

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019121101

威海湾夏季上升流现象及其对悬浮体输运的影响

钟伟¹, 朱龙海^{1,2}, 吴建政^{1,2}, 胡日军^{1,2}, 朱颖涛¹, 岳娜娜³

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教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要: 利用2018年夏季威海湾及邻近海域的实测海水温度、盐度、浊度数据和海湾口门处的水位、潮流、底层水温数据, 结合局地风场和海表温度卫星遥感资料, 分析了夏季威海湾上升流现象, 研究了其形成机制及对悬浮体输运的影响。结果表明: 威海湾内表层水温低于23℃, 较湾外约低4~5℃, 等温线由海向陆沿地形逐渐抬升, 在口门处呈尖锥状向上拱起, 湾内存在明显的上升流现象, 其中心位于口门附近。观测期间随着局地风场变化, 上升流呈现稳定、减弱、消失、恢复的阶段性变化。威海湾上升流主要是由夏季偏南风驱动产生, 海底地形则对上升流的强度具有重要影响。在偏南风的作用下, 上层海水以离岸运动为主, 外海中下层冷水主要通过南侧口门进入湾内, 过剩的水体通过北侧口门流出。研究区水体浊度的分布状态与海水温度场具有高度相关性, 浊度等值线在口门处凸起, 具有向上涌升的趋势。成山头附近海域再悬浮的泥沙可能是威海湾内泥质沉积的主要来源之一, 上升流的存在一方面可以减缓悬浮体的沉降速度, 另一方面为底层海水提供向岸运动的分量。

关键词: 上升流; 悬浮体; 泥质沉积; 威海湾; 山东半岛

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Summer upwelling current in Weihai Bay and its contribution to transportation of suspended matters

ZHONG Wei¹, ZHU Longhai^{1,2}, WU Jianzheng^{1,2}, HU Rijun^{1,2}, ZHU Yingtao¹, YUE Nana³

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

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

3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: This paper is devoted to the mechanism of summer upwelling current in Weihai Bay and its contribution to the transportation of suspended matters based on the observation data acquired from the instrumented tripods placed at the grid stations around the bay mouth during the summer of 2018. The data studied includes water temperature, salinity, turbidity, water level, tidal current, satellite remote sensing data of SST and winds. Results show that the water temperature of the surface layer in the bay is below 23℃, about 4~5℃ lower than that of the outside water. Isotherms were climbing up shoreward and peaked near the bay mouth in a cone-shaped form, indicating the existence of upwelling current. With the change of local winds, the upwelling current changes in a cyclic pattern from stabilization, weakening, disappearance and recovery. The upwelling was supposed to be driven by southerly summer winds, and the local topography has a significant impact on its intensity. Under the action of southerly winds, water in the upper layer moves seaward, which causes the upwelling of cold bottom water flowing from the outside into the bay mainly through the southern mouth. Instead, the surplus water flows out of the bay through the northern mouth. The distribution of turbidity in the study area was well correlated with water temperature, the iso-contours of turbidity also bulge upward near the bay mouth. The re-suspended sediment off the Chengshantou Cape may be the main source of the mud deposit in the bay, the existence of upwelling current may reduce the settling velocity of suspended matters and drive the landward transport of the bottom water.

Key words: upwelling; suspended matter; mud deposit; Weihai Bay; Shandong Peninsula

上升流是指海水由中、深层向海表的垂直运动, 通常伴随有表层海水低温、高盐等特征, 夏季普遍存在于我国沿岸海域^[1-2]。沿岸上升流是近岸环

流的重要组成部分, 通过垂向输运可将深层海水中的营养物质带至真光层, 影响海区的初级生产力, 是渔场形成的重要动力环境, 也与赤潮等事件密切

资助项目: 国家自然科学基金“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制——以威海湾为例”(41776059)

作者简介: 钟伟(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事沉积动力研究, E-mail: zhongwei_ouc@sina.com

通讯作者: 朱龙海(1979—), 男, 教授级高工, 主要从事海洋地质研究, E-mail: zhulonghai@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-12-11; 改回日期: 2020-02-02. 文凤英编辑

相关^[3-4]; 同时, 上升流的存在对于沿岸海区生物、化学等要素的分布和悬浮泥沙的输运也有重要影响^[5-7]。

我国沿岸上升流的研究始于 20 世纪 60 年代, 主要集中在东海和南海沿岸, 包括长江口外及浙江沿岸上升流^[4, 8], 粤东、闽南沿岸上升流^[9-11]和琼东沿岸上升流^[1, 12]等。对于黄海的上升流则报道较少, 而且已有的研究主要针对陆架潮汐锋及表层冷水现象。夏季黄海表层存在多个冷水斑块, 其分布具有地点选择性, 发生在山东、辽东半岛顶端、苏北浅滩外侧和朝鲜半岛西岸, 近岸水温较外海低约 2~5 °C^[13-15]。夏综万和郭炳火将其解释为潮流绕半岛形成的上升流^[14]; 赵保仁将其归因于潮混合作用, 由底层低温水体和表层高温水体混合形成, 锋面处伴有锋面上升流^[13, 16]; 吕新刚通过数值模拟的方法认为该现象由潮致上升流和垂向混合效应共同作用形成, 并给出了黄海夏季上升流的分布及其潮生机制^[15, 17]。

前人对于夏季黄海上升流的研究主要集中在其分布特征和机制解释方面, 采用的实测资料多基于 20 世纪 80 年代的调查成果, 缺乏高精度、高分辨率的现场数据和同步的海面风场、潮流观测资料, 相对于南海和东海沿岸, 对黄海上升流缺乏系统的研究, 对其空间结构、演变、对海面风场的响应和水体浊度的影响等鲜有论及。黄海是典型的高浊度陆架海区, 受黄河、长江等大型河流入海物质的影响, 发育有多个全新世泥质沉积体^[18-19], 夏季冷水斑块发生的地方往往也是悬浮体的高浓度区^[20], 因此研究黄海上升流及其对悬浮体运移的影响具有重要意义。

2018 年夏季, 中国海洋大学在威海湾及邻近海域进行了海洋水文综合调查, 发现威海湾存在上升流现象。本文根据 2018 年 7—8 月的实测海水温度、盐度、浊度、潮流等水文资料, 结合海面风场和同期遥感 SST 数据, 讨论分析了夏季威海湾上升流现象及对悬浮体输运的影响。

1 研究区概况

威海湾位于山东半岛东北部, 濒临北黄海, 平均水深 7 m, 面积约 60 km², 近似属于半开敞型海湾^[21-22]。刘公岛将海湾湾口分为南北两部分(图 1), 北侧口门较窄, 约 1.8 km, 水深为 8~20 m; 南侧口门较宽阔, 宽约 3.8 km, 水深为 12~16 m。海湾的潮流运动受北黄海左旋潮波控制, 平均潮差 1.3 m, 属于不正规半日潮^[23]。北侧口门流速较大, 潮流运

动形式为往复流, 南侧口门以旋转流为主, 流速较小^[24]。湾内的沉积物以黏土质粉砂为主, 中值粒径为 5.7~6.7 Φ , 约占整个海湾的 80%; 以砂为主的粗粒沉积主要分布在近岸破波带内, 中值粒径为 2.3~2.9 Φ ^[23]。威海湾地处东亚季风区, 夏季盛行东南风, 冬季以西北风为主。注入威海湾最大的河流为风林河, 全长 10 km, 属于季节性雨源河流, 年输沙量约 1.02 万 t^[25]。

2 资料来源与方法

大面站海水温度、盐度、浊度剖面数据取自 2018 年夏季在威海湾及邻近海域进行的水文要素的走航观测结果, 共包括 87 个站位, 设 7 条主要断面, 观测时间为 2018 年 7 月 31 日至 8 月 4 日。调查期间采用美国 TRDI 公司生产的 CTD-NV 温盐深仪(温度数据精度为 ± 0.005 °C, 电导率精度为 ± 0.009 mS/cm, 压力精度为 $\pm 0.05\%$)和英国 AQUATEC 公司生产的 Logger 210TY 浊度计(量程 0~2 000 FTU)获取水体剖面温盐和浊度数据, 采样频率分别为 5 Hz 和 1 Hz, 垂向分辨率一般小于 0.5 m。调查期间以南风为主, 风速小于 5 m/s。调查站位布设见图 1。

水位、潮流和近底温度数据取自 2018 年夏季布放于威海湾南北两个口门中部的座底三角架观测系统(布设位置见图 1), T1、T2 的平均水深分别为 13.5 和 15.5 m, 观测时间为 2018 年 8 月 5—15 日。搭载仪器包括一台美国 LinkQuest 公司生产的 600 kHz ADCP、一台挪威 Nortek 公司生产的 6 MHz ADV 和一台 CTD-NV 温盐深仪。其中 ADCP 用于测量垂向海流剖面, 流速精度为 $\pm 0.25\%$ 或 ± 2.5 mm/s, 垂向分辨率为 1 m, 向上发射脉冲; 近底流速数据由 ADV 获得, 流速精度为 $\pm 0.5\%$ 或 ± 1 mm/s, 用于弥补由于 ADCP 换能器高度及盲区造成的底层数据缺失; CTD 用于观测近底海水温度和水位变化。为便于分析海湾水体交换情况, 对潮流矢量进行了垂直口门方向和平行口门方向的分解, T1、T2 站位垂直口门方向分别为与正北夹角 28°和 66°。所有仪器采样间隔均为 60 min, 三角架观测系统仪器布设情况见表 1。

海面上空 10 m 处的风场数据获取自美国环境预测中心(NCEP)提供的第二代气候预报系统(CFSv2), 空间分辨率为 0.2° $\times$ 0.2°, 时间分辨率为 1 h。本文选取座底三角架观测系统所在站位的风场数据进行分析, 数据下载网址为 <https://rda.ucar.edu/>。海表温度(SST)数据选用全球高分辨率海表面温度

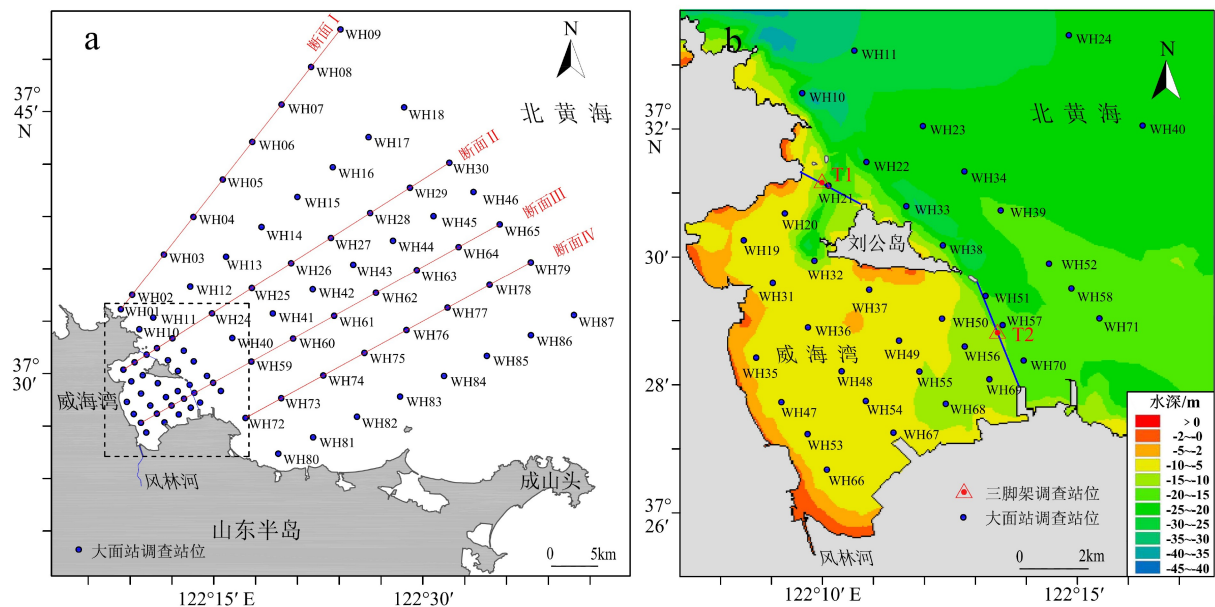


图 1 研究区地理位置及调查站位分布
Fig.1 Location of the study area and sampling stations

表 1 三角架观测系统仪器布设及参数设定情况
Table 1 Summary of instruments and sampling parameters at tripod stations

仪器名称	距底高度/m	采样时间/间隔	测量参数	观测时间
Nortek 6 MHz ADV	0.7	300 s/60 min	近底流速	2018年8月5-15日
Teledyne RD Instruments CTD-NV	1.2	300 s/60 min	底层水温、水位	
FlowQuest 600 kHz ADCP	1.8	100 s/60 min	潮流	

(GHR SST)项目提供的融合网格化日平均海表温度数据,其空间分辨率为 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$,时间分辨率为1 d。数据下载网址为 <https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/services/>。

3 结果

3.1 威海湾的上升流现象

图 2 和图 3 分别为 2018 年 7 月 31 日至 8 月 4 日大面站调查期间研究区的海水温盐平面分布及典型断面温度分布图。由图 2a 可以看出,表层(海面下 2 m)出现 2 处孤立的冷水斑块,较周围水温低约 4~5 ℃,分别位于威海湾内和研究区东侧靠近成山头处。威海湾内表层水温低于 23 ℃,冷水中心温度约为 20 ℃,2 条低温水舌近似垂直于口门向湾外扩展,于口门处形成较强的温度锋面,变化梯度可达 0.6~0.8 ℃/km。表层温度由近岸向海逐渐升高,湾外普遍高于 25 ℃,研究区中部高于 27 ℃。底层水温由陆向海逐渐降低(图 2b),湾内为 19~

20 ℃,湾外最低可至 15.5 ℃,研究区西侧底层水温明显低于东侧。

研究区海水盐度分布较为均匀,表层盐度为 31.72~32.41PSU,其分布特征与温度类似,湾内和研究区东侧盐度相对较高,由陆向海逐渐减小(图 2c)。底层盐度较表层略有降低(图 2d),为 31.86~32.08 PSU,近岸浅水区和离岸深水区无明显差异,分布较为均匀。

为说明研究区水文要素的垂直分布特征,选取 2 条典型断面进行分析,断面 II、III 近似垂直于岸线,分别横穿北侧、南侧口门由湾内延伸至湾外约 40 km(图 1)。海底地形自湾内向外海逐渐下倾,湾内海底坡度较大,湾外相对平缓。由于研究区盐度变化较小,本文仅选取温度进行讨论。由图 4 可以看出,温跃层出现在海面以下 10~15 m 处,等温线有由海向陆沿地形逐渐抬升的趋势,如断面 II 中 21 ℃ 等温线由 WH30 站位处的-13 m 抬升至 WH21 站位处的-1.5 m。两条断面的等温线均在口门处呈尖锥状向上拱起,具有冷水涌升的特征,其两侧呈下凹趋势,其中断面 II 北侧口门处湾内与湾外水体

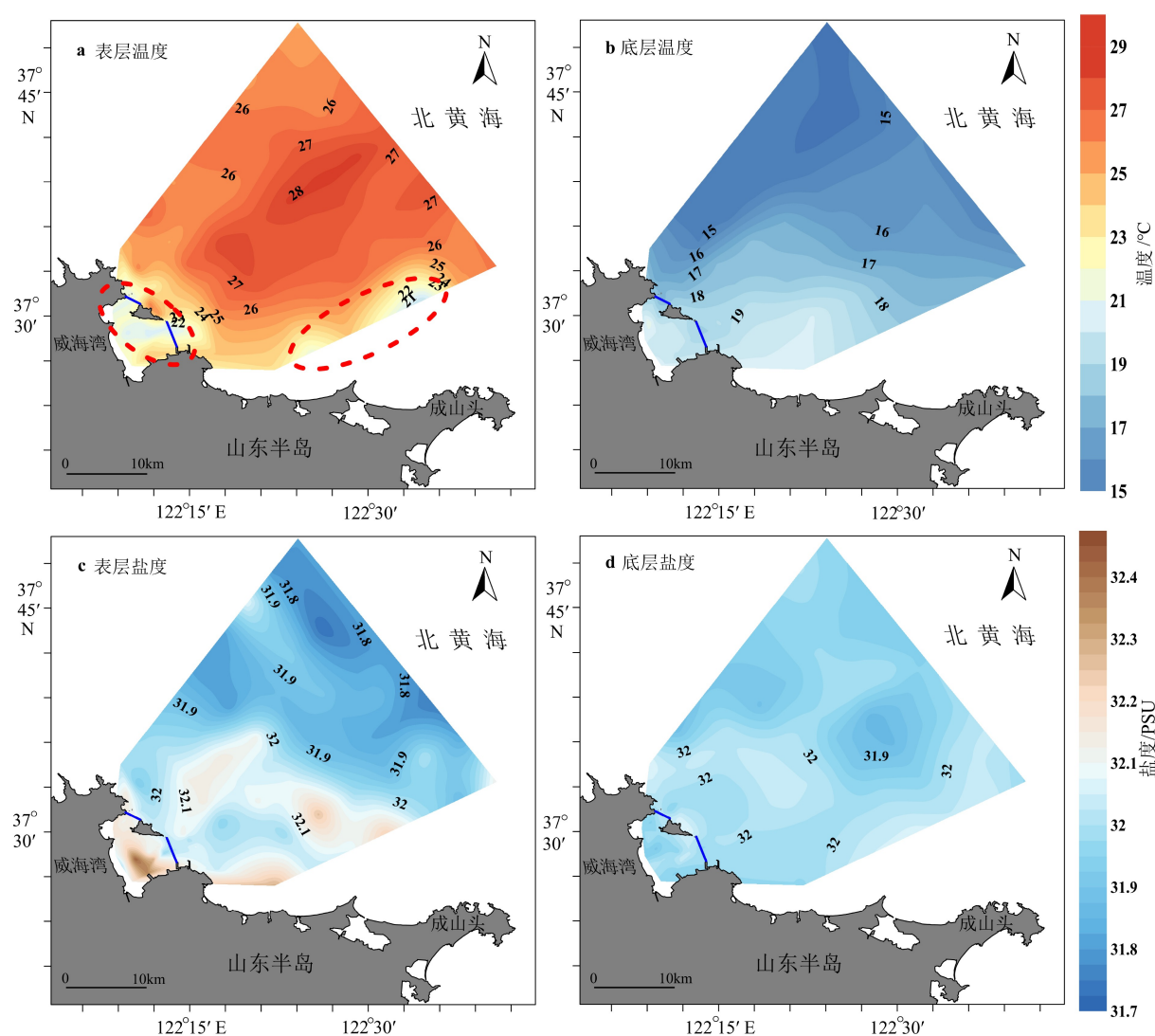


图 2 2018 年夏季大面站调查期间研究区温度、盐度平面分布

a、b 为表层温度平面分布, c、d 为表层盐度平面分布。

Fig.2 Plane distributions of temperature in the surface (a), bottom layers (b) and salinity in the surface (c), bottom layers (d) over the study area during the grid stations cruise

存在一明显的温度锋面。

夏季表层低温高盐现象及等温线的向岸抬升是上升流存在的重要特征^[11, 17]。结合图 2、3 可知 2018 年 7 月 31 日至 8 月 4 日观测期间, 威海湾内存在明显的上升流现象。湾内被温度小于 23 °C 的冷水占据, 其源头来自湾外的中底层水体, 上升流中心区域位于口门处, 22 °C 等温线可穿透至海表, 南侧口门上升流强度大于北侧口门。

3.2 威海湾上升流的时空特征

为了解威海湾上升流的时空变化特征, 选取与座底三脚架观测同步的日平均 SST 遥感数据和海面风场数据, 分析上升流的短期变化特征。观测期间威海湾局地风场变化情况如图 4 所示。2018 年

8 月 6—8 日, 威海湾盛行西南风, 在 8 月 8 日转为西北风并持续至 8 月 11 日, 8 月 11—15 日, 风向又转至夏季盛行的东南风。

由图 5a 可以看出, 8 月 6 日山东半岛东部近岸海域存在明显的表层冷水现象和多个独立的冷水中心, 分别位于威海湾内、威海湾东侧和成山头附近。威海湾内表层水温低于 26 °C, 湾外水温大于 28 °C, 口门处存在较强的温度锋面。8 月 9 日研究区转为西北风后, 威海湾内仍然被低温水体占据, 但表层水温有所升高, 温度锋面明显减弱(图 5b)。至 8 月 11 日北风持续作用 3 天后, 由图 5c 可以看出, 威海湾内已被高于 28 °C 的暖水覆盖, 与湾外温度接近, 上升流几乎消失。8 月 13 日, 随着西北风转为东南风, 湾内再次被小于 27 °C 的低温水体占

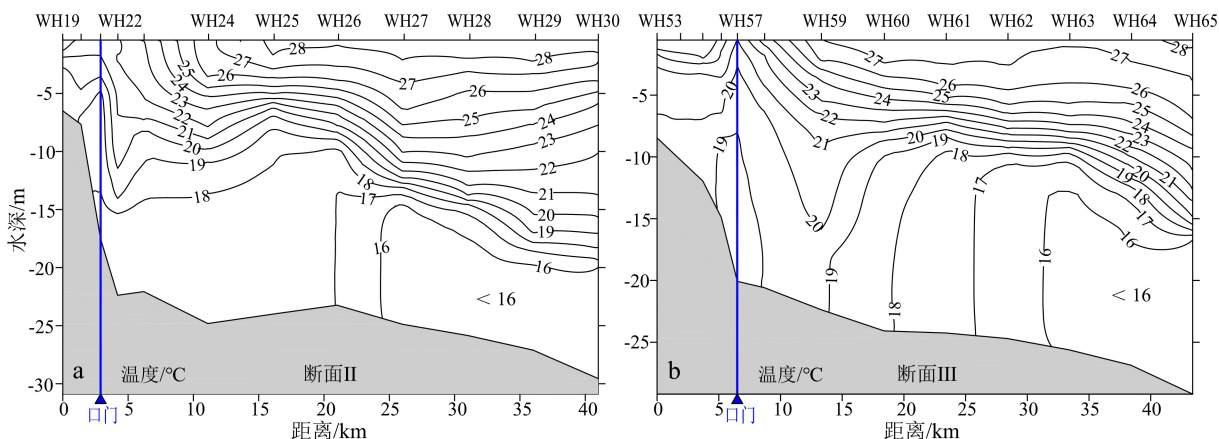


图3 2018 年夏季大面站调查期间研究区断面 II (a)、断面 III (b) 水温断面分布
(图中蓝线代表口门位置)

Fig.3 Vertical distributions of temperature at transect II, III during the grid stations cruise
(The blue line represents the location of the bay mouth)

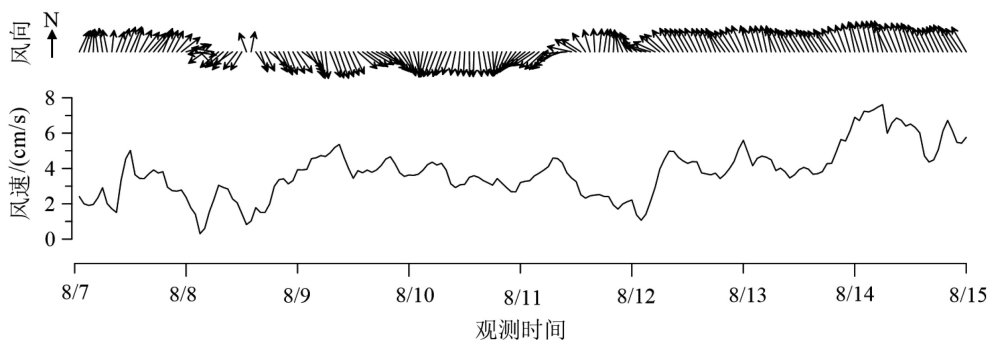


图4 三脚架观测期间威海湾局地风场变化情况

Fig.4 Winds vector during the tripod observation at Weihai Bay

据, 上升流逐渐恢复(图 5d)。

综上所述, 随着局地风场的变化, 观测期间威海湾上升流呈现稳定、减弱、消失、恢复的阶段性变化。

4 讨论

4.1 威海湾上升流的控制因素

以往研究表明^[2, 14-16], 诱生和影响沿岸上升流的主要动力机制包括风应力驱动的沿岸上层海水 Ekman 离岸输运、海底地形对海流的抬升作用、强潮流引起的潮混合及锋面环流、潮流绕半岛的离心运动等。由于海区特征的复杂性和海水运动的多样性, 诱导局地上升流的控制因素往往是多因子的共同作用^[10, 15]。

(1) 局地风场对威海湾上升流的影响

就全国范围来看, 夏季沿岸上升流通常是西南

季风驱动的。根据经典埃克曼漂流理论, 当盛行风与岸线平行时, 有利的风向会驱使表层海水离岸输运, 外海深层海水向岸输送进行补偿, 从而在沿岸形成上升流。Tomczak^[26]指出, 在近岸的海湾、岬角等曲折岸线区域, 有利于诱发上升流的风向是垂直海岸而不是平行海岸。根据 3.2 节分析, 威海湾上升流的变化特征与风向密切相关, 为了探讨局地风场对上升流的影响, 本文利用座底三脚架观测系统获取的底层水温、水位、潮流时间序列进行分析。水温、水位数据通过低通滤波去除潮信号的影响, 潮流数据经调和和分析得到各层余流。由于滤波器的原因会导致起始阶段结果失真, 因此选取 2018 年 8 月 6—15 日的结果进行解释。

底层水温可以有效地反映上升流的强度变化^[1, 27]。由图 6 可以看出, 8 月 6—8 日, 在持续的西南风作用下, 两个站位的底层水温维持在 20 °C 左右并逐渐降低, 说明上升流处于较为强盛的阶段且比较稳定。8 月 8—11 日, 威海湾被偏北风控制, 上升流强

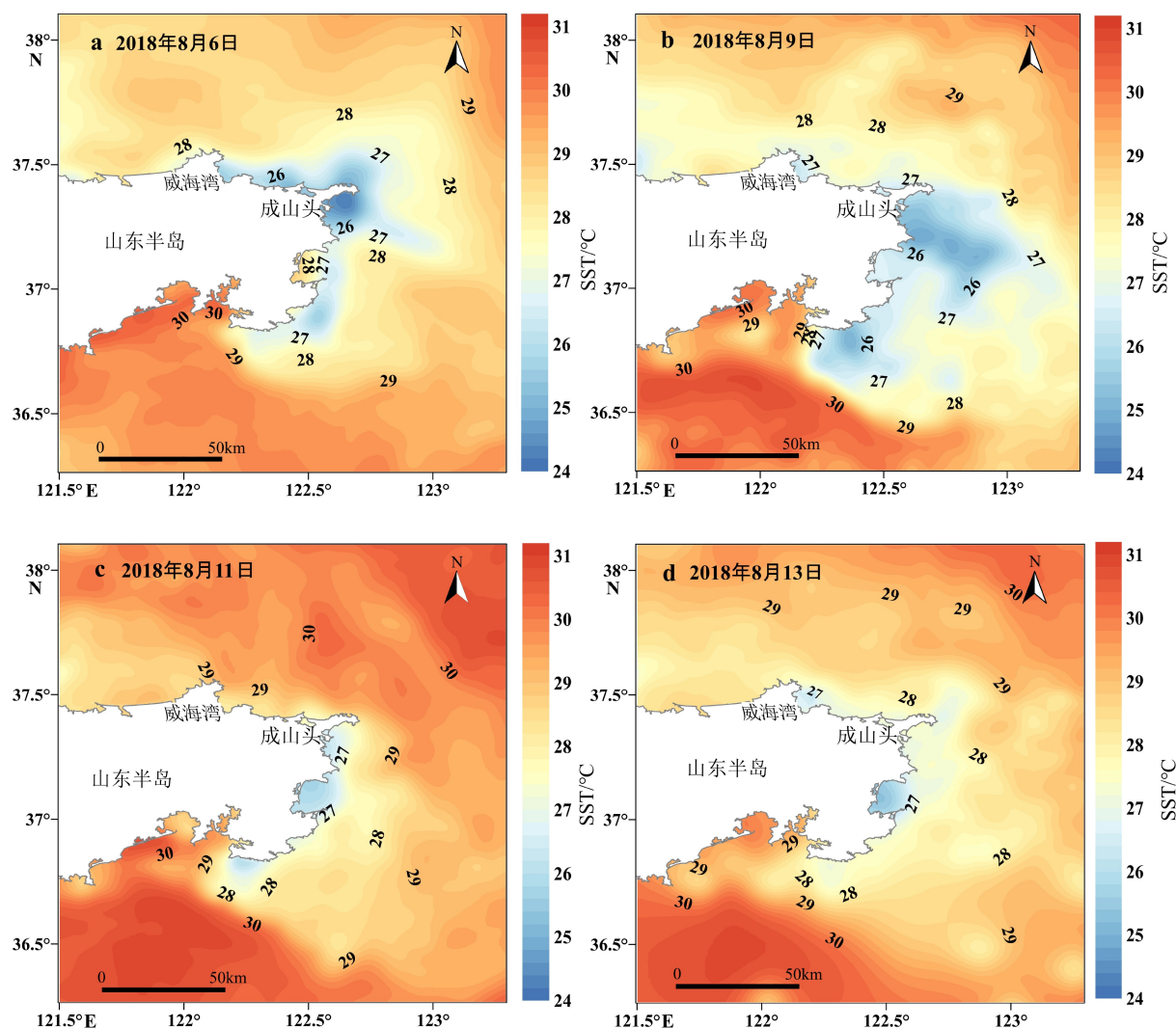


图 5 2018 年 8 月山东半岛东部近岸海域 GHRSSST 海表温度 (SST) 平面分布
a: 8 月 6 日, b: 8 月 9 日, c: 8 月 11 日, d: 8 月 13 日。

Fig.5 Plane distributions of sea surface temperature (SST) obtained from GHRSSST off the eastern tip of Shandong Peninsular in August, 2018
a: Aug 6, b: Aug 9, c: Aug 11, d: Aug 13.

度逐渐减弱甚至被破坏, 对应的底层水温迅速升高, 由 20°C 升至 23°C 。8 月 11—15 日, 局地风场转为东南向后, 底层水温开始缓慢下降, 说明上升流逐渐恢复。

从水位变化曲线 (图 6e、f) 可以看出, 8 月 6—8 日、11—15 日期间, 受偏南风的影响, 威海湾内水位逐渐上升; 偏北风作用期间 (8—11 日), 湾内水位总体呈下降趋势。为说明湾内水体的运动规律, 探讨上升流水体的来源, 选取垂直口门方向的余流变化进行分析讨论。图 6g、h 分别为北侧口门和南侧口门处的余流剖面, 图中正值表示海水流出口门方向, 从中可以看出, 两个站位的余流受风向的影响较为显著。在偏南风的作用下, 上层海水 (3~5 m 以浅) 均以离岸运动为主, 在偏北风时转为

向岸运动。而中下层水体表现出不同的运动趋势, T1 站位的中下层余流均指向湾外, T2 站位呈两层结构, 表底余流方向相反。由此可知, 威海湾上升流水体主要来源于湾外的中下层冷水, 在偏南风的作用下, 表层水体离岸输运, 外海中下层冷水主要从南侧口门进入威海湾, 造成水位升高, 过剩的水体则通过北侧口门流出湾外。

综上, 威海湾上升流主要是由夏季偏南风驱动产生的, Ekman 效应带来的上层海水离岸输运是其形成的重要因素。威海湾夏季上升流是间歇性的, 与风向密切相关。

(2) 海底地形对威海湾上升流的控制作用

海底地形对上升流的分布和结构特征具有一定控制作用^[28]。为说明地形对威海湾上升流的影

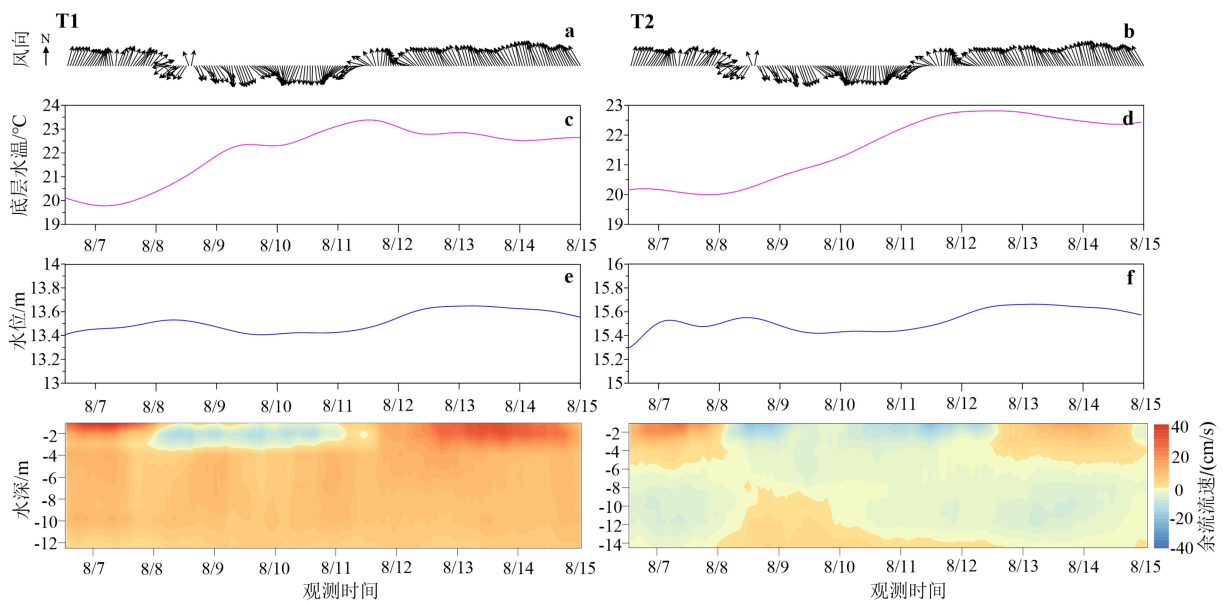


图6 2018年8月三角架观测系统T1、T2站位风速矢量、底层水温、水位变化和垂直口门余流剖面时间序列

Fig.6 Time series of winds, near-bed water temperature, water level and across-mouth components of residual currents at site T1 and T2 in August, 2018

响,选取断面Ⅰ、Ⅳ与断面Ⅱ、Ⅲ进行对比分析。断面Ⅰ地形较为复杂,由陆向海水深先变浅再逐渐变深,如图7a所示,10 m以深的等温线随地形由WH09站位向WH03站位逐渐抬升,具有冷水爬坡的特征,由于WH03-WH01站位之间水深变深,阻碍了外海冷水向近岸的继续入侵。断面Ⅳ地形变化较小,由陆向海逐渐下倾,坡度较缓,对应的等温线由WH79站位向WH72站位缓慢抬升。

等温线向岸抬升的高度可以代表上升流的强弱^[29]。与断面Ⅱ、Ⅲ相比,断面Ⅰ、Ⅳ等温线虽有向近岸抬升的趋势,但抬升高度明显较小,说明上升流强度较弱。以往研究表明,上升流中心多集中在地形急剧变化处^[8],从断面Ⅱ、Ⅲ(图3)可以看出,威海湾口门处地形坡度较大,等温线呈尖锥状向上凸起,上升流较强而且能够到达海表。而断面Ⅰ、Ⅳ地形坡度较缓,受宽缓地形底摩擦作用的影响^[30],上升流强度较弱,无法到达10 m以浅的位置(图7a)。因此,威海湾上升流是局地风场和地形共同作用的结果,夏季偏南风是上升流产生的先决条件,而海底地形则对上升流的强度具有重要影响。威海湾口门附近地形起伏较大,有利于形成较强的上升流。

4.2 上升流对悬浮体输运的影响

前人研究发现,中国陆架海的泥质沉积与上升流的位置有很好的对应关系,并进一步提出“陆架上升流会形成泥质斑块沉积”的理论^[7],尽管这一理论未得到进一步证实,却使上升流区的悬浮体输运

和沉积过程受到广泛关注^[5,31]。威海湾位于山东半岛东北部,其外侧海域是黄河入海泥沙通过渤海海峡向黄海输运的通道,在该海域发育有山东半岛近岸泥质区^[18,32]。流入威海湾的河流均为短小的山溪性雨源河流,仅在夏季输沙,输沙量较小且主要为粗粒沉积物,而湾内沉积物以黏土质粉砂为主,钻探结果表明其沉积厚度可达14 m^[23]。威海湾内无大型河流注入,湾内却发育有较厚的细粒沉积,其主要沉积物来源可能来自于湾外。

水体浊度可以有效地反映悬浮体浓度信息。图8为断面Ⅱ、Ⅲ的浊度分布,从中可以看出,高浊度水体主要集中在温跃层以下,湾外的水体浊度大于湾内,底层高于表层。浊度分布与水温分布特征较为一致,等值线在口门处凸起,具有向上涌升的趋势,北侧口门处亦存在明显的浊度锋面,与图3a中的温度锋面对应。选取WH19-WH23、WH53-WH58站位相同水深的浊度和温度数据进行相关性分析,结果表明水体浊度与温度具有高度相关性,相关系数分别为0.81和0.85。以上分析表明上升流区的悬浮体分布明显受到海水温度结构的影响。上升流可能对威海湾的悬浮体输运起到重要作用。一方面,数值模拟结果表明上升流的流速与悬浮泥沙的沉降速度量值相当^[31],上升流水体的涌升能够减缓悬浮体的沉降速度,泥沙得以在水体中保持悬浮,进而在潮流的作用下进行输运;另一方面,泥沙输运主要发生在底部边界层^[33],上升流的存在能够驱动外海底层海水的向岸输送,如王爱

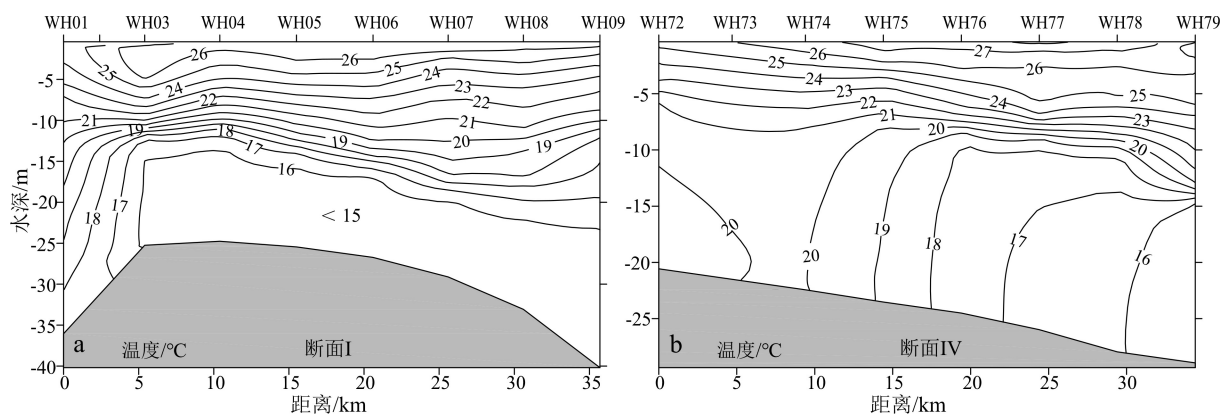


图 7 2018 年夏季大面站调查期间研究区断面 I (a)、断面 IV (b) 水温断面分布

Fig.7 Vertical distributions of temperature at transect I, IV during the grid stations cruise

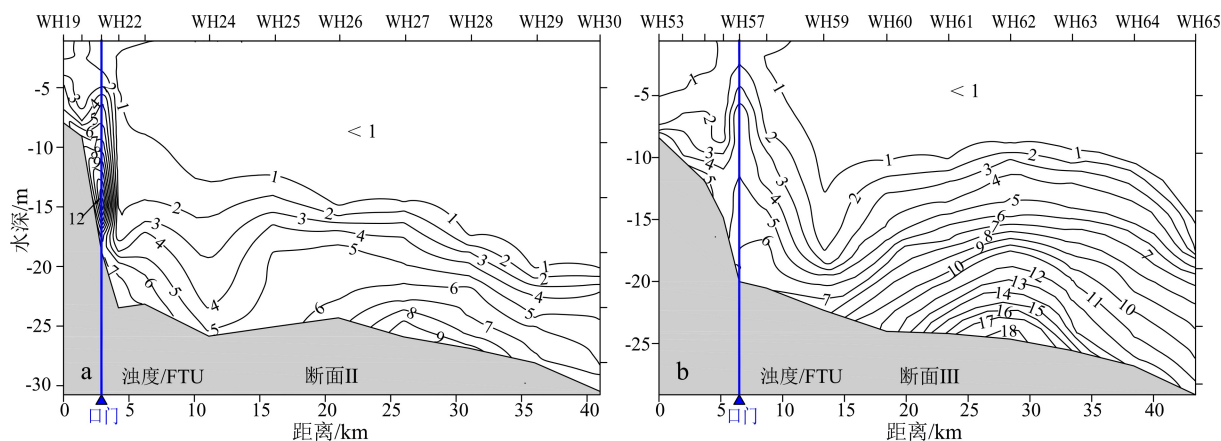


图 8 2018 年夏季大面站调查期间研究区断面 II (a)、断面 III (b) 浊度断面分布

(图中蓝线代表口门位置)

Fig.8 Vertical distributions of turbidity at transect II, III during the grid stations cruise

(The blue line represents the location of the bay mouth)

军等^[34]发现台湾海峡西南部海域沉积物有向岸输运的趋势,并通过有机碳与氮原子的比值,将悬浮体的向陆输运归因于上升流的作用。与沿岸流相比,近岸上升流的量级甚小,其沉积效应对悬浮体的输运机制需要结合数值模拟进一步深入研究。

黄河作为世界上含沙量第二高的大河,是影响渤海沉积格局的主要物质来源。一般认为,黄河入海泥沙主要通过渤海海峡南部向北黄海输运,部分沉积在山东半岛北部,其余部分绕过成山头成为南黄海泥质区的主要物源之一^[18, 32]。²¹⁰Pb 测年数据表明成山头东北端为沉积速率的低值区^[35-36],同时,沉积物粒度较南北两侧变粗,砂含量明显增加^[37],说明在强水动力作用下再悬浮作用强烈。Zhong 等^[38]近期研究成果表明夏季威海湾南侧口门悬浮泥沙浓度变化受控于平流输运,其输运方向指向湾内。成山头附近海域是悬浮体浓度的高值区,再悬浮的沉积物可在潮流作用下进入威海湾沉积,成为现代

湾内泥质沉积的主要来源之一,而上升流的存在可为底层海水提供向岸运动的分量。

5 结论与展望

(1) 实测海水水温和盐度数据表明夏季威海湾内存在明显的上升流现象,其中心位于口门附近。威海湾夏季上升流是间歇性的,与风向密切相关,观测期间随着局地风场经历西南风、西北风和东南风的转变,上升流呈现稳定、减弱、消失、恢复的阶段变化。

(2) 威海湾上升流主要由夏季偏南风驱动产生,在风应力的作用下,上层海水以离岸运动为主,外海中下层冷水主要通过南侧口门进入湾内,造成底层水温降低,水位升高,过剩的水体主要通过北侧口门流出湾外。同时,海底地形对上升流的强度具有重要影响。

(3)研究区水体浊度的分布状态与海水温度场具有高度相关性,浊度等值线在口门处凸起,具有向上涌升的趋势。成山头附近海域再悬浮的泥沙可能是威海湾内泥质沉积的主要来源之一,上升流的存在一方面可以减缓悬浮体的沉降速度,另一方面为底层海水提供向岸运动的分量。

(4)由于上升流流速甚小,目前无法通过仪器直接观测证实。在本文研究的基础上,下一步将开展数值模拟工作,为类似海湾中的上升流问题提供理论支撑,并对其沉积效应对悬浮体的输运机制进行进一步深入探讨。

参考文献 (References)

- [1] 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 2006年夏季琼东、粤西沿岸上升流研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 11-18. [XU Jindian, CAI Shangzhan, XUAN Lili, et al. Study on coastal upwelling in eastern Hainan Island and western Guangdong in summer, 2006 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(4): 11-18.]
- [2] 颜廷壮. 中国沿岸上升流成因类型的初步划分[J]. 海洋通报, 1991, 10(6): 1-6. [YAN Tingzhuang. Features and classification of coastal upwellings off China [J]. Marine Science Bulletin, 1991, 10(6): 1-6.]
- [3] 赵保仁, 李徽翡, 杨玉玲. 长江口海区上升流现象的数值模拟[J]. 海洋科学集刊, 2003: 64-76. [ZHAO Baoren, LI Huifei, YANG Yuling. Numerical simulation of upwelling in the Changjiang River mouth area [J]. Studia Marina Sinica, 2003: 64-76.]
- [4] 吕新刚, 乔方利, 夏长水, 等. 长江口外及浙江沿岸夏季上升流的潮生机制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 50(3): 462-473. [Xingang, QIAO Fangli, XIA Changshui, et al. Tidally induced upwelling off Yangtze River estuary and in Zhejiang coastal waters in summer [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(3): 462-473.]
- [5] 要津. 春季长江口外上升流变化及其对悬浮体分布的影响[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)硕士学位论文, 2017. [YAO Jin. The variation of the upwelling off Changjiang estuary and its impact on the distribution of suspended matters in spring [D]. Master Dissertation of the University of Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [6] 刘兴泉, 侯一筠, 尹宝树. 东海沿岸海区垂直环流及其温盐结构动力过程研究 I. 环流的基本特征[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(5): 393-403. [LIU Xingquan, HOU Yijun, YIN Baoshu. Dynamic process of vertical circulation and temperature-salinity structure in coastal area of East China Sea I. Basic Characteristics of the circulation [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(5): 393-403.]
- [7] Hu D X. Upwelling and sedimentation dynamics I. The role of upwelling in sedimentation in the Huanghai Sea and East China Sea-A description of general features [J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 1984, 2(1): 12-19.
- [8] 曹公平, 宋金宝, 樊伟. 2007年长江口邻近海域夏季上升流演变机制研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(1): 102-112. [CAO Gongping, SONG Jinbao, FAN Wei. Mechanism of upwelling evolvement in the Yangtze River Estuary adjacent waters in summer, 2007 [J]. Marine Sciences, 2013, 37(1): 102-112.]
- [9] 庄伟, 胡建宇, 贺志刚, 等. 2000年7-8月台湾海峡南部至珠江口附近海域表层温、盐度分析[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 68-76. [ZHUANG Wei, HU Jianyu, HE Zhigang, et al. An analysis on surface temperature and salinity from southern Taiwan Strait to Zhujiang River estuary during July-August, 2000 [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(4): 68-76.]
- [10] 孙振宇, 胡建宇, 毛华斌. 2006年9月南海北部表层温盐场的走航观测[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 6-10. [SUN Zhenyu, HU Jianyu, MAO Huabin. Underway observation of surface temperature and salinity in north South China Sea in September 2006 [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(1): 6-10.]
- [11] 蔡尚湛, 吴日升, 许金电. 2006年夏季粤东至闽南近岸海域上升流的特征[J]. 台湾海峡, 2001, 30(4): 489-497. [CAI Shangzhan, WU Risheng, XU Jindian. Characteristics of upwelling in eastern Guangdong and southern Fujian coastal waters during 2006 summer [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 30(4): 489-497.]
- [12] 汪戆, 经志友, 齐义泉. 2013年夏季琼东海域上升流观测研究[J]. 热带海洋学报, 2016, 35(2): 40-49. [WANG Yu, JING Zhiyou, QI Yiquan. Coastal upwelling off eastern Hainan Island observed in the summer of 2013 [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2016, 35(2): 40-49.]
- [13] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 451-460. [ZHAO Baoren. The fronts of the Huanghai Sea Cold Water Mass induced by tidal mixing [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(6): 451-460.]
- [14] 夏综万, 郭炳火. 山东半岛和辽东半岛顶端附近水域的冷水现象及上升流[J]. 黄渤海海洋, 1983, 1(1): 13-19. [XIA Zongwan, GUO Binghuo. Cold water and upwelling around the tips of Shandong Peninsula and Liaodong Peninsula [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1983, 1(1): 13-19.]
- [15] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2010. [LÜ Xingang. A numerical study of the mechanisms of the upwelling in the Yellow Sea and East China Sea [D]. Doctor Dissertation of the University of Chinese Academy of Sciences, 2010.]
- [16] 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, 18(3): 217-226. [ZHAO Baoren. A preliminary study of continental shelf fronts in the western part of southern Huanghai Sea and circulation structure in the front region of the Huanghai Cold Water Mass (HCWM) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1987, 18(3): 217-226.]
- [17] Lü X G, Qiao F L, Xia C S, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(6): 620-632.
- [18] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2007, 240(1-4): 169-176.
- [19] Bian C W, Jiang W S, Quan Q, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based

- on field surveys during the four seasons of 2011 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121-122: 24-35.
- [20] 余佳. 黄海悬浮体分布及季节性变化[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2012. [YU Jia. Seasonal variation and distribution of suspended sediment in the Yellow Sea[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [21] 吴桑云, 王文海. 海湾分类系统研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(4): 83-89. [WU Sangyun, WANG Wenhai. Study on the classification system of bays [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(4): 83-89.]
- [22] 程波. 威海湾表层沉积物地球化学[J]. 海洋科学, 1989(6): 42-46. [CHENG Bo. Geochemistry of Weihai Bay surface sediment and its development [J]. *Marine Sciences*, 1989(6): 42-46.]
- [23] 冯秀丽, 姜朝松, 杨荣民, 等. 威海湾建港条件分析[J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 41-48. [FENG Xiuli, JIANG Chaosong, YANG Rongmin, et al. Analysis of conditions for harbour building in Weihai Bay [J]. *Coastal Engineering*, 1992, 11(1): 41-48.]
- [24] 姚兰芳. 威海湾潮流的分布特征[J]. 海岸工程, 1990, 9(3-4): 61-65. [YAO Lanfang. Distributional features of the tidal current in the Weihai Bay [J]. *Coastal Engineering*, 1990, 9(3-4): 61-65.]
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 山东半岛北部和东部海湾(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 265-308. [Compilation Committee of China Bays. *China Bay in Third Volumes (North and East of Shandong Peninsula Bays)*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.]
- [26] Tomczak M. Upwelling dynamics in deep and shallow water[Z]//*Shelf and Coastal Oceanography*. 1998.
- [27] 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 粤东至闽南沿岸海域夏季上升流的调查研究[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(2): 1-9. [XU Jindian, CAI Shangzhan, XUAN Lili, et al. Observational study on summertime upwelling in coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(2): 1-9.]
- [28] Song Y T, Chao Y. A theoretical study of topographic effects on coastal upwelling and cross-shore exchange [J]. *Ocean Modelling*, 2004, 6(2): 151-176.
- [29] 颜廷壮. 浙江和琼东沿岸上升流的成因分析[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 12-18. [YAN Tingzhuang. Analysis of the causes of coastal upwelling off Zhejiang and eastern Guangdong [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(3): 12-18.]
- [30] Jiang L D, Yan X H, Tseng Y H, et al. A numerical study on the role of wind forcing, bottom topography, and nonhydrostaticity in coastal upwelling [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(1): 99-109.
- [31] Gao S, Jia J J. Modeling suspended sediment distribution in continental shelf upwelling/downwelling settings [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(4): 218-226.
- [32] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [33] Li Y H, Qiao L, Wang A J, et al. Seasonal variation of water column structure and sediment transport in a mud depo-center off the Zhejiang-Fujian coast in China [J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(6): 679-690.
- [34] 王爱军, 陈坚, 叶翔, 等. 台湾海峡西南部海域春季悬浮体及沉积物来源与输运机制[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 130-143. [WANG Aijun, CHEN Jian, YE Xiang, et al. Sediment sources and transport patterns in the southwest Taiwan Strait in spring [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(6): 130-143.]
- [35] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 9-14. [QI Jun, LI Fengye, SONG Jinming, et al. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 9-14.]
- [36] Lim D I, Choi J Y, Jung H S, et al. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas [J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 73(2): 145-159.
- [37] 王爱美. 黄海中部泥质沉积区温度锋面及层化的时空变化及其沉积效应[D]. 中国海洋大学, 2019. [WANG Aimei. Thermal front and stratification effect on the sediment transport and deposition at a muddy clinoform in the Yellow sea[D]. Ocean University of China, 2019.]
- [38] Zhong W, Zhu L H, Dong P, et al. Mechanisms of sediment trapping in coastal embayments off the Shandong Peninsula in summer—A case study in Weihai Bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 236: 106623.