

杨雪, 李广雪, 丁咚, 等. 山东半岛沿岸流强度与悬浮体时空变化特征[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 49-58.

YANG Xue, LI Guangxue, DING Dong, et al. Spatio-temporal change of coastal current around Shandong Peninsula and transport characteristics of suspended matter[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 49-58.

山东半岛沿岸流强度与悬浮体时空变化特征

杨雪^{1,2}, 李广雪^{1,2*}, 丁咚^{1,2}, 王祥东³, 刘雪^{1,2}, 刘世东^{1,2}

(1 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100;

3 青岛蓝色地球大数据科技有限公司, 青岛 266400)

摘要:基于 2014—2018 年 NOAA/AVHRR 遥感数据, 在山东半岛海域选取 6 条剖面, 结合海表温度和表层悬浮体的时空变化特征, 详细研究了山东半岛沿岸流的年周期变化规律与移动路径。研究表明, 山东半岛沿岸流年周期变化可分为 4 个阶段: 成长期 (10—12 月) 时开始形成于黄河口附近, 沿莱州湾南部向东运移; 强盛期 (次年 1—3 月) 时山东半岛沿岸流完全成型, 扩散带最宽, 鼎盛时期北部可以至 38°N 附近, 东部可以至 123°E 附近, 在 35°~36°N 附近分成 NE—SW 向的 2 个分支, 主干部分最远可到达胶州湾东部海域, 余流沿岸向西南方向转折; 衰退期 (4—6 月) 时沿岸流强度减弱, 只在山东半岛北部和东部小范围内有微弱的显示; 消亡期 (7—9 月) 时基本消失。山东半岛沿岸流在冬季时对悬浮体扩散具有强烈的驱动作用, 使其在黄河口南侧与山东半岛北岸-成山头东部海域分别形成呈“弧形”和“条带状”分布的 2 个高浓度区域。

关键词:山东半岛沿岸流; NOAA/AVHRR; 海表温度; 表层悬浮体

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.234

0 引言

海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 是研究海-气相互作用的重要参数之一, 也是用来揭示海流移动路径的一个重要指标^[1]。悬浮体是指水中有机、无机的颗粒态物质, 是海水的物质成分之一, 是许多微生物的重要载体, 影响着海洋生态环境以及内陆与海洋之间的物质交换; 同时悬浮体的输运过程可以反映海洋水动力特征, 影响海底地形地貌的塑造和海岸线的变迁。而沿岸流是影响近海悬浮物质分布和输运过程的主要驱动力。因此, 认识和

揭示山东半岛沿岸流及近海悬浮体的时空变化特征, 对山东半岛海洋环境乃至整个中国东部陆架海有着重要的意义。

山东半岛沿岸存在一条形成于全新世的泥质带^[2], 其受北黄海冷水团、沿岸南下的风海流和北上的黄海暖流的共同影响, 季节性变化特征显著, 形成“夏储冬输”的分布规律^[3]。泥沙多在夏季沉积入海, 冬季时, 悬浮泥沙沿着成山头近岸海区向南再向西流入南黄海^[4-8], 形成了山东半岛外部沿海特有的“Ω”形状泥质沉积带^[9-10]。LU 等^[11]通过模型模拟认为, 该沉积带是黄河沉积物的分支, 一直延伸至海岸线西南部。

对山东半岛沿岸流, 前人多是将其作为黄海沿岸流的北段来研究^[12-14], 称为鲁北沿岸流, 其沿山东半岛北岸自西向东流动, 在成山头转而向南, 在 36.7°N 处逐渐减弱并向西偏移^[9], 最远可到达青岛外海域^[15], 冬季最强, 春季减弱, 夏秋季消失^[16]。但将山东半岛沿岸流作为具体研究对象的较少, 其年周期演变特征和具体路径缺少系统梳理。本文主要利用 2014—2018 年的 NOAA/AVHRR 遥感数据, 对

收稿日期: 2021-08-30

资助项目: 青岛市科技局项目“青岛海域绿潮灾害预测系统开发”(19-6-1-77-nsh); 国家重点研发计划政府间重点专项(2017YFE0133500); 泰山学者建设工程专项

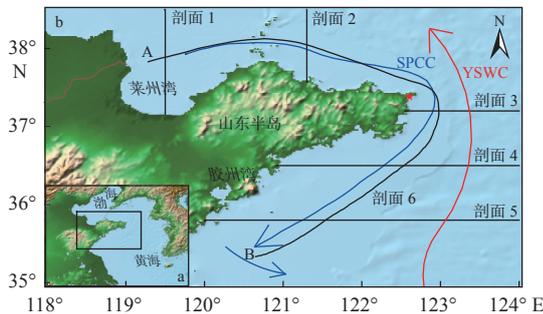
作者简介: 杨雪(1996—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地学遥感方面的研究工作。E-mail: yangxue_0906@163.com

* 通讯作者: 李广雪(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积与环境变化、海底资源与工程和海洋信息科学研究工作。E-mail: estuary@ouc.edu.cn

山东半岛海域 SST 和悬浮体浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)进行分析,系统研究山东半岛沿岸流的年周期变化规律和移动路径,探讨悬浮体时空分布特征和变化规律。

1 区域背景与数据来源

山东半岛毗邻渤海和黄海,水深为 20~40 m,是黄河沉积物向外海运输的主要通道^[17],水动力条件复杂。本文研究区域为 35°—38°30'N、118°—124°E 的范围(图 1)。研究海域存在一个逆时针环流系统^[18-21],主要是由南下的山东半岛沿岸流和北上的黄海暖流组成,具有明显的季节变化特征。西侧的山东半岛沿岸流沿莱州湾自西向东绕过成山头后向南流动,冬季较强,夏季较弱;东侧主要为高温高盐的黄海暖流^[14],从济州岛西南侧进入黄海,沿黄海中部向北流动,冬季较强,夏季衰退甚至不存在^[22]。研究海域属于温带季风气候,主要受东亚季风控制,季节性变化显著。



SPCC-山东半岛沿岸流; YSWC-黄海暖流

剖面 1~6 是典型剖面位置

图 1 研究区位置图^[18-19]

Fig.1 Location of the research area and the sections^[18-19]

遥感观测具有高时效性、高分辨率、不受极端恶劣天气和地理位置影响的特点,可以准确测量多个海洋物理量的连续变化规律^[23]。本研究使用的遥感数据来自美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的太阳同步极轨卫星 NOAA-19 AVHRR/3 的升序数据,NOAA 卫星具有周期短、覆盖范围宽、连续性好的特点^[24-25],被广泛应用到温度和悬浮体反演领域。

AVHRR/3 探测器地面分辨率(星下点)为 1.1 km,包含 5 个波段:可见光红色波段(波长范围 0.58~0.68 μm)、近红外波段(波长范围 0.725~1.00 μm)、中红外波段(波长范围 1.58~3.93 μm)和 2 个热红

外波段(波长范围 10.30~11.30、11.50~12.50 μm)。

NOAA 卫星的 band1 和 band2 可以通过辐射定标被定标为反射率(L ,单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$),反射率与 SSC 之间呈正相关关系^[26],因此,采用反射率来代表 SSC 的变化情况。

NOAA-19 卫星的反射率 L 可以通过如下方法计算得到^[27]:

$$L = Gain \times DN + Bias \quad (1)$$

式中: L 为反射率, $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$;

DN 为数字量化值;

Gain 为增益, Bias 为偏移,二者可以通过遥感数据的头文件获得。

NOAA 卫星的 band3~5 可以被定标为亮度温度(单位为 K),进而得到海表温度(SST)。NOAA-19 卫星的 SST 可以通过如下方法计算得到^[27-28]:

$$SST = -278.74596 + 1.01922 \times band4 + 1.72270 \times (band4 - band5) + 0.80263 \times (band4 - band5)(\sec(\psi) - 1) \quad (2)$$

式中: SST 为海表温度, °C;

band4 和 band5 分别为 NOAA 卫星的波段 4 和波段 5;

$\sec(\psi)$ 为卫星高度角的正切值。

基于每月的 SST 数据,计算得到其 5 年年平均值 SST_y ,研究海表温度的逐月变化趋势,计算公式如下:

$$SST_y = \left(\sum SST_m \right) / n \quad (3)$$

式中: SST_y 为每月海表温度的 5 年平均值;

SST_m 为每一年对应的月平均 SST 值;

n 为所用数据的总年数。

根据国家自然科学基金委渤海共享航次 2015—2018 年的 CTD 调查数据,建立研究区实测 SST 和遥感反演 SST 的关系式(图 2),研究二者之间的相关性。从图 2 可知,实测 SST 和遥感 SST

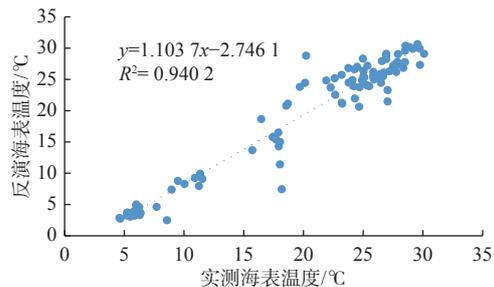


图 2 实测海表温度与反演海表温度拟合关系

Fig.2 Fitting relationship between measured SST and inversion SST

的 R^2 为 0.940 2, 相关性很好, 因此, 可以用遥感 SST 来代表海表温度。

2 研究结果

2.1 山东半岛沿岸海表温度季节性分布规律

山东半岛沿岸海域 SST_y 分布情况如图 3 所示, 呈现出明显的季节性变化特征。冬季(图 3a-c), 山东半岛沿海 SST_y 整体呈现低温状态, 2 月时达到全年最低值, 近岸低、远岸高, 南下的沿岸冷水从莱州湾南岸沿山东半岛北部向东移动, 在成山头处转而

向南呈“水舌状”扩散, 一直延伸至胶州湾东侧海域; 春季(图 2d-f), 整个山东半岛 SST_y 介于 4~16 °C, 黄河入海口南侧明显高于周围海域, 呈“弧形”分布, 沿岸“水舌状”冷水分布范围逐渐缩小, 到 4 月基本消失, 只在蓬莱北部海域和成山头东部海域出现“条带状”低温水域; 夏季(图 3g-i), 海域 SST_y 逐渐升高, 范围主要介于 16~26 °C, 8 月达到全年最高值, 黄河入海口南侧“弧形”高温水域范围扩大, 春季时出现的 2 个“条带状”水域温度升高范围缩小甚至消失; 秋季(图 3j-l), SST_y 逐渐降低, 莱州湾南部海域出现低于 10 °C 的“条带状”低温区, 并逐渐沿山东半岛北岸向东扩散。

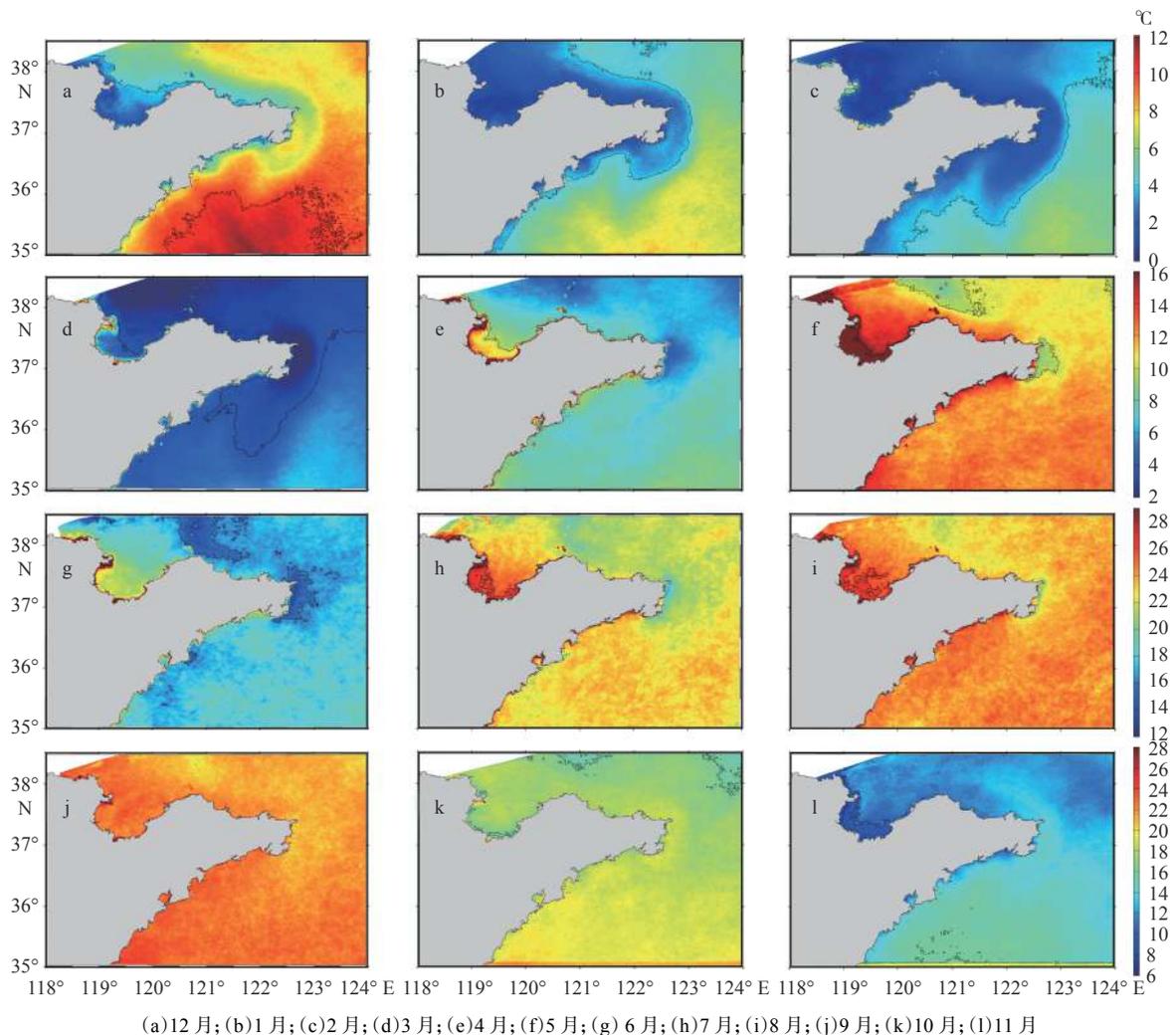


图 3 山东半岛海域 SST_y 分布图

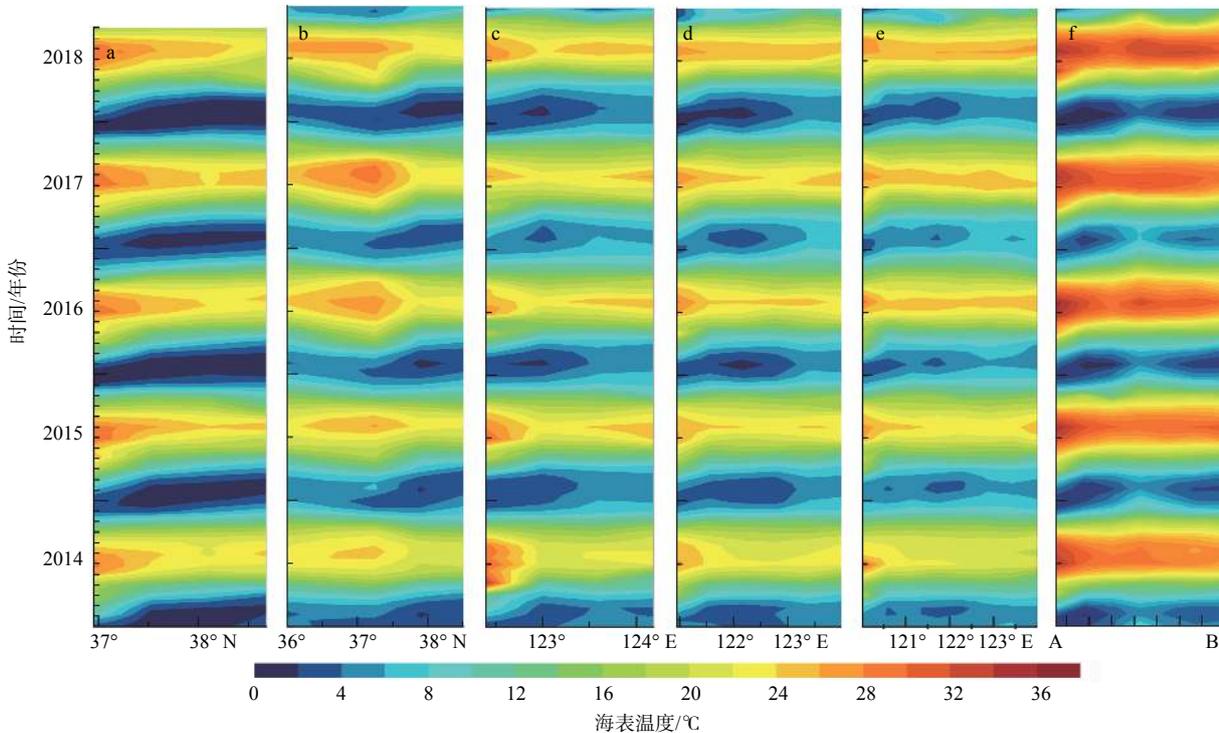
Fig.3 Distribution of SST_y near the Shandong Peninsula

在研究区内选取 5 条垂直于岸线的剖面 1~5, 选取一条沿 20 m 等深线分布的沿岸流剖面 6(图 1), 提取剖面上的 SST 数据绘制经纬度-时间-SST 剖面

图(图 4)。结果显示, 各条剖面 SST 整体呈现出夏秋高、冬春低的特征: 夏秋季时, 海域温度维持在较高的水平, 且剖面 1、2(图 4a、b)存在一个离岸一定

距离的高温中心,剖面3~5(图4c-e)的温度变化趋势基本一致,变化幅度较小,沿岸流剖面(图4f)整体呈现出逐年增温的趋势;冬春季时,剖面2的37.5°N附近(莱州湾海域)、剖面3的123°E附近

(成山头东部海域)、剖面6的119.5°E附近(莱州湾海域)和122.5°E附近(成山头东部海域)都分别出现低温中心,这与图3冬春季的2个低温分布区域一致。



(a)垂直剖面1, 119.5°E; (b)垂直剖面2, 121.3°E; (c)垂直剖面3, 37°N; (d)垂直剖面4, 36.5°N; (e)垂直剖面5, 35.8°N; (f)沿岸流剖面6

图4 经纬度-时间-SST剖面图

Fig.4 Profiles of longitude-latitude-time-SST at different sections

2.2 山东半岛沿岸悬浮体季节性分布规律

图5是山东半岛沿岸海域反射率5年平均分布图。山东半岛沿岸海域的反射率整体呈“W”型分布,12月最高,8月最低,6、7月反射率值较5、8月有所升高。冬季(图5a-c)山东半岛沿岸海域反射率最高,变化范围介于16~20 W/(m²·μm·sr),黄河入海口南侧的反射率值超过18 W/(m²·μm·sr),并呈“弧状”逐渐向外扩散,沿山东半岛近岸形成“条带状”分布区域,最终消失于胶州湾东部海域附近;春季(图5d-f)延续了冬季的分布特征,“条带状”分布区域向外范围逐渐减小,反射率逐渐降低,主要介于8~16 W/(m²·μm·sr),最大值出现在黄河入海口南侧;夏季(图5g-i)“条带状”分布区域完全消失,反射率值最低,变化趋势平缓,整体处于8~13 W/(m²·μm·sr),8月时达到最低值;秋季(图5j-l)反射率缓慢增高,黄河入海口南侧回升最为明显,山东半岛近岸的“条带状”分布区逐渐形成

并扩大。

提取垂直剖面和沿岸流剖面的反射率数据,绘制经纬度-时间-反射率剖面图(图6)。结果显示,冬春季反射率值最高,存在明显的高值中心,以剖面1的37.5°N附近(莱州湾海域)和剖面3的122.5°E附近(成山头东部海域)的高值区域最为典型;夏秋季反射率值偏低,2014—2016年存在较为明显的反射率低值中心,以剖面2的38°N附近(山东半岛北部沿岸)和剖面3、4、5的123°E附近(成山头东部海域)最为典型,2017、2018年反射率变化趋势平缓。纵向来看,剖面1~5(图6a-e)反射率每年呈现不同程度的增高;横向来看,剖面1~5反射率呈现出逐渐降低的趋势,这反映出研究区SSC随运输距离的增加而减小,沿岸流剖面(图6f)印证了这一点。从A点开始沿山东半岛沿岸,反射率基本呈现出逐渐降低的趋势,在122.5°E附近(成山头东部海域)存在一个高值中心。

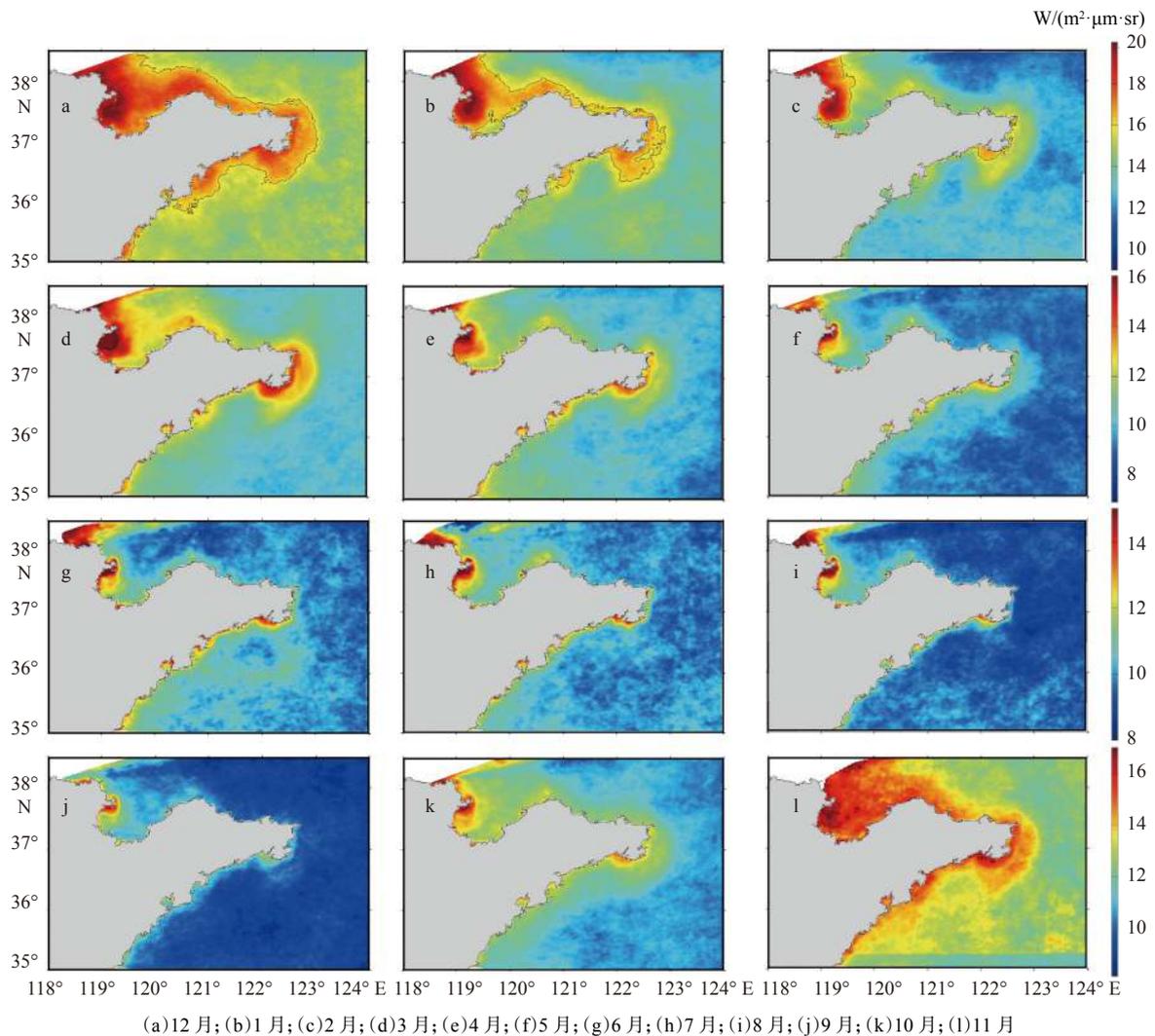


图 5 山东半岛海域反射率 5 年平均分布

Fig.5 Distribution of five-year average of reflectivity near the Shandong Peninsula

3 讨论

3.1 山东半岛沿岸流路径及演变特征

等值线越密, SST_y 梯度变化越大, 等值线外围消失的地方即为冷水沿岸流消失的位置, 因此, 可以根据垂直剖面 SST_y 等值线梯度的变化, 判断山东半岛沿岸流的起始位置和扩散宽度。沿选取的 5 条剖面绘制经纬度-时间- SST_y 剖面图 (图 7), 可以发现, 剖面 1、2 的 SST_y 等值线边缘在 38°N 附近, 剖面 3、4、5 的 SST_y 等值线边缘在 123°E 附近; 因此推断山东半岛沿岸流向北可以扩散至 38°N 附近, 向东可以扩散至 123°E 附近, 这与图 4 分析的沿岸流最远扩散距离一致。

根据 SST_y 最大梯度处 (图 7 黑线) 的数据绘制

SST_y 时间序列图 (图 8), 定量分析 SST_y 的年周期变化规律发现: 1—3 月时, SST_y 维持在 0~5 °C, 整体呈现平稳趋势; 4—6 月时, SST_y 升温较快, 最高温度可达 20 °C; 7—9 月时, SST_y 呈现较弱的升温趋势, 温度达到全年最高值; 10—12 月时, SST_y 降温较快, 但最低温度高于 1—3 月的平均温度。 SST_y 的年周期变化具有较强的规律性, 而海表温度可作为分析山东半岛沿岸流强弱变化的指标^[1], 因此, 可以将山东半岛沿岸流年周期变化分为 4 个阶段, 分别是成长期 (10—12 月)、强盛期 (次年 1—3 月)、衰退期 (4—6 月) 和消亡期 (7—9 月)。

图 9 反映了山东半岛沿岸流 4 个阶段的分布情况, 其中, 实线代表沿岸流的主干边界, 虚线代表沿岸流的扩散边界。成长期时, 山东半岛沿岸流形成于黄河口附近, 沿莱州湾南部移动, 之后沿山东半岛北岸向东流动; 强盛期时, 山东半岛沿岸流最强, 扩

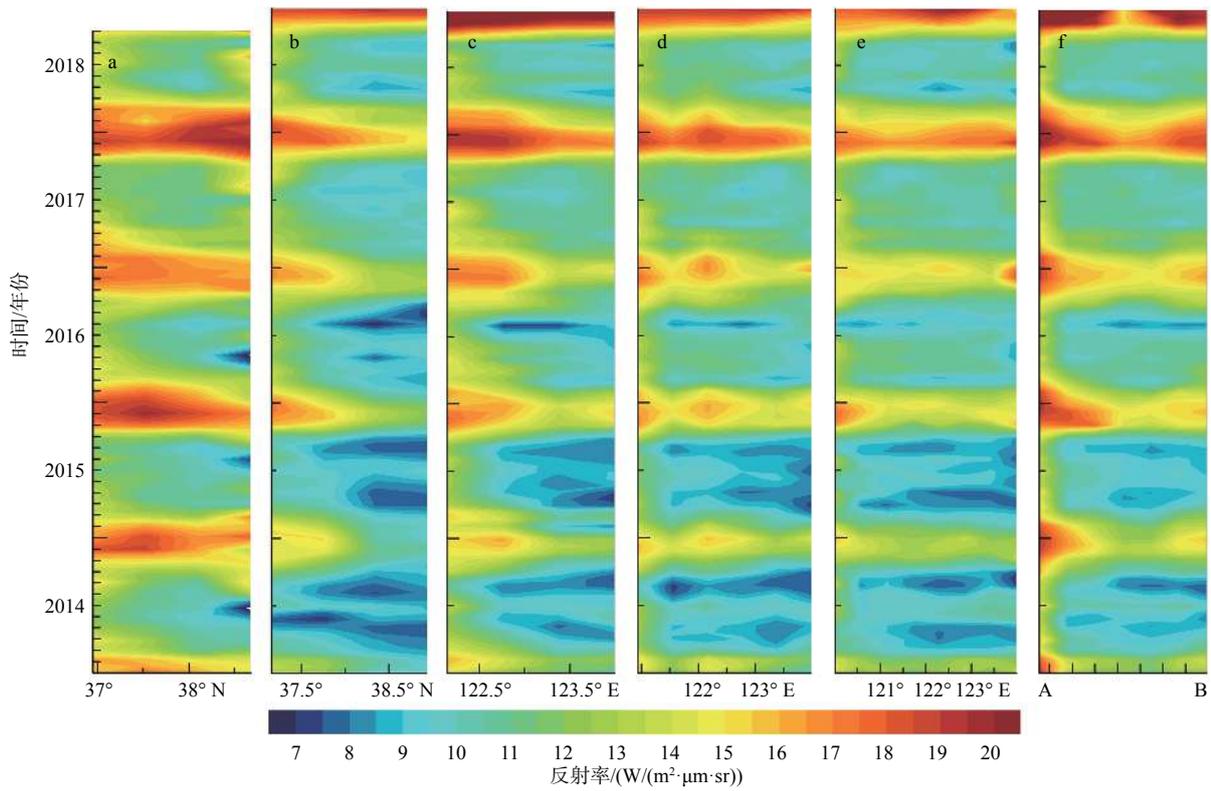


图 6 经纬度-时间-反射率剖面图

Fig.6 Profiles of longitude-latitude-time-reflectivity at different sections

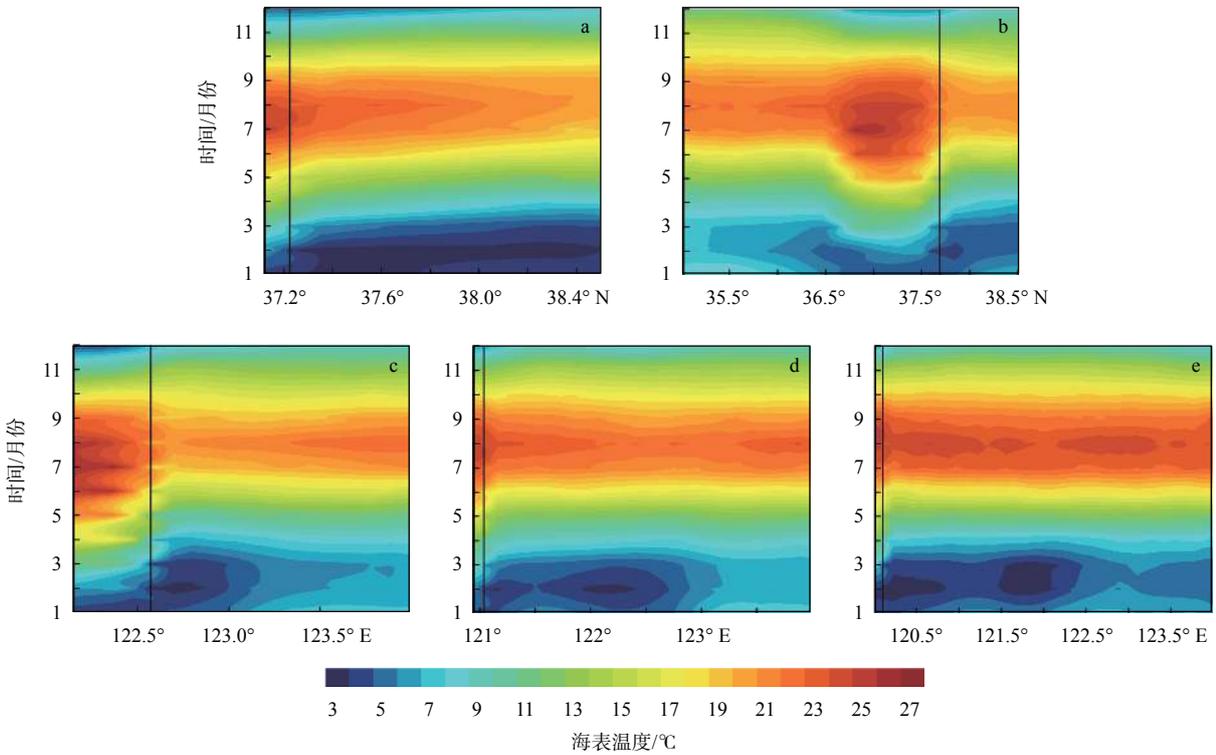


图 7 经纬度-时间-SST_y 剖面图

Fig.7 Profiles of longitude-latitude-time-SST_y at different sections

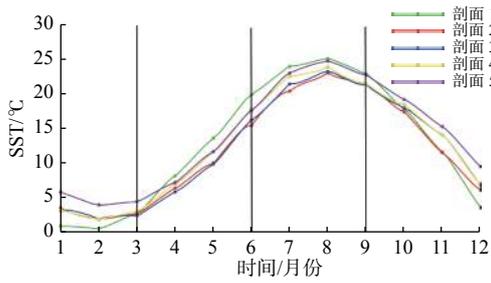


图 8 SST_y 时间序列图

Fig.8 Time series of SST_y

散带最宽, 最宽时北部可以至 38°N 附近, 东部可以至 123°E 附近, 在 35°—36°N 附近受到黄海暖流的阻碍作用^[27, 29], 分为 2 个皆呈 NE—SW 向的分支, 主干部分最远可到达胶州湾东部海域, 余流沿岸向南延伸一段距离; 衰退期时, 山东半岛沿岸流减弱, 只在山东半岛北部和东部小范围出现; 消亡期时, 山东半岛沿岸流基本消失, 与强盛期形成明显的反差。

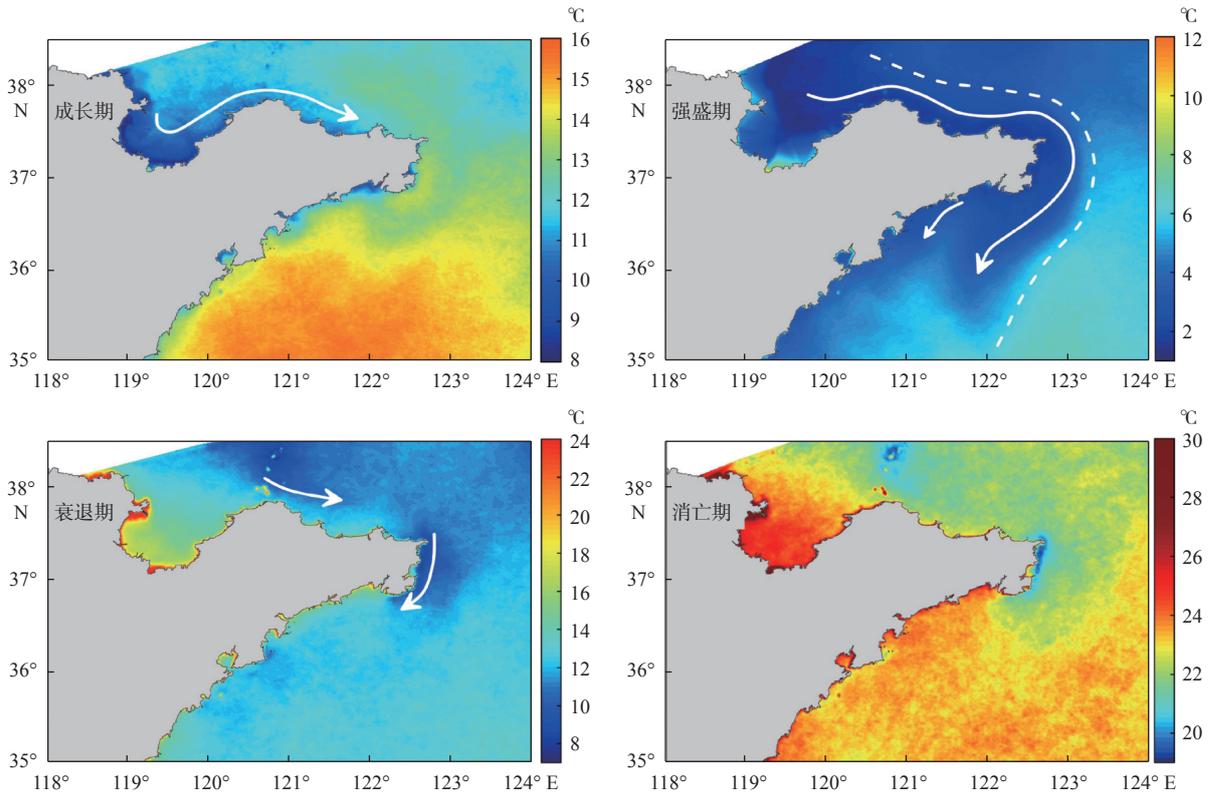


图 9 山东半岛沿岸流年周期变化示意图

Fig.9 Schematic diagram of annual periodic variation of coastal currents along Shandong Peninsula

3.2 悬浮体输运特征及原因

MARTIN 等^[30] 通过 SSC 实测数据发现, 黄河携带的泥沙物质, 有 90%~95% 堆积在水下三角洲, 5%~10% 输运到渤海, 只有 <1% 的输运到黄海。根据《中国河流泥沙公报》统计的利津站 2014—2018 年黄河径流量和输沙量数据, 绘制 5 年平均变化曲线图(图 10), 根据 NASA Earth Science Enterprise(ESE) 提供的 2014—2018 年 Cross-Calibrated, Multi-Platform(CCMP) 风场资料, 绘制山东半岛沿岸的海表风场特征图(图 11), 对影响研究区悬浮体输运的因素进行分析。

结果显示, 冬季(图 11a—c)黄河径流量小, 输沙量少, 在西北风的强力扰动下, 黄河三角洲近岸再

悬浮的泥沙成为研究区悬浮体的主要物质来源, 同时, 受季风影响的山东半岛沿岸流加强, 输运悬浮

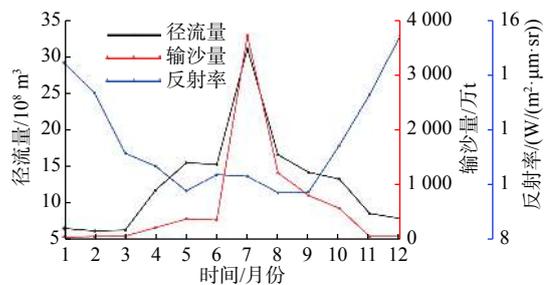


图 10 2014—2018 年黄河径流量、输沙量与研究区反射率 5 年平均变化图

Fig.10 The five-year average variations of the Yellow River runoff, sediment discharge, and reflectance of research area from 2014 to 2018

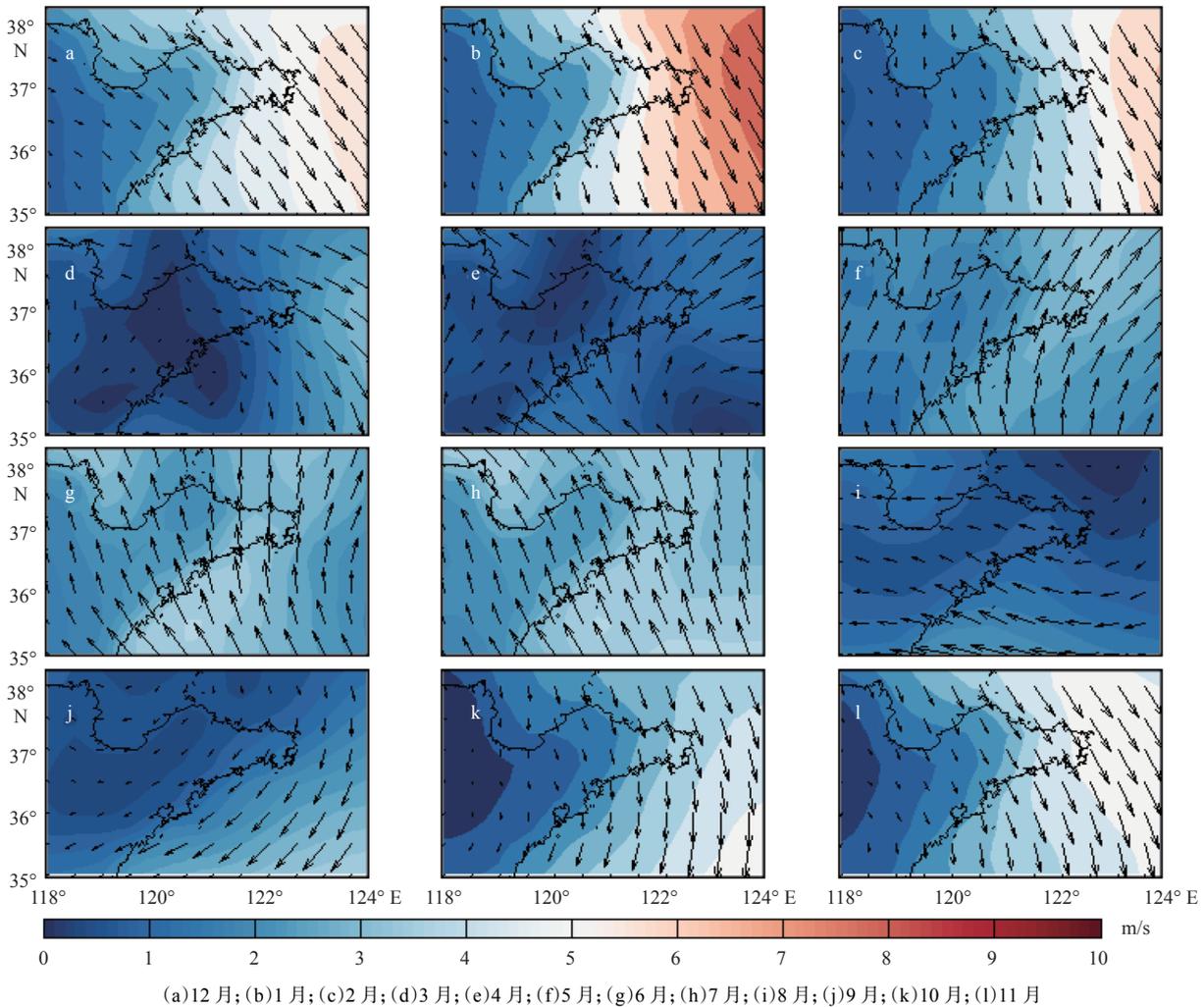


图 11 山东半岛 CCMP 风场 5 年平均图

Fig.11 The five-year average of CCMP wind field in Shandong Peninsula

物的能力增强,携带再悬浮的泥沙沿山东半岛北岸向东输运,在成山头东部与北上的沿岸流相遇,形成明显的海流切变锋,山东半岛沿岸流流幅迅速减小^[31],悬浮泥沙在此沉积形成成山头东部海域高值区。继续向南输运时,在 35°–36°N 附近又受到黄海暖流的阻碍作用^[27,29],山东半岛沿岸流被分为 2 个皆呈 NE–SW 向的分支,其主干部分与黄海暖流发生切变作用,携带的大部分悬浮物质在 36°–37°N 附近沉积,余流部分沿山东半岛沿岸向西输运至胶州湾东部海域附近,整体呈“N”形分布,与沿岸锋面分布^[32]大致相同。春季(图 11d–f),悬浮泥沙的运移延续了冬季的特征,但是由于西北季风作用减弱,再悬浮作用和沿岸流作用减弱,悬浮泥沙的浓度和运移能力都减小,高值区主要位于黄河口沿岸地区以及成山头东部沿岸海域。夏季(图 11g–i),黄河径流量大,输沙较多,但是山东半岛东部海域盛行东南风,山东半岛沿岸流减弱甚至消失,水动

力条件较弱,悬浮泥沙失去了运移的载体,运输量较小,浓度较低。秋季(图 11j–l),西北风逐渐增强,再悬浮和沿岸流的作用开始显现,SSC 逐渐增高,悬浮泥沙在山东半岛沿岸流的搬运下向东向南运移。

4 结论

本文利用 NOAA 遥感数据分析山东半岛沿岸海域 2014–2018 年海表温度的时空分布特征和表层悬浮体浓度,探讨山东半岛沿岸流的年周期变化规律和移动路径,得到以下结论:

(1) 山东半岛沿岸流年周期变化可分为成长期(10–12月)、强盛期(次年 1–3月)、衰退期(4–6月)和消亡期(7–9月)4 个阶段。成长期时,沿岸流形成于黄河口附近,沿莱州湾南部移动,之后沿山东半岛向东流动;强盛期时,山东半岛沿岸流完

全形成,扩散带最宽,鼎盛时期北部可以至 38°N 附近,东部可以至 123°E 附近,在 35° — 36°N 附近分为2个皆呈NE—SW向的分支,主干部分最远可到达胶州湾东部海域,余流沿岸向西南方向转折;衰退期时,山东半岛沿岸流势力减弱,只在山东半岛北部和东部小范围内有微弱的显示;消亡期时,山东半岛沿岸流基本消失,与强盛期形成明显的反差。

(2)山东半岛沿岸流对悬浮体扩散具有强烈的驱动作用,冬季在北向风作用下,山东半岛沿岸流挟带再悬浮的泥沙跨过莱州湾向外海搬运,使其在黄河入海口南侧以及山东半岛北岸-成山头东部海域分别形成“弧形”和“条带状”悬浮体高浓度分布区域。

参考文献:

- [1] 张春桂,张星,曾银东,等.台湾海峡海表面温度的遥感反演及精度检验[J].*海洋学报(中文版)*,2008,30(2):153-160.
- [2] YANG Z S, LIU J P. A unique Yellow River-derived distal sub-aqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1): 169-176.
- [3] 杨作升,高文兵. 黄海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(中文版)*,1992,14(2):81-90.
- [4] 秦蕴珊,李凡,郑铁民,等. 南黄海冬季海水中悬浮体的研究[J]. *海洋科学*,1986,10(6):1-7.
- [5] 郑铁民,赵一阳,李凡,等. 南黄海夏季海水中悬浮体的研究[J]. *海洋学报(中文版)*,1990,12(6):749-757.
- [6] LIU X M, QIAO L L, ZHONG Y, et al. Pathways of suspended sediments transported from the Yellow River Mouth to the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 236: 106639.
- [7] QIAO L L, ZHONG Y, WANG N, et al. Seasonal transportation and deposition of the suspended sediments in the Bohai Sea and Yellow Sea and the related mechanisms[J]. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(5): 751-766.
- [8] 王保铎. 夏、秋季黄海典型断面悬浮体分布特征及环境意义[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013.
- [9] 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*,2012,17(5):49-57.
- [10] 王勇智,张永强,孙惠凤. 山东半岛东部海域悬浮体分布季节变化及其冬季输送通量研究[J]. *沉积学报*,2019,37(3):541-549.
- [11] LU J, QIAO F L, WANG X H, et al. Modeling the Yellow River sediment flux and its deposition patterns under climatological conditions[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(6): 709-722.
- [12] 孙湘平. 中国近海区域海洋学[M]. 北京:海洋出版社,2006.
- [13] 乔方利. 中国区域海洋学-物理海洋学[M]. 北京:海洋出版社,2012.
- [14] GUAN B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[C]//ZHOU D, LIANG Y B, ZENG C K. *Oceanology of China seas*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994: 17-26.
- [15] 温国义,李广雪,赵东波,等. 根据AVHRRSST探讨中国北部海域冬季环流演变[J]. *海洋环境科学*,2008,27(S2):19-23.
- [16] 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.
- [17] 窦衍光,李军,杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义[J]. *海洋学报(中文版)*,2012,1(34):109-119.
- [18] YUAN D L, ZHU J R, LI C, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1/2): 134-149.
- [19] BIAN C, 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] 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运输的影响[J]. *地球科学进展*,2011,26(2):145-156.
- [21] 藏政晨,王厚杰,薛佐,等. 黄海近岸锋面的时空变化及其对沉积物运输和沉积的影响[J]. *海洋地质前沿*,2015,31(7):1-10.
- [22] MASK A C, O'BRIEN J J, PRELLER R. Wind-driven effects on the Yellow Sea Warm Current[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C13): 30713-30729.
- [23] 姜杰. 遥感技术在海岸带海洋地质环境综合调查中的应用[J]. *海洋地质动态*,2006,22(5):30-32.
- [24] 李艳彬. 中红外数据反射信息反演研究[D]. 石家庄:河北地质大学,2018.
- [25] 余伟豪. NOAA卫星同期观测数据综合分析及应用研究[D]. 廊坊:防灾科技学院,2019.
- [26] 熊学军. 中国近海海洋:物理海洋与海洋气象[M]. 北京:海洋出版社,2012.
- [27] 刘雪. 基于遥感的中国东部海域悬浮泥沙季节变化研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [28] LIU X, LI G X, MA Y Y, et al. Distribution and diffusion of surface suspended matter off the East China Shore, 2010[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 49-59.
- [29] 王辉武,于非,吕连港,等. 冬季黄海暖流区的空间变化和年际变化特征[J]. *海洋科学进展*,2009,27(2):140-148.
- [30] MARTIN J M, ZHANG J, SHI M C, et al. Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the Western Pacific Ocean[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1993, 31(3): 243-254.
- [31] 鲍献文,李真,王勇智,等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布特征[J]. *泥沙研究*,2010,15(2):48-56.
- [32] 刘传玉. 中国东部近海温度锋面的分布特征和变化规律[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2009.

Spatio-temporal change of coastal current around Shandong Peninsula and transport characteristics of suspended matter

YANG Xue^{1,2}, LI Guangxue^{1,2*}, DING Dong^{1,2}, WANG Xiangdong³, LIU Xue^{1,2}, LIU Shidong^{1,2}

(1 Key Laboratory of Submarine Sciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Qingdao Blue Earth Big Data Technology Co. Ltd., Qingdao 266400, China)

Abstract: Based on NOAA/AVHRR remote sensing data from 2014 to 2018, six sections were selected in the sea area around Shandong Peninsula, East China. Combined with the temporal and spatial variation characteristics of sea surface temperature and concentration of surface suspension matter, the annual periodic variation and movement path of the coastal current at the six sections were studied. Results show that the annual periodic variation of the coastal current along Shandong Peninsula could be divided into four stages. The first is the growth stage (October to December), during which coastal currents are originated near the Yellow River estuary and move eastward along the southern Laizhou Bay. The second is the mature stage (January to March of the next year), during which the coastal currents are fully formed, and had the widest diffusion zone reaching near 38°N in the north and 123°E in the east. Two branches from northeast to southwest near 35°~36°N could be recognized. The main part reached the eastern sea area of Jiaozhou Bay, and the residual current turned southwest. The third is the decline stage (April to June), during which the intensity of coastal currents weakened but showing only a small range in the north and east of Shandong Peninsula. The fourth is the extinction stage (July to September), and they largely disappeared. In winter, Shandong Peninsula coastal current had a strong driving effect on the diffusion of surface suspension, by which two high-concentration areas in the patterns of "arc" and "strip" distribution were formed in the south of the Yellow River Estuary, and in the area between the north shore of Shandong Peninsula and the east of Chengshantou, respectively.

Key words: Shandong Peninsula coastal current; NOAA/AVHRR; sea surface temperature; surface suspension matter