

青草沙水库工程对河床冲淤演变的影响

陈伟伦¹,王 伟²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2. 中交海洋投资控股有限公司,海南 三亚 572000)

摘要:为了探究长江口青草沙水库建设前后工程周边的水动力环境和河床泥沙冲淤变化,通过平面二维潮流悬沙数值模拟,结合改进后可以同时计算淤积和冲刷强度的王义刚公式进行冲淤计算。研究表明,水库建成后,长兴岛北侧航道的分流比和流速下降,南侧航道的分流比和流速上升;水库南侧航道整体呈冲刷状态,而北侧航道整体呈淤积状态,南侧航道变化量小于北侧航道,工程的实施对北侧航道水下地形的影响较南侧大;改进后的王义刚公式对水库周边冲淤的计算结果与工程建设后实测地形和数值模型结果吻合较好。

关键词:青草沙水库工程;冲淤演变;数值模型;经验公式

中图分类号:TV697.2⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)04-0044-07

Influence of Qingcaosha Reservoir Project on riverbed erosion and deposition//CHEN Weilun¹, WANG Wei²
(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. CCCC Ocean Investment Holding Co., Ltd., Sanya 572000, China)

Abstract: To explore the hydrodynamic environment and sediment scouring and silting around the Yangtze estuary before and after the construction of the Qingcaosha Reservoir Project, a depth-averaged 2D tidal current and suspended sediment numerical model was established to simulate erosion and deposition. Combined with a modified empirical formula proposed by Wang Yigang, the numerical model can simulate the intensity of erosion and deposition simultaneously. The calculated results show that, after the construction of the reservoir, the diversion ratio and flow velocity in the north channel of the Changing Island decrease but increase in the south channel. The south channel of the reservoir shows a scouring state, while deposition dominates in the north channel. The variation in the south channel is less than that in the north channel, indicating that the construction of the reservoir project has a greater impact on the underwater topography in the north channel. The calculated results by the modified Wang Yigang's formula are in good agreement with the measured topography and the numerical results after the project construction.

Key words: Qingcaosha Reservoir Project; scouring and silting evolution; numerical model; empirical formula

河口地区是陆地与海洋、自然过程与人类活动相互作用最为强烈的区域,丰富的水源、便利的交通航运、适宜的气候环境为社会和经济的发展提供了极为重要的条件^[1]。但人类的发展必然会对自然环境造成一定影响,以青草沙水库工程为例,该工程施工后引起附近相关水域水动力条件及泥沙运动发生变化,造成了工程区域附近水下地形发生冲淤变化。

泥沙冲淤计算主要依赖以下 4 种方法:①现场资料分析法;②物理模型试验法;③数值模拟法;④经验公式法。目前多采用数值模型法和经验公式法。在河口治理工程对水沙动力和冲淤演变的影响方面,窦希萍等^[2]研究了长江口深水航道治理工程实施后的航道回淤情况;王兆华等^[3]分析了治理工程对北槽拦门沙河段的影响;王艳姣等^[4]利用 GIS 技术对长江口北港河段的冲淤演变进行了可视化分析;陆忠民等^[5]评价了青草沙水库建设的可行性;时连强等^[6]探讨了没冒沙形成及演变规律;陈界仁等^[7]计算出三角洲淤积影响平均宽度和延伸的平均距离。而在河床泥沙回淤经验公式的研究方面,刘家驹等^[8]提出了用于淤泥质海岸航道开挖后泥沙回淤计算的方法;曹祖德等^[9]根据水流归槽和平衡泥沙质量浓度的概念,推导出顺岸式码头前沿的港池淤积计算公式;乐培九等^[10]提出了适用于河口海湾地区挖槽回淤估算方法;王义刚等^[11]提出了计算边滩围垦淤积的一种简便方法。

本文通过建立大范围无结构三角网格的高精度数值模型,探究青草沙水库工程建设前后周边河口范围水流变化和冲淤演变规律,以期为河口水库工程的建设提供更为可靠的工程咨询,并对只能应用于计算回淤强度的王义刚公式进行改进,使其可以同时计算河床冲淤。

1 平面二维潮流悬沙数值模型的建立和验证

1.1 控制方程

依托 MIKE21 水动力模型软件中 HD 模块及其附属的 MT 模块来建立高精度的数值模型,其连续方程:

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

动量方程:

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

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

悬沙输移扩散方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{F_s}{h} \tag{4}$$

床面冲淤变化方程:

$$\gamma_d \frac{\partial \eta_b}{\partial t} - F_s = 0 \tag{5}$$

其中 $h = \eta + d$ $f = 2\Omega \sin \varphi$
 式中: x,y 为右手 Cartesian 坐标系; t 为时间; η 为水位; h 为总水深; d 为静水深; u,v 分别为流速在 x,y 方向上的分量; P_a 为当地大气压; ρ 为水密度, ρ_0 为参考水密度; f 为 Coriolis 参量; $S_{xx},S_{xy},S_{yx},S_{yy}$ 为辐射应力分量; $T_{xx},T_{xy},T_{yx},T_{yy}$ 为水平黏滞应力项; τ_{sx},τ_{sy} 分别为 x 和 y 方向上的表面切应力分量; τ_{bx},τ_{by} 分别为 x 和 y 方向上的底部切应力分量; S 为源汇项; u_s 和 v_s 分别为 x 和 y 方向源汇项水流流速; D_x,D_y 分别为 x,y 方向上的泥沙扩散系数; F_s 为泥沙冲淤函数; γ_d 为床沙干容重; η_b 为海底床面的竖向位移(即冲淤变化量); Ω 为地球自转角速率, $\Omega=0.729\times10^{-4}\text{s}^{-1}$; φ 为地理纬度。

1.2 泥沙模型的参数选取

在缺少实测现场干容重资料的情况下,可以通

过泥沙中值粒径公式^[7]估算。对于长江口区域,干密度取值相对稳定, γ_d 取值 720 kg/m^3 。经过数值模型的反复调试,絮凝沉降的相关控制参数取值为:泥沙密度 ρ_s 取值 $2\,650\text{ kg/m}^3$,絮凝开始发生时的泥沙质量浓度(含沙量,下同) c_{floc} 取值 0.01 kg/m^3 ,阻碍沉降开始发生时的泥沙质量浓度 c_{hin} 取值 10 kg/m^3 ,凝胶点泥沙质量浓度 c_{get} 取值 50 kg/m^3 。由 Richardson-Zaki 公式^[12]结合侯志强等^[13]的观点,沉速系数 ω 取为 0.0005 m/s 。选取临界淤积切应力在 $0.10\sim0.25\text{ Pa}$ 之间,泥沙临界冲刷切应力在 $0.15\sim0.5\text{ Pa}$ 之间。粗糙高度选用模型推荐值 0.001 m 。

1.3 模型范围及网格划分

本文模型涵盖长江口和杭州湾大范围区域,上边界取在江阴验潮站,南边界至浙江象山县,北边界取在江苏如东县中部,东部外海开边界位于 $123^{\circ}34'E$,从北至南约为 $50\sim60\text{ m}$ 等深线位置。模型东西长约 310 km ,南北长约为 311 km ,整个模型面积为 $5.75\times10^4\text{ km}^2$ 。此外,在大模型内嵌套建立了仅包含长江口区域的小模型,北边界、南边界及东边界为水边界,给定潮位过程,该区域潮流受东中国海潮波系统控制,开边界的潮位过程由全球潮波数学模型提供,上游边界条件采用江阴潮位站实测潮位资料。

考虑到实际研究区域地形的复杂性,模型网格采用非结构三角形网格,网格生成考虑地形边界和潮流的走向,整个计算区域包括个 $28\,232$ 个网格节点, $54\,028$ 个单元,网格间距在 $200\sim5\,000\text{ m}$ 之间,研究区域水下地形图及网格如图 1 所示。本文模型

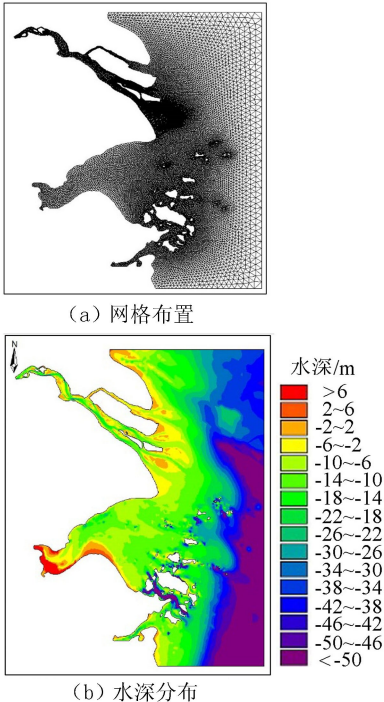


图 1 研究区域水下地形及计算网格

以 1985 国家高程基准为计算基面,坐标系统为北京 1954 坐标系,中央经线 123°。

1.4 模型验证

1.4.1 潮流模型验证

选取 2002 年 3 月 1—9 日大、小潮全潮水文测验的结果进行验证。各验潮站、测流垂线及流量断面如图 2 所示,部分潮位站大潮验证结果如图 3 所示,部分测点大潮验证结果如图 4 所示,北港、南港断面大潮验证结果如图 5 所示。本文约定落潮流速及落潮流量为正值。

1.4.2 悬沙模型验证

图 6 反映了 2002 年 3 月 1 日 0 时至 10 日 0 时

Y6 和 Z9 测点大、小潮过程中泥沙质量浓度计算值与实测值的比较,表明所建模型基本能反映不同潮型下泥沙质量浓度随时间变化的情况,计算结果与实测值基本接近,满足后续工作的精度需要。

1.4.3 河床冲淤验证

基于三角形无结构网格建立水流泥沙模型和潮流泥沙数值模拟,利用 2007 年 12 月至 2009 年 10 月实测水下地形进行冲淤演变计算验证,见图 7。

由图 7 可以看出,计算得到的冲淤区域及冲淤强度与实测结果基本吻合,表明数值模型中相关参数的取值合理,数值模拟的计算结果满足工程研究的需要。

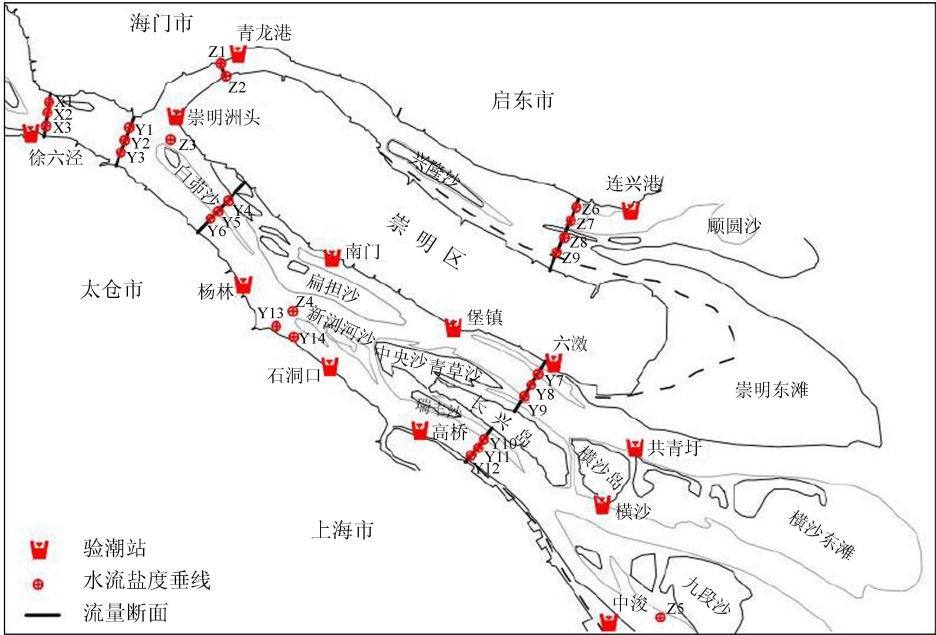


图 2 长江口水文测验布置示意图

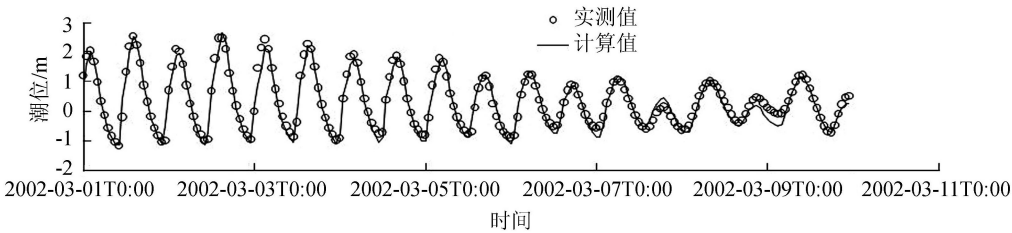


图 3 高桥站大潮验证结果

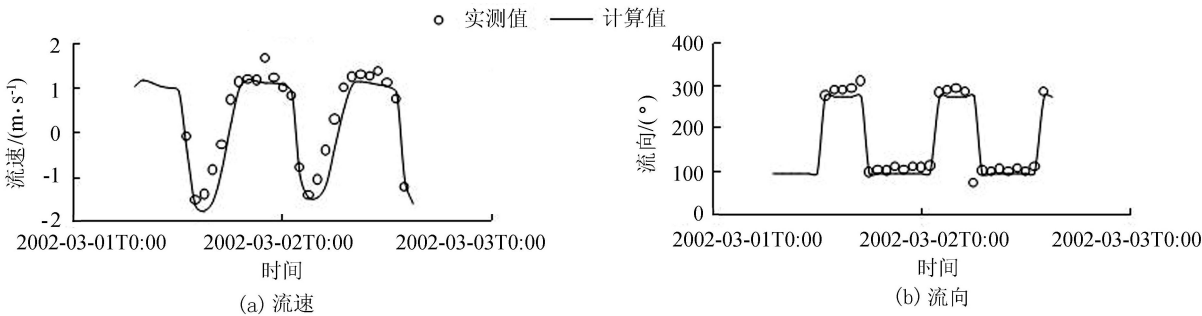


图 4 X3 测点流速及流向大潮验证结果

○ 实测值 — 计算值

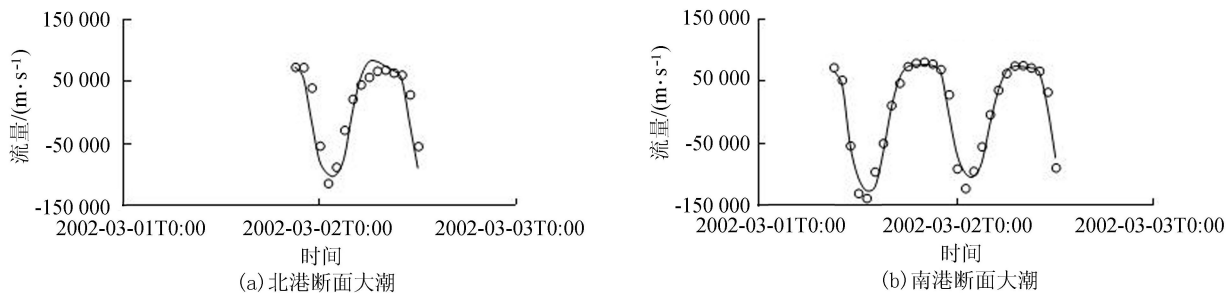


图5 部分断面流量大潮验证结果

○ 实测值 — 计算值

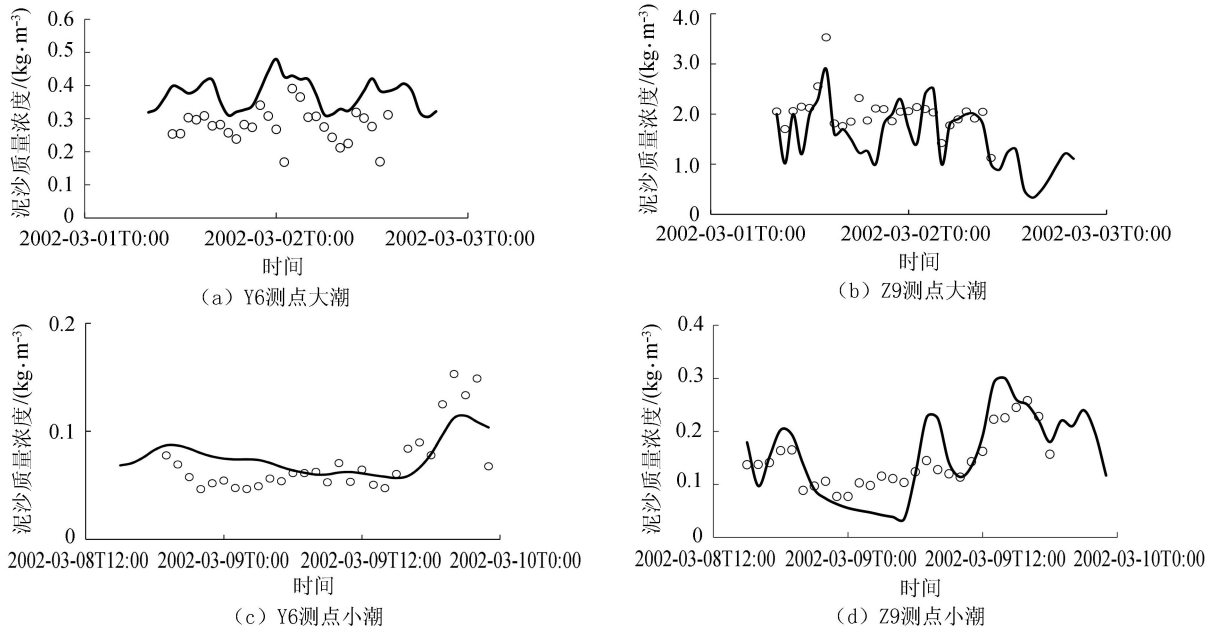


图6 部分测点泥沙质量浓度大、小潮验证结果

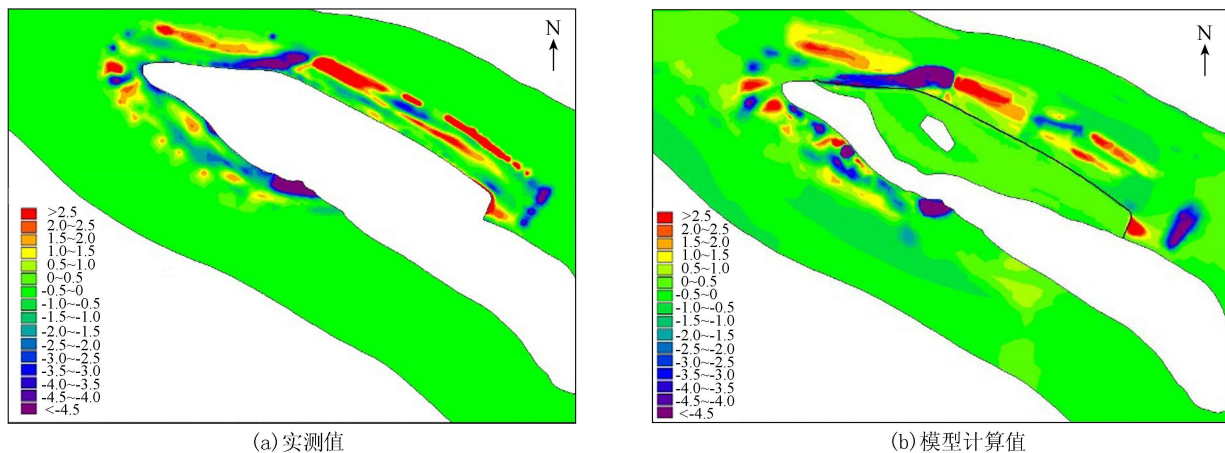


图7 模型计算冲淤结果与实测地形对比(单位:m)

2 水动力环境与河床冲淤演变

2.1 水库工程建设后对水动力场影响

由于工程的影响,工程区域附近的流速和流向均发生了改变。根据实测资料,水库建成后,长兴岛南侧航道流速呈增大趋势,小部分区域流速下降;水库工程前沿取水口处,水流流向发生改变,方向沿着

水库围堤向北侧航道偏转,同时流速增加;水库工程北侧航道围堤附近流速微增,围堤较远处流速下降;水库工程尾部流速下降,工程对水流的影响范围呈扇形向外扩散,距离工程区域越近,流速和流向改变越明显。南侧航道的分流比增加,水库工程的建设使得北侧航道流速整体下降,南侧航道流速整体上升。

2.2 水库工程建后对水下地形年冲淤强度影响分析

2.2.1 数值模拟法

水库工程的实施对周边泥沙冲淤强度分布的影响主要集中在水库工程的两侧区域,分别布置了15个采样点(图8)进行定量分析。青草沙水库工程实施后,工程对水下地形冲淤影响如图8和图9所示:水库口门A区域至B区域,由于工程围堤前沿的挑流作用,口门前围堤区域水流流向急转,流速增加,在工程围堤拐角处B区域出现冲刷,冲刷呈现由口门到工程围堤拐角处增大的趋势,冲刷量最大达5.0 m/a左右。C区域到D区域以及K区域,由于工程实施导致工程北侧水道的分流比和流速下降,南侧水道主要呈淤积状态,最大淤积出现在C区域,最大淤积强度达到3.2 m/a,由C至D区域,淤积强度不断下降,D区域下降到大约1.8 m/a。在工程的围堤尾部E区域,由于围堤的导流作用,流速下降,泥沙呈淤积状态,最大淤积强度达到3.5 m/a。F区域由于处在桥墩后方,呈冲刷状态。由于H区域位于限流潜堤的前端,底部流速下降,G区域受到限流潜堤的导流作用导致流速下降,故H、G区域呈淤积状态,最大淤积强度达到2.0 m/a。工程南侧水道由于分流比增加,流速增加,南侧水道主要呈现出冲

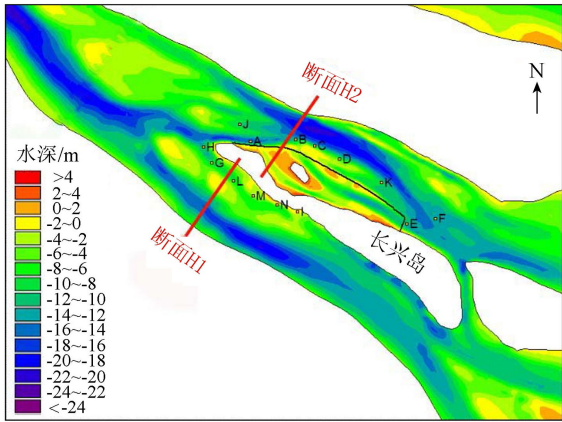


图8 工程前水深、地形、潮量断面及冲淤点布置

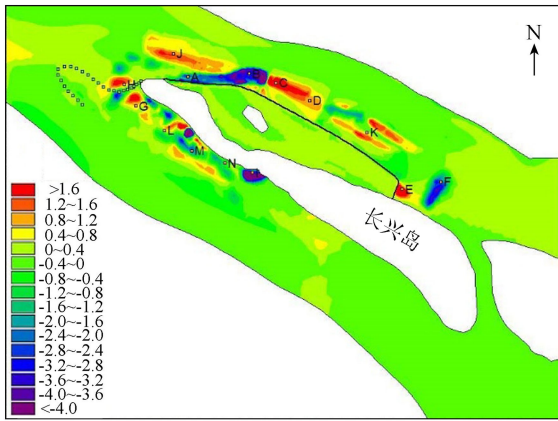


图9 工程后水库周边年平均冲淤强度分布(单位:m)

刷趋势,L、M、N、I沿线水道冲刷强度一般在1.3 m/a左右。如图9所示,南侧水道I区域由于靠近岸边,工程前水深仅有1 m左右,但由于工程后流速的增加I区域受到强烈的水流冲刷,最大冲刷强度达到6 m/a。综上所述,青草沙水库工程的实施整体上使得工程南侧航道呈现冲刷状态,北侧航道呈现淤积状态,南侧航道变化量小于北侧航道,工程的实施对北侧航道影响较大。

2.2.2 经验公式法

2.2.2.1 王义刚公式简介

王义刚等^[11]结合窦国仁^[14]的潮汐水流悬沙运动微分方程、罗肇森^[15]的航道回淤计算公式和刘家驹等^[8]以及乐培九等^[10]的研究成果,提出了计算边滩围垦淤积的简便方法^[16],其表达式如下:

$$P = \frac{\alpha n \omega T S_{*1}}{\gamma_d} \left(1 - \frac{S_{*2}}{S_{*1}} \right) \quad (6)$$

式中: P 为第1年回淤强度; α 为沉降概率; n 为1年中的潮数; ω 为泥沙沉速; T 为潮周期; S_{*1} 、 S_{*2} 分别为工程前、后对应的全潮平均泥沙质量浓度。

一般来说,河口边滩区域水深相对较浅,单个潮周期内的泥沙沉降距离远大于边滩区域内最大平均水深,即 $\omega T > H$,令 $\omega T \approx k_0 H$, $k_0 \leq 1$,则式(6)可简化为

$$P = \frac{\alpha n k_0 H S_{*1}}{\gamma_d} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{2m} \right] \quad (7)$$

式中: H 为全潮平均水深; u_1 、 u_2 分别为工程前、后全潮平均流速; k_0 为考虑波浪及其他因素的综合影响系数; m 为计算参数,大小随着地区不同而变化。 k_0 、 m 均由实测资料率定得出。

滩面的促淤标高一般都在平均潮位以下,滩面高程越接近平均潮位,其年回淤强度就越小,所以促淤工程建后第2年的泥沙回淤量必然小于第1年的回淤量。在外界来沙条件不变的情况下,可以认为当年回淤强度与去年回淤强度的比值同去年平均水深与前年平均水深的比值成正比^[16],即

$$P_{i+1} = K P_i \frac{H_i}{H_{i-1}} \quad (8)$$

式中: P_i 为当年的回淤强度; P_{i+1} 来年的回淤强度; H_i 为当年的全潮平均水深; H_{i-1} 为去年的全潮平均水深; K 为比例系数,工程应用中一般取 $K=1.0$ 。

当 $u_1 \geq u_2$ 时,表示工程施工后水域的流速减小,水动力减弱,相应的挟沙力下降,该区域出现淤积。当 $u_1 < u_2$ 时,表示流速增大,但只有当 u_2 大于临界起动流速时,该区域才会产生冲刷^[17]。由于缺少起动流速资料,因此王义刚公式一般不用于冲刷计算,但工程周边往往淤积与冲刷同时存在,如何对王义刚公式进行改进使其能够用于冲刷计算,是改

进公式要解决的问题。

2.2.2.2 王义刚公式的改进

由于缺乏泥沙起动流速的资料,无法判别泥沙是否起动,且由于计算时采用全潮平均流速,可能出现平均流速小于临界起动流速,而最大流速大于临界起动流速的现象,因此本文采用折中的处理方式,在原公式中加入冲刷系数 β 。该系数由李瑞杰等^[18]提出,是一个与沉速和泥沙质量浓度相关的系数,而沉速和泥沙质量浓度可以通过实测数据率定得出,所以冲刷系数的引入并不需要通过试验得到起动流速。冲刷系数 β 的取值应在0~1之间,考虑到工程地区底床表层为淤泥层,处于冲淤频繁的状态,因此冲刷系数应取值较大,本文采取试算方法得到冲刷系数取值0.85较为适宜。在综合考虑泥沙起动和长时间尺度的影响后,提出的改进方法计算公式如下:

$$\Delta P = \frac{\alpha \beta S_{*1} H}{\gamma_d} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{2m} \right] = \begin{cases} \frac{\alpha S_{*1} H}{\gamma_d} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{2m} \right] & u_2 \geq u_1 \\ \frac{0.85 \alpha S_{*1} H}{\gamma_d} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{2m} \right] & u_2 < u_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$P_i = n \Delta P \quad (i = 2, 3, \dots) \quad (10)$$

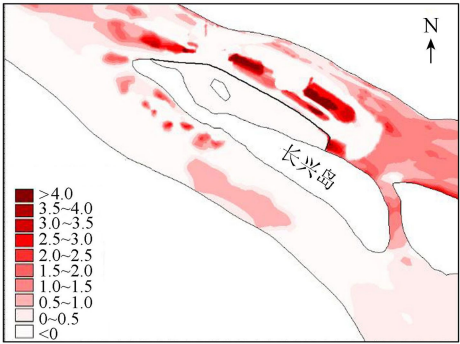
$$P_{i+1} = \begin{cases} KP_i \frac{H_i}{H_{i-1}} & P_i \geq 0 \\ KP_i \frac{H_{i-1}}{H_i} & P_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 ΔP 指单个潮周期的回淤强度。

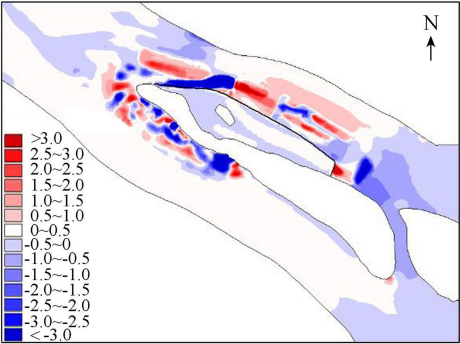
改进方法冲淤计算结果见图10(b)。与改进前的计算结果(图10(a))相比,改进后的王义刚公式能够进行冲刷计算,且冲刷和淤积计算结果与图10(c)中实测值和图9中数值模拟结果基本吻合。由此可知,在改进经验公式时,加入适当的冲刷系数 β 是可行的。结合董晓伟^[19]的计算结果,认为 β 取值在0.70~0.85之间是合理的,如在其他河口海岸地区,需通过当地的地形演变资料对 β 合理取值后参考应用。

3 结 论

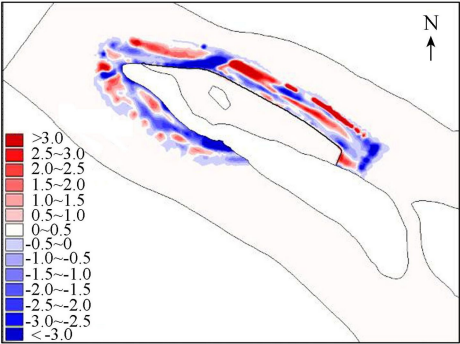
a. 应用 MIKE 21 软件,采用三角形网格,建立了长江口区域平面二维水沙数学模型,从潮位、流速、流向、泥沙质量浓度过程线、地形冲淤等角度对其进行验证。模拟结果显示模型精度满足研究需要,因此可利用此模型进行水库工程对周边水域冲淤影响的计算研究。



(a) 改进前王义刚公式计算结果



(b) 改进后王义刚公式计算结果



(c) 实测值

图10 河床冲淤深度计算结果与实测值对比(单位:m)

b. 青草沙水库工程建成后,水库北侧航道的分流比减小,南侧航道的分流比增大,水库工程的建设使得北侧航道流速整体减小,南侧航道流速整体增大。

c. 工程实施后,整体上使得水库南侧航道呈现冲刷状态,北侧航道呈现淤积状态,南侧航道变化量小于北侧航道,水库工程前沿口门处发生严重冲刷,而尾部区域发生严重淤积,但对距工程较远的区域的水下地形影响不大。

d. 在王义刚公式中添加冲刷系数 β (β 值由实测资料率定),可使改进后的王义刚公式同时计算水库工程建设后对冲刷和淤积的影响,且满足工程应用精度要求。

参考文献:

- [1] 孙东坡,李国庆,朱太顺,等. 治河及泥沙工程[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.
- [2] 窦希萍,李来,窦国仁. 长江口全沙数学模型研究[J]. 水利水运科学研究,1999(2):136-145. (DOU Xipin, LI Lai, DOU Guoren. Numerical model study on total sediment transport in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1999 (2):136-145. (in Chinese))
- [3] 王兆华,杜景龙. 长江口深水航道一、二期工程建设以来北槽河段的冲淤演变[J]. 海洋通报,2006(6):55-62. (WANG Zhaohua, DU Jinlong. Evolution of the north passage after executing the Deep-Water Channel Project of Yangtze Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2006(6):55-62. (in Chinese))
- [4] 王艳姣,张鹰,陈荣. 基于 GIS 长江口北港河段冲淤变化的可视化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34(2):223-226. (WANG Yanjiao, ZHANG Ying, CHEN Rong. GIS-based visualized analysis of scouring and siltation in North Channel of Changjiang Estuary [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006,34 (2):223-226. (in Chinese))
- [5] 陆忠民,卢永金,宋少红,等. 青草沙水库建设与长江口综合整治关系研究[J]. 给水排水,2009(1):55-58. (LU Zhongmin, LU Yongjing, SONG Shaohong, et al. Study of Qingcaosha Reservoir construction and comprehensive regulation of the Yangtze Estuary relationship[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009 (1):55-58. (in Chinese))
- [6] 时连强,李九发,应铭,等. 长江口没冒沙演变过程及其对水库工程的响应[J]. 长江流域资源与环境,2006(4):458-466. (SHI Lianqiang, LI Jiufa, YING Ming, et al. Evolutional process in Momaosa of the Yangtze River Estuary and its response to reservoir project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006 (4):458-466. (in Chinese))
- [7] 陈界仁,陈国祥. 黄河河口三角洲演变的数学模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(1):103-106. (CHEN Jieren, CHEN Guoxiang. Mathematical simulation of the Yellow River mouth delta processes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001,29(1):103-106. (in Chinese))
- [8] 刘家驹,张镜潮. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用:兼论连云港建西大堤后的泥沙问题[J]. 水利水运科学研究,1993(4):301-320. (LIU Jiaju, ZHANG Jinchao. The calculation method and its application of silt coastal waterway and harbor basin, and the sediment problem after the construction of the west bank of lianyungang. [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1993(4):301-320. (in Chinese))
- [9] 曹祖德,王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟[J]. 海洋学报,1993,15(1):107-118. (CAO Zude, WANG Guifen. Numerical simulation of wave lifting sand and tidal current sediment transport [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1993,15(1):107-118. (in Chinese))
- [10] 乐培九,张华庆. 河口海湾地区航道挖槽回淤的估算方法[J]. 水道港口,1993(3):1-11. (YUE Peijiu, ZHANG Huaqing. An estimate method of siltation for dredged channels in estuaries [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1993(3):1-11. (in Chinese))
- [11] WANG Yigang, LI Xi, LIN Xiang. Analysis on suspended sediment deposition rate for muddy coast of reclaimed land [J]. China Ocean Engineering, 2001(1):147-152.
- [12] WILLIAMS D J, PEIRCE T J. Experiments on certain aspects of sedimentation of estuarine muds[C]//[S. I.]: Institution of Civil Engineers, 1966:391-402.
- [13] 侯志强,杨华. 黄骅港外航道骤淤分析[J]. 水道港口, 2004, 25(4):213-215. (HOU Zhiqiang, YANG Hua. Analysis of sudden siltation of outer channel of Huanghua Harbor[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2004, 25 (4):213-215. (in Chinese))
- [14] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4):13-23. (DOU Guoren. Suspended sediment movement and scouring and silting calculation in tidal currents [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(4):13-23. (in Chinese))
- [15] 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算[J]. 泥沙研究, 1987(2):13-20. (LUO Zhaosen. Computation of siltation in dredged channels in estuaries[J]. Journal of Sediment Research, 1987(2):13-20. (in Chinese))
- [16] 王义刚,林祥,冯卫兵. 计算淤泥质海岸围垦多年回淤强度的一种简便方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(6):100-102. (WANG Yigang, LIN Xiang, FENG Weibin. A simple method for calculating long-term deposition rate after construction of warping bank in estuary[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000,28(6):100-102. (in Chinese))
- [17] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速[J]. 泥沙研究, 1982(2):11-26. (HAN Qiwei. Characteristics of incipient sediment motion and incipient velocity [J]. Journal of Sediment Research, 1982(2):11-26. (in Chinese))
- [18] 李瑞杰,罗锋,周华民,等. 泥沙沉降机率 and 冲刷系数分析[J]. 泥沙研究, 2010(1):63-66. (LI Ruijie, LUO Feng, ZHOU Huamin, et al. Analysis on sediment setting probability and erosion coefficient[J]. Journal of Sediment Research, 2010(1):63-66. (in Chinese))
- [19] 董晓伟. 中尺度海岸演变动力模型与行为模型对比研究[D]. 南京:河海大学,2014.

(收稿日期:2017-11-08 编辑:骆超)