

我国河口挡潮闸闸下泥沙冲淤研究综述

郑主平¹, 谈广鸣¹, 罗 景², 葛 华¹, 郑淑芳³

(1. 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; 2. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072;
3. 浙江省宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要 指出由于挡潮闸的修建, 改变了河口地区的水动力条件, 破坏了原有天然情况下的泥沙冲淤平衡, 使闸下游河段普遍出现严重的泥沙淤积。综述了国内对挡潮闸闸下泥沙冲淤的认识和研究进展, 展望了今后挡潮闸闸下泥沙冲淤的研究方向。
关键词 河口水闸, 挡潮闸, 泥沙淤积, 河床变形, 模拟技术
中图分类号 TV66, TV14 **文献标识码** A **文章编号** 1006-764X(2007)S2-0011-05

为了挡潮御咸、排泄内涝, 近几十年来, 我国沿海大部分中小入海河口都已建立了挡潮闸。但由于这些挡潮闸的建设, 改变了河口地区水动力条件, 破坏了原有天然情况下的泥沙冲淤平衡, 使挡潮闸下游河段普遍出现了越来越严重的泥沙淤积, 尤其是粉砂质河口和泥质河口更为严重。闸下河道淤积不但引起河床底坡增高, 河道断面缩窄, 过水断面及河床容积锐减, 形成束水断面, 而且易使河道产生淤滩, 弯曲变长, 从而降低了挡潮闸的排水泄洪能力, 制约了工程效益的发挥。随着经济的发展, 闸下河道的严重淤积使区域的防洪排涝形势变得极为严峻, 对河道通航带来了不利影响, 同时排水不畅使闸上游河道含盐量增高, 水质恶化, 水生态环境失衡, 严重制约了区域经济的发展。

1 挡潮闸闸下淤积成因、淤积特性研究

1.1 挡潮闸闸下淤积成因研究

早在 20 世纪 60 年代, 龚国仁等^[1]就以射阳河为例开始了对挡潮闸闸下淤积问题的研究, 并对射阳河建闸前后潮流特性的变化做了细致的记录。在 80 年代, 罗肇森^[2]等对建闸后河口淤积变化规律做了总结, 并认为闸下淤积的原因主要包括 3 个方面: ①下泄径流量减少; ②潮流量减少; ③潮波变形。随后, 钱宁^[3]以射阳河建闸前后的实测资料为例, 再次分析挡潮闸闸下泥沙淤积成因, 认为罗肇森关于建闸后潮流量减少这个提法欠妥, 因为海口进潮量并不比建闸前

小, 只有在靠近挡潮闸的河段, 潮流量才减少很多。严恺^[4]和杨庆钰^[5]在总结了前人的经验后, 指出潮流量的变化与闸门的运转方式有关。筑闸后如果取涨平关闸、落平开闸的运行方式, 则在涨潮时通过该断面的部分进潮量被截, 落潮时下泄流量相应减小。如果闸门长时间关闭, 则涨潮时通过该断面的超量全部被截, 落潮流量也将锐减, 造成闸下河段严重淤积。在随后的研究中^[6-11], 挡潮闸闸下泥沙淤积的原因越来越明朗, 综其主要原因, 就是落潮流平均流速下降。根据武汉水利电力学院公式^[12], 水流挟沙能力与流速的 3 次方成正比, 水流挟沙能力衰减比流速衰减要快得多, 所以涨潮水流挟沙能力比落潮挟沙能力大得多。在以海域来沙为主的闸下河段, 涨潮流带进的泥沙, 落潮流不能全部带出, 以致每潮都有不同程度的淤积, 这是闸下淤积的根本原因。为了进一步研究流速对挡潮闸闸下泥沙淤积的影响, 胡玉志^[6]又根据青静黄排水渠挡潮闸下游观测资料, 对挡潮闸闸下泥沙淤积成因从流速垂线分布方面做了分析。在闭闸情况下, 河口段涨潮流近底流速大于水面流速, 而在落潮时水面流速大于近底流速, 河口段潮流流速在垂线上分布不遵循无潮河流的规律。由于泥沙的垂线分布是水流底层含沙量高, 所以涨潮时带入闸下引河段的泥沙量大于落潮时带走的泥沙量, 因而使挡潮闸下引河段严重淤积。施世宽^[7]、张文渊^[8]等从围垦等人为因素方面对挡潮闸闸下淤积成因作了补充, 认为大面积围垦而减少甚至截断滩面归槽水, 从而加剧

基金项目: 国家自然科学基金(50679064)
作者简介: 郑主平(1983—)男, 浙江嵊州人, 硕士研究生, 从事港口航道与海岸工程研究。E-mail: zhengzhuiping@126.com

了闸下淤积的发展。王义刚等^[9]以川东港为例,说明了在淤涨型海岸,闸下河道逐渐变长也是挡潮闸闸下淤积的重要原因。由于挡潮闸闸下河道属于盲肠河道,根据国内外的研究,异重流和口门回流亦是造成盲肠河道淤积的重要因素。综上所述,潮波变形后引起下泄水流流速下降是挡潮闸闸下泥沙落淤的主要原因,同时滩地围垦、异重流和口门回流亦是加重闸下淤积的重要因素。

1.2 挡潮闸闸下淤积的特性研究

在早期的研究工作中,很多水利学者^[1-5]对挡潮闸闸下淤积的特性有过研究。王宏江^[10]在2002年对闸下引河的淤积特性作了系统的阐述,并将闸下引河分成短引河和长引河两部分进行分别研究。短引河的淤积发展可分为2个阶段:①闸前淤积厚度最大,然后自闸前向闸下逐渐递减,其闸下淤积厚度纵剖面呈明显的尖端指向河口的三角形形状,如图1所示;②随着闸下引河内淤积的发展,淤积泥面逐渐上升,淤积厚度自闸下向河口逐渐加大,引河断面继续缩小,但淤积发展的速度越来越慢,如不采取措施则闸下泥面高程可淤至高潮位,甚至将闸下引河淤平,如图2所示。长引河中在不同的引河段,冲淤变化规律有所不同,王宏江将闸下河段分为淤积段、冲淤平衡段和冲刷段分别进行了描述,具体淤积情况如图3所示。

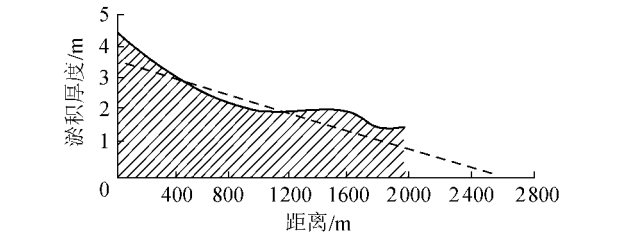


图1 海河闸下淤积厚度沿程分布
(1958.9~1959年汛前)

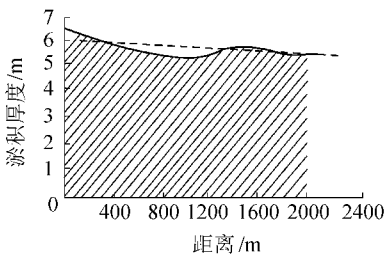


图2 海河闸下淤积厚度沿程分布
(1972年11月)

朱国贤等^[11]又对挡潮闸闸下淤积特性作了补充,认为河床淤积与下泄流量密切相关,河床内沿程淤积和局部淤滩主要是由挡潮闸下水流的横向流动造成的,同时通过观察发现,相对而言,低潮位下的河床内淤积更为严重。

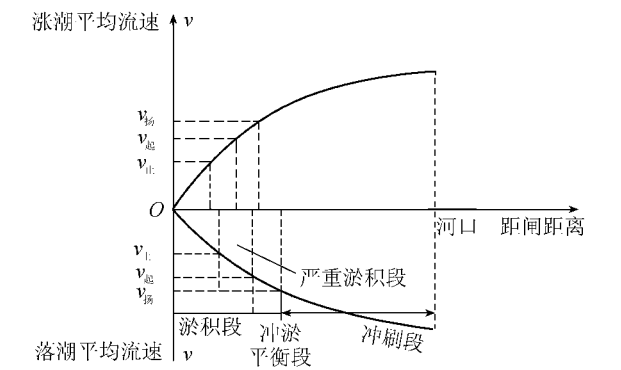


图3 长引河建闸河道闸下引河分段示意图

2 闸下河床变形估计研究

2.1 河相关系法

严恺等^[4]最早对闸下河床变形的估计进行了研究,并提出利用河相关系预估闸下河床变形估计的方法。根据国内若干河口资料分析表明,塑造河口河床主要是多年平均落潮流量和多年平均落潮含沙量,其他参数是次要的,而且这些参数资料也很难获得。故实际使用的河口河相关系常写成如下形式:

$$h = k_1 \left(\frac{Q_e}{S_e} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$B = k_2 S_e Q_e^5 Y^9 \quad (2)$$

$$A = k_3 \left(\frac{Q_e^8}{S_e^2} \right)^{1/9} \quad (3)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = k_4 S_e Q_e^5 Y^9 \quad (4)$$

式中: k_1, k_2, k_3, k_4 为用河口实测资料反算得出的系数; Q_e 为多年平均落潮流量; S_e 为多年平均落潮含沙量。这些简单关系式既使用方便,且符合实际情况。

为了粗略地估计筑闸以后闸下游河段河床调整到均衡时的河床断面尺度,用上述简化河相关系来预报,可以得到较为满意的结果。例如从式(1)~(4)出发,利用挟沙能力关系式可以求得筑闸前后单宽潮量、含沙量比值的变化,从而可得水深的变化:

$$H_2 = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{1/3} \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^{2/3} H_1 \quad (5)$$

式中: H_1, H_2 分别为筑闸前后水深; S_1, S_2 分别为筑闸前后含沙量; q_1, q_2 分别为相应的单宽潮量。

在甬江口镇海港整治前后,假定含沙量不变,用上述关系式进行计算,结果表明水深和实际吻合较好。因此,这种粗略的计算不失为一种可行的方法,可以用于筑闸前后闸下河段河床变形的估算。

2.2 床面平衡条件法

严恺、梁其荀^[13]等提出了根据床面平衡条件进行闸下航槽淤积计算的方法。根据床面平衡条件,给出河口地区水流与航道走向一致时,计及水流归

槽或航道人为工程作用,航槽浚深或人为工程(如建防潮闸)所引起的流速变化后航槽淤积计算式如下:

$$P = \frac{KSc_{p\alpha t}}{\rho_B} \left| 1 - \frac{V_1'}{2V_1} \right| \left| 1 + \frac{H_1}{H_1 - P} \right| \quad (6)$$

式中: P 为淤积时段 t 内的淤积厚度; K 为经验系数,根据现场资料分析,可取 $K \approx 0.13 \sim 0.15$; H_1 为工程前的水深; ρ_B 为淤积物的干密度; V_1 和 V_1' 分别为工程前后的平均流速。式(6)需用迭代法计算,该公式的优点在于不仅能获得闸下总淤积量,而且能获得闸下淤积的沿程分布。

2.3 纳潮回淤法

王宏江^[10]提出了纳潮回淤的计算方法。建闸后在引河段内的淤积量 W 可按下式计算:

$$W = \frac{T}{\rho_B} (QS_{\uparrow cp} \epsilon) \quad (7)$$

式中: W 为年淤积量; T 为一年中的潮汐数; ρ_B 为淤积物的干密度; Q 为口门纳潮量; $S_{\uparrow cp}$ 为口门涨潮平均含沙量,其中箭头表示涨潮; ϵ 为淤积率,是淤积量与进沙量之比,其取值主要取决于建闸引起的潮波变形,即涨落潮流速比值和涨落潮时间的比值。实践表明,建闸前 ϵ 一般为 $10\% \sim 20\%$,建闸后增大至 $30\% \sim 60\%$, ϵ 值的确定见文中公式(10)。 $S_{\uparrow cp}$ 通常应按实测含沙量资料计算,在缺乏该项资料的情况下,对一般淤泥质河口海岸,可按刘家驹公式估算:

$$S_{cp} = K\rho_s \frac{(|V_1| + |V_2|)^2}{gH} \quad (8)$$

式中: H 为水深; V_1 和 V_2 分别为浅滩潮流平均流速和波动水体的平均振动速度; ρ_s 为泥沙颗粒密度。

对出现浮泥的海岸河口地带,可按文献^[16]提出的公式进行估算:

$$S_{cp} = \rho \left| \frac{\rho_s}{\rho_w} \right|^{12.8} \frac{(|V_c| + |V_w|)^3}{gH\omega} \quad (9)$$

式中: K 为系数, $K = 4.345 \times 10^{-6}$; ω 为黏性泥沙絮凝沉速; ρ 、 ρ_s 和 ρ_w 分别为水密度、泥沙颗粒密度和床面浮泥湿密度; V_c 、 V_w 分别为潮流时段平均流速和波动水质点平均水平速度。

$$\epsilon = \frac{\text{进沙量} - \text{出沙量}}{\text{进沙量}} = 1 - \frac{1}{\eta} \left| \frac{V_{\downarrow cp}}{V_{\uparrow cp}} \right|^4 \quad (10)$$

式中: $V_{\uparrow cp}$ 、 $V_{\downarrow cp}$ 分别为涨、落潮平均流速,可通过实测潮流资料或物模试验或数模计算确定。

必须指出,公式(5)是对河口筑闸后河床变形的比较粗略的计算公式。而公式(6)和公式(7)均属一元水沙条件的方程式,适合于引河较长的闸下淤积计算,而对于短引河的河口建闸工程,其进口含沙量必须考虑两侧浅滩的侧向供沙和水沙交换,其浅滩

含沙量按实测含沙量或通过公式(8)和(9)估算。实践表明,通过上述处理能获得与天然实测状况相一致的结果。

3 挡潮闸闸下河流模拟技术研究

作为挡潮闸闸下泥沙研究的重要手段之一,河流泥沙模拟技术也得到了迅猛的发展。河流模拟技术包括泥沙实体模型和泥沙数学模型两部分。

3.1 泥沙实体模型

在实体模型方面,建立了一整套河工模型的相似理论、设计方法和试验技术,并在研究和解决大量的泥沙问题中积累了丰富的经验。20世纪70年代末,主要的相似理论成果有李昌华的动床泥沙模型律^[15]、屈孟郝的动床泥沙模型律^[16]、窦国仁的全沙模型律^[17]和武汉水利电力学院的动床泥沙模型律^[18]等。20世纪80年代以来,随着泥沙基本理论与水利工程建设需要,泥沙实体模型试验得到进一步发展。在模型变态(几何变态、时间变态和比降二次变态)、模型沙选择、宽级配非均匀沙模型、模型人为转弯、泥沙起动和扬动相似条件、沉降相似,以及各相似条件偏移对试验成果的影响等方面提出了新的理论和模拟方法,并取得了很好的使用效果^[19-25]。

黄建维^[26-29]等就永定新河建立了防淤减淤工程浑水动床物理模型,对河口建闸与导堤工程的减淤效果进行了对比分析,认为建闸方案优于双导堤工程,并提出了一系列的减淤防淤方案。徐和兴等^[30]针对江苏北部盐河和灌河上拟建的盐灌船闸做了定床和动床物理模型试验,探讨了闸下泥沙淤积和减淤措施问题。

3.2 泥沙数学模型

在数学模型方面,有关非饱和输沙的概念和基本方程式,早在20世纪30年代年代葛斯同斯基就曾经提出过,并用来计算沉沙池淤积。20世纪60年代侯晖昌、张启瞬曾从均匀流二维扩散方程出发,用这一概念计算了坝下游冲刷及沉沙池淤积。而将这一概念作为在一般情况下必须考虑的因素引进一维数学模型的则是从窦国仁开始,在韩其为后来的工作中得到了进一步的发展^[31]。20世纪70年代泥沙数学模型的研究得到快速发展,许多数学模型开始用于水库泥沙研究,为满足工程实践的需要,随后二维、三维泥沙模型也得到了发展^[32-33]。

目前,水沙数学模型的数值计算方法主要有以下几种:特征线法^[34]、有限差分法^[35]、有限元法^[36-40]、有限体积法^[41-42]和有限分析法^[43]。一维模型常采用的数值计算方法为有限差分法,这种方法

又分为显式格式和隐式格式两种。据研究,隐式格式是无条件稳定的,只需考虑解的精度问题。

茅泽育^[44]等在2003年建立了基于圣维南方程组及四点隐式 Preissmann 格式的一维感潮河段潮流数值模型,并在主支河汇流、主支河分流等内边界的处理上得到很大突破。但是,茅泽育等建立的模型只能计算水流的特性,对于泥沙方面还有待补充。杨红等^[45]、张幸农等^[46]用 Preissmann 四点偏心格式对水流连续方程和运动方程进行离散,以 TDMA 法求解差分方程组,用迎风格式计算含沙量,用显式差分格式计算河床变形,建立了系统的挡潮闸闸下河道一维水沙数学模型。在用张家港船闸下游引航道的水沙资料进行验证过程中,取得了良好的效果。

4 挡潮闸闸下泥沙研究方向展望

随着社会经济的发展,流域水资源的利用率越来越高,下泄水量逐年减少,为了使水力冲淤达到最佳效果,必须对挡潮闸闸下水沙特性有更加充分的了解。但是,目前还是有诸多问题束缚着挡潮闸闸下泥沙研究的发展。

首先,在水流结构研究上主要表现在以下几个方面:①挡潮闸修建引起的下游河道潮波变形问题。在闸门关闭情况下,潮波从口门入侵后经过几次来回反射,由前进波变为驻波,沿程高潮位或低潮位同时出现,潮差沿程递增,闸下潮差最大。但是,这个潮差与闸门的运行方式关系很大,在不同的闸门运行方式下潮差沿程具体的变化过程,国内还没有可靠的研究成果。②往复流问题。由于挡潮闸闸下河道是在径流和潮流共同作用下的一种复杂的河流,往往在全河段中存在两股方向相逆的水流,一股因径流来自上游而下,一股因潮位上涨逆流而上。由于上游水位和流量、下游潮位以及闸门开启度的不断变化,其中流速为零的位置是一直变化的,在单一的一维水沙数学模型中,很难模拟这个情况。③闸门出流流量的不恒定对下游河道的水流结构的影响。在进行水力冲淤时,闸门开启度一定的情况下,由于闸下水位随潮位的改变而改变,而闸门出流流量又与上游水位和闸下水位相关,所以闸门的出流流量也是不断变化的。由于下泄流量的不断改变,又引起闸上游及闸下游河道水位的不断改变,最终又影响出流流量。这种水流相互间紧密的联系,使得闸下水流的特性变得更加复杂。

其次,在泥沙特性研究上主要存在以下几个问题:①水流挟沙力问题。目前,国内外的水流挟沙力公式大都是半理论、半经验的,有的则完全是经验性的。这些公式对物理现象和机理的体现还相当粗

糙,因而各家泥沙模型差异较大,其根本原因在于描述水流泥沙运动的有关系数具有不确定性。特别是在有潮流影响的河段,由于潮流对径流的抵制作用,使得其挟沙能力大大降低,有学者甚至提出在感潮河道的水流挟沙力应与水流水速的2次方成正比,这与传统的认识有很大的差异。②悬移质、推移质和床沙交换问题,以及由此引起的床沙粗、细化问题。③黏性泥沙问题。处于淤泥质海岸带的挡潮闸闸下河流,由于其包含的泥沙粒径比较小,往往具有黏性,很容易发生絮凝现象,沉降机理已经与粗颗粒泥沙大不相同,天然径流河道的泥沙沉降公式已经不再适用,成熟的理论还待提出。同样,黏性沙的起动流速公式也尚待解决。④淤后冲刷问题。挡潮闸闸下河道内泥沙的冲刷问题属于淤后冲刷问题,然而目前还没有理论将泥沙淤积固结的造床特点与冲刷机理联系起来,如淤积历时、淤积方式等因素对冲刷量的影响,淤后冲刷的变化规律还有待研究。

挡潮闸闸下河道受径流、潮流的影响,属于非常复杂的流动。考虑到目前研究的局限性,今后研究重点应放在闸下水流和泥沙运动特点上,更好地了解径流潮流共同作用下泥沙的起动及沉降特性,从而从根本上突破目前研究的瓶颈。要很好地模拟其水流泥沙特性,还需要建立起更加符合实际情况的二维甚至三维水沙数学模型。目前,国内在这方面的研究还处于空白。我们应积极地以某些实际工程建设为契机,建立实体模型,使数学模型和物理模型相结合,得出闸下水流泥沙运动规律,选择最佳时机控制闸门运行,充分利用水流冲淤,使挡潮闸闸下的泥沙淤积危害降到最低。

参考文献:

- [1] 窦国仁.射阳河闸下淤积问题分析(1958~1962)河港研究第三分册[R].南京:南京水利科学研究所,1963:1-25.
- [2] 罗肇森,顾佩玉.建闸河口淤积变化规律和减淤措施[C]//河流泥沙国际学术论文会论文集.第1卷.1980:477-486.
- [3] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987:504-506.
- [4] 严恺,黄胜.中国海岸工程[M].南京:河海大学出版社,1992.
- [5] 杨庆钰,李玉山,蒋礼平.海河流域泥质潮汐河口淤积问题及防淤减淤措施的初步探讨[J].海河水利,1985(2):17-31.
- [6] 胡玉志.入海河口挡潮闸下防淤减淤研究[J].河北水利科技,1996(2):1-3.
- [7] 施世宽.东台沿海挡潮闸淤积成因及减淤防淤措施[J].中国农村水利水电,1999,(1):20-22.

- [8] 张文渊. 苏北沿海挡潮闸下淤积的成因及其对策[J]. 泥沙研究 2002 (1) : 73-76.
- [9] 王义刚, 席刚, 施春香. 川东港挡潮闸闸下淤积机理浅析[J]. 江苏水利 2005 (3) : 28-29.
- [10] 王宏江. 泥质河口闸下冲淤特性及冲淤量的分析预报[J]. 海洋工程 2002 (4) : 78-84.
- [11] 朱国贤, 项明. 沿海挡潮闸闸下淤积分析与疏浚技术[J]. 海洋工程 2005 (3) : 115-118.
- [12] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学 上册[M]. 北京 : 水利出版社, 1981.
- [13] 严恺, 梁其荀. 海岸工程[M]. 北京 : 海洋出版社 2002.
- [14] 孙林云, 黄建维, 刘建军, 等. 永定新河河口区水动力条件及泥沙运动特性分析研究[C]//第十届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京 : 海洋出版社 2001.
- [15] 李昌华. 论动床河工模型的相似律[J]. 水利学报, 1966.
- [16] 屈孟浩. 黄河动床河道模型的相似原理及设计方法[J]. 泥沙研究, 1981.
- [17] 窦国仁. 金沙模型相似律及设计实例[J]. 水利水运科技情报, 1977(3) : 6-12.
- [18] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 武汉 : 水利出版社, 1982.
- [19] 王延贵, 等. 模型沙物理特性的试验研究及相似分析[J]. 泥沙研究, 1992(3) : 18-24.
- [20] 吕秀贞, 戴清. 泥沙河工模型时间变态的影响及其误差校正途径[J]. 泥沙研究, 1989(2) : 17-24.
- [21] 胡光斗, 曾庆华. 模型沙水下休止角与边坡上起动相似问题[J]. 泥沙研究, 1989(4) : 34-37.
- [22] 陈稚聪, 安毓琪. 河工模型中时间变态与水流挟沙力关系的试验研究[J]. 人民长江, 1995 26(8) : 28-32.
- [23] 吕秀贞. 河工模型几何变态对破面上推移质输移相似性的影响[J]. 泥沙研究, 1992(1).
- [24] 姚文艺, 王德昌, 侯志军. 多沙河流河工动床模型“人工转析设计方法”研究[J]. 泥沙研究 2002(5).
- [25] 胡春宏, 王延贵, 等. 长江防洪模型沙选择的试验研究[R]. 北京 : 中国水利水电科学研究院 2004.
- [26] 黄建维, 等. 永定新河防淤减淤工程模型试验研究第一阶段报告[R]. 南京 : 南京水利科学研究院 ; 天津 : 天津水利局 2001.
- [27] 黄建维, 等. 永定新河防淤减淤工程浑水动床物理模型试验研究报告[R]. 南京 : 南京水利科学研究院 ; 天津 : 天津水利局 2001.
- [28] 黄建维, 等. 永定新河防淤减淤工程模型试验研究总报告[R]. 南京 : 南京水利科学研究院 ; 天津 : 天津水利局, 2001.
- [29] 黄建维, 张金善. 我国河口挡潮闸闸下淤积综合治理技术[J]. 泥沙研究 2004 (3) : 46-53.
- [30] 徐和兴, 徐锡荣. 潮汐河口闸下淤积及减淤措施试验研究[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 2001 (6) : 30-35.
- [31] 韩其为. 悬沙不平衡输沙的初步研究[C]//第一次国际河流泥沙会议论文集. 北京 : 1980.
- [32] 李义天, 谢鉴衡, 吴伟明. 二维及三维泥沙数学模型的研究进展[C]//全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 第二卷. 中国水利学会泥沙专业委员会, 1992.
- [33] 陈国祥, 陈界仁. 沙捞·巴里. 三维泥沙数学模型的研究进展[J]. 水利水电科技进展, 1998 (1) : 13-19.
- [34] 杨国录. 河流数值模拟[D]. 武汉 : 武汉大学水利水电学院, 1992.
- [35] 刘树坤, 袁小勇. 二维溃坝洪水数值模拟的研究[C]//水利水电科学院研究论文集. 第 29 集.
- [36] 章本照. 流体力学中的有限元法[M]. 北京 : 机械工业出版社, 1986.
- [37] AKANBI A A, et al. Model for flood propagation on initially dry land[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988 (144) : 7).
- [38] 李大鸣, 陈虹, 李施森. 河道洪水演进的二维水流数学模型[J]. 天津大学学报, 1998(4) : 439-446.
- [39] 韦直林. 天然河道平面二维水沙数学模型研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1992(6) : 33-37.
- [40] 韦直林. 河道水流泥沙问题的一种有限元解法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1999(6) : 13-16.
- [41] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京 : 清华大学出版社, 1998.
- [42] 谭维炎, 胡四一, 王银堂, 等. 长江中游洞庭湖防洪系统水流模拟—— I 建模思路和基本算法[J]. 水科学进展, 1999(12) : 336-334.
- [43] 李炜. 黏性流体的混合有限分析解法[M]. 北京 : 科学出版社, 1989.
- [44] 茅泽育, 等. 感潮河段潮流数值计算[J]. 海洋工程, 2003 (4) : 86-90.
- [45] 杨红, 张幸农. 感潮河段船闸下引航道水沙运动及泥沙淤积[J]. 海洋工程 2004 (4) : 86-94.
- [46] ZHANG Xing-nong, YANG Hong, SUN Bo. Prediction of siltation in the downstream approach channel of tidal locks[J]. China Ocean Engineering, 1999 (13) : 317-326.

(收稿日期 2007-02-07 编辑 : 高建群)

