

港口疏浚产生悬浮物三维数值模拟

张 聃¹ 韩龙喜¹ 金 坚²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要: 为研究港口疏浚产生悬浮物的输运规律, 建立了三维潮流及悬浮物数学模型, 模型中主要考虑了潮流等因素作用下悬浮物的三维输运以及悬浮物的扩散、沉降和再悬浮作用。将模型应用于大丰港拟建码头疏浚区疏浚产生悬浮物输运数值模拟预测, 模拟了工程海域潮流场及悬浮物浓度场, 并根据预测结果初步分析了其对水环境的影响。分析结果表明, 疏浚对海水水质影响很小, 且影响主要集中于施工期。

关键词: 港口疏浚; 悬浮物; 三维数值模拟

中图分类号: TV851 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2008)S1-0030-04

在港口、码头的建设过程中, 一般都要进行疏浚作业, 在施工过程中容易因泥沙搅动、外泄而产生悬浮物。在潮流等动力因素的作用下, 悬浮物向周围扩散, 导致以施工区为中心的附近海域海水混浊度增加, 对海水水质造成影响, 因此有必要对悬浮物的影响范围进行研究, 为进一步评价海水水质提供技术依据。

疏浚施工产生的悬浮物大部分是海底淤积泥沙, 因此其输运过程也往往借用泥沙动力学的基本理论进行模拟。Van Rijn 对非黏性悬浮物的沉降及再悬浮机理进行研究, 建立了非黏性悬浮物输移基本理论^[1]。Ziegler 等^[2]将 Van Rijn 模式应用于 Pawtuxet 河, 计算所得结果与实测结果吻合较好。Gailani 等^[3]对黏性悬浮物的沉降及再悬浮规律进行了研究, 所得成果较为广泛地应用于海洋悬浮物浓度场的计算中。本文在对大丰港附近海域潮流场模拟的基础上, 应用 Van Rijn 模式对疏浚产生悬浮物的扩散输移进行数值模拟, 并初步分析其对环境的影响。

1 潮流及悬浮物数值模型

1.1 控制方程

在流体不可压缩、Boussinesq 和静压假定下, 给出笛卡尔坐标系下三维斜压原始方程组。

连续方程

$$\nabla v + \frac{\partial w}{\partial Z} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v \nabla u + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = & - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2 A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = & - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2 A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\rho g = - \frac{\partial P}{\partial z} \tag{4}$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度; ρ_0 为参考密度; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; P 为压强; K_M 为垂向涡黏性系数; f 为科氏参数; A_M 为水平涡黏性系数。

为精确计算控制方程(1)~(4)中的垂向涡黏性系数 K_M 及垂向紊动扩散系数, 采用 2.5 阶 Mellor-Yamada 紊流闭合模型求解紊动能和混合长度。

悬浮物输运方程: 悬浮物数学模型包含了悬浮物的输运、沉积及再悬浮过程, 其三维输运控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s) C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

作者简介: 张聃(1983—), 男, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 从事环境水力学研究。E-mail: zdan_sharp@163.com

式中： C 为悬浮物质量浓度； w_s 为悬浮物沉降速度； A_H 为水平紊动扩散系数； K_H 为垂向紊动扩散系数。

1.2 边界条件

区域开边界上水位、温盐和悬浮物质量浓度由实测资料确定，岸边界上法向流速定为零。自由表面和床面水流边界可分别表示如下：

自由表面

$$\begin{cases} \rho_0 K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{ox}, \tau_{oy}) \\ w = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \end{cases}$$

床面

$$\begin{cases} \rho_0 K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \\ w_b = -u_b \frac{\partial H}{\partial x} - v_b \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases}$$

自由表面不考虑大气沉降的颗粒物质，床面悬浮物的沉降和再悬浮视为其扩散的汇和源，则悬浮物边界条件表示为

$$\begin{aligned} K_H \frac{\partial C}{\partial z} &= 0 & z \rightarrow \eta \\ K_H \frac{\partial C}{\partial z} &= E - D & z \rightarrow -H \end{aligned}$$

式中： E 和 D 为再悬浮和沉积通量； η 为自由表面； H 为水深。

根据研究海域地质成分分析，本文采用 Van Rijn 模式模拟计算再悬浮及沉积通量，计算式为

$$\begin{aligned} E &= \frac{(\rho_s q_s - qzC_z)\Delta t}{\Delta x \Delta y} \\ D &= w_s C \end{aligned}$$

式中： ρ_s 为泥沙密度； q_s 为悬浮负荷； q 为底层流量； C_z 为底层 SS 浓度； Δt 为时间步长； $\Delta x \Delta y$ 为底层的表面面积。

1.3 动边界处理

以江苏省大丰港海域为例，研究码头前沿疏浚施工产生悬浮物的浓度场分布特征。大丰港附近海域近岸有宽阔的潮间带，高潮淹没，低潮露出，在模型计算时需要进行动边界处理。目前应用较多的动边界处理方法有冻结法、窄缝法、开挖法以及干湿法等。实践经验表明^[4]，用干湿法进行动边界判别既简单又实用，其基本思想为：在存在露滩现象的浅滩，涨潮时滩面被逐渐淹没，落潮时逐渐干出。选定一临界水深 H_{dry} （通常取 10 ~ 20 cm），当在某一时刻某一网格单元的实际水深 $H \leq H_{dry}$ 时，认为该单元干出，令单元各边流速值及泥沙浓度为零；当某一个时刻某一网格单元的实际水深 $H > H_{dry}$ 时则认为该单元被淹没，恢复正常程序计算。对于有可能出现

干出和淹没的网格单元，每隔一个时间步长进行一次干出和淹没的判断。

1.4 离散方法

模型采用模态分裂的方法将控制方程分为二维的外模式及三维的内模式进行求解。平面外模式控制方程采用显式差分格式离散；三维内模式控制方程垂向采用隐式差分格式离散，可适当减小垂向网格步长，提高垂向分辨率。

2 模型应用及结果分析

2.1 研究区域概况

本研究范围为大丰港附近，生死港至川港之间海域（33°10.5' ~ 33°17.7' N，120°41.7' ~ 120°53.8' E，见图 1），为建设大丰港二期工程，拟对港区码头前端海域进行疏浚。工程区一带为粉砂淤泥质平原海岸，岸外西洋水道近南北向延伸，与岸线走向大致平行。

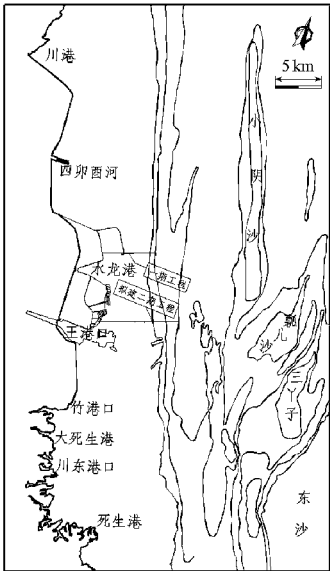


图 1 研究区域示意图

本海域底质呈黄灰色，成分为黏土质、粉砂、砂，致密的、无黏性、不可塑、分选良，含有少量贝壳。经分析，粒径 0.004 mm 以下的黏土占 1.80% ~ 19.81%，粒径 0.008 ~ 0.032 mm 的粉砂占 6.12% ~ 56.76%，粒径 0.063 ~ 0.500 mm 的砂占 23.43% ~ 92.08%。底质中值粒径为 0.015 4 ~ 0.087 9 mm，取其均值 0.052 mm 作为计算所用的悬浮物中值粒径。

2.2 定解条件

2.2.1 模型参数选取

模型在水平方向采用矩形网格布置，空间步长为 500 m × 500 m，施工区附近对网格进行局部加密，加密后网格单元数为 88 × 161 个；垂向采用 σ 坐标系，平均分为 10 层。模型内模式时间步长取为 60 s，外模式时间取为 1 s。经模型率定，海底粗糙高度 z_0 取为 0.002。

2.2.2 边界条件及初始条件

水位边界条件由东中国海潮波模型得出,选取2006年2月13~14日的25h的水位过程作为模型水力边界条件。初始水位及初始流速均设为零。

为反映疏浚引起的人为增加的泥沙量,悬浮物模型的边界条件为 $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$,即开边界处悬浮物的浓度梯度为零。

2.2.3 悬浮物源强

由于绞吸式挖泥船能较好地控制悬浮物的产生,故本疏浚项目拟采用该类船只。通常情况下绞吸式挖泥船产生的悬浮物量可以用下式计算^[5]:

$$Q = \frac{W_0 R}{R_0} T \quad S_0 = \frac{Q}{AH}$$

式中: Q 为悬浮物产生量,t/h; W_0 为悬浮物发生系数,可取 $1.45 \times 10^{-3} \text{ t/m}^3$; R 为指定发生系数 W_0 时悬浮物粒子粒径累计百分比; R_0 为现场流速悬浮物界限粒子累计百分比; T 为疏浚量, m^3/h ; S_0 为悬浮物发生浓度; A 为作业区面积; H 为作业区水深。

结合研究海域底质情况,通过公式计算得出疏浚量为 $1600 \text{ m}^3/\text{h}$ 时悬浮物的产生量为 7.2 kg/s 。根据交通部天津水运工程科学研究所的现场模拟,得到在相同疏浚量时悬浮物平均产生量为 2.4 kg/s ,取二者平均得出本项目的源强为 4.8 kg/s 。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 流场特征

由计算结果及图2和图3可知,大丰港码头所在西洋深槽海域为强海流区,主流向与岸线大致平行,近似呈南北向往复流,涨潮流向偏南,落潮流向偏北,由于岸线及水下地形较为复杂,不同区域的水动力特征也各不相同。

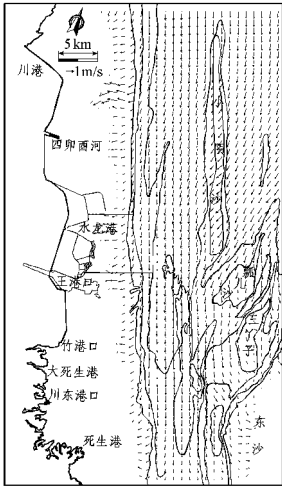


图2 涨急表层流场

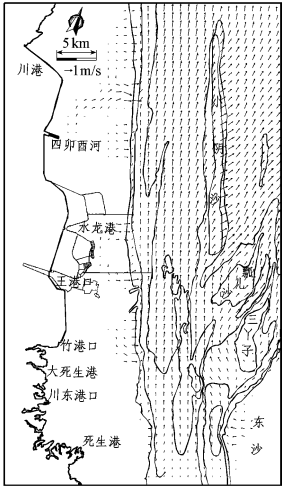


图3 落急表层流场

近岸及沙脊群潮滩宽阔,涨潮及落潮时均表现出与主流成较大角度的漫滩流或归槽流。涨潮时,

涨潮流沿西洋深槽向岸边流动,区域东侧水流越过小阴沙、瓢儿沙和三子丫与深槽水流汇合。由于东沙滩地势较高,涨潮过程中同样出现较为明显的漫滩流。落潮时的水流基本与涨潮路线一致。

西洋深槽由于受到两侧滩地的制约,水流基本以往复流为主,且流速强、流向稳、转流快。最大流速一般出现在中潮位,涨潮流速大于落潮流速,小潮时涨急表层流速可达 1.6 m/s ,落急表层流速可达 1.1 m/s 。表层流速大于底层流速,底层流速在 $0.4 \sim 0.9 \text{ m/s}$ 之间。高低潮位为转流时表现为憩流,流速较小。涨急及落急时流场见图2、图3。

2.3.2 模型验证

选取2006年2月13日9时至14日9时的实测水位流速对模型进行率定验证。由图4、图5可知,计算水位、流速过程与实测值吻合较好,能满足模型预测要求。

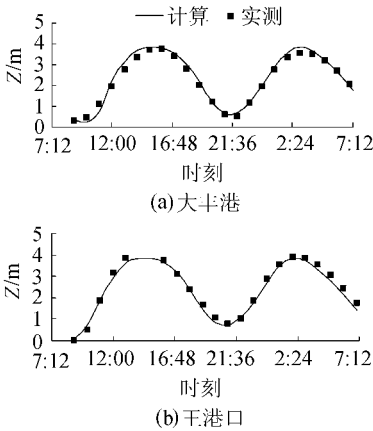


图4 水位过程验证

2.3.3 悬浮物分布特征

对预测结果分析可知,由于疏浚发生区域已位于深槽边缘,产生的悬浮物进入水体后主要随潮流沿近似南北方向流动,且由于水体的紊动作用,悬浮物沿垂直于流速方向横向扩散。涨潮时,潮流自北向南运动,在施工区南侧形成一悬浮物带,随着流程的增加,由于扩散及沉降的共同作用,底层悬浮物浓度不断减小,表层悬浮物浓度则先增大,然后逐渐减小。涨急时流速较大,水流的紊动作用较强,施工区中心点悬浮物浓度迅速降低,其影响范围较小。憩流时,水流紊动作用最弱,施工区底层悬浮物浓度较高,其影响范围也较大。

落潮时,潮流自北向南运动,由于悬浮物的沉降作用及随流运动特性,累积作用对浓度场影响较小,悬浮物带基本位于施工区北侧。落急和落憩时浓度场分布规律与涨急、涨憩时基本一致。涨急和落急时底层的悬浮物浓度分布见图6,悬浮物沿流线方向的质量浓度分布见图7。

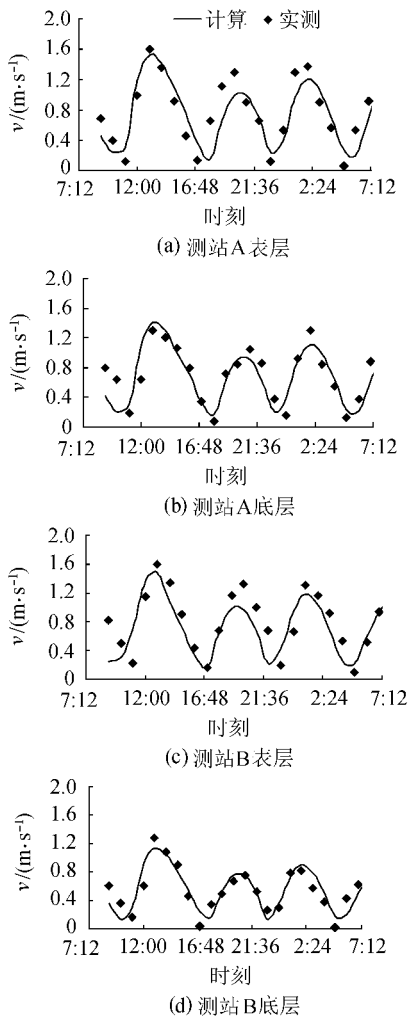


图5 流速过程验证

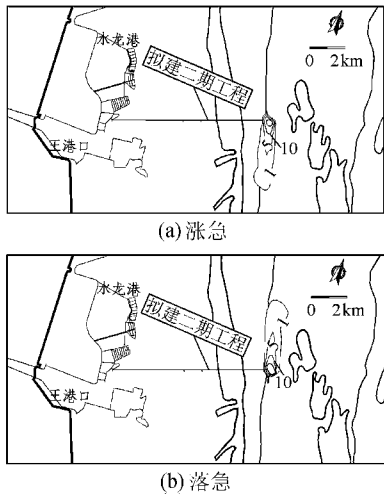
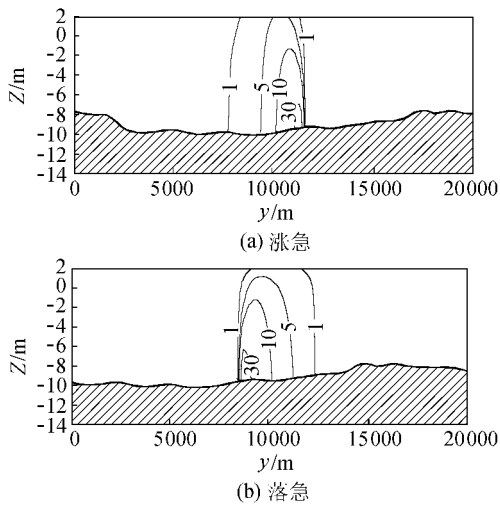


图6 底层悬浮物浓度等值线

根据绞吸式挖泥船的挖泥原理及特点,本文计算中假定悬浮物发生源位于底层附近,从图7中可以看出底层悬浮物浓度较高,并沿流线及向水面方向递减。因此,表层悬浮物的最高浓度点并不在发生源所在轴线处,而是在其沿流线方向一定距离的某一位置。涨急和落急时由于水流掺混能力较强,表层悬浮物浓度相对较大。涨憩和落憩时则由于水



流的紊动作用较弱,只有少量的悬浮物扩散至表层,因此,憩流时表层的悬浮物浓度较涨急、落急时要小。涨急、落急等典型流态下悬浮物增量等值线面积见表1。

表1 悬浮物质量浓度增量等值线面积 km²

潮流状态	垂向位置	$\rho(SS)=5 \text{ mg/L}$	$\rho(SS)=10 \text{ mg/L}$	$\rho(SS)=100 \text{ mg/L}$
涨急	表层	0	0	0
	底层	0.90	0.35	0
落急	表层	0	0	0
	底层	1.09	0.46	0
涨憩	表层	0	0	0
	底层	0.72	0.42	0.005
落憩	表层	0	0	0
	底层	0.75	0.47	0.001

2.3.4 疏浚对环境初步影响分析

本文采用 GB 3097—1997《海水水质标准》中以悬浮物人为增加量的大小来判别海水水质类别的方法分析疏浚施工对海域环境的影响。根据标准,悬浮物人为增加量小于 10 mg/L 的为第 1 类或第 2 类海水,大于 10 mg/L 且小于 100 mg/L 的为第 3 类海水。由以上计算结果可知,底层涨急时刻悬浮物浓度增量大于 10 mg/L 的区域面积为 0.35 km²,涨憩时为 0.42 km²,落急时为 0.46 km²,落憩时为 0.47 km²;悬浮物增量大于 100 mg/L 的情况仅出现在憩流时,且范围较小,只位于底层,表层悬浮物人为增加量均在 5 mg/L 以下。因此,本项目疏浚对海水水质影响很小,且主要发生于海底附近。

3 结论

a. 建立了三维海洋水动力及悬浮物数学模型,并应用于大丰港附近海域。水动力模拟结果与实测水位、流速吻合较好,满足悬浮物数值模拟的要求。

(下转第 57 页)

的水化速率与 C_2S 相似,水化引起的收缩略大于基准水泥浆^[7]。所以,当矿渣粉的掺量为 30% 时,掺矿渣粉浆体的化学收缩高于纯水泥浆体;但当掺量为 60% 时,由于部分矿渣粉末完全反应,其化学收缩低于纯水泥浆体。

2.4 磷渣粉对化学收缩的影响

粒化电炉矿渣具有较高的活性,但在一般条件下,磷渣并不具有水硬性,只有在激发剂存在的情况下才能发生水化反应,形成胶凝物质并具有水硬性。

掺磷渣的水泥加水后,首先是水泥熟料矿物发生水化反应,生成的氢氧化钙成为磷渣的碱性激发剂,使磷渣中的 Ca^{2+} 、 AlO_4^{5-} 、 Al^{3+} 、 SiO_4^{4-} 离子进入溶液,生成水化硅酸钙、水化铝酸盐等新的水化产物。由于石膏的存在,还会有水化硫铝(铁)酸钙、水化硅铝酸钙 C_2ASH_8 和水化石榴子石 C_3AH_6 等的生成。在磷渣玻璃体结构中, $Si-O$ 、 $P-O$ 和四配位的 $Al-O$ 是网络形成体,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和六配位的 Al^{3+} 是网络改性离子。磷渣与矿渣相比,其网络形成体较多,故其玻璃体结构更为牢固,活性较低。因此在同等激发条件下,磷渣的反应量低于矿渣,在相同龄期时,磷渣的化学收缩较低^[8]。

3 结 语

通过试验研究了粉煤灰、磷渣粉、矿渣粉 3 种矿物掺合料对胶凝材料化学收缩的影响,结果表明,纯水泥浆体的化学收缩主要与水泥的矿物组成有关,

掺合料的掺入改变了水泥基材料体系的水化速率,进而改变其化学收缩速率,3 种掺合料均可使水泥浆体早期的化学收缩降低,而矿渣粉和磷渣粉的掺入使水泥浆体的化学收缩在后期有一定的增长,且矿渣粉较磷渣粉的活性更高,粉煤灰可以较好地抑制水泥浆体的化学收缩。

参考文献:

[1] 席耀忠. 水泥混凝土的体积变形及其测量[J]. 混凝土, 2000(9): 35-38.
[2] TAZAWA E I. Autogenous shrinkage of concrete[M]. London and New York: E & FN Spon, 1999: 3-27.
[3] 1608-06, Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste[S].
[4] 高英力, 姜诗云, 周士琼, 等. 矿物超细粉对水泥浆体化学收缩的影响研究[J]. 水泥, 2004(7): 8-11.
[5] PAULINI P. A weighing method for cement hydration[C]// MULLICK A K. The 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi, India: National Council for Cement and Building Materials. 1992, 248-254.
[6] GEIKER M, KNUDSEN T. Chemical shrinkage of portland cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1982(12): 603-610.
[7] MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. 混凝土. 2 版.[M]. 吴科如, 张雄, 姚武, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005, 85-92.
[8] 翟红侠, 廖绍锋. 磷渣硅酸盐水泥水化反应机理研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1998, 21(2): 132-135.

(收稿日期 2008-03-03 编辑: 方宇彤)

(上接第 33 页)

b. 悬浮物进入水体后, 随潮流在施工区南北侧形成悬浮物带。憩流时悬浮物的影响范围较大, 质量浓度增量为 10 mg/L 的区域面积最大可达 0.47 km²。

c. 在悬浮物带范围内, 沿流线方向, 距离施工区越远悬浮物浓度越低, 底层浓度大于表层浓度。浓度场的分布特征符合悬浮物在水体中的紊动输运机理。

d. 悬浮物对海域的影响主要集中在疏浚区底层及中层海域, 影响范围较小, 且影响仅限于施工期。施工结束后由施工所引起的以泥沙为主的悬浮物可以在较短时间内沉降, 不会对水环境造成太大影响。

参考文献:

[1] Van RIJN L C. Sediment transport, part II: suspended load

transport[J]. ASCE, Hydr Engr, 1984, 110(11): 1613-1638.
[2] ZIEGER C K, NISBET B S. Fine-grained sediment transport in Pawtuxet River, Rhode Island[J]. ASCE, Hydr Engr, 1994, 120(5): 561-567.
[3] GAILANI J, ZIEGER C K, LICK W. The transport of sediments in the Fox River[J]. Great Lakes Res, 1991, 17: 479-494.
[4] LIE-YAUW O. A wetting and drying scheme for POM[J]. Ocean Modelling, 2004, 9: 133-150.
[5] 王大魁. 平面二维悬沙输移扩散模式在航道整治工程环境影响评价中的应用[J]. 黑龙江环境通报, 2004(3): 54-57.
[6] 刘俊勇, 徐峰俊, 朱秋菊. 珠江口门近期整治工程对含氯度影响及施工期悬浮物输送数学模型研究分析[J]. 人民珠江, 2006(6): 45-47.

(收稿日期 2007-10-28 编辑: 高建群)