钦州湾滩槽地貌体系演化数值模拟研究^{*}



王玉海 (中国水利水电科学研究院,北京100048)

摘要: 钦州湾的滩槽地貌体系由东、中、西3条主要的涨、落潮水道和相间分布的沙脊(洲)组成。利用3D、无结构 网格、有限体积法、并行计算的FVCOM数值模式对整个钦州湾水下地形的冲淤演变进行模拟研究。结果表明,槽冲滩淤的 冲淤格局反映出潮流是塑造和维持钦州湾滩槽地貌体系演变的主导动力; 钦州港对东水道2000年9月—2002年12月、2004年2 月—2008年12月分别进行的3万吨级、10 万吨级航道疏浚工程引起了目前的滩槽地貌体系的冲淤调整,初期强度较大,随 后缓慢下降,这一调整过程将持续很长一段时间; 各类工程的影响相互叠加,须密切关注。

关键词: 软州湾; 滩槽体系; 冲淤演变; 数值模拟; FVCOM
中图分类号: TV 148
文献标志码: A
文章编号: 1002-4972(2013)01-0045-06

Numerical modeling morphodynamics of channel-shoal system in Qinzhou bay

WANG Yu-hai

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The channel-shoal system in Qinzhou bay consists of east, middle, west three major tidal channels and interpolating sand shoals (ridges). Numerical modeling of the morphodynamics of the channel-shoal system is performed using 3D unstructured grid, finite volume, paralleled computation FVCOM. Erosions occur within channels and depositions occur on shoals and at the end of channels, reflecting that tidal flow is really the dominant force to maintain and modify the channel-shoal system; two large-scale dredgings at the east channel during Sep. 2000 and Dec. 2012, and Feb. 2004 and Dec. 2008 respectively have caused the present sea bed erosion & deposition adjustment in the whole Qinzhou bay, the magnitudes of which are large initially but decreasing steadily; this adjustment process will last over 100 years if no further coastal engineering project is conducted and other presumed conditions are maintained. The morphological adjustments caused by various constructed and planned engineering projects might reinforce each other. This needs further comprehensive modeling study.

Key words: Qinzhou bay; channel-shoal system; morphodynamics; numerical simulation; FVCOM

钦州湾位于广西海岸的中部,与北部湾连 通。钦州湾由内湾茅尾海、外湾(狭义上的钦州 湾)和连通二者的鹰岭潮汐通道组成(图1)。 茅尾海面积大约114.9 km²(以平均海面计,下 同),平均水深约2.38 m(理论基面,下同), 潮沟内最大水深约10.73 m,在湾顶东北部和西北 部分别有钦江和茅岭江注入; 连接内外两湾的鹰 岭潮汐通道, 面积约45.4 km², 由青菜头至海印石 水域长约10.1 km, 最窄处位于亚公山水域, 宽约 1.1 km, 整个通道由深槽和两侧的岛屿及支汊组 成, 岸线曲折, 内有包括龙门岛在内的大小岛屿 约71座, 岛屿星罗棋布、岸壁陡峭, 岛屿间形成

收稿日期: 2012-06-11

^{*}基金项目:港口航道泥沙工程交通行业重点实验室2010年度开放基金、国家自然科学基金面上项目(51179211);中 国水科院青年专项(泥集1009)

作者简介:王玉海(1970-),男,博士,高级工程师,主要从事河口海岸泥沙运动基本理论及工程应用等方面的研究。

约72条支汊水道,深槽内的水深5~20 m;外湾呈喇 叭形,湾口以大庙墩和企沙为界东西宽约28.2 km, 至青菜头南北长约13.2 km,面积约255.3 km²,外湾 有东、中、西3条主要的涨、落潮水道和相间分布 的纵向潮流沙脊,以青菜头为顶点呈扇形分布, 平均水深4.67 m,东水道的水深超过10 m,中水道 的水深在6 m左右,西水道的水深在10 m左右;湾 口向外是水下岸坡,分布于-5~-12 m。



前人已经对钦州湾做了大量的研究工作,包 括钦州湾的潮流波浪动力条件、水下地貌类型、 泥沙来源及沉积物特征^[1-3]、水道稳定性^[4]等,针 对钦州湾的潮流场特征更是进行了大量的数值模 拟研究^[5],针对局部工程引起的泥沙回淤问题也利 用不同的数值模式进行了初步研究^[6-7]。由于泥沙 运动的复杂性,已有的泥沙数值模拟研究需要借 助于经验公式计算航道回淤^[7],还停留在局部、短 期的层面上,缺乏从整体角度对钦州湾滩槽体系 长期演变趋势的剖析,因而对局部工程引起的滩 槽体系冲淤调整的强度、分布及过程难以给出准 确的认知,不利于有关工程的科学布局及规划。

本文利用先进的三角形网格、有限体积法、 并行计算的三维FVCOM数值模式^[8]及美国地质调 查局研究人员开发的泥沙计算模块^[9],结合泥沙 运动基本规律,经过必要的程序修正,对钦州湾 复杂的滩槽体系的演变进行了模拟研究。限于篇 幅,本文不再介绍相关的数值模式和钦州湾的 各种泥沙、潮流动力条件,读者可参阅相关的 文献^[1-4, 8-9]。

1 模型建立

1.1 计算网格

计算范围如图2所示,包涵了整个钦州湾, 外海开边界东至北海市,西至白龙尾,以利用2个 海洋观测站的潮位观测资料作为边界控制条件; 计算范围内包括了茅岭江、钦江和南流江3条主 要的河流;水下地形由2008年局部实测地形、中 国人民解放军海军司令部航海保证部2005年出版 的1:40 000和1:120 000海图资料组成,并统一 采用理论基面。钦州港东航道位于东水道内,已 于2008年12月完成10万吨级航道疏浚,航道底宽 160~190 m,底高程-13.0 m,计算地形中反映了 东航道的水深变化。



图2 钦州湾计算区域及网格剖分图

计算海域在水平方向上剖分为29 722个三角 形计算单元,共有16 466个计算节点,网格的大小 从外海开边界上的2 000 m过度到软州湾内的350 m 再到鹰岭水道的150 m左右,在岛屿周围及河流入海 处局部加密到最小边长30 m左右。垂向上共分6层。

1.2 边界条件

模型开边界上各节点的潮位利用北海和白

龙尾验潮站2009-07-11T10:00—07-27T7:00半月 潮期间的实测潮位资料通过内插得到,含沙量由 2009年夏季全潮观测期间^[10]相邻测站实测的含沙 量进行外插确定。

钦江、茅岭江^[2]和南流江3条入湾河流均采用 年平均径流量和输沙量^[11]作为控制条件。FVCOM 采用内、外模分割的算法,时间步长均为1 s。

2 模型率定

模型比较好地率定了2009年夏季钦州湾实测潮 位、潮流流速、流向和大、中、小潮的含沙量^[12]。限 于篇幅,这里主要介绍一下地形冲淤验证的结果。

利用2008年10月施测的钦州湾1:5 000局部水 深图和施测于2004年4月由中国人民海军司令部航 海保证部出版的1:10 000海图(No.16781)进行 地形冲淤分析。如图3所示,4 a间总的淤积量约 1 519.67万m³,空间平均淤积0.592 m;总的侵蚀量



约3 353.41万m³, 空间平均侵蚀-1.104 m, 净侵蚀 总量约1 833.74万m³。

采用2004年海图地形作为初始地形,从2004年 9月计算至2008年9月,同样海域的海床冲淤分布如 图4所示。4 a间地形总的淤积量约1 244.48万m³,空 间平均淤积0.461 m;总的侵蚀量约2 968.74万m³, 空间平均侵蚀约–1.073 m,净侵蚀总量1 724.26万m³。



图4 数模计算2004-04-2008-10地形冲淤分布

考虑到钦州港东航道于2004年2月21日开工 扩建10万吨级深水航道至2008年12月6日正式通 航,期间航道内一直在开挖疏浚,再加上附近大 榄坪保税港区的围填造陆等工程活动,图3中某些 部位的强烈侵蚀很可能是疏浚或者挖沙造成的, 数值模拟很难反映出来,但是从冲淤总量、冲淤 面积、平均冲淤强度等各项统计指标(表1)来 看,本次地形验证的计算结果还是比较好的,各 项计算参数的确定比较可靠。

| | 表1 | 数模计算地形冲淤量与实测地形冲淤量对比 |
|--|----|---------------------|
|--|----|---------------------|

| 项目 | 总淤积量/万m ³ | 总侵蚀量/万m ³ | 净侵蚀量/万m ³ | 总淤积面积/万m² | 总侵蚀面积/万m ² | 空间平均淤积/m | 空间平均侵蚀/m |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------------------|----------|----------|
| 实测 | 1 519.67 | 3 353.41 | 1 833.74 | 2 568.75 | 3 036.52 | 0.592 | -1.104 |
| 计算 | 1 244.48 | 2 968.74 | 1 724.26 | 2 700.00 | 2 765.64 | 0.461 | -1.073 |
| 百分比/% | 81.89 | 88.53 | 94.03 | 105.11 | 91.08 | 77.870 | 97.190 |

3 计算结果

3.1 悬沙场

钦州湾的泥沙来源主要包括茅岭江、钦江

等河流输入的泥沙以及外海少量的悬沙。茅岭 江和钦江输入的泥沙大部分沉积在茅尾海内, 只有少量细颗粒的悬沙随落潮流输入外湾和湾 外深水区。

钦州湾悬沙场浓度的变化很大程度上与潮 流流速过程密切相关,大潮含沙量大于中潮含沙 量,小潮含沙量最小,悬沙浓度最大时刻与流速 最大时刻一致或者滞后1~2 h(图5),反映出钦 州湾悬沙场很大一部分来自于潮流就地侵蚀悬浮 的泥沙。总体来说,涨、落潮水道内悬沙浓度较 高,而两侧滩地上及沙洲区浓度较低;鹰岭水道 内悬沙的浓度最大,外湾西水道及西南湾口区域 悬沙浓度较大,中水道次之,东水道再其次(图 4),这些特征反映出西水道是钦州湾涨、落潮输 沙的主要通道,并且落潮输沙量要大于涨潮输沙 量;从垂向分布来看,底层含沙量最高,中层次 之,表层含沙量最小。



3.2 地形冲淤演变

由于缺乏软州湾沉积物厚度分布的资料,同 时考虑到鹰岭通道内的深槽由于潮流冲刷强劲, 局部基岩出露,其它部位沉积物厚度很薄^[2],为了 计算能够接近实际,本文在计算软州湾2008年以 后海床冲淤演变时,暂假定鹰岭通道东侧青菜头 至亚公山一带大致-8 m深槽内的沉积物初始厚度为 0.3 m,软州湾其余部位沉积物初始厚度为20 m;利 用地形验证中使用的2009年夏季实测代表潮的潮 位资料作为外海开边界上长时间序列地貌数值模 拟的潮位,同时利用地形验证中确定的开边界上 各节点上的含沙量作为开边界各节点长时间序列 地貌数值模拟的含沙量资料。

3.2.1 2012年海床冲淤

计算的2011-10—2012-10钦州湾海床冲淤分 布如图6所示。钦州湾冲淤分布格局表现为水道侵 蚀、沙脊(洲)区淤积的特点,反映出潮流是控

制钦州湾滩槽地貌体系演变的主导动力。 在图示区域,总的年淤积量约2 429.06万m³,





总的年侵蚀量约3 475.94万m³,冲大于淤,净侵蚀 总量约1 046.88万m³,空间平均淤积约0.051 m,空 间平均侵蚀约-0.079 m。

茅尾海表现为净淤积, 年淤积总量约 697.04万m³, 年侵蚀总量约413.86万m³, 净淤积总 量283.19万m³, 空间平均淤积约0.069 m, 空间平 均侵蚀约-0.176 m。侵蚀主要发生于鹰岭水道延伸 入茅尾海的部位及东、西两侧的潮沟内。

鹰岭水道表现为净侵蚀, 年淤积总量约 342.01万m³, 年侵蚀总量约422.87万m³, 净侵蚀总 量约80.86万m³, 空间平均淤积约0.10 m, 空间平 均侵蚀约-0.220 m。

外湾表现为净侵蚀,年淤积总量约764.56万m³, 年侵蚀总量约1 180.65万m³,净侵蚀总量约 416.09万m³, 空间平均淤积约0.050 m, 空间平均 侵蚀约-0.096 m。自青菜头开始以-5 m等深线计, 西水道(三块石至象骨石段)除局部淤积外,几 乎全线发生侵蚀,淤积总量约24.05万m³,侵蚀总 量约203.18万m³,净侵蚀量约179.13万m³,空间平 均淤积约0.063 m, 空间平均侵蚀约-0.185 m; 中 水道(自东海江礁始)入口段侵蚀强烈,淤积总 量约3.27万m³, 侵蚀总量约43.55万m³, 净侵蚀量 约40.28万m³, 空间平均淤积约0.044 m, 空间平均 侵蚀约-0.217 m; 东水道(青菜头至小扭鸡礁)除 金鼓江与东水道交汇段有所淤积外,大榄坪段侵 蚀明显,小扭鸡礁拦门沙段则冲淤相间分布,淤 积总量约35.62万m³,侵蚀总量约116.08万m³,净 侵蚀量约80.46万m³, 空间平均淤积约0.084 m, 空 间平均侵蚀约-0.159 m。小扭鸡礁以南的外航道则 以淤积为主。

湾口以外水下岸坡西南侧淤积明显,而中部 及东南区域侵蚀明显,年淤积总量约620.45万m³, 年侵蚀总量约1 453.57万m³,冲大于淤,净侵蚀总 量833.12万m³,空间平均淤积约0.034 m,空间平 均侵蚀约-0.054 m。

3.2.2 2015年海床冲淤

计算的2014-10—2015-10钦州湾海床冲淤分 布如图7所示。钦州湾冲淤分布格局基本不变,水 道继续侵蚀,沙脊(洲)及水道末端继续发生淤 积,但是冲淤强度及总量均有所下降。



在图示区域,总的年淤积量约2 123.68万m³, 总的年侵蚀量约3 237.52万m³,冲大于淤,净侵蚀 总量1 113.84万m³,空间平均淤积约0.046 m,空间 平均侵蚀约-0.071 m。

茅尾海年淤积总量约649.28万m³,年侵蚀 总量约384.76万m³,淤大于冲,净淤积总量约 264.52万m³,空间平均淤积约0.065 m,空间平均侵 蚀约-0.152 m。鹰岭水道深入茅尾海的尾部侵蚀 有一定增长,在茅尾海西侧茅岭江河道的延伸部 位也继续侵蚀,接近鹰岭水道的部位出现沙坝形 淤积体,与黎广钊等^[2]描述的"河口沙坝"位置一 致,茅尾海东侧也形成明显的侵蚀潮沟。

鹰岭水道年淤积总量约295.75万m³,年侵 蚀总量约363.11万m³,冲大于淤,净侵蚀总量约 67.37万m³,空间平均淤积约0.092 m,空间平均侵 蚀约-0.171 m。

外湾年淤积总量约621.12万m³,年侵蚀总量 约1 037.97万m³,净侵蚀总量约416.85万m³,空间 平均淤积约0.042 m,空间平均侵蚀约-0.080 m。 西水道全线发生侵蚀,淤积总量约17.07万m³,侵 蚀总量约190.23万m³,净侵蚀量约173.16万m³,空 间平均淤积约0.065 m,空间平均侵蚀约-0.156 m; 中水道全线明显侵蚀,淤积总量约2.57万m³,侵 蚀总量约38.25万m³,净侵蚀量约35.68万m³,空间

• 49 •

平均淤积约0.033 m, 空间平均侵蚀约-0.193 m; 东水道除金鼓江口门至青菜头段淤积明显外,大 榄坪段继续侵蚀,小扭鸡礁段则冲淤相间分布, 淤积总量约35.88万m³,侵蚀总量约73.03万m³,净 侵蚀量约37.15万m³,空间平均淤积约0.082 m,空 间平均侵蚀约-0.102 m。小扭鸡礁以南的外航道继 续以淤积为主。

湾口以外水下岸坡西南侧继续淤积,而中部 及东南区域继续侵蚀,年淤积总量约553.51万m³, 年侵蚀总量约1 447.66万m³,冲大于淤,净侵蚀总 量894.14万m³,空间平均淤积约0.031 m,空间平 均侵蚀约-0.052 m。

3.2.3 钦州湾长期冲淤演变

钦州港利用东水道作为进出港的主要通道, 于2000-09-2002-12进行了3万吨级航道疏浚工 程,疏浚总量约823.4万m³,随后又于2004–02–21 一2008-12-06进行了10万吨级深水航道疏浚,疏 浚总量约4 530.7万m³,水道普遍挖深约4 m^[4]。这 两次水道浚深对钦州湾包括茅尾海在内的整个滩 槽地貌体系的演变带来了深刻的影响。本文计算 的2008-10-2015-10的水下地形冲淤分布就是这 一影响的具体表现。在这一冲淤调整过程中,茅 尾海不仅接受茅岭江和钦江输入的泥沙沉积,而 且接受相当数量的由涨潮流输送的来自外湾水道 内侵蚀的泥沙沉积,外湾净侵蚀的其余泥沙则由 落潮流输送到外湾水下岸坡西南侧沉积下来。需 要说明的是,本次计算由于靠近数模边界而没有 全部反映钦州港东航道小扭鸡以南的外航道长度和 水深,事实上,外航道应该全程处于淤积状态。

考虑到位于钦州湾西岸的防城港核电厂已正 式开工建设并计划于2015年首台机组正式投入商 业运营,核电厂将利用长明渠方式在西水道取、 排水,长明渠的建设无疑将对钦州湾滩槽地貌体 系的演变叠加新的影响。有鉴于此,本文不再进 一步介绍钦州湾滩槽地貌体系2015年后长期演变 的计算结果,但是如果假定没有防城港核电厂工 程和其它新的工程上马,并且满足本文假定的钦 州湾沉积物初始厚度、泥沙垂向分布均一、潮流 动力条件没有大的变化等条件的话,根据现有的 计算结果可以推测,已有的东水道疏浚工程所造 成的钦州湾外湾滩槽地貌体系的冲淤调整初期冲 淤强度较大,随后缓慢下降,整个过程可能要持 续上百年后才会基本完成,而其它部位的冲淤调 整则可能持续时间会更长些。

4 结语

在深入了解泥沙运动基本规律的基础上,运 用先进的数值计算模式开展河口海岸地区复杂滩 槽地貌体系的冲淤演变的模拟研究具有很大的效 率和优势。本文利用FVCOM数值模式对钦州湾 整个滩槽体系的冲淤调变进行了数值模拟研究。 结果表明,滩槽体系冲淤调整表现为水道或者深 槽内侵蚀而沙脊(洲)与水道末端(包括拦门沙 段)淤积的格局,这种槽冲滩淤的格局反映出潮 流是塑造和维持钦州湾整个滩槽体系演变的主导 动力; 钦州港对东水道的两次大规模疏浚工程引 起了钦州湾整个滩槽地貌体系的冲淤调整,初期 强度较大,随后缓慢下降,在没有新的工程上马 和满足其它一些计算假定条件下,这一冲淤调整 过程要持续上百年才能基本完成。

钦州湾有很多在建和规划建设的工程项目, 这些密集的工程建设所引起的滩槽地貌体系冲 淤调整的效应相互叠加,对各条主要水道的稳定 性的影响如何,需要综合研究。需要说明的是, 如果能有整个钦州湾近期实测水下地形资料、沉 积物厚度(包括礁石、岩盘等)的空间分布、垂 向上泥沙分层、海岸线以及更好的地形验证等资 料,计算结果将会更接近真实状态。

参考文献:

- [1] 邓朝亮,刘敬合,黎广钊,等. 钦州湾海岸地貌类型及 其开发利用自然条件评价[J]. 广西科学院学报, 2004, 20(3): 174-178.
- [2] 黎广钊,梁文,刘敬合. 钦州湾水下动力地貌特征[J]. 地 理学与国土研究, 2001, 17(4): 70-75.
- [3] 阎新兴,刘国亭. 钦州湾近海区沉积特征及航道淤积研 究[J]. 水道港口, 2006, 27(2): 79-83.
- [4] 王玉海, 王崇浩, 刘大滨, 等. 钦州湾水道稳定性的初步 研究[J]. 水运工程, 2010(8):76-80.

(下转第75页)