

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.013

三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应

张钊汇^{1,2}, 危小艳³, 张蔚^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 英国海洋研究中心, 默西塞德 利物浦 L3 5DA)

摘要: 为探究在人类活动与气候条件改变的影响下, 径潮动力以及水深的改变对河口区域盐水入侵的影响, 建立了三维理想河口盐水入侵数值模型, 分析了纵向环流及盐度的垂向与横向沿程分布, 研究了垂向与横向剪切作用以及潮泵效应引起的纵向盐输运对盐水入侵的影响以及盐分输运过程对径潮动力与水深变化的响应。结果表明: 盐水上溯程度对流量与潮振幅的变化有明显响应, 流量增大与潮振幅增大对盐水入侵均有抑制作用; 在较浅的河口, 潮驱动增大在河口上下游引起相反的潮平均盐度变化趋势, 这与横向、纵向剪切与潮泵效应分别引起的纵向盐输运对径潮水深条件的响应相关。

关键词: 理想河口; 盐水入侵; 剪切输运; 河口环流; 数值模型

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0096-07

Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing

ZHANG Zhaohui^{1,2}, WEI Xiaoyan³, ZHANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. National Oceanography Centre, Liverpool L3 5DA, United Kingdom)

Abstract: In order to explore the response of estuarine salt intrusion to river and tidal forcing as well as water depth under the influence of human activities and climatic changes, a three-dimensional numerical salinity model for three-dimensional ideal estuaries was established. By analyzing the vertical and lateral distributions of longitudinal circulation and salinity, the effects of vertical salt transport induced by the vertical and lateral shear as well as the tidal pumping on saline intrusion, and the response of salt transport to radial tidal dynamics and water depth were studied. The results show that the salt intrusion is sensitive to changes in the river runoff and tidal forcing. In a relatively deep estuary, increasing the runoff or tidal forcing can reduce salt intrusion throughout the estuary. In shallower estuaries, the increase of tidal drive causes the opposite trend of tidal-averaged salinity change in the upstream and downstream of the estuary, which can be explained by the response of longitudinal salt transport to radial tide depth conditions caused by transverse shear, longitudinal shear and tidal pump respectively.

Key words: idealized estuary; salt intrusion; shear dispersion; estuarine circulation; numerical model

河口位于河流和海洋的交汇地带, 来自河流的淡水和来自海洋的盐水在河口发生强烈混合, 从而影响周围的淡水供应和河口生态系统的正常运行。近年来, 随着河口地区经济的发展, 河口地区淡水资源开发程度不断提高, 流域建坝、河道采砂导致的河床下切等人类活动因素以及海平面上升、极端天气等气候变化因素导致河口盐水入侵普遍加剧^[1-5]。面对在全球气候变化背景下日益严重的盐水入侵现象, 明确河口盐度的时空变化特征及盐分输运的物理机制对于保障河口水资源安全以及保护河口生态环境具有重要的理论与实际意义。

基金项目: 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金项目(J202201); 英国自然环境研究委员会 CHAMFER 项目(NE/W004992/1); 英国皇家学会中英交流项目(IEC/NSFC/223066); 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040203)

作者简介: 张钊汇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口水动力研究。E-mail: mrchaoz33@163.com

引用本文: 张钊汇, 危小艳, 张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 96-102.

ZHANG Zhaohui, WEI Xiaoyan, ZHANG Wei. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 96-102.

河口的动力过程是河口盐水、泥沙等物质输运和沉积、地貌演变以及河口生态健康的重要基础^[6]。河口盐水入侵受到径流、潮汐、滩槽地形等多种物理要素的综合作用,在时间和空间维度产生明显的盐度差异。这些盐度差使得河口在水平方向与垂向产生斜压梯度力,从而在河口内形成重力环流^[7]。在强分层河口和部分混合河口,重力环流是主导河口咸潮上溯的主要动力;另外,盐度的时空分布可以通过重力环流、垂向动量掺混对潮汐流、河口环流及其他物质输运产生显著影响^[8]。

河口的环流结构一般呈现三维分布特征。然而,已有的河口研究大多关注纵向的重力环流、潮汐流对咸潮上溯的影响^[9-10],关于横向剪切对盐分输运的影响了解甚少。已有实测数据表明河口水流的横向结构显著影响盐、污染物和悬浮沉积物纵向以及横向的运输^[11-12]。目前,已有学者对河道沉积物从深槽到浅滩的横向运动模式开展了一些研究^[9-17],主要采用的方法是通量分解法^[18-19],但该方法通常基于垂向或水平二维模型,而忽视了横向环流或纵向环流对纵向盐输运的贡献以及二者相互作用对盐输运的影响。人类活动和自然原因引起的径潮驱动以及水深改变会对横向环流、纵向环流以及潮泵效应产生重要影响,这一点还尚未展开系统研究。

本文通过理解河口地区复杂的人类活动与气候变化对河口区域咸潮上溯的影响,研究纵向环流与潮平均盐度的垂向差异与横向差异沿程分布,分析垂向与横向剪切作用以及潮泵效应引起的纵向盐输运、整体咸潮上溯程度对径潮动力与水深的响应,以期为解决河口地区盐水入侵引起的水资源问题提供参考。

1 研究方法

1.1 数值模型

本文采用 Delft3D-Flow 建立三维数值模型计算河口区域的盐水动力时空变化。Delft3D-Flow 基于 Boussinesq 假定和静水压假定,求解不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程^[17]。该模型在水平面上采用正交结构网格,在垂直方向上采用 σ 坐标系。采用 $k-\varepsilon$ 湍流闭合模型和二阶闭合方程求解水流的垂向涡黏系数和垂向扩散系数。模型水平网格分辨率为 400×200 ,垂向为均匀分布的 20 层网格。网格坐标原点设置于河道口门深槽中心点, x 方向为沿程纵向,以涨潮流方向为正; y 方向为横向,口门处的横向坐标最大值为 $\pm1.875\text{ km}$; z 方向(垂向)为沿水深方向。

1.2 模型设置

河口长度为 50 km ,考虑外海边界为振幅 2 m 的 M2 天文分潮,河口的上游来流分别考虑了较小的枯季流量 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 和洪季流量 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 。河口宽度向陆地方向呈指数形式减少:

$$B = B_{\text{m}}\text{e}^{-x/L_{\text{b}}}$$

(1)

式中: B 为河宽; B_{m} 为河口最大宽度; L_{b} 为收敛长度, B_{m} 通过 L_{b} 控制河宽沿程减小程度; x 为沿程方向坐标。

河口水深纵向上沿涨潮流方向递减,在河道中央有较深的河道,两侧浅滩较浅。简化的水深分布为

$$H = H_1 + H_2(x + L_{\text{b}})/(L + L_{\text{b}}) + H_3[1 - (x + L_{\text{b}})/(L + L_{\text{b}})]\text{e}^{-c_{\text{s}}x^2}$$

(2)

式中: C_{s} 为控制侧向水深梯度的系数; L 为河口长度; H_1 为基础水深参数; H_2 为纵向水深梯度参数; H_3 为横向水深梯度参数。

模型最大水深约为 30 m ,最小水深为 6 m ,大于潮振幅,因此无需考虑潮间带的影响。横向边界设置为光滑直立边壁。水平扩散与黏滞系数在河口口门位置最大,沿涨潮流方向递减:

$$k_{\text{h}} = k_0 + C_{\text{h}}\frac{B}{B_{\text{m}}}$$

(3)

式中: k_{h} 为水平扩散与黏滞系数; k_0 为基础扩散系数,取 $0.01\text{ m}^2/\text{s}$; C_{h} 为线性变化参数,取 $0.06\text{ m}^2/\text{s}$ 。

采用较小的水平扩散与黏滞系数,可以忽略水平扩散作用对纵向盐度输运的作用,从而简化了可能对结果造成影响的因素。

1.3 试验分组工况设置

本文考虑的径潮动力参数与河口水深参数见表 1。通过径流量与 M2 天文分潮振幅的不同组合来模

表 1 试验分组工况参数

Table 1 Grouping condition parameters of experiments

试验分组	径流量/ (m^3/s)	潮振幅/ m	最大 水深/ m	最小 水深/ m
Exp default	60	2	30	6
Exp1	600	2	30	6
Exp2	60	4	30	6
Exp3	600	4	30	6
Exp4	60	2	15	6
Exp5	600	2	15	6
Exp6	60	4	15	6
Exp7	600	4	15	6

拟不同的径潮驱动;通过改变 H_1 、 H_2 和 H_3 的大小控制河口最大水深和最小水深。其中前 4 组为默认水深设置,后 4 组为最大水深减半(较浅河口)。模型的水深分布如图 1 所示。

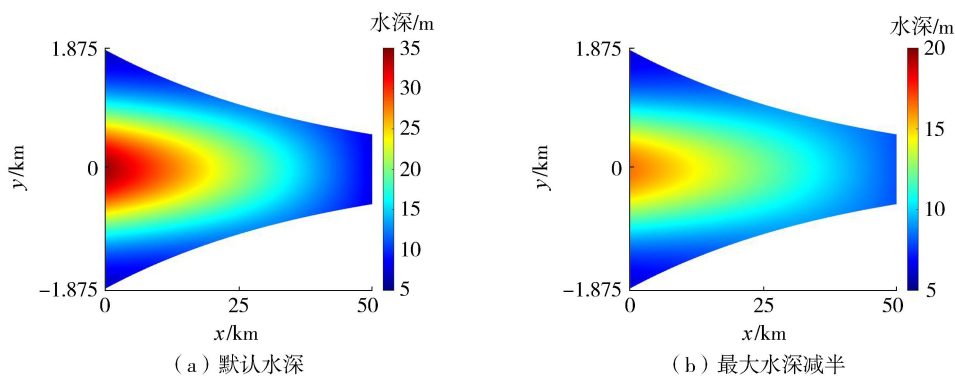


图 1 模型水深分布
Fig.1 Distribution of model water depth

1.4 环流强度参数

为了衡量具有不同边界条件或者水深情况的 8 组模型环流强度的横向分布情况,根据 Burchard 等^[16]提出的纵向环流强度参数描述河道横向不同位置的环流强度。当纵向环流强度参数大于 0 时,表示此时为经典河口环流,即表层余流向海、底层余流向陆。本文通过计算横向环流强度在 $y=0$ 和 $y=2B/3$ 位置的差值来衡量滩槽的余流横向差异。余流的横向差值与潮平均盐度横向差值共同决定横向剪切引起的盐通量。

2 结果与讨论

2.1 潮平均盐度空间分布规律

2.1.1 盐水入侵对径潮驱动的响应

由图 2(a)可知,在默认径潮条件下,潮平均盐度(横截面平均)从口门处的 31 ng/L 缓慢降至河口上游边界处的 25 ng/L。当流量增大至默认流量的 10 倍时,河口盐度显著下降,上游边界处的潮平均盐度仅为 15 ng/L。当口门处的潮振幅增大 1 倍时,河口的潮平均盐度也出现一定的下降,上游边界的盐度为 20 ng/L。当潮振幅和径流同时增大,河口内盐度降至最低(上游边界处潮平均盐度约 12 ng/L)。该结果表明,盐度上溯程度对流量与潮振幅的变化有明显响应,流量增加与潮振幅增大对咸潮上溯均有抑制作用。

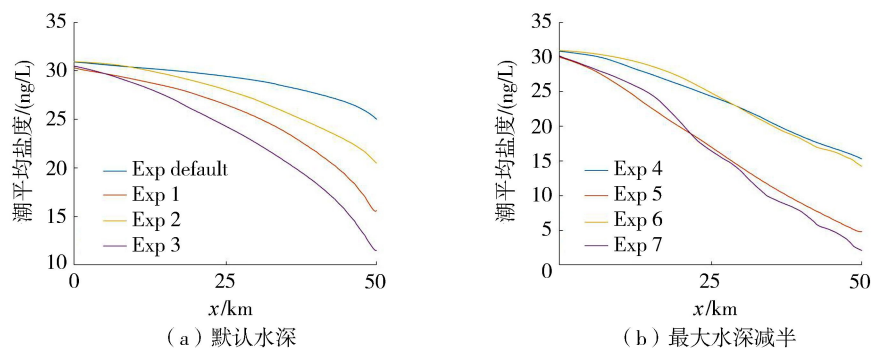


图 2 潮平均盐度的沿程分布
Fig.2 Longitudinal distribution of average salinity

2.1.2 盐水入侵对河床水深的响应

潮振幅对咸潮上溯的影响随着水深减半发生了明显的变化(图 2)。随着河口最大水深减半,盐水入侵对径潮驱动变化的响应也随之改变。如图 2(b)所示,径流量增大使得潮平均盐度发生了最大幅度的减小,上游边界的潮平均盐度降至 2 ng/L。在较浅河口,盐度在河口上下游出现了相反的变化趋势:在河口下游($x<25$ km),潮平均盐度随着潮振幅的增大而增大;在上游,随着潮振幅的增大而减小。这种沿程差异在大流量条件下(Exp5、Exp7)更加显著,这可能是由于在较浅的河口内部存在较大的盐分运输机制的空间差异。

2.2 横截面的潮平均盐度与纵向环流差异

2.2.1 潮平均盐度的垂向差异

对沿程各横截面的表底层潮平均盐度进行宽度平均并相减,得到潮平均盐度垂向差异的沿程分布(图 3)。由图 3 可知,表底层盐度垂向差基本沿涨潮流方向缓慢增大,水体垂向分层在口门附近显著弱于上游位置。

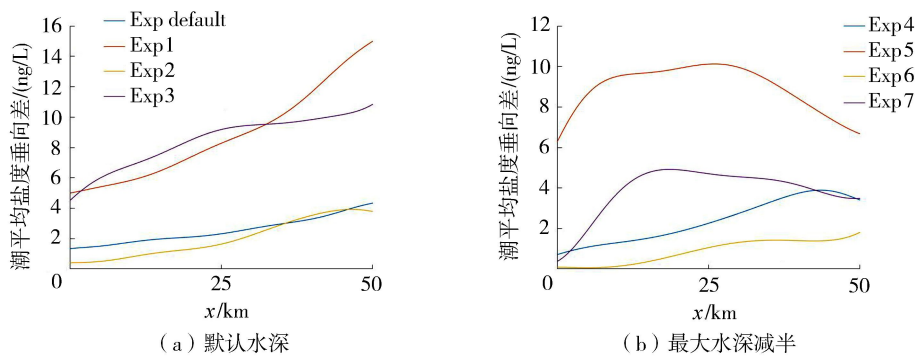


图 3 潮平均盐度垂向差的沿程分布

Fig. 3 Longitudinal distribution of vertical deviation of width-averaged salinity

在默认水深与径潮条件下,潮平均盐度垂向差从口门处的 1.5 ng/L 缓慢增大至河口上游边界处的 4 ng/L。当径流量增大至默认流量的 10 倍时,朝平均盐度垂向差沿程显著增加约 6 ng/L,水体趋向于分层。整体来看,模型结果准确地体现了大流量促进水体分层,强潮动力促进水体混合的规律。大流量时,潮振幅增倍引起口门附近和河口上游区域的盐度垂向差减小,但在河口中游区域($x = 5 \sim 28$ km 附近)出现了盐度垂向差的增大;小流量时,只在极小的区域内出现了盐度垂向差的减小。

当最大水深减半,盐度垂向差对径流量的响应不变,但对潮振幅的响应出现变化。增强潮驱动导致沿程各个断面的盐度垂向差大幅降低,引起了整个河口的盐度掺混增强。

2.2.2 纵向环流强度的垂向差异

对沿程各横截面的纵向环流强度进行横向平均,得到潮平均纵向环流强度的沿程分布(图 4)。上游在默认水深与径潮条件下,沿程纵向环流强度为 0.3 ~ 0.4 m/s。当流量增大至默认流量的 10 倍时,纵向环流强度约增大 1 倍,纵向环流显著增强(Exp1 和 Exp5)。当潮振幅增大 1 倍时,沿程的纵向环流强度约减半,潮驱动下纵向环流强度显著减弱(Exp2 和 Exp6)。当最大水深减半时,纵向环流强度显著减弱。由于存在纵向的水深梯度,水深在口门附近减小幅度沿涨潮流方向减弱,因此口门附近纵向环流强度减弱相较上游区域更加显著。

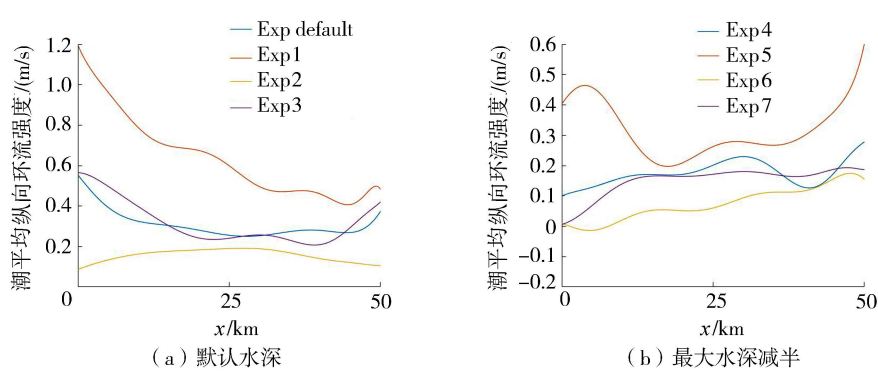


图 4 潮平均纵向环流强度的沿程分布

Fig. 4 Longitudinal distribution of width-averaged longitudinal circulation intensity

通过对比潮平均盐度垂向差和纵向环流强度在不同径流条件下的变化,可以推断出垂向剪切对陆向盐通量的贡献随着径流量增加而增大。在较浅河口,增强潮驱动引起了整个河口区域的盐度分层和纵向环流强度同时减小。因此,垂向剪切对该河口段盐通量的影响也显著减小。然而在较深河口,潮驱动增强对潮平

均盐度垂向差在不同流量下存在不同的影响:小流量情况下,增强潮驱动使得盐度分层和纵向环流强度同时减小,故垂向剪切对该河口盐通量的影响减小;大流量情况下,增强潮驱动使得垂向剪切作用在中上游与下游对盐度垂向差产生相反的影响,因此改变潮驱动对垂向剪切作用引起的陆向盐通量的影响有限。

由图5可知,潮平均盐度横向差沿程均为正值,说明深槽的潮平均盐度高于浅滩。盐度的横向差在8 km附近达到最大,此后沿涨潮流方向递减,在上游边界附近横向盐度差异消失。

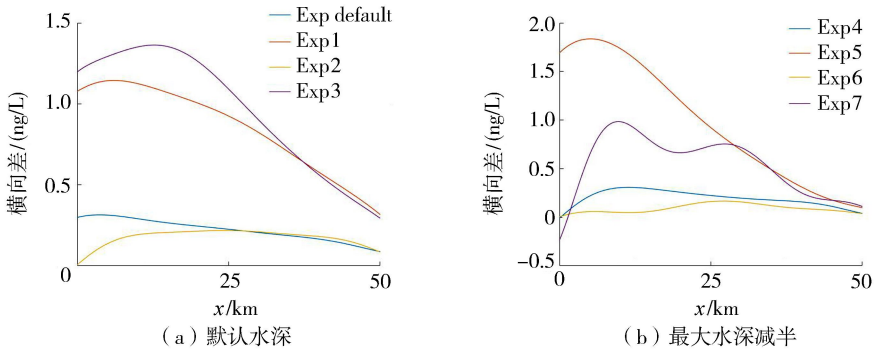


图5 潮平均盐度横向差的沿程分布(y=0与y=2B/3的差值)

Fig. 5 Longitudinal distribution of lateral deviation of width-averaged salinity (difference between $y=0$ and $y=2B/3$)

在默认径潮条件下,潮平均盐度横向差从口门附近0.3 ng/L缓慢降低为零。当流量增大至10倍默认流量时,口门附近的盐度横向差提升至1.2 ng/L。当口门处潮振幅增大至默认潮振幅2倍时,口门附近盐度横向差降低,当径潮动力同时增强,河口盐度横向差达到最大(1.3 ng/L)。

在河口最大水深减半后,小流量条件下的盐度横向差仍然随着潮驱动增强而减小。然而,在大流量条件下,盐度横向差不再随着潮驱动增强而增大,而是在河口中下游区域($x<25$ km)呈现出相反的趋势:盐度横向差随着潮驱动增加而显著降低,这意味着水体横向掺混更加充分。而在中上游区域,潮动力增强引起的盐度横向差的变化非常小。

2.3 纵向环流强度的横向差异

图6为潮平均纵向环流强度横向差沿程分布。差值为正时,表示河道深槽的纵向环流强度大于两侧浅滩,反之亦然。在默认水深与径潮条件下,纵向环流强度横向差沿程为负值,说明此时纵向环流强度在浅滩强于深槽。当潮驱动增强,横向差显著减小,同时潮平均盐度横向差减小。当径流量增大至10倍时,河口中下游区域的纵向环流强度横向差显著增大,但在中上游区域横向差减小(Exp1和Exp3)。无论径流量条件大小,潮驱动增强都显著减弱了纵向环流在潮滩与深槽的横向差异。强径流在中下游区域促进横向差异,在上游区域减小横向差异。据此可以推断,横向剪切作用在高低径流的条件下均产生落潮流方向的盐分输运,且其影响随着潮驱动的增加而减小。

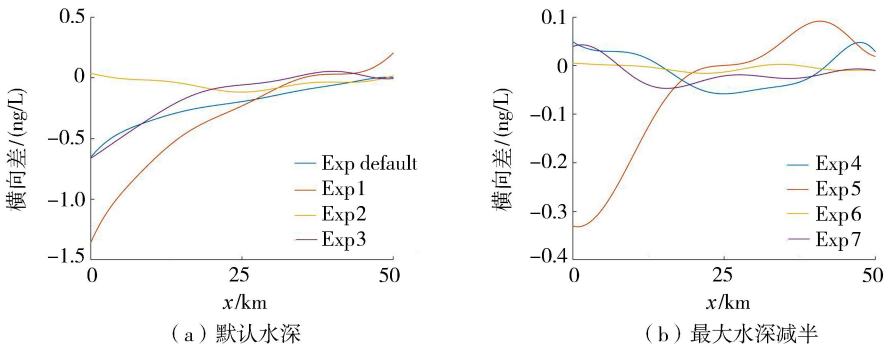


图6 潮平均纵向环流强度横向差的沿程分布(y=0与y=2B/3的差值)

Fig. 6 Longitudinal distribution of lateral deviation of longitudinal circulation intensity (difference between $y=0$ and $y=2B/3$)

河口水深减半情况下,整个河口的纵向环流强度横向差都明显减弱,但是在河口局部区域深槽的环流强度大于浅滩。由于深槽的潮平均盐度普遍高于浅滩,可以推断横向剪切在浅河口局部区域产生了涨潮流方

向的盐分输运。无论径流大小,潮驱动增强都使得纵向环流横向差减小,且使得潮平均盐度横向差也减小,因此横向剪切作用对盐分纵向输运的影响在深浅河口都随着潮动力增强而减小。由于纵向环流强度以及潮平均盐度的横向差异在高径流弱潮驱动时最明显,横向剪切作用在该条件下对纵向盐分输运的影响也达到最大程度。

2.4 潮泵效应

为了评估潮泵效应的重要性随着径潮驱动变化所产生的变化,参考 Wei 等^[11]将该过程对每个断面潮平均盐通量的贡献用潮泵扩散系数来量化。潮泵扩散系数所反映的是纵向流速与盐度的时间相关性所引起的盐分输运,即潮泵效应。由图 7 可知,潮泵扩散项在口门附近较大,并沿涨潮流方向减小,在上游边界附近消失。除口门附近外,在默认径潮与水深条件下的潮泵扩散系数沿程为 0~0.4 m²/s,说明潮泵效应向岸输盐。当径流量增大至 10 倍时,局部区域出现潮泵扩散系数为负值即向海输盐的情况。当潮驱动增大时,在口门与上游区域潮泵扩散系数显著增大,在中游区域潮泵扩散系数对潮驱动响应不明显。

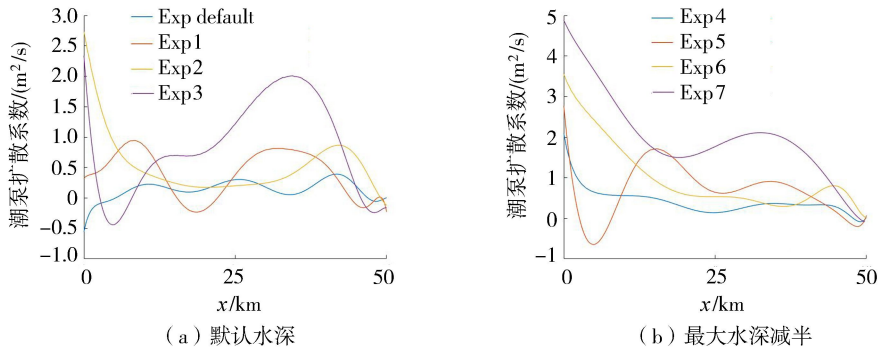


图 7 潮泵扩散系数沿程分布

Fig. 7 Longitudinal distribution of tidal pumping diffusion parameter

较浅河口的潮泵系数整体高于较深河口,当潮驱动增大时,各位置的潮泵扩散系数均有增大。由此可以推断,潮泵效应引起的向岸输盐随着潮驱动增大而增大。该变化趋势在河道口门与上游区域最明显,在中游区域响应不明显。在强径流驱动条件下,潮泵效应引起的输盐方向在中下游区域局部向海。在强径流的条件下加强潮驱动使得下游区域的潮泵效应从向海输盐转变成向陆输盐,在中上游潮泵效应产生的向陆输运也明显增强。

3 结 论

- a. 盐水入侵对流量与潮振幅的变化有明显响应。在较深河口,径流驱动与潮驱动增强均对咸潮上溯有抑制作用;在较浅河口,潮驱动增倍在河口上下游引起相反的潮平均盐度变化趋势:河口下游盐度随着潮驱动的增大而增大,河口上游盐度随着潮驱动的增大而减小。
- b. 垂向剪切对陆向盐分输运的贡献随着径流量增大而增大。垂向剪切对潮驱动变化的响应与河口水深密切相关:在较浅河口,增强潮驱动使得垂向剪切作用引起的盐输运减小;在较深河口,潮驱动增强对潮平均盐度垂向差在不同流量下存在不同的影响。在低径流情况下,增强潮驱动使得垂向剪切引起的盐分输运明显减小;在强径流情况下,垂向剪切对潮驱动响应相对不明显。
- c. 不论径流高低,横向剪切作用在深河口均产生落潮流方向的盐分输运,且其对纵向盐分输运的贡献随径流增大而增大,随着潮动力增强而减小。当水深变浅时,横向剪切作用在河口下游或者上游产生向陆输盐,该作用仍然随着径流增强而增大、随着潮驱动增强而减小。
- d. 在低径流情况下潮泵效应对盐分的输送基本沿涨潮流方向,且随着潮驱动的增加而明显增强。在强径流时,河口局部区域出现潮泵扩散系数为负值即向海输盐的情况。潮泵效应在河口下游随潮驱动增大而减小,而在中上游随着潮驱动增加而明显增加。该变化在浅河口更加显著。
- e. 当浅河口潮驱动增大,潮泵效应的增强是下游区域的咸潮上溯增强的主要原因;而垂向剪切与横向剪切产生的向陆输盐的减小是河口上游区域咸潮上溯受到抑制的主要原因。

参考文献:

[1] DU J, SHEN J, ZHANG Y J, et al. Tidal response to sea-level rise in different types of estuaries: the importance of length, bathymetry, and geometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 227-235.

[2] 刘洋. 全球气候变化对长三角河口海岸地区社会经济影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

[3] 孙清, 张玉淑, 胡恩和, 等. 海平面上升对长江三角洲地区的影响评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 1997(1): 59-65. (SUN Qing, ZHANG Yushu, HU Enhe, et al. Impact evaluation of sea level rise on Yangtze River Delta[J]. *Resources and Environment in Yangtze River Basin*, 1997(1): 59-65. (in Chinese))

[4] 苏爱平, 吕行行, 吴宇帆. 南水北调工程对长江口盐水入侵和淡水资源的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2020(3): 32-42. (SU Aiping, LYU Xingxing, WU Yufan. Impact of South-to-North Water Diversion Project on saltwater intrusion and freshwater resources in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science Edition)*, 2020(3): 32-42. (in Chinese))

[5] 李林江, 朱建荣. 长江口南汇边滩围垦工程对流场和盐水入侵的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015(4): 77-86. (LI Linjiang, ZHU Jianrong. Influence of Nanhui Beach Reclamation Project on flow field and saltwater intrusion at the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science Edition)*, 2015(4): 77-86. (in Chinese))

[6] PRITCHARD D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. *Journal of Marine Research* 1952, 11(2): 106-123.

[7] 童朝锋, 李磊, 孟艳秋, 等. 磨刀门水道枯季大潮水体层化混合分析[J]. *水利水运工程学报*, 2018(1): 48-57. (TONG Chaofeng, LI Lei, MENG Yanqiu, et al. Stratification and mixing analysis of large tide water body in dry season of Modaomen waterway[J]. *Journal of Water Resources and Water Transport Engineering*, 2018(1): 48-57. (in Chinese))

[8] 浦洋. 长江河口重力环流、潮汐应变、混合与层化[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[9] GEYER R, ROWBRIDGE H, BOWEN M. The dynamics of a partially mixed estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(8): 2035-2048.

[10] GEYER R. The estuarine circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2014, 46(1): 175-197.

[11] WEI Xiaoyan, SCHRAMKOWSKI G P, SCHUTTELAARS H M. Salt dynamics in well-mixed estuaries: importance of advection by tides[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46: 1457-1475.

[12] WEI Xiaoyan, KUMAR M, SCHUTTELAARS H M. Three-dimensional salt dynamics in well-mixed estuaries: influence of estuarine convergence, coriolis, and bathymetry[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47: 1843-1871.

[13] HUGHES F W, RATTRAY M. Salt flux and mixing in the Columbia River Estuary[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1980, 10(5): 479-493.

[14] PETERS H. Observations of stratified turbulent mixing in an estuary: neap-to-spring variations during high river flow[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1997, 45(1): 69-88.

[15] LERCZAK J A, GEYER R. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34: 1410-1428.

[16] BURCHARD H, SCHULZ E, SCHUTTELAARS H M. Impact of estuarine convergence on residual circulation in tidally energetic estuaries and inlets[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 913-919.

[17] LERCZAK J A, GEYER W R, CHANT R J. Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36: 2296-2311.

[18] 严以新, 高进, 郑金海, 等. 长江口南港泥沙运动水动力条件[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(5): 1-6. (YAN Yixin, GAO Jin, ZHENG Jinhai, et al. Hydrodynamic conditions of sediment movement in Nangang at the mouth of the Yangtze River[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2002, 30(5): 1-6. (in Chinese))

[19] DYER K R. The salt balance in stratified estuaries[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2(3): 273-281.

(收稿日期: 2023 - 10 - 11 编辑: 刘晓艳)