

长江口盐和泥沙密度分层对垂向紊动扩散的影响

王心雨, 顾峰峰, 李俊花

The impact of salt and sediment density stratification on vertical turbulent mixing in the Yangtze River Estuary

WANG Xinyu, GU Fengfeng, LI Junhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20221027001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响

New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities

水利水运工程学报. 2021(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200313001>

径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析

Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary

水利水运工程学报. 2021(5): 1 <https://doi.org/10.12170/20210422001>

长江口盐水入侵对海平面上升的响应特征

Responses of saline water intrusion to sea level rise in the Yangtze Estuary

水利水运工程学报. 2018(1): 58 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.009>

1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究

Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958

水利水运工程学报. 2021(2): 27 <https://doi.org/10.12170/20210105003>

2015年长江口航道运行维护特征分析

Characteristic analysis of dredging maintenance for Yangtze River estuary deepwater navigation channel in 2015

水利水运工程学报. 2017(2): 82 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.011>

近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应

Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years

水利水运工程学报. 2021(5): 8 <https://doi.org/10.12170/20210628002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20221027001

王心雨, 顾峰峰, 李俊花. 长江口盐和泥沙密度分层对垂向紊动扩散的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 15-26. (WANG Xinyu, GU Fengfeng, LI Junhua. The impact of salt and sediment density stratification on vertical turbulent mixing in the Yangtze River Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(1): 15-26. (in Chinese))

长江口盐和泥沙密度分层对垂向紊动扩散的影响

王心雨¹, 顾峰峰², 李俊花¹

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 上海河口海岸科学研究中心 交通部河口海岸重点实验室, 上海 201201)

摘要: 为研究河口水域盐和泥沙的垂向密度分层对垂向紊动扩散的影响, 基于长江口北槽 12.5 m 深水航道南侧的实测水沙盐资料, 分析长江口北槽水域的盐度及含沙量垂向分布特征, 并利用 Richardson 数和 PP81 方案的零方程模型计算垂向紊动扩散系数, 研究北槽水域盐和泥沙的垂向密度分层对垂向紊动扩散的影响。结果表明: 盐和泥沙垂向密度分层影响下, 长江口北槽河段沿程水体的垂向紊动扩散系数由近底层向近表层增大, 水体中盐和泥沙等物质的垂向密度分层在北槽中下游河段对水体垂向紊动扩散产生较为明显的抑制作用; 盐的垂向密度分层对水体垂向紊动扩散系数的抑制影响程度为大潮小于小潮、涨潮大于落潮; 泥沙垂向密度分层的抑制影响为大潮大于小潮、涨潮大于落潮; 盐的垂向密度分层是抑制水体垂向紊动扩散的主要因素, 清水和盐水条件下的垂向紊动扩散系数比值最大可达 5; 泥沙的抑制作用相对较弱, 清水和浑水条件下的水体垂向紊动扩散系数比值最大为 2, 垂向紊动抑制影响最大区域出现在近底层; 盐和泥沙综合作用下的垂向密度分层, 对物质垂向紊动扩散抑制程度更为明显, 抑制前后物质垂向紊动扩散系数的比值在北槽中段的近底层达到最大值(约 22)。

关 键 词: 扩散系数; 垂向紊动; 密度分层; 长江口

中图分类号: TV143.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)01-0015-12

河口是河流与海洋相交的地带, 也是上游淡水与下游咸水交汇的区域。外海咸水上溯, 内河淡水下泄, 交汇作用下盐水往往以盐水楔的形式存在, 其主要特征是底部为外海入侵的密度较大的盐水, 表层为内陆河流密度较小的淡水, 整体呈现为垂向上较为明显的盐密度分层现象^[1-2]。此外, 在长江口等悬沙以细颗粒泥沙为主的河口区域, 通常都能观测到高浓度浑浊带及近底高浓度悬浮泥沙的存在^[3-5], 这是由于絮凝沉降作用在近底层形成高浓度细颗粒沉积物, 从而诱导悬沙浓度分层, 使得河口在垂向上呈现底层悬沙浓度大、表层悬沙浓度小的悬沙分层现象^[6-8]。在悬沙垂向密度分层较为显著的区域, 近底层往往会出现十几甚至上百千克每立方米的高浓度泥沙层^[9]。河口区域盐和泥沙综合作用下形成的物质密度分层与该地区的水流紊动及物质扩散都有着密切关系, 盐和泥沙形成的垂向密度分层将影响浮力、抑制垂向紊动扩散, 从而促进水沙盐的垂向密度分层^[10]。

不少学者开展了针对垂向密度分层导致水和物质分布层化以及垂向紊动抑制问题的研究。如王寇等^[11]基于实测数据计算分析得到夏季长江口层化较强的温跃层处的湍动能耗散率和垂向湍扩散系数较小; 徐鹏昭等^[12]在渤海同样得到层化水体抑制垂向混合的结果; 姚炎明等^[13]根据现场观测资料, 分析了河口流速、盐度和含沙量的三维特征, 得出盐度和悬沙浓度引起的层化会随着潮汐变化而变化的结论; 杜雅静等^[14]利用三维水动力及盐度模型模拟了半闭合式的部分理想河口, 结果表明盐密度分层促进了水流的减阻效

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1201700, 21DZ1201002)

作者简介: 王心雨(1998—), 女, 安徽固镇人, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。

E-mail: 461571032@qq.com 通信作者: 顾峰峰(E-mail: gffecsrc@aliyun.com)

应,抑制了水体紊动;黄睿等^[15]基于振荡格栅生成的均匀紊流试验,测量了水体紊动和盐密度的历时变化过程,分析了盐密度分层对水体紊动的影响,结果表明盐密度分层与水体紊动抑制程度成正相关;Pal 等^[16]通过对理论参数的分析表明,通常情况下垂向紊动扩散系数会随着悬沙浓度的增加而降低;Huang 等^[17]设计了双层横向振荡网格的水槽试验,分析表明悬沙浓度梯度会影响紊动抑制程度。

根据上述分析可知,学者们已就河口区域的层化和垂向紊动抑制问题开展了大量研究。但在长江河口区域,目前还没有分别针对盐和泥沙垂向密度分层作用下的垂向紊动抑制作用影响的综合分析,也没有针对河口区域复杂的潮汐动力环境,不同潮动力条件下的垂向紊动扩散抑制作用的空间分布特征开展系统性研究。本文以长江口北槽为例,利用北槽 12.5 m 深水航道南侧边线沿程固定测点的实测资料和垂向紊动扩散系数的理论计算公式,开展长江口北槽航槽附近的盐和泥沙的垂向密度分层对垂向紊动扩散系数的影响研究,定量分析盐和泥沙垂向密度分层对垂向紊动抑制的影响,为本区域的水沙盐垂向运动分析和三维数值模型研究提供参考。

1 观测资料说明与分析

1.1 测量时间和位置

选取北槽 4.5 m 加高完善工程实施后第一个洪季的大小潮时期,即 2020 年 7 月 22 日 9 时至 23 日 9 时(大潮)及 2020 年 7 月 29 日 12 时至 30 日 12 时(小潮),该时间段的数据可以反映新工程边界条件下长江口北槽的水沙盐分布特征及垂向紊动情况,具有一定的代表性。2020 年 7 月流量相对较大,一般大流量叠加天文大潮的影响,北槽内的含沙量会明显增加,有利于本次研究分析高浓度泥沙分层对垂向紊动抑制影响的程度。观测时间段大小潮上游的日均来流量分别为 78 100 和 75 700 m³/s,平均水温为 26.6 和 27.2 ℃,平均潮位分别为 2.60 和 2.58 m,平均潮差分别为 3.36 和 1.81 m。空间上选取长江口北槽 12.5 m 深水航道南侧边线沿程的 8 个固定垂线测验点,具体研究区域及测点分布见图 1。本次研究的观测数据具有时间连续性和一定的空间连续性,观测时间间隔为 1 h,空间间距 5~10 km。观测内容包括垂向上的流速、流向、盐度及含沙量,观测数据均通过六点法进行采样(即采集表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H 及底层的数据,其中 H 为总水深)。主要测取指定时间固定位置的流速、盐度及含沙量垂向上的时间序列数据,用以分析长江口北槽区域的水沙盐特性及紊动抑制作用下垂向紊动扩散系数的特征,研究该区域盐和泥沙垂向密度分层作用对垂向紊动抑制的影响。

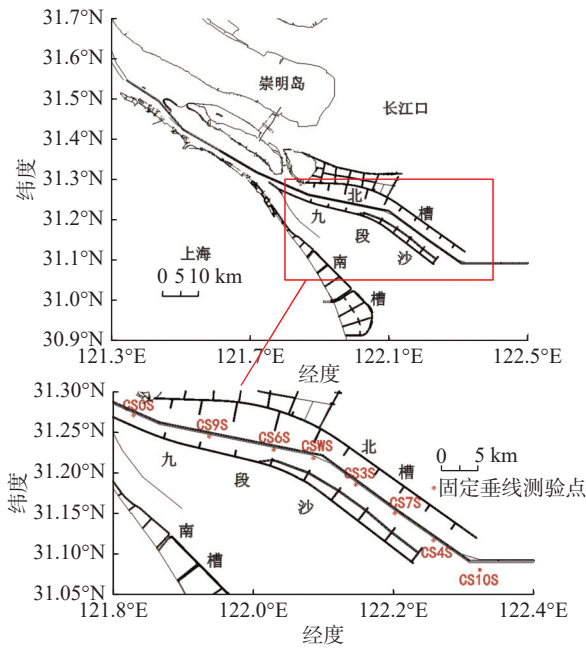


图 1 北槽固定垂向测点分布

Fig. 1 Vertical measurement point locations in the north channel

1.2 盐度、含沙量分布及垂向分层特征分析

根据资料分析,在长江口北槽河段纵向上存在明显的盐和泥沙垂向密度分层现象(不同潮周期、不同水深处盐度和含沙量的平均值见图 2、图 3)。北槽河段沿程的高盐度主要集中分布于河段下游,整体上平均盐度分布呈现为由河段底层向表层递减的趋势,小潮期间平均盐度在垂线上的密度分层特征更明显。

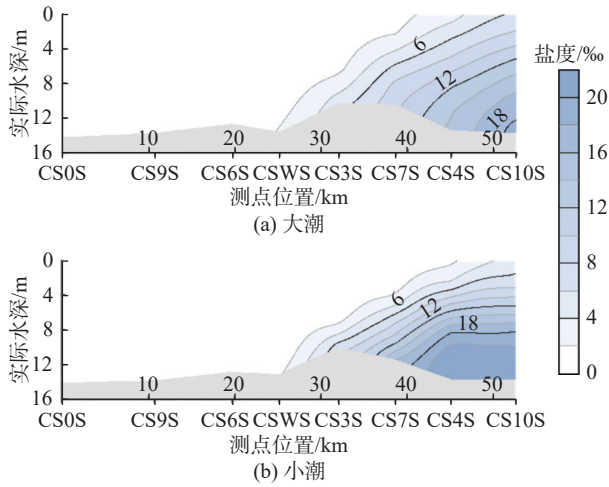


图2 潮周期平均盐度

Fig. 2 Mean salinity of tide cycle

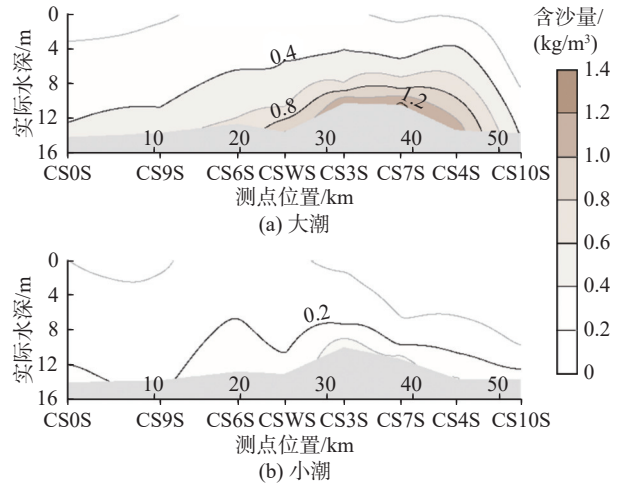


图3 潮周期平均含沙量

Fig. 3 Mean sediment concentration of tide cycle

在北槽河段中下游区域存在一定浓度的泥沙,平均含沙量分布由底层向表层递减。大潮期间含沙量平均值整体高于小潮,且泥沙在垂向上的密度分层特征更明显。

潮周期平均流速分布见图4,沿北槽河段各测站的垂向流速分布总体呈表层大、底层小的特征,大潮整体大于小潮。从垂向分布看,无论是大潮还是小潮,其流速分布均偏离一般的对数分布,表底层流速差异较大,一般认为是由于潮汐河口受到了非恒定流和盐淡水交汇的影响,但垂向密度分层形成的垂向紊动抑制作用也是不可忽略的重要影响因子^[18]。

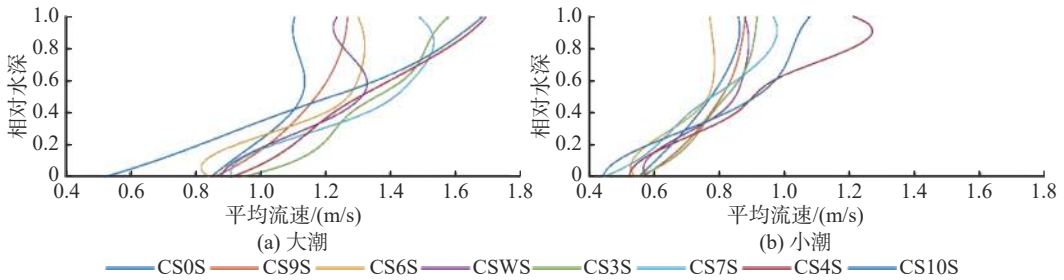


图4 潮周期平均流速

Fig. 4 Mean velocity of tide cycles

为反映研究区域内盐淡水的混合层化程度,采用盐度分层系数 N 作为评价河口混合强弱的指标^[19-20]。

$$N = (S_b - S_s) / \bar{S} \quad (1)$$

式中: S_b 、 S_s 和 $\bar{S}$ 分别为测站底层盐度、表层盐度和断面垂向平均盐度。分层系数 N 值越小,表明该区域盐淡水混合越均匀,反之则表明层化程度越高。通常认为 $N \leq 0.01$ 时,盐淡水充分混合; $0.01 < N < 1.0$ 时,盐淡水呈现部分混合; $N \geq 1.0$ 时,盐淡水高度分层^[21]。

将上述盐淡水混合分层系数的概念引入泥沙引起的混合层化分析中,得到含沙量的分层系数为:

$$N_C = (C_b - C_s) / \bar{C} \quad (2)$$

式中: C_b 、 C_s 、 $\bar{C}$ 分别为测站底层含沙量、表层含沙量和断面垂向平均含沙量。

根据式(1)和(2),计算得到本次研究区域内的盐度和含沙量的分层系数沿程分布。由图5和6可知:

(1)测站 CS6S 向下游方向,盐水处于高度分层状态,在北槽河段中段盐水分层达到最大值,小潮盐水分层程度大于大潮;小潮时涨落潮分层差异不大,大潮时落潮分层系数峰值较之涨潮更靠近上游侧。

(2)沿程含沙量导致的混合分层变化相对平缓,分层系数总体有所减小,尤其是北槽河段中段,减小明显。

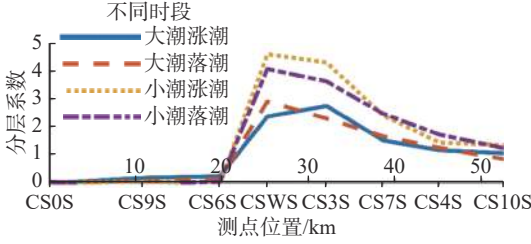


图 5 潮周期盐度分层系数

Fig. 5 Stratification coefficient of salinity of tidal cycles

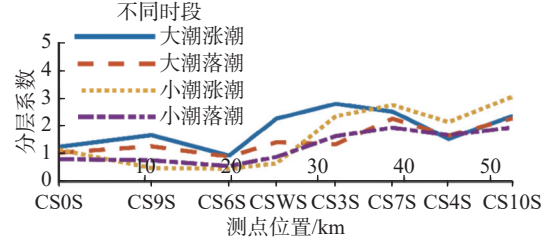


图 6 潮周期含沙量分层系数

Fig. 6 Stratification coefficient of sediment of tidal cycles

2 垂向紊动扩散系数计算模型

根据前述可知,垂向上物质的密度分层会对垂向紊动扩散有明显的抑制作用,为分析对垂向紊动扩散的影响程度,采用垂向紊动扩散系数来进行定量统计和分析。目前常用的紊流模型有零方程模型、单方程模型和双方程模型等^[22-23]。Nunes 等^[24-25]对比了各种应用广泛的零方程模型,认为混合方案(PP81 混合方案)模拟河口物质输运效果更好。因此,本文采用混合方案进行分析研究。

2.1 Richardson 数的计算

Richardson 数(Ri)表示垂向密度分层的影响(N^2)和水平流速的垂向梯度(M^2)两种物理作用之间的相对强弱关系。理论上,以 $Ri=0.25$ 为临界值,即 $Ri>0.25$ 时,水体会受到明显的制紊层化作用影响^[26-27],且该数值越大,水体层化程度越强,反之混合程度越强。其表达式^[28-29]为:

$$Ri = N^2 / M^2, M^2 = (\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2, N^2 = \left(-\frac{g}{\rho_0} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式中: u 、 v 分别为垂向位置 z 处东西和南北方向上的流速分量(m/s); g 为重力加速度(m/s^2); ρ_0 为清水密度(kg/m^3); ρ 为含盐沙的水体密度(kg/m^3)。根据相关文献^[30], $\rho = \rho_0 + 0.78S + 0.62C$, 其中, S 为盐度(‰), C 为含沙量(kg/m^3)。

2.2 垂向紊动扩散系数的计算

在零方程模型中, PP81 混合方案认为扩散系数仅为 Richardson 数的函数,在此基础上,采用文献^[23]中的垂向紊动抑制参数方程^[31]计算水体动量方程的垂向紊动扩散系数 K_{mv} 和物质输运方程中的垂向紊动扩散系数 K_{hv} :

$$K_{mv} = N_0(1 + \beta_N Ri)^{\alpha_N} \quad (4)$$

$$K_{hv} = A_0(1 + \beta_A Ri)^{\alpha_A} \quad (5)$$

式中: N_0 、 A_0 为自然分层($Ri=0$)时的垂向紊动扩散系数(m^2/s), 一般情况认为 $N_0 = A_0$; 参照文献^[32]选取 $\beta_N = 10$; $\alpha_N = 0.5$; $\beta_A = 3.33$; $\alpha_A = -1.5$; 计算中取最底层床面处 $z=0$; N_0 采用下式^[32]计算。

$$N_0 = \begin{cases} a + \kappa u^* z(1 - z/H), & z/H < 0.5 \\ a + \kappa u^* H/4, & z/H \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{C_d/\rho} u_b \quad (7)$$

$$C_d = \kappa / \ln(\delta_b/z_0) \quad (8)$$

式中: a 为使床面处 N_0 不为零的一个极小常数, 取 $a = 10^{-4} (\text{m}^2/\text{s})$; H 为总水深(m); κ 为卡门常数, 取 0.4; u^* 为摩阻流速; u_b 为近底层流速(m/s), 计算中采用实测流速的底层流速; δ_b 为近底层选取的计算厚度(m), 根据实际情况近似取 $0.1H$; z_0 为底部粗糙长度, 长江口按经验选取 $0.000\ 01\ \text{m}$ 。

3 结果及讨论

3.1 水体垂向紊动扩散系数的分布特征

根据式(3)~(8), 计算得到长江口北槽内不同潮段下北槽河段的沿程水体垂向紊动扩散系数分布, 分别绘制有无紊动抑制下的计算结果(见图7~8), 其中无紊动抑制的清水条件, 指不考虑盐度和含沙量对水体密度的影响, 在计算过程中盐度及含沙量的取值为0, 即取 $Ri = 0$ 时的 N_0 。

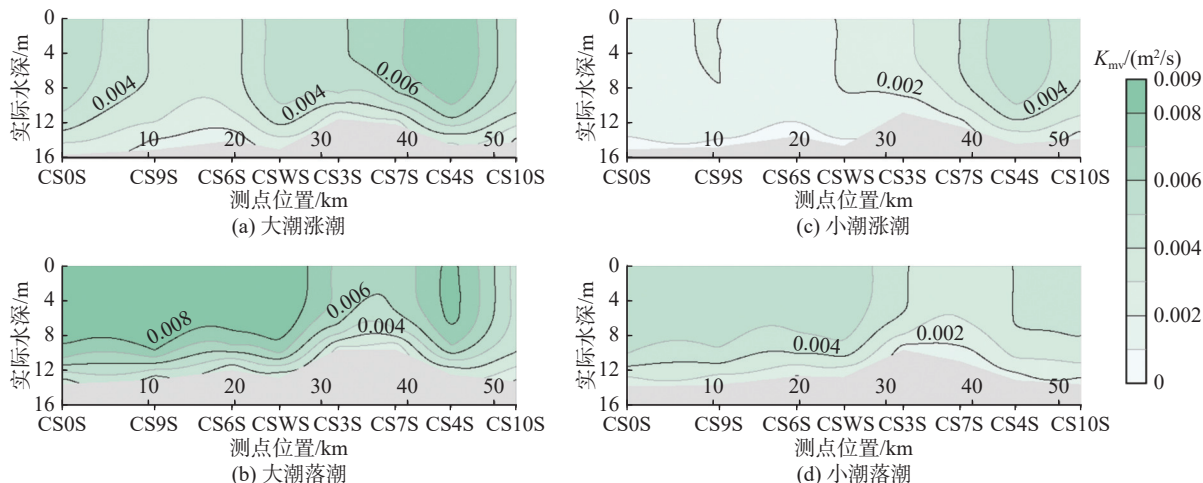


图7 无紊动抑制下的水体垂向紊动扩散系数

Fig. 7 Water vertical turbulent diffusivity without turbulence suppression

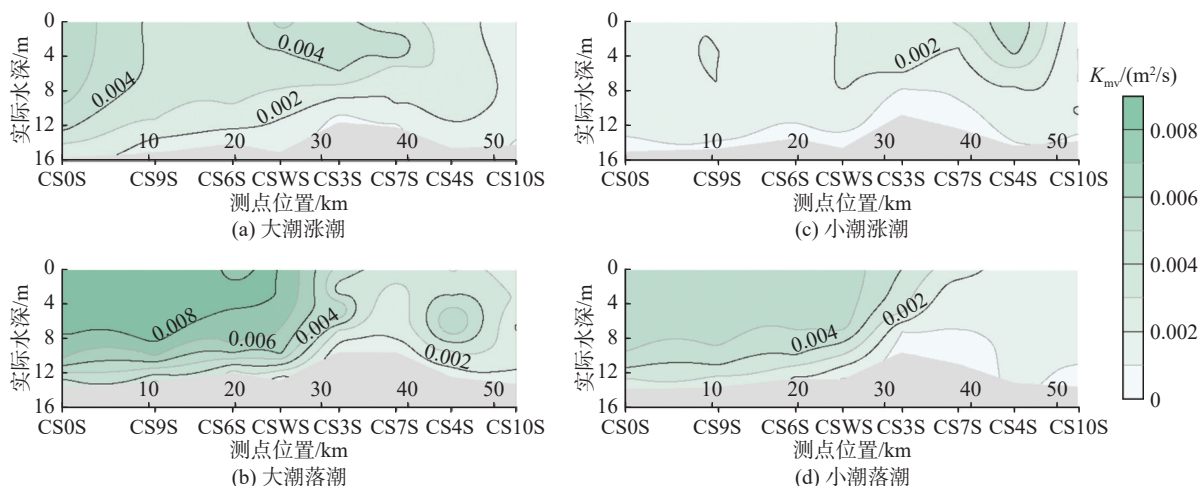


图8 紊动抑制下的水体垂向紊动扩散系数

Fig. 8 Water vertical turbulent diffusivity with turbulence suppression

从图7~8可见, 清水条件下, 垂向紊动扩散系数在近底层达到最小值, 垂向向上递增; 大潮两个潮段的垂向紊动扩散系数值约为对应小潮的2倍, 落潮整体大于涨潮。考虑垂向密度分层导致的紊动抑制时, 在盐和泥沙发生高度分层的北槽中段和下段, 垂向紊动扩散系数明显减小, 上游侧变化不大。

3.2 盐和泥沙垂向密度分层对水体垂向紊动扩散系数的影响

为进一步分析盐和泥沙对水体垂向紊动扩散系数的影响程度, 分别计算盐和泥沙垂向密度分层时的垂向紊动扩散系数, 将该结果与清水条件(不考虑垂向密度分层影响)计算的垂向紊动扩散系数进行对比分析, 结果见图9~10。图11为不同潮时清水条件及紊动抑制后水体垂向紊动扩散系数的比值。

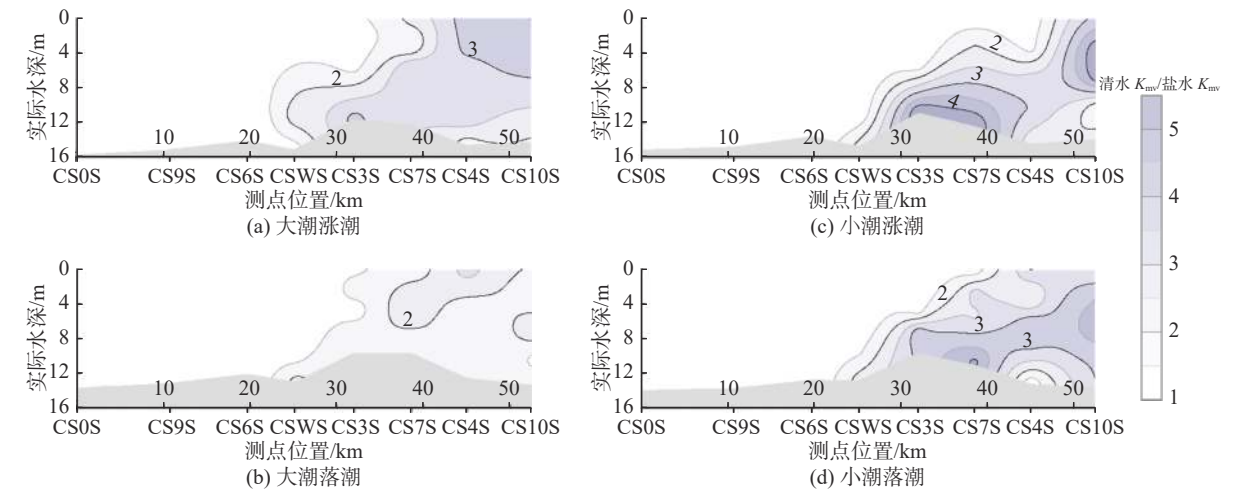


图 9 清水与盐水的水体垂向紊动扩散系数比值
Fig. 9 Ratio of vertical turbulent diffusivity in clear water vs salt water

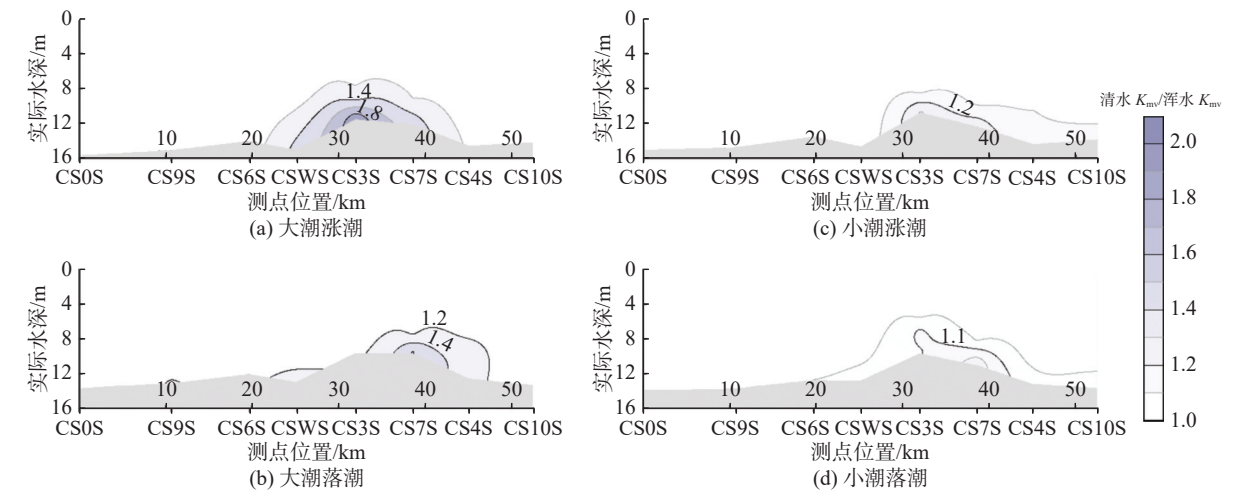


图 10 清水与浑水的水体垂向紊动扩散系数比值
Fig. 10 Ratio of vertical turbulent diffusivity in clear water vs muddy water

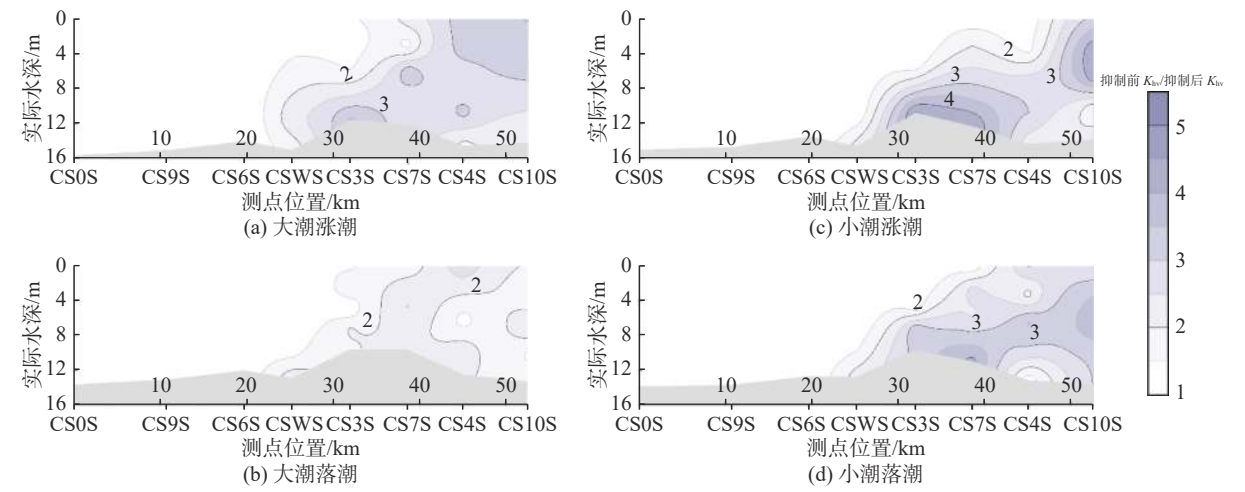


图 11 紊动抑制前后水体垂向紊动扩散系数比值
Fig. 11 Ratio of vertical turbulent diffusivity before and after turbulence suppression

由图 9~11 可知:

- (1)仅考虑盐密度分层时,紊动抑制作用影响程度为大潮小于小潮,涨潮大于落潮。
- (2)仅考虑泥沙密度分层时,紊动抑制作用影响程度为大潮大于小潮,涨潮大于落潮。
- (3)盐密度分层的影响明显大于泥沙密度分层,清水和盐水条件下的垂向紊动扩散系数比值最大可达 5,泥沙密度分层影响最大区域比值不到 2,变化最大的区域在近底层。
- (4)同时考虑盐和泥沙垂向密度分层时,紊动抑制作用的影响程度总体与仅考虑盐密度分层时相近。

近底层的紊动对近底切应力和泥沙沉降都至关重要,因此进一步分析近底层的紊动抑制作用,计算近底层清水与盐水、浑水条件下水体垂向紊动扩散系数的比值,以及盐和泥沙密度直接叠加和综合作用的比值,计算结果见图 12。

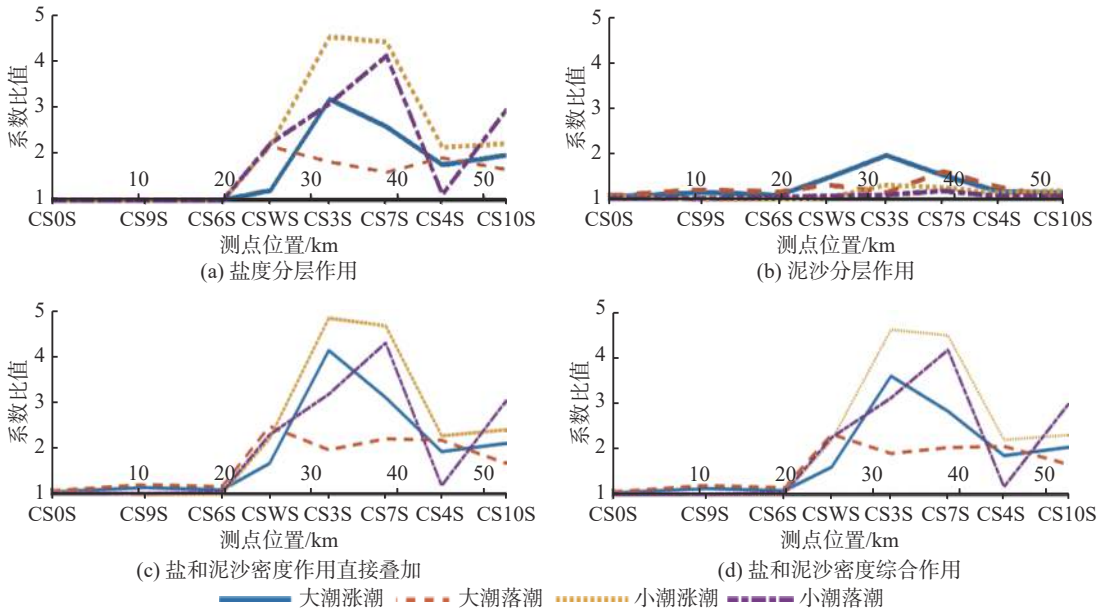


图 12 近底层水体垂向紊动扩散系数比值

Fig. 12 Ratio of vertical turbulent diffusivity in the near-bottom layer

由图 12 可知,在近底层,垂向密度分层对垂向紊动扩散系数的影响作用主要体现在测站 CS6S 的下游方向,其中盐度分层影响的比值为 1~5,整体表现为小潮影响大于大潮,涨潮大于落潮;泥沙密度分层的影响只有测站 CS3S 在大潮涨潮时接近 2,其余测站、潮段影响极小。说明在近底层,盐度分层对水体垂向紊动扩散系数的减小起到更大作用,泥沙密度分层的影响很小。比较盐和泥沙密度作用直接叠加与盐和泥沙密度综合作用的水体垂向紊动扩散系数比值,结果表明涨潮时段综合作用的影响略低于二者直接叠加的结果,而落潮时段综合作用与直接叠加作用下的结果则比较接近。

3.3 垂向密度分层对物质垂向紊动扩散系数的影响

综合考虑盐、泥沙垂向密度分层对紊动扩散的影响,计算得到物质垂向紊动扩散系数(图 13),考虑紊动抑制前后物质垂向紊动扩散系数的比值见图 14。由图 13 和 14 可知,涨潮的紊动抑制影响大于落潮、小潮大于大潮,抑制最为明显区域在近底层。

按大潮涨潮、大潮落潮、小潮涨潮和小潮落潮 4 个时段,将各个测站在垂向上有无紊动抑制的扩散系数值进行比较(图 15)。可见,在北槽中上段,即 CSWS 点以上,紊动抑制影响较小,垂向紊动扩散系数基本一致;CSWS 点以下的紊动抑制影响明显增大。

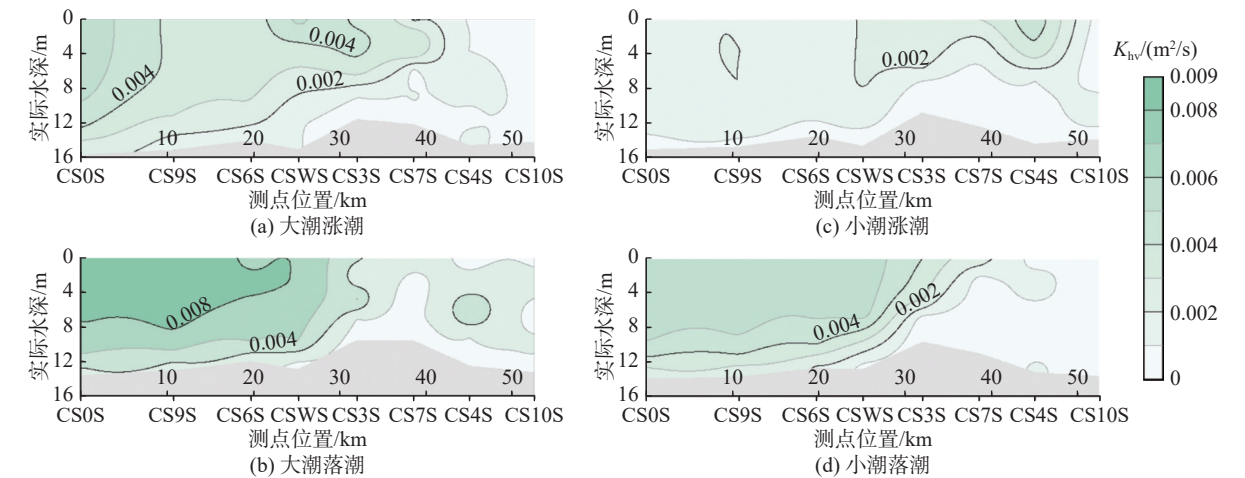


图 13 紊动抑制下的物质垂向紊动扩散系数
Fig. 13 Vertical turbulent diffusivity of materials with stratification effects

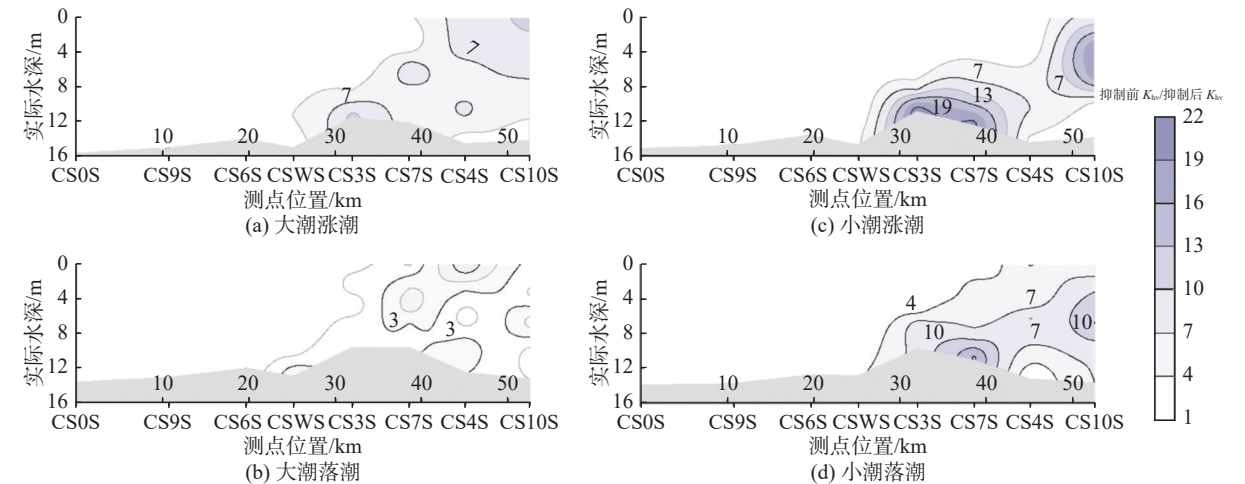
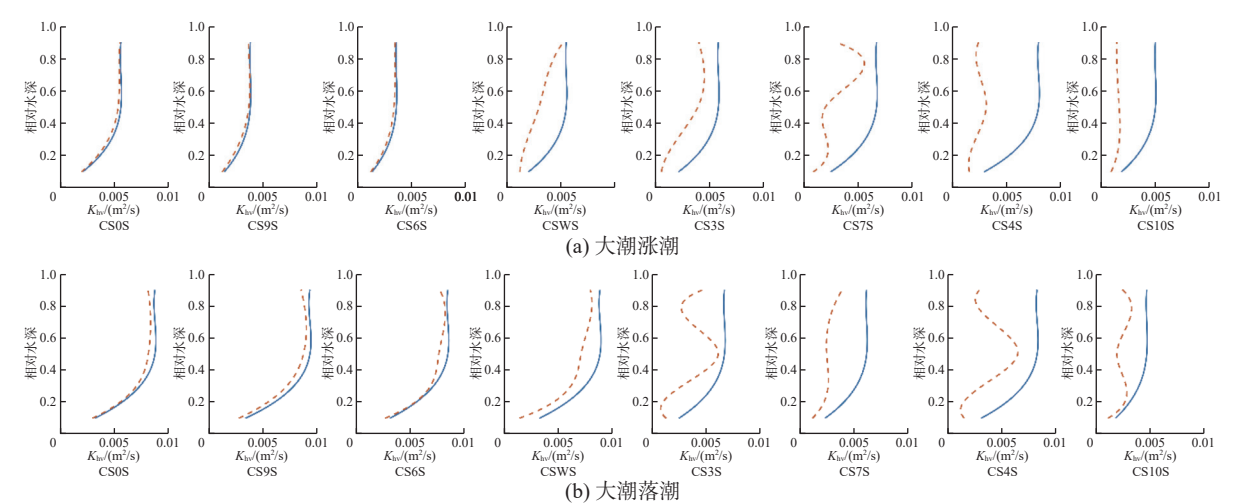


图 14 紊动抑制前后物质垂向紊动扩散系数的比值
Fig. 14 Ratio of material vertical turbulent diffusivity before and after turbulence suppression



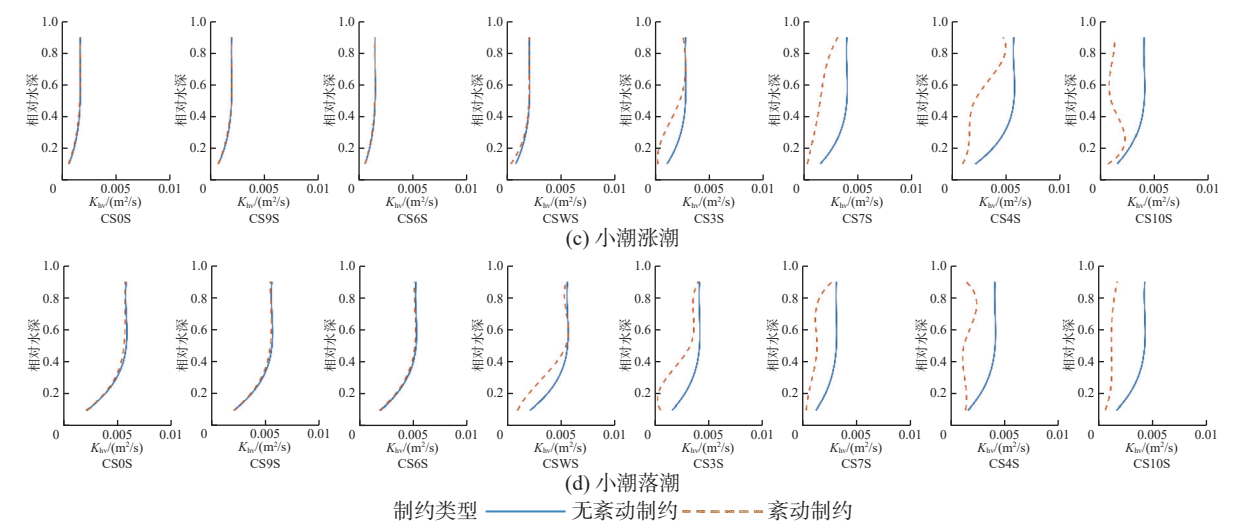


图 15 各站点物质垂向紊动扩散系数

Fig. 15 Vertical turbulent diffusivity profiles at measurement stations

同样取近底层结果进行分析, 结果见图 16。由图 16 可知, 在近底层, 垂向密度分层对垂向紊动扩散系数的影响作用主要体现在测站 CS6S 的下游方向, CS3S~CS7S 区段达到峰值, 抑制前后的比值最大约 22, 整体上表现为小潮影响大于大潮, 涨潮大于落潮。

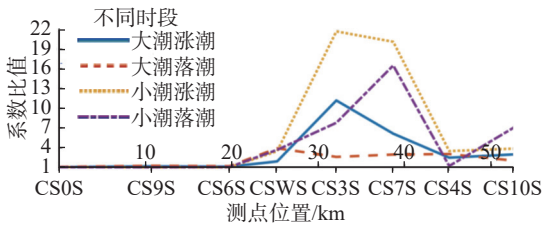


图 16 近底层抑制前后物质垂向紊动扩散系数比值

Fig. 16 Ratio of material vertical turbulent diffusivity before and after turbulence suppression of near-bottom layer

4 结 语

本文基于 2020 年 7 月长江口北槽沿程六点法的实测水文数据, 结合零方程模型定量计算分析了盐和泥沙垂向密度分层对垂向紊动扩散的影响, 得到以下主要结论:

- (1)长江口北槽沿程水体在自然分层情况下存在紊动扩散, 紊动扩散的程度由近底层沿垂线向近表层增大; 水体中盐和泥沙等物质形成的垂向密度分层对水体的紊动扩散起到抑制作用, 该抑制作用主要体现在中下游航段。
- (2)垂向密度分层更大的水域, 在垂向上呈现出更大程度的紊动抑制现象。具体表现为小潮时段的紊动抑制程度大于大潮; 涨潮时段的紊动抑制程度大于落潮; 河段中段的近底层存在更大程度的紊动抑制。
- (3)水体中盐和泥沙形成的垂向密度分层是抑制水体紊动扩散的主要因素, 且盐度分层对紊动扩散的抑制程度明显大于泥沙密度分层。盐度分层对水体紊动扩散的抑制在河段中段近底层及河段下段近表层达到最大(约 5 倍); 泥沙密度分层的抑制程度在河段中段近底层达到最大(约 2 倍)。盐和泥沙垂向密度分层综合作用的影响程度低于二者分别作用时影响程度的直接叠加。
- (4)垂向密度分层对水体垂向紊动扩散及物质垂向紊动扩散有着相同的抑制趋势, 在河段中段近底层的抑制程度最大。垂向密度分层对物质垂向紊动扩散的抑制程度更为明显(最大约 22 倍), 对水体垂向紊动扩散的抑制程度稍小(约 4 倍)。

此外, 本次研究仅分析了流速流向、盐度和含沙量对垂向紊动扩散系数的影响, 其他水文要素, 如温度、波浪等对垂向紊动扩散系数的影响机制有待后续研究进一步分析讨论。

参 考 文 献:

- [1] 沈焕庭, 茅志昌, 顾玉亮. 东线南水北调工程对长江口咸水入侵影响及对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(2): 150-154. (SHEN Huanting, MAO Zhichang, GU Yuliang. Impact of south-north water transfer (east route) on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary with consideration of its countermeasures[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 150-154. (in Chinese))
- [2] LI Y C, LIU J G. A numerical study on salinity stratification at the Oujiang River Estuary, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(11): 40-50.
- [3] LI Y, WANG Y P, ZHU Q G, et al. Roles of advection and sediment resuspension-settling in the turbidity maximum zone of the Changjiang Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 229: 104559.
- [4] VINH V D, OUILLON S. The double structure of the Estuarine Turbidity Maximum in the Cam-Nam Trieu mesotidal tropical estuary, Vietnam[J]. *Marine Geology*, 2021, 442: 106670.
- [5] ZHU W W, LI J F, LI W H. Observations of fine sediment flocculation in the turbidity maximum of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sea Research*, 2022, 179: 102150.
- [6] 于东生, 田淳, 严以新. 长江口悬沙含量垂向分布数值模拟[J]. *水利水电工程学报*, 2004(1): 35-40. (YU Dongsheng, TIAN Chun, YAN Yixin. Numerical simulation of vertical distribution of suspended sediment in the Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2004(1): 35-40. (in Chinese))
- [7] 王家生, 陈立, 刘林, 等. 粘性泥沙分层运动特征的试验研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 13-18. (WANG Jiasheng, CHEN Li, LIU Lin, et al. Experimental study of feature of the cohesive sediment lamination movement[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 13-18. (in Chinese))
- [8] LU T, WU H, ZHANG F, et al. Constraints of salinity- and sediment-induced stratification on the turbidity maximum in a tidal estuary[J]. *Geo-Marine Letters*, 2020, 40(5): 765-779.
- [9] 金镠. 细颗粒泥沙运动及滩槽交换对航道回淤的影响[J]. *水运工程*, 2019(8): 111-116. (JIN Liu. Influences of fine sediment transport and transversal sediment transport between shoal and channel on channel siltation[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(8): 111-116. (in Chinese))
- [10] GEYER W R, CANNON G A. Sill processes related to deep water renewal in a fjord[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(C10): 7985.
- [11] 王寇, 李博, 李爱国, 等. 夏季长江口及其邻近海域湍流特征分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(11): 22-31. (WANG Kou, LI Bo, LI Aiguo, et al. Characteristics of turbulence in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(11): 22-31. (in Chinese))
- [12] 徐鹏昭, 杨伟, 赵亮, 等. 渤海弱层化期湍流混合观测特征分析[J]. *海洋学报*, 2020, 42(3): 1-9. (XU Pengzhao, YANG Wei, ZHAO Liang, et al. Observations of turbulent mixing in the Bohai Sea during weakly stratified period[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(3): 1-9. (in Chinese))
- [13] 姚炎明, 郑逸群, 赵新宇, 等. 椒江河口层化动力特性研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 23-37. (YAO Yanming, ZHENG Yiqun, ZHAO Xinyu, et al. Characteristics of stratification in the Jiaojiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(10): 23-37. (in Chinese))
- [14] 杜雅静, 张庆河. 理想河口盐度层化的减阻效应研究[J]. *水道港口*, 2018, 39(4): 416-421. (DU Yajing, ZHANG Qinghe. Drag reduction induced by salinity stratification in an idealized estuary[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(4): 416-421. (in Chinese))
- [15] 黄睿, 张庆河, 邢恩博, 等. 盐度层化对水体紊动特性影响的实验研究[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(3): 45-55. (HUANG Rui, ZHANG Qinghe, XING Enbo, et al. Experimental investigation on effects of salinity stratification on turbulence characteristics of water body[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(3): 45-55. (in Chinese))
- [16] PAL D, GHOSHAL K. Effect of particle concentration on sediment and turbulent diffusion coefficients in open-channel turbulent flow[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(18): 1245.
- [17] HUANG R, ZHANG Q H, ZHANG W, et al. Experimental research on the effect of suspended sediment stratification on turbulence characteristics[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 278: 108128.

- [18] LU H F, GU F F, QI D M, et al. Investigating near-bottom hydrodynamic processes in the Yangtze River Estuary using in situ measurements[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(4): 805.
- [19] 乐灿,王永红,杨远东,等.珠江八大口门2016年枯季盐度同步观测及咸淡水混合研究[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(1): 51-60. (YUE Can, WANG Yonghong, YANG Yuandong, et al. Synchronous observation of salinity for salt-fresh water mixing at the eight entrances of Pearl River in dry season of 2016[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(1): 51-60. (in Chinese))
- [20] 谢荣耀,刘锋,罗向欣,等.河控型河口盐度层化对悬沙的捕集机制:以洪季磨刀门河口为例[J]. *海洋学报*, 2021, 43(5): 38-49. (XIE Rongyao, LIU Feng, LUO Xiangxin, et al. Sediment trapping mechanism by salinity stratification in a river-dominated estuary: a case study of the Modaomen Estuary in flood season[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(5): 38-49. (in Chinese))
- [21] 李远,李占海,张钊,等.长江口北槽下游河道悬沙浓度垂向分布特征研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2017(6): 114-125. (LI Yuan, LI Zhanhai, ZHANG Zhao, et al. Vertical distribution patterns of suspended sediment concentration in the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2017(6): 114-125. (in Chinese))
- [22] 赵军鹏,龚文平,王道儒.海南岛南渡江河口的盐水入侵[J]. *海洋学报*, 2013, 35(5): 14-28. (ZHAO Junpeng, GONG Wenping, WANG Daoru. Saline intrusion in the Nandu River estuary, Hainan Island[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(5): 14-28. (in Chinese))
- [23] 熊龙兵,浦祥,时钟,等.潮汐应变对长江口北槽枯季湍流混合与层化的影响[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 41-57. (XIONG Longbing, PU Xiang, SHI Zhong, et al. Effect of tidal straining on turbulent mixing and stratification in the dry season within the North Passage of the Changjiang River Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4): 41-57. (in Chinese))
- [24] NUNES VAZ R A, SIMPSON J H. Turbulence closure modeling of estuarine stratification[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C8): 16143.
- [25] PACANOWSKI R C, PHILANDER S G H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(11): 1443-1451.
- [26] TURNER J S, BENTON E R. Buoyancy effects in fluids[J]. *Physics Today*, 1974, 27(3): 52-53.
- [27] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 175-197.
- [28] GRANT W D, MADSEN O S. The continental-shelf bottom boundary layer[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1986, 18: 265-305.
- [29] RICHARDSON L F. The supply of energy from and to atmospheric eddies[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1920, 97(686): 354-373.
- [30] GUAN W B, KOT S C, WOLANSKI E. 3-D fluid-mud dynamics in the Jiaojiang Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(4): 747-762.
- [31] MUNK W H, ANDERSON E R. Note on the theory of the thermocline[J]. *Journal of Marine Research*, 1948, 7(2): 276-295.
- [32] 匡翠萍.长江口盐水入侵三维数值模拟[J]. *河海大学学报*, 1997(4): 54-60. (KUANG Cuiping. A 3D numerical model for saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 1997(4): 54-60. (in Chinese))

The impact of salt and sediment density stratification on vertical turbulent mixing in the Yangtze River Estuary

WANG Xinyu¹, GU Fengfeng², LI Junhua¹

(1. College of Ocean and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory for Estuarine and Coastal of Ministry of Transport, Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: This study examines vertical density stratification of salt and sediment in estuaries. Data were analyzed from the south side of a 12.5 m deep channel along the north channel of the Yangtze Estuary, including water, salt and sediment measurements. The overall distribution characteristics of salt and sediment content in the north channel waters were analyzed. The vertical turbulent diffusion coefficient was calculated using the Richardson number method and PP81 zero-equation model. This investigated the effect of vertical salt and sediment density stratification on vertical turbulent diffusion in the north channel waters. Results show the diffusion coefficient increases from near-bottom to near-surface layers with stratification. Stratification has a more pronounced inhibitory effect in the middle and lower reaches. Salt stratification results in less inhibition during spring than neap tides, and less during flood than ebb tides. Sediment stratification causes more inhibition during spring than neap tides, and more during flood than ebb tides. Salt stratification is the primary inhibitory factor, with coefficients up to 5 times lower under salt versus clear water. Inhibition by sediment is weaker, with coefficients up to 2 times lower under mud versus clear water, and strongest inhibition in near-bottom layers. Combined salt and sediment stratification more markedly inhibits material diffusion, with maximum coefficients of around 22 times lower in near-bottom mid-channel areas.

Key words: diffusion coefficient; vertical turbulence; density stratification; the Yangtze River Estuary