# 长江下游近河口段一维水沙数值模拟

# 孙昭华,陈飞,郭小虎

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:长江下游大通以下河道宽阔、支汊众多,同时受径流、潮流双重作用,水沙运动非恒定性强.基于以上特点,建立了长江下游大通至徐六径具有河网特点的一维非恒定流悬沙数学模型.经验证,模型能够反映径流、潮流双重来流、来沙条件下本河段内的冲淤.

**关 键 词:**河网非恒定流;一维水沙数学模型;径流;潮流;长江近口段 中图分类号:TV142:0242.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2007)03-0044-07

# One-dimension numerical simulation of flow and sediment in estuary reach of the Yangtze River

SUN Zhao-hua, CHEN Fei, GUO Xiao-hu

(State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract**: In the estuary reach of the Yangtze River downstream of Datong Station, the river channel is multibranched and broad, and the flow and sediment transportation is unsteady under the interaction of runoff and tidal current. According to its characteristics, a 1-D unsteady mathematical model for suspended sediment with the channel network character is proposed to simulate the process of flow and sediment transportation in the reach from Datong to Xuliujing. Validation of the model shows that the model can simulate the scour and silting in the reach under the interaction of runoff and tidal current.

Key words: unsteady flow in channel network; 1-D mathematical model for flow and sediment; runoff; tidal current; estuary reach in the Yangtze River

水沙边界条件是进行航道整治研究工作和实施航道整治工程的基本依据.水沙边界条件正确与否直接 关系到航道整治工程方案的效果,甚至工程的成败.然而,实际情况下局部短河段内理想的边界条件往往难 以直接获得,有时不得不借助于空间上相隔较远的实测站点数据经验推求,精度难以保证.特别是在近河口 区域,由于动力及泥沙输移条件复杂,经验关系往往难以奏效.在此条件下,采取长河段一维水沙数值模拟以 提供工程河段所需边界条件成为唯一有效的手段.长江下游大通以下存在多个碍航浅水道,严重影响长江黄 金水道效益的发挥.为了保证这些水道治理工程的顺利实施,需要通过一维水沙数学模型计算为各个整治工 程河段提供水沙边界条件.

收稿日期:2006-11-27

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2003CB415200)

作者简介:孙昭华(1976-),男,河南洛阳人,讲师,博士,主要从事水力学与河流动力学研究. E-mail: lnszh@126.com

#### 1 河道概况

#### 1.1 水沙特性

长江汛期潮区界可达大通附近,潮流界变动范围约在江阴附近,江阴以下受径流和潮流的双重作用,但 徐六泾以上河道较窄,潮流被削弱,径流居于主导地位.

根据上游大通站的实测资料,长江来水来沙一般集中在汛期5~10月,汛期输沙更为集中,约占全年的 90%.对于大通~江阴径流河段,河床冲淤主要是由上游来水来沙的变化引起的,集中于汛期.对于江阴以下 河段,由于来沙较集中的汛期径流作用较强,而潮流作用增强的枯季来沙仅占全年的10%.因此,河床变形 也主要发生于汛期.

#### 1.2 河道形态特征

长江下游大通~江阴段为分汊河型,河道宽窄相间,窄段一岸或两岸由山丘或矶头控制,水深较深,河槽 单一稳定.宽段水流分散,沙洲淤长,呈单汊或多汊. 江阴以下江面成喇叭型逐渐展宽,在南通附近宽达 18 km,至口门处约90 km.其中,近口段江阴~徐六泾全长96.8 km,首尾较窄,中间宽并向北弯曲.该河段主 要由福姜沙、通洲沙等水道组成,也是长江下游重点浅滩河段. 江中洲滩将该河段分为多汊河道,受径流和潮 流双重作用,水流弯曲、分汊,洲滩冲淤变化频繁.

2 模型的建立

#### 2.1 建模思路

本河段沿程河宽变化剧烈,如黑沙洲、口岸直等分汊河道宽约4~8 km,而窄段迅速缩减为1 km 左右; 江阴鹅鼻嘴处江面宽仅1.4 km 左右,至通州沙河段江面扩宽至9 km 左右,其下徐六泾处江面又缩窄至 5.7 km.目前,一维数学模型适用的前提是沿程断面几何形态变化较为缓慢.对于河宽变化剧烈、水流频繁 分汇的河段,直接采用通常的一维计算模式划分断面非常困难,甚至无法正确计算.此外,一些多滩分汊段还 存在各汊道动力条件不一致的现象,涨落潮过程中流路各异<sup>[1]</sup>.在这种复杂的河床边界和水流动力条件下, 滩槽交错的 W 型复式断面内主副槽含沙量分布也极不均匀,使得泥沙输移和河床冲淤分布十分复杂.因此, 在这种复杂河势和动力条件下,采用通常的单一河道一维水沙模型,仅仅凭借断面平均的水力、泥沙要素很 难全面反映出水沙的运动特点,也无法正确提供控制断面的水沙边界条件.本文拟建立具有局部河网结构的 一维非恒定流水沙数学模型.与通常处理为单一河道的一维模型相比,在多汊、多滩处采用网河结构并不增 加对地形资料的需求,却能反映阻力、动力等条件在主副槽、滩面等位置的不均匀分布,使计算结果更能反映 实际情况.

虽然近口段和河口段受径流和潮流双重作用,涨落潮流速变幅大,易导致较大级配范围内泥沙反复淤积 和起悬,粗沙和细沙均参与河床变形.但由于径流、潮流控制历时,径流来沙、口外来沙的比例等关系,使得影 响冲淤的主导因素不同,反映在河床组成上表现为不同河段床沙粒径的显著差异.长江中游的细沙河床段, 如下荆江至城陵矶以及城陵矶至九江段,中值粒径分别为0.144~0.190 mm、0.133~0.205 mm,两者较为接 近<sup>[1]</sup>.河口段虽然粒径较细,河床质为极细沙和粘土,但由于不同位置径流与潮流作用差异,河床组成的差 异也比较明显.例如北支的床沙中值粒径为0.027~0.088 mm,而南支为0.071~0.138 mm,这与南支径流 作用较强而北支为涨潮流所控制有直接关系<sup>[1]</sup>.文献[2]对不同河段滩面淤积物粒径的分析也表明了同样 的规律.选取南京乌龙山边滩和长江口拦门沙浅滩分别代表主要受径流、潮流作用沉积的浅滩.南京段淤积 物中值粒径为0.05~0.1 mm的占58.7%,而长江口拦门沙段粒径为0.01~0.05 mm的占48.1%.由此可 见,不同区段由于径流、潮流作用的不同,使得不同组分泥沙参与河床冲淤的概率存在显著差异,在数学模型 中描述床沙与悬沙交换时需加以考虑.

此外,由于河道受径流和潮流的双重作用,使得常规水沙计算模式或参数难以适用,需要结合本河道水 沙特点,确定适用于本河道的经验参数或关系.

#### 2.2 控制方程及解法

根据该河段特点,本文将建立具有河网特点的一维悬沙模型,其基本方程除了通常的一维控制方程之外,还增加了分汊点处的水、沙质量守恒以及水流动量连续条件,各基本方程见文献[3].方程的求解参照了 文献[4,5]中的方法.在保证精度的前提下,水流、泥沙方程组的求解过程均不显著增加计算量和计算时间.

#### 2.3 模型计算中的处理

2.3.1 糙 率 长江下游河道洲滩、支汊众多,滩面与主槽、主汊与支汊阻力不一致,高水过滩,低水落槽, 不同时期阻力差别大.如果将断面糙率固定为某一确定值,则无法反映出高、低水时糙率的变化.当前的模型 大多是通过实测资料拟合出流量和糙率之间的相关关系,根据流量的变化调整阻力.有的考虑影响阻力的其 他因素,如涨落率、下游水位等,建立多元的相关关系.这些方法在径流河段虽也能取得较好的效果,然而经 验性强,且经验关系的修正不够方便.本文对糙率的处理采用以下模式:每个计算断面有一个糙率基值 n<sub>r</sub>; 断面地形数据中,每对起点距、高程附加一个相对糙率系数 a<sub>i</sub>;将这些系数按照它们各自控制的河宽比例加 权求和,得到一个综合系数;该系数与糙率基值的乘积即为该水位下的综合糙率.

这样,利用糙率基值实现对糙率的粗调,利用沿河宽分布的权重系数实现对糙率的微调,并可根据需要 对任意断面糙率进行修正.确定沿河宽分布的权重后,计算过程中根据水位高低实现糙率自动调节.

2.3.2 水流挟沙力 挟沙力反映了水流处于饱和状态的临界含沙量,是数学模型中判断河床冲淤和模拟泥 沙输移的基础.以往研究表明,径流河段的挟沙力与流速、水深等水力要素之间具有较好的相关性.水流挟沙 力可用张瑞瑾公式计算:

$$S_* = k \left(\frac{u^3}{gh\omega}\right)^m \tag{1}$$

式中:S<sub>\*</sub>为水流挟沙力;u 为流速;h 为水深;ω 为泥沙沉速;k,m 分别为经验系数和指数.可见,流速是挟沙 力最主要的影响因素,流速大则挟沙力大,当流速接近于0时,挟沙力亦趋近于0.近口河段受潮流和径流双 重作用,水流非恒定性强,难以判断含沙量是否饱和.因此,常规挟沙力概念及理论是否适用尚存质疑<sup>[6,7]</sup>. 然而,为了利用数学模型对近口段泥沙输移和河床冲淤进行模拟,必须将挟沙力概念加以引申,并给出计算 方法.考虑到天然状况下河床冲淤幅度小,可认为处于一种平衡状态,因此可认为此时的含沙量即为水流挟 沙力,并从实测资料总结含沙量与其影响因素之间的定量关系.这也是河口泥沙模型中通常采用的方法<sup>[6]</sup>.

江阴~徐六径受潮流作用的近口段,泥沙输移虽然以径流为主,但含沙量与水力要素之间的关系仍具有 潮流河段的某些特性:含沙量随流速变化的波动幅度小,并且流速接近于0时含沙量仍能保持一定的水平, 存在一个下限值.因此,必须采用不同于径流河段的挟沙力公式来描述这些特性.当前,对河口段挟沙力常用 的计算方式可归结为两种:一种是利用潮流流速和含沙量变化的周期性,分涨潮、落潮将各量取半潮平均并 统计经验关系,能够满足粗略计算的要求,如文献[6]中提出的钱塘江河口涨、落潮平均含沙量关系式;另一 种是建立类似(1)式的形式,分涨、落潮或大、小潮统计瞬时含沙量与水力要素之间的关系<sup>[7]</sup>,如韩曾萃<sup>[8]</sup>提 出的钱塘江河口挟沙力关系式.这两种经验关系具有共同点,即流速指数 *m* 均接近于 2. 这反映出感潮河段 含沙量变化对流速的敏感性较径流河段弱的特性,类似公式曾在钱塘江口<sup>[8]</sup>、海河口<sup>[9]</sup>、珠江口<sup>[10]</sup>得到应 用.此外,考虑到实际中河口含沙量存在一个下限值,任汝述<sup>[11]</sup>等提出了长江口挟沙力的统计规律:涨潮时  $\sqrt{S_*} = 8.5 \frac{u}{\sqrt{gh}} + 0.33,落潮时<math>\sqrt{S_*} = 7.8 \frac{u}{\sqrt{gh}} + 0.17. 在吸收已有成果的基础上,本文拟采用以下结构公式反$ 映水流挟沙力:

$$S_{*} = k \frac{u^{2}}{h} + S_{0}$$
(2)

式中:k为待定的经验系数;S<sub>0</sub>为含沙量下限值;u、h分别为断面平均流速和水深.由于长江近口段悬沙沿程 较均匀,且变化不大,(2)式中忽略了沉速的影响,将其影响并入系数 k.S<sub>0</sub>是为了保证流速为0时,也能保持 一定的挟沙力.

以往研究证明,由于动力条件的差异,河口段在洪、枯季具有不同的挟沙特性,本文对(2)式中参数的率 定也注意了这一点.选取肖山、狼山沙、徐六泾等断面的观测资料,分洪、枯季分别确定河段内自下而上各区 段的参数.表1中给出了肖山、徐六泾附近相关参数值.由不同位置的参数比较可见,同一河段 k 值汛、枯期 相差不大,但自上而下随着潮流作用增强而减小.在徐六泾段,由于潮流作用较强,S<sub>0</sub>值在汛、枯期以及大、 中、小潮期间均可能不同,但在江阴附近仅在汛、枯期有变化,并且江阴附近的 S<sub>0</sub>值明显小于徐六泾附近.以 上特点反映了径流、潮流在汛枯期以及上下游不同位置的强弱变化.

	参数	汛期			枯 期		
12. 且.		大 潮	中 潮	小潮	大潮	中 潮	小潮
	k	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Ħ Ш	$S_0$	0.08	0.08	0.08	0.03	0.03	0.03
公子汉	k	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
体八径	$S_0$	0.18	0.10	0.05	0.08	0.06	0.03

表1 (2)式中参数取值

由于在径流河段应用(1)式而近口段应用(2)式,会造成输沙量的不连续.计算时,通过在潮流界变动范围江阴~南京设置过渡河段.按照沙量守恒的原则调整过渡河段内(2)式中的 k 值使(1)、(2)两式计算的挟沙力近似相等.

$$P_{*k} = \frac{\alpha_c \left(\frac{P_{bk} P_k}{\omega_k}\right)}{\alpha_k \sum_{k=1}^n \left(\frac{P_{bk} P_k}{\omega_k}\right)}$$
(3)

式中:系数  $\alpha_c$  可由  $\sum_{k=1}^{n} P_{*k} = 1$  求得,  $\alpha_c = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left(\frac{P_{bk} p_k}{\omega_k}\right)}{\sum_{k=1}^{n} \left(\frac{P_{bk} p_k}{\alpha_k \omega_k}\right)}$ ,其中,  $p_k$  为第 k 组泥沙由床沙转变为悬沙的概率与该

组泥沙由悬沙转变为床沙的概率的比值,粒径越粗,该值越小;α<sub>k</sub>为河底含沙量与断面平均含沙量的比值, 粒径越粗,该值越大.实际计算中,由天然实测资料率定其中的参数,不同区段参数的取值不同.由于(3)式 可以对每组泥沙分别取值,因此,能够保证较大的细颗粒泥沙含量,比较符合感潮河段实际情况.

2.3.4 河 口 来 沙 本河段除大通以上径流来沙,涨潮过程中潮流也挟带部分海域来沙.因此,为保证计 算中沙量的守恒以及河床冲淤的合理性,给出了下边界含沙量过程.在缺少实测资料的情况下,采用潮流进 口断面的挟沙力作为其含沙量过程,其中的参数根据实测资料确定.

2.3.5 双向流河段 由于受潮流影响,计算河网中存在水流双向流动的河段,给泥沙输移计算造成困难.对于图 1(a)所示的情形,假设滞流点位置处于 *i* 和 *i*+1 断面之间,则可以按照单向流河段泥沙计算方法,自两端分别推算至第 *i* 和 *i*+1 断面.对于图 1(b)的情形,假设 *i* 和 *i*+1 断面的含沙量等于上一时刻的含沙量,然后分别向两侧推算.由于非恒定流计算时间步长不大,因此以上处理不会造成大的误差.



Tab. 1 Parameter values in Equation (2)

#### 2.4 河道概化

数学模型计算范围自大通至徐六泾.根据河道中实际的洲滩分布进行河网结构的概化,共分为66个河段,45个汊点,共计685个断面.计算过程中,上边界采用大通站实测水沙过程,下边界采用徐六泾潮位过程和含沙量过程.令徐六泾的含沙量等于其挟沙力.

### 3 模型验证

#### 3.1 水流验证

为反映水流运动的不恒定性,计算时间步长取为 10 min. 采用 1998 年实测资料进行糙率率定,2004 年 部分资料进行水流模拟的效果检验(见图 2 和图 3). 可见,不同时期水位及相位符合较好,说明所取糙率能 够反映实际的河道阻力特性.





#### 3.2 含沙量及冲淤验证

用上述数学模型计算沿程各站的含沙量过程,肖山大潮和通州沙中潮的含沙量与实测值的比较见图 4. 可见,计算的含沙量过程具有明显涨落潮差别,且具有下限值.

文献[13]给出了徐六泾站1998-08~2000-07 表层含沙量的月均值变化过程.相关资料<sup>[14]</sup>证实长江口 表层含沙量与垂线平均含沙量比值约为3,考虑到徐六泾段潮流较下游弱,因此,将表层平均含沙量乘以一 个系数(约为2~3),即可换算成断面平均含沙量.图5为计算徐六泾月均含沙量与实测值的比较,图中实测 含沙量为文献[13]中数值乘以2.35.可见,计算与实测值基本相符.



Fig. 4 The calculated and measured sediment concentrations



Fig. 5 The calculated and measured monthly mean sediment concentrations at Xuliujing

### 4 长系列水沙过程计算及分析

采用长河段一维数学模型进行长系列水沙过程模 拟,是为局部工程河段提供边界条件的常用途径.下面 采用1998~2004年大通站来水来沙及徐六泾潮位过 程,计算了大通以下的水沙输移过程,并对其合理性进 行分析.

长江口泥沙运动以悬沙为主,水体含沙量来自流 域和海域(即河口局地),后者主要是指河口浅滩沉积 物在风浪、潮流作用下的起动和运移.这类泥沙补给冬 季较夏季明显,迭加流域来沙,使河口水体含沙量的年 内变化趋于均匀.而径流河段汛枯季沙量悬殊不同.本 文计算结果表明,徐六泾年内含沙量过程较大通站趋 于均匀,但由于仍受径流支配,汛枯季的差别仍比较明 显.枯期的往复流使徐六泾输沙基本平衡,而汛期落潮 流输沙量远大于涨潮流,使汛期大通来沙得以宣泄入 海,年内总体保持平衡(见图 6).图7则显示了同期的 江阴-徐六泾输沙率差值,该值在 *x* 轴两侧成对称分 布.这些现象与长江近口段长期保持冲淤平衡的事实 是相符的.



### 5 结 语

(1)结合大通~长江口河段的实际特点,建立了具有河网特点的一维水沙数学模型,并对其中的阻力、 挟沙力模式等进行了处理.

(2)验证计算表明,河段内潮位、流量和含沙量过程符合感潮河段的一般特点,模型总体上能够反映河段的水、沙输移规律.

(3)利用模型对长系列水沙过程进行了模拟,分析表明这些成果符合长江近口段的实际动力条件和冲 淤特点.

#### 参考文献:

[1] 水利部长江水利委员会. 长江中下游干流河道治理规划报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会. 1997.

- [2] 林承坤,杨佳木.从河床特性与演变角度评长江口白茆沙浅水航道的整治[J].中国航海,1994,(1):41-50.
- [3] 孙昭华,李义天,曹志芳. 河网非恒定水沙数学模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 165-172.
- [4] 李义天. 河网非恒定流隐式方程组的汊点分组解法[J]. 水利学报, 1997, (3): 49-57.
- [5] 李义天,尚全民.一维不恒定流泥沙数学模型研究[J]. 泥沙研究, 1998, (1): 81-87.
- [6] 黄 胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社. 1992: 392-403.
- [7] 曹文洪, 舒安平. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力研究述评[J]. 泥沙研究, 1999, (10): 74-80.
- [8] 史英标. 钱塘江河口一维非恒定动床模型研究及其应用[J]. 河口与海岸工程, 1998, (3): 13-21.
- [9] 张华庆,李华国,岳翠平.海河口潮流泥沙运动数值模拟及清淤方案研究[J].水动力学研究与进展,2002,17(3): 318-326.
- [10] 施 勇, 胡四一. 感潮河网区水沙运动的数值模拟[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 431-438.
- [11] 任汝述, 许为华. 长江口水流挟沙能力[C]//长江口航道治理工程领导小组. 长江口航道治理研究(第一集), 1981: 94-103.
- [12] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 117-121.
- [13] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京:海洋出版社, 2004: 15-16.
- [14] 金 缪, 谈泽炜, 李文正, 等. 长江口深水航道的回淤问题[J]. 中国港湾建设, 2003, (8): 1-6.

16 M	, ,***********************************	**
****	第2届亚洲水资源和可再生能源开发国际会议	****
**	时 间: 2008 年 3 月 10 日 ~ 11 日	**
***	地 点:越南岘港	***
***	E-mail: mf@ hydropower-dams. com	***
***	http://www.hydropower-dams.com	****
*	<sup>(</sup> ************************************	**