



盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙静水沉速影响试验研究

陆秉宣, 黄睿, 陈中, 章家保, 张蔚

Experimental study on the effects of salinity and sediment concentration on the settling velocity of fine-grained sediments in still water

Lu Bingxuan, Huang Rui, Chen Zhong, Zhang Jiabao, Zhang Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

柱状珊瑚砂静水沉降试验研究

Experimental study on settlement of rod coral sand in stagnant water

海洋学报. 2023, 45(4): 57-67 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023043>

黄原胶影响下泥沙起动特性对水体磷质量浓度的影响

The effect of sediment incipient motion characteristics on phosphorus mass concentration in water under the influence of xanthan

海洋学报. 2025, 47(3): 108-117 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025018>

淹水时长与盐度对桐花树胚胎萌根与生长发育过程的影响研究

The impacts of submergence duration and salinity on the germination and growth process of *Aegiceras corniculatum* radicles

海洋学报. 2023, 45(11): 101-111 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023150>

钝缢锦蛤 (*Tapes dorsatus*) 稚贝的温度和盐度耐受性研究

Study on temperature and salinity tolerance of *Tapes dorsatus* juveniles

海洋学报. 2022, 44(4): 57-64 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022094>

椒江河口层化动力特性研究

Characteristics of stratification in the Jiaojiang Estuary

海洋学报. 2021, 43(10): 23-37 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021135>

基于GEE的黄河口表层悬浮泥沙浓度时空分布及其影响因素分析

Analysis of the temporal and spatial distribution of suspended sediment concentration and its influencing factors in the Huanghe River Estuary based on GEE

海洋学报. 2023, 45(8): 178-190 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023090>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆秉宣, 黄睿, 陈中, 等. 盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙静水沉速影响试验研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(2): 70–78, doi:10.12284/hyxb20260014

Lu Bingxuan, Huang Rui, Chen Zhong, et al. Experimental study on the effects of salinity and sediment concentration on the settling velocity of fine-grained sediments in still water[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(2): 70–78, doi:10.12284/hyxb20260014

盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙静水沉速影响试验研究

陆秉宣¹, 黄睿^{1*}, 陈中², 章家保¹, 张蔚¹

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 沉速是细颗粒黏性泥沙动力特性的关键参数, 对于认识细颗粒泥沙运动规律以及预测港口航道冲淤演变具有重要意义。细颗粒黏性泥沙因其粒径小, 比表面积大、颗粒间容易发生絮凝, 其沉速受到多重因素的影响, 其中盐度和泥沙浓度对其影响较为显著。采用嘉兴港航道现场采集的原状泥沙, 利用沉降桶进行了 0~15‰ 盐度范围和 1~20 kg/m³ 泥沙浓度范围内不同盐度和泥沙浓度条件下共 42 组细颗粒泥沙静水沉速试验。试验结果表明, 当盐度小于 7~9‰ 时, 随着盐度的增加, 泥沙沉速逐渐变大; 当盐度大于 7~9‰ 后, 随着盐度继续增加, 沉速逐渐减小而后趋于稳定。而当泥沙浓度小于 8~10 kg/m³ 时, 随着泥沙浓度增加, 沉速逐渐增大; 当泥沙浓度大于 8~10 kg/m³ 时, 沉速逐渐减小。另外, 相比单一因素的影响, 盐度和泥沙浓度存在共同作用, 其共同作用对沉速的影响更大, 对比分析了不同条件下盐度和泥沙浓度对沉速的影响。拟合建立了不同盐度和泥沙浓度影响下细颗粒泥沙的静水沉速公式, 并和前人的研究结果进行了验证对比, 研究结果可为嘉兴港航道泥沙运动规律研究提供相应的参考。

关键词: 细颗粒泥沙; 沉降速度; 盐度; 泥沙浓度; 沉降桶

中图分类号: TV148*.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)02-0070-09

1 引言

细颗粒泥沙在河口海岸区域广泛分布, 其中黏性细颗粒泥沙约占其中 90%^[1]。细颗粒泥沙的沉降规律直接影响泥沙淤积过程, 进而对河口海岸泥沙淤积、港口航道回淤以及滩涂演变等产生重要影响。而沉降特性始终是细颗粒泥沙运动规律的重要课题。研究细颗粒泥沙的动力沉降机制有助于了解细颗粒泥沙输运规律, 并可为优化航道治理、评估岸滩演变, 以及底泥污染治理提供科学依据^[2]。

与粗颗粒的沉降特性不同, 细颗粒泥沙具有较大的比表面积, 其表面会形成双电层, 在水中阳离子

作用下会产生絮凝现象^[3-4]。细颗粒泥沙通过絮凝变成絮团, 导致其沉速显著变化。影响细颗粒泥沙絮凝沉降因素主要有泥沙粒径、盐度、泥沙浓度、温度以及水体紊动强度等^[5-6]。粒径对细颗粒泥沙絮凝有重要影响, 只有当颗粒粒径小于临界尺寸才会出现絮凝现象, 一般认为细颗粒泥沙粒径小于 30 μm 时才会产生絮凝^[7]; 温度主要通过影响水的运动黏滞系数间接影响泥沙的沉降过程, 温度升高时黏滞系数降低, 沉速会有所增大, 但超过一定温度后双电层厚度会变大导致沉速减小^[8]; 水流紊动会产生上举力和剪切力, 低强度会促进絮凝体的形成, 高强度则会导致絮凝体发生破碎, 一般认为水流紊动的临界剪切率在 30 s⁻¹

收稿日期: 2025-12-15; 修订日期: 2026-02-12。

基金项目: 国家自然科学基金(42206165, 42576156, U2040203)。

作者简介: 陆秉宣(2003—), 男, 云南省昆明市人, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: bxlu@hhu.edu.cn

* 通信作者: 黄睿, 副教授, 主要从事河口海岸水动力与泥沙运动研究。E-mail: ruihuang@hhu.edu.cn

左右^[9-10]。

另外, 盐度和泥沙浓度也是两个重要的因素, 它们直接影响细颗粒泥沙絮凝过程进而影响其沉速^[11]。尤其在河口海岸等咸淡水交汇区域, 盐度和泥沙浓度的耦合作用会较大程度影响细颗粒泥沙沉速^[12]。盐度主要通过改变水体黏性以及颗粒表面电学性质, 直接影响泥沙颗粒间的相互作用力^[13]。研究表明盐度与细颗粒泥沙絮凝程度及沉速之间并非简单的正相关关系, 而是存在细颗粒泥沙絮凝程度和沉速最大的最佳絮凝盐度^[14]。王家生等^[15]通过泥沙絮凝试验发现, 细颗粒泥沙的沉速随离子的浓度增加而呈现先增加后减小的趋势, 其中高价阳离子的作用显著强于低价阳离子。杨扬等^[16]认为长江口细颗粒泥沙最佳絮凝盐度约为 12‰。陈邦林等^[17]同样采用长江口细颗粒泥沙展开研究, 试验结果显示最佳絮凝盐度区间为 10‰~13‰。关许为和陈英祖^[18]的现场观测数据揭示, 当盐度超过 5‰阈值后, 水体盐度对絮凝过程的调控作用呈现衰减趋势。黄建维^[5]和白玉川^[19]分别采用连云港和天津港的原状沙试验研究盐度与泥沙浓度共同作用对泥沙沉速的影响机制, 结果表明在不同泥沙浓度条件下最佳絮凝盐度也会有所不同。

另一方面, 泥沙浓度主要是由于泥沙颗粒形成的絮网结构以及泥沙颗粒间的碰撞作用等因素进而影响细颗粒泥沙群体沉降特性^[20-22]。钱宁^[23]表明在低泥沙浓度条件下, 絮凝作用可显著提高沉速, 而当泥沙浓度增至中高浓度范围时, 絮团持续发育形成空间网状结构, 反而导致沉速急剧下降。金鹰等^[1]通过系统试验观测发现, 沉降速率随泥沙浓度的变化呈现非单调变化特征, 在浓度达到 10 kg/m^3 这一临界值后, 沉降速率转为下降趋势。杨云平等^[24]通过长江口泥沙试验发现, 在泥沙浓度为 15 kg/m^3 时沉速达到最大值, 超过 15 kg/m^3 后沉速开始降低。陈曦^[25]则分别采用长江口北槽洪季和枯季泥沙进行试验研究, 得到最佳絮凝泥沙浓度分别为 4.6 kg/m^3 和 7 kg/m^3 。Mehta 和 Partheniades^[26]基于南卡罗莱纳州和圣弗朗西斯科湾的泥沙样品试验得到的最佳絮凝泥沙浓度相差 10 kg/m^3 以上。

综上所述, 盐度和泥沙浓度均会对细颗粒泥沙的沉降过程产生影响。但目前大部分研究多集中于研究单因素对泥沙沉速的影响, 且不同区域泥沙的研究成果也有所差别。因此, 本文通过采集浙江嘉兴港外海进港航道现场原状泥沙, 通过在沉降桶中配制不同盐度和不同泥沙浓度的均匀悬浊液试验研究盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙的沉速影响规律, 并和前人的

研究结果进行验证对比, 研究结果可为嘉兴港航道泥沙运动规律研究提供参考。

2 试验材料

2.1 试验泥沙

试验细颗粒泥沙取自浙江嘉兴港外海进港航道, 由于现场泥沙多呈密实状态, 通过搅拌使其试验设备在水中分散为均匀悬浮体系, 筛分纯化除去杂质, 得到试验泥沙样品, 具体试验步骤如下:

(1) 将采集的现场泥沙样品置于沉降桶中, 加入清水搅拌混合均匀后静置 6 h;

(2) 静置后去除上层杂质, 采用马尔文激光粒度仪对细颗粒泥沙进行粒径测量;

(3) 重复上述步骤 3 次, 直到分析结果显示细颗粒泥沙级配曲线趋于稳定, 再将泥沙样品烘干待用。

经处理后的泥沙样品采用马尔文激光粒度分析仪进行粒径分布测定, 泥沙级配曲线如图 1 所示, 其中泥样粒径 $D_{10} = 0.857 \mu\text{m}$, $D_{50} = 7.28 \mu\text{m}$, $D_{90} = 28.4 \mu\text{m}$, 可以看出, 经处理后的泥沙样品主要为黏性细颗粒组分, 符合后续试验要求, 可用于试验。

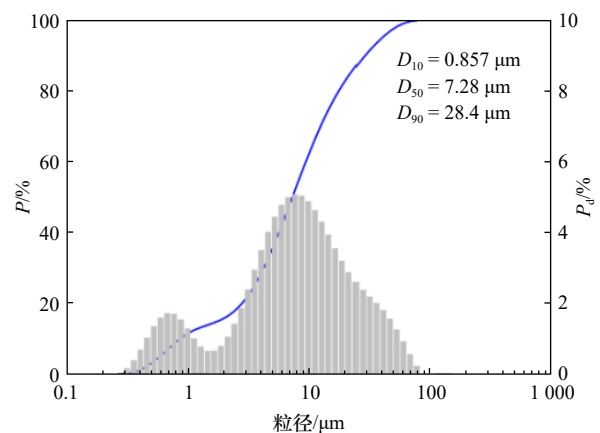


图 1 泥沙样品级配曲线

Fig. 1 Sediment sample grading curve

2.2 试验设备

试验采用的沉降桶由有机玻璃制作而成, 如图 2 所示。沉降桶长度为 15 cm, 宽度为 15 cm, 高为 100 cm, 沉降桶侧壁从上到下分别在 10 cm、20 cm、25 cm、35 cm、40 cm、50 cm、55 cm、65 cm、70 cm 和 80 cm 处共设置了 10 个取样口, 用于不同高度处的泥沙样本采集。

为确保泥沙悬浮液充分混合均匀, 在沉降桶上方配备了电动搅拌装置, 该装置由高强度升降支撑机构、驱动电机、搅拌主轴及叶片构成。系统配置高性能动力组件, 额定功率 60 W, 空载转速最高可达 600 r/min。可以通过调节传动轴的旋转速率与叶片

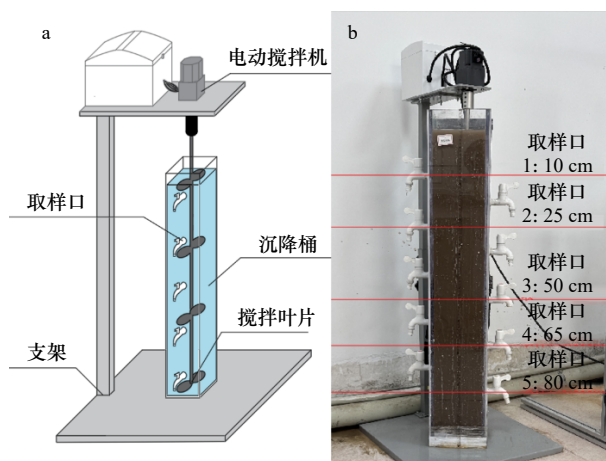


图 2 沉降装置

Fig. 2 Diagram of settling device

a. 示意图, b. 实物图

a. Schematic diagram; b. photograph of the actual object

的大小, 确保细颗粒泥沙悬浊液混合均匀。

3 试验方法

3.1 试验方法

目前研究细颗粒泥沙沉速的室内试验方法主要有底抽管法^[27]、重复深度吸管法^[28]、图像分析法^[29]、LISST-ST 现场试验法^[30]等, 本文试验采用沉降桶进行重复深度吸管的沉降试验。重复深度吸管法是在传统底抽管法基础上改进的一种测量技术, 其主要特点是通过多点同步取样代替单点底部取样, 从而实现对泥沙沉降过程的精确监测^[31]。通过在不同时刻采集不同深度处的泥沙浓度分析泥沙沉速的变化。盐度采用工业氯化钠 (NaCl 纯度 99.9%) 配制不同盐度的悬浊液。嘉兴港外海进港航道位于杭州湾, 属于典型的高浊度河口, 盐度和泥沙浓度变化较大, 综合嘉兴港外海进港航道的实际水文情况, 本文在 0~15‰ 盐度范围和 1~20 kg/m³ 泥沙浓度范围内设置 7 种盐度 (0‰、3‰、5‰、8‰、10‰、12‰、15‰) 和 6 种泥沙浓度 (1 kg/m³、3 kg/m³、5 kg/m³、10 kg/m³、15 kg/m³、20 kg/m³), 共计 42 组试验。

具体试验步骤如下:

(1) 在沉降桶中注入清水至高度 5 cm 处, 按对应的盐度和泥沙浓度投入相应的氯化钠和泥沙样品;

(2) 采用电动搅拌机将悬浊液充分搅拌均匀, 待悬浊液稳定后开始计时试验;

(3) 实验开始后, 分别在 0 s、300 s、900 s、1 500 s、2 100 s 和 3 300 s 6 个时刻在 10 cm、25 cm、50 cm、65 cm、80 cm 5 个取样口进行取样, 每次取样 20 mL, 分别装入对应编号的培养皿中, 具体沉降桶取样口位

置如图 2 所示。

(4) 将试验所取样品放入烘箱烘干后测量取样泥沙质量, 计算各取样点泥沙浓度。烘干后的泥沙样品中存在大量析出的 NaCl 晶体, 由于取样量较少, 这部分质量不可忽略。为准确测定纯泥沙浓度, 根据试验盐度分别计算试验条件下 20 mL 泥沙悬浊液中所含 NaCl 固体的质量, 并在烘干样品总质量中进行扣除。

3.2 泥沙沉速计算方法

泥沙静水沉降过程采用麦克劳林 (R.T. Mclaughlin) 公式计算不同时刻的泥沙沉速^[32]。根据泥沙连续方程可得:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\omega}C)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

对水深 z 进行积分得:

$$(\bar{\omega}C)_{z=h} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h C dz, \quad (2)$$

即:

$$\int_t^{t+\Delta t} [\bar{\omega}C_h(t)] dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_0^h C(z,t) dz dt. \quad (3)$$

假设 Δt 非常小, $\bar{\omega}$ 保持不变, 得到:

$$\bar{\omega} = \frac{\int_0^h [C(z,t) dz - C(z,t + \Delta t)] dz}{\int_t^{t+\Delta t} C_h(t) dt}. \quad (4)$$

通过测量不同沉降时间沿水深 h 泥沙浓度的分布情况, 利用图积分即可得到不同时刻, 不同水深断面处泥沙的瞬时沉速, 而各断面的平均沉速, 一般以泥沙浓度达到初始泥沙浓度的 50% 时的沉降时间 $t_{0.5}$ 内的平均值, 求得泥沙在水深 h 处的断面平均沉速:

$$\omega_{50\%} = \frac{1}{t_{0.5}} \int_0^{0.5} \omega_i dt, \quad (5)$$

式中, ω 为泥沙瞬间沉速, $\omega_{50\%}$ 为达到初始泥沙浓度的 50% 时的平均沉速, h 为水深, t 为沉降时间, C 为泥沙浓度。

4 试验结果分析

考虑到试验组次较多, 图 3 仅部分展示了泥沙浓度为 3 kg/m³、5 kg/m³、10 kg/m³、15 kg/m³ 时盐度为 0‰、8‰、15‰ 工况下的泥沙群体沉速, 图中不同颜色表示不同水深下的沉速变化。

根据泥沙连续方程, 在重力作用下, 泥沙沉速是泥沙浓度和沉降距离的函数, 但由于其他影响因子的共同作用, 使得沉距对沉速影响实际表现可能非常复杂。由图 3 可以看出, 取样深度愈深, 沉速越大, 愈能使泥沙完全发展到群体沉降状态, 表现为泥沙群体沉速^[33]。根据万远扬等的研究, 细颗粒泥沙群体沉速与沉距呈正相关关系^[22], 本次试验结果也验证了这一

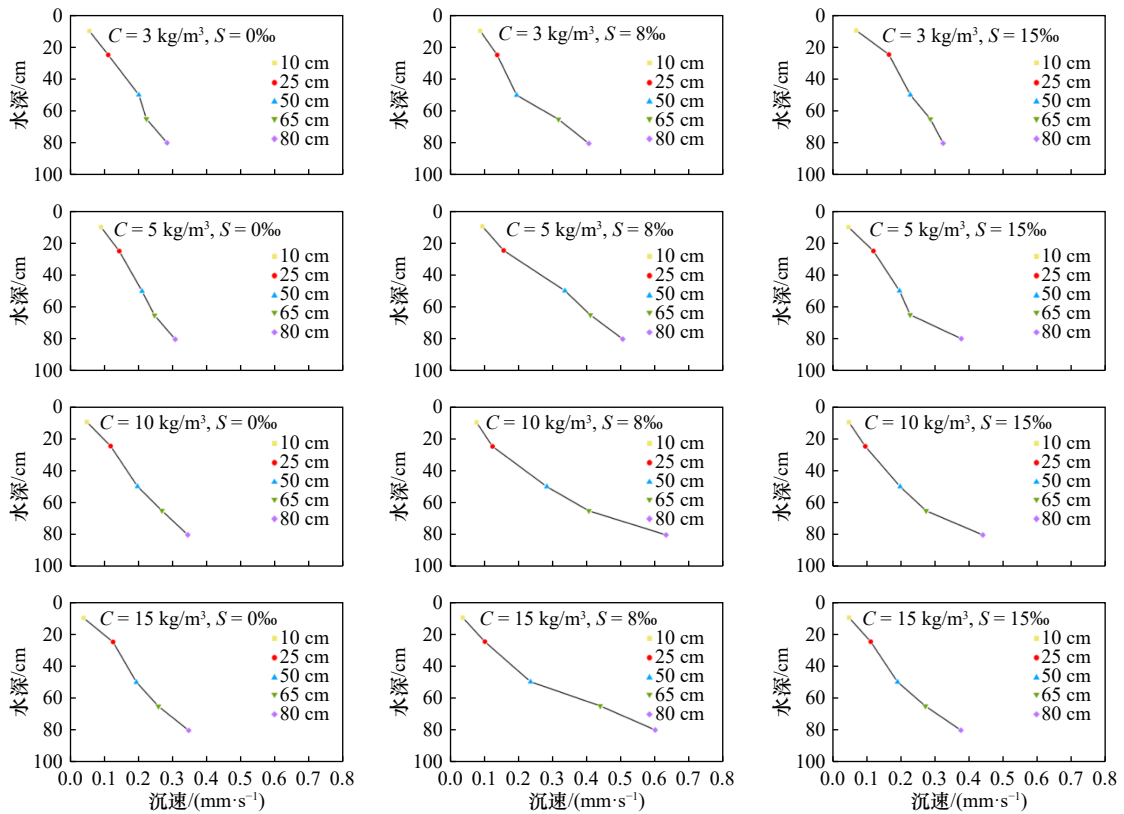


图3 不同工况下的群体沉速

Fig. 3 Group settling velocity under different working conditions

泥沙浓度为 3 kg/m³、5 kg/m³、10 kg/m³、15 kg/m³，盐度为 0‰、8‰、15‰
Sediment concentration: 3 kg/m³, 5 kg/m³, 10 kg/m³, 15 kg/m³; salinity: 0‰, 8‰, 15‰

规律。

为同一化比较不同影响因子对沉速的影响，取水深 80 cm 处的群体沉速代表该组天然沙的群体沉速^[33]。具体各组次沉速计算结果如表 1 所示。

4.1 盐度对细颗粒泥沙沉速的影响

根据表 1 计算结果，不同盐度对细颗粒泥沙沉速影响如图 4 所示。

可以看出，盐度对细颗粒泥沙沉速产生了较大的

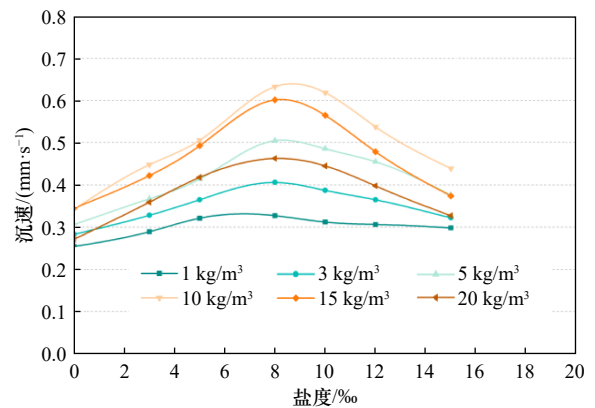


图4 盐度对细颗粒泥沙沉速的影响

Fig. 4 Effect of different salinities on settling velocity

表 1 不同工况下的泥沙沉速 (单位: mm/s)

Table 1 Settling velocity under different working conditions (unit: mm/s)

泥沙浓度	盐度						
	0‰	3‰	5‰	8‰	10‰	12‰	15‰
1 kg/m ³	0.254	0.289	0.321	0.327	0.312	0.306	0.298
3 kg/m ³	0.283	0.328	0.365	0.406	0.387	0.365	0.322
5 kg/m ³	0.306	0.367	0.414	0.505	0.486	0.455	0.376
10 kg/m ³	0.342	0.448	0.506	0.633	0.619	0.538	0.439
15 kg/m ³	0.345	0.422	0.493	0.602	0.565	0.479	0.374
20 kg/m ³	0.271	0.359	0.418	0.463	0.445	0.398	0.327

影响。总体表现为：当盐度处于 0 至 7~9‰ 区间时，不同泥沙浓度的泥沙沉速随盐度增大呈显著增大趋势；而当盐度超过 7~9‰ 后，沉速则呈现下降态势，随后趋于平缓。不同盐度和不同泥沙浓度条件下的泥沙沉速存在较大差异，但不同泥沙浓度时泥沙均在盐度约为 7~9‰ 时达到最大沉速。另外，不同泥沙浓度时最佳絮凝盐度有所不同。1 kg/m³ 泥沙浓度的最佳絮凝盐度约为 7%，10 kg/m³ 泥沙浓度的最佳絮凝盐度约为 9%，随着泥沙浓度增大，最佳絮凝盐度有

所增大。

从曲线变化趋势来看,在盐度0至7~9‰的递增区间内,各泥沙浓度组沉速均随盐度的增加而增加。以10 kg/m³组为例,当盐度从0‰提升至8‰时,沉速由0.342 mm/s增至0.633 mm/s,增幅达85.1%;即使在低泥沙浓度1 kg/m³条件下,沉速也从初始0.254 mm/s提升至0.327 mm/s,增幅达28.7%。这主要是由于低盐度,导致颗粒表面双电层压缩范德华力增强进而促进细颗粒泥沙絮凝^[34]。而当盐度超过7~9‰后,所有工况条件下沉速都开始下降,在盐度10~15‰区间,3 kg/m³泥沙浓度组的沉速从0.406 mm/s快速降至0.322 mm/s,降幅达26.1%;而15 kg/m³高泥沙浓度组沉速降幅更是高达61.0%。这种现象表明较高的盐度会抑制絮凝作用,这主要是由于过量电解质会导致胶体稳定性下降,破坏已形成的絮凝结构;另一方面,盐分导致的渗透压变化会改变颗粒间的接触力学特性,削弱絮团的有效密度^[35-36]。

另外,对比高泥沙浓度与低泥沙浓度情况可以发现。随着盐度的增加,细颗粒泥沙的沉速变化幅度在高泥沙浓度情况下更为显著,如泥沙浓度为15 kg/m³时,沉速随盐度变化幅度可达74.5%;而泥沙浓度为1 kg/m³时,变化幅度仅为28.7%。这表明当泥沙浓度较大时,细颗粒沉速对盐度变化更加敏感。

4.2 泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速的影响

不同泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速影响如图5所示。可以看出,泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速产生了较大的影响。总体表现为:在不同盐度条件下,不同泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速影响呈现出近似的变化规律:细颗粒泥沙在泥沙浓度为8~10 kg/m³左右达到最大沉速,当泥沙浓度小于最佳絮凝泥沙浓度时,泥沙沉速随浓度增大而增大,当泥沙浓度大于最佳絮凝泥沙浓度时,泥沙沉速随浓度增大而减小。另外,不

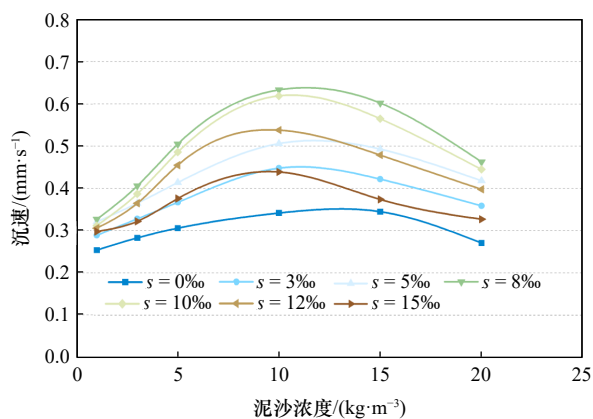


图5 泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速的影响

Fig. 5 Effect of sediment concentration on settling velocity

同盐度条件下最佳絮凝泥沙浓度也有所不同。

当泥沙浓度较小时,泥沙沉速的增速较快,随着泥沙浓度逐渐增大,增速逐渐减小。当泥沙浓度超过5 kg/m³后,沉速增速显著下降,例如在盐度为5‰时,泥沙浓度从5 kg/m³增至10 kg/m³时,沉速仅由0.414 mm/s增至0.506 mm/s增幅为22.2%,远低于前期33.3%的增速。当泥沙浓度超过10 kg/m³后,所有盐度条件下沉速均出现随浓度增加而递减的趋势,如图中泥沙浓度为20 kg/m³时,盐度10‰沉速已降至0.445 mm/s,较峰值下降39.1%。整体来看,当泥沙浓度超过最佳絮凝泥沙浓度后,过高的颗粒浓度反而导致沉速下降。这主要是由于在高泥沙浓度条件下,细颗粒间的碰撞频率虽高,但更易形成松散的絮凝体,颗粒间存在受阻沉降的影响,反而削弱了重力沉降效率^[23]。

当泥沙浓度在最佳絮凝浓度范围8~10 kg/m³时,盐度的共同作用可使沉降速率显著提升;在盐度为8‰、泥沙浓度为10 kg/m³的中等浊度条件下,实测最高沉速达到0.633 mm/s,较盐度为0‰、泥沙浓度为10 kg/m³单一因素作用时的实测最大沉速0.342 mm/s提升85%,可以看出盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙絮凝沉降的共同作用效果显著。

5 盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙静水沉速影响规律分析

5.1 试验结果验证

本文通过试验探究了盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙在静水环境中沉速的影响规律。为验证试验结果的可靠性,本文收集了陈洪松等^[37]、Manning等^[38]、陈曦^[25]及吴宇帆^[39]诸位学者的实测数据,其中陈洪松等的试验泥沙取自黄河流域的壤土耕层,Manning等的试验泥沙取自塞文河口,陈曦的试验泥沙取自长江江口北槽,吴宇帆的试验泥沙取自长江河口,且泥沙中值粒径均在0.01 mm左右。本文试验结果与前人数据进行对比验证如图6所示。

图6中三维曲面为本文实测的沉速结果,不同颜色的离散点代表前人研究的试验结果。通过对比可以看出,本文试验结果与Manning等在沉速随盐度、泥沙浓度变化的总体趋势上较为一致,且不同盐度和泥沙浓度组合下的离散点偏差均较小;当盐度低于5‰且泥沙浓度低于8 kg/m³时,本文试验结果与陈洪松等实验数据的平均绝对误差仅为0.08 mm/s;在盐度高于10‰、泥沙浓度介于12~16 kg/m³的条件下,试验结果与吴宇帆实验数据的偏差在0.12 mm/s以内;

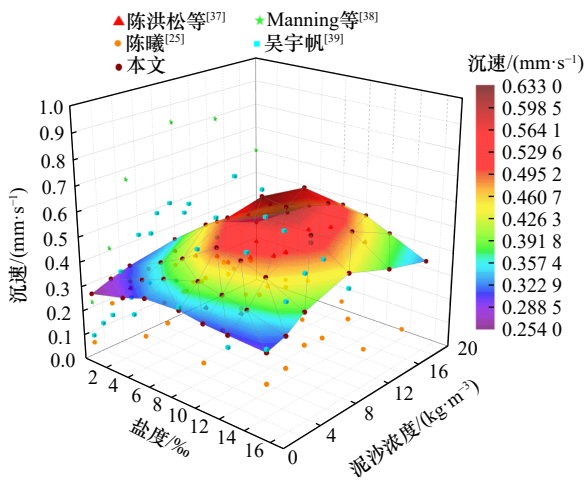


图6 沉速对比曲面

Fig. 6 Comparison surface diagram of settling velocity

对于盐度范围5~10%和泥沙浓度范围4~12 kg/m³, 本文试验结果与陈曦实测数据也较为吻合。总体来看本文试验结果和前人研究的结论较为一致。

但本试验所用现场泥沙的粒径与以往研究有所区别, 泥沙浓度与盐度的覆盖范围较已有研究有所不同。总体而言, 泥沙浓度与盐度对细颗粒泥沙沉速的影响呈现出先促进后抑制的趋势, 但沉降速度和最佳絮凝沉降范围与以往研究存在一定区别, 这主要是由区域泥沙的粒径分布有所不同导致的。

5.2 盐度和泥沙浓度的共同作用

盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙沉速的影响主要通过影响细颗粒泥沙的絮凝, 两者共同作用时必然存在相互影响。为探究盐度与泥沙浓度的共同作用对细颗粒泥沙沉速的影响, 通过单一因素分析法, 分别计算了盐度、泥沙浓度及其共同作用分别对沉速的影响。单一盐度的影响通过计算不同泥沙浓度条件下各盐度组次沉速相对于同浓度下0%盐度组次沉速的变化幅度。单一泥沙浓度的影响通过计算不同盐度条件下各泥沙浓度组次沉速相对于同盐度下泥沙浓度1 kg/m³组次沉速的变化幅度。共同作用的影响以盐度0%、泥沙浓度1 kg/m³工况的沉速为基准, 计算得到二者共同作用下沉速的相对变化幅度。3种因素影响下的沉速变化如图7所示。

由图7可以看出, 盐度和泥沙浓度存在共同作用, 当盐度与泥沙浓度共同作用时, 沉速增幅显著高于单一因素作用的效果, 如盐度8%、泥沙浓度10 kg/m³时, 共同作用下的沉速增幅为149.2%, 较单一盐度作用提升64.1%, 较单一泥沙浓度作用提升55.6%。此外, 不同条件下盐度与泥沙浓度对沉速的影响有所不同。总体表现为, 泥沙浓度小于6 kg/m³较低时, 盐度

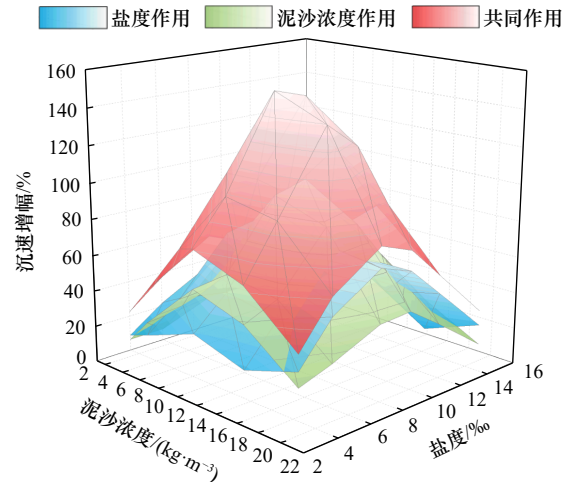


图7 不同因素影响下沉速增幅对比

Fig. 7 Comparison of settling velocity increases under different conditions

的影响超过泥沙浓度的影响, 泥沙浓度在最佳絮凝浓度6~14 kg/m³附近时, 泥沙浓度的作用显著增加, 超过了盐度的影响, 当泥沙浓度大于14 kg/m³较高时, 泥沙浓度的影响又有所增加。这主要是由于不同泥沙浓度条件下盐度对细颗粒泥沙的絮凝影响变化所导致的。泥沙浓度较小时, 盐度的絮凝影响较大, 但泥沙浓度达到最佳絮凝浓度时, 泥沙浓度的影响超过盐度的影响, 泥沙浓度较大时, 受到受阻沉降的影响, 泥沙浓度的影响显著减小。

5.3 盐度和泥沙浓度共同影响下的沉速公式

为了进一步扩大本文试验结果的适用性, 本文基于图8所示的实测数据分布特征, 对盐度与泥沙浓度共同影响下的细颗粒泥沙静水沉速关系进行了公式拟合, 其中S、C分别表示盐度、泥沙浓度, 单位分别为%、kg/m³。

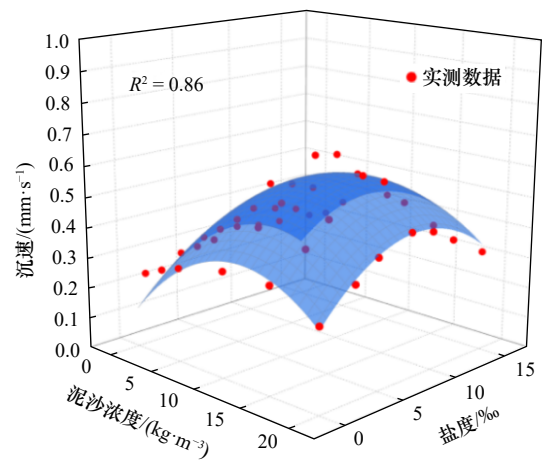


图8 沉速拟合曲面

Fig. 8 Settling velocity fitting surface

在泥沙浓度0~20 kg/m³、盐度0~15%的范围

内,拟合所得曲面如图8所示,拟合公式如下:

$$\bar{\omega} = 0.1298 + 0.0424 \times C + 0.0447 \times S - 0.0018 \times C^2 - 0.0027 \times S^2 + 0.0001 \times C \times S. \quad (6)$$

6 结论

本文以嘉兴港外海航道采集的原状泥沙为研究对象,采用沉降桶在盐度为0~15‰和泥沙浓度为1~20 kg/m³范围内研究了盐度和泥沙浓度对细颗粒泥沙静水沉降的影响规律,为嘉兴港航道泥沙运动规律研究提供了相应的参考。具体结论如下:

(1) 盐度对嘉兴港细颗粒泥沙沉速的影响呈现先增后减的趋势。当盐度低于7~9‰时,盐度促进细颗粒泥沙絮凝使得沉速随盐度增加而增加;但当盐度超过7~9‰后,沉速逐渐下降,嘉兴港细颗粒泥沙的最佳絮凝盐度约为7~9‰;

(2) 泥沙浓度对嘉兴港细颗粒泥沙沉速的影响呈现先增后减的趋势。当泥沙浓度低于8 kg/m³时,沉速随着泥沙浓度增加而增加,当泥沙浓度超过10 kg/m³

后,高浓度泥沙反而会抑制沉降,使沉速下降。嘉兴港细颗粒泥沙的最佳絮凝泥沙浓度约为8~10 kg/m³;

(3) 细颗粒泥沙沉速受盐度与泥沙浓度的共同作用,二者共同作用对沉速的影响超过单一因素的影响。同时,不同盐度和泥沙浓度条件下盐度与泥沙浓度对沉速的影响有所不同;

(4) 拟合建立了盐度和泥沙浓度共同影响下细颗粒泥沙的静水沉速公式,并和前人的研究结果进行了验证对比,结果具有较好的一致性。需要指出的是,本研究基于室内静水沉降试验获得,天然水域中水流紊动、温度变化、泥沙级配及有机质含量等环境因素均可能对细颗粒泥沙絮凝沉降产生影响。因此,在实际应用中,建议结合现场水文泥沙条件对本文所得沉速公式进行相关的校正与修正,以提升其预测精度与适用性。同时,对于其他河口海岸区域,只要其泥沙特性与本文的细颗粒泥沙特性类似,本文结果也有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 金鹰,王义刚,李宇. 长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(3): 61-63.
Jin Ying, Wang Yigang, Li Yu. Experimental study on flocculation of cohesive fine grain sediment at Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Hohai University*, 2002, 30(3): 61-63.
- [2] 时钟,朱文蔚,周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速度[J]. *上海交通大学学报*, 2000(1): 18-23.
Shi Zhong, Zhu Wenwei, Zhou Hongqiang. Settling velocity of fine suspended sediment in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000(1): 18-23.
- [3] Odum B, Xu Chunyang, Chen Yongping, et al. Experimental study on the effect of hydrodynamic conditions on flocculation and settling properties of fine-grain sediment[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2023, 38(6): 821-833.
- [4] Winterwerp J C, Bale A J, Christie M C, et al. Flocculation and settling velocity of fine sediment[J]. *Proceedings in Marine Science*, 2002, 5: 25-40.
- [5] 黄建维. 海岸与河口黏性泥沙运动规律的研究和应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
Huang Jianwei. Research and Application of the Movement Patterns of Viscous Sediments in Coastal and Estuarine Environments[M]. Beijing: Ocean Press, 2008.
- [6] Khelifa A, Hill P S. Models for effective density and settling velocity of flocs. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(3): 390-401.
- [7] 匡翠萍,郑宇华,顾杰,等. 泥沙颗粒团沉速[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12): 1845-1850, 1866.
Kuang Cuiping, Zheng Yuhua, Gu Jie, et al. Settling velocity of sediment particle clouds[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(12): 1845-1850, 1866.
- [8] 郑枫,张金凤,付佳宁. 温度对高岭土絮凝沉降影响的沉降筒实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2018, 33(6): 801-806.
Zheng Feng, Zhang Jinfeng, Fu Jianing. Experiment study on the effects of temperature on the flocculation and settling of kaolinite in the settling column[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2018, 33(6): 801-806.
- [9] 蒋勤,崔莉,聂思航,等. 长江口航道淤泥流变特性试验研究[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 79-87.
Jiang Qin, Cui Li, Nie Sihang, et al. Experimental study on rheological properties of soft mud in Yangtze River Estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 79-87.
- [10] 乔光全,张金凤,张庆河,等. 紊动对黏性泥沙絮凝沉降影响的实验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47(9): 811-816.
Qiao Guangquan, Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, et al. Experimental investigation of the influence of turbulence on the flocculation and settling of cohesive sediment[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(9): 811-816.
- [11] 毛根海,程伟平,章军军,等. 静水中抛泥过程泥沙云团下落运动机理研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(11): 1663-1668.
Mao Genhai, Cheng Weiping, Zhang Junjun, et al. Motion mechanism of particle clouds formed by dumping dredged material into quiescent water[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(11): 1663-1668.

- [12] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 51–57.
Jiang Guojun, Yao Yanming, Tang Ziwen. The analysis for influencing factors of fine sediment flocculation in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(4): 51–57.
- [13] Portela L I, Ramos S, Teixeira A T, et al. Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(sp2): 1188–1193.
- [14] 万远扬, 吴华林, 沈淇, 等. 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评Ⅲ——沉速的影响因子[J]. 水运工程, 2014(5): 21–25.
Wan Yuanyang, Wu Hualin, Shen Qi, et al. Reviews on settling velocity of fine sediment in tidal environment 3: controlling factors[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014(5): 21–25.
- [15] 王家生, 陈立, 刘林, 等. 阳离子浓度对泥沙沉速影响实验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 169–173.
Wang Jiasheng, Chen Li, Liu Lin, et al. Experimental study on effect of positively charged ion in river on the velocity of sediment particles[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(2): 169–173.
- [16] 杨扬, 庞重光, 金鹰, 等. 长江口北槽黏性细颗粒泥沙特性的试验研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 18–24.
Yang Yang, Pang Chongguang, Jin Ying, et al. Experimental study on characteristics of cohesive sediment in North Passage of the Yangtze River (Changjiang) estuary[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(1): 18–24.
- [17] 陈邦林, 陈国平, 韩庆平. 用粉体接触角技术研究长江口表层底泥的润湿性[J]. 海洋科学, 1993(3): 26–30.
Chen Banglin, Chen Guoping, Han Qingping. A study on wettabilities of fine particulate sands in the changjiang river estuary by the contact angle of powder[J]. *Marine Sciences*, 1993(3): 26–30.
- [18] 关许为, 陈英祖. 长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(1): 46–50.
Guan Xuwei, Chen Yingzu. Experimental study on dynamic formula of sand coagulation sinking in stationary water in Changjiang Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 1995, 13(1): 46–50.
- [19] 白玉川. 河口泥沙运动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011.
Bai Yuchuan. Hydrodynamics of Estuarine Sediment Transport[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2011.
- [20] Montserrat F, Suykerbuyk W, Al-Busaidi R, et al. Effects of mud sedimentation on lugworm ecosystem engineering[J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 65(1): 170–181.
- [21] You Zaijin. The effect of suspended sediment concentration on the settling velocity of cohesive sediment in quiescent water[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(16): 1955–1965.
- [22] 万远扬, 吴华林, 沈淇, 等. 长江口悬沙沉速室内试验研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 78–85.
Wan Yuanyang, Wu Hualin, Shen Qi, et al. Experimental study on the settling velocity of suspended sediment in the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(8): 78–85.
- [23] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
Qian Ning. Movement of High-Sediment-Content Water Flows[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [24] 杨云平, 李义天, 胡欣宇, 等. 长江口悬沙浓度变化趋势及成因[J]. 泥沙研究, 2014(6): 51–57.
Yang Yunping, Li Yitian, Hu Xinyu, et al. Variation trend of suspended sediment concentration in Yangtze Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014(6): 51–57.
- [25] 陈曦. 长江口细颗粒泥沙静水沉降试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Chen Xi. Experimental study on deposition in static water of fine sediment of Yangtze River Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [26] Mehta A J, Partheniades E. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1975, 13(4): 361–381.
- [27] 张庆河, 张娜, 胡媚, 等. 黄骅港泥沙静水沉降特性研究[J]. 港工技术, 2005(1): 1–4.
Zhang Qinghe, Zhang Na, Hu Mei, et al. Settling properties of Huanghua Harbour sediment in still water[J]. *Port Engineering Technology*, 2005(1): 1–4.
- [28] 唐杰平, 陈德志, 李高聪. 实验室内细颗粒泥沙沉降速度与悬沙浓度关系评估[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(5): 86–93.
Tang Jieping, Chen Dezhi, Li Gaocong. Evaluation of the relationship between settling velocity and suspended sediment concentration for fine sediment in laboratory[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2023, 42(5): 86–93.
- [29] MoayeriKashani M, Hin L S, Ibrahim S. Experimental investigation of fine sediment deposition using particle image velocimetry[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(19): 655.
- [30] Van Wijngaarden M, Roberti J R. In situ measurements of settling velocity and particle size distribution with the LISST-ST[M]//Winterwerp J C, Kranenburg C. Proceedings in Marine Science. Amsterdam: Elsevier, 2002: 295–311.
- [31] 庞玲, 张科利, 朱明, 等. 泥沙沉降速度实验研究方法回顾与评述[J]. 人民黄河, 2006, 28(5): 50–52.
Pang Ling, Zhang Keli, Zhu Ming, et al. Retrospection and comment on study method of sedimentation velocity tests[J]. *Yellow River*, 2006, 28(5): 50–52.
- [32] McLaughlin R T Jr. The settling properties of suspensions[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1959, 85(12): 9–41.
- [33] 封光寅, 章厚玉, 张孝军, 等. 泥沙群体颗粒平均粒径及平均沉速计算方法的修正[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 36–38.
Feng Guangyin, Zhang Houyu, Zhang Xiaojun, et al. Silt calculation method & formula revision of average particle size and setting velocity[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(6): 36–38.
- [34] 范杨臻, 杨国录, 陆晶, 等. 电离作用下黏性细颗粒泥沙絮凝沉降数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2):

103–108.

Fan Yangzhen, Yang Guolu, Lu Jing, et al. Numerical simulation of flocculation-settling of cohesive fine sediment with ionization[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(2): 103–108.

- [35] 周晶晶, 金鹰, 冯卫兵. 电解质与粘性细颗粒泥沙絮凝的关系[J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2007, 31(6): 1071–1074.
Zhou Jingjing, Jin Ying, Feng Weibing. Relationship between electrolyte and cohesive fine sediment flocculation[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2007, 31(6): 1071–1074.
- [36] 于上, 谢卫明, 何青, 等. 黄河口潮滩泥沙絮凝研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(11): 99–110.
Yu Shang, Xie Weiming, He Qing, et al. Study of sediment flocculation in tidal flat of Huanghe River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(11): 99–110.
- [37] 陈洪松, 邵明安, 李占斌. NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降影响初探[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 131–134.
Chen Hongsong, Shao Ming'an, Li Zhanbin. Preliminary study on the effect of NaCl on fine sediment flocculation and settling in still water[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 131–134.
- [38] Manning A J, Langston W J, Jonas P J C. A review of sediment dynamics in the Severn Estuary: influence of flocculation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 61(1/3): 37–51.
- [39] 吴宇帆. 长江河口细颗粒泥沙沉降速度研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
Wu Yufan. Study on the settling velocity of fine sediment in the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.

Experimental study on the effects of salinity and sediment concentration on the settling velocity of fine-grained sediments in still water

Lu Bingxuan¹, Huang Rui¹, Chen Zhong², Zhang Jiabao¹, Zhang Wei¹

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. China Communications Shanghai Navigation Survey and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Settling velocity is a key parameter in the dynamic characteristics of fine-grained cohesive sediments, holding significant importance for understanding the movement patterns of fine sediments and predicting the evolution of scour and fill in port channels. Due to their small particle size, large specific surface area, and tendency for flocculation between particles, the settling velocity of fine-grained cohesive sediments is influenced by multiple factors, with salinity and sediment concentration exerting particularly significant effects. Using in situ sediment samples collected from the Jiaxing Port channel, 42 sets of hydrostatic settling velocity tests were conducted in a sedimentation tank. These tests covered a salinity range of 0–15‰ and a sediment concentration range of 1–20 kg/m³, examining the combined effects of varying salinity and sediment concentration. The results indicate that when salinity is below 7–9‰, settling velocity increases gradually with rising salinity; beyond this range, settling velocity gradually decreased and stabilised with further salinity increases. For sediment concentrations below 8–10 kg/m³, velocity increased with concentration; above this threshold, velocity progressively decreased. Furthermore, compared to the influence of individual factors, salinity and sediment concentration exhibit synergistic effects, with their combined impact exerting a greater influence on sedimentation velocity. A comparative analysis was conducted on the effects of salinity and sediment concentration on sedimentation velocity under varying conditions. A formula for the hydrostatic sedimentation velocity of fine-grained sediments under different salinity and sediment concentration conditions was established through fitting, and validated against previous research findings. These results may provide relevant reference for studies on sediment transport patterns within the Jiaxing Port channel.

Key words: fine-grained sediment; settling velocity; salinity; sediment concentration; settling column