



长江中下游东流水道河床演变特性及趋势预测

熊小元

(长江航道局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以东流水道为研究对象, 从水流泥沙、河道地形等实测数据出发, 分析其河床演变基本特征, 着重探讨整治工程实施后地貌出现的新变化, 同时结合平面二维数学模型对该河段的发展趋势进行预测。结果表明: 整治工程实施后深泓线趋于顺直, 且整体存在下摆趋势; 东港经历了深泓线下切后进口段已基本稳定, 中下段的深泓有所冲深; 天玉串沟整体维持冲刷趋势, 老虎滩头部冲刷后退, 其尾部淤积下延; 天沙洲沙头侵蚀后退, 尾部基本稳定但面积持续缩减。东流河段的整治工程在2010年汛期前较好地控制了东流河段, 整体上达到了整治预期效果。2010年汛后地貌形态出现较大变化, 结合平面二维水沙数学模型对该河段未来10a发展趋势进行预测, 分析结果与实测基本吻合。今后应加强整治工程力度, 着重维护西港的稳定、控制东港分流比, 防治河段出现大幅的冲刷和淤积。

关键词: 东流水道; 整治工程; 河床演变; 数学模型; 长江中下游

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0125-08

Evolution characteristics and trend prediction of Dongliu channel in middle and lower Yangtze River

XIONG Xiao-yuan

(Yangtze River Waterway Bureau, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the measured data of flow, sediment and monograph of Dongliu channel, we analyze the evolution characteristics, discuss the change of topography after implementation of the waterway regulation projects, and predict the new the evolution trend using a 2-D mathematical model. The results show that the Dongliu channel mostly erodes after one decade and local channel deposits sometimes. The range of erosion/deposition is 5 m. The spilt ratio of east harbor increases and the spilt ratio of west harbor and Lianhuazhou decreases after one decade. The left branch of Laohutan shoal deposits and the channel condition of west harbor worsens because of the deposition of Laohutan shoal, to which enough attention shall be paid.

Key words: Dongliu channel; regulation project; river bed evolution; mathematical model; the middle and lower Yangtze River

长江中下游浅滩分布众多, 严重制约了长江干线航运事业的发展。东流水道为长江下游典型的碍航水道, 由东港、西港和莲花洲港组成, 其在枯季复杂多变, 航道条件极差。由于主流周期性易位, 西港和莲花洲港两汉作为主航道交替使用。当西港作为航道时, 在枯水中前期易出现浅滩碍航; 当莲花洲港作为航道时, 在枯水位较低时期易出现浅滩碍航, 并易发生船舶搁浅。在

2004年以前, 有近1/3的年份航道难以维持到规定的维护尺度, 是长江下游重点浅险水道之一。因此, 交通部以交水发[2003]567号文批复同意实施长江下游东流水道航道整治工程。

国内学者对东流水道演变过程和整治工程效果等进行了大量研究。郑英等^[1]通过物理模型研究认为鱼骨坝式对东流水道泥沙输移带影响小于围堰式鱼嘴工程, 在航槽维护上利于西港航道

收稿日期: 2013-07-22

作者简介: 熊小元(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 注册咨询工程师, 从事航道规划建设工作的。

和深槽的稳定。胡小亭^[2]对100余年东流水道演变进行总结,重点探讨了整治工程对右岸边滩的影响。潘玉明^[3]对东流河段实施整治工程的效果进行了评价,认为整治工程整体达到了稳定河势效果。李青云等^[4]对整治工程一期工程效果进行分析,认为中枯水河势向有利方向发展,西港航道得到改善,整治建筑物整体稳定,并总结了该河道治理的一些有益经验。李文全等^[5]认为,整治工程实施后,东港处于发展过程中,西港有所萎缩,但仍有复苏的可能性。已有研究成果和实测资料显示,东流水道航道整治工程实施后,总体河势基本得到控制,航道条件得到改善,历年航道尺度均达到4.5 m×200 m×1 050 m标准设计航道尺度。上述成果有助于加深对该河段演变特性及工程效果的认识。但由于河道演变的复杂性和水沙条件的变化,近年东流水道出现了超出预期的不利变化:一是东港分流比明显增加,使得老虎滩左侧航槽淤浅;二是西港水流分散,天王窰沟冲深发展,未能集中于设计航道内。鉴于此,为了进一步认识这些变化的特性及原因,有必要结合工程前后东流水道河床演变特征和趋势进行深入分析,客观评价整治工程效果,并采用数学模型对其演变趋势进行预测,为后续航道整治规划提供科学依据。

本文以东流水道为研究对象,在总结其历史演变的基础上,探讨了近期整治工程影响下河床演变特征。同时结合近期水、沙及地形数据,基于平面二维数学模型对东流水道发展趋势进行预测,为下一步的航道整治提供参考。

1 东流水道河道演变特征及发展趋势

1.1 水沙过程特征

东流水道下游约120 km设有大通水文站,由于期间无大型支流分汇,大通水文站的水沙条件基本反映这一水道的水文要素。1950—2011年年均水量为8 918亿m³/a,年平均流量为28 340 m³/s,年均沙量为3.84×10⁸ t/a。多年水量变化趋势性不明显,沙量存在阶梯型锐减,近期(2003—2011年)沙量较1950—1968年年均减小为3.46×10⁸ t/a,减

幅达70.75%。在年内分配上,汛期水量占70.59%,枯期为29.71%;而输沙量汛期占87.15%,枯期为15.82%。水量和输沙量的年内分布不均衡,且沙量的不均衡性大于水量。同时统计东流水道泥沙粒径特征,悬移质粒径在0.009~0.25 mm,中值粒径变化范围为0.012~0.031 mm,平均粒径在0.031~0.056 mm。河床质的中值粒径变化范围在0.096~0.223 mm。

统计东流河段分流比变化(图1),1960—2003年东港的分流比呈现减小趋势,2004—2010年表现为增加趋势,截至2010年已经达到40%,表明整治工程已经发挥了明显效果。过渡段2003年前分流比先减少后增加,在2004年起为减少趋势。同时莲花洲港在20世纪60年代分流比较大,自1970年起分流比变化不大。过渡段(西港)随着流量的增加而减少,莲花洲港则随流量的增加而增加,西港为枯期主汊,莲花洲港为洪水汊道。

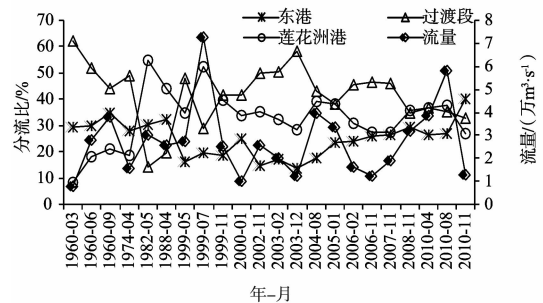


图1 东流水道分流比变化特征

1.2 东流水道历史时期河床演变特点

东流水道位于长江下游九江市—安庆市之间,上起华阳河口,下至吉阳矶,长约31 km,属于顺直分汊河型(图2)。将历史时期的演变分为3个阶段:1842—1880年,进口主流指向东港,东港为主汊,水深条件良好;1923—1935年莲花港为主汊;1950—1975年,老西港经历了发展-成熟-衰退的过程,左岸有所崩退,航道走西港,但莲花洲港开始发展,1974年和1960年相比,老西港分流比减少约13.2%,莲花洲港分流比增加约10.6%,东港分流比维持在28%左右。1975—1992年,时间为17 a,过渡段的老西港经历了发展-成熟-衰退的过程,新西港经历了孕育-发展的

过程，莲花洲港经历了发展-成熟-衰退的过程，该时期莲花洲港为主汊。此期间东港分流比有所增加，至1988年4月东港分流比达32.4%，但期间东港进口4 m水深线并未贯通。1992—2004年，西港发展至鼎盛时期，莲花洲港和东港有所衰退，主

要是1998和1999年两届大水过后，上下滩群基本完整，左岸边滩下移，洪水使得西港航道严重淤积，而后西港进入成熟期，成为枯水主汊，此时莲花洲港衰退。综上，东流水道的主汊交替变化的周期为40~45 a。

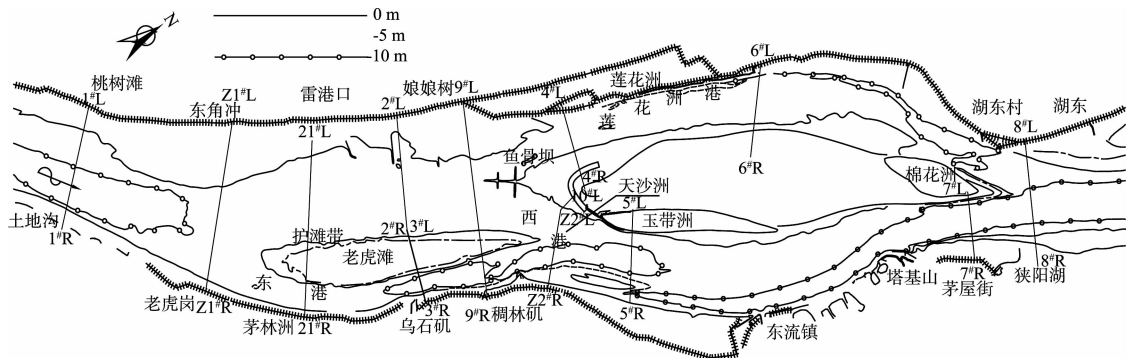


图2 东流河段2010年11月河势

1.3 东流水道近期河床演变特点

在2004年东流水道实施了航道整治工程，目的是控制莲花洲，维持西港分流比，形成利于航道条件的河道格局。实施整治工程后东流水道的沙洲、边滩、典型断面及深泓线等发生较大变化，以2004—2010年实测数据分析这一演变特征。

1.3.1 深泓线摆动特征

深泓线的平面变化在整治工程实施后表现为，

近口段的深泓较为稳定，未出现大幅的摆动。老虎滩左汊主流被束缚在河槽内，整个水道的深泓线趋于顺直，西港受到老虎滩沙尾的挤压，2003—2010年深泓线表现为整体的持续下摆（图3）。2010年的汛期过后，老虎滩的上游深泓线出现了较大幅度的右摆，摆动约280 m，这一摆动使得东港分流比增加。

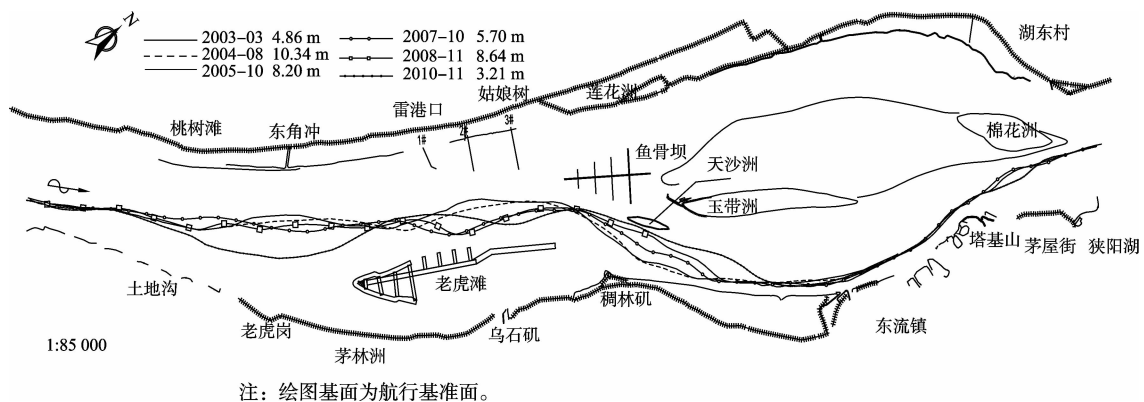


图3 东流河段深泓线摆动特征

东流水道深泓线变化见图4，其纵向变化表现为：东港进口老虎滩—茅林洲在2003—2007年为明显冲刷，最大冲深可达3.0 m，2007年后相对稳定，局部最大冲深在2.0 m，2010年大水对东港影响较小，未出现明显冲刷，东港中下段乌石

矶—稠林矶发生明显的冲刷。整体而言，东港经历了深泓线冲刷下切后，进口深泓已基本稳定，无明显的变化，中下段的深泓仍有所冲深。西港2003—2008年，进口段小幅淤积，中下段的淤积幅度较大，深泓抬高了7 m。2010年大水过后，

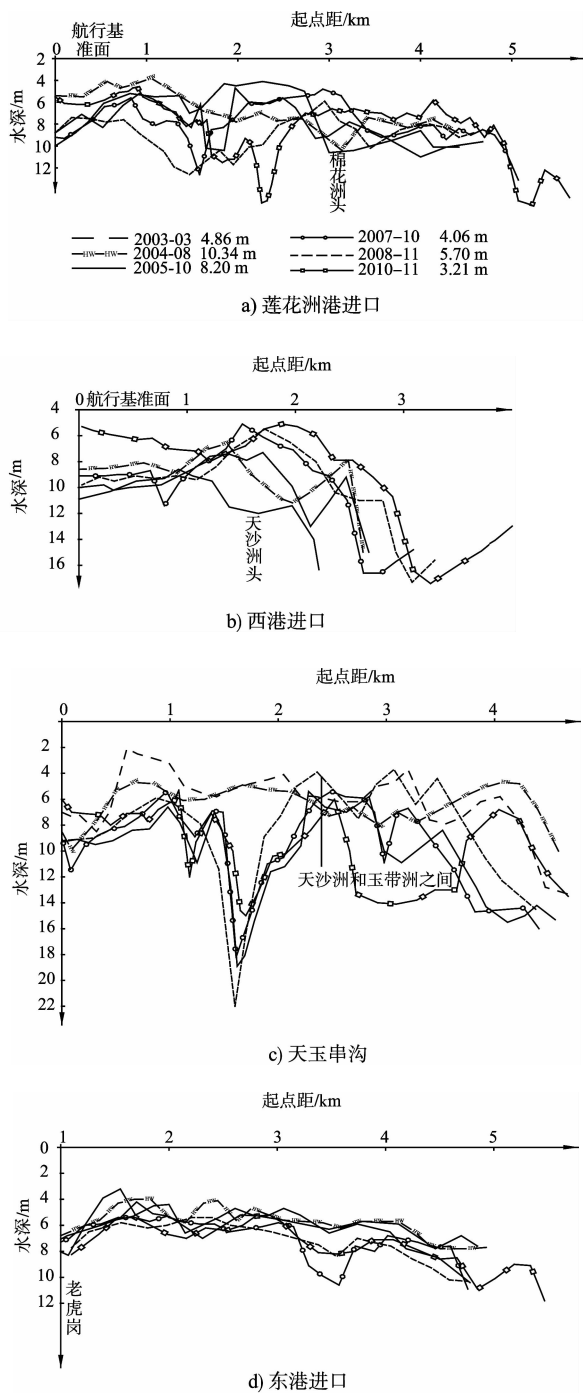
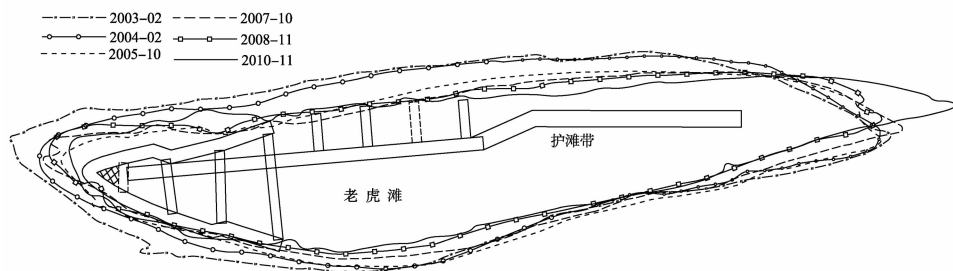


图4 东流河段深泓线的纵向变化



注：绘图基面为航行基准面；比例为1:25 000。

图5 老虎滩0 m 以上滩体变化

西港普遍淤积，进口深泓抬高约 6 ~ 8 m，使得西港冲刷能力降低，航道趋于恶化。天玉串沟因天沙洲崩退影响发展较快，2003—2007 年明显下切，2007 年以来进口虽略有淤积，但整体仍延续着冲刷趋势。莲花洲港在东流水道整治工程实施后，受左岸丁坝和玉带洲鱼骨坝的直接限制，进口段有所冲刷，中下段淤积，深泓的变化幅度较小，表明整治工程对莲花洲港起到了较好的控制作用。

1.3.2 整治工程影响下东流水道洲滩演变特征

整治工程实施后，纵向上老虎滩头部基本稳定，中、下部滩面处于持续淤积状态，滩脊抬高，年均淤高 1 ~ 2 m (2003—2009 年)，2010 年 4 月较 2007 年淤高约 5 m。老虎滩头部 0 m 等深线略有冲刷后退，尾部淤积下延约 60 m (2005—2011 年)，见图 5。老虎滩 0 m 以上面积 2002 年至 2010 年 4 月表现为大幅减少，在 2010 年汛后，因大水作用迅速淤积。整治工程实施前的 2000—2002 年，左岸边滩在华阳镇—桃树滩一带生成发展，向右侧挤压水流，在 2002—2004 年左岸边滩下移，桃树滩—雷港口一带边滩淤长发展 (图 6)。整治工程实施后，在 2008—2009 年，除桃树滩—雷港口边滩小幅淤涨外，左岸边滩较为稳定。2010 年汛后，华阳镇—桃树滩一带边滩大幅度冲刷后退，在雷港口一带淤积，使左岸边滩快速发展，向河心拓宽并突出岸线约 860 m。边滩的淤涨，使得 2010 年汛后左岸边滩的快速发展并引发河道内斜向水流，跨越老虎滩头部，进入东港。斜向水流促进了东港发展，同时加剧了老虎滩头部的冲刷，对已建老虎滩护滩工程造成不利影响，老虎滩头部 0 m 等深线已退至守护工程边缘 (图 6)。

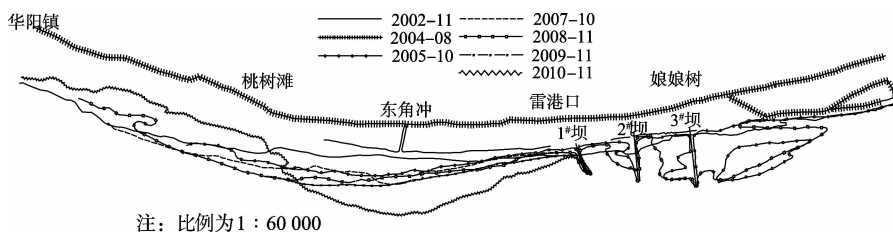
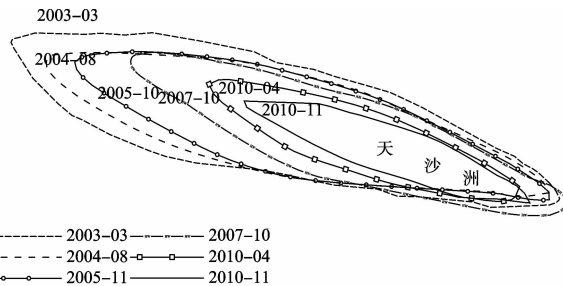


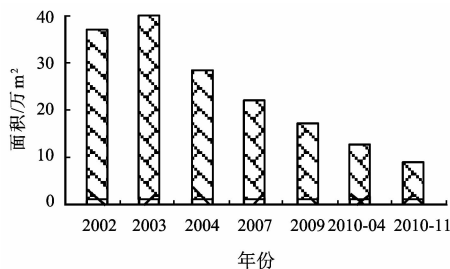
图 6 左岸边滩变化

工程前 1999—2003 年 11 月天沙洲洲头崩退超过 370 m，尾部下延约 225 m。2000 年以来崩退速度加快，头部及左侧崩退严重，2002—2010 年天沙洲发生较大幅度的崩退（图 7）。统计表明，2002 年天沙洲面积 36.27 万 m²，2010 年 4 月为 11.83 万 m²，减幅约 67%（图 7）。2003 年—2010 年 4 月，天沙洲共崩退 595 m（表 1）。除 2010 年大水外，近年来天沙洲崩退速度有所减缓，又因该区域地质为粉质黏土覆盖，未来一段时间天沙洲的崩退幅度可能会进一步减小，短期难以崩失。由于天沙洲的崩退，使深泓线摆向天玉串沟一侧，加之老虎滩尾淤积下延挤压西港，进一步增加天玉串沟的分流，促进了天玉串沟发展。2010 年汛后，天玉串沟分流比达 18%，而西港分流比仅为 15%，天玉串沟的发展对西港极为不利。综上，整治工程后，天沙洲冲淤延续工程前基本规律，为洲头和左右缘均发生崩退，洲尾也发生崩退。



注：绘图基面为航行基准面，比例为 1:1 000。

a) 等值线



b) 柱状图

图 7 天沙洲 0 m 以上面积的变化

表 1 天沙洲崩退距离变化

时间	2003—2004	2004—2005	2005—2007	2007—2009	2009—2010-04	2010-04—2010-11
崩退距离/m	106	84	159	158	88	110

综上，整治工程后东流水道河床演变特征出现新的变化，主要表现为：深泓线趋于顺直，西港受到老虎滩沙尾的挤压，2003—2010 年深泓线表现为整体的持续下摆；东港经历了深泓线冲刷下切后，进口深泓已基本稳定，中下段的深泓仍有所冲深，天玉串沟整体仍延续冲刷的趋势，整治工程对莲花洲港起到了较好的控制作用。但航道条件也有明显的向不利方向发展的趋势，特别是 2010 年大水造成东港迅速发展，老虎滩左汊淤积、航槽淤浅，老虎滩尾的大幅下延，导致西港航宽减小，使航道水深及宽度大幅减小，航行条件变差。

2 数学模型及演变趋势预测

数学模型的控制方程及推导过程参见文献[7]，

方程的离散基于 SIMPLE 算法，水位采用 Patanker 水位校正法，为避免计算迭代过程中出现溢出值，采用 Patanker 和 Splading 给出的欠松弛技术、块校正技术及逐行扫描的 ADI 法。计算区域采用曲线贴体网格进行划分，整个计算区域划分成 340 × 160 个四边形网格单元，沿水流 ξ 方向上网格长度为 40 ~ 130 m，沿河宽 η 方向上网格宽度 10 ~ 30 m，在工程区域网格进行局部加密，网格长度在 30 ~ 50 m。

2.1 模型参数选取

1) 依据长江实测资料，得到挟沙力的经验公式：

$$S_* = K(0.1 + 90 \times \frac{\omega}{u}) \frac{\bar{u}^3}{gh\omega} \quad (1)$$

式中： K 为断面平均挟沙力系数，其取值与一维水流挟沙力系数相同。

2) 糙率系数选取沿平面分布的经验表达式：

$$n = C_1 \left[1 + \left(\frac{1}{h} \right)^{n_1} \right] f(A, r, u)$$

式中： C_1 为一维糙率系数； h 为水深； A 为过水面积； r 为曲率半径； u 为流速。 $f(A, r, u)$ 随河道平面形态的不同，表达式略有差异，其值约为0.5~1.5。

3) 泥沙恢复饱和系数。

一般情况下，若悬移质中各粒径组泥沙均发生淤积时，悬移质恢复饱和系数 $\alpha_L = 0.25$ ；若悬移质中粗颗粒不落淤，床沙中可冲颗粒部分均发生冲刷时，悬移质恢复饱和系数 $\alpha_L = 1.0$ ；若悬移质中粗颗粒落淤，同时床沙中细颗粒部分发生冲刷时，悬移质恢复饱和系数 $\alpha_L = 0.5$ 。

2.2 模型验证

计算采用2010年4月地形，水文数据采用2009年12月($Q = 14\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$)、2010年4月($Q = 38\ 850\ \text{m}^3/\text{s}$)和2010年11月($Q = 13\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$)的数据(图8)。计算值和实测值吻合较好，误差均小于5 cm。图9为典型断面流速分布的验证结果，计算的断面流速分布和实测值基本吻合。

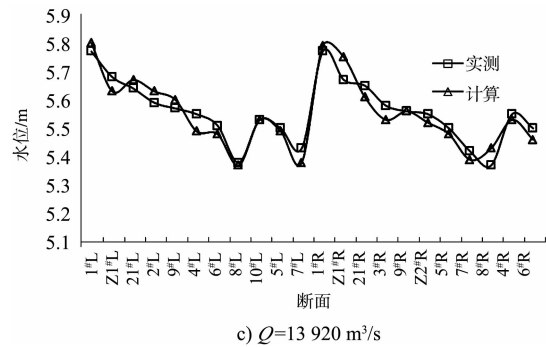
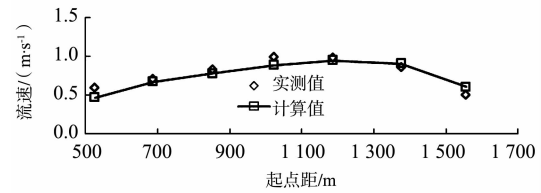
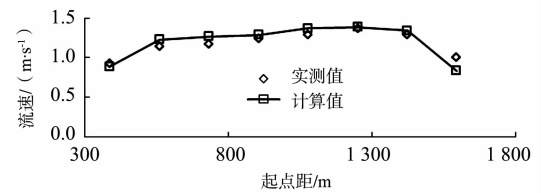


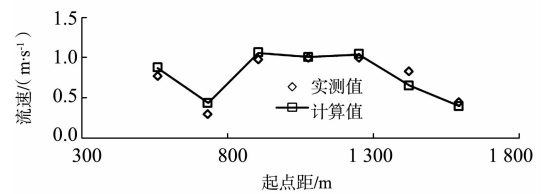
图8 不同流量级下的水位验证



a) $Q=14\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$



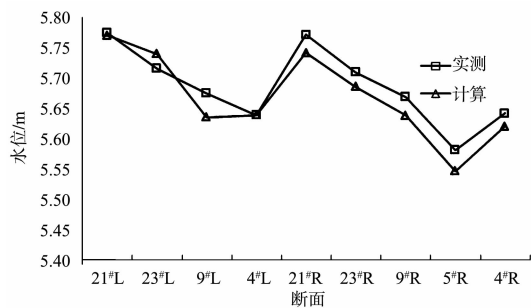
b) $Q=38\ 850\ \text{m}^3/\text{s}$



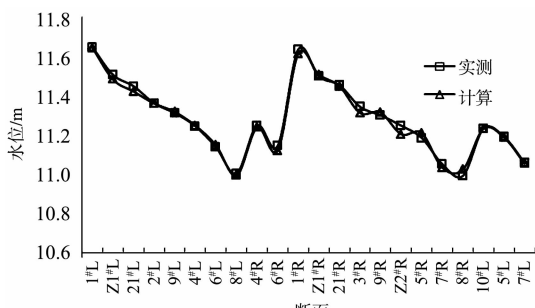
c) $Q=13\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$

图9 典型断面的流速分布验证

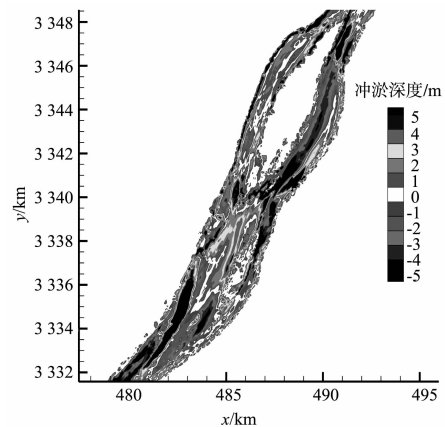
选取2009年4月—2010年11月期间的数据，进行地形冲淤验证(图10)。结果表明，实测河段的冲淤量为289万 m^3 ，计算得到该河段的冲淤量为303万 m^3 ，相对误差为4.62%，同时在冲淤分布上也基本吻合，表明本数学模型计算结果可靠。



a) $Q=14\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$



b) $Q=38\ 850\ \text{m}^3/\text{s}$



a) 实测冲淤分布

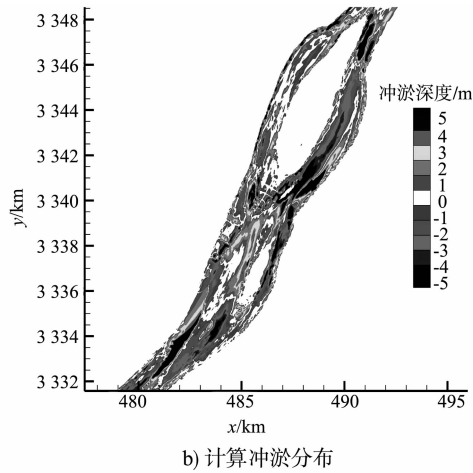


图 10 2009-04—2010-11 计算冲淤分布

2.3 基于数学模型河床演变趋势预测

2.3.1 水沙系列的选取

以 2010 年 11 月地形为初始地形，水沙系列选取大、中、小 3 种水文情况进行组合，组合选取：2006，2007，2008，2009，1998，2005，2007，2008，2009 和 2010 年共计 10 个水文年。其中 1998 年洪峰持续时间比较长；2010 年峰值超过 7 万 m³/s，基本能反映洪水特征；2006 年径流特枯，作为小水年参与计算；2008 年有明显秋汛；2009 年汛后退水速度较快。因此，选取的水文年组合完全可以反映径流的变化特征。

2.3.2 东流水道分流比趋势预测

表 2 为分流比变化趋势，受 2010 年汛后洪水的影响，雷港口边滩快速发展，形成淤积体，导致东港分流比持续增加，3 a 末增加约 4%，5 a 后分流比变化较小，基本稳定。西港和莲花洲港的分流比保持持续减少。由于东港分流比的增加，西港分流比不足的状态短期内很难得到改善，同时老虎滩沙尾的淤积下延，挤压西港，天沙洲段内难以冲失，且分流比有所增加，西港的航道将进一步恶化，这与实测整治工程后河床演变分析的趋势相一致。

表 2 东流水道分流比变化 %

年份、时间	莲花洲	天玉窟沟	西港	东港
2010 年 11 月	26.14	18.55	15.48	39.83
3 a	23.52	18.62	14.03	43.83
5 a	22.91	18.71	13.42	44.96
10 a	22.37	19.08	13.33	45.22

2.3.3 东流水道航槽变化趋势预测

计算得到东流水道 3 a 后、5 a 后和 10 a 后的航道水深变化 (图 11)。航槽由华阳河口进入老虎滩左汊后向右过渡，经西港后进入玉带洲右汊，10 a 后老虎滩左汊淤积变浅，4.5 m 航槽未能贯通，且受左岸边滩头冲尾淤影响，4.5 m 航槽右摆，沿老虎滩左缘向下发展，西港进口段受老虎滩尾部淤积影响，航道条件恶化。可见，近年来随着河道左岸边滩的淤积下移，老虎滩的头冲尾淤，东港持续冲刷发展，老虎滩左侧分流比逐渐减小，西港航道条件逐渐恶化。下一阶段航道整治应加强西港分流比控制作用，防止航道进一步恶化。

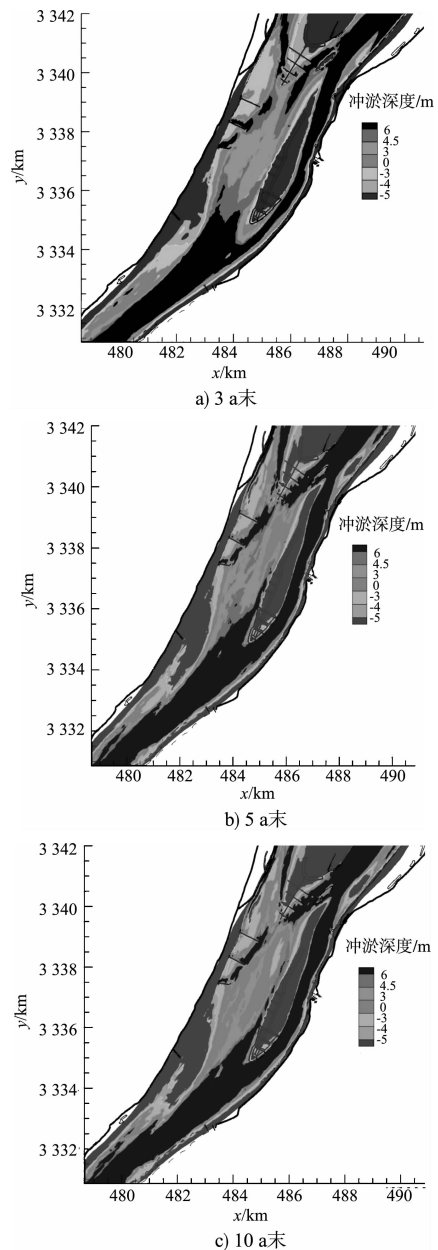


图 11 东流水道航槽变化趋势预测

3 结论

1) 天然情况下东流水道的主汊交替变化的周期为 40 ~ 45 a, 整治工程影响下整个水道的深泓线趋于顺直, 西港受到老虎滩沙尾挤压, 2003—2010 年深泓线表现为整体持续下摆。

2) 东港经历了深泓线冲刷下切后, 进口深泓已基本稳定, 无明显的变化, 中下段深泓仍有所冲深, 天玉串沟整体仍延续冲刷的趋势, 整治工程对莲花洲港起到了较好的控制作用。

3) 老虎滩探头冲刷后退, 2010 年汛后左岸边滩快速发展, 引起的河道内斜向水流进入东港, 加速了老虎滩头部冲刷, 对老虎滩护滩工程造成不利影响。天沙洲冲淤延续工程前基本规律为洲头和左右缘均发生崩退、洲尾也发生崩退。

4) 基于平面二维水沙数学模型对未来 10 a 期间河床演变进行预测, 东港分流比的增加, 西港分流比不足的状态短期内很难得到改善, 老虎滩左侧分流比逐渐减小, 西港航道条件逐渐恶化。今后航道整治应加强西港分流比控制作用, 防止

航道进一步恶化。

参考文献:

[1] 郑英, 陈建, 赵德玉. 东流水道鱼骨坝式与围堰式鱼咀工程效果模型试验研究[J]. 中国水运, 2008(8): 28-29.

[2] 胡小亭. 长江东流河段河床演变分析及实施航道整治工程后对下游右岸的影响[J]. 水利建设与管理, 2007(4): 65-67.

[3] 潘玉明. 长江下游东流水道航道整治工程效果分析[J]. 中国水运, 2010(8): 42-43.

[4] 李青云, 谭伦武, 张明进. 长江下游东流水道航道整治经验总结[J]. 水道港口, 2007(3): 169-172.

[5] 李文全, 涂新民, 杨祖欣, 等. 长江下游东流水道河床演变特征分析及航道整治[J]. 水运工程, 2011(10): 83-88.

[6] 长江航道规划设计研究院. 长江下游东流水道航道整治二期工程平面水沙数值模拟研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2011.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 124 页)

[5] 祁茂文, 罗保平. 长江中游碾子湾河段航道整治工程研究[G]//中国水利发电工程学会通航专业委员会. 第三届第二次学术交流会论文集. 北京: 中国水利发电工程学会, 1999.

[6] 刘怀汉, 李文全. 长江中游周公堤—天星洲河段浅滩演变及整治工程初步研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2004.

[7] 湖北省交通规划设计院. 汉江丹江口至襄攀航道整治工程设计施工总结[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院, 2004.

[8] 刘保军, 罗明祥. 浅析水利枢纽梯级上下游航道整治技术[J]. 广东科技, 2012(21): 135-136.

[9] 广东省航道勘测设计研究院有限公司. 梯级水利枢纽上下游航道整治技术研究[R]. 广州: 广东省航道勘测设计研究院有限公司, 2008.

[10] 长江航道规划设计研究院. 长江中游浅滩整治关键参数研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2009.

[11] 湖北省交通规划设计院. 汉江下游航道整治工程(兴隆至汉川段)工程可行性研究报告[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院, 2009.

[12] 余明辉. 汉江下游航道整治工程(兴隆至汉川段)一维水沙数学模型计算分析报告[R]. 武汉: 武汉大学, 2007.

[13] 程昌华, 刘晓平, 唐寿鑫. 航道工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[14] 王秀英. 冲积河流航道整治设计参数确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2006.

[15] 武汉大学. 引江济汉通航工程出口河段(汉江兴隆至新泗港)动床模型试验[R]. 武汉: 武汉大学, 2008.

[16] 长江水利委员会水文局. 汉江下游航道整治工程(兴隆—汉川段)新泗港—泽口段和麻洋潭滩段平面二维泥沙数学模型计算分析报告[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2007.

(本文编辑 武亚庆)