

黄河入海径流对河口海域盐度影响研究

王海霞^{1,2}, 秦华伟^{3*}, 乔守文^{1,2}, 李凡³, 石洪源^{1,2}, 张旭日^{1,2}

(1. 鲁东大学 水利工程学院, 山东 烟台 264025;

2. 鲁东大学 港口海岸防灾减灾研究院, 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 264006)

摘要:为研究黄河入海径流变化条件下河口附近海域盐度扩散特征,以更好地保护河口海域生物多样性,本文以黄河下游利津水文站的长序列实测径流数据资料为基础,利用近海水动力模型 FVCOM,分析径流变化对河口海域盐度的影响规律。结果表明:黄河口与莱州湾之间存在顺时针的环流系统,在余流作用以及涨落潮方向的影响下,黄河冲淡水长期向莱州湾扩散;丰水期黄河冲淡水几乎影响了整个莱州湾,27 盐度锋可以到达莱州湾中部,27 等盐线的表层包络面积为 2 665.61 km²,占莱州湾的 1/4 左右,枯水期低盐度水只有向南扩散的趋势,27 以下的低盐度水集中分布在黄河口门附近,27 等盐线的表层包络面积只有 199.65 km²;5 月份,随着入海径流量增加,27 等盐线扩散的范围、距离、方向都会发生明显变化。在对近海生物资源有迫切保护需求的情景下,适当减少其他用水户供水量以增加入海生态径流量,可以有效改善黄河口海域附近的盐度情况,为生物资源的生长繁殖创造良好条件。

关键词:黄河口;入海径流;近海水动力;盐度模拟;FVCOM

中图分类号:P731.12

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2022)02-0115-13

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220113001

引用格式:王海霞,秦华伟,乔守文,等.黄河入海径流对河口海域盐度影响研究[J].海岸工程,2022,41(2):115-127.

WANG H X, QIN H W, QIAO S W, et al. Effect of the yellow river runoff into the sea on the salinity of the waters near the estuary[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 115-127.

黄河是我国第二长河,年输沙量超过亿吨,输水输沙的同时为河口地区带来丰富的营养物质^[1]。温带季风气候使黄河口与周边海域相互作用,形成适宜、稳定的生态环境^[2-3],使黄河口海域成为黄渤海渔业生物重要的产卵场、孵幼场、索饵场和洄游通道。黄河口海域已监测到的海洋生物有 600 多种,其中渔业资源种类约有 130 种^[4]。黄河口海域鱼卵、仔稚鱼的种类和数量,对整个黄渤海海域的鱼类资源具有重要意义^[5-6]。但是,随着气候变化及人类活动影响的加剧,黄河口海域生态环境恶化,鱼类资源生存面临威胁^[7-8]。已有研究表明,河口海域的盐度条件对于近海渔业资源类群的产卵特性具有重要影响^[9-11]。

黄河入海径流会直接影响黄河口海域附近盐度的时空分布,从而对近海生物的生长、繁殖产生重要影响^[12-13]。黄河冲淡水形成的低盐度区有利于河口海域浮游动植物的生长、繁殖,而高盐海水却对海洋生物的生长、繁殖产生抑制作用^[14-15],每年的 4—6 月黄河冲淡水的这一影响尤其显著。4—6 月是黄河口海域梭鱼、鲅鱼、对虾、大闸蟹等重要渔业资源的产卵孵幼期,黄河冲淡水带来的水沙及营养盐条件为海域附近的浮游植物、浮游动物、鱼类等提供了丰富多样的初级生产力,为黄河口海域生物多样性提供了重要保障。

近些年来,在自然因素以及水库建设等人为因素的影响下,黄河入海径流量呈现显著减少趋势,对黄河口附近海域乃至整个渤海的温盐场产生重要影响^[16-17]。已有研究表明:黄河入海径流量大幅度锐减,整个渤海的温盐场已发生明显变异^[18]。随着计算机模拟技术的不断发展,利用海洋数值模型结合现场综合测量,具有可视化、成本低、计算速度快以及参数可控等优势,能够有效解决现场观测所需时间长、资源投入量大、

收稿日期:2022-01-13

资助项目:山东省自然科学基金项目——径流情势对山东近海生态环境的影响机理研究(ZR2019PEE025)

作者简介:王海霞(1986—),女,讲师,博士,主要从事考虑流域及近海生态环境问题的水资源调度方面研究。E-mail: whx0804@126.com

*通信作者:秦华伟(1980—),男,副研究员,博士,主要从事海洋与渔业生态环境监测评价方面研究。E-mail: 15965178556@126.com

(李 燕 编辑)

受环境及其他因素限制等问题,成为研究河口海域物理过程的重要手段^[19-22]。因此,针对黄河入海径流量锐减所产生的一系列问题,有必要基于数值模式研究新条件下黄河口附近海域盐度扩散特征,探明黄河入海径流对河口海域盐度影响的时空变动规律,对于合理利用黄河水、保护黄河口海域生物多样性以及实施黄河流域生态保护与高质量发展提供科学依据。

1 方法介绍

有限体积海岸海洋模型 FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)是由美国麻省大学(University of Massachusetts)陈长胜博士带领的海洋生态动力学模型实验室与伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)的 Beardsley 博士合作开发建立的海洋环流与生态模型^[19,23]。模型是以三维 N-S 方程为基础,通过有限体积法对控制方程进行离散求解,可以更好保证在复杂岸线和地形条件下计算范围内单元间的标量和动量守恒。模型融合有限体积法、自由表面和三维原始方程,在垂向上采用 σ 坐标系,该坐标系可以更好地拟合复杂的地形,提升对河口海域海底多变地形的拟合程度,在水平方向上采用无结构化不规则的三角形网格,可以更好地拟合曲折多变的复杂岸线,采用的干湿网格判别法能较好地模拟出海水涨落潮期间的滩涂或潮间带淹没及露出情况。FVCOM 源代码开源,获取方便,模型多适用于海湾、河口、陆架和海洋等区域,并已成功应用于我国渤海、黄海、东海等海域^[24-27]。其表达式如下:

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g. \quad (3)$$

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

盐度方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s. \quad (5)$$

假定模型中海水密度仅和温度变量以及盐度变量的变化有关,构造成简单线性方程,可以表示为:

$$\rho = \rho(\theta, S). \quad (6)$$

计算盐度的海洋表面边界条件方程如下:

$$\frac{\partial S}{\partial z} = -\frac{S(\hat{P} - \hat{E})}{K_h \rho} \cos \gamma, \quad (7)$$

$$z = \zeta(x, y, t). \quad (8)$$

计算盐度的海洋底面边界条件方程如下:

$$\frac{\partial S}{\partial z} = -\frac{A_H \tan \alpha}{K_h} \frac{\partial S}{\partial n} \cos \gamma, \quad (9)$$

$$z = -H(x, y), \quad (10)$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 + |\nabla \zeta|^2}. \quad (11)$$

由于海洋底部边界不规则,为了减少因海底地形变形而产生的虚假扩散和虚假流动,在垂直方向采用 σ 坐标对海洋底部地形起伏进行平滑处理,方程如下:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta} = \frac{z - \zeta}{D}. \quad (12)$$

式(1)~(12)中: x 、 y 和 z 分别为直角坐标系中的东向、北向和垂直坐标轴; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量; θ 为温度; S 为盐度; ρ 为海水密度; P 为压强; f 为科氏参量; g 为重力加速度; K_m 为垂直旋转黏性系数; K_h 为热量垂直旋转扩散系数; F_u, F_v 分别为动量在正东、正北方向的分量; F_T, F_S 分别为热量和盐度的扩散项; A_H 为水平热量的扩散系数; α 为与海底地形所成角度; $\hat{P}$ 为降水率; $\hat{E}$ 为蒸发率; D 为总水深; H 为平均海平面以下的水深; ζ 为平均海平面以上的自由海面高度; σ 值的大小自海底为-1 至海表为 0。

模型中底摩擦系数计算方程如下:

$$C_d = \max \left[k^2 / \ln \left(\frac{Z_{ab}}{Z_0} \right)^2, 0.0025 \right], \quad (13)$$

式中: $k=0.4$ 为 von Karman 常数, Z_{ab} 为离海底最近的 σ 层与海底间的距离, Z_0 为海底粗糙度。

2 研究区概况及模式建立

2.1 研究区概况

黄河口海域多年平均气温为 13.0 ℃, 全年以 1 月份平均气温最低, 为 0.5 ℃, 8 月份平均气温最高, 为 25.6 ℃。多年平均降水量为 434.3 mm, 全年降水主要集中在夏季, 特别是 7、8 月份。研究区域受季风影响明显, 全年最多风向主要为东北向和西南向, 其中, 冬、春季东北风偏多, 夏、秋季西南风偏多。累年平均风速为 5.2 m/s, 夏季平均风速较小, 在 4.3~5.1 m/s, 春、冬季风速相对较大, 在 4.8~6.5 m/s。平均相对湿度为 71%, 一年中, 1—7 月份相对湿度逐渐增大, 7 月最大, 达到 84%; 7—12 月份逐渐减小, 12 月份最小, 只有 64%。工程所在海域雾日较少, 累年平均为 19.1 d。

2.2 模式建立

本文基于较高分辨率的黄河口岸线和地形数据, 利用 FVCOM 模式建立黄河口海域三维水动力数值模拟, 模式中各参数及工况设置如下。

1) 网格、水深、岸线设置

网格: 为了能够了解黄河口附近海域潮位、潮流和盐度变化情况, 在黄河口附近进行了网格加密处理。黄河口附近岸线的网格分辨率在 50~100 m, 莱州湾岸线的网格分辨率在 100~500 m, 开边界网格分辨率在 1~2 km。整个计算区域在水平方向上共有 100 428 个三角形网格单元和 51 499 个节点。

水深: 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^[28]; 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修正, 同时利用部分工程和勘测数据。渤海湾水深值介于 0~60 m, 黄河口附近及莱州湾海域水深在 0~20 m。

岸线: 岸线由海图岸线, 以及工程附近海岸线勘测资料和 Google earth 最新岸线信息拼接而成。

模型网格设置及水深分布如图 1a~1c 所示。潮位、潮流、盐度测站的地理位置如图 1d 所示。

2) 工况设置

图 2 是 1950—2020 年间黄河利津站径流量的变化过程统计结果。由图 2 可以看出, 黄河入海径流量年内分配极为不均, 丰水期(6—10 月)径流量较多, 枯水期(11 月—翌年 5 月)径流量较少。1985 年以后黄河入海径流量明显减少, 但自 2008 年黄河实行生态补水后, 入海径流量特别是 6—10 月的径流量, 多数年份有明显增加。

协调好农业用水与生态用水的矛盾, 是实现黄河流域生态保护和高质量发展的关键。5 月是黄河口海域鱼类产卵育幼的关键期, 盐度条件对海域的生物量具有重要影响。同时, 5 月是黄河流域农业用水的重要时

期,农业用水需求较大。在黄河淡水总量有限的前提下,工业与生活、农业、生态环境用水相互竞争,使入海径流量年际变化较大。为分析不同用水户竞争后对近海盐度的影响,本文设置了几种不同的5月日径流工况,分析不同径流下黄河口海域的盐度场特征,为黄河口海域的生物资源保护提供一定参考。

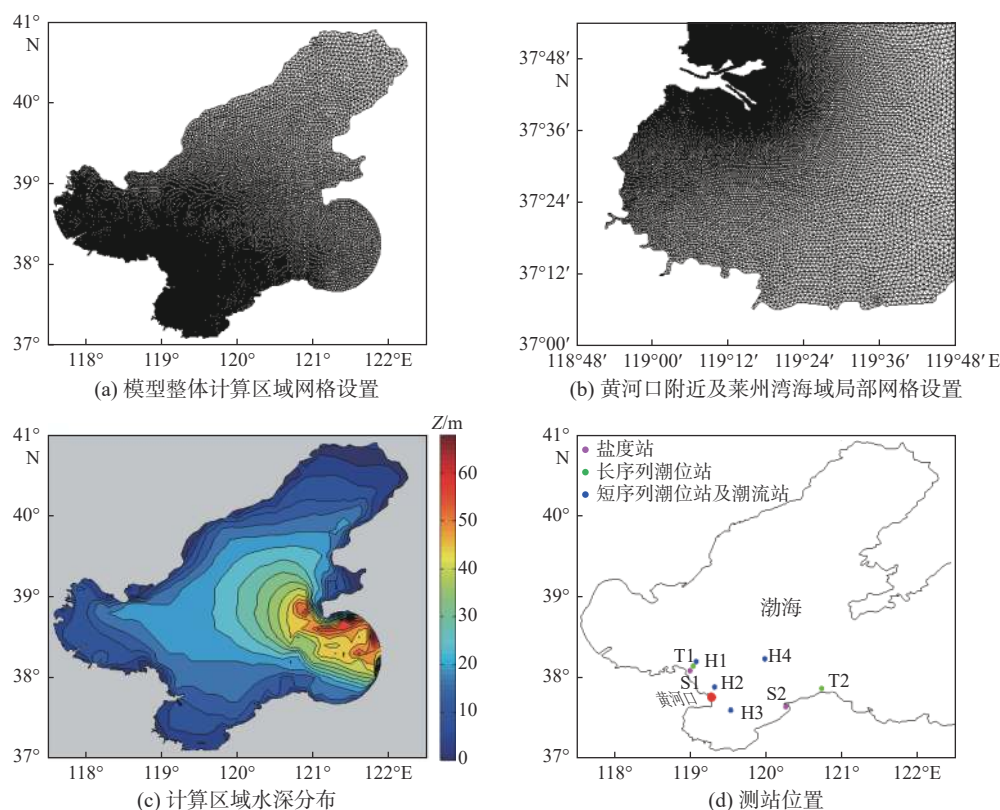


图1 黄河口海域模式网格设置、水深分布及测站位置

Fig. 1 Mode grid settings, water depth and monitoring station location in the waters of the Yellow River Estuary

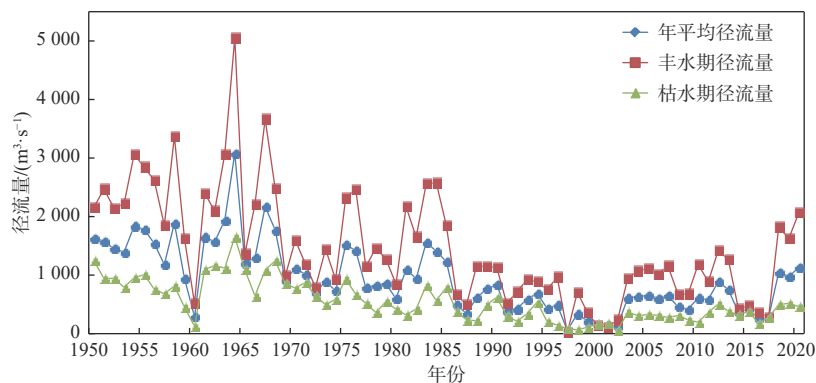


图2 1950—2020年利津站径流量分布

Fig. 2 Distributions of runoff volume from 1950 to 2020 at the Lijin station

模式垂直方向分为20个sigma层,计算采用内外模分裂算法,其中内模时间步长设置为0.5 s,外模时间步长设置为10 s。模型盐度初始场采用SODA(Simple Ocean Data Assimilation)数据^[29],风场采用ERA5(ECMWF Reanalysis v5)数据^[30],分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。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 和 Q_1),根据调和常数设置了模型开边界条件。模拟过程中,黄河淡水盐度为0,开边界盐度设置为32。分别模拟丰枯水期典型月份和5月不同径流条件下黄河口盐度扩散情况,详细信息见表1。

表 1 模型各工况设置详细信息
Table 1 Information about the operation settings for the model

工 况	径流量	风
1	2020 年丰水期(7—8 月)逐日径流量	对应的逐时风
2	2020 年枯水期(1—2 月)逐日径流量	
3	46.2 m ³ ·s ⁻¹ , 2010—2020 年 5 月日均最小径流量	2020 年 5 月逐时变化
4	1 600 m ³ ·s ⁻¹ , 2010—2020 年 5 月日均最大径流量	
5	2 400 m ³ ·s ⁻¹ , 2010—2020 年 5 月日均最大径流量的 1.5 倍	
6	3 200 m ³ ·s ⁻¹ , 2010—2020 年 5 月日均最大径流量的 2 倍	

3 模型验证及结果分析

3.1 模型验证

为验证模型的准确性,选取 6 个潮位站(T1、T2、H1、H2、H3、H4)、4 个潮流站(H1、H2、H3、H4)和 2 个盐度站(S1、S2)进行验证。其中潮位验证包括 2 个长时间序列(T1、T2)和 4 个短时间序列(H1、H2、H3、H4)的数据对比。选择均方根误差(Root Mean Square Error, E_{RMS})、相对平均误差(Relative Mean Error, E_{RM})和模型技能参数(S_{M})等作为长时间序列潮位验证的指标,各指标计算如下所示:

1)均方根误差 E_{RMS} :

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (14)$$

2)相对平均误差 E_{RM} :

$$E_{\text{RM}} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N ((M_i - \bar{O})^2 + (O_i - \bar{O})^2)} \times 100\% \quad (15)$$

3)模型技能参数 S_{M} :

$$S_{\text{M}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (16)$$

式中: M_i 和 O_i 分别为模拟和实测值 ($i=1, 2, 3, \dots, N$), N 为时间序列的总长度, $\bar{O}$ 为实测数据的平均值。

将 FVCOM 模式运行得到的各测站位置的潮位、潮流和盐度数据与各测站实测数据进行对比,验证模式可靠性。潮位、潮流及盐度验证结果表明,所建模型对研究区海域水动力和盐度的模拟效果较好,模型基本能够模拟出黄河口海域的实际情况,可以用来对研究区进行进一步模拟分析。

1)潮位验证

模型验证结果如图 3 所示。模型计算得到长时间潮位验证中 T1 测站的均方根误差、相对平均误差和模型技能参数为 0.05、4.2% 和 0.961, T2 测站的均方根误差、相对平均误差和模型技能参数为 0.177、8.24% 和 0.957。

短时间潮位验证结果中,最高潮位值最大相差 3 cm,最低潮位值最大相差 8 cm,误差在 (± 10)cm 以内,除 H1 测站受无潮点影响相位偏差略大,其他测站潮位振幅和相位模拟值与实测值基本一致,如图 4 所示。

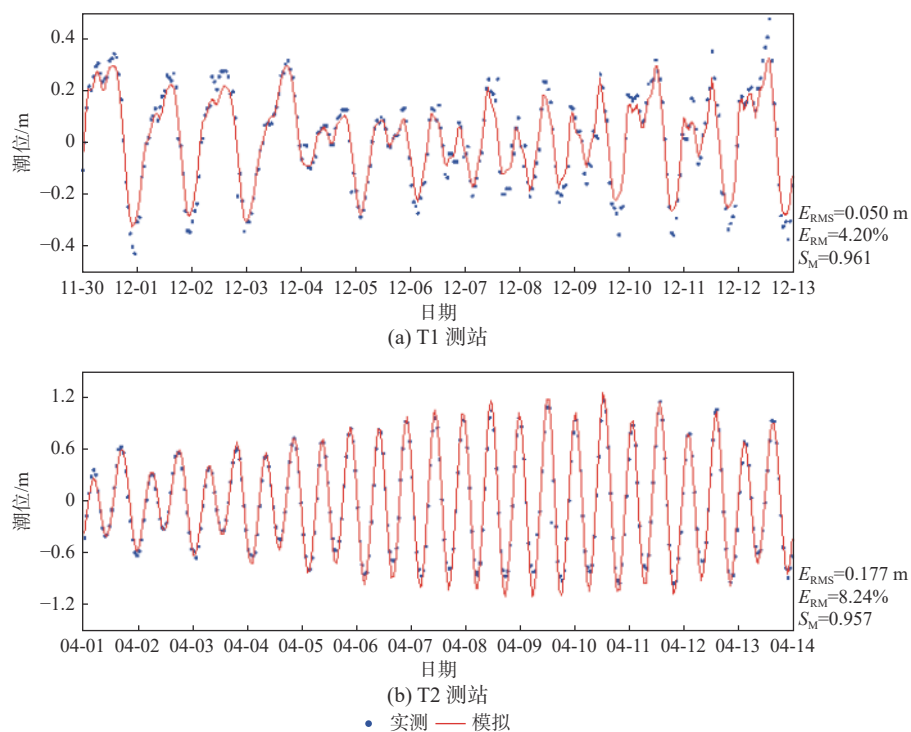


图 3 长时间潮位验证曲线

Fig. 3 Curves of long-term tide level validation

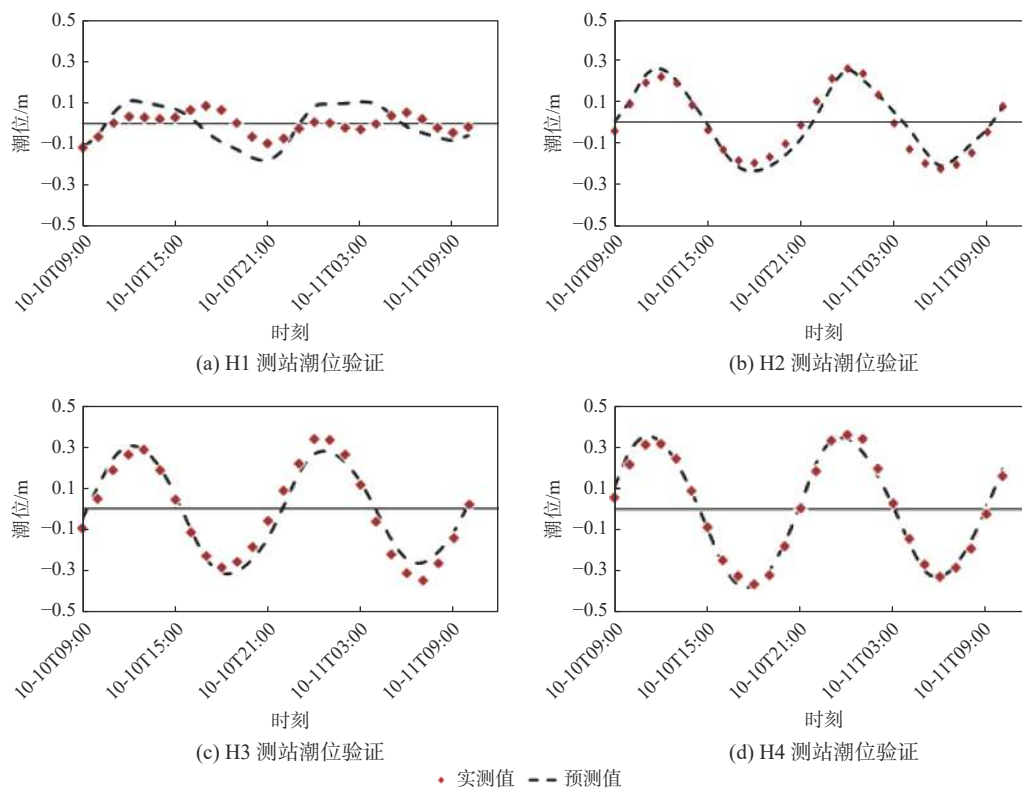


图 4 短时间潮位验证曲线

Fig. 4 Curves of short-time tide level validation

2) 潮流验证

通过监测点的潮流数值计算结果和实测资料验证,得到流速的大小及方向、转流发生时刻等的模拟值与实测值基本一致,除了H3测站底层平均流速偏差略大外,其他各站位涨落潮平均流速最大误差在 $\pm 7\%$ 以内,相差不到10%。部分站位潮流验证曲线如图5所示。

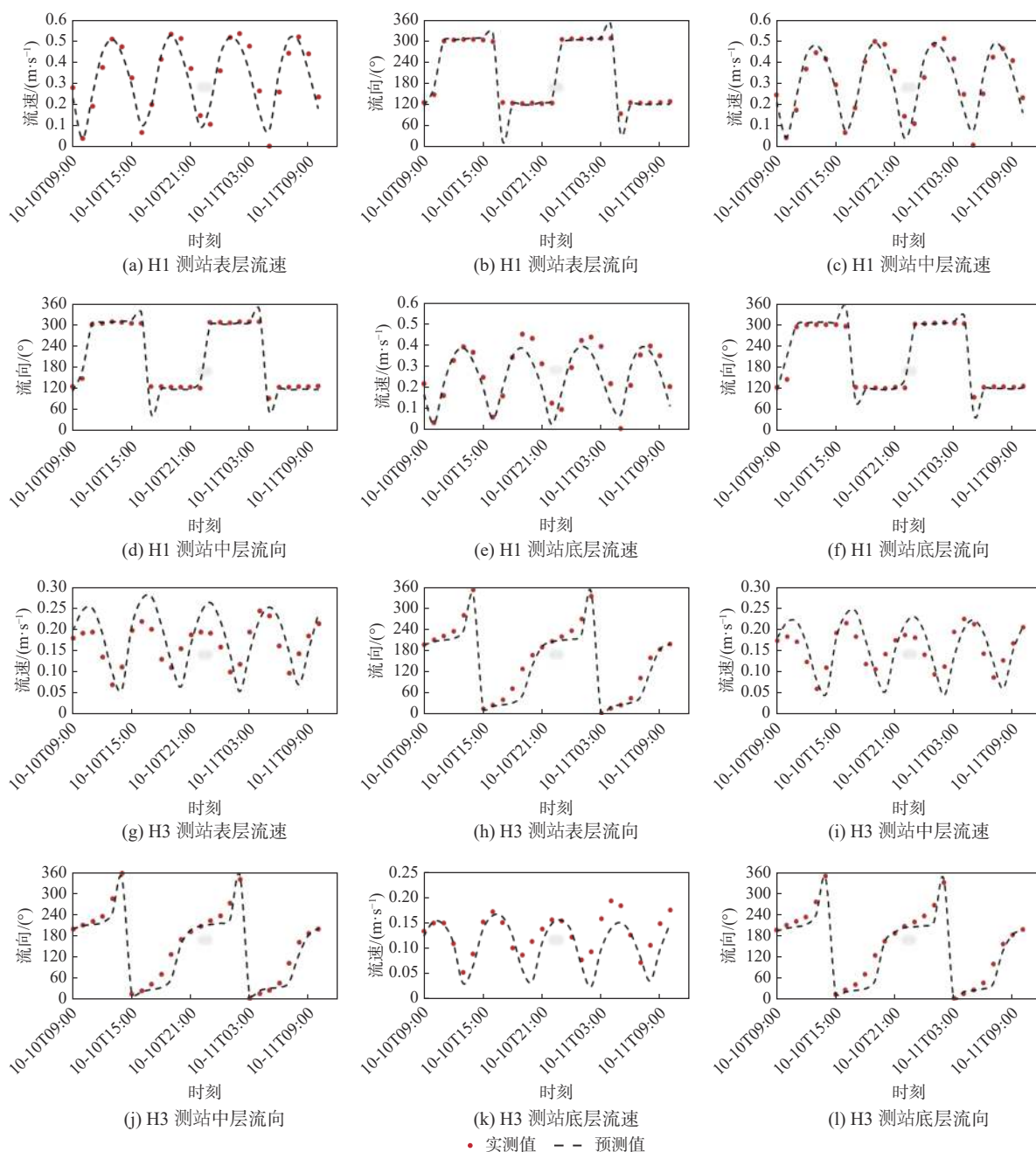


图5 H1测站、H3测站潮流验证曲线图

Fig. 5 Verification curves of tidal currents at H1 and H3 stations

3) 盐度验证

分别选用枯水期2月和丰水期8月东营站(S1)及龙口站(S2)实测数据与数模计算结果进行验证,结果如图6

所示。东营站距离黄河口较近,受黄河径流影响较大,枯丰季盐度模拟与实测结果有一定差距,差值均在 1 以内。龙口站距离黄河口较远,受黄河径流影响较小,模拟与实测结果一致性较好,绝对差值均在 0.1 以内。总体来讲,模型能够很好地模拟计算海域的盐度变化状况。

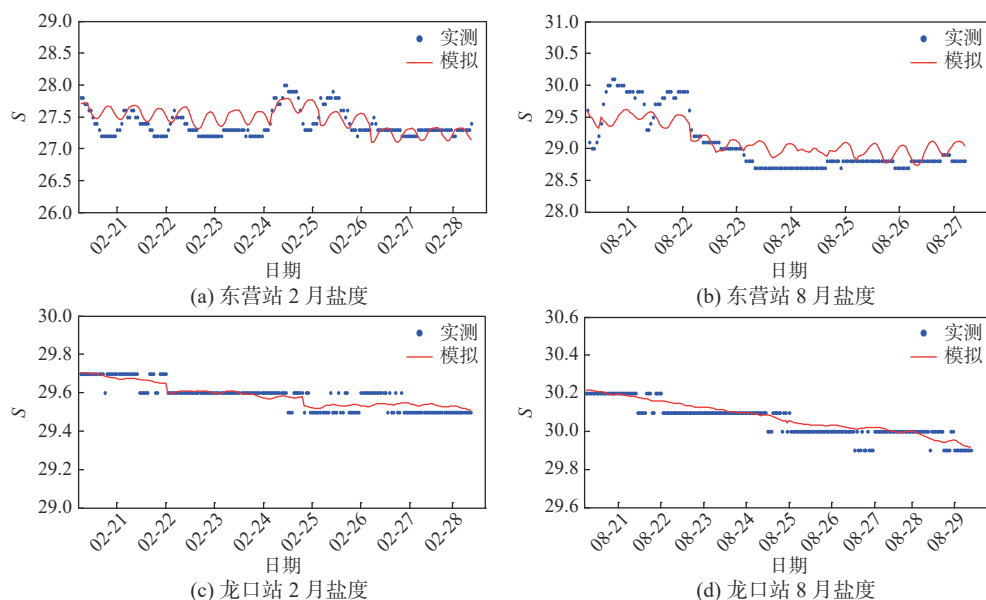


图 6 东营站及龙口站 2 月和 8 月盐度模拟结果

Fig. 6 The simulated salinity in February and August at Dongying and Longkou stations

3.2 结果分析

1) 流场特征

对枯水期(2月)及丰水期(8月)径流输入引起的黄河口周边海域的流场变化特征进行分析。分别提取涨急、涨憩、落急、落憩四个典型时刻的表层潮流,其分布如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在余流作用下,黄河冲淡水长期向莱州湾输入。高流速区域主要集中在黄河口和莱州湾南部,莱州湾的流速普遍在 0.3 m/s 以下。黄河口与莱州湾之间存在明显的顺时针环流系统,这也是黄河口海域和莱州湾进行盐度交换的方式之一。黄河冲淡水在地形和科氏力影响下,会出现明显的“南偏”现象,涨潮和落潮的方向是造成黄河冲淡水向南扩散的原因之一。黄河口西北侧的潮流方向是沿着岸线,随着涨落潮在 NW—SE 方向上往复,黄河口以南包括莱州湾的潮流方向均随着涨落潮在 NE—SW 方向上往复。黄河入海口口门朝向偏北。涨潮时,丰水期黄河口西北方潮流的运动方向是 NW 向,黄河入海冲淡水向南扩散流速被抵消,所以丰水期涨急时刻,黄河口附近高流速区域反而小,落急时刻高流速范围更大。

2) 盐度场特征

27 以下的低盐度区域是极适合海洋生物生存的,因此 27 等盐线是衡量盐度分布的一个重要指标。由图 8 可以看出,受径流影响丰水期和枯水期的盐度分布差异较大。枯水期日平均径流量为 209.783 m³/s,黄河冲淡水影响区域仅在莱州湾西北部,27 以下区域只集中在黄河口门附近。冬季,风主要为西北和东北向,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。表层 27 等盐线包络面积大约为 199.65 km²,表层和底层的盐度分布差别不大。

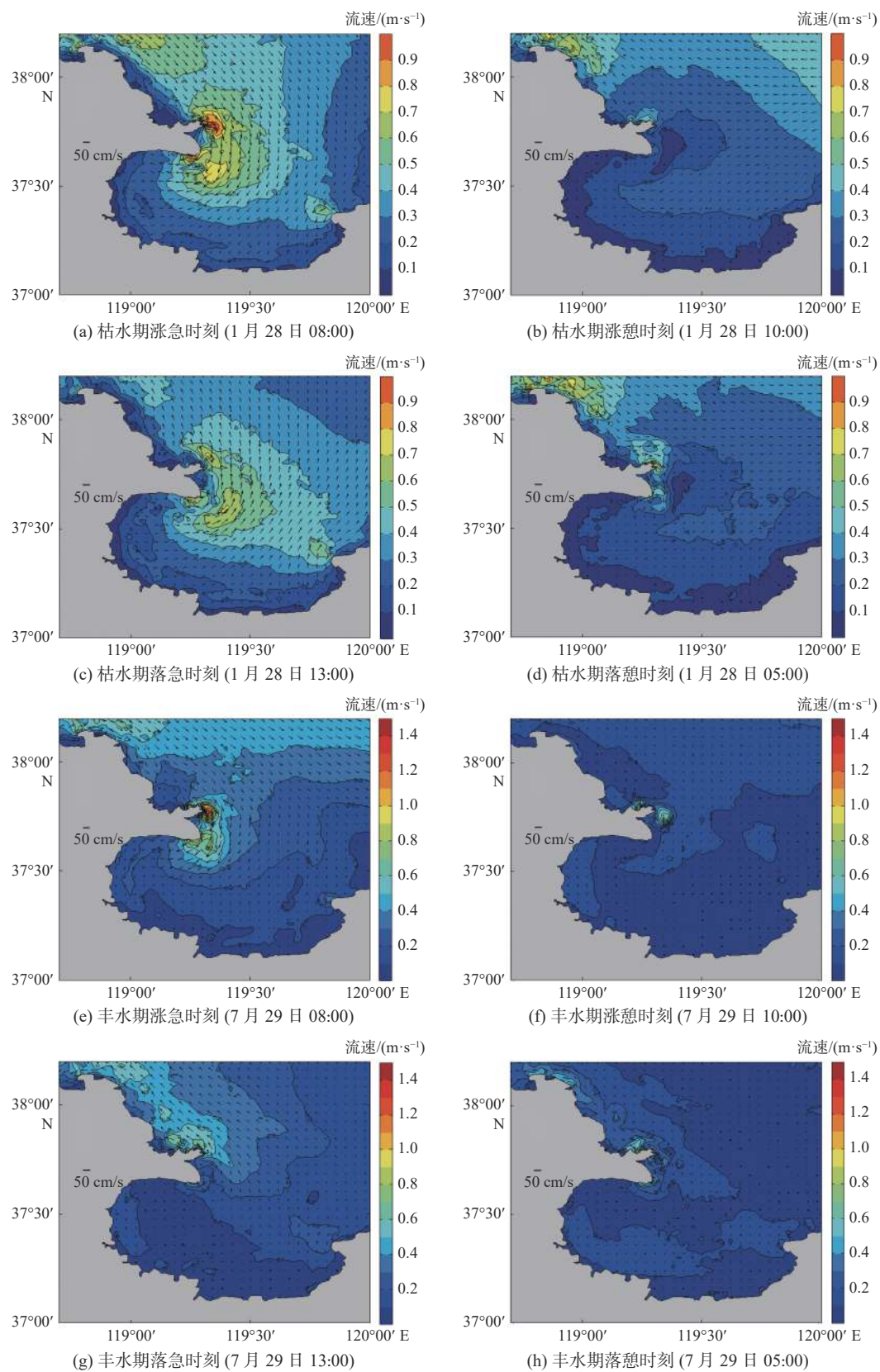


图 7 枯水期及丰水期表层流场分布

Fig. 7 The distribution of surface flow for in dry and wet seasons

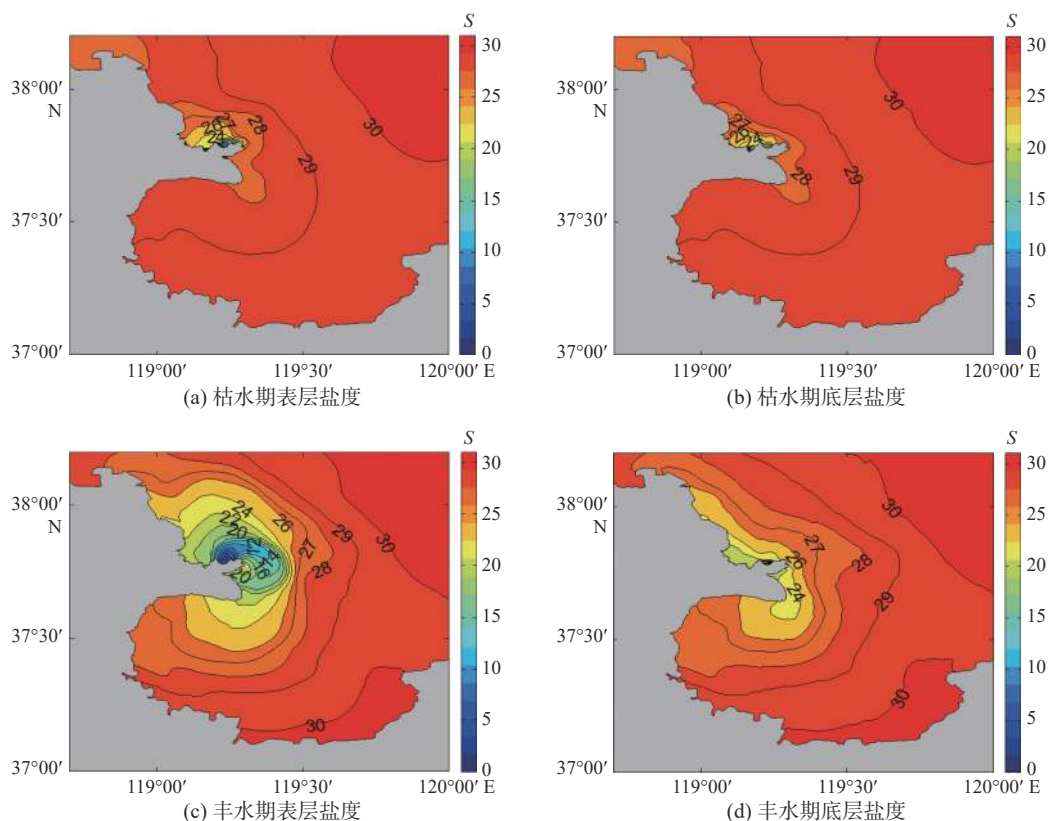


图 8 枯水期(2月)及丰水期(8月)表层、底层盐度月均分布

Fig. 8 The monthly distribution of surface and bottom salinity in dry season (February) and wet season (August)

丰水期黄河日平均入海径流量为 $2\,761.935\text{ m}^3/\text{s}$, 在高入海径流量影响下, 黄河冲淡水几乎影响了整个莱州湾。27 盐度锋可以扩散到莱州湾中部, 占整个莱州湾 1/4 左右。表层盐度场中 27 等盐线的包络面积约为 $2\,665.61\text{ km}^2$ 。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, 在表层流作用下, 低盐度水主要集中在莱州湾西北向。同时, 黄河口及莱州湾海域夏季有明显的分层现象, 表层和底层盐度分布差别很大。

3) 5 月不同径流量情况下盐度场特征

由图 9 可以看出, 5 月最小日均径流量产生的盐度场, 27 以下的低盐度区域只存在黄河入海口门附近。5 月最大、1.5 倍最大、2 倍最大日均径流量产生的盐度场, 黄河冲淡水向东和向南扩散的距离和面积都明显增加。经计算, 最小日均径流量产生的 27 等盐线的包络面积为 83.31 km^2 , 最大日均径流量产生的包络面积为 588.74 km^2 , 后者是前者的 7 倍左右。1.5 倍最大日均径流量产生的包络面积为 939.88 km^2 , 2 倍最大日均径流量产生的包络面积为 $1\,379.43\text{ km}^2$, 是最大日均径流量的 2.3 倍左右。

最小日均径流量产生的 27 等盐线向北扩散的最远距离距黄河口垂直距离为 8.22 km , 向东扩散的最远垂直距离为 10.11 km , 无向南的扩散。最大日均径流量产生的 27 等盐线向北扩散的最远垂直距离为 16.91 km , 向东扩散的最远距离为 11.46 km , 向南扩散的最远距离为 18.38 km 。1.5 倍最大径流量产生的 27 等盐线向北扩散的最远距离为 21.25 km , 向东扩散的最远距离为 21.98 km , 向南扩散的最远距离为 18.48 km 。2 倍最大径流产生的 27 盐度场向北扩散的最远距离为 25.52 km , 向东扩散的最远距离为 27.22 km , 向南扩散的最远距离为 23.94 km 。

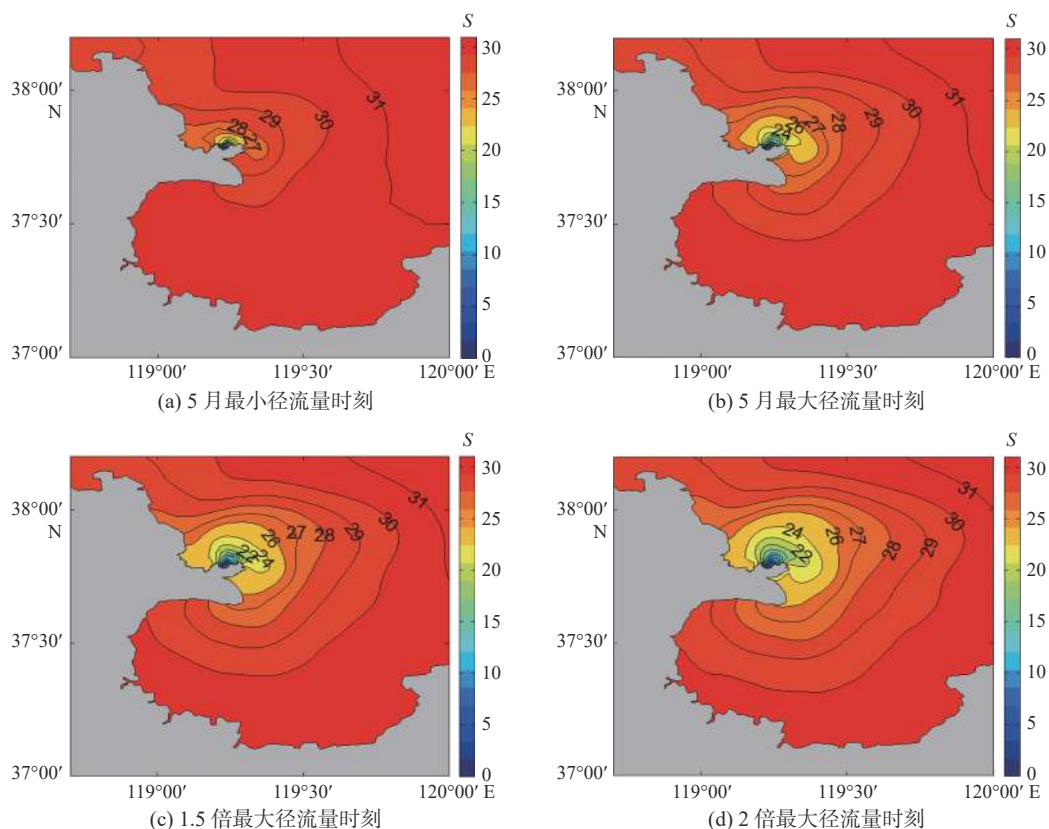


图 9 5 月不同径流量时表层盐度分布

Fig. 9 The distribution of surface salinity under the cases of different runoff in May

4 结 论

黄河具有明显的丰水期和枯水期, 入海径流量动态变化。本文以黄河下游利津水文站的长序列实测径流数据资料为基础, 利用近海水动力模型 FVCOM, 分析黄河入海径流变化对河口海域盐度的影响规律, 得出以下结论:

1) 黄河口附近冲淡水在环流作用下, 以顺时针方向向渤海扩散。黄河口与莱州湾之间存在顺时针环流系统, 黄河口西北方向的潮流在 NW 和 SE 方向往复, 黄河口南部包括莱州湾的潮流在 NW 和 SE 方向往复。在余流以及涨落潮方向的影响下, 黄河冲淡水长期向莱州湾扩散。

2) 丰水期和枯水期 27 盐度锋包络面积差异巨大。丰水期黄河冲淡水几乎影响了整个莱州湾, 27 盐度锋可以到达莱州湾中部, 27 等盐线的表层包络面积为 2 665.61 km², 占莱州湾的 1/4 左右。枯水期低盐度水只有向南扩散的趋势, 27 以下的低盐度水集中分布在黄河口门附近, 27 等盐线的表层包络面积只有 199.65 km²。

3) 黄河冲淡水对 27 等盐线具有重要影响。5 月份, 随着入海径流量增加, 27 等盐线扩散的范围、距离、方向都会发生明显变化。

本文入海径流对黄河口海域盐度影响的研究工作能为黄河入海径流管理及渤海渔业资源保护和管理提供科学依据。黄河口海域附近的盐度条件与黄河口入海径流量的变化情况密切相关, 在近海生物资源对盐度条件有特殊要求的时期, 可以通过减少农业或其他用水户的供水量, 增加入海生态径流量, 为黄河口海域生物资源提供适宜的盐度条件, 促进其生长繁殖。

参考文献 (References):

- [1] 牟冰, 崔廷伟, 秦平, 等. 黄河口海域颗粒有机碳浓度遥感反演与时空分布特征[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 33-43. MU B, CUI T W, QIN P, et al. Remote sensing retrieval and temporal-spatial distribution characteristics of particulate organic carbon concentration in seawater near Yellow River Estuary[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 33-43.
- [2] 翟璐, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 黄河口及其邻近水域夏季鱼类群落空间格局及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2852-2858. ZHAI L, XU B D, JI Y P, et al. Spatial pattern of fish assemblage and the relationship with environmental factors in Yellow River Estuary and its adjacent waters in summer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2852-2858.
- [3] 杨尧尧, 李忠义, 吴强, 等. 莱州湾渔业资源群落结构和多样性的年际变化[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(1): 22-29. YANG Y Y, LI Z Y, WU Q, et al. Interannual variations in community structure and species diversity of fishery resources in the Laizhou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(1): 22-29.
- [4] 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 Y Z, XU C L, ZHANG Z H, et al. Response of fresh water from Yellow River to marine ecological regulation[J]. Yellow River, 2019, 41(8): 68-75.
- [5] 秦雪, 张崇良, 肖欢欢, 等. 黄河口水域春、夏季鱼卵、仔稚鱼种类组成和数量分布[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(7): 46-55. QIN X, ZHANG C L, XIAO H H, et al. Composition and distribution of fish eggs and larvae in Yellow River Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(7): 46-55.
- [6] 刘霜, 张继民, 冷宇. 黄河口及附近海域鱼卵和仔鱼种类组成及分布特征[J]. 海洋通报, 2011, 30(6): 662-667. LIU S, ZHANG J M, LENG Y. Species and distribution characteristics of fish eggs and larvae at the Yellow River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(6): 662-667.
- [7] 张立斌, 杨红生. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望[J]. 生命科学, 2012, 24(9): 1062-1069. ZHANG L B, YANG H S. Advances in principles and techniques of marine habitat restoration and biological resource conservation[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2012, 24(9): 1062-1069.
- [8] 马伟伟, 申友军, 游奎, 等. 渤海油气资源开发对渔业负外部效应研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021(1): 63-70. MA W W, SHEN Y J, YOU K, et al. Studies on negative external effects of oil and natural gas resources exploitation on fishery of Bohai sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021(1): 63-70.
- [9] 李雪童, 王琨, 徐宾铎, 等. 山东近海鱼类群落种类组成与空间结构的周年变化[J]. 水产学报, 2021, 45(4): 552-562. LI X T, WANG K, XU B D, et al. Annual variation of species composition and spatial structure of fish community in Shandong offshore[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(4): 552-562.
- [10] MOON J H, KIM T K, SON Y B, et al. Contribution of low-salinity water to sea surface warming of the East China Sea in the summer of 2016[J]. Progress in Oceanography, 2019(175): 68-80.
- [11] WU H, ZHU J R, CHOI B H. Links between saltwater intrusion and subtidal circulation in the Changjiang Estuary: A model-guided study[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(17): 1891-1905.
- [12] 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.
- [13] 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(Suppl.1): 203-207.
- [14] 张朝晖, 徐丛亮, 洪旭光, 等. 黄河口及邻近海域生态系统管理关键技术研究及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2017. ZHANG C H, XU C L, HONG X G, et al. The research and application of key technologies for ecosystem management in Yellow River Estuary and the adjacent areas[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2017.
- [15] WANG B, HIROSE N K, YUAN D L, et al. Effects of tides on the cross-isobath movement of the low-salinity plume in the western Yellow and East China Seas in winter[J]. Continental Shelf Research, 2017(143): 228-239.
- [16] ZHANG L, JIAY G, LIU X L, et al. A review of the relation between estuary runoff and erosion of estuarine sediment in the Yellow River Mouth region[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(7): 44-50.
- [17] 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 W W, ZONG H B, DING P X. Numerical study of the circulation influenced by runoff input in the Huanghe (Yellow) River Estuary and adjacent waters in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(7): 1-13.
- [18] 姜会超, 王玉珏, 李桂惠, 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 H C, WANG Y Y, LI J H, et al. Annual variation and spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(4): 411-423.
- [19] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual: USA, NOAA Grant No. NA10OAR4170086 [P]. (2011-11-06) [2021-09-15] <https://www.docin.com/p-1926467666.html>.
- [20] YOU Z J, CHEN C. Sediment Dynamics of Chinese Muddy Coasts and Estuaries: Physics, Biology and their Interactions[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [21] 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.
- [22] LIU R, ZHANG X Q, LIANG B C, et al. Numerical study on the influences of hydrodynamic factors on water age in the Liao River Estuary, China[J].

- Journal of Coastal Research, 2017(80): 98-107.
- [23] ZHANG Y, CHEN C S, BEARDSLEY R C, et al. Applications of an unstructured grid surface wave model (FVCOM-SWAVE) to the Arctic Ocean: the interaction between ocean waves and sea ice[J]. *Ocean Modelling*, 2020(145): 1-23.
- [24] CHEN C, BEARDSLEY R, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [25] WU Y, LI Q, LIU Y, et al. Study on dispersion of marine pollutants from islands in the southern section of Bohai Strait[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020(99): 242-249.
- [26] WANG Y, GAO T, NING J, et al. Numerical study of the impacts of typhoon parameters on the storm surge based on Hato storm over the Pearl River Mouth, China[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020(34): 101061.
- [27] 黄学智, 张瑞瑾, 马苡泮, 等. 基于FVCOM的黄渤海潮波运动的数值模拟[J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(5): 617-624. HUANG X Z, ZHANG R J, MA Q F, et al. Numerical simulation of tidal waves in Bohai Sea and Yellow Sea based on FVCOM[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(5): 617-624.
- [28] NOAA National Centers for Environmental Information[DB/OL]. (2011-05-05) [2020-12-09]. https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/data/ice_surface/grid_registered/binary/.
- [29] Department of Atmospheric and Oceanic Science of the University of Maryland [DB/OL]. (2021-01-10) [2021-05-28]. <https://www.atmos.umd.edu/~ocean/>.
- [30] The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts[DB/OL]. (2021-03-22) [2021-07-13]. <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Effect of the Yellow River Runoff into the Sea on the Salinity of the Waters Near the Estuary

WANG Hai-xia^{1,2}, QIN Hua-wei³, QIAO Shou-wen^{1,2}, LI Fan³, SHI Hong-yuan^{1,2}, ZHANG Xu-ri^{1,2}

(1. *School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;*

2. *Centre for Ports and Coastal Disaster Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China;*

3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China*)

Abstract: In order to study the salinity diffusion characteristics of the waters near the estuary under the changing runoff of the Yellow River into the sea and to protect better the diversity of biological resources in the estuary, the offshore hydrodynamic model FVCOM is used to analyze the influence of runoff variations on salinity of the estuary waters based on the long series of runoff data from the Lijin Hydrological Station. The results show that there is a clockwise circulation system between the Yellow River estuary and the Laizhou Bay. Under the function of residual flow and the influence of tidal current directions, the diluted water of the Yellow River diffuses in long term toward the Laizhou Bay. In wet seasons the Yellow River diluted water affects almost the whole Laizhou Bay. The 27 salinity front can reach to the central part of the Laizhou Bay and the surface envelope area of the 27 salinity isohaline can be 2 665.61 km², accounting for about a quarter of the size of the Laizhou Bay. In dry seasons, however, low-salinity water only tends to diffuse southward. The water with salinity lower than 27 is mainly distributed in the area near the Yellow River mouth and the surface envelope area of the 27 salinity isohaline can only be 199.65 km². In May, the range, distance and direction of the 27-salinity line diffusion vary distinctly with the increase in the volume of runoff into the sea. In the situations where there are urgent protection needs for offshore biological resources, appropriately reducing the water supply of other water users to increase the ecological runoff volume into the sea can effectively improve the salinity situation of the waters of the Yellow River Estuary and create good conditions for the growth and reproduction of biological resources.

Key words: the Yellow River Estuary; runoff into the sea; offshore hydrodynamics; salinity simulation; FVCOM

Received: January 13, 2022