

黄河口门位置及入海径流变化对莱州湾盐度分布的影响

乔守文^{1,2}, 李 凡³, 秦华伟³, 石洪源²

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 鲁东大学 水利工程学院, 山东 烟台 264025; 3. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 265500)

摘要: 2020 年黄河丰水期入海径流量是往年平均值的 2 倍以上, 必然会引起河口水动力和盐度分布的动态变化。本作者基于有限体积海岸海洋模型(Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM), 模拟 2020 年黄河冲淡水在丰水期和枯水期的扩散情况, 研究黄河口以及莱州湾海域的盐度分布状况变化, 以及径流量变化和口门变迁对黄河冲淡水扩散的影响, 模型结果与观测结果吻合较好。模拟结果表明, 黄河口西北侧潮流沿岸线方向, 随着涨落潮呈西北-东南向往复; 黄河口以南包括莱州湾的潮流均随着涨落潮呈东北-西南方向往复。高流速区域主要集中在黄河口和莱州湾北部, 在 0.5 m/s 以上。在余流作用下, 大量的黄河冲淡水会涌入莱州湾, 丰水期时 27psu 等盐线包络面积占到整个莱州湾的 1/4 左右。径流量和风的变化主要影响羽流的扩散面积, 而口门的变迁会改变其扩散方向。黄河冲淡水经北向口门入海主要影响莱州湾区域, 经东向口门入海更多地会向北扩散。通过对 2020 年黄河口及莱州湾海域盐度分布的分析, 为黄河入海径流管理及莱州湾渔业资源保护提供科学参考。

关键词: 盐度扩散; 黄河羽流; 莱州湾; 有限体积海岸海洋模型

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)09-0012-13

DOI: 10.11759/hyxx20211124001

入海河口不同于大洋区域, 不管在近海海洋结构还是在生态环境上, 都充分体现着其自身的复杂性。河口的潮汐环流和盐度输移过程通常是非常复杂和高度动态的。由于盐和淡水的混合以及径流、潮汐、海浪、风和离岸流的同步影响, 会使情况变得更加复杂^[1]。当淡水从河口流入开阔的近岸水域时, 由于河口内外密度流的侵入速度不同, 在河口附近形成了羽流状的扩散结构^[2]。而且低盐度区已经成为重要的海洋渔业经济发展区域, 河口盐度的变化对生物生存、海水养殖、水下建筑等方面都会产生极大的影响。黄河是汇入渤海湾的主要径流。黄河口是典型的演变频繁的陆相河口^[3, 4], 一直都是被关注和研究的重点区域。黄河口的低盐度区是渤海重要的鱼类产卵区域和栖息环境^[5]。最近几十年来, 在自然因素以及水库建设等人为因素的影响下, 黄河径流量显著减少, 必将对黄河口附近海域乃至整个渤海的温盐场产生影响^[6-8]。黄河入海径流量大幅度锐减造成整个渤海特别是莱州湾的盐度有所上升。

吴德星等^[9, 10]通过渤海沿岸 4 个观测站 35 a 和渤海常规断面 21 a 的盐度观测资料, 研究了盐度场

长序列时间的变化特点, 发现渤海的盐度在 35 a 内上升了 2 个实用盐度(practical salinity scale, psu), 并且分析认为近年来渤海海域盐度值的升高和黄河入海水量的显著减少关系密切。张洪量等^[11]将实测的盐度资料和黄河入海径流量结合分析, 发现 40 a 来莱州湾盐度总体上呈现出一种上升的趋势, 同时研究表明黄河的入海径流量锐减和断流是引起这种变化的关键因素。赵鹏等^[12]基于 2000—2005 年莱州湾 5 a 的大面积实测数据和实测的黄河入海径流量数据, 发现 2003 年是莱州湾平均盐度变化的一个明显的转折点, 2003 年后的平均盐度与历年平均盐度对比有明显的减小。黄河入海径流量对莱州湾的盐度变化起着决定性作用^[13]。近年来黄河入海径流量的减少, 引起黄河口海域水动力和盐度发生动态变

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-06-12

基金项目: NSFC-山东联合重点基金资助项目(U1806227, U1706220); 国家自然科学基金资助项目(51909114)

[Foundation: Joint Key Foundation of NSFC and Shandong Province, Nos. U1806227, U1706220; National Natural Science Foundation of China, No. 51909114]

作者简介: 乔守文(1997—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事河口海岸环境动力学研究, 电话: 17853515522, E-mail: qiaoshouwen1997@163.com; 秦华伟(1980—), 通信作者, E-mail: 15965178556@126.com

化。入海径流的变化对黄河口低盐度区的分布影响显著^[14]。黄河口海域盐度变化受入海径流和海洋动力因素等条件影响,时空特征变化明显。WANG^[15]使用数值模型指出黄河口盐度变化有明显的季节性变化,说明了径流变化对河口盐度的影响。LIU^[16]使用三维原始方程海洋环流模型指出风和潮汐对黄河口盐度分布有很大影响。CHENG^[17]基于 ECOM 数值模型,研究了黄河改道3次以来,径流和地形变化对盐度扩散带来的变化和差异。SHI^[18]利用 ROMS 数值模型,研究了入海径流对莱州湾盐度的影响。卢昱岑^[19]基于有限体积海岸海洋模型(Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM)数值模型探究了黄河口地形淤进对近海盐度分布的影响。

已有的一系列研究表明,黄河口盐度的分布对于径流量、风、潮汐等因素的变化十分敏感。但是针对黄河口盐度扩散影响因素的综合性和特殊性研究开展较少。2020年黄河丰水期出现了近20年

来最大的入海径流量,本文考虑黄河入海的感潮河段,使用2020年的最新的岸线、地形、径流等统计数据,综合探究径流、风、口门变迁等因素,对2020年黄河口和莱州湾盐度变化的时空特征进行分析,并与前人研究成果进行对比,探讨黄河口门变迁及径流变化对黄河口及莱州湾盐度的影响。

1 模型设置与验证

1.1 方法和模型设置

FVCOM 是一款基于非结构化三角网格的三维近岸海洋模型^[20],该模型可以较好模拟河口区域复杂状况。本模型模拟海域为整个渤海,黄河口区域网格加密处理,最小网格长度为50 m,共有100 428个单元和51 499个节点,计算区域及网格设置见图1。垂直方向分为20个sigma层,模式计算采用内外模分裂算法,其中内模时间步长设置为5 s,外模时间步长设置为0.5 s,可以很好地满足计算精度要求。

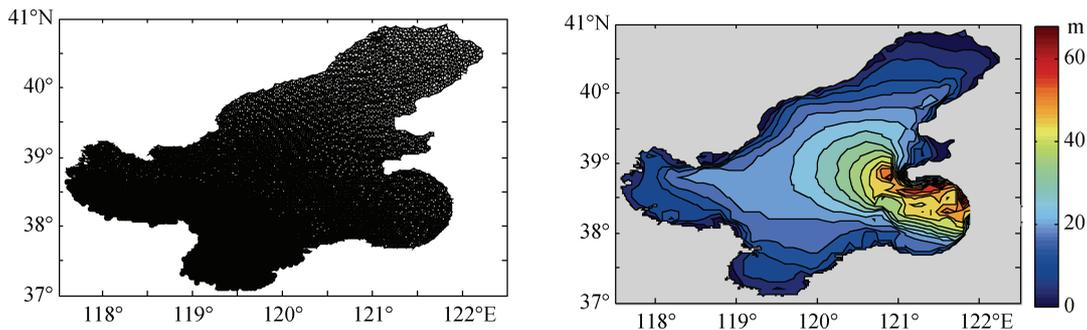


图1 计算区域网格(左)及水深分布(右)图
Fig. 1 Grid and depth distribution map of the calculation area

外海水深使用的是由美国地球物理中心(U.S. National Geophysical Data Center, NGDC)发布的ETOPI地形高程数据;黄河口附近近岸水深选取中国人民解放军海军航海保证部制作电子海图,根据沿海海洋站潮位与最低理论基准面关系对海图水深进行订正,以及部分工程和勘测水深数据。岸线由海图的岸线、工程附近海岸线勘测资料和Google earth最新岸线信息拼接而成。

模型盐度初始场采用简单海洋数据同化(Simple Ocean Data Assimilation, SODA)数据,以近10 a对应时间的平均值作为初始场。2020年黄河利津站逐日径流量作为径流输入数据。风数据来自于ERA5 (ECMWF Reanalysis v5),分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间步长为1 h。模型选用了8个主要分潮(M_2 、 S_2 、

N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1),使用“TPXO”潮位模型设置了模型开边界潮位信息。

在模拟过程中,黄河淡水盐度为0,分别模拟丰水期代表月份(7~8月)和枯水期代表月份(1~2月)盐度的扩散情况。考虑蒸发和降水对模型的影响,蒸发和降水数据使用ERA5逐时的分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的数据。蒸发考虑的热通量包括长波、短波、潜热和感热。模型采用冷启动,所有强迫从始至终存在,丰水期模拟时间为2020年7月1日—2020年8月31日,枯水期模拟时间为2020年1月1日—2020年2月29日,考虑到模型稳定时长,本文主要对2月份和8月份的结果进行分析,分析数据采用2月及8月的模型计算结果的日平均值。两个时期的径流量变化及风情况见图2~图3。

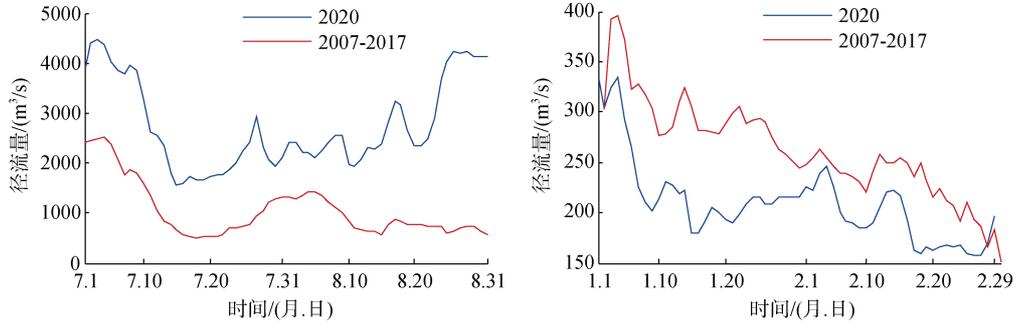


图2 2020年丰水期(左)和枯水期(右)入海径流日变化图

Fig. 2 Daily variation of runoff into the sea during the wet and dry seasons in 2020

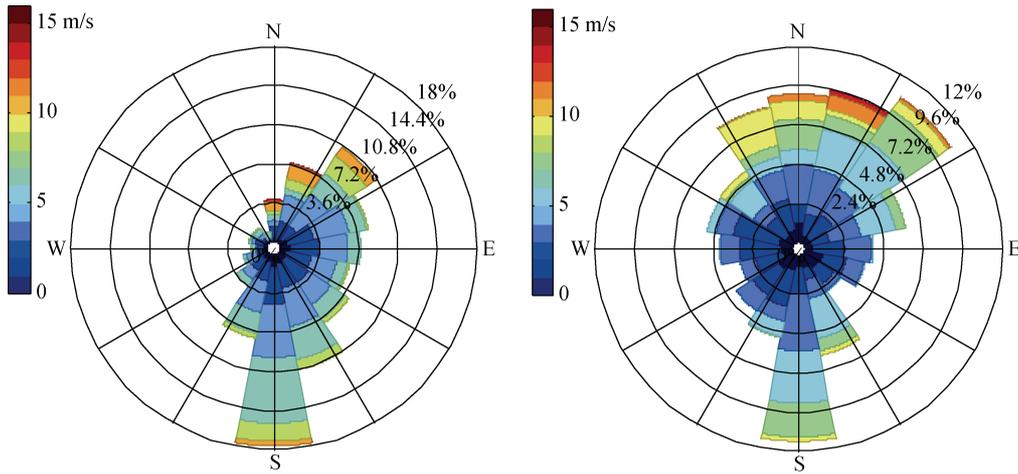


图3 2020年丰水期(左)和枯水期(右)风玫瑰图

Fig. 3 Wind rose for the wet and dry seasons in 2020

1.2 模型验证

为了验证模型的准确性,本文选取3个潮位站和2个潮流站实测数据进行验证。图4是测站的具体位置,表1为测站详细信息。为了说明模型的准确性,仅对长周期的潮位验证计算了均方根误差(rms)、相对平均误差(E)和模型技能参数($Skill$)。

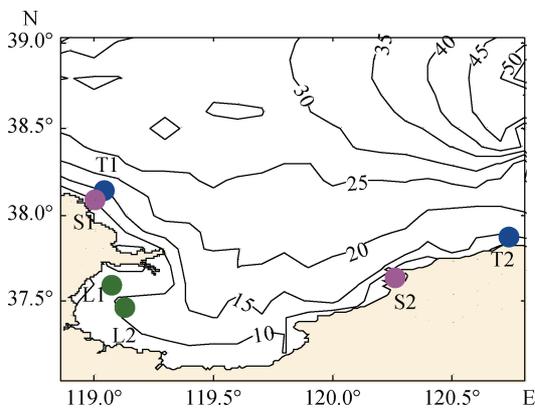


图4 测站位置图

Fig. 4 Location of observation stations

图5是潮位对比验证图,图6是流速和流向对比验证图。图7是盐度对比验证图。对比结果显示:盐度计算值与实测值基本一致。对S1站而言,其距离黄河河口较近,受黄河径流波动影响较大,枯丰季节盐度模拟结果与实测有一定差距,差值均在0.5 psu以内;龙口站距离黄河河口较远,受黄河径流的影响小,数模结果与实测一致性较好,绝对差值均在0.1 psu以内。计算结果基本反映了计算海域盐度变化状况。

2 结果分析

黄河径流的输入是导致莱州湾盐度场变化最主要的原因。图8和图9分别是丰水期和枯水期4个典型时刻的表层潮流分布图,高流速区域主要集中在黄河口和莱州湾北部。莱州湾的流速普遍在0.3 m/s以下,上述区域流速在0.5 m/s以上。图10是1个大阴日的余流图,将纯潮流剔除,主要由径流和风引起。在余流的作用下,黄河冲淡水长期向莱州湾输入。这也是黄河口海域和莱州湾进行黄河冲淡水扩散

表 1 测站详细信息表

Tab. 1 Station detailed information

测站类型	测站	经度(E)	纬度(N)	观测时间(年.月.日)
潮流	L1	119.0723°	37.6001°	2020.12.09-2020.12.10
	L2	119.1290°	37.4651°	2020.12.09-2020.12.10
潮位	T1	120.7356°	37.8724°	2016.04.01-2016.04.13
	T2	119.0383°	38.1502°	2019.11.29-2019.12.13
盐度	S1	118.9983°	38.0894°	2020.2.20-2.28, 8.20-2.27
	S2	120.2561°	37.6427°	2020.2.20-2.28, 8.20-2.27

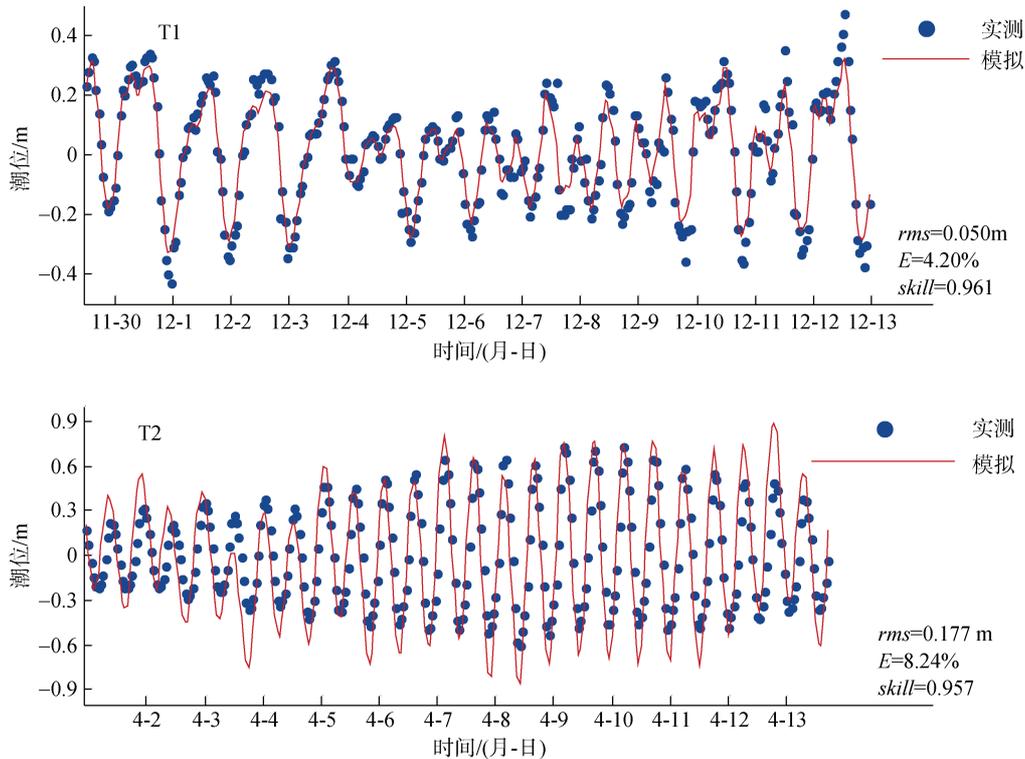


图 5 潮位验证对比图

Fig. 5 Comparison diagram of tide level verification

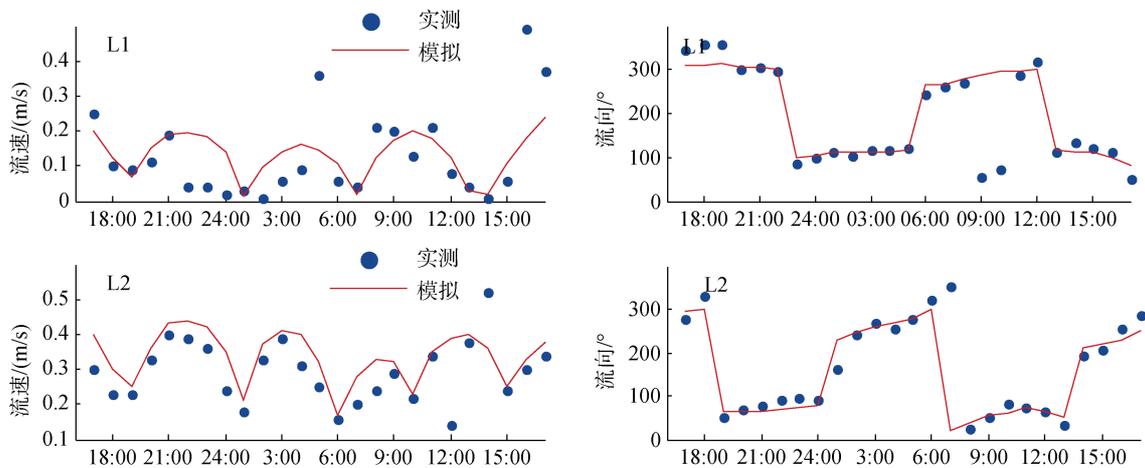


图 6 流速和流向验证对比图

Fig. 6 Comparison diagram of flow rate and flow direction verification

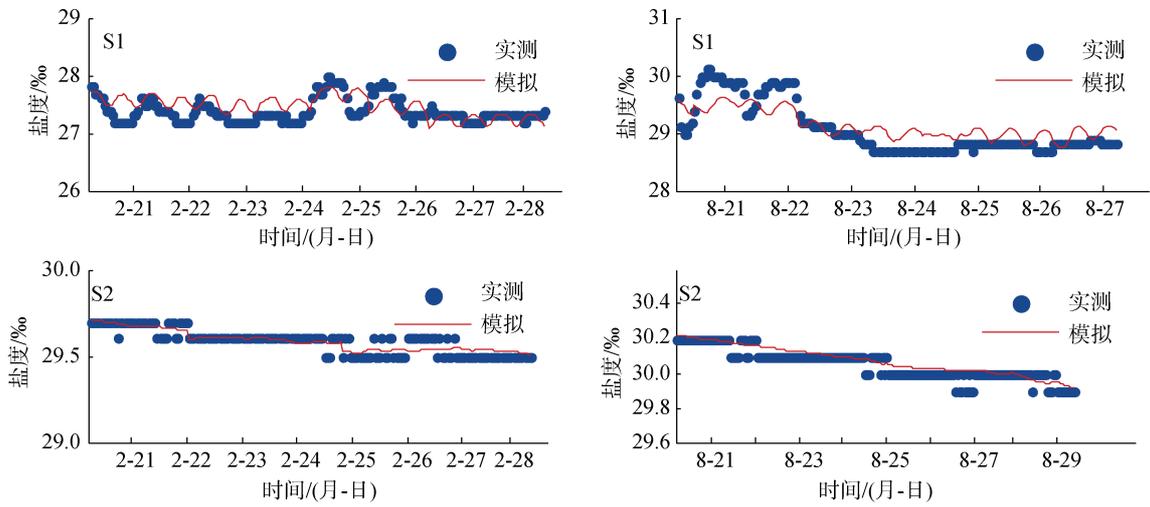


图 7 盐度验证对比图
Fig. 7 Comparison diagram of salinity

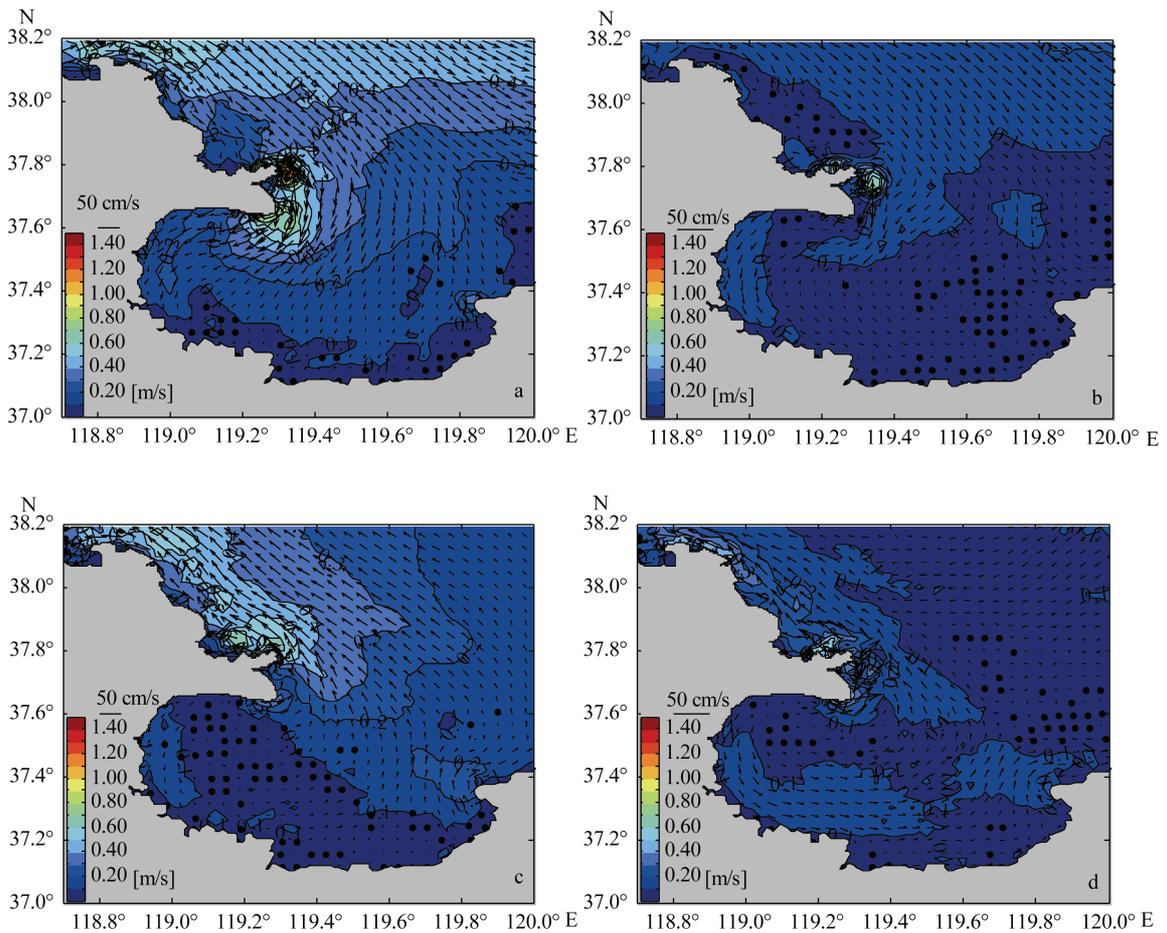


图 8 2020 年丰水期典型时刻表层潮流分布
Fig. 8 Surface tidal current distribution at a typical time in the wet season in 2020

a. 涨急; b. 涨憩; c. 落憩; d. 落急
a. maximum flood; b. flood slack; c. ebb slack; d. maximum ebb

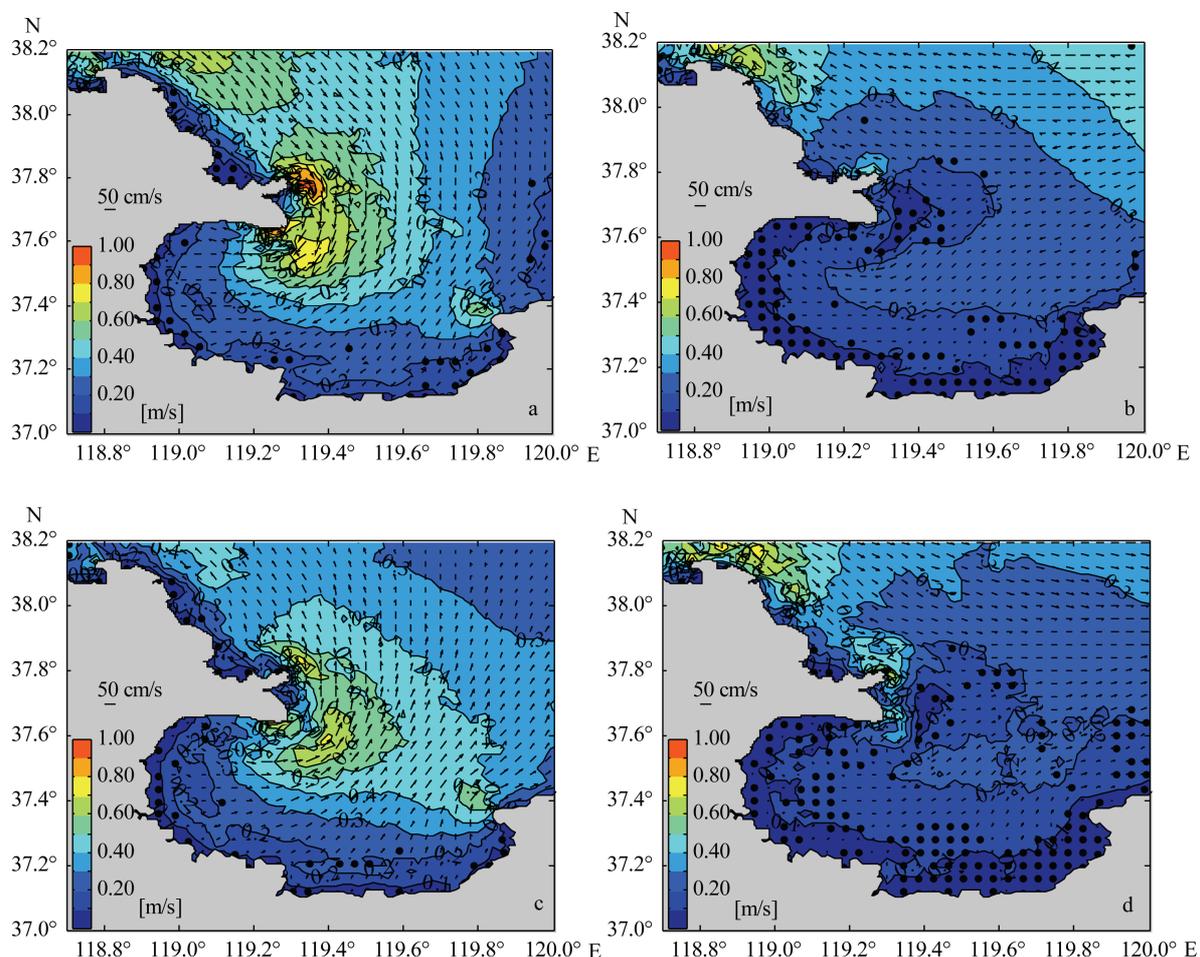


图 9 2020 年枯水期典型时刻表层潮流分布

Fig. 9 Surface tidal current distribution at a typical time in the dry season in 2020

a. 涨急; b. 涨憩; c. 落急; d. 落憩

a. maximum flood; b. flood slack; c. ebb slack; d. maximum ebb

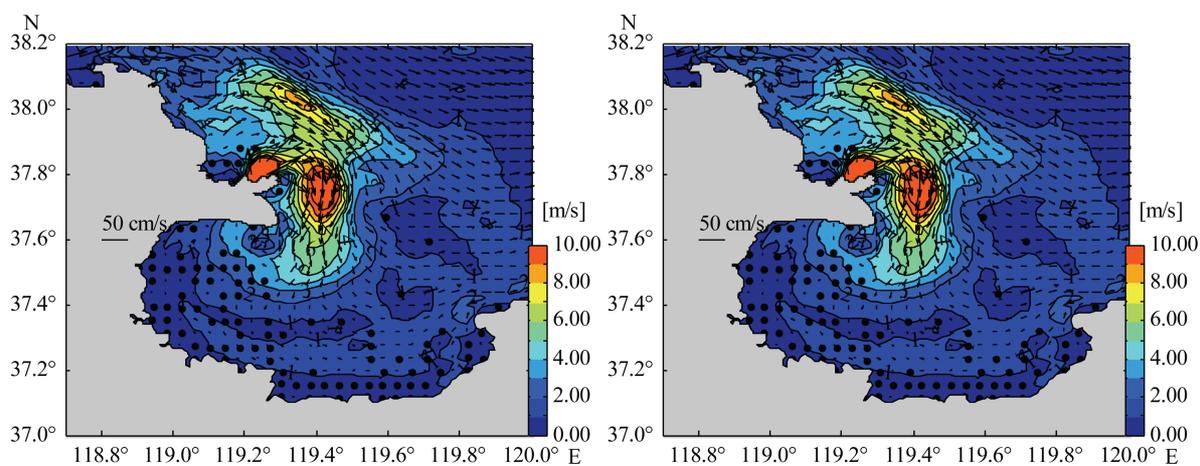


图 10 2020 年丰水期(左)和枯水期(右)表层余流分布图

Fig. 10 Surface residual current distribution in the wet season (left) and dry season (right) in 2020

的方式之一。黄河冲淡水在地形和科氏力的影响下，会出现明显的“南偏”现象^[21]。入海径流量、季风

的差异对这些现象有很大的影响，所以丰水期和枯水期的余流、黄河冲淡水的转向都有显著的差异。

2.1 黄河口及莱州湾海域表层盐度场时空分布特征

图 11 和图 12 是丰水期和枯水期表层及底层盐度空间分布图。模型结果显示, 黄河口及莱州湾海域丰水期和枯水期的盐度分布差异巨大, 这种差异主要受到径流量的影响。丰水期, 黄河冲淡水几乎影响

了整个莱州湾; 枯水期, 由于径流量的限制, 黄河冲淡水的影响区域局限在莱州湾的西北部。盐度空间分布差异也较大, 夏季时盐度的空间分布有明显的分层现象, 表层和底层盐度分布差别很大; 冬季的空间差异主要体现在水平向的盐度分布, 盐度的垂直向分布较均匀。

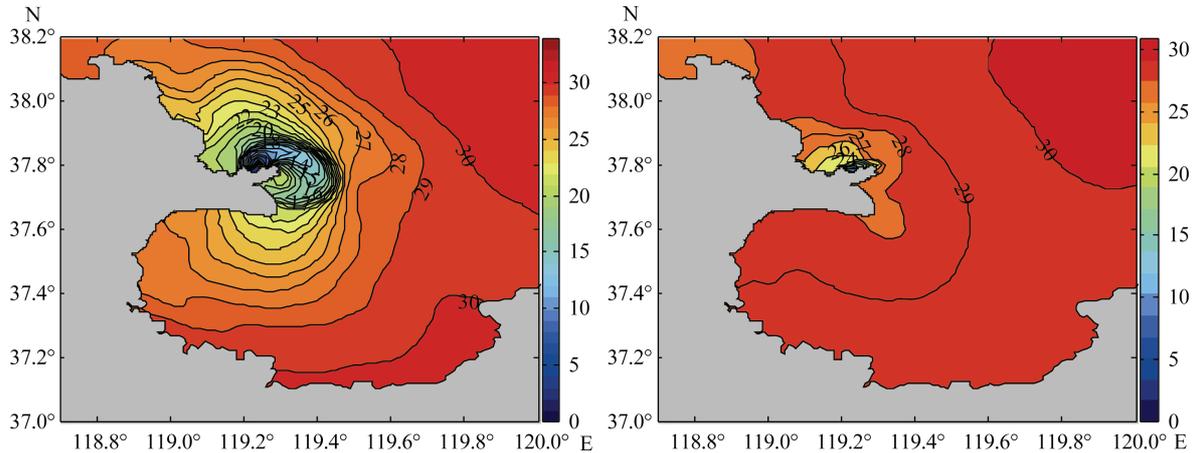


图 11 2020 年丰水期(左)和枯水期(右)表层盐度空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution of surface salinity in the wet and dry seasons in 2020

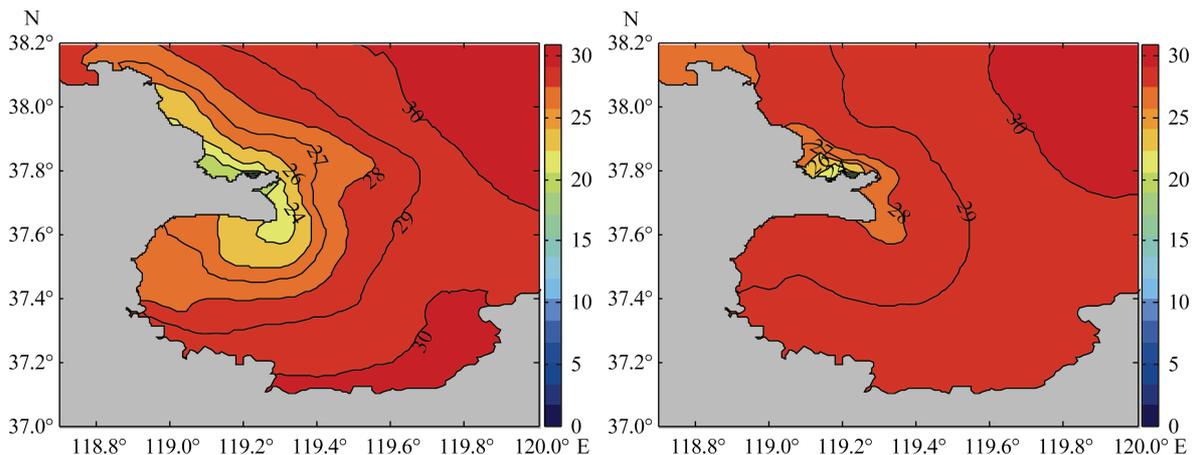


图 12 2020 年丰水期(左)和枯水期(右)底层盐度空间分布图

Fig. 12 Spatial distribution of bottom salinity in the wet season (left) and dry season (right) in 2020

27 psu 等盐度线是衡量盐度分布的一个重要指标, 27 psu 以下的低盐度区域是极适合海洋生物生存的^[22-23]。夏季, 黄河口东南风向居多, 低盐度水向东南方向的扩散受到限制, 在表层流的作用下, 使得低盐度水向莱州湾扩散。根据模型丰水期的结果显示(图 11 左), 27 psu 盐度锋可以扩散到莱州湾中部, 经计算表层盐度场中 27 psu 等盐线的包络面积为 2 665.61 km², 27psu 包络面积可以占到整个莱州湾 1/4 左右; 而在枯水期(图 11 右)时, 27 psu 以下

的区域只集中在黄河口附近。对莱州湾并没有产生比较大的影响。表层 27 psu 等盐度线的包络面积为 199.65 km²。枯水期 27 psu 等盐线的包络面积仅为丰水期时的 1/13.35。这主要由径流和风限制所导致的。虽然低盐度水有明显东南向的扩散趋势, 但是黄河冲淡水供给不足, 只在黄河口南部不远处形成一小团低盐度区域。

图 10 是丰水期和枯水期表层余流分布, 主要考虑径流和风的影响, 对 1 个太阴日周期进行余流

分析。丰水期和枯水期，黄河口附近的余流方向都是向莱州湾方向扩散的。丰水期黄河口附近余流流速较大，莱州湾余流流速较小；枯水期时，黄河口附近高流速区域面积较小。这主要是悬殊的径流差异引起的。枯水期时黄河口和莱州湾海域的余流流速比较均匀，且在莱州湾内，余流流速略大于丰水期时的流速，这主要和冬季盛行风力大的偏北风有关。盐度扩散主要依靠径流、潮汐和风等作用进行，黄河冲淡水与周围高盐度水体混合，径流量越高，和周围高盐度水体混合后，形成的低盐度区域越大，混合扩散的方向和盐度的扩散结构受潮汐和风等作用影响。

2.2 莱州湾海域垂向盐度场时空分布特征

考虑受环流和余流影响较大，且盐度扩散现象比较明显，本文以 119.3°E 展开剖面，研究盐度扩散

情况。图 13 是具体展开的剖面位置。图 14 是丰水期和枯水期盐度的剖面分布图。

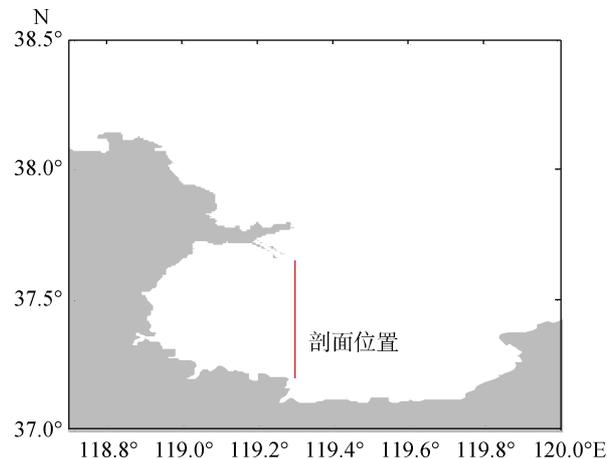


图 13 剖面位置图

Fig. 13 Section location map

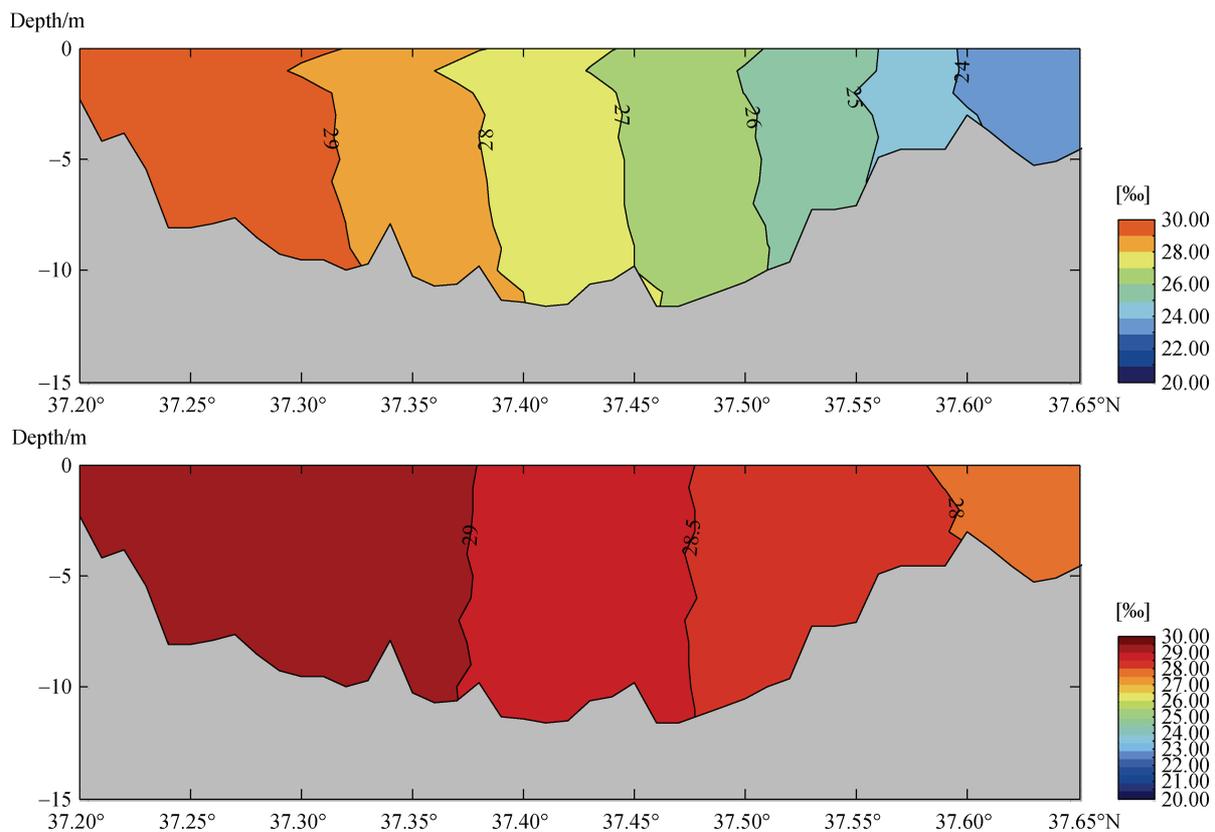


图 14 2020 年丰水期(上)和枯水期(下)莱州湾盐度剖面分布图

Fig. 14 Salinity profile of Laizhou Bay in the wet and dry seasons in 2020

图 14 显示，丰水期径流量大，黄河冲淡水影响莱州湾的盐度分布范围大。上层的盐度交换比较剧烈，所以盐度锋比较突出。随着向莱州湾南部的深入，表层的低盐度水团越来越少，垂向交换的深度也越

来越浅。通过剖面图也可以看出丰水期羽流扩散的距离更远。距离表层 5 m 的范围内才有明显的水体交换现象。

枯水期(图 14 下)，整个莱州湾盐度都偏高，盐度

值在 28~30 psu。盐度垂向分布比较均质，只有在莱州湾最北部有发生明显的盐度的垂向扩散。

3 讨论

WANG^[24]于 2008 年发表的论文说明了低盐度区域在黄河口和莱州湾的分布情况。研究指出，枯水期时，黄河冲淡水沿着近岸，向莱州湾扩散，莱州湾的西侧和南侧都是 30 psu 以下的区域。丰水期时，黄河冲淡水更多的是向渤海湾中部扩散。本次模拟的结果和上述结论差别很大，使用 2020 年的最新数据得出的结论显示，丰水期和枯水期，黄河冲淡水都是向莱

州湾方向扩散的。丰水期在莱州湾的羽流扩散面积比 WANG 模拟的结果更大。造成这种现象可能的原因，主要为入海径流量的变化、黄河入海口门位置的变迁。

3.1 入海径流量对黄河冲淡水扩散的影响

根据利津站统计数据得到 1952—2017 年黄河入海年径流量变化(图 15)。近几十年，黄河入海的径流量动态起伏，但整体上呈减少的趋势。1964 年，黄河入海径流量达到最大值 $1\ 057 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；2002 年，黄河入海径流量仅达到 $41.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是近几十年以来入海径流量的最低值。2002 年后，对黄河进行了水调节^[14]，入海径流量有所上升。

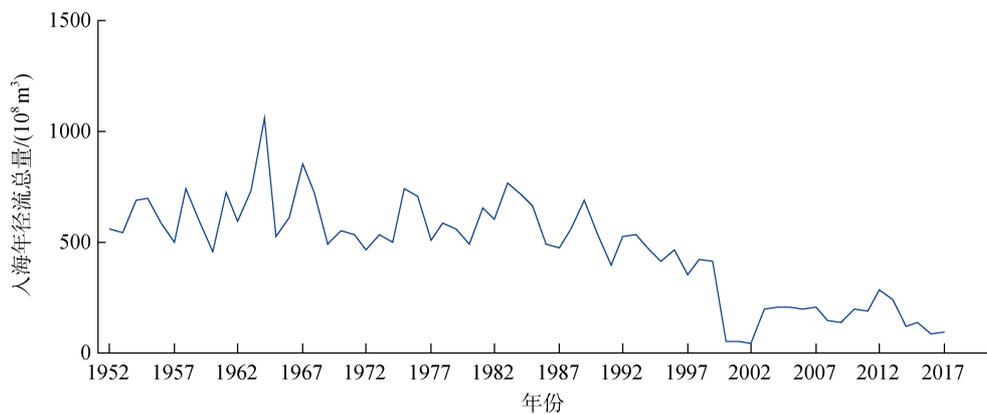


图 15 1952—2017 年黄河入海年径流量变化图

Fig. 15 Annual runoff variation of the Yellow River into the sea from 1952 to 2017

WANG^[24]使用的径流量数据是 1977—2002 年的月平均值，包含了 2000 年前后黄河入海径流量骤减的阶段，丰水期平均径流量在 $1\ 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右，枯水期平均径流量在 $340 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。据利津站统计，2020 年丰水期的平均入海径流量为 $2\ 761.935 \text{ m}^3/\text{s}$ ，枯水期平均入海径流量为 $209.783 \text{ m}^3/\text{s}$ 。两个模型使用的径流数据相比，2020 年丰水期的入海径流量远超 WANG 所使用的数据，但是枯水期的入海径流量偏小。

初始模型使用的是 2020 年丰水期和枯水期对应的逐日变化的径流数据。为探究径流变化对盐度扩散的影响，新增 2 个模型，新增模型 1 使用 2020 年丰水期平均径流量模拟的丰水期黄河口及莱州湾表层盐度分布情况(图 16)；新增模型 2 使用 $1\ 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 的平均入海径流模拟的丰水期黄河口及莱州湾表层盐度分布情况(图 13)，2002—2020 年的丰水期平均入海径流为 $1\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ，和 WANG 模型中使用的 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 的丰水期径流量差别不大，故不再设置径流量梯度。

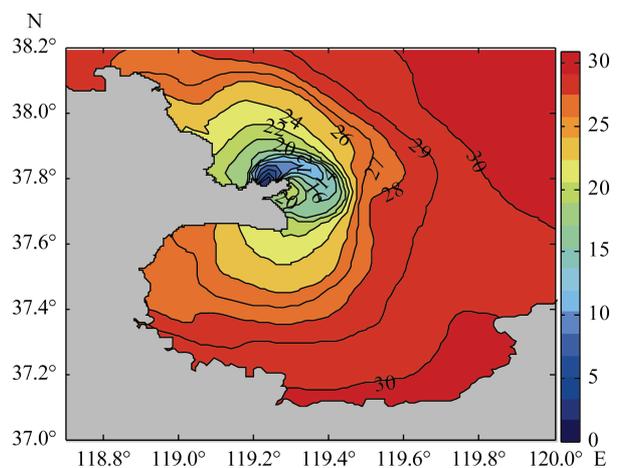


图 16 新增模型 1 的丰水期表层盐度分布图

Fig. 16 Surface salinity distribution of added model 1 in the wet season

新增模型 2(图 17)的结果显示，由于入海径流量大幅度减少，相比初始模型，丰水期黄河冲淡水扩散的距离和面积大大减小。和 WANG 建立的模型

一样,丰水期的低盐度区域主要集中在黄河口附近和莱州湾的西北角,部分扩散形状上的差异可能与当年的潮汐和风应力条件有关系。但是在羽流的扩散方向上依旧存在差异,新增模型在丰水期的扩散方向和初始模型一致,有着明显向南扩散的盐度锋。

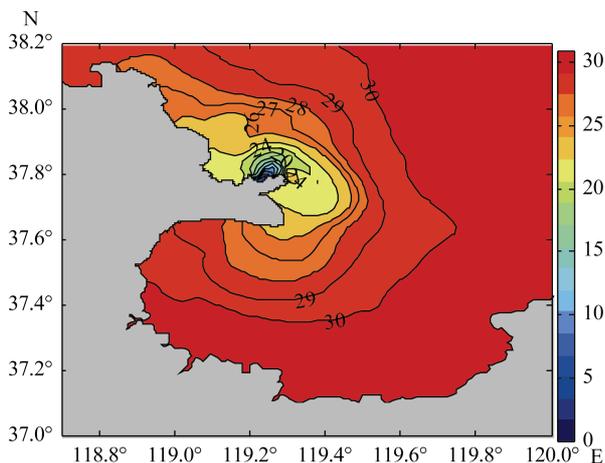


图 17 新增模型 2 的丰水期表层盐度分布图

Fig. 17 Surface salinity distribution of added model 2 in the wet season

径流的大小在水平方向上主要影响盐度的扩散面积和扩散距离。通过新增模型 1(图 16)和模型 2(图 17)的对比,2020 年丰水期盐度扩散的面积更大、距离更远。27 psu 盐度锋向北和向莱州湾扩散的距离更远,27 psu 包络面积更大。2020 年丰水期的 27 psu 等盐线包络面积为 2 023.938 km²,新增模型 2 产生的 27 psu 等盐度线表层包络面积为 1 285.495 km²,前者比后者的包络面积大 738.443 km²,相差 1.6 倍左右。前者 27 psu 表层盐度锋向北扩散的距离为 29.012 km,向南扩散的距离为 36.037 km,向东扩散的距离为 18.358 km;后者向北扩散的距离为 25.075 km,向南扩散的距离为 28.152 km,向东扩散的距离为 15.536 km,2020 年丰水期相比往年的数据,27 psu 向北扩散的距离远 3.937 km,向南扩散的距离远 7.885 km,向东扩散的距离远 2.882 km。

3.2 入海口门位置对黄河冲淡水扩散的影响

黄河经过多次改道和地形变迁,目前稳定在山东省东营市垦利区入海,口门位置朝向稳定在偏北方向。WANG 的模型的口门朝向偏东,大致是 20 世纪 80 年代的黄河入海口位置。为探究口门位置对黄河冲淡水的影响,新增模型 2 的口门朝向偏东,并使用对应时期的岸线数据,综合岸线改变和口门

朝向变化,探究入海口门变迁对黄河冲淡水扩散的影响。图 18 是丰水期时的表层盐度分布图。结果显示,黄河冲淡水经东向口门和北向口门向外海扩散的扩散不同。经东向口门,黄河冲淡水有明显向北扩散的盐度锋,这和 WANG 的模式结果是一致的。经北向口门,黄河冲淡水主要向莱州湾输入。造成这种现象的主要原因是余流影响。潮流图(图 8~图 9)显示,黄河口西北侧的潮流方向是沿着岸线,随着涨落潮呈西北-东南方向往复;黄河口以南包括莱州湾的潮流方向均随着涨落潮呈东北-西南方向往复。图 19 是初始模型和新增模型 3 的表层余流分布情况图。初始模型在黄河口区域的余流方向大致是向东南方,在黄河口与莱州湾的区域有顺时针环流,导致黄河冲淡水沿着东南方向从口门扩散出来,在环流的影响下继而向南扩散至莱州湾。新增模型 3 在黄河口附近的余流方向是向北,北向的余流使得黄河冲淡水从东向口门扩散出来后,直接向渤海中部方向扩散。

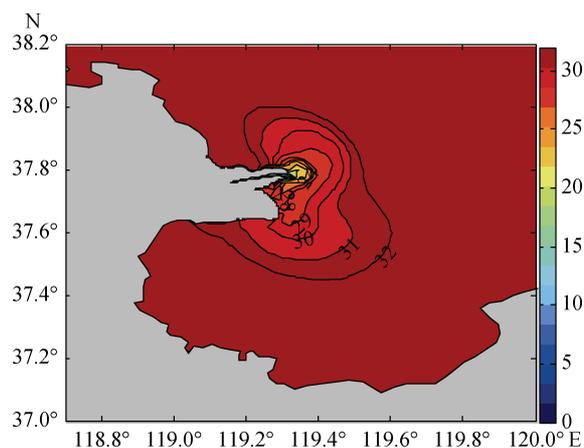


图 18 新增模型 2 丰水期表层盐度分布图

Fig. 18 Surface salinity distribution of added model 2 in the wet season

3.3 风对黄河冲淡水扩散的影响

图 20 展示的是无风条件下,丰水期和枯水期的表层盐度分布情况。在潮流作用下,丰水期时黄河冲淡水也有明显向莱州湾扩散的行为,枯水期因为径流量的限制并不明显。经计算丰水期无风条件下表层 27 psu 包络面积是 1 885.83 km²,枯水期无风条件下表层 27 psu 包络面积是 135.56 km²。相比考虑风影响的结果(图 11),丰水期表层 27 psu 包络面积减少了 779.78 km²,枯水期表层包络面积减少了 64.09 km²。从而证实风可以促进盐度的扩散。

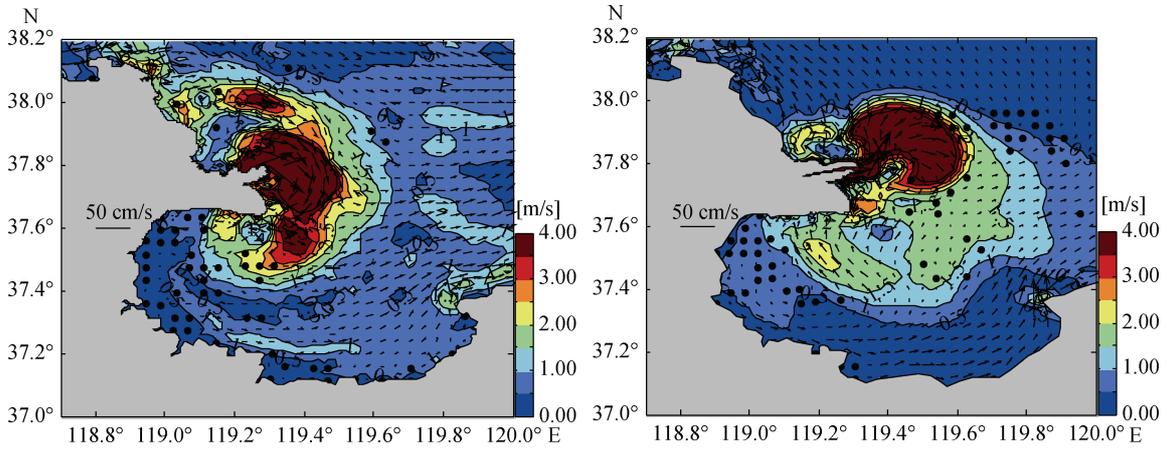


图 19 初始模型(左)和新增模型 3(右)表层余流场图

Fig. 19 Surface residual current field of the initial model and added model 3

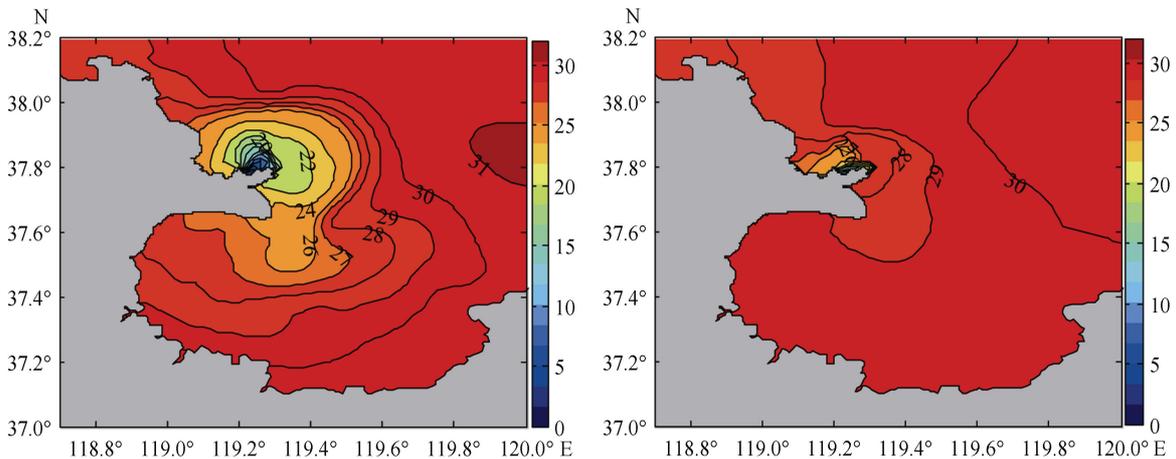


图 20 无风条件下丰水期(左)和枯水期(右)表层盐度分布图

Fig. 20 Spatial distribution of surface salinity in wet and dry seasons with no wind

4 结论

本文使用 FVCOM 温盐模式,对黄河口及莱州湾海域进行盐度模拟。展示说明 2020 年丰水期和枯水期黄河口及莱州湾海域的盐度分布特征,并讨论径流量和黄河口门位置对黄河冲淡水扩散的影响。得到以下结论。

(1) 2020 年丰水期和枯水期,黄河羽流都是向南扩散进入莱州湾,由于枯水期径流量的限制,枯水期羽流只有向莱州湾扩散的趋势。

(2) 2020 年丰水期径流量比往年平均值高一倍以上,黄河冲淡水几乎影响了整个莱州湾,27 psu 等盐线包络面积占莱州湾的 1/4 左右。枯水期径流量和往年变化不大,27 psu 以下盐度区域只集中在黄河口附近。枯水期 27 psu 等盐线的包络面积仅为丰水期时的 1/13.35。

(3) 入海径流量的变化主要影响黄河口羽流的

扩散面积,径流量越大,扩散面积越大。2020 年丰水期的 27 psu 等盐线包络面积为 2 023.938 km²,往年的径流数据产生的 27 psu 等盐度线表层包络面积为 1 285.495 km²,相差 1.6 倍左右。2020 年丰水期相比往年,27 psu 盐度锋向北扩散的距离远 3.937 km,向南扩散的距离远 7.885 km,向东扩散的距离远 2.882 km。

(4) 风会促进表层盐度的扩散,不考虑风的影响后,丰水期表层 27 psu 包络面积减少了 779.78 km²,枯水期表层包络面积减少了 64.09 km²。

(5) 入海口门位置的变化会改变羽流的扩散结构。黄河口西北侧潮流沿岸线方向,随着涨落潮呈西北-东南向往复;黄河口以南包括莱州湾的潮流方向均随着涨落潮呈东北-西南方向往复。在余流的作用下,黄河冲淡水经北向口门入海更多地会向南扩散进入莱州湾;经东向口门入海主要向北扩散影响渤海湾中部。

参考文献:

- [1] XING Y, AI C F, JIN S. A three-dimensional hydrodynamic and salinity transport model of estuarine circulation with an application to a macrotidal estuary[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 39: 53-71.
- [2] DONG L X, SU J L. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1761-1777.
- [3] 应铭, 李九发, 陈沈良, 等. 黄河三角洲飞雁滩动力特征与地形剖面塑造[J]. *海洋通报*, 2007, 4: 13-22.
YING Ming, LI Jiufa, CHEN Shenliang, et al. Dynamics characteristics and topographic profiles shaping process of Feiyantan at the Yellow River Delta[J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 4: 13-22.
- [4] SUI Y, SHI H Y, YOU Z J, et al. Long-term trend and change point analysis on runoff and sediment flux into the sea from the Yellow River during the period of 1950-2018[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 99(sp1): 203-207.
- [5] 谷源泽, 徐丛亮, 张朝晖, 等. 黄河入海淡水对海洋生态调控响应研究[J]. *人民黄河*, 2019, 41(8): 68-75.
GU Yuanze, XU Congliang, ZHANG Zhaohui, et al. Response of fresh water from Yellow River to marine ecological regulation[J]. *Yellow River*, 2019, 41(8): 68-75.
- [6] 姜会超, 王玉珏, 李佳蕙, 等. 莱州湾营养盐空间分布特征及年际变化趋势[J]. *海洋通报*, 2018, 37(4): 411-423.
JIANG Huichao, WANG Yujue, LI Jiahui, et al. Annual variation and spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(4): 411-423.
- [7] 胡兆珂. 黄河三角洲附近海域温、盐场的变化及对流场的影响[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
HU Zhaoke. Numerical modelling of changes of temperature and salt fields in the Bo Sea including the waters around the Yellow River delt and effects on the current field[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [8] 单红仙, 王伟宏, 刘晓磊, 等. 海水盐度对沉降泥沙固结过程影响研究[J]. *海洋工程*, 2015, 33(2): 50-57+76.
SHAN Hongxian, WANG Weihong, LIU Xiaolei, et al. Effects of sea water salinity on the consolidation process of sediments settlement[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 33(2): 50-57+76.
- [9] 吴德星, 林霄沛, 鲍献文. 渤海动力环境研究应关注的新问题[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 5: 685-688.
WU Dexing, LIN Xiaopei, BAO Xianwen. New issues in the dynamic and environmental studies of the Bohai Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 5: 685-688.
- [10] 吴德星, 牟林, 李强, 等. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素[J]. *自然科学进展*, 2004, 2: 73-77.
WU Dexing, MU Lin, LI Qiang, et al. Characteristics of long-term salinity variation in Bohai Sea and possible leading factors[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 2: 73-77.
- [11] 张洪亮, 杨建强, 崔文林. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响[J]. *海洋环境科学*, 2006, S1: 11-14.
ZHANG Hongliang, YANG Jianqiang, CUI Wenlin. Status of salinity changes and the effect on marine environments and ecosystem in Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, S1: 11-14.
- [12] 赵鹏, 江文胜, 毛新燕, 等. 2000—2005 年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(1): 12-23.
ZHAO Peng, JIANG Wensheng, MAO Xinyan. Salinity change and influencing factor in the Laizhou Bay from 2000 to 2005[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2010, 41(1): 12-23.
- [13] MAO X Y, JIANG W S, ZHAO P, et al. A 3-D numerical study of salinity variations in the Bohai Sea during the recent years[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(19): 2689-2699.
- [14] 赵进平, 侍茂崇, 李诗新. 低盐区及渤海低盐区的盐度特征[J]. *海洋科学集刊*, 1998, 40: 249-260.
ZHAO Jinping, SHI Maochong, LI Shixin. Low-salinity region and salinity characteristics of the low-salinity region in Bohai Sea[J]. *Studia Marina Sinica*, 1998, 40: 249-260.
- [15] WANG Y C, LIU Z, GAO H W, et al. Response of salinity distribution around the Yellow River mouth to abrupt changes in river discharge[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(6): 685-694.
- [16] LIU H. Fate of three major rivers in the Bohai Sea: A model study[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(14): 1490-1499.
- [17] CHENG X Y, ZHU J R, CHEN S L. Extensions of the river plume under various Yellow River courses into the Bohai Sea at different times[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 249(9): 107092.
- [18] SHI H Y, LI Q J, SUN J C, et al. Variation of Yellow River runoff and its influence on salinity in Laizhou Bay[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(6): 1235-1244.
- [19] 卢昱岑, 沈永明, 张明. 地形演变对黄河口切变锋位置及盐度分布的影响[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2012, 27(3): 348-358.
LU Yucen, SHEN Yongming, ZHANG Ming. Influence of topography evolution on position of tidal shear front

- and distribution of salinity around Yellow River estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics(A), 2012, 27(3): 348-358.
- [20] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual, second edition[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-79.
- [21] 寿玮玮, 宗海波, 丁平兴. 夏季黄河入海径流对黄河口及附近海域环流影响的数值研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(7): 1-13.
SHOU Weiwei, ZONG Haibo, DING Pingxing. Numerical study of the circulation influenced by runoff input in the Huanghe (Yellow) River Estuary and adjacent waters in summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(7): 1-13.
- [22] 李建生, 胡芬, 程家骅. 长江口水域春季鱼卵仔鱼分布及其与温度盐度的关系[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 16-21.
LI Jiansheng, Hu Fen, CHENG Jiahua. Distributions of fish eggs and juveniles and relations between surface layer water temperature and salinity of the Yangtze estuary water area in spring[J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 16-21.
- [23] 王同顺. 黄河入海径流和近海水域的相互作用及其应用探讨[D]. 烟台: 鲁东大学, 2017.
WANG Tongshun. Study on the interaction between the Yellow River Entrance runoff and Coastal Waters and its Application[D]. Yantai: Ludong University, 2017.
- [24] WANG Q, GUO X Y, HIDEKATA T. Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: A model study[J]. Geophysical Research, 2008, 113(C8): C08046.

The effects of gate and runoff changes on salinity distribution around Laizhou Bay

QIAO Shou-wen^{1, 2}, LI Fan³, QIN Hua-wei³, SHI Hong-yuan²

(1. The Ocean University of China, College of Oceanography and Atmosphere, Qingdao 266100, China; 2. Ludong University College of Hydraulic Engineering, Yantai 264025, China; 3. Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Yantai 265500, China)

Received: Nov. 24, 2021

Key words: salinity diffusion; Yellow River plume; Laizhou bay; FVCOM

Abstract: The runoff into the sea in the Yellow River during the wet season in 2020 is more than twice the average value of previous years, which will definitely lead to dynamic changes in estuarine dynamics and salinity distribution. Based on Finite Volume Community Ocean Model, this study simulates the diffusion of fresh water from the Yellow River during the wet and dry seasons in 2020, as well as investigates the changes in the salinity distribution of the Yellow River Estuary and Laizhou Bay and the effects of runoff modifications and gate changes on the aforementioned diffusion. The model results are in good agreement with the observation results. The simulation demonstrates that the direction of the tidal current in the northwest of the Yellow River estuary is along the shoreline, reciprocating in the northwest to southeast direction with the ebb and flow of the tide. Furthermore, the direction of the tidal current in the southern part of the Yellow River estuary, including Laizhou Bay, reverses from northeast to southwest. The high velocity area is primarily focused around the Yellow River Estuary and the north of Laizhou Bay, with speeds exceeding 0.5 m/s. A huge volume of fresh water from the Yellow River will flow into Laizhou Bay due to the effect of residual current, and the area with a salinity of <27 psu accounts for ~1/4 of the entire Laizhou Bay during the wet season. The change in runoff primarily influences the diffusion area of a plume, while the change in the gate will change its diffusion direction.

(本文编辑: 谭雪静)