征温度锋面的时空分布特征,锋面的位置取决于海水的水平温度梯度。

在夏季,水体底层温度锋面与冷水团边界吻合较好(图 7a),温度水平梯度最大可超过 5×10^{-4} °C/m;在秋季,近岸水体温度梯度减弱(图 7b),温度锋面由近岸向黄海中部深水区域移动。结合夏秋季节冷水团分布范围可知(图 3),秋季强风增强了近岸浅水区域的垂向混合,冷水团分布范围缩小,仅在南黄海中中部深水区域存在,冷水团附近的温度锋面也随之向深水区域移动。

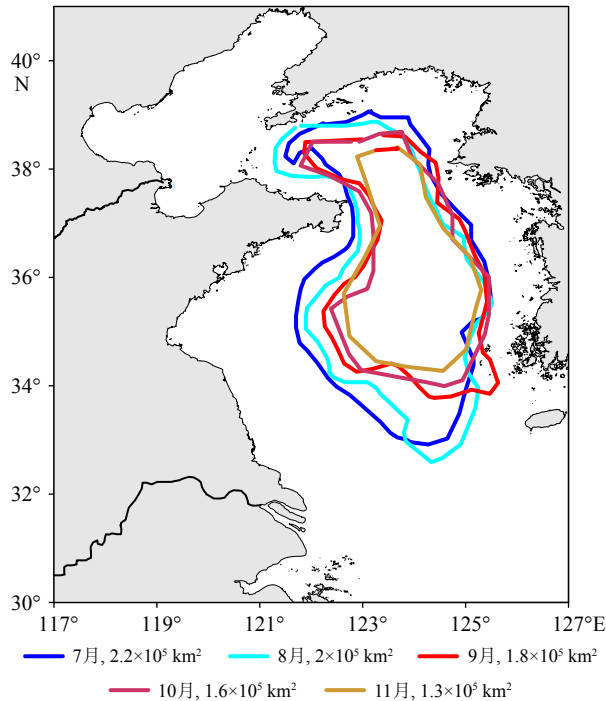


图 4 2015 年黄海冷水团月均曲线及覆盖范围
Fig.4 Curves and coverage areas of monthly average variation of Yellow Sea cold water mass in 2015

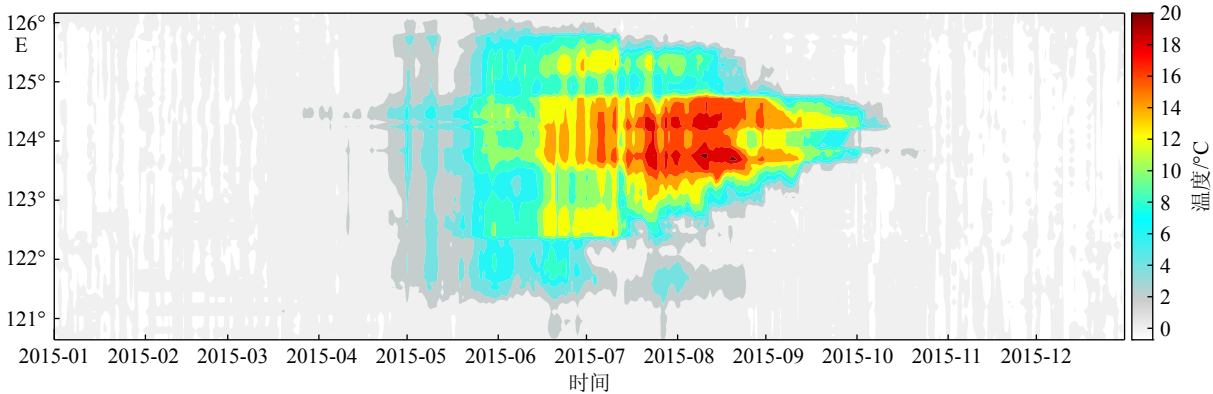


图 5 2015 年 36°N 断面表底层水体温度差的年内变化
Fig.5 Annual variation in the temperature difference of bottom water in the 36°N section in 2015

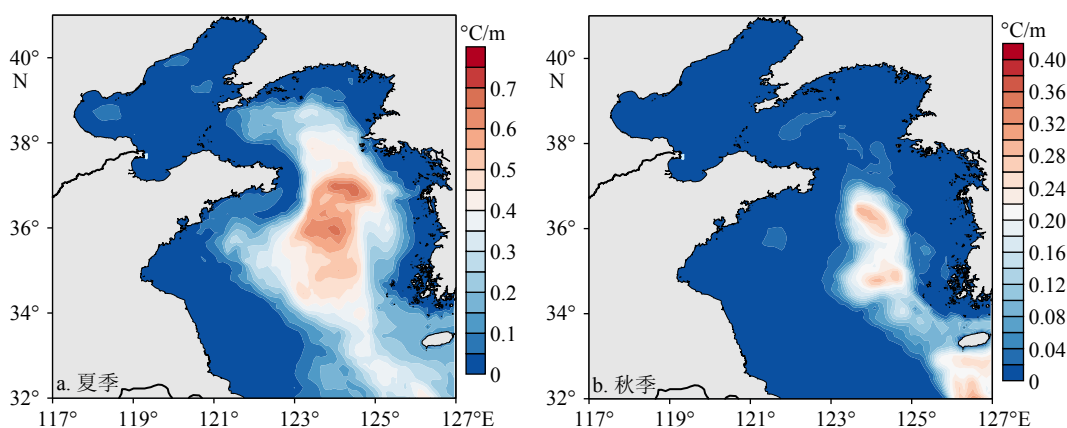


图 6 2015 年夏季、秋季海水垂直温度梯度分布

Fig.6 Seawater vertical temperature gradient distribution in summer and autumn of 2015

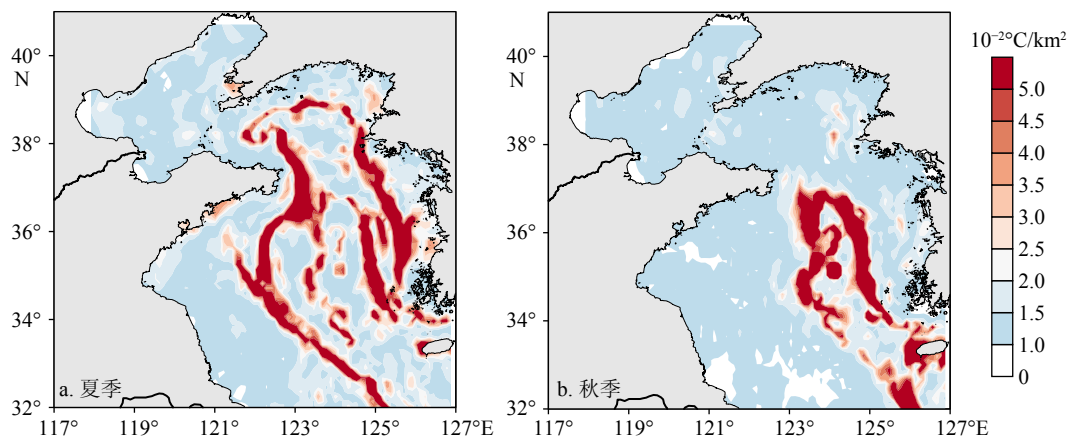


图 7 2015 年夏季、秋季底层温度水平梯度分布

Fig.7 Horizontal gradient distribution of bottom temperature in summer and autumn of 2015

2.2 黄海冷水团环流结构的调整

2.2.1 冷水团环流结构的季节性变化

夏、秋季节黄海表层水体均呈现出近似气旋型的环流特征。在夏季, 南黄海东岸 125°E 附近存在自南向北的沿岸流, 水体在南北黄海交接处及北黄海北岸向西南方向流动(图 8)。南黄海西岸 123°E 存在主体向南流动的沿岸流, 水体在南黄海南部向东流动, 整体围绕黄海中部冷水团边界位置形成逆时针环流。

在夏季, 黄海气旋型环流结构的分布范围为 33.5°~39°N、122°~125°E(图 8a); 在秋季, 气旋型环流结构分布范围缩小到 33.5°~37°N、123°~125°E, 北黄海气旋型环流十分微弱(图 8b)。关于该环流的成因, 对比黄海海表高度分布(图 9)可知, 夏季太阳辐射强烈, 海水温度不断升高, 水体膨胀, 整个海域海平面明显升高^[36-37]。渤海和黄海近岸浅水区水体升温明显, 因此海平面高度较黄海中部水体增加

较快。黄海夏季中部深水区域被冷水团占据, 海表高度较低。而近岸浅水区域海平面较高, 海表高度的分布差异引起地转流, 黄海中部气旋式环流结构与海平面低值区分布范围较为匹配, 也与冷水团的分布范围相吻合。

2.2.2 地转流场的季节性变化

在夏季, 低温高盐的冷水体占据了黄海广大的深水区域, 高密度的水体边界发育了跃层和锋面系统, 较大的密度梯度产生的压强梯度力与科氏力平衡时, 形成了地转流性质的气旋型环流结构。密度不均匀所引起的梯度流会随水体深度的增加而逐渐减小, 这是表层环流较强而底层环流微弱的原因。在秋季, 冷水团衰弱, 高密度水体的分布范围缩小, 水体引起的压强梯度力减小, 地转流的流速减小、分布范围收缩, 导致秋季环流结构发生调整。由于观测数据有限, 本文仅计算了 121°~124°E 范围地转流的分布。在夏季, 122°~122.5°E 表层水体存在较强的南向地转流, 地转流速大于 0.1 m/s

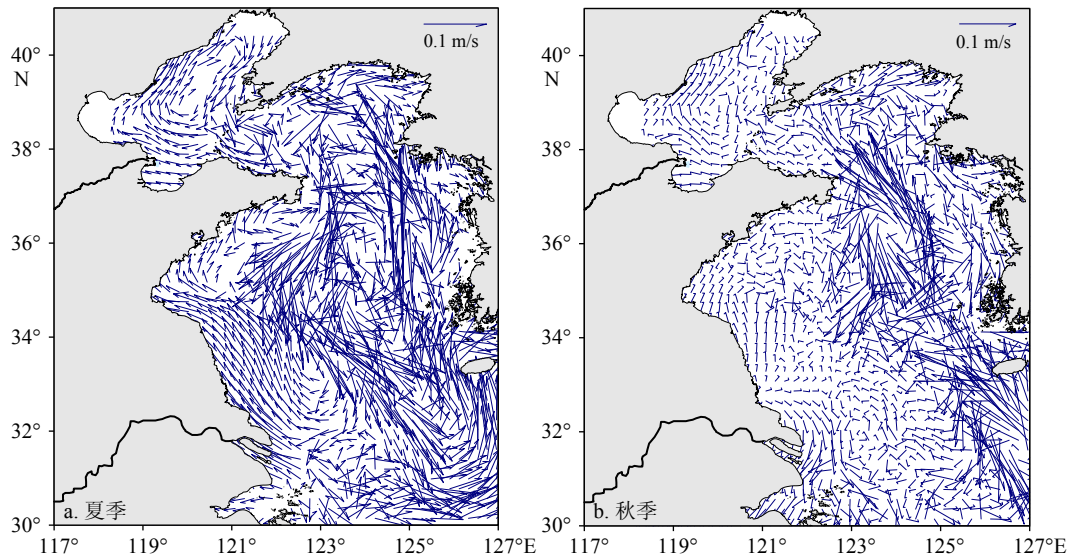


图 8 2015 年夏季、秋季 10 m 深度环流分布 (HYCOM 模型结果)

Fig.8 Distribution of the ocean circulations at 10 m depth in summer and autumn of 2015 (based on HYCOM model results)

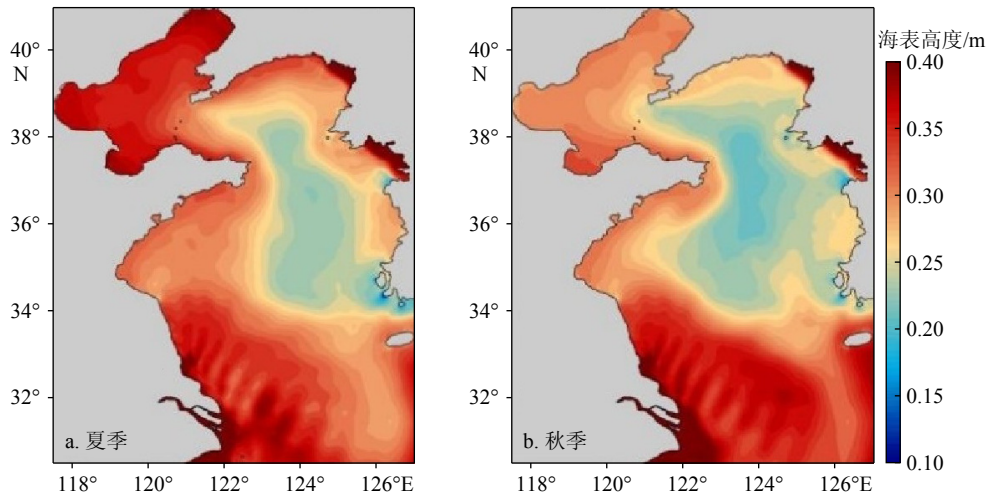


图 9 黄海夏季、秋季多年平均海表高度分布^[38]

Fig.9 Distribution of long-term average sea surface height in the Yellow Sea in summer and autumn^[38]

(图 10a); 在秋季, 表层水体较强的南向流分布范围向东移动至 123°~123.5°E 附近 (图 10b), 符合气旋型环流在夏秋季节的分布 (图 8)。

2.3 悬沙浓度垂向分布对冷水团季节变化的响应

夏秋季节 36°N 断面水体悬沙浓度的分布如图 11 所示。在夏季, 悬沙浓度较高的区域主要分布在近岸 (121°~122.1°E), 在水深 18 m 以下的区域悬沙浓度大于 6 mg/L, 向上悬沙浓度逐渐减少。冷水团边界即 10°C 等温线在 122.1°E 附近出现, 冷水团顶部边界位于水深 20 m 处, 上层悬沙浓度小于 3 mg/L (图 11a)。在秋季, 近岸区域 (121°~121.5°E) 水体混合强烈, 悬沙浓度垂向分布均匀。冷水团顶部边界降至水深 40 m 处, 底层悬沙浓度较高 (10 mg/L),

冷水团顶部边界之上悬沙浓度迅速降低 (小于 2 mg/L) (图 11b)。

3 讨论

A 站位 (表 1) 位于近岸区域, 表层温度大于 25°C, 随着深度增加温度逐渐减小, 至水深 20 m 附近温度保持稳定, 降至 15°C; 表层盐度为 31 PSU, 盐度随深度的增加逐渐增高, 底层盐度约 31.6 PSU; 底部悬沙浓度大于 4.5 mg/L, 向上逐渐递减, 至 20 m 水深维持在较低水平 (图 12A)。而秋季由于风力增强, 近岸区域垂向混合增加^[22], 表底层温盐几乎一致; 底层悬沙浓度约为 4 mg/L, 向上逐渐递减, 至 24 m 水深维持在较低水平 (图 12A1)。

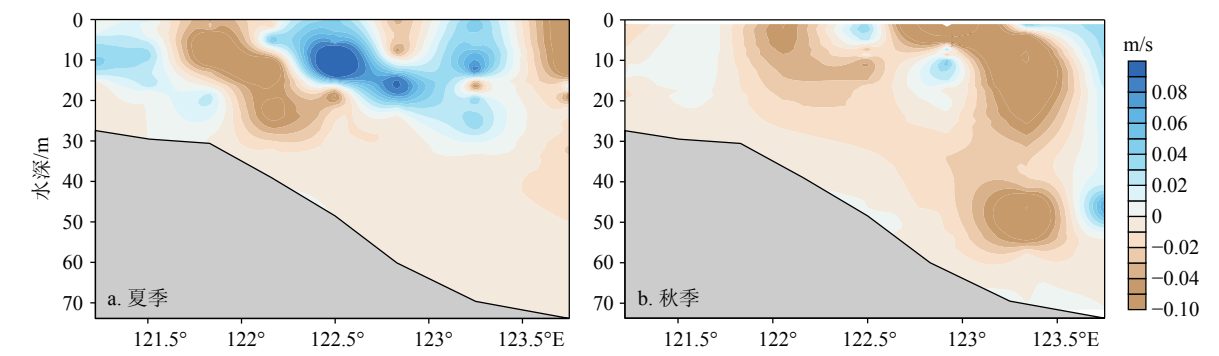


图 10 2015 年夏季、秋季 36°N 断面地转流速分布图

流速垂直断面向北为正, 向南为负。

Fig.10 Distribution of geostrophic current velocity at 36°N section in summer and autumn of 2015

The current velocity direction is positive to the north and negative to the south perpendicular to the section.

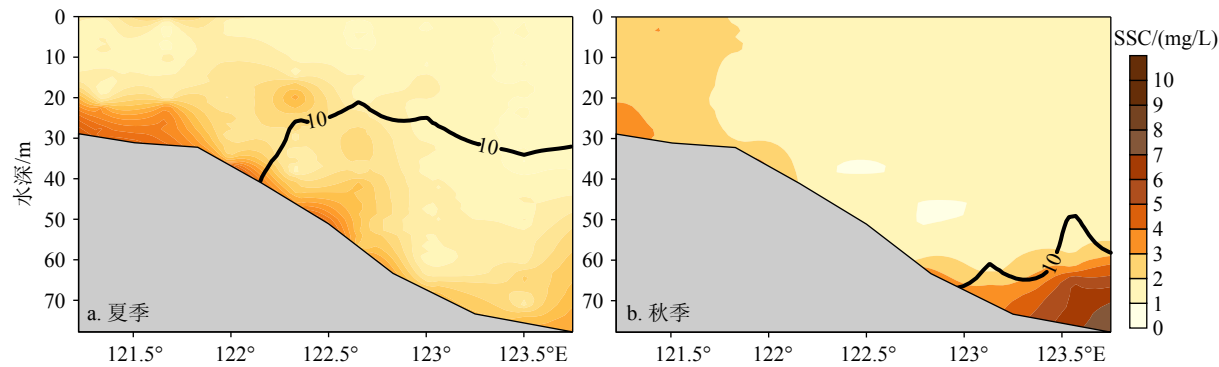


图 11 2015 年夏季、秋季 36°N 断面悬沙浓度分布图

图中黑色实线为 10°C 等温线。

Fig.11 Distribution of suspended sediment concentration at 36°N section in summer and autumn of 2015

The solid black line is the 10°C isotherm.

表 1 夏秋季节分析点位坐标与水深

Table 1 The analysis points and water depth in summer and autumn

夏季站位	位置	水深/m	秋季站位	位置	水深/m
A	36°N、121°E	32	A1	36°N、121°E	32
B	36°N、122°E	40	B1	36°N、121.8°E	39
C	36°N、122.33°E	50	C1	36°N、122.3°E	50
D	36°N、122.66°E	70	D1	36°N、122.7°E	70
E	36°N、124°E	80	E1	36°N、124°E	80

夏季冷水团发育至鼎盛时期,冷水团西部边界位于 122.2°E 附近(图 3)。B 站位表层水体温度约为 31°C,随深度的增加温度逐渐递减,至水深 32 m 处水体温度稳定在 11°C(图 12B),大于冷水团临界温度,表明 B 站位位于冷水团边界外部。B 站位底层悬沙含量约 5 mg/L,在水深 32 m 处水体悬沙浓度骤降。夏季 C 站位水体温度在水深 25 m 处保持稳定,底层温度约 8°C(图 12C),表明 C 站位位于

冷水团内部,因此冷水团的西部边界处于 B 站位与 C 站位之间。水深 32 m 处, B 站位悬沙浓度为 4.6 mg/L,而 C 站位仅为 1.2 mg/L,表明 B、C 站位之间的冷水团边界阻碍了悬沙由近岸(B 站位)向远海(C 站位)的输运。

夏季 C 站位水体分层明显,而秋季 C1 站位表底温度基本一致,表明秋季冷水团的覆盖范围缩小, C1 站位位于秋季冷水团之外(图 12C1)。夏季

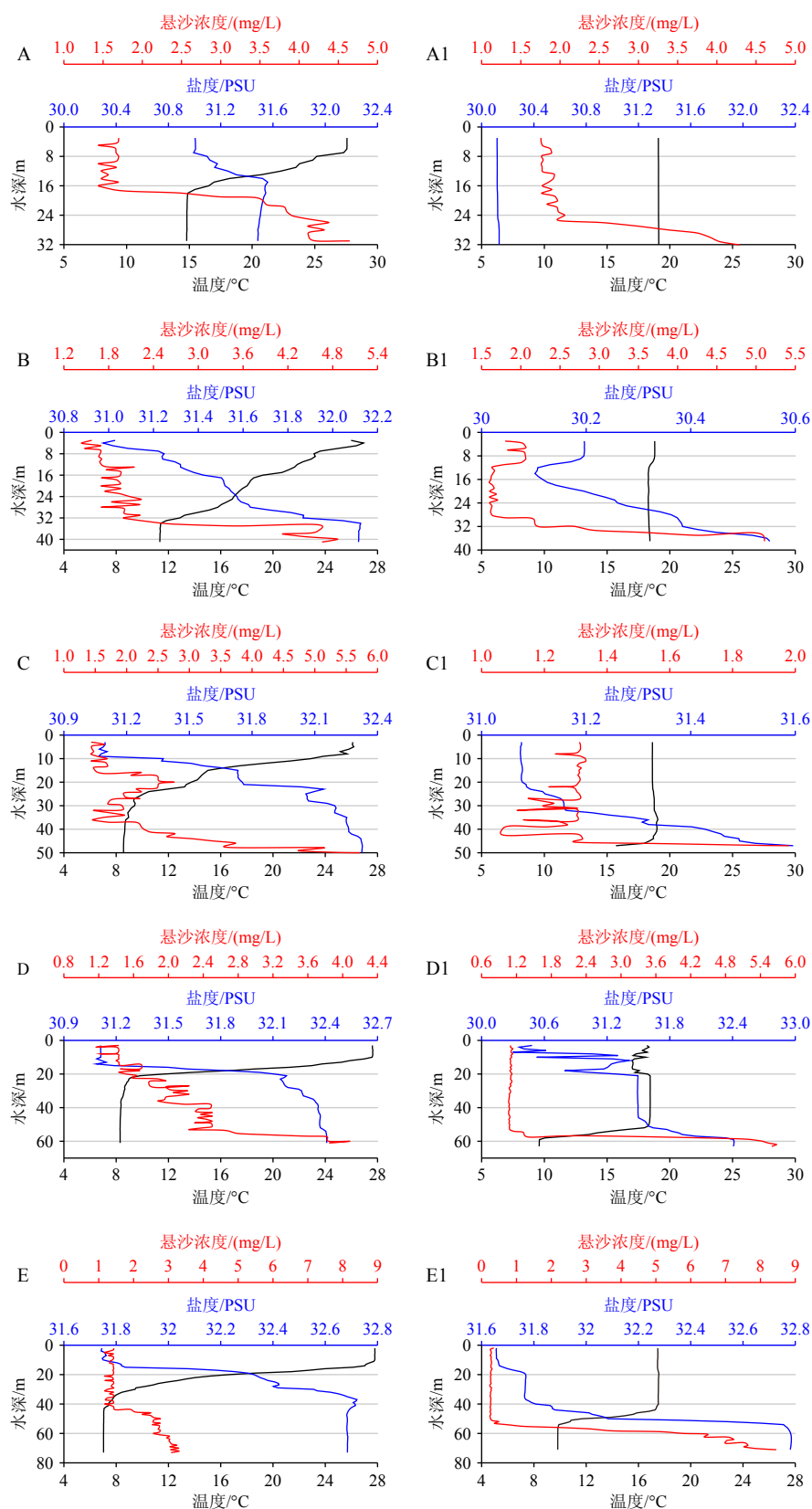


图 12 36°N 断面夏季站位 (A—E) 及秋季站位 (A1—E1) 的温度、盐度以及悬沙浓度垂向分布

其中黑色实线代表温度, 蓝色实线代表盐度, 红色实线代表悬沙浓度。

Fig.12 Vertical distribution of temperature, salinity, and suspended sediment concentration at the 36°N section in stations (A—E) in summer and stations (A1—E1) in autumn

The black solid line represents temperature, the blue solid line represents salinity, and the red solid line represents suspended sediment concentration.

D 站位水体温度在水深 10 m 处出现分层, 至 20 m 处温度趋于稳定, 降至 8°C(图 12D)。秋季 D1 站位水体温度在水深 40 m 处开始下降, 在水深 60 m 处降至 10°C, 跃层出现深度增大, 表明 D1 站位底层水体位于冷水团内(图 12D1)。E1 站位秋季跃层深度可达 50 m, 跃层之上温度混合均匀, 水体悬沙含量较低, 温跃层之下, 水体温度降至 10°C 以下, 悬沙浓度也迅速增加至 5.5 mg/L(图 12E1)。E1 站位底部悬沙浓度高于 E 站位, 而在水深 20~40 m 范围, E 站位的悬沙浓度大于 E1 站位, 原因是 E1 站位底层的悬沙被 40 m 水深处的温跃层所限制, 难以向上扩散, 而夏季 E 站位跃层出现在水深 20 m 处, 底层悬沙可以向上扩散至 20 m 水深处。

夏季表层为 25°C, 秋季下降到 18°C, 而秋季底部温度与夏季相比基本不变, 表、底层温差减小, 说明秋季冷水团逐渐衰弱。秋季风相对较强, 水体垂向混合加强, 近岸海域温度、盐度在垂向上的分布几乎一致(图 12A1、B1)。冷水团的衰弱造成温跃层的强度和锋面的强度下降并且位置发生变化, 冷水团顶部温跃层出现的深度由夏季的 20 m 下降至秋季的 40 m 左右, 边界处的温度锋面由夏季 122°E 附近向东移动至秋季 123°E, 水体结构发生季节性变化(图 6-7)。

冷水团边界的温度锋面能够阻拦底部悬沙的向东输运, 与前人的研究结果较为一致, 黄海冷水团周围的温度锋面能够限制近岸泥沙向海输送, 近岸的混合锋面能够捕获细颗粒的沉积物并阻止悬浮沉积物在近岸海床沉积下来^[39-40]。结合悬沙粒径分布可知, 近岸区域主要以细砂为主, 随着远岸方向, 悬沙以粉砂、黏土为主^[41], 其中夏季黄海冷水团西边界锋面处悬浮体浓度较高且以细颗粒沉积物为主, 与南黄海中部泥质区的细粒沉积区相对应^[42]。冷水团的气旋性环流结构, 能够捕获锋面外部的细颗粒泥沙, 并在冷水团内部的低能环境中沉积下来^[43-44], 对泥质区的演化和发展有一定贡献^[16]。

夏季至秋季, 温度跃层出现位置由水深 20 m 移动至 40 m。夏季风应力较小, 悬沙受温跃层影响, 难以向上扩散至表层。秋季风应力增大, 引起近岸区域强烈的再悬浮作用, 近岸悬浮沉积物的浓度增加^[10], 近岸海域垂向混合强烈, 悬沙可扩散至表层; 而深水区域由于冷水团依然存在, 悬沙向上扩散受到冷水团顶部边界阻碍, 使得秋季 20~40 m 水深悬沙浓度低于夏季(图 11)。冷水团的衰弱, 使得温跃层出现的深度降低, 限制了底层悬沙的垂向扩散, 底层悬沙浓度增加。

4 结论

本文基于黄海海域夏季和秋季共享航次 CTD 实测水文及悬浮体浓度数据, 结合 HYCOM 模型数据, 对比了黄海冷水团夏秋季节的水文特征、环流结构和悬沙分布, 研究了黄海冷水团的季节性变化对悬沙输运的影响, 取得主要认识如下:

(1) 夏季冷水团发育至鼎盛时期, 覆盖范围为 33°~38.5°N、122°~126°E, 冷水团的强度和分布范围均达到峰值; 至秋季黄海冷水团分布范围缩小, 覆盖范围为 35°~38°N、123°~125.5°E, 其分布范围和强度逐渐缩小, 仅局限在南黄海中部区域。

(2) 夏季至秋季, 冷水团顶部温跃层强度逐渐减弱, 由 0.7°C/m 减弱为 0.4°C/m; 温跃层深度加深, 由 20 m 降至 40 m。温度锋面存在于冷水团的边界, 其分布范围随冷水团的衰弱逐渐缩小。

(3) 冷水团边界处的温度锋面能够阻拦近岸悬沙的向东扩散, 捕获锋面外部细颗粒悬浮泥沙并使其在冷水团内部沉积; 随着季节变化引起冷水团的衰退, 温度锋逐渐向黄海中部区域移动, 近岸的悬浮泥沙向外海输运范围扩大。

(4) 除影响泥沙水平输运外, 冷水团顶部的温跃层能够限制悬浮泥沙的垂向扩散, 夏季至秋季, 悬浮泥沙可向上扩散的范围进一步缩小。

参考文献 (References)

- [1] Milliman J D, Beardsley R C, Yang Z, et al. Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: Identification and potential transport mechanisms[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 175-188.
- [2] Yang, Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240: 169-176.
- [3] 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨 [J]. *海洋与湖沼*, 1959(1): 11-15. [HE Chongben, WANG Yuanxiang, LEI Zongyou, et al. The yellow sea cold water mass of the formation and properties of preliminary discussion[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1959(1): 11-15.]
- [4] 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(4): 255-284. [GUAN Bingxian. Preliminary analysis of water temperature variation and circulation characteristics of cold water mass in Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963(4): 255-284.]
- [5] 鲍献文, 李娜, 姚志刚, 等. 北黄海温盐分布季节变化特征分析 [J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(4): 553-562. [BAO Xianwen, LI Na, YAO Zhigang, et al. Seasonal variation characteristics of

- temperature and salinity of the North Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(4): 553-562.]
- [6] 邹娥梅, 熊学军, 郭炳火, 等. 黄、东海温盐跃层的分布特征及其季节变化[J]. 黄渤海海洋, 2001(3): 8-18. [ZOU Emei, XIONG Xuejun, GUO Binghuo, et al. Characteristics and seasonal variations of the thermocline and halocline in the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001(3): 8-18.]
- [7] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005(S1): 887-896. [REN Huijun, ZHAN Jiemin. Seasonal variation characteristics and formation mechanism of cold water mass in Yellow Sea[J]. Journal of Hydrodynamics (Series A), 2005(S1): 887-896.]
- [8] 赵保仁. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1987(3): 218-226, 313. [ZHAO Baoren. A preliminary study of continental shelf fronts in the western part of Southern Yellow Sea and circulation structure in the front region of the yellow cold water mass[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1987(3): 218-226, 313.]
- [9] Yanagi T, Takahashi S. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Journal of Oceanography, 1993, 49(5): 503-520.
- [10] Larsen L H, Cannon G A, Choi B H. East China Sea tide currents[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 77-103.
- [11] Pang C, Liang J, Hu D, et al. Surface circulation patterns observed by drifters in the Yellow Sea in summer of 2001, 2002 and 2003[J]. 2004, 22(3): 209-216.
- [12] Choi B H, Lie H J. Physical oceanography program of the East China Sea and the East Sea (Japan Sea) dynamics in Korea[C]// Proc. Porsec-92. 1992: 1-28.
- [13] Beardsley R C, Limeburner R, Kim K, et al. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas[J]. La Mer, 1992, 30(3): 297-314.
- [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. [TANG Yuxiang, ZOU Emei, LI Xingzai, et al. Some features of circulation in the Southern Yellow Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(1): 1-16.]
- [15] Xia C, Qiao F, Yang Y, et al. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C11): 1-19.
- [16] Zhong Y, Qiao L L, Song D H, et al. Impact of cold water mass on suspended sediment transport in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2020, 428: 106244.
- [17] Zhou C, Dong P, and Li G. Hydrodynamic processes and their impacts on the mud deposit in the Southern Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2015, 360: 1-16.
- [18] Li G X, Li P, Liu Y, et al. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. Earth Science Review, 2014, 139: 390-405.
- [19] 庞重光, 杨扬, 刘志亮. 黄东海悬浮泥沙输运结构及其形成机制[J]. 泥沙研究, 2010(3): 24-30. [PANG Zhongguang, YANG Yang, LIU Zhiliang. Transportation pattern of suspended sediment and its forming mechanism in the Yellow and East China Sea[J]. Journal of Sediment Research, 2010(3): 24-30.]
- [20] 秦蕴珊. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1963(1): 71-85. [QIN Yunshan. A preliminary study on the topography and sedimentary types of the shelf sea in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963(1): 71-85.]
- [21] Dong L X, Guan W B, Chen Q, et al. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2011, 93(3): 248-258.
- [22] Bian C, Jiang W, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2013, 118(11): 5908-5923.
- [23] 肖合辉, 王厚杰, 毕乃双, 等. 渤海海域悬浮体季节性分布及主要运移路径[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(2): 11-21. [XIAO Hehui, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal variation of suspended sediment in the Bohai and Yellow Sea and the pathway of sediment transport[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(2): 11-21.]
- [24] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于 MODIS L1B 数据的黄海悬浮体季节性分布的反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 1-9. [YU Jia, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal distribution and variation of suspended sediment in the Yellow Sea in 2010 based on retrieved monthly data from Modis L1B Imagery[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(1): 1-9.]
- [25] Luo Z, Zhu J, Wu H, et al. Dynamics of the sediment plume over the Yangtze Bank in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(12): 10073-10090.
- [26] 边昌伟. 中国近岸泥沙在渤海、黄海和东海的输运[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2012. [BIAN Changwei. Chinese coastal sediment transport in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [27] Zeng X, He R, Xue Z, et al. River-derived sediment suspension and transport in the Bohai, Yellow, and East China Seas: A preliminary modeling study[J]. Continental Shelf Research, 2015, 111: 112-125.
- [28] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报, 1992(2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Macro pattern of transport of suspended suspension from the Huangdonghai Shelf to the eastern deep sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992(2): 81-90.]
- [29] 庞重光, 白学志, 胡敦欣. 渤、黄、东海海流和潮汐共同作用下的悬浮物输运、沉积及其季节变化[J]. 海洋科学集刊, 2004: 32-41. [PANG Zhongguang, BAI Xuezhi, HU Dunxin. The transport and sedimentation of suspended matter and their seasonal variation are affected by circulation and tide current in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Studia Marina Sinica, 2004: 32-41.]
- [30] 王勇智, 乔璐璐, 杨作升, 等. 夏、冬季山东半岛东北部沿岸悬浮物输送机制的初步研究[J]. 泥沙研究, 2012(5): 49-57. [WANG Yongzhi, QIAO Lulu, YANG Zuosheng, et al. Research on suspended sediment transport mechanisms along northeast coast of Shandong Peninsula in summer and in winter[J]. Journal of Sediment Research,

- 2012(5): 49-57.]
- [31] Zhang J, SM Liu, H Xu, et al. Riverine sources and estuarine fates of particulate organic carbon from North China in late summer[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences*, 1998, 46: 439-448.
- [32] Shi W, Wang M H. Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 104: 30-45.
- [33] Shi W, Wang M H. Satellite observation of the seasonal sediment plume in central East China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82: 280-285.
- [34] Wang F, Liu C. An N-shape thermal front in the western South Yellow Sea in winter[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 898-906.
- [35] 陈红霞, 刘娜, 袁业立, 等. 东海黑潮地转流计算中的零流面选取问题 [J]. *海洋科学进展*, 2007(4): 383-390. [CHEN Hongxia, LIU Na, YUAN Yeli, et al. Study on the selection of level of no motion for calculating geostrophic flow in the East China Sea Kuroshio area[J]. *Advances in Marine Science*, 2007(4): 383-390.]
- [36] 奚智祥. 渤海和北黄海沿岸海区的月平均海平面变化及其主要影响因素的初步讨论 [J]. *海洋通报*, 1983(6): 7-14. [XI Zhixiang. A preliminary discussion of monthly mean sea level changes and the effects of major factors in the coastal areas of the Bohai Sea and North Yellow Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 1983(6): 7-14.]
- [37] Cazenave A, Dieng H B, Meyssignac B, et al. The rate of sea level rise[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 358-361.
- [38] 仲毅. 冷水团季节变化对南黄海泥沙输运及泥质区发育的贡献 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2020. [ZHONG Yi. Suspended Sediment Transport and Deposition Mechanism in the Central Southern Yellow Sea Due to the Cold Water Mass Evolution[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2020.]
- [39] Zang Z C, Xue Z G, Bi N S, et al. Seasonal and intraseasonal variations of suspended-sediment distribution in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 148: 116-129.
- [40] Wang A M, David K, Ralston, et al. Seasonal variation in sediment transport and deposition on a muddy clinoform in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 179: 37-51.
- [41] 张凯南. 北黄海冷水团对悬浮体物质组成和沉积环境的影响机制 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 2018. [ZHANG Kainan. The Influence of the North Yellow Sea Cold Water Mass on the Properties of Suspended Particulate Matter and Sedimentary Environment[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [42] 仲毅, 乔璐璐, 王震, 等. 南黄海中部悬浮体垂直分布及其季节变化 [J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(3): 518-526. [ZHONG Yi, QIAO Lulu, WANG Zheng, et al. Vertical distribution and seasonal variation of suspended particulate matter in the central south Yellow Sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2016, 47(3): 518-526.]
- [43] 石学法, 申顺喜, Yi Hi-il, 等. 南黄海现代沉积环境及动力沉积体系 [J]. *科学通报*, 2001(S1): 1-6. [SHI Xuefa, SHEN Shunxi, Yi Hi-il, et al. Modern sedimentary environment and dynamic sedimentary system in the South Yellow Sea[J]. *Science Bulletin*, 2001(S1): 1-6.]
- [44] 乔璐璐, 李广雪, 邓声贵, 等. 夏季渤海湾中北部悬浮体分布 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(3): 23-30. [QIAO Lulu, LI Guangxue, DENG Shenggui, et al. Distribution of suspended particulate matters in the middle and northern Bohai Bay in summer[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(3): 23-30.]