

连云港30万吨级航道工程疏浚土抛泥 扩散的数值模拟研究*

丁琦, 谢军

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 利用二维潮流泥沙数学模型, 对连云港航道抛泥扩散观测期间的流场和含沙量进行了模拟计算。在对实测成果验证良好的基础上, 研究了各抛泥方案中疏浚土倾倒入所产生的悬浮泥沙的扩散规律及其对周边水域含沙量的影响。研究结果表明, 采用两艘舱容4 500 m³的耙吸式抛泥船, 在拟设抛泥点的流向偏向航道一侧时进行抛泥作业, 所产生的悬浮泥沙能较快地沿水流方向扩散, 高含沙水体的存在时间及扩散距离均较短, 对临近航道含沙量的影响很小。

关键词: 连云港30万吨级航道; 疏浚土; 抛泥扩散; 二维数值模拟

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0025-07

Numerical simulation of diffusion of dredged spoil in 300 000 DWT waterway project of Lianyungang harbor

DING Qi, XIE Jun

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: A 2D tidal current and sediment numerical model was established to simulate the flow field and the sediment concentration during the survey of disposing spoil in Lianyungang waterway. Based on the good certification, the law of the diffusion of the suspended sediment from dredged spoil disposing and its influence on the sediment concentration of nearby water area were studied in different cases. The result of the study showed that if two drag suction dredgers with 4 500 m³ tank volume disposed the dredged spoil at the mud dumping area simultaneously when the flow direction was bias to the nearby waterway, the suspended sediment would spread quickly along the flow direction, the high-concentration water would not last for long and covered a short distance, also it had little influence on the sediment concentration of nearby waterway.

Key words: 300 000 DWT waterway of Lianyungang harbor; dredged spoil; diffusion of spoil after disposing; 2D numerical simulation

连云港港地处江苏省沿海北部黄海海州湾西南岸, 是我国沿海中部能源外运和外贸运输的重要口岸。根据规划, 现有15万吨级连云港航道将逐步扩建至30万吨级, 同时徐圩港区航道也将开挖、扩建。由于本航道疏浚工程的抛泥量较大, 且外航道段离陆地较远, 故采用了在外海设置倾倒入区来处理疏浚土的方法, 主要倾倒入区设置在连

云港航道与徐圩航道交界段东南侧的2#倾倒入区, 总面积约11.9 km² (图1)。中交上海航道勘察设计研究院有限公司于2010年7月4日—7月15日在此倾倒入区南端和东北端分别设置了P1和P2抛泥试验点, 并于各点的4个方向布置观测断面, 对抛泥扩散进行了现场观测。其中P1和P2点靠近航道一侧按潮流旋转方向分别设置3组观测断面, 其它3

收稿日期: 2012-09-09

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划) (2012AA112509)

作者简介: 丁琦 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事河口海岸潮流泥沙数值模拟工作。

个方向各设置1组断面，每个试验点共6组观测断面。观测点及观测断面的具体布置见图1，试验点与航道轴线的距离列于表1。

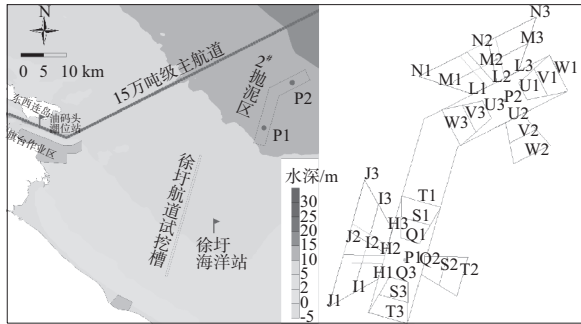


图1 抛泥区位置及观测断面

表1 抛泥点与航道轴线距离 km

试验点	连云港航道	徐圩航道
P1	7.00	4.65
P2	4.59	5.96

根据以往的观测及研究成果^[1]，抛泥过程中大部分疏浚土很快到达床面，部分呈悬浮状态，在波浪、潮流的作用下向周边扩散，对周边水域的回淤可能存在一定影响。本文利用此次试验现场的观测资料，研究了不同时刻抛泥后，悬浮泥沙的扩散规律及其对周边水域含沙量的影响，为优化和指导抛泥作业提供依据。

1 数学模型的建立

1.1 计算范围及网格划分

模型的计算范围东至东经120°16′，北至日照港，西南至海岸线（图2）。

计算区域采用任意贴体坐标进行网格划分，以便较好地拟合连云港深水航道及抛泥区布置；同时为保证数值计算精度，将抛泥区及航道周边水域的网格加密至25 m。

1.2 控制方程及定解条件

疏浚土倾倒后，悬浮的泥沙在潮流及波浪作用下向周边水域扩散。连云港海域的水文要素在垂向上变化较小，采用任意曲线坐标下的二维潮流泥沙模型进行模拟，其控制方程为：

1) 连续方程。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{\alpha} Hu) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{\gamma} Hv) = 0 \quad (1)$$

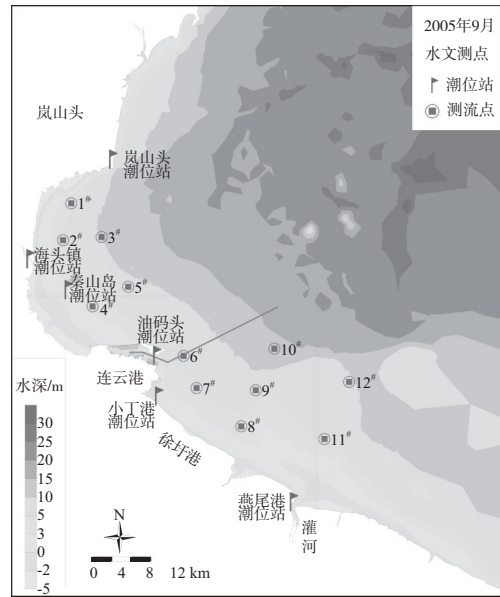


图2 模型计算范围

2) 动量方程。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial u}{\partial \eta} + a_1 u^2 + b_1 uv + c_1 v^2 + \frac{g \nabla}{c^2 H} - f(\beta u + \sqrt{\alpha} v) / J + g \left(\sqrt{\alpha} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) / J = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial v}{\partial \eta} + a_2 u^2 + b_2 uv + c_2 v^2 +$$

$$\frac{g \nabla}{c^2 H} + f(\beta v + \sqrt{\gamma} u) / J + g \left(\sqrt{\gamma} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - \frac{\beta}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) / J = 0 \quad (3)$$

式中： $\alpha, \beta, \gamma, J, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为坐标 x, y 的函数； ζ, η 为任意曲线坐标轴线； ζ 为潮位； u, v 分别为沿 η, ξ 法向流速分量； ∇ 为潮流流速； H 为总水深； c 为谢才系数， $c = \frac{1}{n} H^{1/6}$ ， n 为糙率系数；科氏力参数 $f = 2\omega \sin \phi$ ， ω 为地球自转角速度， ϕ 为所在地区纬度。

3) 悬沙运动方程。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial S}{\partial \eta} - \frac{F_s}{H} - \frac{S_a}{H} = D_s \left(\frac{\alpha}{J^2} \frac{\partial^2 S}{\partial \xi^2} - \frac{2\beta}{J^2} \frac{\partial^2 S}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\gamma}{J^2} \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} + A_\xi \frac{\partial S}{\partial \xi} + B_\eta \frac{\partial S}{\partial \eta} \right) \quad (4)$$

式中： D_s 为扩散系数， $D_s = 5.93 \sqrt{g \nabla H} / c$ ； S 为含沙量； S_a 为抛泥扩散源项； $F_s = \mu \omega (S^* - S)$ 为泥沙冲

淤函数, μ 为泥沙沉降机率, ω 为泥沙沉速; S_0 为挟沙力, 在潮流、波浪共同作用下的悬沙挟沙力 $S_s = k \frac{(|v_1| + |v_2|)^2}{gH}$, 抛泥作业时为正常天气, 平均波动流速 $|v_2| = |v_w| = 0.2 \frac{h}{H} C_w$, h 为波高, C_w 为波速。

方程(1)~(4)定解条件为:

初始条件: $\zeta(\zeta, \eta, t)|_{t=t_0} = \zeta_0(\zeta, \eta)$

$u(\zeta, \eta, t)|_{t=t_0} = 0$

$v(\zeta, \eta, t)|_{t=t_0} = 0$

$S(\zeta, \eta, t)|_{t=t_0} = S_0(\zeta, \eta)$

ζ_0, S_0 为计算初始时刻潮位、含沙量空间分布函数。

边界条件:

在水边界上: $\zeta(\zeta, \eta, t) = \zeta_B(\zeta, \eta, t)$

悬沙按入流: $S(\zeta, \eta, t)|_r = S^*(\zeta, \eta, t)$

出流: $\frac{\partial S}{\partial t} + u_n \frac{\partial S}{\partial n} = 0$

在固边界上: $u=0$ 或 $v=0, \partial S/\partial n = 0$ 。

1.3 计算方法

本模型采用有限差分法中的DSI法, 所用网格

为交错网格, 变量 ζ, u, v 在网格上交错布置, 对时间微分采用前差, 对流项微分采用迎风格式可显著增强计算的稳定性, 其余空间微分均采用中心差分。离散后得到两组三对角系数矩阵, 用追赶法求解。

1.4 模型参数

模型的计算时间步长为6 s, 糙率系数取为0.02; 悬沙沉降几率取0.6, 絮凝沉速取0.05 cm/s, 挟沙力系数 k 根据率定, 取15~50 kg/m³; 正常天气下的波要素采用波浪模型^[2]推算的常年波要素, 抛泥区附近有效波高 $h=0.48$ m, 周期 $T=3.5$ s。

1.5 模型验证

抛泥扩散的现场观测中, 于P1和P2点4个方向的观测断面上共安排了21艘船次进行大、中、小潮期流速、含沙量的测量。本文选用了其中大、小潮期时, 抛泥时刻流向偏向航道一侧的4组测次进行验证, 各测次的具体情况列于表2。

同时考虑到抛泥扩散现场观测的测量范围较小, 模型还采用了2005年9月4日—9日大范围的水文、泥沙测量资料进行验证, 站点位置见图2。

表2 模型验证选用测次情况

潮汛	抛泥点	测量日期及时间	抛泥时流速/(m·s ⁻¹)	抛泥时流向/(°)	本底含沙量/(kg·m ⁻³)
小潮	P1	2010-07-05 T 07:27—08:45	0.334	257	0.06
	P2	2010-07-05 T 18:00—19:24	0.265	15	0.06
大潮	P2	2010-07-13 T 15:26—16:36	0.578	249	0.07
	P1	2010-07-14 T 15:33—17:00	0.587	266	0.07

2005年9月大潮期油码头站潮位、7#测点流速、含沙量验证结果见图3~5, 其余验证结果见文献[3]; 抛泥扩散现场观测的大潮期中, 徐圩海洋站潮位及P1和P2动船取水(分别沿H2-I2-J2及L2-M2-N2方向进行测量)流速、含沙量验证结果见图6~9, 其余验证结果见文献[4]。

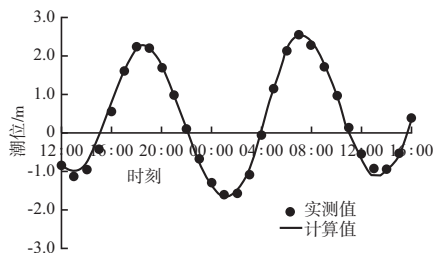
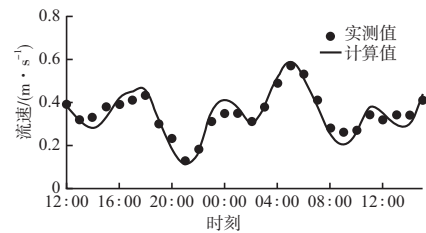
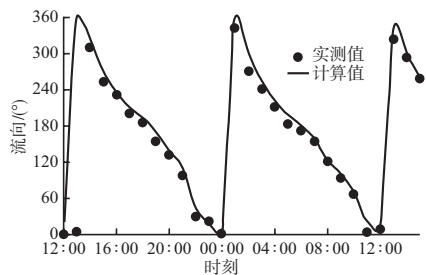


图3 油码头站潮位验证结果(2005年9月大潮)



a) 流速



b) 流向

图4 7#测点验证结果(2005年9月大潮)

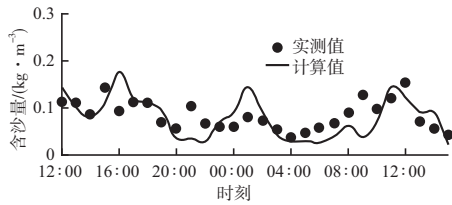
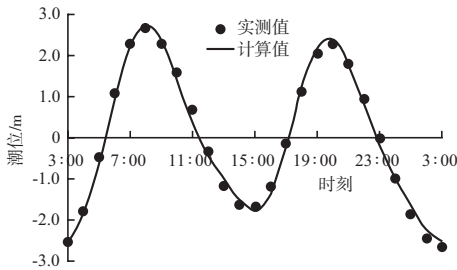
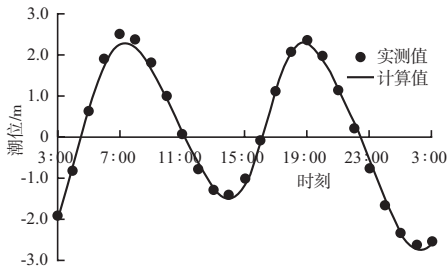


图5 7#测点含沙量结果 (2005年9月大潮)

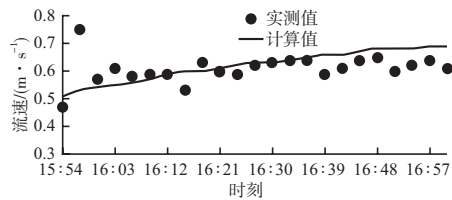


a) P1点抛泥前后

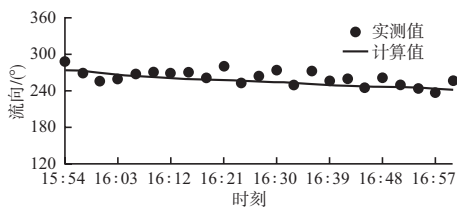


b) P2点抛泥前后

图6 大潮潮位验证结果

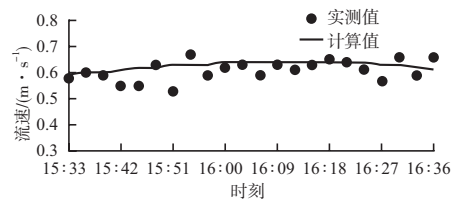


a) 流速

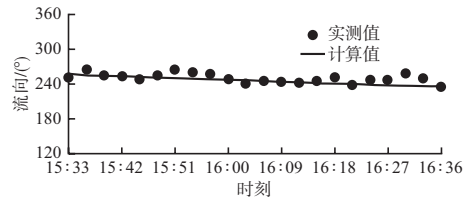


b) 流向

图7 P1点动船取水大潮流速、流向验证结果

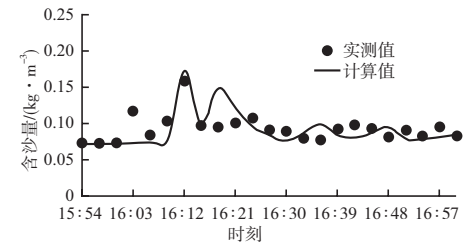


a) 流速

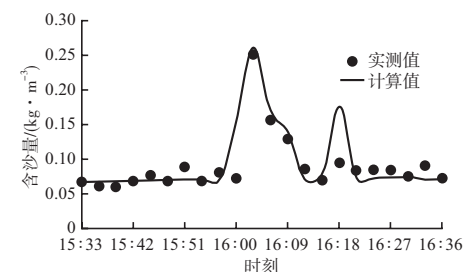


b) 流向

图8 P2点动船取水大潮流速、流向验证结果



a) P1点



b) P2点

图9 动船取水大潮含沙量验证结果

从验证结果来看,模型计算所得的潮位、流速、含沙量与实测值的吻合程度较好,符合相关规范^[5]中的精度要求,所模拟的流场和含沙量场能够较好地体现抛泥区附近的水流特性及抛泥前后的含沙量变化过程。

2 疏浚土抛泥扩散模拟计算与研究

2.1 抛泥方案及源强

考虑到抛泥区周边的潮流为旋转流,抛泥所形成的高含沙水体将主要随逆时针潮流运动,对抛泥点下游侧水域含沙量的影响较大,因而选择了抛泥点流向垂直于航道时进行抛泥的方案,同时在此流向的顺时针和逆时针50°时各设置一组抛泥方案进行比较。源强根据连云港实际作业中的船机配置情况,在原P1和P2抛泥试验点两侧500 m处各设置一条4 500 m³的耙吸式疏浚船同时进行抛泥,具体布置见图10。

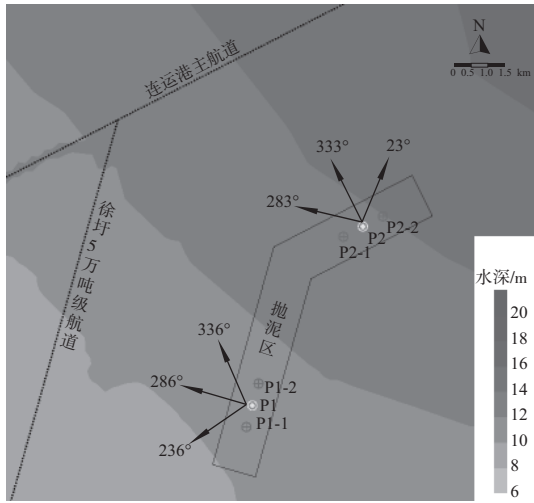


图10 计算方案

每条船的抛泥源强 $S_a = Q \frac{\rho_0 g P}{T}$ ，其中 Q 为每船倾倒的疏浚土量，根据疏浚船的实际装舱容量，取为 $4\ 500\ m^3$ ； ρ_0 为抛泥土的干容重， $\rho_0 = \frac{G_s}{G_s - 1} \times (\rho' - \rho_w)$ ， G_s 为土粒比重，其值为 2.74， ρ' 为抛泥土天然密度，本次观测采用的抛泥土为连云港主航道基建开挖的原状土，天然密度约为 $1\ 430\ kg/m^3$ ， ρ_w 为水的密度，取为 $1\ 025\ kg/m^3$ ，经计算，抛泥土的干密度 ρ_0 约为 $640\ kg/m^3$ ； P 为抛泥产生的悬沙比例，一般取为 $1\% \sim 10\%$ [6-10]，本文结合实测成果，取为 5% ； T 为抛泥时间，取为 $300\ s$ 。

经计算，单船产生的抛泥源强 S_a 约为 $480\ kg/s$ ，取 $500\ kg/s$ 进行方案计算。计算所采用的潮型为 2010 年 7 月 13 日—7 月 14 日的大潮，以及 2010 年 7 月 5 日的小潮，抛泥时抛泥点附近的流场情况列于表 3。

表3 抛泥时抛泥点附近的流场情况

抛泥点	流向/(°)	潮型	流速/(m·s ⁻¹)	潮段时刻
P1	336	大潮	0.41	落憩
		小潮	0.23	
	286	大潮	0.46	涨急前 1.5 h
		小潮	0.25	
	236	大潮	0.72	涨急
		小潮	0.37	
P2	23	大潮	0.34	落憩前 1 h
		小潮	0.27	
	333	大潮	0.31	落憩
		小潮	0.22	
	283	大潮	0.43	落憩后 1 h
		小潮	0.28	

2.2 抛泥影响的判断标准

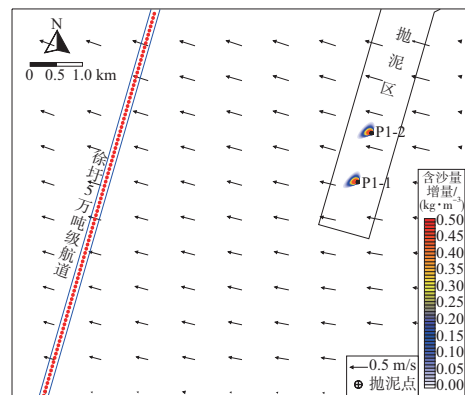
在本文的研究中，抛泥作业对周边海域含沙量的影响程度以抛泥后含沙量相对于抛泥前本底含沙量的增加量来表征。考虑到抛泥作业一般在风浪较小时进行，而 2# 抛泥区周边海域在正常天气下的含沙量较低，在大、小潮时分别仅为 $0.07\ kg/m^3$ 和 $0.06\ kg/m^3$ 左右，因而宜选取接近于本底含沙量的含沙量增量来进行分析。在本文中主要以 $0.05\ kg/m^3$ 的含沙量增量为衡量标准，通过分析此含沙量增量的变化及扩散范围来判定各抛泥方案对周边海域含沙量的影响。

2.3 抛泥扩散时间与路径

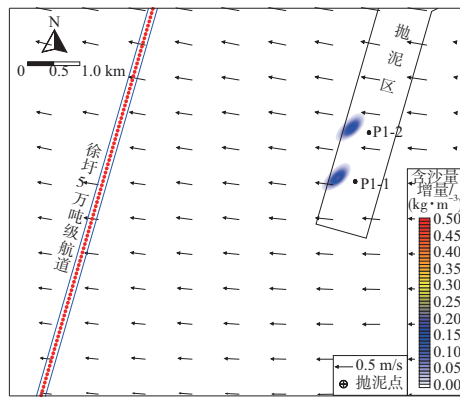
根据计算，各方案中含沙量增量的持续时间列于表 4。由于 P1 点和 P2 点抛泥后含沙量的变化规律基本一致，文中给出 P1 抛泥点于大潮期，在流向垂直于航道时刻（ 286° ）抛泥后，含沙量增量的变化过程，见图 11。

表4 各含沙量增量持续时间 min

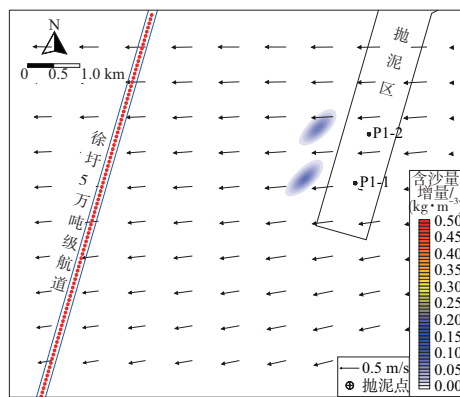
潮型	抛泥点	抛泥时流向/(°)	含沙量增量/(kg·m ⁻³)	
			0.05	0.50
大潮	P1	336	50	3
		286	56	2
		236	65	5
	P2	23	73	20
		333	50	3
		283	51	2
小潮	P1	336	80	8
		286	111	7
		236	107	13
	P2	23	90	24
		333	70	7
		283	80	5



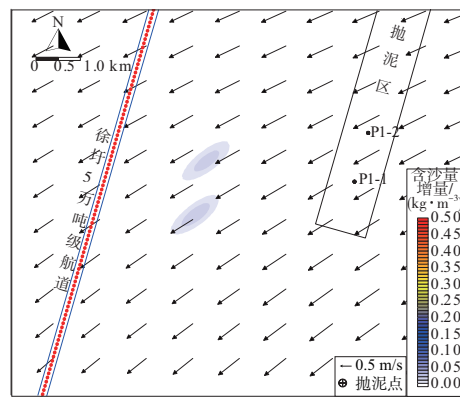
a) 抛泥结束时刻



b) 抛泥后10 min



c) 抛泥后30 min



d) 抛泥后90 min

图11 P1点大潮期抛泥后含沙量增量变化过程

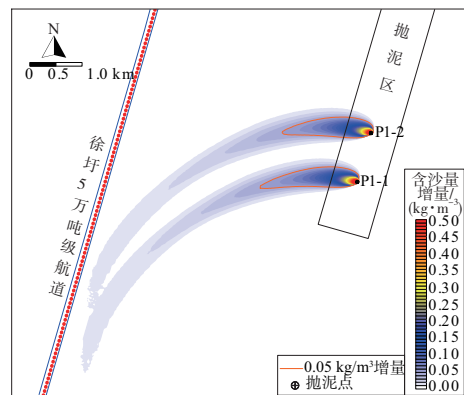
大潮抛泥过程中，抛泥点附近水域含沙量增量较大，在 1.0 kg/m^3 以上，高含沙水体以抛泥点为中心向周围扩散，沿水流方向扩散较快；抛泥结束后，高含沙水体的中心随水流运移，逐渐远离抛泥点，其运移轨迹与海流方向基本一致。随着悬浮泥沙的扩散，含沙量逐渐减小至本底水平，水体中高含沙量的持续时间很短， 0.5 kg/m^3 以上的含沙量增量仅能持续3~20 min；而经过50~73 min后，含沙量的增量已降低至 0.05 kg/m^3 以下。

小潮时水动力条件较弱，高含沙水体的扩散

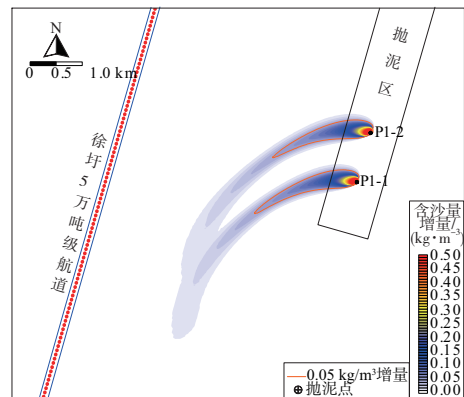
速率较慢，含沙量增量降低至 0.05 kg/m^3 以下需要70~111 min，但高含沙水体的变化及输移规律同大潮时一致。

2.4 抛泥影响范围

将抛泥及扩散过程中各时刻的最大含沙量增量集合起来，可得抛泥扩散的影响范围，抛泥时流向垂直于临近航道（P1点为 286° ，P2点为 333° ）的情况见图12~13； 0.05 kg/m^3 含沙量增量的扩散距离及其与航道的最近距离列于表5。



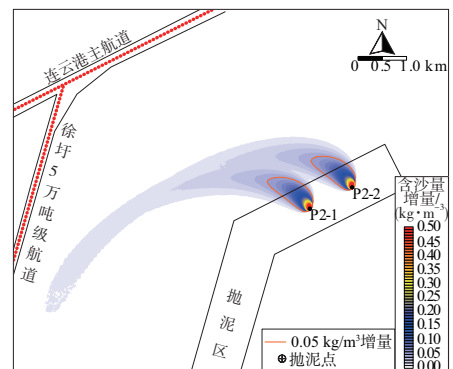
a) 大潮



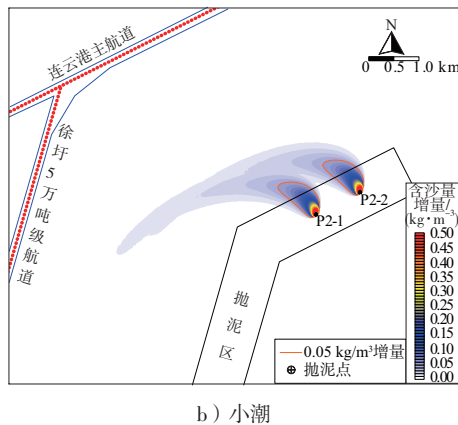
b) 小潮

注：流向垂直于徐圩航道时开始抛泥。

图12 P1点抛泥后含沙量增量分布



a) 大潮



b) 小潮

注: 流向垂直于连云港航道时开始抛泥。

图13 P2点抛泥后含沙量增量分布

表5 抛泥后0.05 kg/m³含沙量增量影响范围 km

抛泥点	潮型	抛泥时 流向/(°)	最远扩散 距离/km	距主航道最 近距离/km	距徐圩航道最 近距离/km
P1	大	336	1.27		3.44
		286	1.88		2.81
		236	2.56		3.42
	小	336	1.09		3.51
		286	2.07		2.84
P2	小	236	2.22		3.57
		23	1.32	3.23	4.96
		333	1.07	3.53	3.99
	大	283	1.60	3.84	4.01
		23	1.19	3.35	5.00
		333	0.97	3.60	4.63
		283	1.48	3.92	4.14

注: 由于P1抛泥点距连云港主航道较远, 表中不列出抛泥对其影响。

由图表可见, 大潮时由于水动力条件较强, 抛泥扩散的影响范围总体上要大于小潮。各方案中含沙量增量的分布规律基本一致, 由抛泥点向潮流方向扩散, 等值线呈现出向逆时针偏转的特征。随抛泥时刻的不同, 高含沙水体的扩散距离以及影响范围有较为明显的差别, 具体如下:

1) P1点抛泥。流向236°时开始抛泥, 由于流速最大(表2), 因而扩散距离最远, 但由于此后高含沙水体逐步随流向偏离徐圩航道, 对其影响反而较小, 0.05 kg/m³的含沙量增量与其最近距离在大、小潮时分别为3.42 km和3.57 km; 流向286°时开始抛泥, 处于流速逐渐增大的阶段, 同时流

向指向徐圩航道, 对其影响略大, 0.05 kg/m³的含沙量增量与其最近距离在大、小潮时分别为2.81 km和2.84 km; 而流向336°时开始抛泥, 流速最小, 因而扩散距离最小。

2) P2点抛泥。由于P2抛泥点的流向偏向航道时处于憩流前后, 流速都较小, 因而各方案中, 高含沙水体的扩散距离较小, 0.05 kg/m³的含沙量增量的扩散距离在0.97~1.6 km, 与两航道的距离也基本在4 km以上。

可见, 各方案中所采用的抛泥方式, 所产生的悬浮泥沙仅能影响抛泥点下游侧约1~3 km水域的含沙量, 不会对航道周边水域的含沙量产生明显的影响。

3 结语

根据模型计算结果, 在拟设P1和P2抛泥点附近, 采用两条舱容4 500 m³的耙吸式疏浚船同时在流向偏向于航道一侧时进行抛泥作业, 所产生的悬浮泥沙均较快地沿流向方向扩散。大潮时水体中高浓度含沙量的扩散速率要大于小潮, 0.05 kg/m³的含沙量增量持续时间在大、小潮时分别为50~73 min和70~111 min, P1和P2点抛泥后其扩散距离分别为1.09~2.56 km和0.97~1.6 km, 大潮时的扩散范围总体上要略大于小潮, 但与临近航道的距离均在2.8 km以上。可见, 各方案中所采用的抛泥方式都不会对附近航道水域的含沙量产生明显影响。

由于本次抛泥观测采用的疏浚土为连云港主航道的深层开挖土, 而在今后航道维护期中, 倾倒的主要为航道回淤土, 其密度将小于基建疏浚期, 抛泥过程中形成的悬浮泥沙密度将增大, 高含沙水体的扩散距离及持续时间有可能增加; 此外, 若采用更大舱容的抛泥船进行抛泥作业, 对周边含沙量的影响也可能大于文中研究的情况。因此, 除必须在指定的抛泥区范围内抛泥以外, 还应注意尽量避免在落潮流向为280°~330°时抛泥, 以降低抛泥悬浮泥沙进入航道的几率。

(下转第36页)