

一个理想河口中拦门沙的存在对河口羽流扩展的影响*

吴文森¹ 张昊丹² 刘嘉欢² 龚文平^{1,3}

(1. 中山大学海洋科学学院 广东珠海 519082; 2. 广东省海洋发展规划研究中心 广东广州 510060; 3. 广东省海洋资源与近海工程重点实验室 广东珠海 519082)

摘要 河口羽流是河口冲淡水在陆架中扩展的主要形式,其扩展受到诸多动力与地形因素的影响,口门拦门沙就是其中之一。以一个理想化的河口为例,采用区域海洋模型(regional ocean modelling system, ROMS),研究口门拦门沙对河口羽流扩展的影响,具体包括拦门沙对羽流的出流状态、扩展范围以及远场区沿岸流淡水输运的影响。研究结果表明,拦门沙增加了口门处的水体分层,减小了羽流出流速度,增大了羽流凸出体的半径,减小了远场区沿岸流宽度,并进而减少了沿岸流中的淡水输送。本项研究对地形因素对河口羽流的扩展研究以及陆源物质的向海输运等均具有重要意义。

关键词 河口羽流; 拦门沙; ROMS 海洋模式

中图分类号 P731.2 doi: 10.11693/hyhz20230800162

河口羽流(river plume)指河流淡水进入海洋后在近岸区域形成的盐度较低的水体。羽流对近海的物理、化学和生物等过程都有重要的影响。羽流从河口向外海扩展,其扩展方向和强度直接影响着陆架环流过程。羽流携带的大量陆源物质向海输送,决定了淡水、营养盐和陆源沉积物的输运范围和分布状况。羽流带来浮力与动量,可增强羽流区的水体分层与流速的垂向剪切,影响水体的垂向混合过程。河流淡水与海水交界的羽状锋区为辐聚带,显著影响了物质的空间分布,进而影响水中的生物、化学过程,这使得羽状锋区常与海洋高生产力区和污染物聚集区相联系(胡方西等, 1995; Li *et al.*, 2016; 徐家婧等, 2021)。可见,研究河口羽流的动力过程对于近海动力学、生态学以及环境科学等领域都具有重要的科学意义,因而也成为了近几十年来的热点。

羽流的扩展可分为四个动力区段(Horner-Devine *et al.*, 2015):

源区: 河流紧贴河床底部向海运动;
近场区: 河流离开河床底部开始抬升, 水体进入超临界状态, 与下层海盆水体发生摩擦和混合, 动量平

衡主要由压强梯度力、惯性力和摩擦力决定; 中场区: 水体进入次临界状态, 跨岸方向的扩展停止, 运动由压强梯度、科氏力和离心力的平衡控制, 风应力也起较大作用, 运动发生明显转向, 形成顺时针涡旋, 以一定角度流向岸边; 远场区: 羽流流向岸边后沿开尔文波下游方向运动, 其运动主要受到地球自转、浮力、风应力的控制, 有时也受到底摩擦的影响。经历以上的动力过程, 羽流最终表现出两个显著的特征(Isobe, 2005): 在河口前形成一个反气旋涡, 即向海突出的凸出体(bulge); 在开尔文波下游方向形成沿岸流(coastal current)。

拦门沙是河口区典型的地貌单元。在海陆的动力消能带, 海陆动力交汇, 径流动力沿程减弱, 加之河口环流、波浪作用等的影响, 泥沙沉降淤积, 形成拦门沙。拦门沙减小了河口口门附近的水深, 改变了断面形态与面积, 对海陆的动力进行重新分配, 影响着口门处的流场和盐度场。这种影响必然作用于羽流扩展的各个方面。虽然前人已经对羽流的动力过程进行了大量研究, 但是关于拦门沙对羽流扩展影响的研

* 国家自然科学基金项目, NSFC42276169 号。吴文森, E-mail: 1966056561@qq.com

通信作者: 龚文平, 教授, E-mail: gongwp@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-03, 收修改稿日期: 2023-09-27

究还较少。

为了更好地理解拦门沙对羽流扩展的影响,本研究设计了理想化的有拦门沙与无拦门沙的地形,采用区域海洋模型(regional ocean modelling system, ROMS)进行数值模拟。本文试图阐明以下问题:(1) 拦门沙的存在如何影响河口冲淡水在口门处的水体分层、出流流速及流态;(2) 拦门沙如何影响河口羽流凸出体的范围及其与下游沿岸流的夹角;(3) 拦门沙如何影响远场沿岸流的水流特征及淡水输运通量。对上述问题的回答有助于加深对地形与河口羽流相互作用的理解,并为河口资源管理与近岸环境保护提供科学依据。

1 研究方法 with 模型设置

本次研究使用的水动力模型为三维斜压的 ROMS 模型。ROMS 模型是一种基于自由表面的描述原始海洋动量与物质输运方程的模型。该模型基于垂向静压近似和 Boussinesq 近似,采用有限差分格式近似求解雷诺平均的 Navier-Stokes 原始方程。ROMS 模型在水平方向上采用的是 Arakawa C 正交曲线网格,在垂向上则采用的是可随地形变化及自由表面可伸缩的 S 坐标。

ROMS 模型具有较好的用户自由度,在网格、垂直混合参数化、海气相互作用等多个方面提供了多种不同的可选方案,使得模型更好地满足用户需求。目前 ROMS 模型已被广泛应用于海洋尤其是近海及河口等地区的海洋水动力和环境模拟中。

本研究中,模型区域采用一个包含河口-大陆架的系统,大小为 $500 \text{ km} \times 350 \text{ km}$,如图 1a 和图 2a 所示。模型区域包含 2 个部分,分别是河口和大陆架。为了研究拦门沙对河口羽状流扩展的影响,我们设

置了无拦门沙和有拦门沙情况下的地形。

模型的原点位于河口口门的中间。以正东方向为 x 方向,正北方向为 y 方向,竖直向上为 z 方向,建立三维正交坐标系。为了方便理解,我们仅在此使用坐标轴的名称(x 、 y 、 z),在后文中均采用方位(东、南、西、北)。

有无拦门沙情况下的地形设置如下:

我们通过以下公式,在原点附近建立一个向南逐渐放宽和加深的口门:

$$H(x, y) = H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot 0.1 \cdot \frac{|x|}{L_x} \cdot \frac{y}{L_y} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{y}{L_y}\right) \cdot e^{C_f \left(\frac{4x^2}{L_x^2}\right)} \quad (1)$$

口门区域的最小深度 $H_{\min} = 2 \text{ m}$,由于我们给定的潮差较小,这一最小水深的设置可保证低潮时拦门沙仍被水所淹没;最大深度 $H_{\max} = 15 \text{ m}$; L_x 和 L_y 分别是东西方向的宽度和南北方向上河口宽度的收敛系数,分别设为 5 和 10 km; C_f 是潮坪参数,设置为 4 (Wei *et al.*, 2016)。

口门以北是长度为 140 km、口门宽度为 3 km 的河口段,深度以 $1/10\,000$ 的斜率向北线性递减;口门以南是大陆架,大陆架以 $1/10\,000$ 的斜率向南线性加深至口门外约 150 km 处,之后变为平坦的陆架。大陆架的深度在东西方向保持均一。在二个部分间的连接处,地形做了一定的平滑处理。为了使边界条件不对模拟产生显著的影响,及更好地研究羽流在下游(相对于开尔文波,下同)形成的沿岸流,我们将模型区域的西边界设置在口门以西 300 km,将模型域的东边界设置在口门以东 200 km。得到的无拦门沙时的地形如图 1 所示。

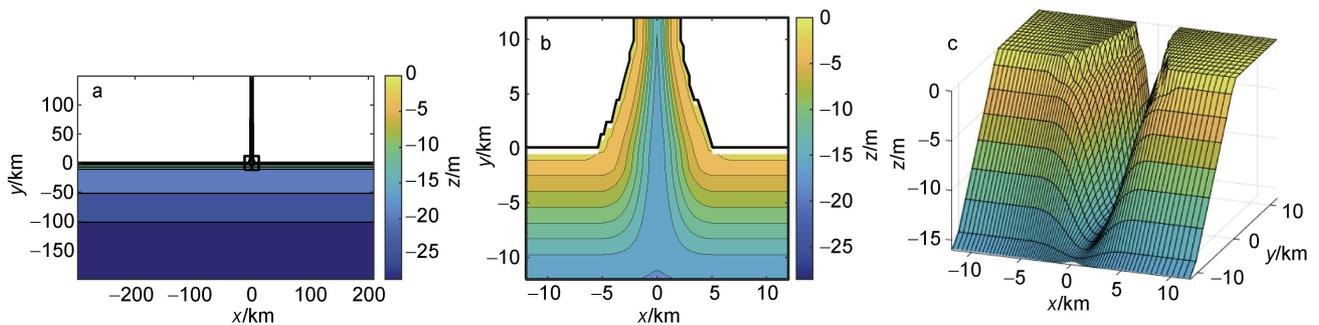


图 1 无拦门沙时的模型区域等深线(a)、口门等深线(b)和口门地形(c)

Fig.1 The model domain and bathymetry (a), bathymetry near the estuary mouth (b) and 3D topography near the estuary mouth (c) without river mouth bar

注: x 轴指向正东, y 轴指向正北, z 轴竖直向上

对于有拦门沙的地形, 我们将拦门沙理想化为一个规则的堆集体, 各个水平截面均为椭圆形, 截面积随着水深呈指数增加。将其中心设置在口门区内, 设定

2 m 为最小水深, 与口门区的最小水深 H_{\min} 相同, 最终得到有拦门沙时的地形如图 2。上述理想地形的设置已在河口盐水入侵的研究中得以应用(Gong *et al.*, 2022)。

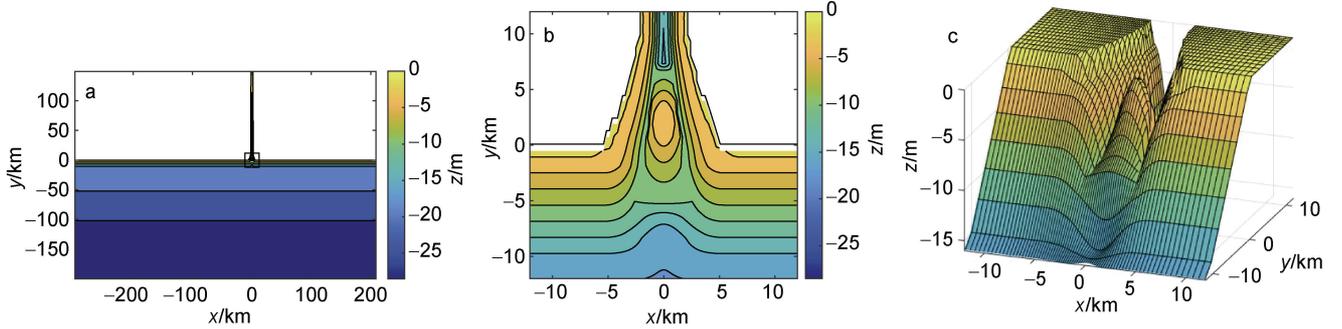


图 2 有拦门沙时的模型区域等深线(a)、口门等深线(b)和口门地形(c)

Fig.2 The model domain and bathymetry (a), bathymetry near the estuary mouth (b) and 3D topography near the estuary mouth (c) with river mouth bar
注: x 轴指向正东, y 轴指向正北, z 轴竖直向上

模型区域在水平方向上分割为 346 (东西方向)×190 (南北方向)个单元网格。水平方向分辨率在口门区域达到最大, 向边界逐渐减小。在口门, 东西向的分辨率为 0.2 km, 南北向的分辨率为 0.3 km; 在外海边界, 东西向的分辨率大致为 3 km, 南北向的分辨率大致为 6 km。在垂直方向上分为 15 层, 采用 S 坐标, 与垂向分层相关的参数 θ_s 、 θ_b 和 h_c 系数分别设置为 2.5、3.0 和 5.0, 使得在表面边界和底边界有较高的分辨率, 在口门附近的垂向分辨率达到 0.1 m。

模型开始时, 整个研究区盐度(34)与温度(20 °C)均一, 水体处于静止状态。模拟过程中, 各边界上的盐度和温度分别为 34 和 20 °C 保持不变, 与初始条件相同, 并应用辐射拉伸型(RadNud)开放边界条件。

将河口北部边界的网格设置为河流入流的点源以模拟径流输入。根据各网格的深度, 将 5 000 m³/s 的总流量加权分配至各网格, 并保持这一流量不随时间变化。该流量与枯季时的珠江口流量近似。为了使温度不对密度异常产生贡献, 河流的温度被设置为与初始场相同的 20 °C。河流的盐度被设置为 0。

为了模拟潮汐条件, 我们设定一自东向西传播的开尔文波。波动的周期 T 与 M_2 分潮相同, 为 12.42 h; 振幅 A 的大小取为 0.5 m。各个边界的自由表面高程 ζ 由公式(2)给出:

$$\zeta = Ae^{\frac{f}{c}y} \sin\left(\sigma t + \frac{\sigma}{c}x\right), \quad (2)$$

其中, x 和 y 是水平坐标, σ 是波动的圆频率, f 是科氏

参数, 取值为 5.47×10^{-5} , 系采用纬度为 22°时的条件所得, 波速 c 的计算公式为

$$c = \sqrt{gh}, \quad (3)$$

在此, 我们将 c 取为定值 9.9 m/s, 为利用岸线附近的水深所给出。

用 u 、 v 表示向东方向和向北方向的流速, 边界上的垂向平均流速 \bar{u} 和 \bar{v} 由以下公式给出(Chen, 2014):

$$\bar{u} = \zeta \sqrt{\frac{g}{h}} e^{\frac{y}{L_R}}, \quad (4)$$

$$\bar{v} = 0, \quad (5)$$

其中, h 是水深, L_R 是正压变形罗斯贝半径, 计算公式如下:

$$L_R = \frac{\sqrt{gh}}{f}. \quad (6)$$

本研究将 L_R 取为定值 180 km, 由岸线附近的水深计算所得。在模型的开边界条件上, 我们对自由表面高程应用 Chapman 条件, 对边界法向速度的深度平均应用 Flather 条件。在这样的设置下, 正压扰动以开尔文波的形式沿海岸由东向西传播, 驱动与海岸平行的潮流, 使模型区域内的水位与流速产生周期性波动。

模型在以上条件下开始运行, 外模和内模的时间步长分别为 2 s 和 20 s, 模型时间为 60 d (约 114 个 M_2 潮周期)。在结果中, 我们所作的分析均为潮平均下的结果。

2 结果与分析

2.1 拦门沙对羽流出流速度、羽流厚度和羽流盐度的影响

由于模型的河流流量较大,模型运行 15 d 后,整个模型区域的水流与盐度分布已趋于均衡状态。在此,我们选取第 19 d 的数据作为代表,对羽流的出流速度、厚度和盐度进行对比。

口门附近 40 km 范围内纵向剖面上的流速和盐

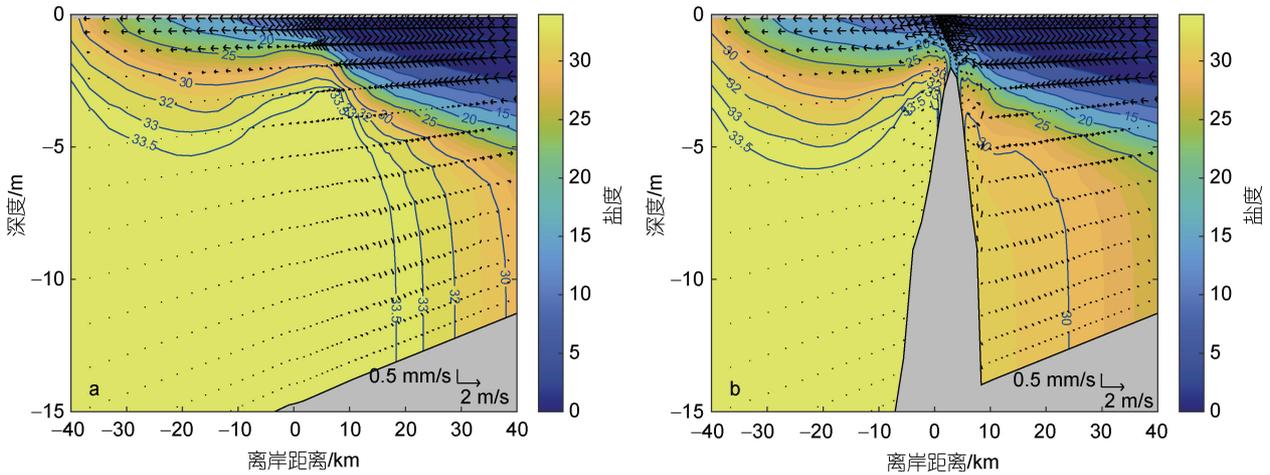


图 3 第 19 d 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时的口门南北向剖面上的流场和盐度等值线

Fig.3 The longitudinal profiles of salinity and current on Day 19 without (a) or with (b) river mouth bar

为了表征水体的分层情况,我们计算了沿程的盐度分层系数 k 、梯度理查森数 Ri 和弗劳德数 Fr , 盐度分层系数和理查森数由公式(7)~(8)得到:

$$k = \frac{S_b - S_s}{S_a}, \quad (7)$$

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}. \quad (8)$$

其中, S_s 和 S_b 分别是表层和底层盐度, g 是重力加速度。由于全程均表现出了较强的盐度分层(盐度分层系数 > 0.01), 在计算弗劳德数时, 我们将水体视作以盐度(密度)跃层为界的双层流动。计算公式如下 (Gong *et al.*, 2022):

$$Fr = \frac{v_1^2}{g_0' h_1} + \frac{v_2^2}{g_0' h_2} \quad (9)$$

其中, v_1 、 v_2 分别为上下层水体的平均流速, h_1 、 h_2 分别为上下层水体的厚度, g_0' 为约化重力加速度, 通过公式(10)得到:

度分布如图 3 所示。根据盐度等值线的疏密程度, 我们将 33.5 的盐度等值线作为羽流边界, 以确定羽流范围。通过流矢量可以看出, 两种情况下羽流的出流速度差异不显著, 而盐度等值线分布具有较大差异。拦门沙减小了陆架高盐水向口门内的入侵, 降低了口门内及口门附近的平均盐度, 并使得盐度等值线在口门外的深度增加。拦门沙降低了河口出水体的盐度, 增大了羽流厚度(以盐度跃层为界, 其上层的水层厚度)。

$$g_0' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0} \quad (10)$$

其中, ρ_1 、 ρ_2 分别为上下层水体的平均密度, ρ_0 为海水密度。计算结果如图 4 所示。

盐度分层系数在两种情况下均表现出向海逐渐减小的趋势。相比之下, 在有拦门沙时, 全程的盐度分层系数较大, 并且在口门内 4 km 处出现了一个峰值。无拦门沙时, 从陆向海平均盐度的增加使得分层系数不断减小; 平顺的口门地形使表底层盐度的变化趋势稳定, 从而分层系数的变化过程较为平滑。而有拦门沙时, 地形抑制了盐水入侵, 平均盐度降低, 这导致了全程分层系数的增加。同时, 盐度等值线被地形隔断, 拦门沙两侧底层盐度和平均盐度发生剧烈变化: 口门内 9 km 处至口门内 4 km 处, 水深迅速向海减小导致平均盐度的迅速降低, 而底层盐度变化不大, 从而分层系数升高; 口门内 4 km 处至口门处, 底层盐度迅速减小, 从而分层系数向海减小。

理查森数在两种情况下均表现出向海先减小再增大的变化趋势。有拦门沙时, 理查森数在口门附近

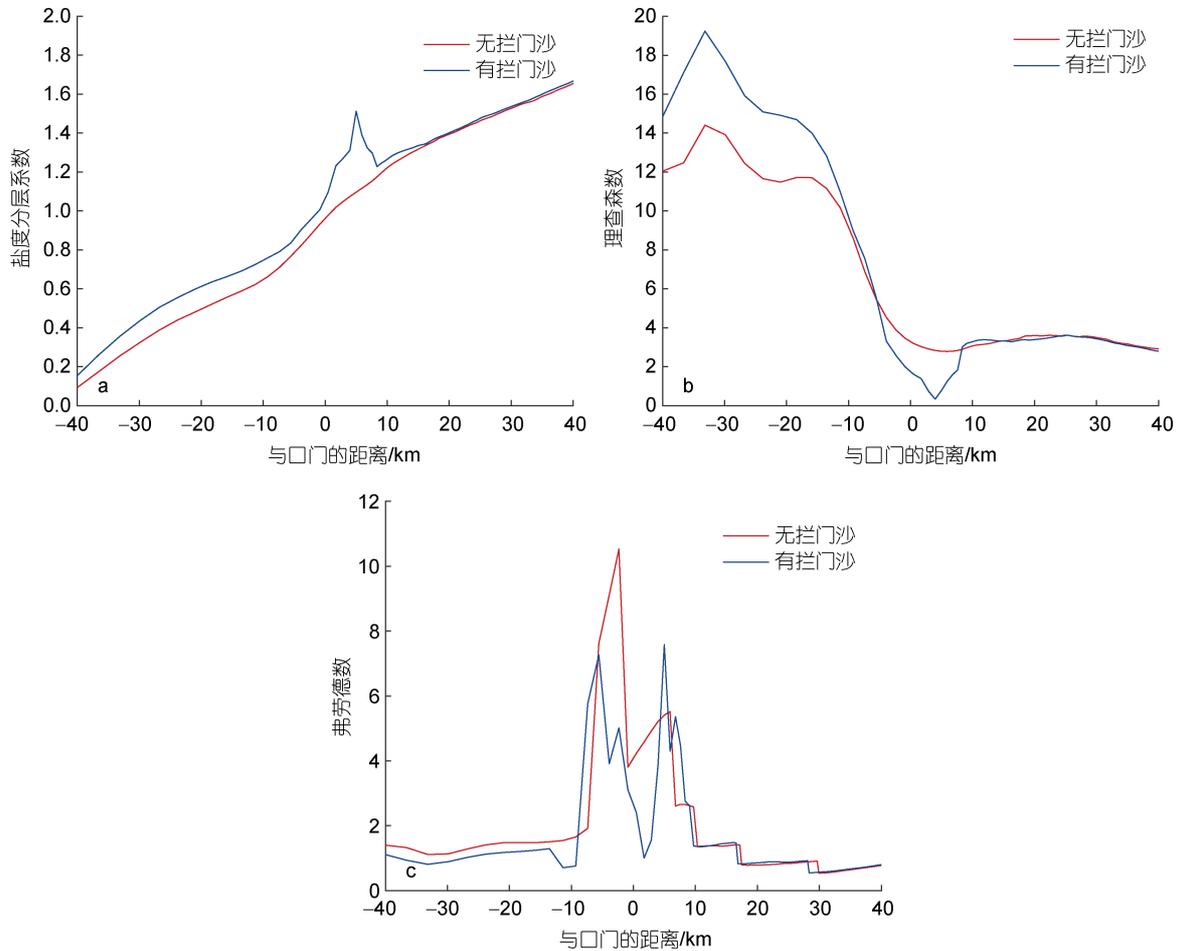


图 4 沿程的盐度分层系数(a)、理查森数(b)和弗劳德数(c)

Fig.4 The longitudinal distribution of salinity stratification (a), the Richardson number (b), and the Froude number (c)

明显减小, 说明在深度迅速减小的过程中, 水体的稳定性明显降低。

弗劳德数在两种情况下均表现出在口门附近较高、其余位置较低的特点。口门附近的水流呈现为超临界状态, 符合羽流从源区至近场区再至中场区的次临界-超临界-次临界的过程。相比之下, 拦门沙减小了拦门沙滩顶以及向海一侧的弗劳德数, 增大了拦门沙向陆一侧的弗劳德数, 使其形成了更明显的双峰特点。事实上, 两种情况下, 在口门内的 70~80 km, 冲淡水均已经离开河床底部开始抬升(即 lift off), 随后弗劳德数不断增大。有拦门沙时, 弗劳德数在口门附近明显下降的具体表现是: 上层水体受到拦门沙的阻挡流速减小, 以及流速等值线倾斜程度增加, 盐度跃层深度迅速增大。

可见, 拦门沙增强了全程的盐度分层, 尤其是口门附近的盐度分层, 也明显增大了口门附近的流速剪切; 对应着口门处弗劳德数的减小, 拦门沙也明显

削弱了水流惯性项的作用。

从图 3 中可以看出, 拦门沙的向陆一侧存在明显的水体垂向运动, 以拦门沙滩顶向陆 5~6 km 处最为强烈, 并且水体垂向运动的方向在该处发生了突变。我们给出了口门处及口门向内 5、6 和 10 km 处的四个最具代表性的纵剖面(图 5~8), 以研究两种情况下横向环流的特征, 结果如表 1 所示。

无拦门沙时, 各断面水体的垂向运动几乎始终保持着相同的特点。有拦门沙时, 水体的垂向运动被明显地分为了四个区段以及它们中间的过渡区段, 可以推测地形的引导是垂向环流发生变化的主要成因: 口门附近, 水体垂向运动复杂, 主要表现为两侧通道外侧强烈的下降流、两侧通道内侧强烈的上升流、拦门沙顶部微弱的上升流和拦门沙顶两侧强烈的下降流, 底层水体的运动方向基本与地形方向相同;

口门内 3~5 km, 由于该处水深由海向陆迅速增加, 向陆运动的水体产生了明显的下降流动; 口门内

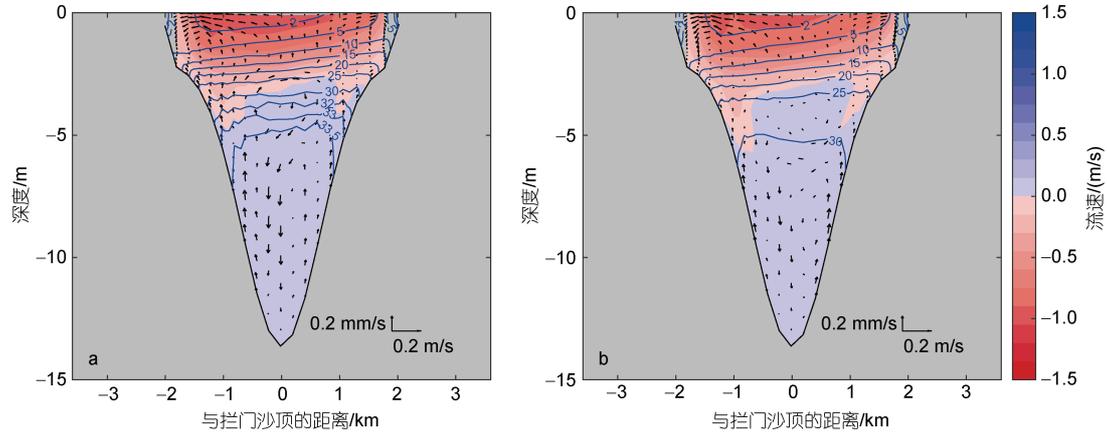


图 5 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时口门内 10 km 处东西向剖面的流场和盐度等值线

Fig.5 The lateral distribution of current and salinity on the cross-section 10 km upstream of the estuary mouth without (a) or with (b) a river mouth bar

注: 红色表示向海速度, 蓝色表示向陆速度

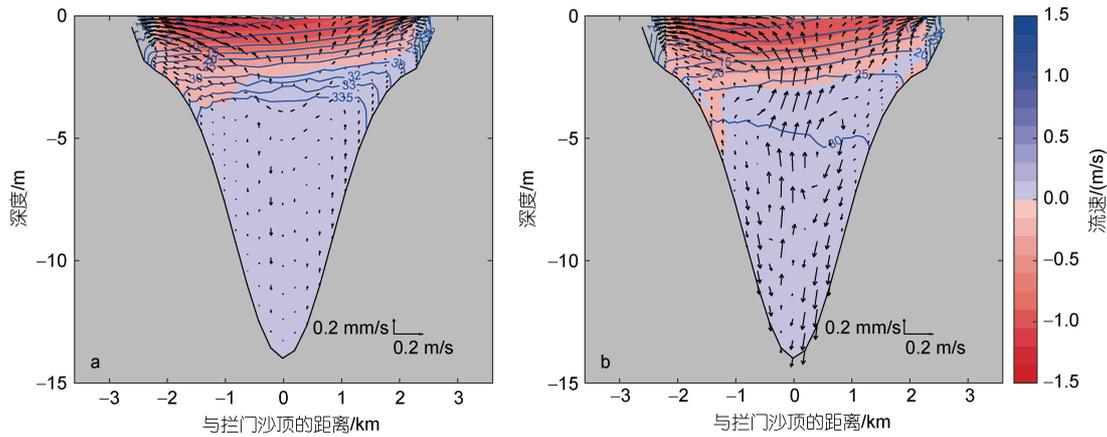


图 6 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时口门内 6 km 处东西向剖面的流场和盐度等值线

Fig.6 The lateral distribution of current and salinity on the cross-section 6 km upstream of the estuary mouth without (a) or with (b) a river mouth bar

注: 红色表示向海速度, 蓝色表示向陆速度

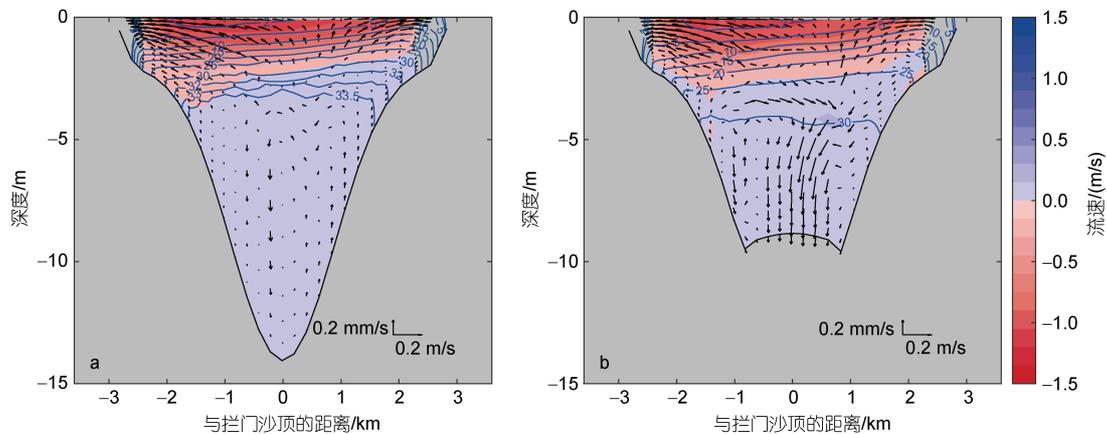


图 7 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时口门内 5 km 处东西向剖面的流场和盐度等值线

Fig.7 The lateral distribution of current and salinity on the cross-section 5 km upstream of the estuary mouth without (a) or with (b) a river mouth bar

注: 红色表示向海速度, 蓝色表示向陆速度

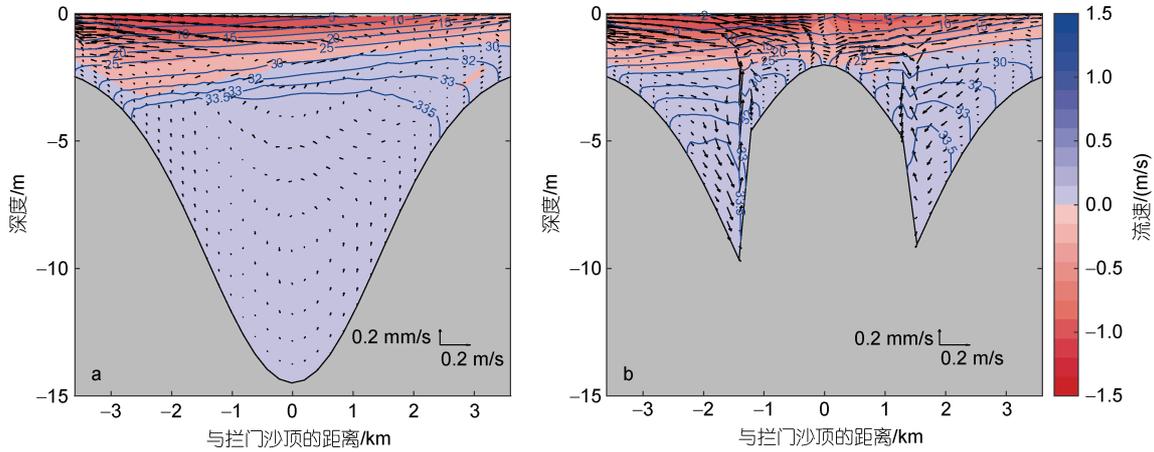


图 8 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时口门处东西向剖面的流场和盐度等值线

Fig. 8 The lateral distribution of current and salinity on the cross-section at the estuary mouth without (a) or with (b) a river mouth bar
注: 红色表示向海速度, 蓝色表示向陆速度

表 1 有无拦门沙情况下的横向环流对比

Tab.1 Comparison of the lateral circulation with or without the mouth bar

	无拦门沙	有拦门沙
口门-口门内 2 km	垂向运动不明显	复杂的垂向运动
口门内 3 km~口门内 5 km	中间下降流, 两侧上升流	中间下降流, 两侧下降流
口门内 6 km~口门内 7 km	中间下降流, 两侧上升流	中间上升流, 两侧下降流
口门内 8 km~口门内 30 km	中间下降流, 两侧上升流	中间下降流, 两侧上升流

6~7 km, 此时还未到达拦门沙背海一侧的最大深度, 两侧依然保持下降流, 而中间水体则向上运动; 口门内 8~30 km, 由于水深向陆不断减小, 两侧水体上升, 为了补偿质量损失, 中间的水体向下运动。强烈的下降流促进了表层淡水的向下输送, 使盐度等值线下沉并加深。

在水平方向上, 口门在无拦门沙时, 在科氏力的影响下, 大部分上层水体(向海流的水层)具有向西的速度分量, 上层水体的厚度具有明显的西厚东薄的特点。在有拦门沙时, 口门在水下被分为了东西两个通道。上层海水被拦门沙的顶部分成了两部分, 向海方向的流速具有中间小、两侧大的特点, 且两侧的水体分别具有向西和向东的速度分量。可见, 拦门沙虽然对上层水体的向海流速未产生明显影响, 但是对横向水流产生明显的影响, 具体表现为减弱了西向流动, 增强了东向流动。

计算表明, 无拦门沙时, 出流面积约为 $17\,771\text{ m}^2$, 盐度为 17.8, 出流冲淡水具有 0.413 m/s 的向海速度, 以及约 0.070 m/s 的西向速度, 合成速度约为 0.419 m/s ,

与海岸的夹角为 80.4° ; 在有拦门沙时, 出流面积约为 $17\,685\text{ m}^2$, 盐度为 13.7, 出流水体具有 0.374 m/s 的向海速度, 以及约 0.027 m/s 的西向速度, 合成速度约为 0.375 m/s , 与海岸的夹角为 85.9° 。表明拦门沙降低了出流的流速, 对流动具有阻挡作用; 拦门沙改变了流动的方向, 使出流更向东偏。

综上, 拦门沙降低了出流水体的向海速度, 并通过阻挡高盐水入侵和促进垂向混合的方式降低了口门及口内的盐度, 使羽流在出流时表现为具有较低的盐度和较大的厚度, 从而降低了出流冲淡水的惯性。

2.2 拦门沙对羽流凸出体的向海伸突距离及其与下游沿岸流夹角的影响

为直观地对比拦门沙对羽流凸出体的范围和其与下游沿岸流的夹角的差异, 我们给出了两种地形条件下第 13、19、25 d 的水体表层的羽流范围, 如图 9 所示。随着时间的推移, 两种条件下的羽流凸出体边界所表现出的差异逐渐增大。总体上表现为, 拦门沙的存在增加了羽流凸出体向上游的扩展范围, 增大了羽流凸出体的面积, 但对凸出体离岸方向的扩展距离改变不明显, 并减小了与下游沿岸流的夹角。

根据 2.1 节中所计算的弗劳德数, 羽流在离开口门时, 水体处于超临界态, 为羽流的近场区, 而在中场区的动量平衡为风梯度平衡(wind-gradient)。本节我们分别分析拦门沙如何影响凸出体向上游扩展、向离岸方向的扩展及其与沿岸流的夹角。

为了理解羽流在离开口门后的流动过程, 我们给出了两种情况下第 19 d 表层的流速等值线(图 10)和海表高度(图 11)。

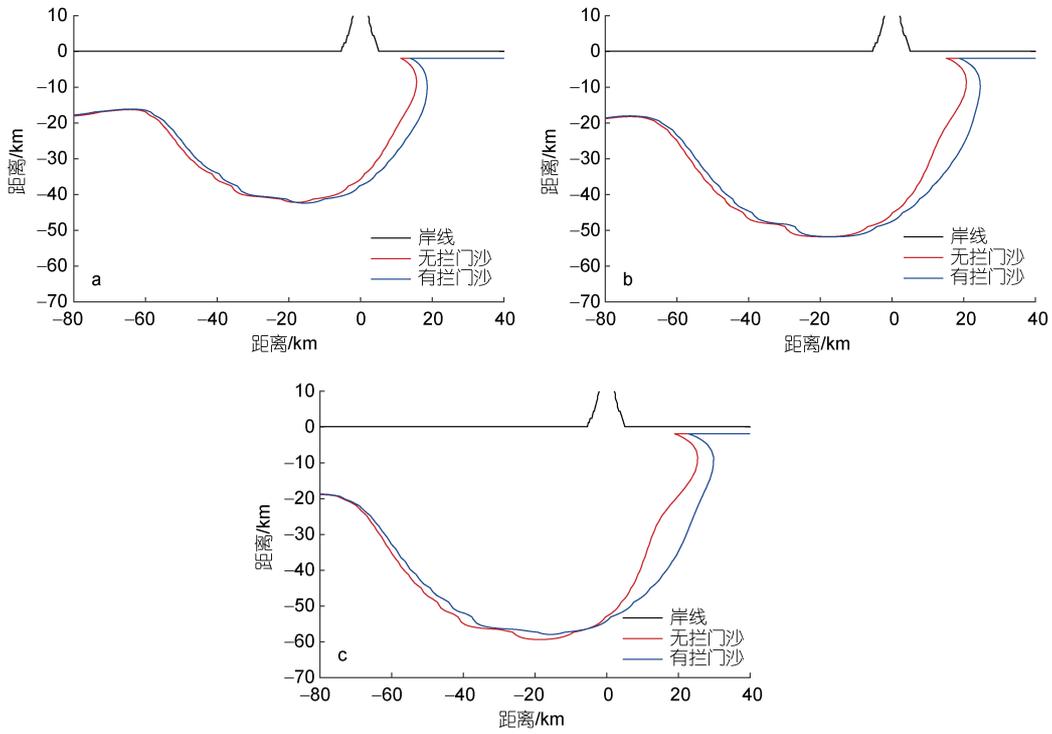


图 9 第 13 d(a)、19 d (b)、25 d (c)的羽流凸出体范围

Fig.9 The distribution of the boundary of the plume bulge on Day 13 (a), 19 (b), and 25 (c), respectively

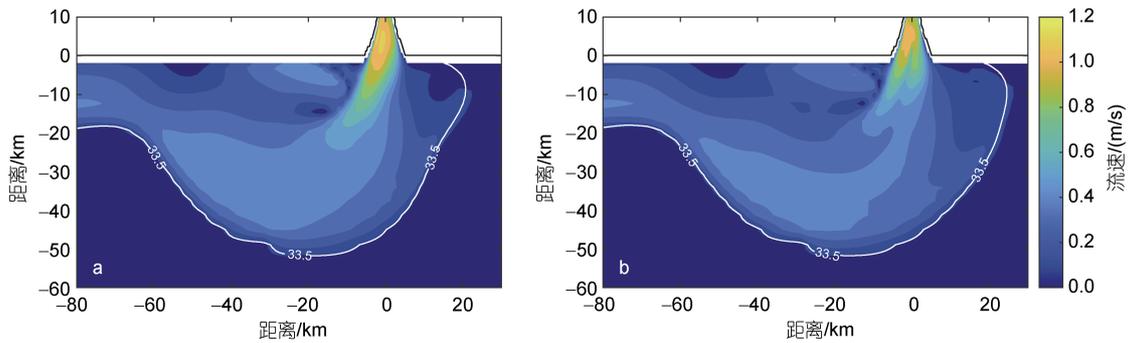


图 10 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时第 19 d 的表层流速

Fig.10 The distribution of the surface current without (a) or with (b) river mouth bar

The white line represents the outer boundary of the plume

注: 白色等值线为羽流边界, 余同

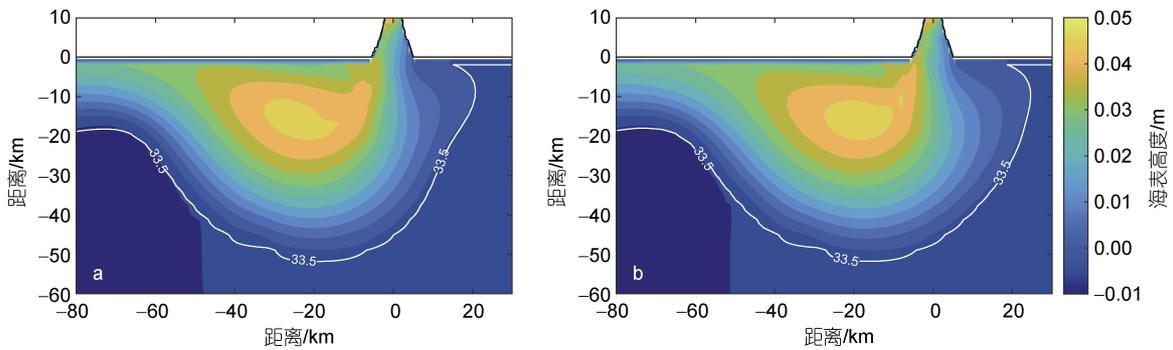


图 11 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时第 19 d 的海表高度

Fig.11 The distribution of the water level without (a) or with (b) river mouth bar

通过流速等值线, 我们可以看到, 拦门沙减小了羽流的表层流速, 也减小了羽流离开口门时向下游的偏转角, 这与 2.1 节中的结果是一致的; 拦门沙还改变了出流流速的分布, 拦门沙两侧较大, 中间较小。这一特点保持到了口门外的 30 km 左右。同时, 我们也注意到, 拦门沙增大了羽流在口门东侧的流速。离岸 4 km 处是最大东向流速所在的位置, 我们给出了该处的东向流速(图 12), 可以看到, 拦门沙使凸出体在口门东侧的东向流速明显地增大了。有拦门沙时, 东向流速在东侧方向大约 13~20 km 处增大。

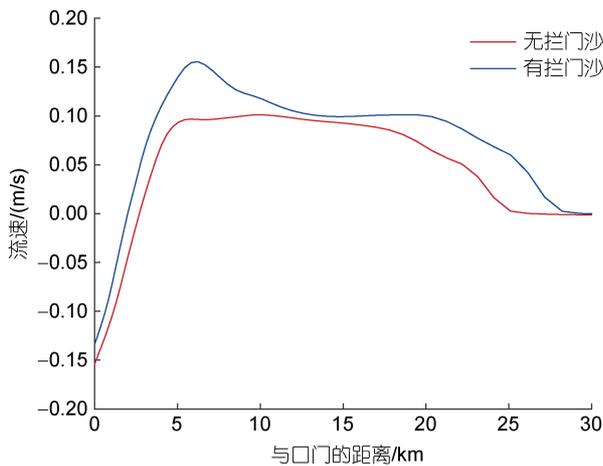


图 12 第 19 d 两种情况下口门东侧的最大东向流速

Fig.12 The distribution of the maximum eastward current at the cross-shore section east of the estuary mouth

水流的变化影响体积的输送, 导致海表高度的变化。从海表高度的分布可以看到, 拦门沙增大了羽流东侧的海表高度, 增加了羽流向上游(开尔文波传

播的反方向)的体积输送。同时, 拦门沙导致海表高度等值线的变化, 使其更加向上游倾斜(图 11)。

我们计算了在口门东侧离岸 10 km 与近岸的海表高度差和盐度差, 表明拦门沙增大了凸出体东侧的海表盐度差, 也增大了海表高度梯度, 从而有利于羽流的东向扩展。

根据 2.1 节中所计算的弗劳德数, 羽流在口门处仍处于近场区, 离开口门后发生一段距离的跨岸方向输运。结合 2.1 节中的分析结果, 我们认为, 拦门沙主要通过以下三个过程增强了羽流向上游的扩展: (1) 拦门沙改变了出流时的方向, 使得出流冲淡水的运动方向向东侧偏移; (2) 拦门沙的存在减小了拦门沙顶出流的流速, 但增大了口门处东槽的出流速度, 从而增大了羽流东侧的射流, 减小了该处的盐度; (3) 拦门沙所导致的海表高度变化促进了羽流东侧水体向岸和向东侧的扩展。

在中场区, 羽流的运动是由压强梯度力、科氏力和离心力主控的风梯度运动。我们给出了第 19 d 羽流凸出体的表层流场, 并通过表层的流向和流速大小确定了羽流凸出体的运动中心, 如图 13 所示。无拦门沙时的凸出体中心大致位于坐标(-16.8, -14.5)处, 与口门的距离为 22.2 km, 与口门的连线和岸线的夹角为 40.8°, 半径为 36.5 km; 有拦门沙时的凸出体中心大致位于(-13.4, -12.3)处, 与口门的距离为 18.2 km, 与口门的连线和岸线的夹角为 42.5°, 半径为 38.7 km。可见, 拦门沙使凸出体的运动中心向上游、向岸移动, 这与较小的出流速度和偏上游的出流方向是相吻合的。

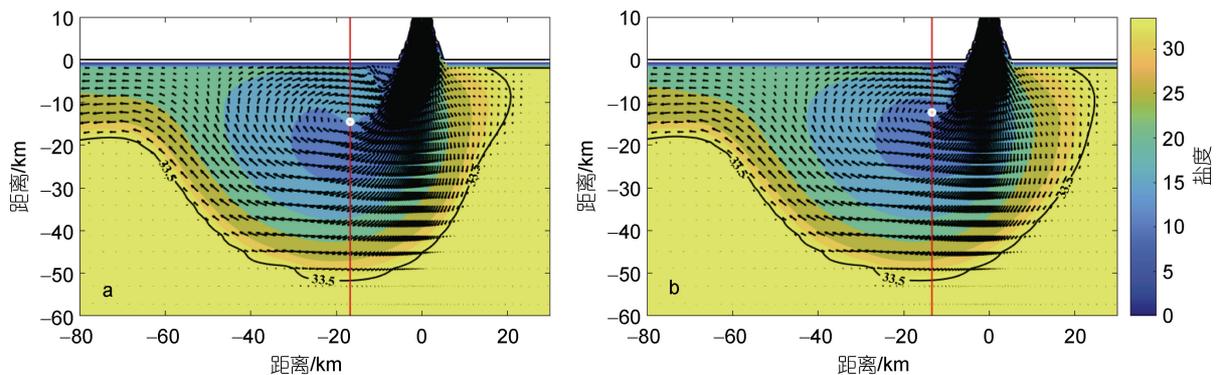


图 13 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时第 19 d 表层盐度场、流场、羽流边界(黑色实线)和凸出体中心(白色圆点)

Fig.13 The surface salinity, current, plume boundary, and the center of the bulge without (a) or with (b) river mouth bar

Yankovsky 等(1997)曾提出一种仅通过羽流出流条件估算其向海扩展范围的方法。该研究中, 羽流被

理想为一个具有恒定半径 r_s 的反气旋环流, 并有一个离开口门外向开尔文波下游方向移动的狭窄沿岸流。

对于与底部没有接触的表面平流(surface-advected)型羽流,其在凸出体的运动能够利用以下的动量方程描述:

$$-\frac{\hat{v}^2}{r} - f\hat{v} = g' \frac{\partial d}{\partial r}, \quad (11)$$

g' 是约化重力加速度, \hat{v} 是水流垂直于直径方向的速度, d 是羽流厚度, r 是距离旋转中心的径向距离。假设羽流不与底部相互作用,那么其厚度从边缘至凸出体的中心大致是线性变化的,可以近似将羽流厚度的径向变化表示为

$$\frac{\partial d}{\partial r} = -\frac{h_0}{r_s}, \quad (12)$$

h_0 是口门出流处羽流的厚度。将(12)代入(11)可以解得

$$r_s = -\frac{g'h_0 + \hat{v}_s^2}{f\hat{v}_s}, \quad (13)$$

下标 s 表示羽流的边界。为计算 \hat{v}_s , 又考虑了伯努利函数:

$$B = g'd + \frac{\hat{v}^2}{2}, \quad (14)$$

其在流线上是常数。将羽流的外缘视作一条与河口出流相连接的流线,在这两处 B 的值相等,有

$$\frac{v_{\text{inflow}}^2}{2} + g'h_0 = \frac{\hat{v}_s^2}{2}, \quad (15)$$

v_{inflow} 是出流流速。解出

$$\hat{v}_s = \sqrt{2g'h_0 + v_{\text{inflow}}^2}, \quad (16)$$

最终将 v_{inflow} 后代回得到:

$$r_s = \frac{3g'h_0 + v_{\text{inflow}}^2}{f\sqrt{2g'h_0 + v_{\text{inflow}}^2}}. \quad (17)$$

我们假定本研究中的羽流是以恒定宽度(与口门宽度相同)出流的,以此计算出流水体的厚度,最终得到无拦门沙与有拦门沙的 r_s 分别为 15.41 km 和

16.52 km, 比值为 0.933。而实际观察所得到的二者运动半径之比为 0.943, 与理论值十分接近。可见,拦门沙所导致的盐度(密度)变化(即增大了约化重力)在改变羽流凸出体的半径中占据了主导地位,增大了凸出体的半径。

拦门沙增大了凸出体的半径,并使凸出体的中心向口门移动,最终对羽流凸出体在离岸方向的扩展距离没有造成明显的影响。同时,半径的增大也使凸出体以较小的角度进入到下游的沿岸流中。

2.3 拦门沙对远场区沿岸流的流幅宽度及密度梯度的影响

有无拦门沙两种情况下,第 19 d 的表层流场和羽流边界如图 14 所示。从图中可以看到沿岸流的特点:在沿岸方向上,沿岸流的流速没有明显的变化;在离岸方向上具有明显的速度梯度,流速先增大后减小;流幅宽度在离开凸出体后的短暂距离内先增加达到最大值,之后缓慢减小,基本保持不变;沿岸流宽度和前进距离均随着时间而增加。无拦门沙时沿岸流的前沿(leading edge)比有拦门沙时的沿岸流前沿略微偏西。

本研究中,我们对第 7~19 d 的沿岸流进行分析,得到了两种情况下的沿岸流宽度随时间的变化趋势,表明沿岸流的流幅宽度大致以 0.6~1.0 km/d 的速度增加,增加速度随时间逐渐变缓。有拦门沙时的流幅宽度总是小于无拦门沙时的流幅宽度,差值基本在 0.5 km 以内。

图 15 是第 19 时距离口门 80 km 处的剖面(图 14 中的红色实线所在剖面)。两种情况下,沿岸流的结构是非常相似的,主要的差别体现为有拦门沙时沿岸流的宽度略小及近岸处的盐度略低。由于凸出体沿岸流的结构与凸出体本身的结构直接相关,我们给出了两种情况下凸出体中心所在的南北向断面(图 13 的红色实线)的垂向结构,如图 16 所示。

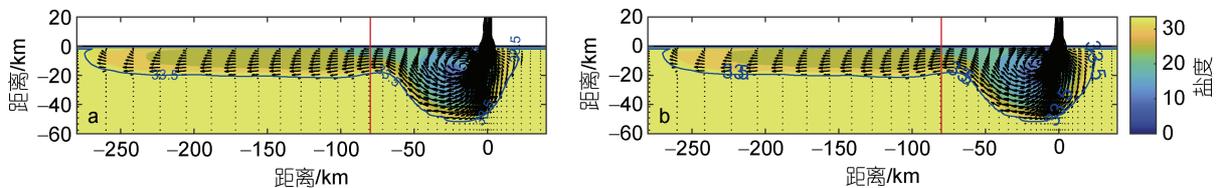


图 14 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时第 19 d 的表层流场、盐度场和羽流范围

Fig.14 The surface current, salinity and extent of the river plume without (a) and with (b) the river mouth bar

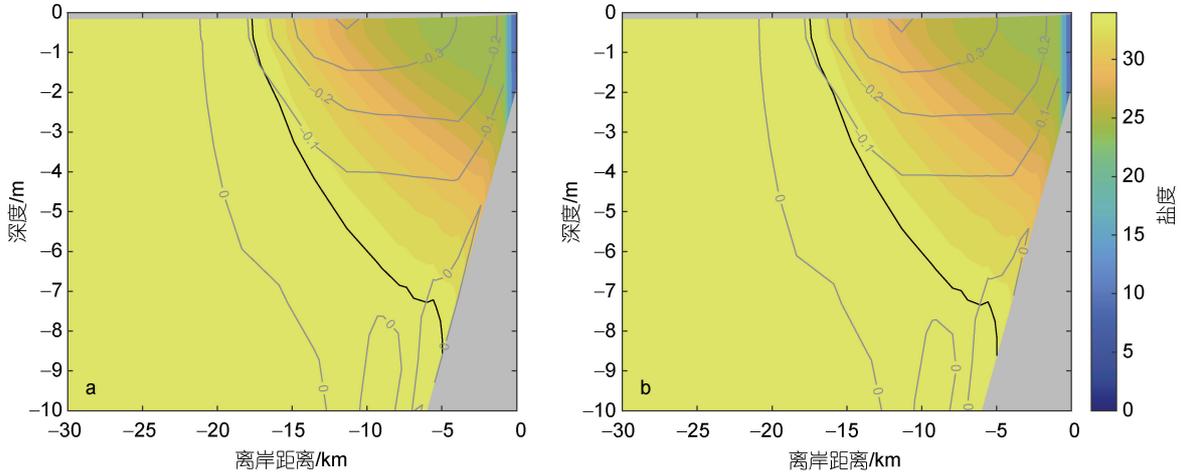


图 15 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时口门以西 80 km 处南北向剖面的沿岸流结构

Fig. 15 The N-S cross-shore profiles of salinity and longshore current at the cross-section 80 km downstream of the estuary mouth without (a) or with (b) river mouth bar

注: 等值线为流速(m/s), 向西为负

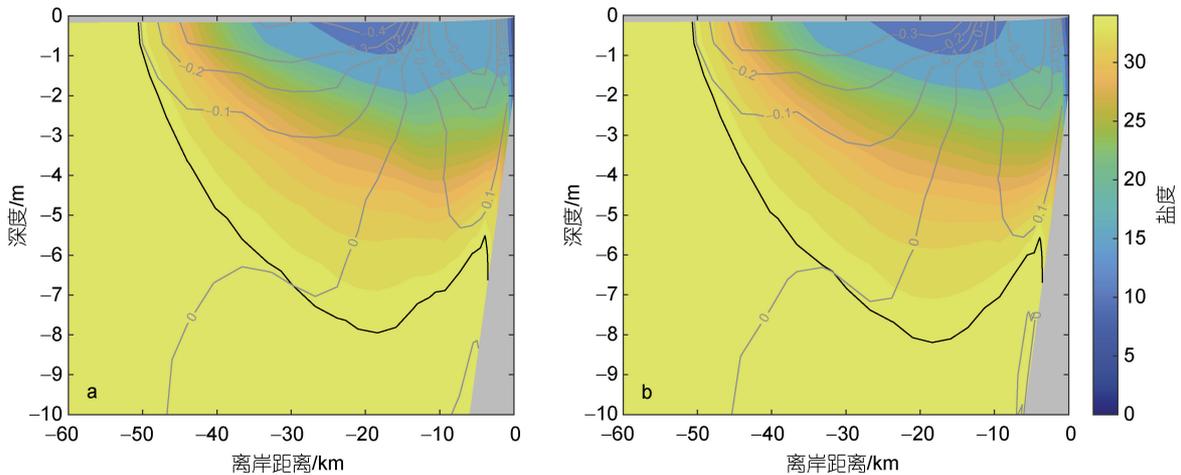


图 16 无拦门沙(a)和有拦门沙(b)时第 19 d 的凸出体中心所在南北向断面垂向结构

Fig. 16 The cross-shore profiles of salinity and longshore current at the center of the bulge without (a) or with (b) river mouth bar

注: 等值线为流速(m/s), 向西为负

从图 15 和图 16 可见, 相似的沿岸流结构与相似的凸出体结构吻合, 而宽度的差异也与羽流凸出体表层流速的分布相对应。拦门沙显著地降低了羽流凸出体内侧的流速, 同时增大了凸出体的外侧流速, 使得流速的分布在径向上更平均, 这与羽流在口门出流时的流速分布相对应。根据风梯度关系, 这一流速的变化使得内侧的低盐水更容易被凸出体捕获, 同时又促进了外侧的高盐水向沿岸流的输送。

从图 13 的表层流场反映的羽流从中场区进入远场区的过程来看, 两种情况下, 在口门以西 50~60 km 处, 羽流凸出体的流动逐渐分为了进入沿岸流和回流进入凸出体两部分, 这个过程在口门以西 50~60 km

处的近岸形成了一个流速很小的区域(图 10)。拦门沙增大了这个区域的范围, 说明在有拦门沙时, 羽流在进入远场区之前, 汇入沿岸流的部分与被凸出体捕获的部分具有更明显的分离, 这与流速分布的特点相吻合。

2.4 拦门沙对羽流凸出体捕获的淡水量及下游沿岸流淡水输运通量的影响

我们先简要说明淡水输运量的计算方法。

在一个面积为 A 、盐度和流速分布均匀的面元上, 各点的盐度为 S , 垂直于面元方向的流速为 u , 则该面元的水体流量为

$$Q_{\text{total}} = uA. \quad (18)$$

面元内的淡水比例

$$k = \frac{S_0 - S}{S_0}, \quad (19)$$

S_0 为面元的初始盐度。则面元的淡水流量为

$$Q_f = kQ_{\text{total}} = \frac{S_0 - S}{S_0} uA. \quad (20)$$

对于盐度和流速在空间上分布不均匀的断面, 则将上式对面元进行积分, 即

$$Q_f = \int \frac{S_0 - S}{S_0} u dA. \quad (21)$$

本研究选定断面的淡水输运量可以写作以下等式:

$$Q_f \approx \sum_i Q_{fi} = \sum_i \frac{S_0 - S_i}{S_0} u_i A_i, \quad (22)$$

其中, A_i 是第 i 个网格的截面积, S_i 和 u_i 分别是第 i 个网格处的盐度和垂直于断面方向的流速。

我们依然选取口门下游 80 km 的断面, 计算了第 20 d 前的淡水输送量, 如图 17 所示。在这段时间内, 无拦门沙时有与有拦门沙时的淡水输送量的比例基本保持在 $92\% \pm 1\%$ 。拦门沙降低了沿岸流的淡水输运量。前文中提到, 拦门沙促进了淡水向口门上游的扩展, 也促进了凸出体中心对淡水的捕集, 从而降低了向下游的输运通量, 这与本节的结果是一致的。

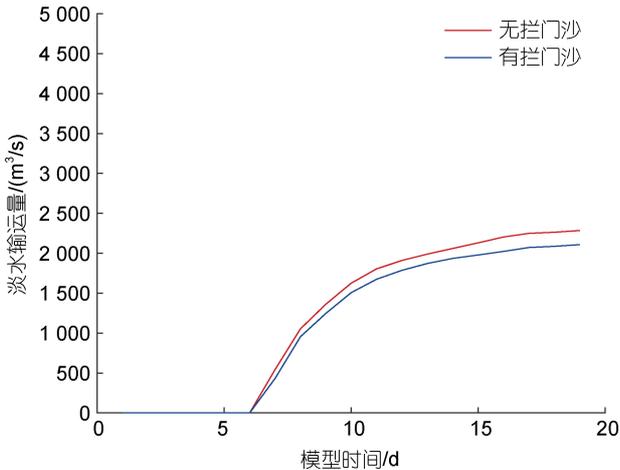


图 17 沿岸淡水输运量

Fig.17 The timeseries of freshwater transport rate at the cross-section 80 km downstream of the estuary mouth

3 讨论与结论

本研究中, 我们以磨刀门河口为原型, 建立了有拦门沙和无拦门沙时的河口-大陆架系统的理想地形, 利用 ROMS 海洋模式, 研究了在恒定径流($5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)

和振幅为 0.5 m 的开尔文波的条件下, 拦门沙对羽流扩展的影响, 结果如表 2 所示。

表 2 拦门沙对羽流扩展的影响汇总
Tab.2 Summary on the impact of the mouth bar on the spreading of river plume

	出流速度	出流厚度	出流盐度	凸出体半径	沿岸流宽度	沿岸流密度梯度	沿岸流淡水输运
无拦门沙	↗	↘	↘	↘	↗	-	↗
有拦门沙	↘	↗	↗	↗	↘	-	↘

注: “↗”与“↘”分别表示羽流特征的较大与较小者,“-”表示没有明显差异

根据 Fong 等(2002)的研究, 凸出体的形状和沿岸的淡水输运量与冲淡水的罗斯贝数 Ro 关系紧密。罗斯贝数通过公式(23)得到:

$$Ro = \frac{v_{\text{inflow}}}{fD} \quad (23)$$

v_{inflow} 为出流速度, D 为口门宽度。罗斯贝数的作用表现为: 具有较小罗斯贝数的冲淡水出流将使凸出体更接近半圆, 使凸出体中心离海岸更近, 进而被凸出体捕获的流量更小, 最终下游的沿岸淡水输送更强。

本研究中, 我们将口门的最大宽度作为 D , 若使用口门断面上的平均流速作为 v_{inflow} , 得到无拦门沙和有拦门沙时罗斯贝数分别为 0.77 和 0.69; 若使用口门断面上的最大流速作为 v_{inflow} , 得到无拦门沙和有拦门沙时罗斯贝数分别为 2.03 和 1.93。可以推断: 拦门沙略微减小了羽流出流的罗斯贝数。从本研究的结果上看, 有拦门沙时的凸出体更接近半圆, 凸出体中心离岸的距离更小, 与上述结论相符; 而沿岸流的淡水输运量表现出了与上述结论相反的情况。

在 Fong 等(2002)的研究中, 河流的源被设置在河口, 出流方向为垂直于岸线, 且速度均一; 本研究中, 河流的源被设置在口门内, 这使得水体在口门处出流速度分布不均, 且具有沿岸方向的速度。无拦门沙和有拦门沙时的出流水体所具有的沿岸速度分别为 0.070 和 0.027 m/s, 达到了开尔文波在沿岸方向速度的约 $\frac{1}{6}$ 和 $\frac{1}{15}$ 。沿岸速度的差异使凸出体的位置发生了明显的偏移和旋转, 这必然影响凸出体的离岸尺度, 进而影响凸出体中心对淡水的捕获; 同时, 出流流速的水平分布具有明显的差异, 这种差异直接影响了羽流凸出体在径向上的流速分布, 进而改变

了凸出体中的水体被捕集和进入沿岸流的相互对比。这表明,除了出流的罗斯贝数,沿岸流速和流速的水平分布都可能对沿岸流的淡水输运量起到重要作用。

对于拦门沙导致羽流凸出体向上游偏移的现象,我们认为出流方向和流速的改变所导致的海表高度变化是主要原因。Matano 等(2010)曾研究过底部平流(bottom-trapped)型羽流在上游的扩展,指出该类型的羽流在上游的扩展是受到底部地形显著影响并不断发生地转调整的过程。本研究中我们未对羽流的上游扩展的时空变化做深入的讨论。但是这启示我们,虽然羽流向上游的扩展距离远不及向海和向下游的扩展距离,但是羽流向上游的扩展也具有复杂的时空变化和多元的影响因素,是非常值得深入研究的。

本研究中,羽流在还未至口门处已经与床底分离,在口门处的出流水体的厚度不足 2 m,小于拦门沙顶部的深度,这对于拦门沙较深、出流水体较薄的河口研究具有一定的参考意义。然而,也正是因为这个原因,我们并没有观察到口门截面积减少对口门射流的增强效应。许多河口的拦门沙较浅,甚至露出水面,例如意大利的 Misa 河口(Baldoni *et al*, 2021)。显然,本研究的结果对这类情况不具备代表意义。此外,我们只给定了单一的径流与潮汐状况,未考虑径流与潮汐变化的效应,因此,为了更好地研究拦门沙对羽流扩展的影响,下一步可以改变径流和潮汐条件,并考虑环境因素(例如风应力和背景流),扩大我们研究的参数空间。

本研究得到的主要结论如下:(1) 拦门沙降低了羽流的出流速度和出流盐度,增大了羽流的厚度;(2) 拦门沙使羽流的凸出体向开尔文波上游方向偏移,增大了凸出体的面积,但是对凸出体向海伸突的距离没有明显影响;(3) 拦门沙减小了沿岸流的宽度,对沿岸流的密度梯度的影响不大;(4) 拦门沙加强了羽流凸出体对淡水的捕获,减小了下游沿岸流的淡

水输运量。上述结果对河口拦门沙的砂资源管理及近岸的环境管理具有一定意义。

参 考 文 献

- 胡方西, 胡辉, 谷国传, 等, 1995. 长江河口盐度锋[J]. 海洋与湖沼, 26(S1): 23-31.
- 徐家婧, 周鹏, 连尔刚, 等, 2021. 2019 年夏季长江口及邻近海域锋面控制下叶绿素 *a* 的分布特征及其环境影响因素分析[J]. 海洋通报, 40(5): 541-549.
- BALDONI A, PERUGINI E, SOLDINI L, *et al*, 2021. Long-term evolution of an inner bar at the mouth of a microtidal river [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 262: 107573.
- CHEN S N, 2014. Enhancement of alongshore freshwater transport in surface-advected river plumes by tides [J]. Journal of Physical Oceanography, 44(11): 2951-2971.
- FONG D A, GEYER W R, 2002. The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume [J]. Journal of Physical Oceanography, 32(3): 957-972.
- GONG W P, ZHANG G, ZHANG H, *et al*, 2022. The effects of mouth bar on salt intrusion in a partially mixed estuary [J]. Journal of Hydrology, 612: 128261.
- HORNER-DEVINE A R, HETLAND R D, MACDONALD D G, 2015. Mixing and transport in coastal river plumes [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 47(1): 569-594.
- ISOBE A, 2005. Ballooning of river-plume bulge and its stabilization by tidal currents [J]. Journal of Physical Oceanography, 35(12): 2337-2351.
- LI D W, CHEN J F, WANG K, *et al*, 2016. Contribution of outer-shelf deep water to the nutrient inventories in the euphotic zone of the Changjiang River plume during summer [J]. Journal of Coastal Research, 32(5): 1081-1091.
- MATANO R P, PALMA E D, 2010. The upstream spreading of bottom-trapped plumes [J]. Journal of Physical Oceanography, 40(7): 1631-1650.
- WEI X Y, SCHRAMKOWSKI G P, SCHUTTELAARS H M, 2016. Salt dynamics in well-mixed estuaries: Importance of advection by tides [J]. Journal of Physical Oceanography, 46(5): 1457-1475.
- YANKOVSKY A E, CHAPMAN D C, 1997. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges [J]. Journal of Physical Oceanography, 27(7): 1386-1401.

THE IMPACT OF A RIVER MOUTH BAR ON THE SPREADING OF RIVER PLUME IN AN IDEALIZED ESTUARY

WU Wen-Sen¹, ZHANG Hao-Dan², LIU Jia-Huan², GONG Wen-Ping^{1,3}

(1. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Research Center of Guangdong Marine Development & Planning, Guangzhou 510060, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Zhuhai 519082, China)

Abstract River plume is the form of riverine brackish water spreading in a continental shelf after leaving river mouth. The spreading of a river plume is affected by many external forcings and bathymetry near river mouth, of which mouth bar is an important one. Taking an idealized estuary as an example, we studied the effect of mouth bar using the ROMS ocean model on plume spreading in terms of outflow regime, extent of the plumes, and the transport of freshwater along coastal current in far-field region. Results demonstrate that the existence of the mouth bar decreases the outflow velocity but increases the stratification in estuary mouth and the exiting angle to downstream coastline. In addition, it decreases the radius of the plume bulge and the width of the coastal alongshore current. Eventually, it reduces the freshwater transport in the alongshore flow. This study provided an important reference for understanding the bathymetric effect on the spreading of river plume and the transport of terrestrial materials into the shelf.

Key words river plume; mouth bar; ROMS