黄河入海物质输运通道*

刘兴民[1, 2] 乔璐璐[1, 2①] 万修全[3] 仲 毅[1, 2] 马伟伟[3] 刘 鹏[1, 2]

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室 青岛 266100; 3. 中国海洋大学 海洋与大气学院 青岛 266100)

摘要 渤海水体浊度的分布及其季节变化反映了悬浮物质的分布、输运及其季节特征。本文利用 2012—2016 年渤黄海 8 个航次现场观测的水体温度、浊度数据, 并结合 CCMP(Cross—Calibrated Multi—Platform)风场数据、ROMS(Regional Ocean Model System)海流数值模拟结果, 分析了渤海海域水体浊度季节分布特征。水体浊度的大小与风速的季节变化密切相关, 冬季, 黄河口及附近海域的浊度值最高,离岸 31km 到 56km 处浊度值从 180NTU 迅速下降至 54.3NTU, 而其他季节的浊度较低; 渤海全年 20m 以深海域再悬浮较弱, 以水平扩展为主。进而甄别了黄河口附近高浊度水体向渤黄海输运的两条路径, 分别为: 冬夏季均存在的沿渤中浅滩西侧通道向渤海北部扩展和冬季存在的沿莱州湾湾口向渤海海峡南部及北黄海输运,该两条路径主要由环流场控制。

关键词 渤海; 浊度; 季节变化; 风场
中图分类号 P736.21 doi: 10.11693/hyhz20180700173

渤海是半封闭的陆架边缘浅海, 也是悬浮体浓度较高的海域。其海洋环流复杂, 主要受潮流和季风控制(王桂芝等, 2002)。渤海海域有黄河、海河、滦河、辽河等河流的注入, 因此该海域成为陆源沉积物的主要物质汇(Yang *et al*, 2007)。而众多河流当中, 黄河输沙量所占比重最大, 其他河流携带泥沙仅为黄河输沙量的 10%。在渤海环流作用下, 黄河输入的物质经渤海海峡输入北黄海, 然后绕过山东半岛东部进入南黄海, 成为黄海中部泥质区主要物源(秦蕴珊等, 1986)。

关于渤海悬浮体的分布及输运, Lu 等(2017)通过 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)遥感影像与数值模拟相结合的方法来研究近岸悬浮体的时空差异, 研究表明由于水动力条件变化, 悬浮体浓度季节变化显著, 黄河入海口附近海域悬浮体浓度值及其变化范围比其他海域大。肖合辉(2014)通过实测数据并结合遥感影像和 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)模型探讨了渤黄海悬浮体的主要运移路径。王勇智等(2007)利用 HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Mode)模型模拟了不同季节渤、黄海悬浮体浓度变化, 得出渤、黄海悬浮体浓度分布存在明显的季节性差异, 由于冬季风浪作用强于夏季, 所以冬季海底沉积物再悬浮强度明显高于夏季。庞重光等(2014)通过长时间序列悬浮泥沙质量浓度和风场遥感反演数据, 进一步定量研究风浪和潮流共同作用下沉积物的再悬浮过程, 从而揭示整个渤海海域代表性海区悬浮泥沙质量浓度时空分布的动力成因。周舟等(2017)利用多年遥感数据反演了渤海表层悬浮体浓度的空间分布, 结果表明除了季节变化特征外, 从年际变化上看整个渤海海域的悬浮体浓度呈下降趋势。Wang 等(2014)根据实测数据和 MODIS 卫星遥感资料, 研究了渤海悬浮沉积物的分布, 结果表明, 在渤海海区, 悬浮泥沙的空间分布主要由河流的输入和海岸泥沙的再悬浮所致, 取决于

*国家重点研发计划"大型水库调控下河口沉积动力过程及其生物地球化学效应”, 2016YFA0600903 号; 国家自然科学基金面上基金, 41476030, 40906025 号; 泰山学者建设工程专项; 中国东盟海上合作基金: 长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究。刘兴民, 硕士研究生, E-mail: liuxingminouc@sina.com
① 通信作者: 乔璐璐, 博士生导师, 教授, E-mail: qiaolulu126@sina.com
收稿日期: 2018-07-18, 收修改稿日期: 2018-10-15

当地表层沉积物和水动力情况。

虽然目前对于渤海的悬浮体分布及输运路径的研究已经很多，但大多局限于研究表层悬浮体的分布，而且基本是通过遥感影像和数值模拟的手段进行分析，缺乏实测数据的验证。少数基于实测数据的研究对悬浮体季节性变化的认识不够深入，影响因素分析也较为欠缺。前人的研究工作证明，海水浊度的大小与水体中悬浮物质的分布有直接的关系，可以通过水体浊度的变化来反映悬浮体浓度的变化(Li *et al*, 2009; 王勇智等, 2012; 李爱超等, 2016)。因此，本文利用 2012—2016 年 CTD 实测数据和风场数据，分析渤海水体浊度分布特征及其季节变化，为渤黄海悬浮体分布、物质交换及典型泥质区的形成机制提供科学依据。

1 资料与方法

本文采用的数据来源于 2012—2016 年的国家自然科学基金委“渤黄海海洋学综合科学考察”航次 8 个航次的调查数据，该航次由中国海洋大学“东方红 2 号”科考船承担，各个航次站位分布和具体调查日期分别如图 1 和表 1 所示。其中 8 个航次的水体温度、浊度等数据使用 CTD(Seabird911，美国海鸟公司)仪器观测，垂直分辨率为 1m。为了比较水体温度和浊度的季节性变化特征，这里将同一季节的多个航次进行平均处理，得到多年平均的水体温度和浊度特征。

文中所用的黄河径流量、输沙量数据来源于《黄河泥沙公报》。为了更好地研究表层悬浮体的分布机制，本文还补充收集了 CCMP (Cross—Calibrated Multi—Platform) 风场数据，该数据来源于 RSS (Remote Sensing Systems)，集合了遥感、浮标以及模型计算的风场数据，时间分辨率 6h，空间分辨率 0.25°×0.25°。

本文所使用的流场，是基于 ROMS(Regional Ocean Modeling System)数值模型建立渤黄东海大区环流模型，该模型首先使用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)气候态平均风场强迫，开边界考虑温度、盐度、海面起伏和正、斜压流速分量，模拟 10 年达到稳定，之后采用 NCEP 提供的 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)日平均风场、气温和海面气压驱动模型，模型的空间分辨率为 0.204°×0.205°。模型的验证及其他参数详见参考文献(马倩, 2014; 万修全等, 2015)。本文为了进一步提高模型计算精度，开边界加入 M_2、S_2、O_1、K_1 共 4 个分潮。因此，本文所使用的环流场包括风海流、密度流和潮流的总环流场。研究中提取与现场观测时间一致的各月平均流场数据进行分析计算。

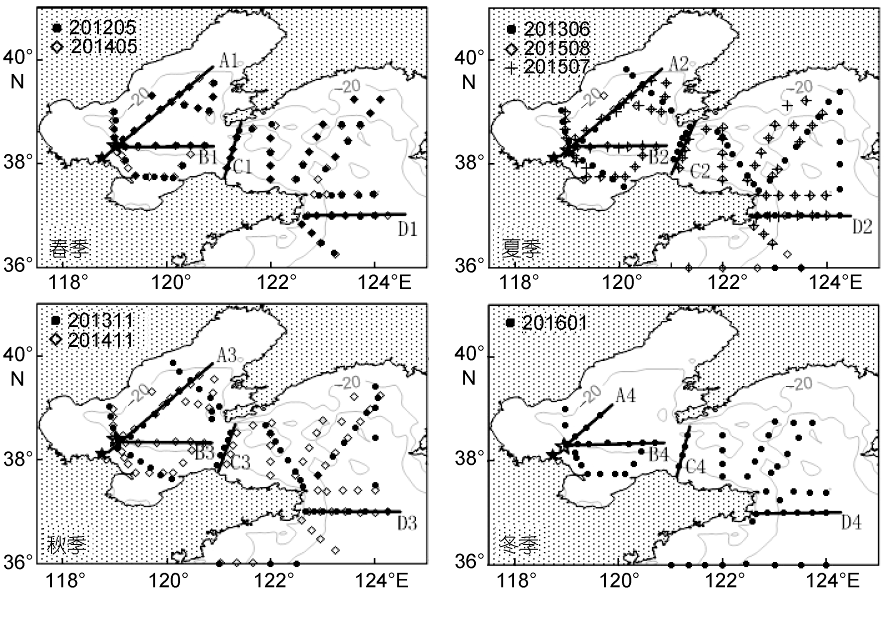


图 1 调查站位分布

Fig.1 Deployment of the observation sites

注：等值线表示水深；黑色实线线表示该断面大体位置

表 1　2012—2016 年 8 个航次信息

Tab.1　Information of the eight cruises from 2012 to 2016

季节	站位数(个)	调查日期(年.月.日)
春季	69	2012.05.11—2012.05.18
	75	2014.05.08—2014.05.17
夏季	53	2013.07.03—2013.07.09
	71	2015.08.26—2015.09.04
	71	2016.07.08—2016.07.14
秋季	53	2013.11.15—2013.11.23
	75	2014.11.16—2014.11.23
冬季	61	2016.01.14—2016.01.30

2　渤黄海水体温度、浊度分布特征

2.1　渤黄海温度及环流场分布特征

渤海水体温度季节性变化明显(图 2)。春季，近岸与表中层水体升温快，残留的低温水团主要集中在辽东半岛东南部的底层附近，核心水温约 3.9°C。夏季，海域表层温度达到一年中最高值，海域中下层黄海冷水团发育明显，冷水团中部水温约 6°C。可见北黄海冷水团主要盘踞于下层水体，并于春季生成，且核心温度最低，夏季发育成熟，可向上扩展至 15m 水层。秋季，水体层化作用较强，表中层水体温度特征基本一致，海域南部水体温度高于北部，底层冷水团势力明显减弱并向南黄海收缩。冬季，渤黄海海域水体混合作用强烈，表中底层水体的温度特征近乎一致，整个海域由于受到黄海暖流的影响，有明显的底层暖水入侵，暖水温度可达 4.5°C。入侵的暖水可到达渤海中部海域，近岸海域水体温度低于渤海中部。

春、夏、秋季，渤海中部各层以顺时针环流为主，其中夏季表层环流流速较强，冬季该顺时针环流不明显，表层在冬季偏北风控制下，海流指向渤海海峡(图 3)。渤海海峡表层环流以“北进南出”为主，而底层海流尤其是山东半岛北部的海流春、夏、秋季较弱，只有冬季表现为较强的向东流出渤海的环流特征。黄河口外环流场常年存在北向流场，而冬季还存在向莱州湾口方向的环流，这与前人的研究结果相符(吴永胜等, 2002)。

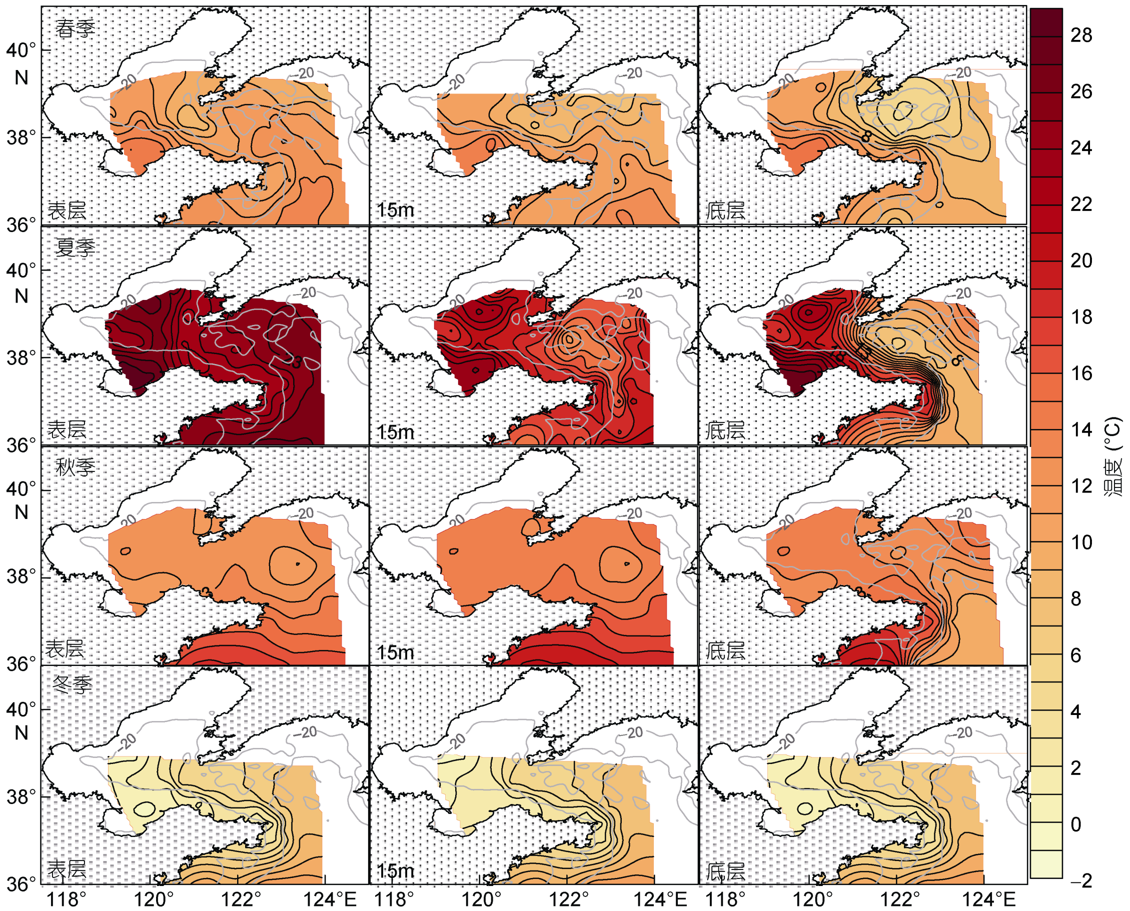


图 2　渤黄海水温(单位: °C)水平分布季节变化

Fig.2　The seasonal variations of water temperature in Bohai Sea and Yellow Sea (unit:°C)

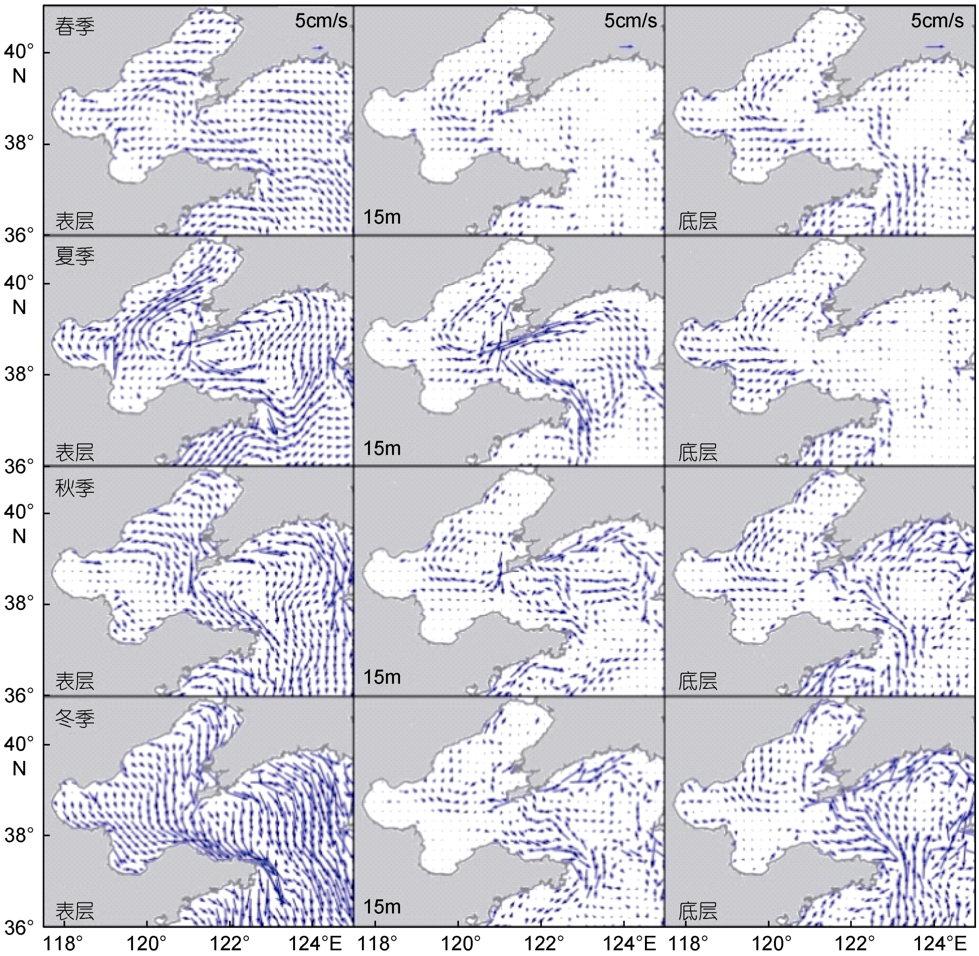


图 3　渤黄海环流场水平分布季节变化

Fig.3　The seasonal variation of the flow field in Bohai Sea and Yellow Sea

2.2　渤黄海浊度平面特征

渤黄海海域水体浊度的季节性差异明显(图 4)。春季，研究海域浊度值整体较低，只有莱州湾中底层和山东半岛东部底层有部分浊度高值区，最高值出现在山东半岛东部底层，但浊度值仅有 28NTU 左右。夏季，研究海域的浊度达到一年中的最低值，除黄河口附近海域底层浊度值相对较高外，其他海域都较低。秋季，渤黄海海域整体浊度开始升高，在中底层海域除山东半岛北部输运通道浊度升高之外，还存在一个沿东北方向向渤海中部延伸的高值区，这可能是黄河入海泥沙向渤海中部输运的通道。在辽东半岛西南部海域底层存在一个明显的高浊度区，前人研究表明这一海域潮流流速较周围海域明显较大(董礼先等, 1989)，使底层沉积物发生再悬浮，进而导致浊度值较高。冬季，由于风浪较大，使得水体混合充分，近岸及海底沉积物极易发生再悬浮，所以底层浊度明显高于表层，近岸浊度高于远海。整个研究海域的浊度达到一年中的最高值，黄河口附近海域的浊度值较高，最高值可达 212NTU，并且在山东半岛北部出现高浊度条带状水体，前人研究认为这是黄河入海泥沙向黄海输运的通道(Park *et al*, 1990; 秦蕴珊等, 1986)。成山角以东海域出现高浊度区，浊度值可以达到 108NTU，与黄河物质向南输运及海底沉积物再悬浮有关。

2.3　渤海中部断面 A 温度、浊度特征

渤海中部断面水深较浅，平均水深在 20m 左右。春季，近岸及表层水体升温较快，开始出现层化现象(图 5a)，该季节渤海海域浊度值较低，仅在近岸底部有高浊度区(图 5b)。夏季，海水温度的层化现象更加明显，38.3°N 附近温度锋面区域的浊度值明显高于其他区域(图 5d)。秋季，整个海域水体混合作用明显，近岸水体温度下降快，水体混合作用使得在近岸和辽东湾口浊度值明显增高(图 5f)。冬季，渤海海域整体温度较低，混合作用强烈(图 5g)，浊度值自黄河口

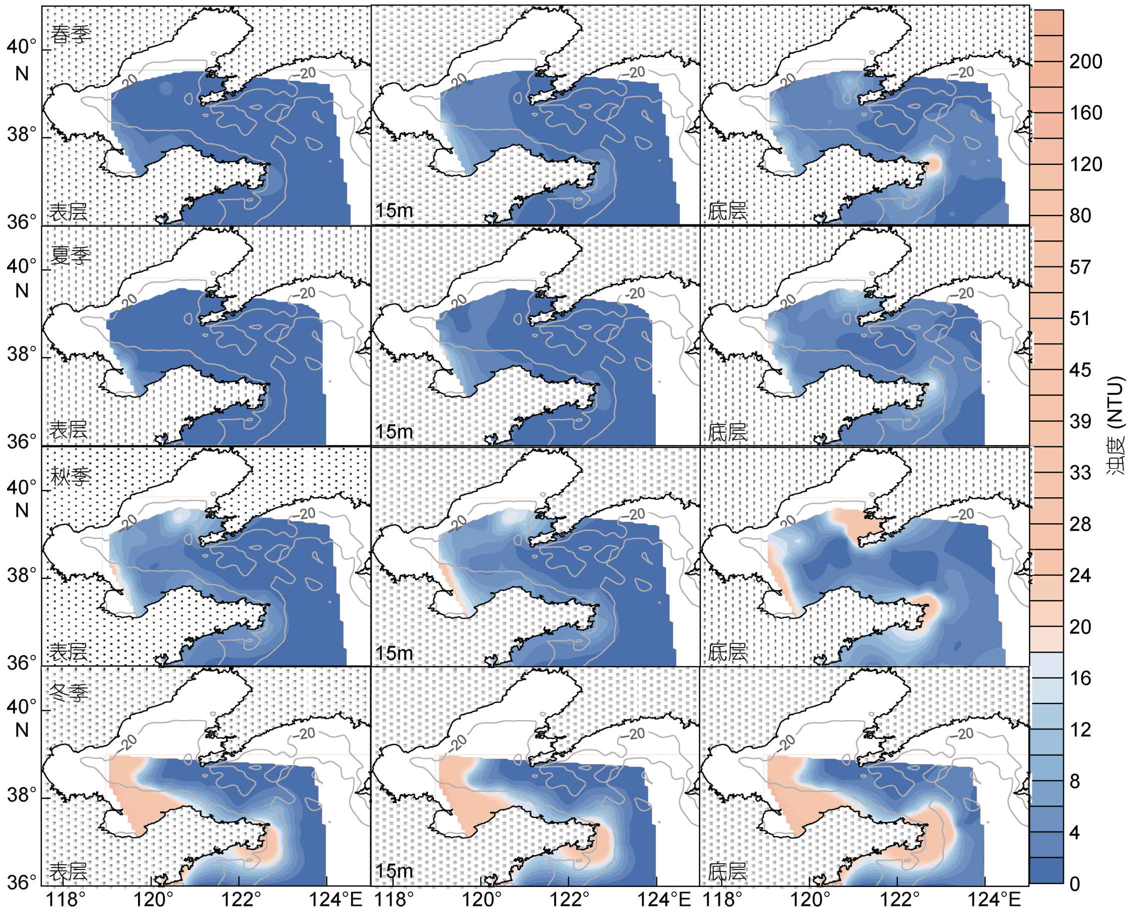


图 4　渤黄海浊度(单位: NTU)平面分布季节变化

Fig.4　The seasonal variation of the turbidity in Bohai Sea and Yellow Sea (unit: NTU)

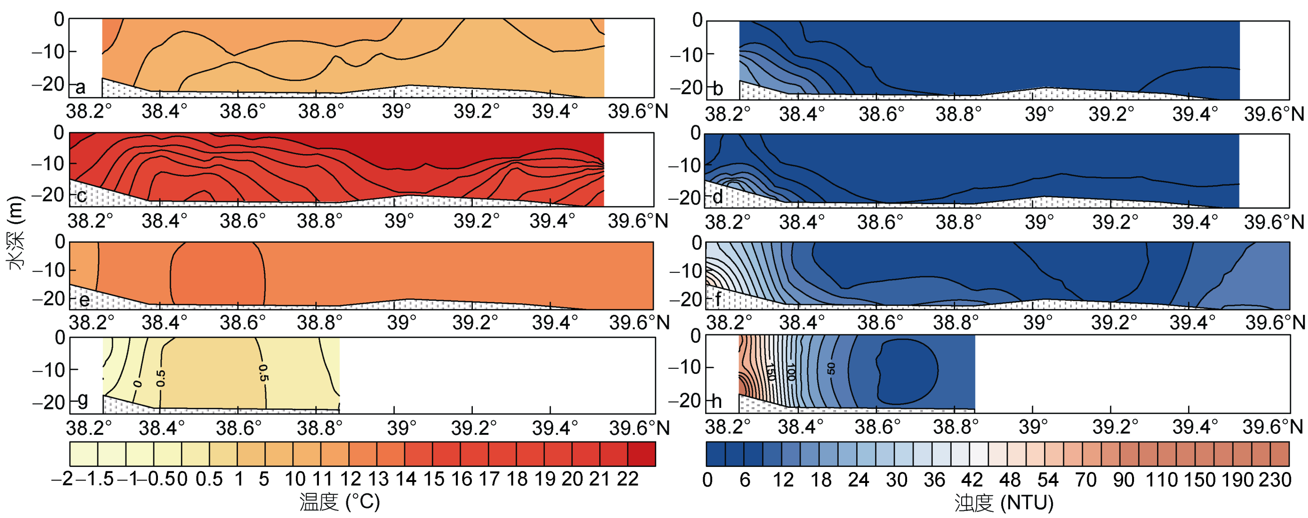


图 5　渤海中部断面 A 水体温度(单位: °C)和浊度(单位: NTU)垂直剖面分布

Fig.5　The profiles of temperature (unit: °C) and turbidity (unit: NTU) along the transect across the central Bohai Sea

注: a、c、e、g 分别为春、夏、秋、冬断层温度; b、d、f、h 分别为春、夏、秋、冬断层浊度

附近海域向渤海中部逐渐降低，河口附近海域浊度最高可达 250NTU(图 5h)，这主要是因为冬季风浪较大，海水搅动使得底部沉积物发生再悬浮。四个季节渤海中部 38.6°N 以北附近海域悬浮浓度均较低。

由于黄河入海泥沙并不是进入渤海后直接向外海输运，而是在河口附近海域沉积，根据不同季节风浪条件的差异，扩散距离会出现明显的不同(图 6)。对于渤海中部断面 A(图 1)，计算 15m 层沿断面水体浊度变化，如图 5 所示。断面 A 水深变化较为均匀，冬季，水体浊度从离岸 31km 到 56km 处，从 180NTU 迅速下降至 54.3NTU，而其他季节的悬浮体含量较低，均在离岸 50km(水深约 20m)附近降低至较低浓度值，20m 以深水域物质供应少、再悬浮较弱。

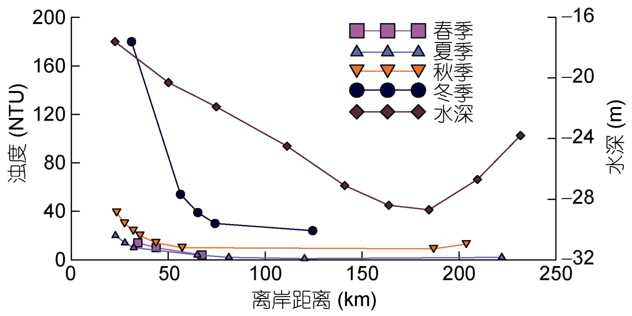


图 6 渤海中部断面(图 1 中 A 断面)浊度扩散距离及与水深的关系

Fig.6 The reach of turbidity diffusion and the relationship to the water depth in the central Bohai Sea (Transect A in Fig. 1)

注：起点位置为图 1 中“★”所示

2.4 38°N 断面 B 度、浊度特征

沿渤海 38°N 断面分析渤海悬浮体向黄海输运情况，其温度、浊度的季节性分布差异明显(图 7)。渤海 38°N 断面的温、浊特征与渤海中部断面相似(图 5)。春季，近岸水体升温较快，层化现象开始发育(图 7a)。该海域浊度值偏低，仅在近岸底部有高浊度区(图 7b)。夏季，该海域海水温度的层化现象更加明显，在 119.3°E 以西中底层水体出现混合现象，进而使该区域的浊度值略高于其他海域(图 7d)。秋季，整个海域水体混合作用明显，温差极小，仅有 0.3°C。该季节浊度值较夏季明显升高，最高值为 41NTU，由近岸向渤海海峡浊度值逐渐下降，最低值仅有 1.2NTU(图 7f)。冬季，渤海海域整体温度较低，近岸混合作用强烈，自近岸向渤海海峡温度逐渐升高(图 7g)。浊度值自黄河口附近海域向渤海海峡逐渐降低，近岸河口附近海域浊度值最高可达 243NTU(图 7h)。流场是影响浊度分布的重要因素。全年在黄河口附近始终存在北向输运的流场(图 8)，进一步证明了冬夏季均存在黄河入海物质沿渤中浅滩西侧向渤海北部扩展的通道。

2.5 渤海海峡断面 C 温度、浊度特征

渤海海峡是渤黄海水体交换的重要通道，温度和浊度季节性变化明显(图 9)。春季，38.1°N 以北表中层水体出现层化现象，底层存在冷水团，水团核心温度为 5.6°C，38.1°N 以南水体近岸水体垂直混合较好。浊度上有两个明显的高浊度区，山东半岛北部底层的高浊度区，另一个对应冷水团位置，浊度值在 2.6NTU。夏季，渤海海峡整体海域层化结构明显，在

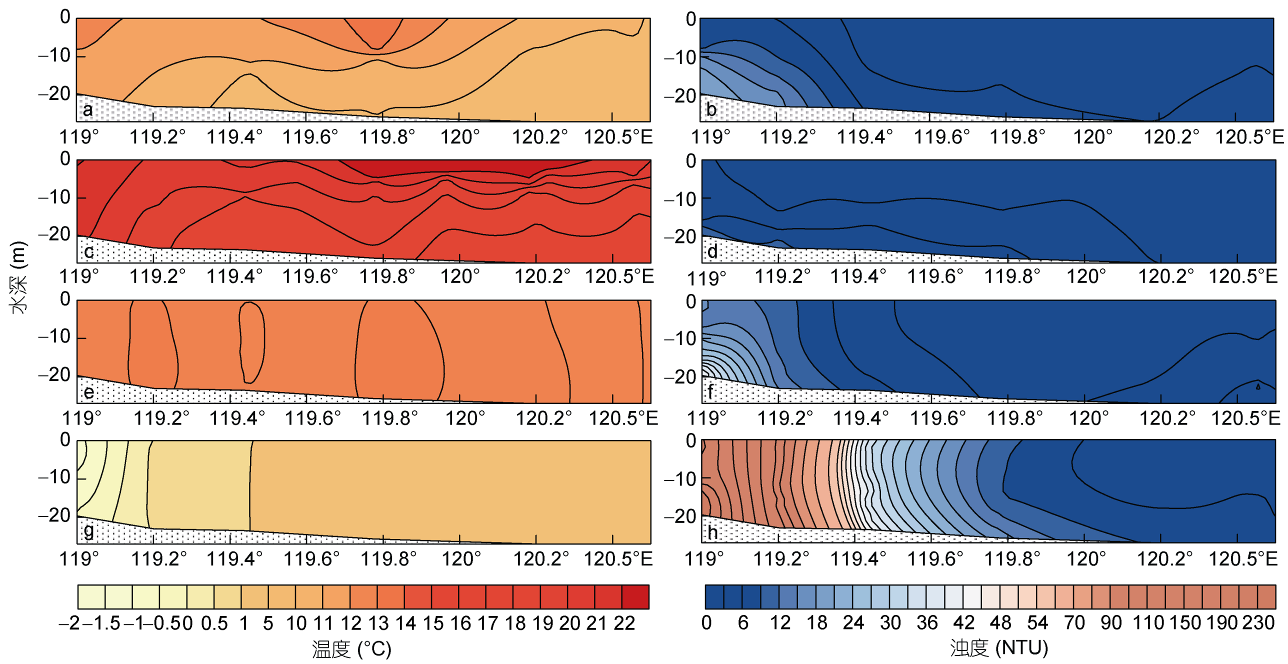


图 7 38°N 断面水体温度(单位: °C)和浊度(单位: NTU)垂直剖面分布

Fig.7 The profiles of temperature (unit: °C) and turbidity (unit: NTU) along the 38°N transect

注: a、c、e、g 分别为春、夏、秋、冬断层温度; b、d、f、h 分别为春、夏、秋、冬断层浊度

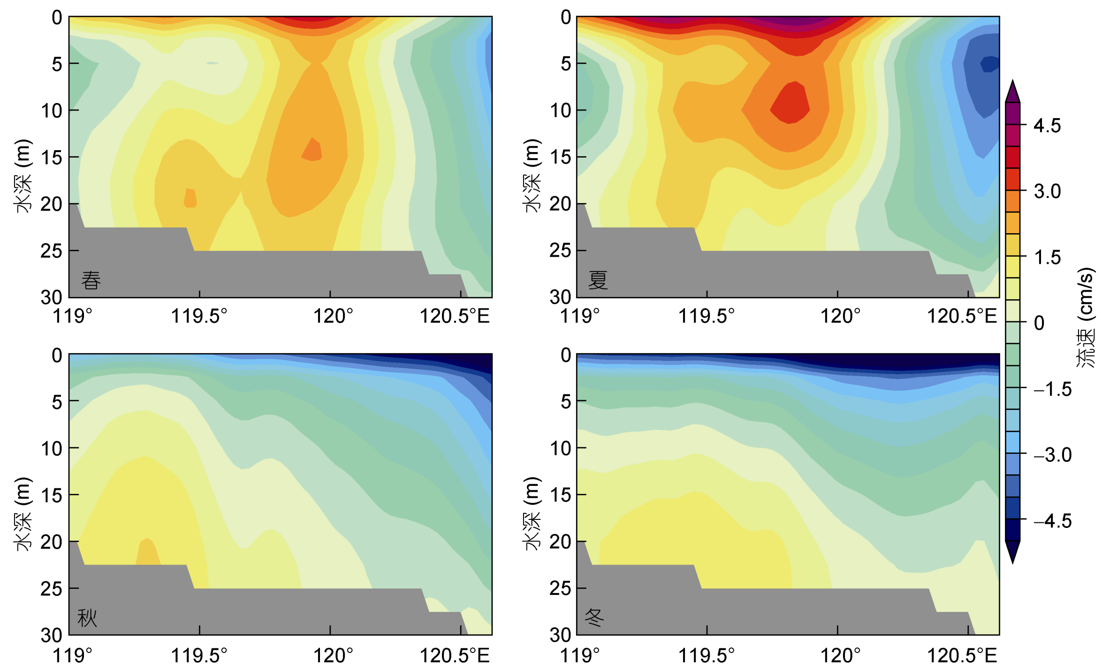
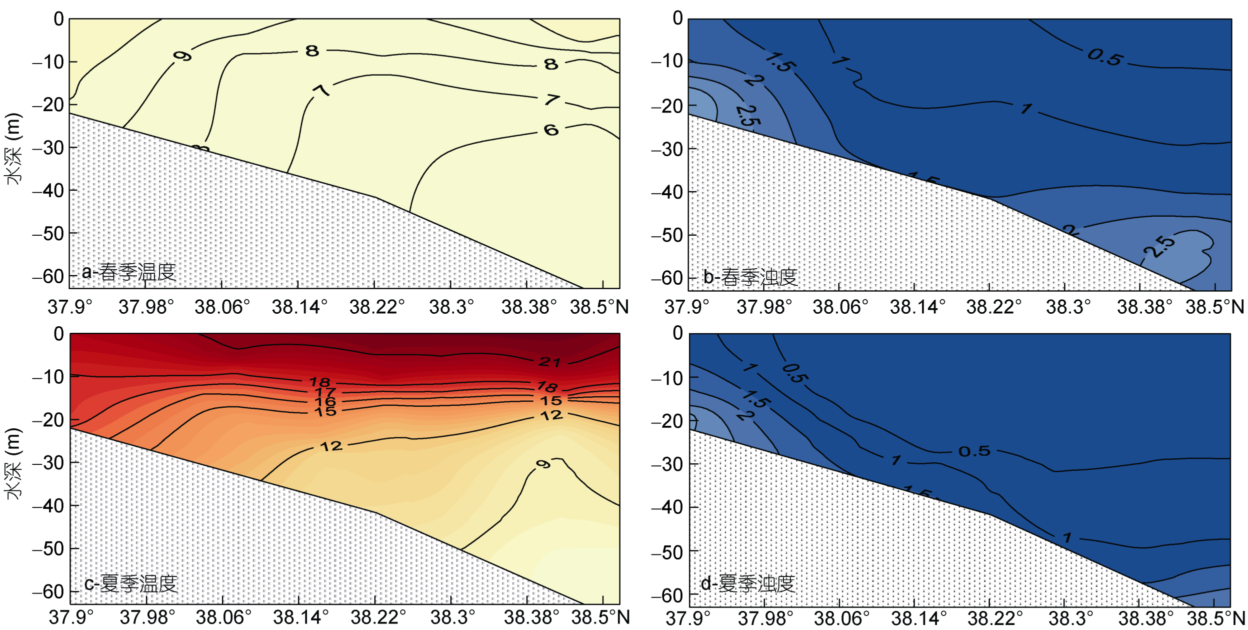


图 8 38°N 断面流场分布

Fig.8 Profiles of the flow field distribution along the 38°N transect

注：正值表示北向、负值表示南向

老铁山水道附近中底层冷水团主要来自黄海冷水团的入侵，冷水团核心温度为 8.1°C。该冷水团的影响范围可达水深 20m 左右，在水深 20—10m 的位置存在明显的温度跃层，跃层强度约 0.8°C/m，这与前人的研究相吻合(王燕等, 2016)。夏季水体浊度很低，只有在底层冷水团核心部分和海峡南部底层海域浊度较高，其他海域浊度很低。秋季，渤海海峡的垂直混合逐渐增强，在海峡南坡 38.2°N 附近可发现黄海暖水的侵入，高温水体温度在 12.6°C 左右。最低温度在老铁山水道底部，水温约 11.9°C。海峡南部山东半岛北部海域的浊度值最高，向北浊度值逐渐降低，最低值低于 0.5NTU。冬季，由于风的搅拌作用，使得水体混合作用增强，渤海海峡南部近岸浅水区域浊度的垂直分布较为均匀(李爱超等, 2016)。海峡南部由于受到鲁北沿岸流的影响水体温度较低，水体温度自南向北逐渐升高，与前人研究一致(王勇智等, 2012)。渤海



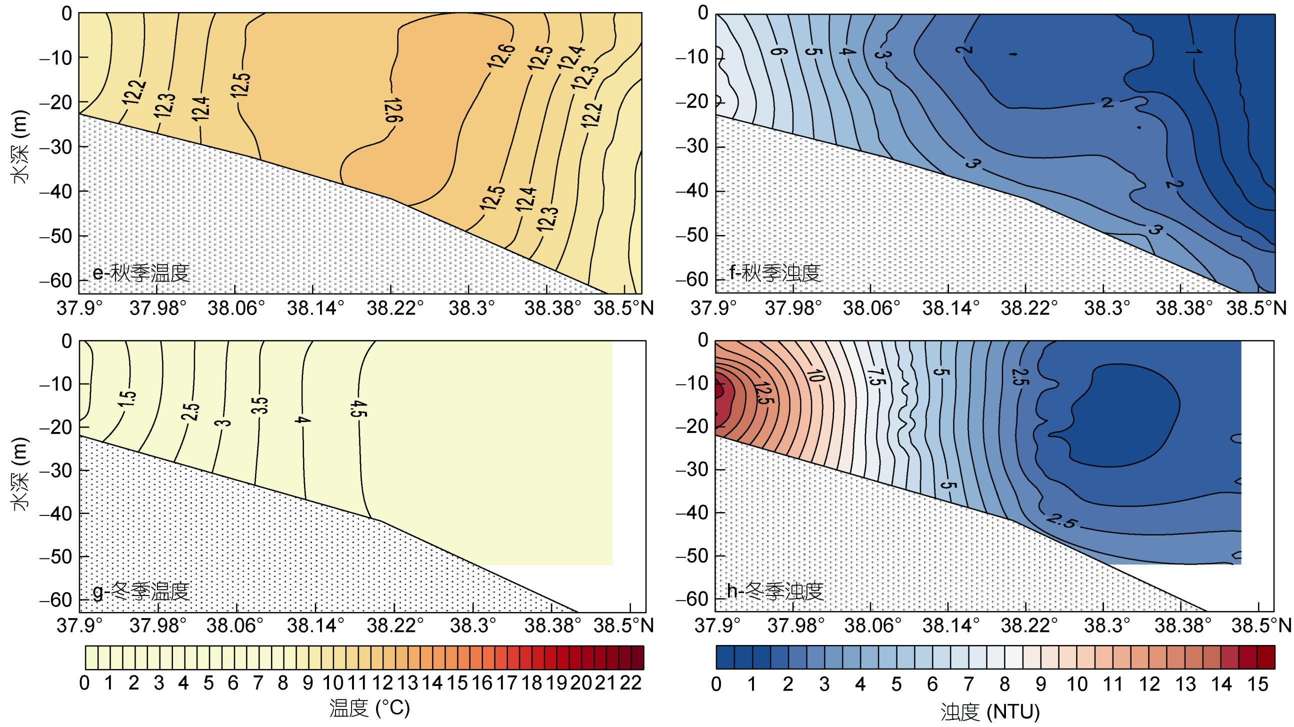


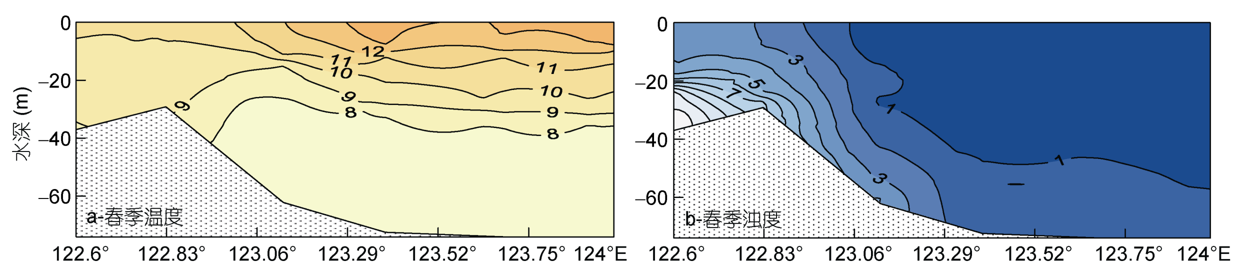
图 9 渤海海峡断面 C 水体温度(单位: °C)和浊度(单位: NTU)垂直剖面分布

Fig.9 Profiles of temperature (unit: °C) and turbidity (unit: NTU) along the transect of the Bohai Strait

海峡浊度值自南向北逐渐降低，山东半岛北部的浊度高达 14.8NTU，而渤海海峡北部的浊度只有 1.3NTU。

2.6 37°N 断面 D 温度、浊度特征

春季，30m 以浅水体增温快，层化现象开始出现，而在 122.8°E 以西水体温度依旧较低，可能是冬季残留的水体，与低温水体相对应的是浊度高值区，浊度值为 11.7NTU，其他区域浊度较低。夏季，30m 以浅水体层化现象明显，底层被黄海冷水团占据，核心区域水温约 7.9°C，冷水团可以影响 35m 以深的海域，冷水团上部为温跃层，强度约 0.6°C/m。在 122.8°—123.1°E 附近，存在一个垂向温度跃层，这是由山东半岛沿岸流与黄海冷水团共同作用的结果。高浊度区主要集中于该垂向温度跃层以西，浊度最高值约 10.5NTU，该区域主要受山东半岛沿岸流的影响，所以应为沿岸流使得海底表层沉积物再悬浮所致。秋季，表层海水温度下降较快，温跃层深度加深，跃层强度减弱为 0.3°C/m。该温跃层起到了明星的阻碍作用，使海底再悬浮产生的高浊度水体难以向上扩散，在 123.1°E 以东的表中层海域出现明显的低浊度水体，浊度值基本在 1.5NTU 以下。由于秋季风浪逐渐增强，在 122.8°E 以西的近岸浅水区海底表层沉积物再悬浮强烈，使得该区域浊度与夏季相比明显升高，最高值可达 16.8NTU。冬季，该断面水体温度自近岸向远海逐渐升高，而浊度值同样自西向东梯度变化明显，高值区主要集中在 122.8°E 以西和东侧底部，在 123°—123.2°E 区域内，浊度值迅速下降，在 123.3°E 以东海域浊度值基本低于 5NTU。这可能是由于冬季沿山东半岛南下的沿岸流与黄海暖流形成强海流切变锋，从而导致近岸的高浊度水体难以纬向输运(王勇智等, 2013)。本文利用 ROMS 模拟的环流场，可以明显的看到在秋、冬季 123°E 附近有不同流向海流形成的切变锋，冬季最为明显，这与前人的研究结果一致(王勇智等, 2013)。



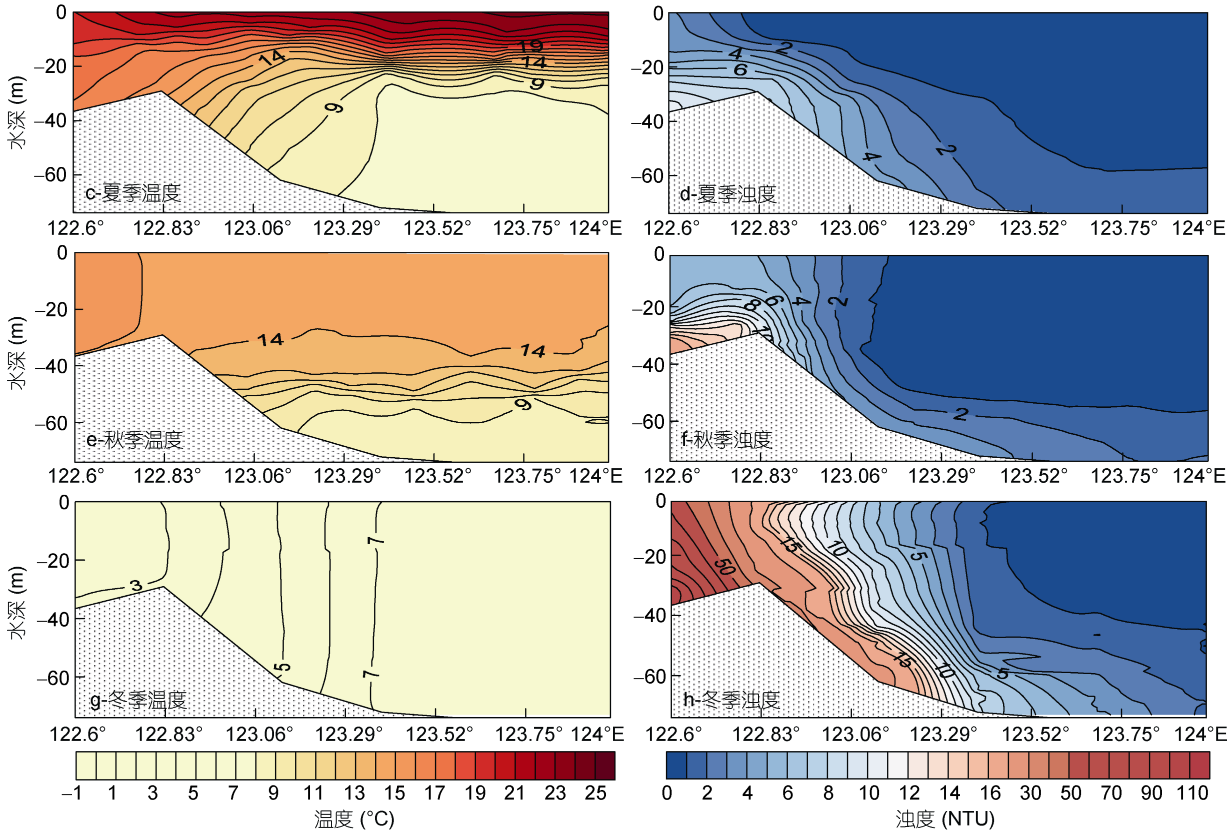


图 10　37°N 断面水体温度(单位: °C)和浊度(单位: NTU)垂直剖面分布

Fig.10　Vertical distribution of temperature (unit: °C) and turbidity (unit: NTU) along 37°N transect

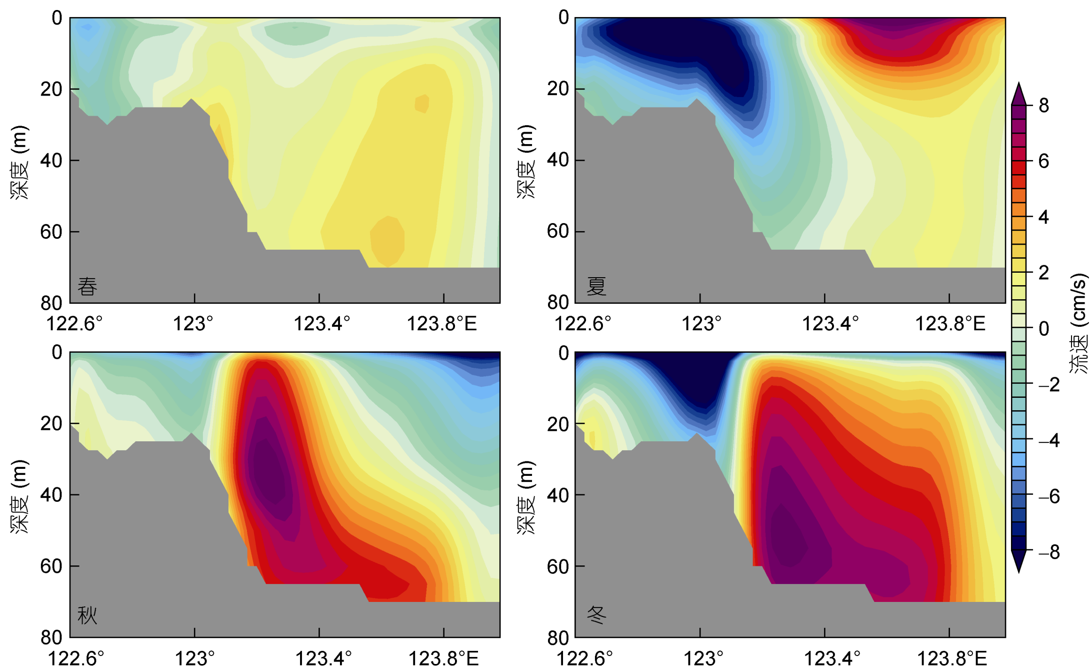


图 11　37°N 断面流场分布(正值表示北向、负值表示南向)

Fig.11　Profiles of the flow field distribution at the 37°N transect

3 渤黄海水体浊度影响因素分析

3.1 黄河入海泥沙对黄渤海浊度分布的影响

本文根据2010—2016年黄河泥沙公报利津站径流量、输沙量进行统计，统计结果显示，在6、7、8月份输沙量最高(图12)。其中, 6月份多年平均输沙量为1398.029万吨；7月份输沙量最高，可达3930.857万吨；8月份输沙量为2665.986万吨。冬季输沙量最低，最低月份只有69.07万吨。根据渤黄海表层浊度分布特征(图4)，在黄河输沙量较多的夏季，黄河口附近海域浊度并不高，仅有15NTU，而且高浊度范围仅有50km 左右。而在输沙量最低的冬季，整个渤黄海海域的浊度最高，最高值可达212NTU。这说明黄河入海泥沙并不是进入渤海后直接向外海输运，而是在河口附近海域沉积，之后受风浪影响产生再悬浮，通过山东半岛北部向黄海输运。这也是导致37°N 断面(图10h)冬季近岸浊度较高的原因之一。

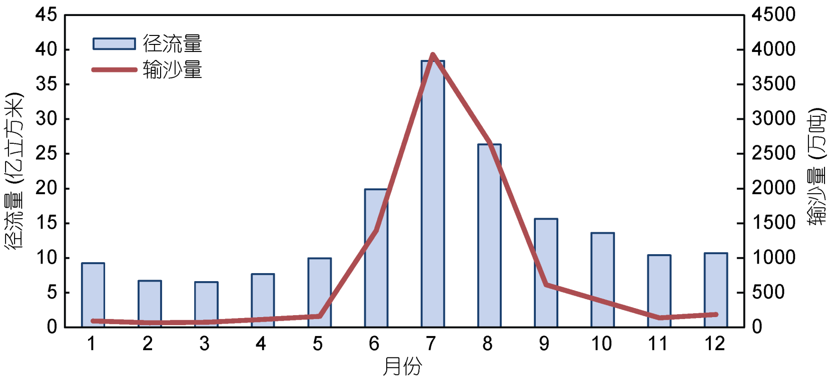


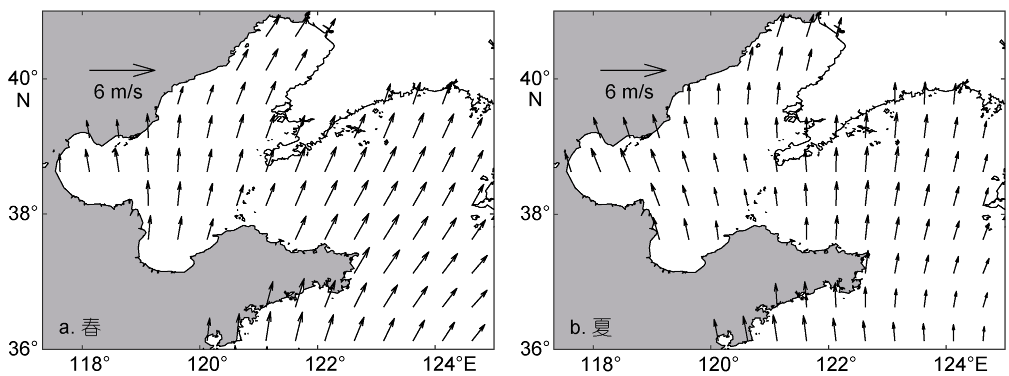
图 12 2010—2016 年黄河月均径流量与输沙量统计图

Fig.12 Statistics of average monthly runoff and sediment transport of the Huanghe (Yellow) River in 2010 to 2016

3.2 季节性风场对黄渤海浊度分布的影响

本文中所使用的风场是多个航次观测期间的平均风场。春季，研究海域盛行偏南风，风速较为均一，平均风速为 3.2m/s。夏季，研究海域盛行偏南风，风速达到一年中最低值，仅有 1m/s，渤海海峡处风速较低，渤海中部和北黄海中部风速较大。秋季，研究海域盛行西北风，风速与冬季一样自东南向西北递减，但平均风速较冬季偏小，为 4.6m/s。海域浊度最高的冬季，整个研究海域盛行偏北风，风速自东南向西北递减，平均风速可达 5.6m/s(图 13d)。整个渤黄海海域风场与浊度分布之间的关系有两个明显的特点：一是在秋冬季，整个海域盛行偏北风时，渤黄海浊度值较高；而春夏季盛行偏南风时，研究海域的浊度值较低。二是风速大小与浊度值的高低关系密切，渤黄海海域冬季风速最大，其次是秋季、春季、夏季，正好与浊度的季节性分布特征相对应。随着风速的增加，海浪尺度增大，海水的紊动强度提高，进而使得海底沉积物再悬浮的强度增加(秦蕴珊, 1982)。

根据图 4 可以看到，山东半岛北部底层水体浊度较高，可以认为是渤黄海物质输运的主要通道，结合图 3 渤海环流分布特征，春、夏、秋季该海域海流均较弱，只有冬季表现为较强的向东流出渤海的环流特征，因此冬季是渤海悬浮体向黄海输送的主要季节。



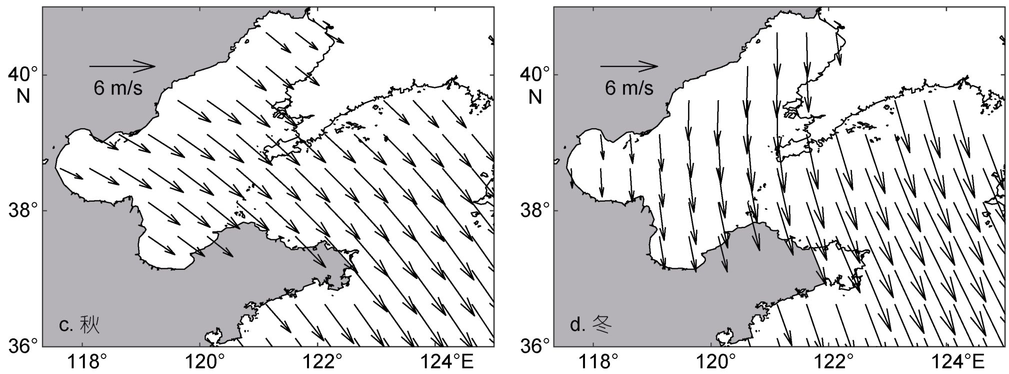


图 13　多个航次调查期间平均 CCMP 风场(单位: m/s)

Fig.13　Average CCMP wind field recorded during the multiple voyage surveys (unit: m/s)

3.3　黄河入海物质向渤黄海输运的路径

通过图 4 可以清楚地甄别出黄河入海物质向渤黄海输运的两条路径，分别为：冬夏季均存在的沿渤中浅滩西侧通道向渤海北部扩展，和冬季的沿莱州湾湾口向渤海海峡南部及北黄海输运(图 14)。如图 4 所示，不同季节黄河入海物质向渤黄海输运的距离和量值有明显不同，而且输运的路径也存在差异，这主要是因为两条路径主要由环流场(图 3)控制。

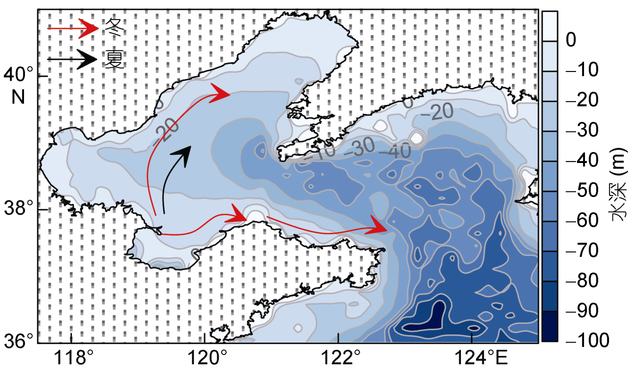


图 14　黄河入海物质输运路径

Fig.14　The route of material seaward transport from the Yellow River

4　结论

本文通过对渤黄海海域四个季节的温度、浊度进行研究得到以下结论：

(1) 研究海域水体浊度季节性变化明显，浊度值由高到低依次为：冬季、秋季、春季、夏季。

(2) 水平分布来看，高浊度区主要位于 20m 等深线近岸海域；从垂直剖面来看，秋冬季水体混合程度较好，水体浊度高值区主要位于近岸海域；春夏季由于温跃层的影响，高浊度水体主要位于近岸底层及黄海冷水团控制海域。

(3) 风是控制渤黄海悬浮体分布的重要动力因素，浊度值的高低与风速大小密切相关，渤黄海海域冬季风速最大，其次是秋季、春季、夏季，与浊度的季节性分布特征相对应。

(4) 甄别了黄河口附近高浊度水体向渤黄海输运的两条路径，分别为：冬夏季均存在的沿渤中浅滩西侧通道向渤海北部扩展，和冬季的沿莱州湾湾口向渤海海峡南部及北黄海输运，该两条路径主要由环流场控制。

致谢　　*感谢海洋与大气数据中心的数据支持。*

参　考　文　献

万修全，马　倩，马伟伟，2015．冬季高频大风过程对渤海冬季环流和水交换影响的数值模拟．中国海洋大学学报，45(4)：1—8

马　倩，2014．大风作用下渤海环流和水交换的数值模拟研究．青岛：中国海洋大学硕士学位论文

王勇智，乔璐璐，杨作升等，2012．夏、冬季山东半岛东北部沿岸悬浮物输送机制的初步研究．泥沙研究，(5)：49—57

王勇智，汪文胜，2007．渤、黄、东海悬浮物质量浓度冬、夏季变化的数值模拟．海洋科学进展，25(1)：28—33

王勇智，乔璐璐，杨作升等，2013．近岸强海流切变锋作用下悬浮沉积物的输送和沉积——以山东半岛东端外海为例．泥沙研究，31(3)：486—495

王桂芝，高　抒，2002．黄渤海水体交换、悬沙特征及其对渤海海峡沉积的影响．海洋通报，21(1)：43—48

王燕，李日辉，温珍河等，2016．夏季渤海海峡大小潮影响下水体温盐浊分布特征及其水动力机制．海洋地质前沿，32(5)：63—69

李爱超，乔璐璐，万修全等，2016．渤海海峡悬浮体分布、通量及其季节变化．海洋与湖沼，47(2)：310—318

肖合辉，2014．渤黄海海域悬浮体分布：季节性变化及扩散通量．青岛：中国海洋大学硕士学位论文，20—22

吴永胜，王兆印，2002．渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响．

黄渤海海洋, 20(2): 22—30
周 舟, 张万磊, 江文胜等, 2017. 渤海表层悬浮物浓度长期变化(2003—2014年)的卫星反演研究. 中国海洋大学学报, 47(3): 10—18
庞重光, 李 坤, 于 炜, 2014. 渤海表层悬沙的时空分布特征及其动力成因. 海洋科学进展, 32(4): 450—458
秦蕴珊, 李 凡, 1982. 渤海海水中悬浮体的研究. 海洋学报, 4(2): 191—200
秦蕴珊, 李 凡, 1986. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响. 海洋科学集刊, 27: 124—134
董礼先, 苏纪兰, 王康墡, 1989. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系. 海洋学报, 11(1): 102—114
Li Z, Bao X W, Wang Y Z *et al*, 2009. Seasonal distribution and relationship of water mass and suspended load in North Yellow Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(4): 907—918
Lu J Z, Chen X L, Zhang P *et al*, 2017. Evaluation of spatiotemporal differences in suspended sediment concentration derived from remote sensing and numerical simulation for coastal waters. Journal of Coastal Conservation, 21(1): 197—207
Park Y A, Khim B K, 1990. Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. Continental Shelf Research, 10(12): 1179—1191
Wang H J, Wang A M, Bi N S *et al*, 2014. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China. Continental Shelf Research, 90: 17—32
Yang Z S, Liu J P, 2007. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow sea. Marine Geology, 240(1—4): 169—176

THE SEDIMENT TRANSPORT CHANNEL OF THE YELLOW RIVER

LIU Xing-Min[1,2], QIAO Lu-Lu[1,2], WAN Xiu-Quan[3], ZHONG Yi[1,2], MA Wei-Wei[3], LIU Peng[1,2]

(1. *College of Marine Geosciences*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*; 2. *The Key Lab of Sea Floor Resource and Exploration Technique*, *Ministry of Education*, *Qingdao* 266100, *China*; 3. *College of Oceanic and Atmospheric Science*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract The distribution and seasonal variation of turbidity in Bohai sea water that reflects the characteristics of suspended sediment which distributed, delivered and seasonal changes. By using temperature and turbidity data of water in the Bohai sea from eight cruises in 2012 to 2016, and combined with CCMP wind field data, the ROMS current numerical simulation results, that analyzes seasonal distributed characteristics of turbidity in Bohai sea. The turbidity is closely related to the wind speed. In winter, the turbidity of the Yellow River estuary and the nearby sea area is the highest, and the turbidity drops rapidly from 180NTU to 54.3NTU in the 31km to 56km offshore. However, the turbidity is low in other seasons. During the whole year, no resuspension occurred at the depth of 20m, mainly horizontal expansion. During the whole year, no resuspension occurred at the depth of 20m, mainly horizontal expansion.

Key words the Bohai sea; turbidity; seasonal variation; wind field