

Hydrodynamic Characteristics of Tributary River Estuary under TGR Water Inpouring and Drainage Conditions

Mingmei Long¹, Hainan Ai², Buyun Liu², Qiang He², Xingfu Sun², Hong Li²

¹Ecological and Environmental Monitoring Station in Beibei District, Chongqing

²Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing

Email: aihainan@126.com

Received: Jun. 30th, 2017; accepted: Jul. 13th, 2017; published: Jul. 19th, 2017

Abstract

As Three Gorges Reservoir changes seasonally, hydrodynamic characteristics of tributary estuaries around vary correspondingly. Water dilution and self-purification ability faded, water environmental capacity declined, and then it influences the water quality of tributary and the safety of drinking water around reservoir area. Studying hydrodynamic characteristics under the condition of impoundment and drainage in tributary estuaries, and proposing effective measures for improving hydrodynamic condition have a significant effect on improving the tributaries' water quality in reservoir area and guaranteeing the safety of water supplies. Yulin River, a tributary of Three Gorges Reservoir, was chosen as a studying object, simulating estuaries' variation of hydrodynamic characteristics during its impoundment and drainage period, furthermore analyzing evolution law of hydrodynamics. The results indicated that during the period of impoundment, the average velocity of the estuary surface was 0.026 m/s; the average velocity of the estuary bottom was 0.027 m/s. The bulk velocity was slow, influencing the diffusion of waste, which strongly needs intensive control on surface source and preventing harmful algae blooming due to risen temperature by storage of nutriment. During the period of drainage, the average velocity of the estuary surface was 0.21 m/s, however, the average velocity of the estuary bottom was 0.034 m/s. Although it possessed high surface velocity, there were no much differences in bottom velocity between impoundment period and drainage period, resulting in accumulation of nutritive salt and heavy metal in the bottom.

Keywords

Three Gorges Reservoir, Water Inpouring and Drainage, Yulin Estuary, Hydrodynamic Characteristics

三峡蓄放条件下御临河口水动力特性研究

龙明梅¹, 艾海男², 刘步云², 何强², 孙兴福², 李宏²

作者简介: 龙明梅, 女, 1985年11月出生, 重庆北碚人, 工程师, 研究方向: 环境监测与管理。

文章引用: 龙明梅, 艾海男, 刘步云, 何强, 孙兴福, 李宏. 三峡蓄放条件下御临河口水动力特性研究[J]. 水资源研究, 2017, 6(4): 357-369. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.64043>

¹重庆市北碚区生态环境监测站, 重庆

²重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆

Email: aihainan@126.com

收稿日期: 2017年6月30日; 录用日期: 2017年7月13日; 发布日期: 2017年7月19日

摘要

随着三峡水库的周期性运行, 库区支流河口水动力特性发生相应变化, 水体稀释自净能力减弱, 水环境容量降低, 进而影响支流水质和库区饮用水安全。研究三峡工程蓄、放条件下支流河口的水动力特性, 提出改善水动力条件的有效措施, 对于改善库区支流水质状况、保证供水安全具有重要作用。本文选择三峡库区一条支流-御临河为研究对象, 模拟其河口在蓄、放周期内的水动力特性变化, 分析了水动力学演变规律。研究表明, 在蓄水期, 河口表层的平均速率为 0.026 m/s , 底层的平均速率为 0.027 m/s , 整体流速较慢, 影响污染物扩散, 需加强面源的控制, 防止营养物质蓄积导致次年气温升高产生水华现象; 在放水期, 河口表层的平均速率为 0.21 m/s , 底层的平均速率为 0.034 m/s , 虽然表层流速较大, 但底层流速与蓄水期相差不大, 有可能导致营养盐、重金属在底层蓄积。

关键词

三峡水库, 蓄放过程, 御临河口, 水动力特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三峡工程在发挥防洪、发电、航运等多方面巨大效益的同时, 也对长江流域的生态环境产生了一定的影响, 受到社会的广泛关注[1] [2]。自 2003 年, 三峡工程开始试运行, 采取蓄放交替的方式运行。长江干流库区段的水位在 145 m 至 175 m 之间波动, 导致了库区一级支流河口的水动力学特性也呈周期性变化[3], 在天然河流与河流型水库之间切换, 主要表现在: 蓄水过程中, 由于长江干流水位高于支流, 形成回灌, 改变了支流的水动力特性, 进而影响了水体中沉积物中迁移转化过程[4]; 在放水过程中, 虽然表层流速较大, 但底层流速与蓄水期相差不大, 有可能导致营养盐、重金属在底层蓄积。这些周期性变化造成了整个支流中物质与能量的迁移规律发生变化。

由于天然河流尺度较大, 采用实测研究具有相当难度, 近年来, 模拟结合实测研究成为了研究者应用最多的手段。目前, 众多针对河流、湖泊以及海洋的水动力学模拟软件已越来越多的被应用, 如 MAPGIS [5]、MIKE [6]以及 EFDC [7]等, 这些软件都有各自的着重点和应用条件。深入研究一级支流的水动力学特征及演变规律, 对于库区支流水环境保护, 改善三峡库区水环境状况, 保证供水安全具有十分重要作用。本文以三峡库区库尾的较大一级支流御临河为研究对象, 结合多年的实测结果, 应用 EFDC [8]模型, 研究御临河河口段在三峡水库蓄放过程中的水动力学特征, 为御临河以及库区其它支流的水环境保护与治理提供参考。



Figure 1. Study area of Yulin river
图 1. 御临河研究区域图

2. 研究对象

御临河发源于四川省大竹县铜锣山,在洛碛太洪岗注入长江,研究区域如图 1 所示。御临河全长约 218.2 km,流域面积 3861 km²,重庆市境内流域面积 772.8 km²,水域面积 52.97 hm²,河口多年平均流量 50.72 m³/s。御临河是长江上游北岸的一级支流,也是三峡水库库尾的重要一级支流水系。三峡大坝蓄水后,在库区回水顶托的作用下,御临河形成了约 20 km 的回水区域。

3. 水动力模型

3.1. 模型概述

EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 于 1988 年由美国弗吉尼亚海洋科学研究所(IMS)和威廉玛丽学院的海洋科学学院共同开发。该模型是一个开源的地表水建模系统,将水动力、泥沙、污染物和水质模块完全集成在一个单一的源代码内。可以很好的用于包括河流、湖泊、海湾、湿地的一维、二维、三维水动力模拟[9] [10]。

3.2. 模型水动力模块的主控方程

为适应实际边界,把正交曲线坐标转换成 σ 坐标;在 EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好的拟合近岸复杂的岸线和地形[11],从而实现在垂直方向上结合重力矢量和水下地形边界,以及允许长波运动的自由液面:

$$Z = (Z^* + h)/H = (Z^* + h)/(\xi + h) \quad (1)$$

式中: Z 取值范围 $[0,1]$; Z^* 代表 σ 转换前的实际垂向物理坐标; 总深度 $H = h + \zeta$, h 为底床高程, ζ 为自由水面高程。

水动力主控方程包括动量方程、连续性方程, 其中动量方程采用了湍流运动方程的垂直流体静力学边界层形式的转换以及 Boussinesq 近似作为变密度结果:

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mH_u)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_{uu})}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_{vu})}{\partial y} + \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H_v \\ & = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - Z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mH_v)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_{uv})}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_{vv})}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H_u \\ & = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - Z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H_u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H_v)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: u 和 v 为曲线正交坐标系下 x 和 y 方向的流速分量; w 为 σ 坐标下垂向流速; m_x 、 m_y 和 m 为 Jacobian 曲线正交坐标转换系数, $m = m_x m_y$; p 为相对静水压力; f 为柯氏力参量; A_v 为垂向紊流黏滞系数; A_b 为垂向紊动扩散系数; Q_u 和 Q_v 为动量源汇项。

为提供垂直湍流粘度和扩散系数, EFDC 采用了 $2\frac{1}{2}$ 阶 Mellor-Yamada 紊流模型:

$$A_v = \phi_v ql = 0.4(1 + 36R_q)^{-1} (1 + 6R_q)^{-1} (1 + 8R_q) ql \quad (5)$$

$$A_b = \phi_b ql = 0.5(1 + 36R_q)^{-1} ql \quad (6)$$

$$R_q = \frac{gH\partial z b}{q^2} \frac{l^2}{H^2} \quad (7)$$

式中: l 为紊动混合长尺度; ϕ_v 和 ϕ_b 为稳定性函数。

4. 网格生成及边界条件

4.1. 网格划分

网格是模型求解的最小单元, 为了使自然河道的轮廓呈现在软件上, 就必须利用矩形网格或正交网格来构造河流的轮廓, 使模型的边界能与实际边界吻合。网格划分的质量直接关系到模拟的精度。但是自然水体水岸线的几何形状往往是不规则的, 在进行数值模拟时, 如果采用矩形网格会受到各种限制, 模型的边界不能与实际边界很好的吻合, 边界上曲折岸线造成的锯齿效应明显, 采用贴体坐标系建立正交曲线网格可以省去大量的交叉导数项, 模拟计算的速度也能有一定的提高。Delft3D 所建立的网格具有正交性、光滑性(连续性)及疏密度可控性等优点[12], 所以本次模拟采用由荷兰 Delft Hydraulic 公司开发的 Delft3D 作为贴体网格的生成工具, 研究区域水平网格数为 1820 个, 垂向共分 5 层。如图 2 所示。建立并完善后的网格文件导入 EFDC 软件。

4.2. 河底地形的获取与概化

御临河是典型的山地河流, 河底起伏比较大, 上游和下游落差很大, 部分河底为的碎石, 在放水期, 流速

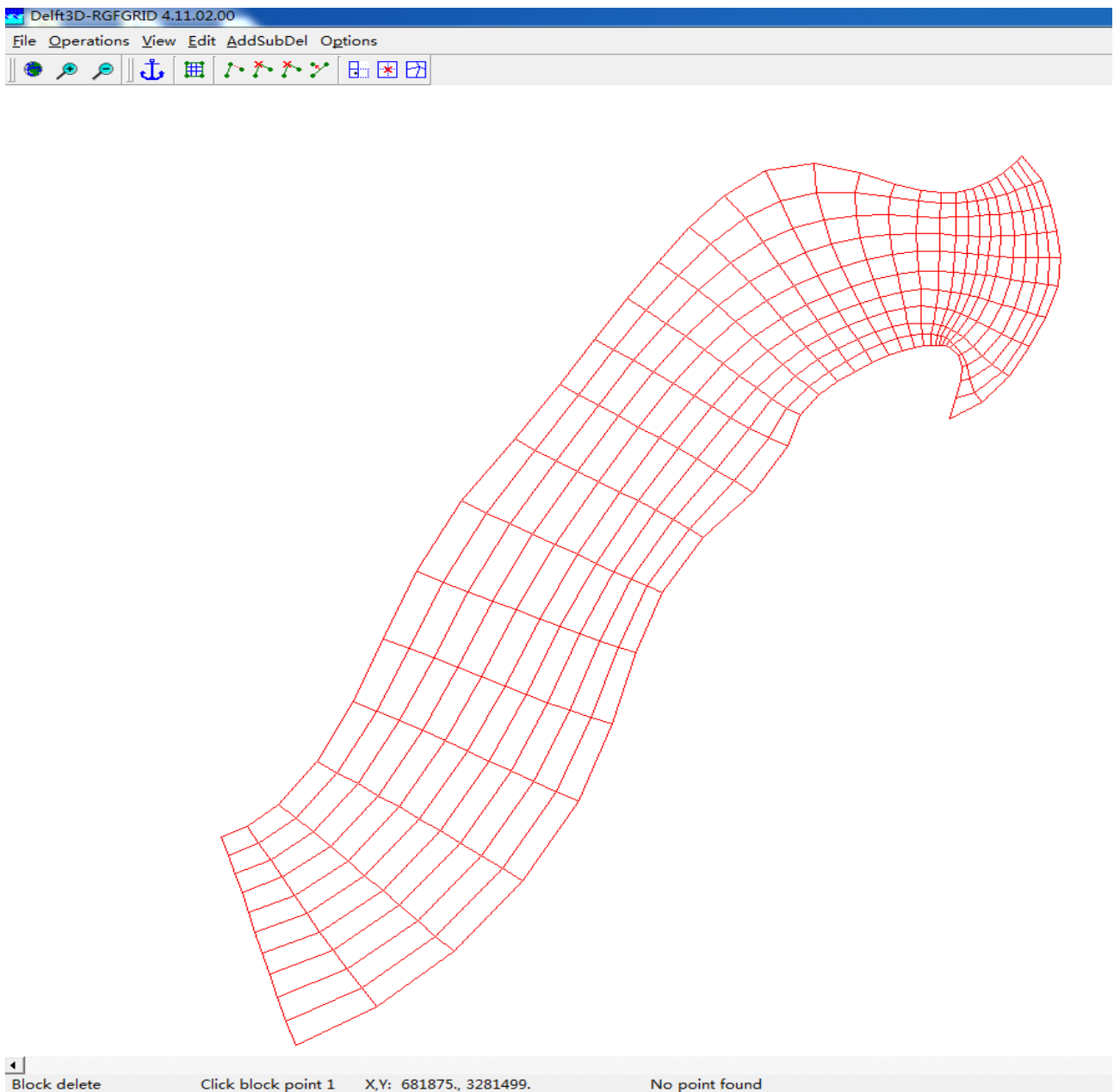


Figure 2. Boundary and curvilinear orthogonal grid based on Delft3D

图 2. 基于 Delft3D 的河流边界与曲线正交网格

很急。对于这样的河流，河底粗糙率是一个模型构建中的关键因素之一，与河床地形、水深、雷诺数、弗劳德数有关[13]，河底粗糙率确定的准确与否直接关系到最终模拟的准确性。但是，由于水下地形的获取具有较大的难度，很多研究在建立模型时常常忽略水下地形的起伏，将河底视为平底或是经验取值[14] [15]。本次模拟利用声学多普勒流速测量仪(ADCP)对研究区域设置的 10 个横向断面及中泓线进行了反复测量，获得河床地形数据，再结合网格文件构造出了御临河河口段的三维地形，最终确定河底粗糙率为 0.035。御临河的三维地形概化图，如图 3 所示。

4.3. 边界条件设置

边界条件是模型模拟的基础设置之一，本次模拟设置的边界条件为流量边界和水位界，流量的入口边界位于

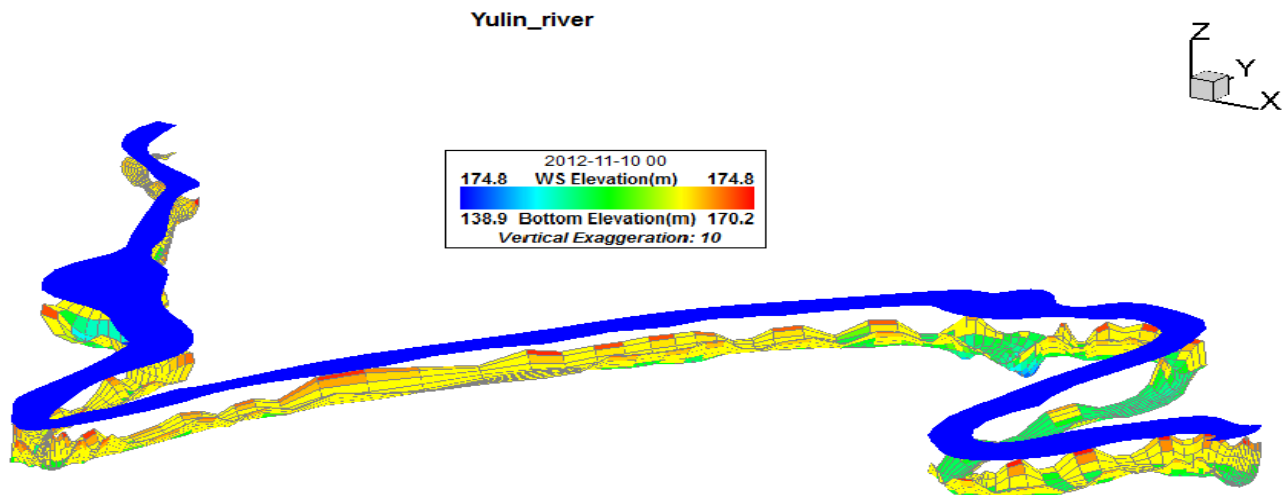


Figure 3. 3-dimensional map of river bed terrain

图 3. 三维河底地形概化图

河流上游，出口边界位于河流的下游，南部的水位边界数据从长江海事局获得。模型的最小水深限制为 0.1 m，利用干湿网格法模拟河口的流场，消除负水深的出现。气压、气温、风速以及风向等气象参数均来自于当地气象站。

5. 结果分析

5.1. 模型验证

5.1.1. 流速验证

本次模拟，利用 2012 年~2014 年两个周期 12 次多普勒流速仪的实测流速数据对水动力模型进行了验证，验证结果如图 4 所示，误差如表 1 所示。从验证结果可知，模拟值与实测值吻合度较高，平均相对误差分别为 9.20% 和 11.50%。由于精确了河底粗糙率，因此，本次验证误差较文献中的验证误差小[16] [17]。

5.1.2. 水位验证

在很多河流、河口、海湾及湿地模拟研究中，水位往往是进行水动力模型验证的首选指标，采用水位进行模型验证的案例远多于流速验证[18]。本次模拟的水位验证同样利用了 12 次实测的水位数据进行，验证结果如图 5 所示，误差如表 1 所示。从验证结果可以看出，2013~2014 年度，两次的模拟误差比较大，第一次可能是由于降雨的原因，正好在 2013 年 8 月中旬有一段时间降雨比较多，河口水位比较高，导致误差比较大；本模型设置河口水位与长江水位等同，但是实际上，在放水末期，河口水位和长江水位存在一定得差值，这可能是导致第二次误差比较大的原因。实测值与模拟值的平均相对误差分别为 8.9% 和 5.0%，本模型具有较高的吻合度。

5.2. 流场分析

5.2.1. 平面二维流场分析

模拟了 2012~2014 年三峡蓄、放过程御临河河口的流场情况，结果如图 6 所示。由于御临河处于三峡库区库尾，因此，在蓄水过程中的响应慢于库首河流。在蓄水初期，如图 6(a)所示，由于长江干流水位并不高，河口流场主要受御临河上游来水作用，正向流为主导流向，回水现象并不明显，只是在北岸一侧出现部分回流。蓄水中期(图 6(b))，此时长江干流水位已超过御临河河口水位，回水已成为河口主要流向。根据流场图显示，此时在河口形成了一个大的环流，整个回流区可以划分为三个区域，其中北岸为主流区，南岸为负回流区，中心为正回流区[19]。在放水末期(图 6(c))，随着长江干流水位持续增至最高水位，由于受到干流水体顶托，流速趋近于 0，且方向由中期的负方向变为正方向，河口的流场变得紊乱，这可能由于以下原因导致：一是主流区与

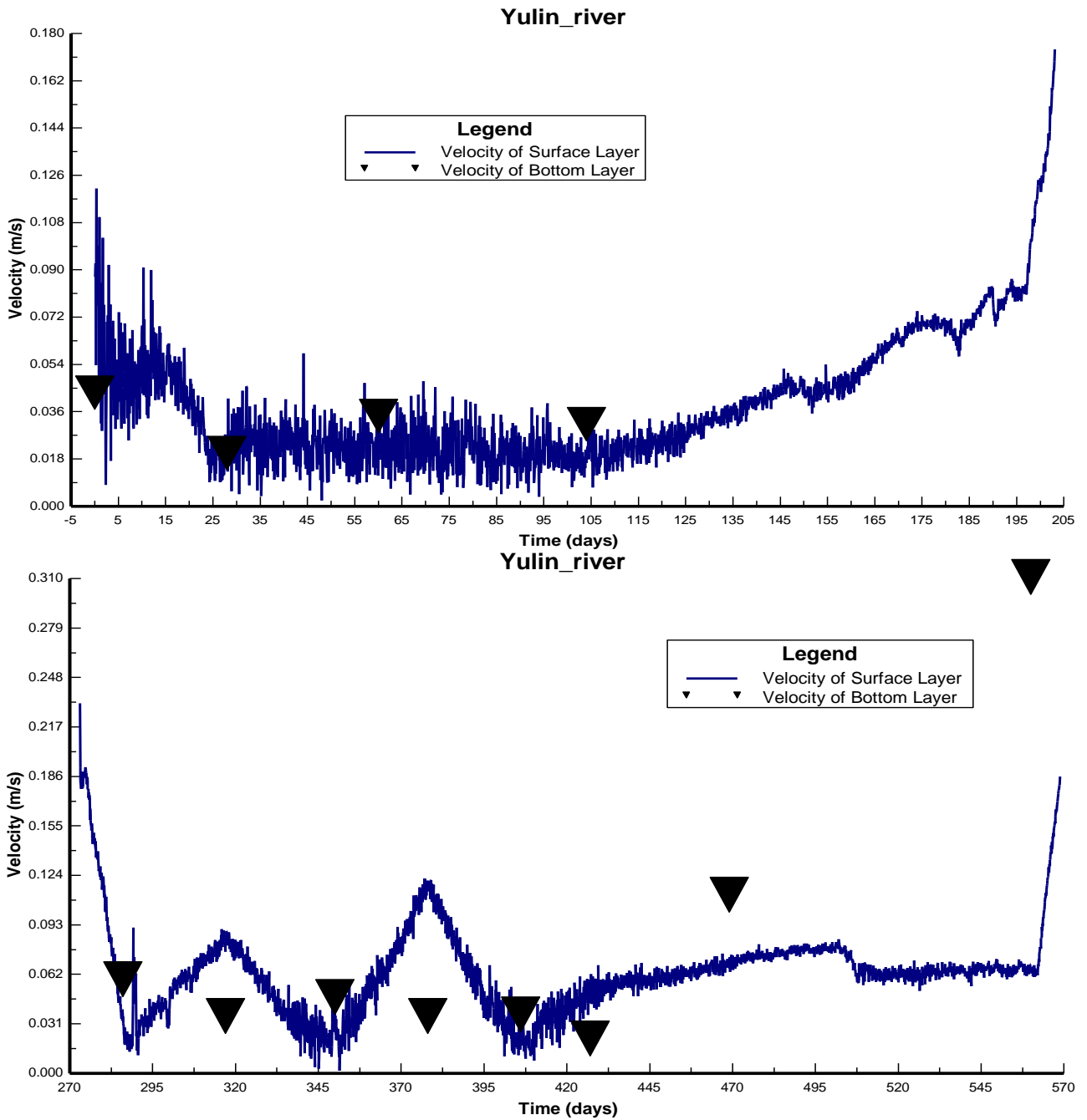


Figure 4. Water velocity verification of estuary

图 4. 河口流速验证

回流区水流的剪切作用起到了重要的作用，它还引起两个区域水体、动量和能量的交换[20]，使得回流区向上移动；二是在回水末期，河口水位已经与长江干流水位相同，长江与河口交互影响的区域往上游移动。

在放水过程中，御临河响应快于库首支流，根据模拟结果显示，放水过程，御临河河口流速呈逐渐增大趋势，到放水末期流速到达最大，呈现出自然河流的流态特征。

5.2.2. 纵向流场分析

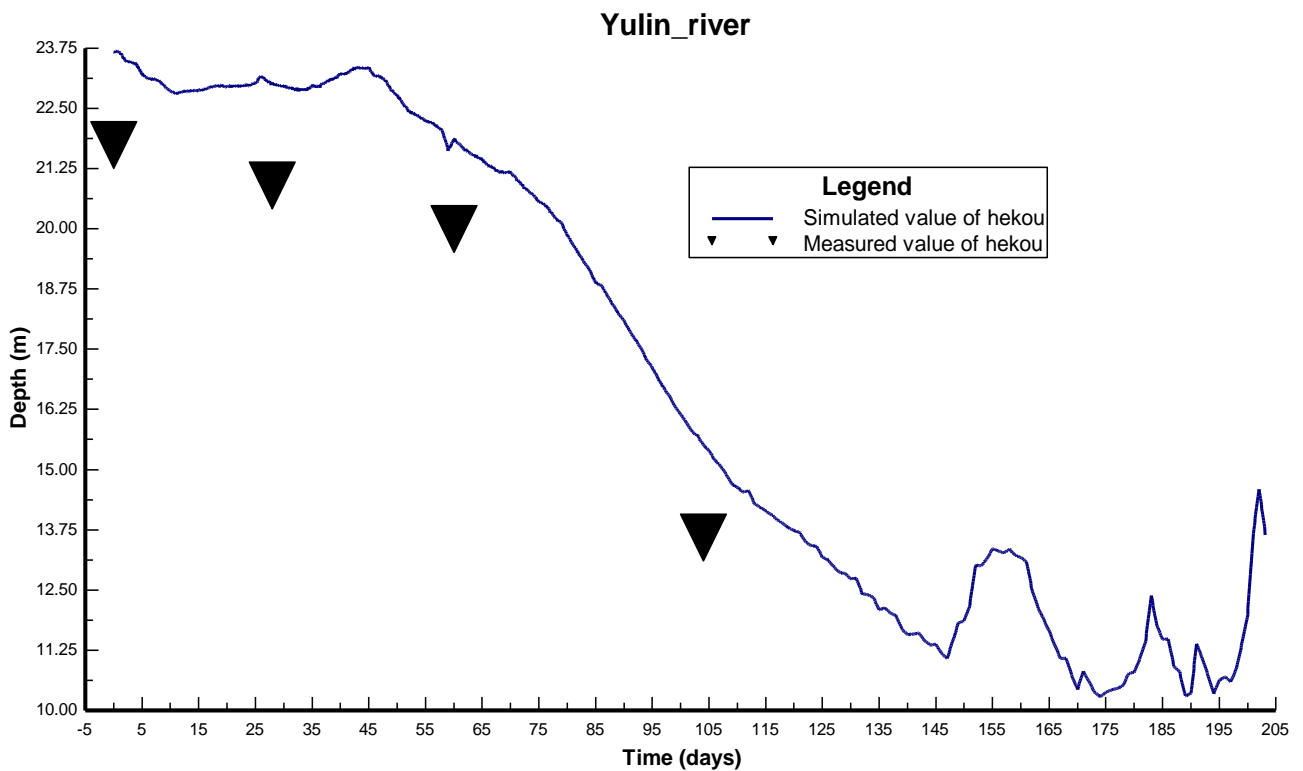
图 7 是 2013~2014 年的纵向流场图，模拟时刻与图 6 相对应。在蓄水初期，当长江水位达到 168~169 m 左

右, 此时, 河口表层速率为 0.083 m/s, 方向为正方向, 底部速率为 0.07 m/s, 方向为负方向; 到蓄水中期, 河口水位变为 173~174 米, 回水区域变大, 表层速率为 0.128 m/s, 方向为正, 底层速率为 0.122 m/s, 方向为负, 这说明回水以下切的方式流向御临河。蓄水中期的速率比蓄水初期的速率大, 这是因为在蓄水中期长江水位与御临河水位差变大, 从而静水压差变大, 导致河口的速率变大。在蓄水末期河口水位变为 175 m, 流速方向开始变的紊乱, 表层流速和底层流速的方向开始逐渐由负方向变为正方向, 表层速率变为 0.076 m/s, 底层速率变为 0.064 m/s。

Table 1. Analysis of relative error about velocity and water level

表 1. 流速及水位相对误差分析

时间	河口流速相对误差/(%)	两周期平均相对误差/(%)	河口水位相对误差/(%)	两周期平均相对误差/(%)
2012/11/10	14.59		11.28	
2012/12/08	2.07	9.2	10.43	8.90
2013/01/09	0.89		10.30	
2013/02/22	4.00		4.65	
2013/08/23	12.79		17.02	
2013/09/23	13.18		3.15	
2013/10/26	2.05		0.27	
2013/11/23	13.12	11.50	0.72	5.0
2013/12/21	0.42		0.57	
2014/01/11	11.31		0.62	
2014/02/22	16.27		0.29	
2014/05/24	23.33		23.37	



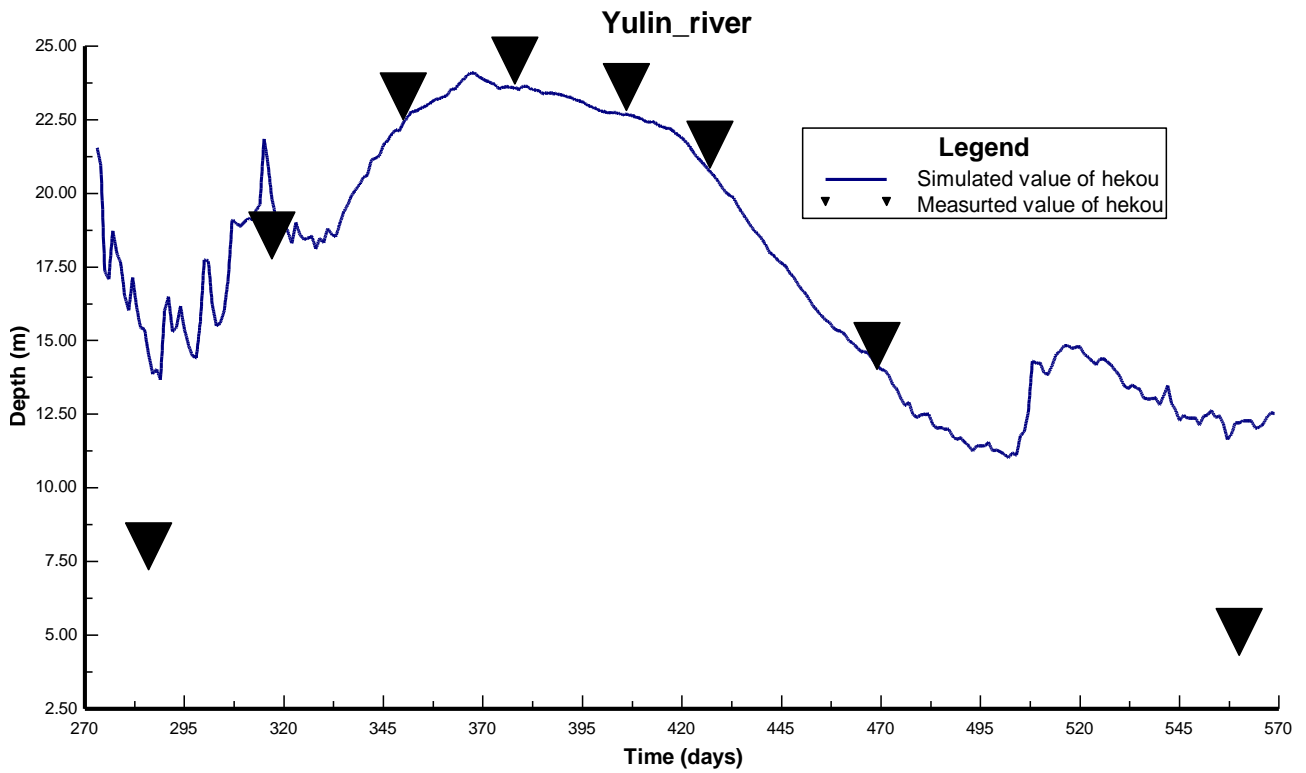
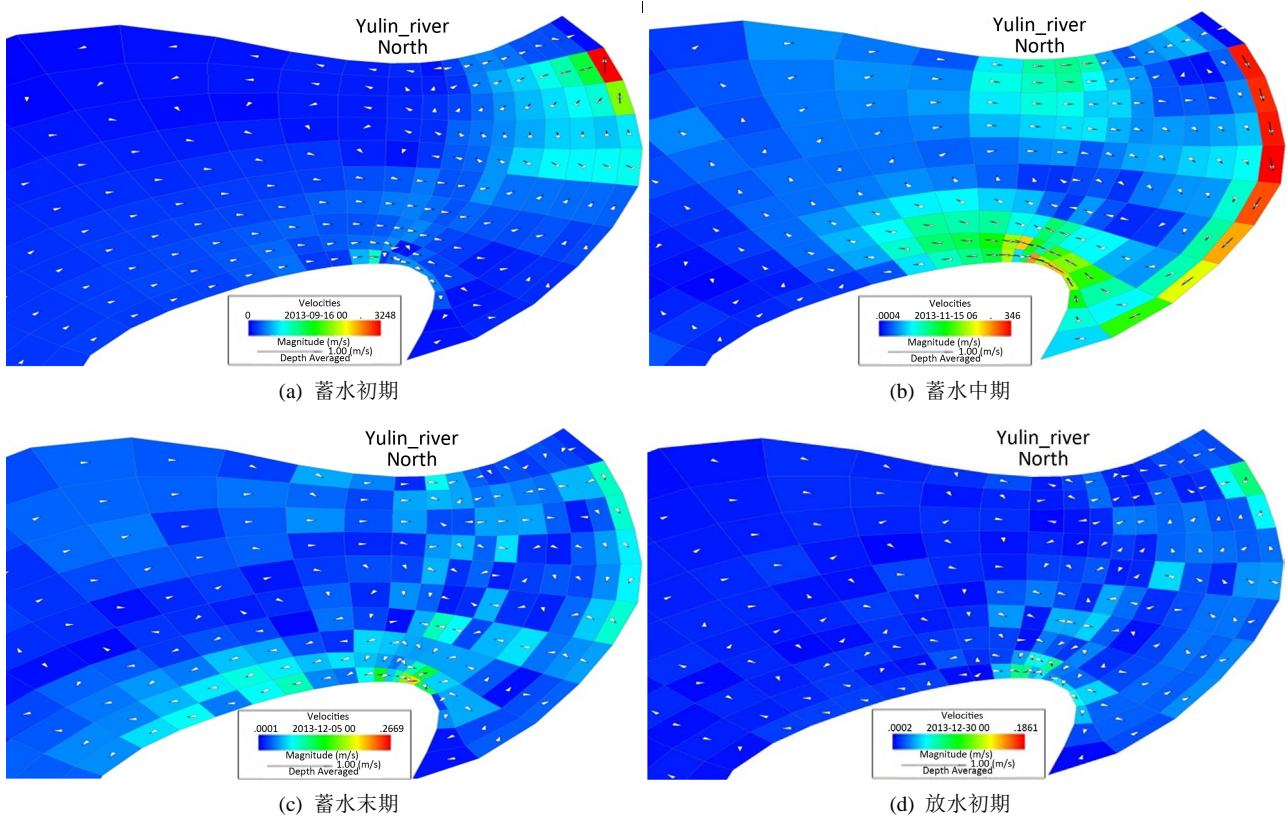


Figure 5. Level verification of estuary

图 5. 河口水位验证



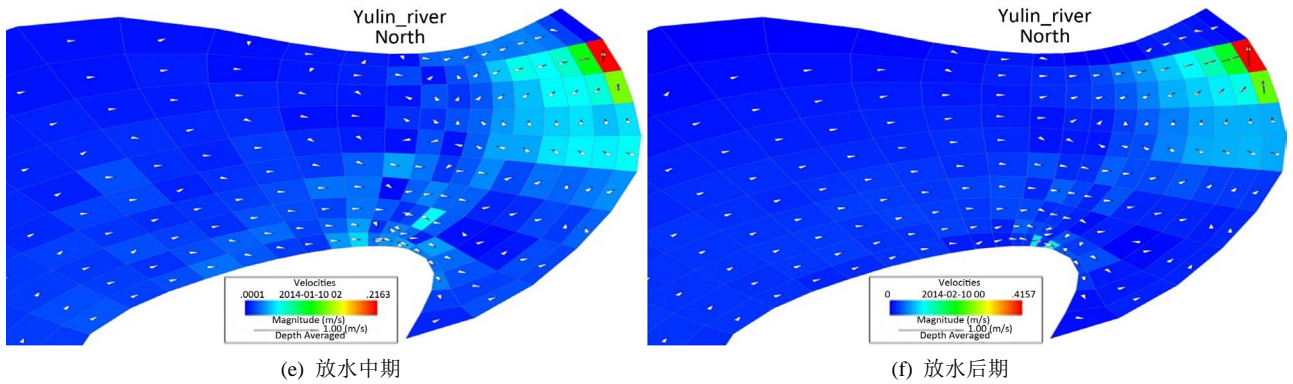


Figure 6. 2-dimensional flow field of estuary
图 6. 河口二维流场

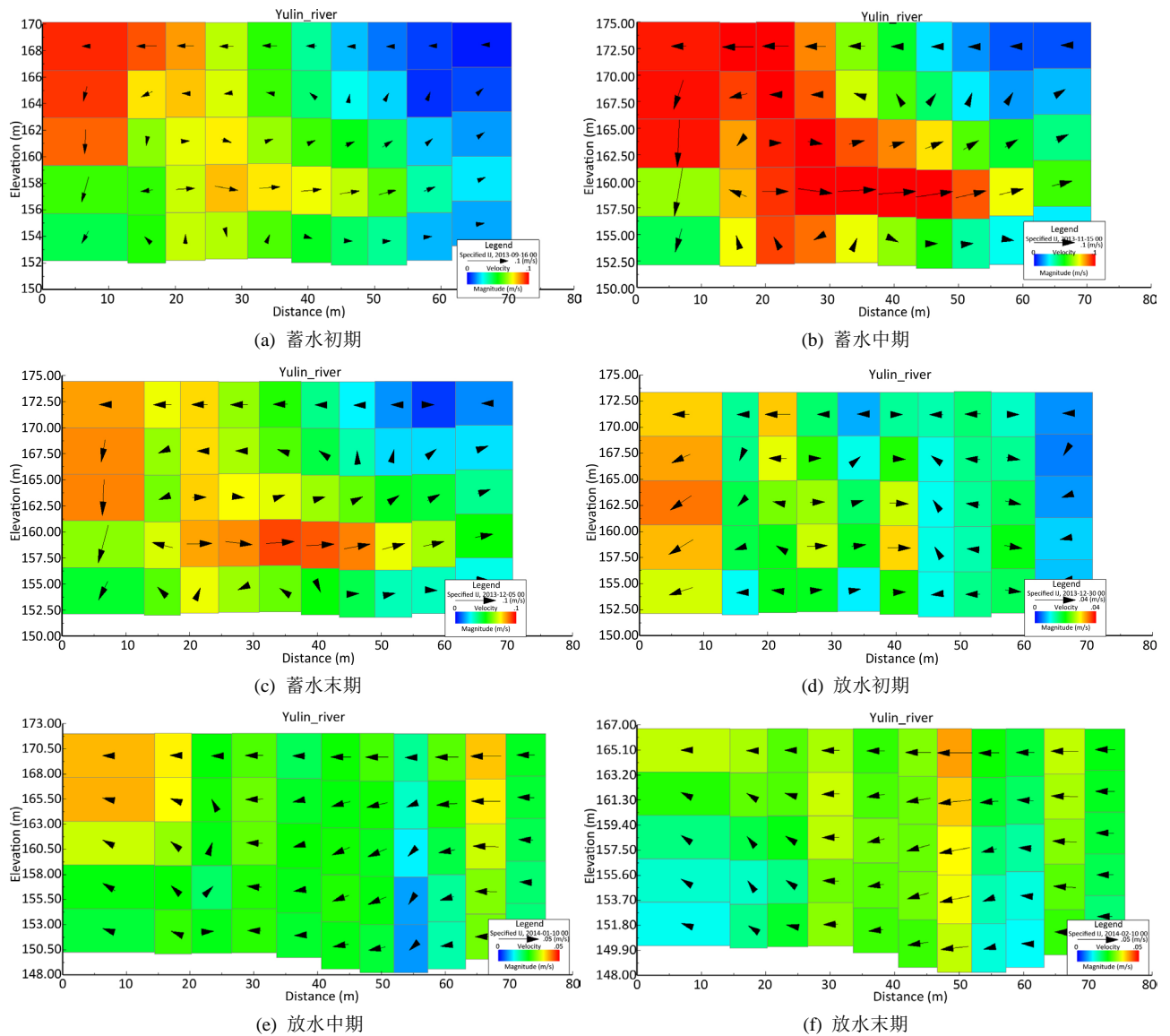


Figure 7. Velocity variation in the vertical direction
图 7. 河口段纵向流场

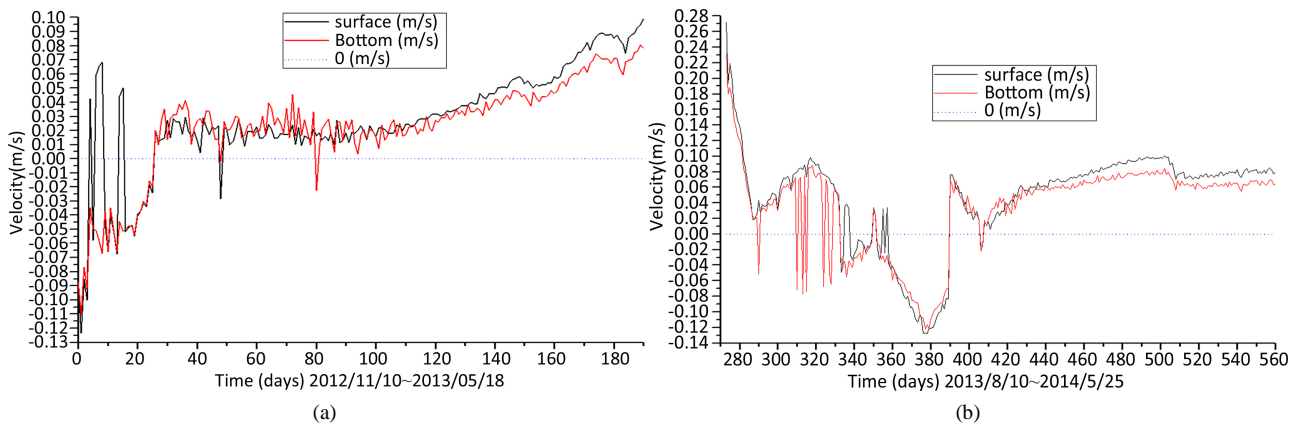


Figure 8. Comparison of surface and bottom velocity in the estuary
图 8. 河口表底层流速对比分析

并且从图 7(a)、图 7(b)可以看出,在蓄水期,河口处在纵向上同样存在漩涡,平面上的竖轴环流与立面的径向环流的复杂叠加,主、回流界面存在较大的流速梯度,而压强梯度是产生流速梯度的主要原因之一,同时造成水体之间产生紊动掺混层,紊动掺混层的存在加剧了主、回流之间的动量、能量和质量交换[18]。

在放水初期,河口水位降至 174 m,表层速率为 0.028 m/s,底层速率为 0.033 m/s,方向都变为正方向,速率变到最小。放水中期,水位继续降至 168 m,此时,御临河上游来水成为河口流速的主要驱动力,表层速率和底层速率开始变大,分别为 0.062 m/s 和 0.051 m/s。放水末期,表层流速和底层流速的方向,都是变为正向,这时河口流速继续增大,已经完全呈现出自然河流的流态特征,表层最大速率为 0.1 m/s,底层最大流速为 0.08 m/s。

5.2.3. 表底层流场分析

图 8 是御临河口口段的表层和底层流速随时间的变化。在图 8(a)中,2012~2013 年度的开始模拟时间是 11 月 10 号,是在蓄水的中后期,这其中的部分时间,表层流速为正,底层流速为负。2013~2014 年度,从 2013 年 8 月 10 号开始模拟,从图 8(b)中看出,御临河在 9~10 月左右刚刚开始形成回水,在这短时间内,部分时间的表层流速是正的,底层流速是负的,正好印证了前面所述;到蓄水的后期,底层流速和表层流速变为正的,蓄水完成。

在 2012~2013 年度的蓄水期,河口表层和底层的平均速率各为 0.026 m/s 和 0.027 m/s;放水期,表层和底层的平均速率各为 0.076 m/s 和 0.061 m/s。在蓄水期表层速率与底层速率差值与表层速率比值为 3.85%,在放水期,这个比值为 19.74%;这说明在放水期,表层速率和底层速率的差值更大。同样,从图 8 中看出,从每年的 1~2 月左右开始,表层和底层速率差值开始变大,正好是三峡大坝开始放水的时间段。

6. 结论

御临河代表了位于三峡库区库尾的一级支流。根据流场实测及模拟结果显示,受到三峡工程蓄放过程的影响,御临河出现回水与自然流交替运行的现象,其中,蓄水过程受长江干流水位的影响呈现较为复杂的流场变化规律;而放水过程,则是一个随着干流水位降低,流速由小逐渐增大最后变为自然河流的过程。并且,在蓄放过程中,受到干流下切式回流的影响,在河口会出现横向和纵向环流的现象,改变了河口物质与能量的迁移途径与转化规律。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51478061)。

参考文献 (References)

- [1] 钟成华. 三峡库区水体富营养化研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川大学, 2004.
ZHONG Chenghua. Study on eutrophication of water body in Three Gorges Reservoir area. Chengdu: Sichuan University doctoral thesis, 2004. (in Chinese)
- [2] 江春波, 李凯, 李苹, 等. 长江三峡库区污染混合区的有限元模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 808-811.
JIANG Chunbo, LI Kai, LI Ping, et al. Finite element simulation of pollution mixing zone in Three Gorges Reservoir area of Yangtze River. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(6): 808-811. (in Chinese)
- [3] 吕平毓, 米武娟. 三峡水库蓄水前后重庆段整体水质变化分析[J]. 人民长江, 2011, 42(7): 28-32.
LV Pinyu, MI Wujuan. Analysis of water quality change of Chongqing section before and after impoundment of Three Gorges Reservoir. Yangtze River, 2011, 42(7): 28-32. (in Chinese)
- [4] 尹真真, 邓春光, 徐静. 三峡水库二期蓄水后次级河流回水河段富营养化调查[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(19): 4998-5000.
YIN Zhenzhen, DENG Chunguang, XU Jin. Investigation on eutrophication in backwater section of secondary river after impoundment of two Gorges Reservoir. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(19): 4998-5000. (in Chinese)
- [5] 田园. 基于 MapGIS 平台的水动力数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
TIAN Yuan. Hydrodynamic numerical simulation based on MapGIS platform. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [6] 梁云, 殷峻暹, 祝雪萍. MIKE21 水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 135-137.
LIANG Yun, YIN Junni, ZHU Xueping. Application of MIKE21 hydrodynamic model in the simulation of water level in Hongze Lake. Water Resources and Power. 2013, 31(1): 135-137. (in Chinese)
- [7] LI, Y. P., TANG, C. Y., WANG, C., et al. Improved Yangtze River diversions: Are they helping to solve algal bloom problem in Lake Taihu, China. Ecological Engineering, 51(2013): 104-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.077>
- [8] WOOL, T. A., DAVIE, S. R., RODRIGUEZ, H. N. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse River estuary, North Carolina. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003(129): 295-306. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:4(295))
- [9] HAMRICK, J. M. Users manual for the environment al fluid dynamic computer code. Virginia: The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1996.
- [10] 王翠, 孙英兰, 张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(5): 833-840.
WANG Cui, SUN Yinglan, ZHANG Xueqing. Numerical simulation of three dimensional tidal current in Jiaozhou Bay based on EFDC model. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(5): 833-840. (in Chinese)
- [11] 范翻平. 基于 Delft3D 模型的鄱阳湖水动力模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2010.
FAN Fanping. Study on hydrodynamic simulation of Poyang Lake based on Delft3D model. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2010. (in Chinese)
- [12] 李榕. 关于影响曼宁粗糙系数 n 值的水力因素探讨[J]. 水利学报, 1989(12): 62-66.
LI Rong. Discussion on hydraulic factors influencing Manning's roughness coefficient n value. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 62-66. (in Chinese)
- [13] 任华堂, 于良, 夏建新, 等. 黄河内蒙古段水污染事故应急预警模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012(S1): 67-76.
REN Huatang, YU Liang, XIA Jianxin, et al. Study on the early warning model of water pollution accident in Inner Mongolia section of the Yellow River. Journal of Basic Science and Engineering, 2012(S1): 67-76. (in Chinese)
- [14] 陈景秋, 赵万星, 季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. 水动力学研究与进展(A 辑). 2005(S1): 829-835.
CHEN Jinqiu, ZHAO Wanxin, JI Zhengang. Dynamic model of two rivers in Chongqing. Journal of Hydrodynamics, 2005(S1): 829-835. (in Chinese)
- [15] 苗晓雨. 基于 EFDC 的尹府水库水质数值模拟及预测[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
MIAO Xiaoyu. Numerical simulation and prediction of water quality based on EFDC. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)
- [16] JI, Z.-G., MORTON, M. R., HAMRICK, J. M. Wetting and drying simulation of estuarine processes. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53, 683-700. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0818>
- [17] GONG, W. P., SHEN, J., HONG, B. The influence of wind on the water age in the tidal Rappahannock River. Marine Environmental Research, 2009, 68, 203-216.
- [18] 刘夏明, 李俊清, 豆小敏, 等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术, 2011(S1): 136-140.
LIU Xiamin, LI Junqin, DOU Xiaomin, et al. Application and development of EFDC model in the simulation of water environment. Environmental Science and Technology, 2011(S1): 136-140. (in Chinese)
- [19] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔. 丁坝回流区水流紊动强度试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2053-2056.

CHEN Yacong, HEI Pengfei, DIN Xiang. Experimental study on turbulence intensity of flow field in groin recirculation zone. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(12): 2053-2056. (in Chinese)

[20] 李绍武, 郑建军. 回流区水流运动二维数值模拟[J]. *港工技术*, 2006(4): 4-10.

LI Shaowu, ZHEN Jianjun. Two dimensional numerical simulation of flow field in recirculation zone. *Port Engineering Technology*, 2006(4): 4-10. (in Chinese)