

河道整治工程中悬浮物输移扩散数值模拟研究

李 晓 凌, 吴 从 林, 张 长 征

(长江勘测规划设计研究院 环境公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:在河道整治工程的施工过程中,抛石、河道疏浚等活动会引起河道中悬浮物浓度的增加,并可能对施工区内的取水口等环境敏感点产生不利影响。以南京市八卦洲河段河道整治工程为对象,采用 MIKE21 水动力和对流扩散模型对河道整治工程主要施工活动产生的悬浮物的影响程度和范围进行了预测。结果表明,疏浚工程施工引起河道中悬浮物浓度增量最高可达 25 mg/L,抛石工程仅 2 mg/L 左右。在模拟区域,疏浚和抛石活动引起悬浮物浓度增加 0.5 mg/L 以上的范围分别为 3.06 km² 和 0.24 km²。同时,通过模型对由施工活动导致的取水口附近河道悬浮物浓度的增量进行了定量分析,以及施工活动对取水口等环境敏感点的影响,可为相关部门科学合理地设置水环境保护措施提供依据。

关键词:悬浮物; 对流扩散; 切滩疏浚; 护岸抛石; 河道整治工程

中图法分类号: TV85

文献标志码: A

近年来,随着我国经济社会迅猛发展,沿江产业集中度和企业集群度不断提高,沿江取水量的日益增大及大运量的航运物流对河势提出了更高的要求。但部分河段汉道逐渐衰退导致岸线利用率和航道通过能力逐渐削弱,一旦河段现有河势出现较大调整,不仅对沿江企业的发展造成不利影响,还将影响整个沿江区域经济的总体布局及持续稳定发展,需要采取水下抛石、沉排、沉沙袋和疏浚等措施对河道进行整治。然而,这些施工活动将产生高浓度悬浮泥沙,会对施工期河流水环境产生影响。因此,在河道整治工程环境影响评价中,需要对悬浮物(SS)的影响程度和范围进行预测,判断对施工河段沿岸重要环境敏感点(例如取水口)的影响程度,从而选择正确的施工方案和环保措施^[1-2]。

MIKE21 模型为丹麦水力学研究所开发的平面二维数学模型,该模型在国内外已经广泛应用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境场。本文以长江南京河段八卦洲汉道河道整治工程为例,采用 MIKE21 水动力和对流扩散模型对河道

治理悬浮物输移扩散进行数值模拟分析。

1 数学模型的建立

1.1 工程概况

长江南京八卦洲汉道整治工程位于南京市八卦洲河段,该处长江河道由八卦洲分成左右两个汉道,右汉为主汉、左汉为支汉。目前,八卦洲左汉分流比仍处于减小趋势,不仅制约了汉道内航道条件的进一步提高,而且严重制约了左汉内企业的发展,成为制约南京市区域可持续发展的瓶颈,迫切需要加以治理。八卦洲汉道整治工程方案由洲头导流坝、左汉进口黄家洲切滩、左汉中部浅区疏浚、右汉进口护底、洲头右缘深槽回填和洲头左缘、上元门至燕子矶等处护岸加固工程组成。其中,八卦洲头导流坝为土石坝,坝长 550 m;右汉进口护底面积 1.28 km²,采用系混凝土块沉排型式,排体外缘采用抛石、土枕压边。上元门至燕子矶段护岸长约 3 160 m,左汉进口段左缘护岸长 3 860 m;左汉进口黄家洲段切滩底高程 -20 m、长 1 475 m、底宽 100 m。左汉中段疏浚底高程 -10 m、长 5 000 m、

收稿日期:2013-01-30

作者简介:李晓凌,男,高级工程师,主要从事水土保持与环境工程设计工作。E-mail:525353091@qq.com

通讯作者:吴从林,男,高级工程师,博士,主要从事智能算法、水环境模拟、水资源保护等工作。E-mail:wuconglin@hotmail.com

底宽 200 m,采用铰吸式挖泥船疏浚。

1.2 模拟区域

在八卦洲汉道整治工程中,水下抛石、沉排、沉沙袋和疏浚等施工作业将扰动水体,引起施工水域悬浮物浓度增加。根据《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ/T2.3-93)中大、中河流二级评价以上数学预测模式的要求,结合工程河段水文及水域地形特点,采用二维水动力和对流扩散模型分析这些作业活动对其周边水体悬浮物的影响。

根据工程区实测河道地形,结合施工区域及施工特点,模拟区域选取上起长江大桥,经八卦洲长江段左右汉,止于长江左右汉汇合口以下西坝附近的长江河段。

1.3 基本方程

1.3.1 水动力控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

平面 x 方向上的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \\ \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial y} + \right. \\ \left. \frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_sS \quad (2) \end{aligned}$$

平面 y 方向上的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \\ \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \right. \\ \left. \frac{\partial S_{yy}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \quad (3) \end{aligned}$$

式中, t 为时间; x 和 y 为 Cartesian 坐标系的坐标; η 为水面高度; h 为静止水深; \bar{u} 和 \bar{v} 分别为流速在 x 和 y 方向上的平均值; p_a 为当地大气压; ρ 为水密度, ρ_0 为参考水密度; $f = 2\Omega\sin\varphi$ 为 Coriolis 力参数(其中 $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} s^{-1}$ 为地球自转角速率, φ 为地理纬度); $f\bar{v}$ 和 $f\bar{u}$ 为柯氏加速度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为横向黏滞应力项; S 为源汇项; u_s 、 v_s 为源汇项流速。

1.3.2 对流扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x_i} + v\frac{\partial C}{\partial y_i} = D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

式中, C 为浓度; D_x 和 D_y 分别为 x 和 y 方向上扩散系

数; $u\frac{\partial C}{\partial x_i} + v\frac{\partial C}{\partial y_i}$ 为对流部分,通过水动力模型求解; D_x

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$ 为扩散部分,通过估计或者从湍流模型计算得到。

模型中假设悬浮物 SS 的浓度变化规律遵循上述一阶反应方程式,衰减系数为 SS 在水中经过沉降、悬浮等运动的综合效果,表现为沉降作用。

1.4 网格剖分

工程河道左汉淤积较严重,河道曲折,近似呈半圆形,右汉为主河道,深泓游走左右岸,河势较复杂。因此,模型求解采用非结构网格中心网格有限体积法,此方法计算速度较快,适合复杂地形。

网格化以工程区域 1:10 000 的水下地形为基础,并采用分区网格化处理。在左汉河段和右汉工程区河段,三角网格尺寸 $S_{\max} = 5\ 000\ m^2$; 在其他河段,网格尺寸 $S_{\max} = 20\ 000\ m^2$,网格最小角度 26° 。

1.5 计算条件

1.5.1 计算时段

根据工程施工进度表,1 月份为施工高峰期,且 1 月在历年均属较枯月份,故选取 1 月作为计算期,设计流量采用 90% 保证率 1 月份平均流量。根据河段长度和水体演进特征,计算时间取 4 d,时间步长取 30 s。

1.5.2 模型参数率定

MIKE21 二维非恒定流水动力水质数值模型的参数主要包括河床糙率、污染物的横向扩散系数以及各种污染物的源项和降解系数。

河床糙率根据 2011 年 5 月和 9 月两次实测水文资料,采用二维水动力模型进行验证,确定计算河段左汉糙率为 0.016,右汉糙率为 0.02。

横向扩散系数采用等比水动力模型中的涡黏系数取得,比例系数取经验系数 1。污染物质的衰减系数参照同类区域类似施工作业,悬浮物衰减系数(或沉降系数)取 $5.0\ d^{-1}$ 。

1.5.3 初始条件

初始条件由监测数据确定。模型仅对 1 月份水文条件进行模拟,故把 1 月份某一典型日平均潮位作为初始值。根据下关潮位站 1 月份资料监测资料,水位初始值 1.325 m(黄海高程),流速 u 和 v 取 1.0 m/s。根据水质监测资料,悬浮物浓度初始取 90 mg/L。

1.5.4 边界条件

水动力模型中计算域的边界包括入流边界、出流边界以及岸边界。模型中在入流边界给定流量条件,

在出流边界给定水位条件,在岸边界直接给定陆地边界条件。对流扩散模型边界浓度设置是针对水动力模型的各种边界设置浓度值。

(1) 水文边界。大通水文站为距下关海潮站是最近水文站,可近似把其流量当做计算区域上边界流量条件。根据大通水文站 1951~2011 年实测最小月平均流量系列, $P = 90\%$ 保证率最小月平均流量为 $8\ 107\ \text{m}^3/\text{s}$,大通水文站 1979 年 1 月份平均流量接近于该流量值。因此,选取 1979 年 1 月份任一日(但要避免出现大的降雨日)下关潮位站潮位过程为上元门附近水位下边界。

(2) 悬浮物浓度边界。假定计算区域河段背景悬浮物在计算时段内为恒定值(即 $90\ \text{mg}/\text{L}$),除背景浓度外,水下抛石、沉排、沉沙袋和疏浚等施工活动是引起水中悬浮物浓度增加的主要来源。根据施工总进度,可计算出该工程中各项施工活动悬浮物产生源强,同时借鉴同类区域相同施工作业的研究成果,从偏保守角度考虑,选取该工程计算值和相关文献成果两者中的较大值作为模型中各类施工活动产生悬浮物的源强(详见表 1)。由表 1 可知,在工程中产生较大悬浮物源强的施工活动为疏浚、土工枕、袋装土和抛石。在模拟时,土工枕、袋装土的源强计算类比抛石施工方法计算。因此,本文重点分析疏浚和抛石施工活动对水体中悬浮物的影响。

表 1 主要施工项目及源强分析

施工地段	施工项目	悬浮物源强
洲头导流坝	砂肋软体排	0.18kg/s
	复合土工枕坝心	1.04kg/s × 4 船
	抛石	1.28kg/s × 2 船
右汊进口护底	系混凝土块沉排	0.05kg/s
	袋装土	0.54kg/s
	抛石	0.65kg/s
八卦洲洲头及左缘护岸加固	抛石	0.47kg/s
上元门-燕子矶护岸加固	抛石	0.25kg/s
黄家洲边滩切滩	疏浚	3.75kg/s × 2 船
左汊中部疏浚	疏浚	3.75kg/s × 2 船
洲头右缘深槽填坑	袋装土	1.64kg/s × 2 船

2 悬浮物影响预测与分析

2.1 疏浚工程施工产生的悬浮物影响预测

根据工程施工进度,在左汊黄家洲边滩切滩工程和左汊中部疏浚工程施工期同时也进行了其他工程活动。因此,在预测疏浚工程产生悬浮物对水体的影响时,叠加了同时期其他施工活动产生悬浮物对水体的影响,具体见表 2。

根据表 2 中的悬浮物源强,由 MIKE21 模型计算出模拟区域内悬浮物(以增量计,下同)浓度场分布,

计算区域内悬浮物浓度增量高的区域发生在左汊黄家洲边滩切滩工程区和左汊中部疏浚工程区。

表 2 疏浚工程悬浮物预测场景下所有施工项目及源强

施工地段	施工项目	悬浮物源强
洲头导流坝	复合土工枕坝心	1.04kg/s × 4 船
右汊进口护底	袋装土	0.54kg/s
黄家洲边滩切滩	疏浚	3.75kg/s × 2 船
左汊中部疏浚	疏浚	3.75kg/s × 2 船
洲头右缘深槽填坑	袋装土	1.64kg/s × 2 船

表 3 为黄家洲边滩切滩工程区附近悬浮物在不同浓度增量下的影响范围及其最大纵向(即主流方向,下同)和横向(即垂直主流方向,下同)距离统计成果。由表 3 可知:在黄家洲边滩切滩工程区周围水体中,悬浮物浓度增量最高达 $15\ \text{mg}/\text{L}$,影响范围仅 $0.01\ \text{km}^2$;浓度增量达 $1.0\ \text{mg}/\text{L}$ 的区域扩散到施工点下游约 $4\ \text{km}$ 处的远古水业八卦洲上坝取水口;浓度增量达 $0.5\ \text{mg}/\text{L}$ 的区域在施工点下游 $2.5\ \text{km}$ 处扩展到左汊河道全断面。

表 3 黄家洲切滩产生的悬浮物影响范围

浓度增量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	纵向最大 影响距离/m	横向最大 影响距离/m	影响范围 面积/ km^2
0.5	6210	全断面	3.06
1	4730	424	1.69
2	2177	293	0.46
5	1528	261	0.19
10	267	196	0.04
15	76	65	0.01

表 4 为左汊中部浅区疏浚区附近悬浮物在不同浓度增量下的影响范围及其最大纵向和横向距离统计成果。由表 4 可知:在左汊中部浅区疏浚工程区周围水体中,悬浮物浓度增量最高可达 $25\ \text{mg}/\text{L}$,但其影响范围仅 $0.01\ \text{km}^2$;浓度增量超 $5.0\ \text{mg}/\text{L}$ 的区域影响范围达 $0.2\ \text{km}^2$,其影响区域在横向上可以扩展到施工点附近河道左岸边的扬子石化公司取水口;浓度增量达 $0.5\ \text{mg}/\text{L}$ 的区域在施工点下游约 $1.8\ \text{km}$ 处扩展到河道全断面。

2.2 抛石工程施工产生的悬浮物影响预测

八卦洲河道整治工程存在多个抛石施工区,抛石施工所产生的悬浮物影响通常较小,作为简化,仅对距取水口较近的抛石工程产生的悬浮物浓度场进行分析(即八卦洲左缘护岸加固和上元门-燕子矶护岸加固)。根据施工进度,在抛石工程施工期也安排了疏浚和砂肋软体沉排等工程施工,具体见表 5。因此,在对八卦洲洲头左缘护岸加固和上元门-燕子矶护岸加

固工程产生悬浮物对水体的影响进行预测时,应考虑同时期其它施工活动产生的悬浮物对水质影响的叠加效果。

表4 左汉中部浅区疏浚产生的悬浮物影响范围

浓度增量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	纵向最大 影响距离/m	横向最大 影响距离/m	影响范围 面积/ km^2
0.5	4610	全断面	2.34
1	3202	522	1.06
2	1355	489	0.54
5	573	456	0.20
10	382	359	0.10
15	267	228	0.05
20	153	163	0.02
25	115	98	0.01

表5 抛石工程悬浮物预测场景下所有施工项目及源强

施工地段	施工项目	悬浮物源强
洲头导流坝	砂肋软体排	0.18kg/s
	抛石	1.28 kg/s × 2 船
右汉进口护底	抛石	0.65kg/s
八卦洲左缘护岸加固	抛石	0.47kg/s
上元门-燕子矶护岸加固	抛石	0.25kg/s
左汉中部疏浚	疏浚	3.75kg/s × 2 船

根据表5中悬浮物源强,由MIKE21模型计算出模拟区域内悬浮物(以增量计,下同)浓度场分布,计算区域内悬浮物浓度较高的区域出现在左汉中部疏浚工程区,抛石区悬浮物的浓度增加普遍较小。

表6为洲头左缘护岸加固区附近悬浮物在不同浓度增量下的影响范围及其最大纵向和横向距离统计成果。由表可知:八卦洲左缘护岸加固工程区水体中的悬浮物浓度最大增量约2 mg/L,远古水业八卦洲上坝取水口附近的悬浮物浓度约1.5 mg/L,浓度增量0.5 mg/L的区域沿着河道右岸扩展到施工点下游约1.8 km处。

上元门至燕子矶护岸抛石、右汉进口护底抛石、洲头导流坝施工等活动产生的悬浮物在右汉区域内悬浮物浓度增幅均在0.5 mg/L以下,除了洲头附近几个小区域浓度增幅在0.5 mg/L以上。因此,该区域的施工活动对水体的悬浮物的影响基本上可以忽略不计。

2.3 施工活动对取水口悬浮物的影响

工程实施河段共有5个取水口,其中八卦洲左汉有2个,分别为远古水业八卦洲上坝取水口和扬子石化公司取水口,八卦洲右汉有3个,分别为上元门水厂

取水口、城北水厂取水口和八卦洲水厂取水口。

根据计算成果可知:上元门取水口、城北水厂取水口和八卦洲水厂取水口均在悬浮物增量等值线0~0.5 mg/L之间的区域,远古水业八卦洲上坝取水口在悬浮物增量等值线1.5 mg/L附近,这些取水口附近的悬浮物浓度增加量均较小,相对该河段丰水期实测悬浮物浓度背景值(约80 mg/L)而言,可忽略不计。扬子石化公司取水口在悬浮物增量等值线5~10 mg/L之间的区域,悬浮物增加较多,因此,在进行左汉中部疏浚工程施工时,如果疏浚工程在接近该取水口江段时应考虑降低施工强度,例如把原先的双船同时作业改为单船作业,工程产生的悬浮物对取水口的影响将会更小。

表6 八卦洲左缘护岸加固产生的悬浮物影响范围

浓度增量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	纵向最大 影响距离/m	横向最大 影响距离/m	影响范围 面积/ km^2
0.5	1822	130	0.24
1	458	98	0.05
2	76	33	0.002

3 结论

利用MIKE21平面二维水动力和对流扩散模型对长江南京八卦洲河段河道整治工程施工期间切滩、疏浚、护岸和抛石等活动产生的悬浮物影响进行了模拟分析。

(1) 八卦洲河段河道加固工程各项施工活动对其附近的取水口影响整体较小,建议疏浚施工在接近该取水口时降低施工强度,以减轻对该取水口水质的影响。

(2) 本文通过MIKE21模型定量分析了疏浚及抛石等施工活动对河道悬浮物浓度场的分布,并分析了施工活动对取水口等环境敏感点的影响,可为相关部门科学合理地设置水环境保护措施提供依据。

(3) 在该模型应用中,因缺乏悬浮物实测资料,悬浮物综合衰减系数采用的是经验值。在将来的研究中应根据实际监测资料,对该参数进行率定,从而提高计算结果的精度。

参考文献:

- [1] 辛小康,叶阔,王凤. 河道疏浚工程悬浮物影响预测模拟[J]. 水利水电科技进步,2011,31(1):8-10,49.
- [2] 吴松华,姚发明,周大成,等. 开挖过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 港工科技,2011,48(2):1-4.

(编辑:李慧)