

文章编号: 1000-5641(2013)05-0018-09

# 长江河口潮流界与径流量定量关系研究

侯成程, 朱建荣

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 长江河口是径流、潮流相互作用的潮汐河口, 潮汐的变化导致河道水体流态发生改变. 本文设计高分辨率数值模式, 基于河道断面流量的计算, 得出了枯季和洪季不同保证率径流量下的长江潮流界位置. 枯季潮流界位于芜湖上游 70 km 附近的太阳洲和镇江水文站之间, 洪季潮流界变化范围在江阴上游太平洲叉道中段至民主沙之间 100 km 范围内. 对不同径流量下潮流界位置的计算结果作多次拟合, 得出枯季潮流界  $y$  与径流量  $x$  的相关关系为  $y = -4 \times 10^{-10} x^3 + 1 \times 10^{-5} x^2 - 0.1937x + 1232.9 (R^2 = 0.9842)$ , 洪季潮流界  $y$  与径流量  $x$  的定量关系为  $y = 2 \times 10^{-13} x^3 + 3 \times 10^{-8} x^2 - 0.0074x + 359.35 (R^2 = 0.9969)$ . 本文结果可为长江潮流界的确定提供科学依据.

**关键词:** 长江河口; 潮流界; 径流量; 定量关系

**中图分类号:** P731.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2013.05.003

## Study on the quantitative relationship of the location of the tidal current limit and the river discharge in the Changjiang Estuary

HOU Cheng-cheng, ZHU Jian-rong

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research,  
East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The Changjiang Estuary is a tidal estuary with the interaction of river discharge and tidal current. The tidal variation results in the change of flow state in the river. By designing a high resolution numerical model, and based on the calculations of water flux along the river transverse sections, the Changjiang River tidal current limits were obtained in various guarantee rate river discharges in dry and flood seasons. The tidal current limit is between Taiyang island (located at the 70 km upstream of Wuhu) and Zhengjiang hydrological station in dry seasons, and is in the range of 100 km between the middle of Taiping island (located at the upstream Jiangying) and Minzhu island in flood seasons. With the multi power fitting of the calculated results, the relationship between the location of the tidal current limit and the river discharge is  $y = -4 \times 10^{-10} x^3 + 1 \times 10^{-5} x^2 - 0.1937x + 1232.9 (R^2 = 0.9842)$  in dry season, and is  $y = 2 \times$

收稿日期: 2012-11

基金项目: 国家自然科学基金(41176071); 国家自然科学基金创新团队项目(41021064);

上海市科学技术委员会重大项目(11dz1204812)

第一作者: 侯成程, 硕士研究生, 从事河口海岸动力学研究. E-mail: houchch\_1986@163.com.

通信作者: 朱建荣, 男, 教授, 从事河口海岸动力学研究. E-mail: jrzh@sklec.ecnu.edu.cn.

$10^{-13}x^3 + 3 \times 10^{-8}x^2 - 0.0074x + 359.35 (R^2 = 0.9969)$  in flood season. This result can provide a scientific basis for determining the tidal current limit of the Changjiang River.

**Key words:** Changjiang Estuary; tidal current limit; river discharge; quantitative relationship

## 0 引 言

长江从上游到入海口通常分为三段:上游河段、中游河段和下游河段.下游河段从江西九江至河口,又分为感潮河段和非感潮河段.感潮河段为长江潮区界所界定的河段,其上起安徽大通站,下到长江入海口,河段全长约 620 km,该河段的特点是受潮汐和径流的共同作用<sup>[1]</sup>.潮流是潮波沿河道上溯形成的上冲水流,是塑造河口的主要动力因素之一,在河口段随着上溯距离以及径流作用而逐渐削弱,从而使河口地区的动力环境产生一系列的复杂变化.

潮流界是指潮流所能达到的上界,超过此位置,潮流不再向上行进.潮流界上游为向海的单向流,下游为往复流,不过受径流的作用涨潮流大小和历时远小于落潮流.长江河口位于河道与海洋的过渡地带,径流和潮流两种动力耦合在一起,共同与地貌边界条件发生相互作用,同时由于人类活动的加剧,长江河口的动力过程变得较为复杂.河流的一些变化,如建坝,引水等,都会对长江河口动力过程产生一定的影响<sup>[2]</sup>.在过去几十年的研究过程中,人们一般认为长江河口潮流界大致位于江阴附近<sup>[3-5]</sup>.宋兰兰<sup>[6]</sup>通过实测资料分析提出了潮流界在枯水期大致位于南京长江大桥以上,平水期(流量 30 000 m<sup>3</sup>/s 左右)在镇江至南京一线,洪水期(流量大于 40 000 m<sup>3</sup>/s)在江阴附近.长江径流随季节变化较为明显,同时潮流界由于受河道径流以及河口潮汐的影响较大,其变动范围也比较剧烈<sup>[7]</sup>.

迄今为止,长江河口潮流界与径流量的定量关系尚未明确给出,本文通过对长江大通水文站近 60 年的枯季(1 月)和洪季(7 月)流量资料进行水文频率分析,应用河口海岸三维数值模式,计算长江河口洪枯季潮流界的位置与不同保证率下径流量的定量关系.针对枯季和洪季长江河口潮流界的位置变化进行分析,有利于阐明长江感潮河段的水动力过程以及影响河道动力沉积的动力因素.

## 1 模式的设置和验证

### 1.1 模式设置

本文采用作者所在研究组长期改进的三维海洋数值模式 ECOM-si<sup>[8,9]</sup>,该模式已应用于长江口水动力过程和盐水入侵等方向的研究,并取得诸多成果<sup>[10-15]</sup>.ECOM 模式是在 POM 模式基础上发展起来的<sup>[16]</sup>,模式具有如下特点:嵌套了一个 2.5 阶湍流封闭模型,提供垂向湍流粘滞和扩散系数<sup>[17]</sup>;水平方向采用曲线网格,采用“Arakawa C”网格差分格式;垂向采用  $\sigma$  坐标系统;动量方程中的正压梯度力采用隐式方法,连续方程的求解半隐方法,使得模式允许的时间步长可比 CFL 条件所限制的时间步长大几十倍;产生慢过程的项采用水平显式时间差分,垂直隐式差分,因此模式能具有很高的垂向分辨能力;耦合了完整的热力学方程.本文作者采用的三阶精度格式 HSIMT-TVD 对盐度方程的平流项的计算进行了改进<sup>[9]</sup>,消除了数值频散,降低了数值耗散,大大提高了模式计算盐度的精度.

本文模式计算范围包括长江河口, 杭州湾以及附近海区, 东边到  $125^{\circ}\text{E}$  附近, 北面到  $33.7^{\circ}\text{N}$  附近, 南面到  $28^{\circ}\text{N}$  附近, 上边界延伸到九江附近(见图 1). 模式采用非正交曲线网格, 较好地拟合长江河口及长江河道岸线, 对局部区域如深水航道等区域作加密处理, 并具有良好的正交性和光滑性. 网格数为  $1\ 380 \times 224$ , 长江河口的分辨率为  $200 \sim 600\ \text{m}$ , 长江河流横穿河道方向的分辨率为  $100 \sim 200\ \text{m}$ , 沿着河道方向的网格分辨率约为  $1\ \text{km}$ , 河口外最粗分辨率约为  $10\ \text{km}$ . 模式垂直方向采用  $\sigma$  坐标, 均匀分为 5 层. 时间步长取为  $35\ \text{s}$ . 长江河口区域浅滩较多, 模式运用干湿判别法实现潮滩移动边界的模拟, 临界水深取  $0.2\ \text{m}$ .

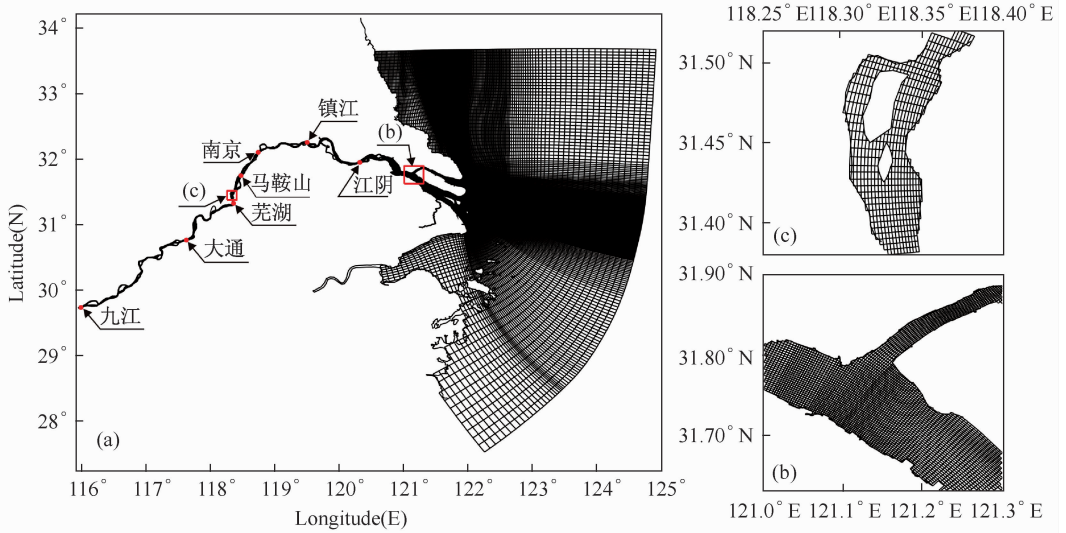


图 1 模式计算区域及网格(a);放大的南北支分叉口网格(b);放大的下游河道网格(c)

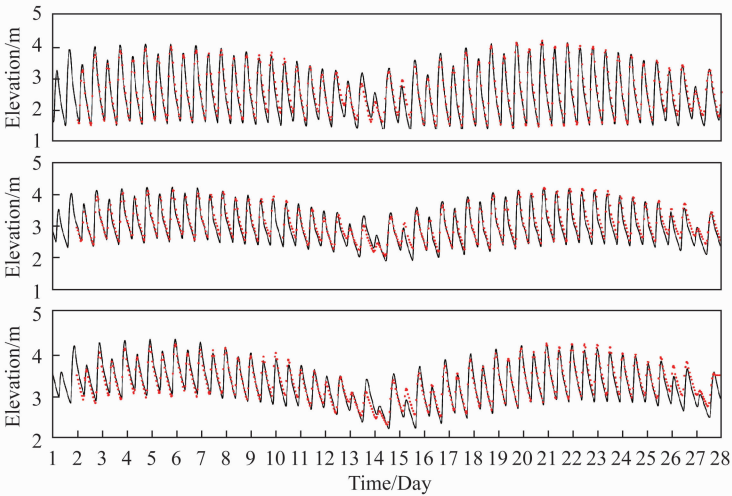
Fig. 1 Numerical model domain and grids (a); Enlarged view of the model grids around the bifurcation of the South and North Branch (b) and at the lower reaches of the river (c)

在模式中, 长江河口徐六泾至口门河底高程采用 2009 年实测资料, 徐六泾以上河底高程采用 2008 年《长江下游航行参考图》, 经数值化得到. 外海开边界由潮位驱动, 考虑 16 个主要分潮( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, U_2, V_2, T_2, L_2, 2N_2, J_1, M_1, OO_1$ ), 由各分潮调和常数合成得到, 资料从全球潮汐数值模式 NAOTIDE 中计算结果得到([http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index\\_En.html](http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html)). 初始水位和流速取零. 温盐场长江口外由《渤海黄海东海海洋图集(水文)》分布图数字化得到<sup>[18]</sup>, 河口内由多次实测资料插值得到. 考虑海表面风应力的作用, 风场由 QSCAT/NCEP 提供, 空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ .

## 1.2 模式验证

本文应用改进的 ECOM-si 模式, 已在长江河口作了大量的验证<sup>[10-17]</sup>, 模式计算的水位、流速、流向和盐度与实测资料吻合良好. 作者利用长江河口多年实测的流速、流向和盐度资料对模式重新做了验证, 因本文重点在徐六泾以上长江河道, 为节约篇幅不再给出, 仅利用 2011 年 2 月南京、镇江和江阴水文站水位资料和 2011 年 1 月芜湖及马鞍山水文站水位资料(<http://www.cjh.com.cn/gis/>)对模式计算区域河流上中段进行验证(见图 2 和图 3). 验证过程中模型上边界条件由九江测站实测径流量给出, 在湖口支流位置设置实测流量, 河段其它位置的流量汇入以及流出忽略不计. 各水文站水位的变化体现了半日潮和日不等现

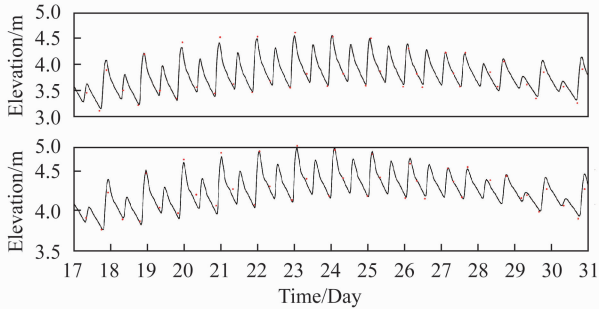
象,大小潮变化明显,南京的最低和最高水位均高于江阴(见图 2). 芜湖的水位整体高于马鞍山,两水文站的计算值都能较好的体现实测资料的半日变化及日不等现象(见图 3). 总体上,数值模式能较好地模拟长江下游的水位变化过程,验证结果总体良好,说明计算参数选取比较合理,数值模式能够较好地反映长江下游潮波的传播特征.



注:点为实测值,线为计算值

图 2 2011 年 2 月长江下游江阴(上)、镇江(中)、南京(下)水位验证

Fig. 2 Model validations of water level at Jiangyin (upper), Zhengjiang (middle) and Nanjing (bottom) in February 2011



注:点为实测值,线为计算值

图 3 2011 年 1 月长江下游马鞍山(上)、芜湖(下)水位验证

Fig. 3 Model validations of water level at Maanshan (upper) and Wuhu (bottom) in February 2011

## 2 洪枯季潮流界的位置变化的数值模拟

为定量分析长江径流量对枯季和洪季潮流界位置变化的影响,本文根据大通水位站 1950—2010 年 1 月份和 7 月份流量资料进行频率分析,针对不同频率对应的径流量(如表 1)设置不同数值试验,通过模式计算河道不同断面的断面流量,分析计算上游径流量变化对感潮河段潮流界位置变化的影响. 本文研究长江潮流界,考虑了径流量和潮汐的作用. 涨潮流在长江内能到达的距河口的位置,当然与潮差有关,但最远距离即潮流界在给定的径流量

下只有一个, 本文的工作就是寻找这个最远距离, 河道内的流速是由径流和潮流共同决定的, 在分析过程中, 将模式计算的每一步河道横断面为零的通量位置输出(它是随潮差显著变化的), 再找出其离河口的最远距离, 即潮流界。

表 1 大通水文站径流量频率分析

Tab. 1 Frequency analysis of river discharge at Datong hydrologic station

频率/%	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
枯季(1月)流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	16 842	15 065	13 209	12 063	11 206	10 503	9 888	9 323	8 776	8 196	7 852
洪季(7月)流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	69 765	64 238	58 131	54 115	50 932	48 161	45 580	43 024	40 292	36 947	34 551

2.1 枯季潮流界位置变化

根据表 1 大通流量频率分析所列的枯季流量设置了 11 个数值试验, 模式上边界条件采用不同频率对应下的枯季径流量, 外海开边界考虑 16 个分潮, 由潮位驱动. 图 4 给出了模式计算的一月份绿华山潮位过程线, 绿华山在大潮时最大潮差达到 3.5 m 以上, 小潮时最小潮差也有 1 m 多。

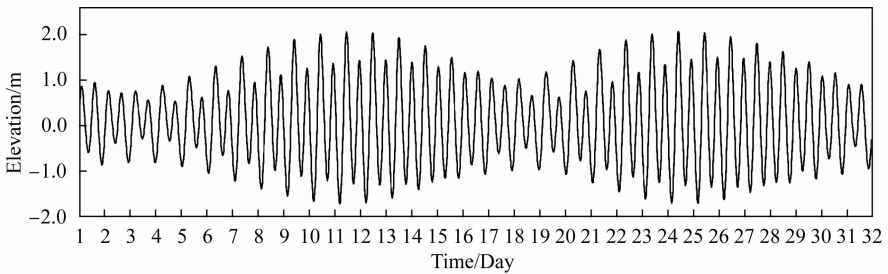


图 4 绿华山一月份潮位过程线

Fig. 4 Temporal variation of the tidal level at Lvhuashan in January

图 5 给出了枯季潮流界和径流量的关系, 随着径流的增加, 潮流界的位置逐渐向河口移动. 它的位置随径流量变化的移动并不是线性的, 随着流量的增加, 潮流界下移的幅度先变缓后变陡, 这可能与河道径流、潮流以及河道形态都存在一定的联系. 当上游径流量大于

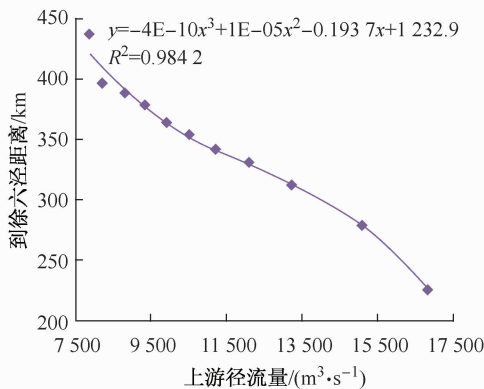
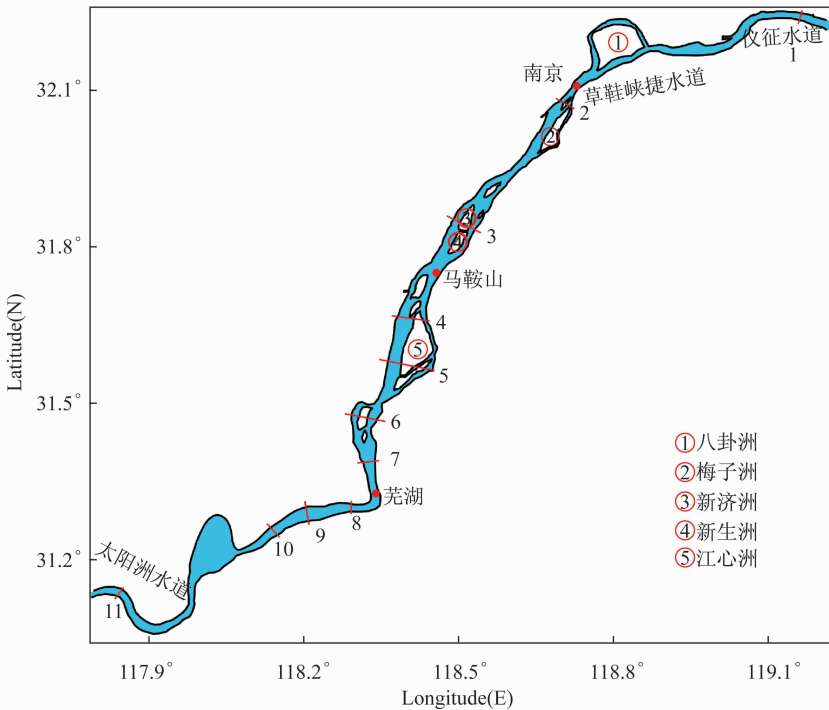


图 5 长江河口枯季潮流界与河道径流的关系

Fig. 5 The relationship of the location of tidal current limit and the river discharge in dry season in the Changjiang Estuary

15 000 m<sup>3</sup>/s时,潮流界主要位于南京水文站与镇江水文站之间(见图 6),即仪征水道段,此河段河道比较顺直,分叉河道及浅滩较少,潮流由于河道的摩擦损耗较小,此时随着径流的变化,潮流界变化较为明显;当上游径流量在 8 500 m<sup>3</sup>/s 至 13 000 m<sup>3</sup>/s 之间时,潮流界主要位于芜湖至南京段,此段河道浅滩和叉道较多,主支叉变化明显,上游径流由于分叉河段及浅滩的影响,水流变缓,径流对下游上溯潮流的抑制作用较弱,潮流在此段河道向上传播主要受到河道地形及叉道的影响,潮流界位置变化较为缓慢.当径流为 7 800 m<sup>3</sup>/s 时,此时潮流界位于芜湖上游 70 km 左右的太阳洲水道附近.对计算结果作潮流界位置与径流量多次拟合,得到拟合函数  $y = -4 \times 10^{-10} x^3 + 1 \times 10^{-5} x^2 - 0.193 7x + 1 232.9$ . 其中,  $y$  为潮流界至徐六泾的距离(km),  $x$  为径流量(m<sup>3</sup>/s),相关系数  $R^2 = 0.984 2$ .



注:断面 1—11 位置分别对应于频率为 5%~95%下的潮流界的位置

图 6 不同径流量保障率下长江河口枯季潮流界位置

Fig. 6 Location of tidal current limit of the Changjiang Estuary in various guarantee rate river discharge in dry season

### 2.2 洪季潮流界位置变化

针对洪季潮流界的位置变化与长江径流量的关系,同样设计了 11 个数值试验,模式上游开边界条件采用表 1 所列的不同频率对应的洪季径流量,外海开边界考虑 16 个分潮,由潮位驱动.图 7 给出了模式计算的七月份绿华山潮位过程线,绿华山在此时间段最大潮差达到 3.5 m,最小潮差也有 1 m 多.

图 8 给出了洪季潮流界与河道径流的关系,随着径流的增加,潮流界的位置逐渐向河口移动,它的位置随径流量变化的移动也并不是线性的,随着流量的增加,潮流界下移的幅度逐渐变缓,也就是说径流量小,潮流界的位置对洪季径流量变化越敏感,同时也说明潮流作

用随着距离河口距离减小而逐渐增大, 而径流作用逐渐减小. 在河道径流量为  $69\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时, 潮流界的位置到徐六泾的距离大约为  $52\ \text{km}$ (图 9), 位于江阴下游  $27\ \text{km}$  左右, 长青沙洲附近; 在河道径流量  $52\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  时, 潮流界位于江阴附近; 在平水期河道径流量为  $34\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  时, 潮流界大致位于江阴上游  $65\ \text{km}$ , 太平洲汊道中段. 对计算结果作潮流界位置与径流量多次拟合, 得到拟合函数  $y = 2 \times 10^{-13} x^3 + 3 \times 10^{-8} x^2 - 0.007\ 4x + 359.35$ . 其中,  $y$  为潮流界至徐六泾的距离 ( $\text{km}$ ),  $x$  为径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), 相关系数  $R^2 = 0.996\ 9$ .

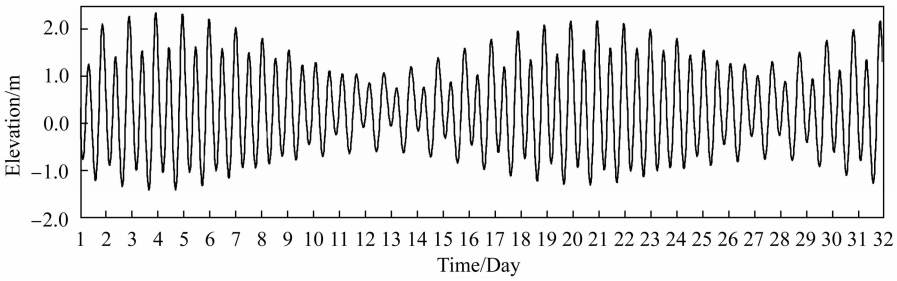


图 7 绿华山七月份潮位过程线

Fig. 7 Temporal variation of the tidal level at Lvhuashan in July

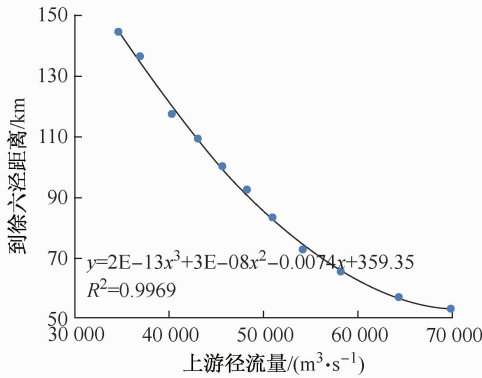
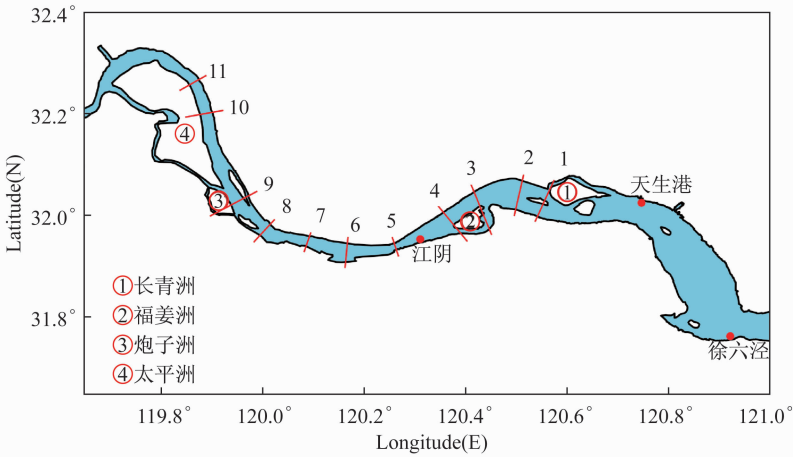


图 8 长江河口洪季潮流界与河道径流的关系

Fig. 8 The Relationship of the location of tidal current limit and the river discharge in flood season in the Changjiang Estuary

### 3 结 语

本文设计高分辨率数值模式, 计算了枯季(1 月)和洪季(7 月)不同径流量保证率下的潮流界位置. 结果表明, 枯季潮流界位置随上游径流的增加, 下移幅度先变缓后变陡, 其变化范围在芜湖上游  $70\ \text{km}$  附近的太阳洲和镇江水文站附近, 潮流界与径流量的相关关系为  $y = -4 \times 10^{-10} x^3 + 1 \times 10^{-5} x^2 - 0.193\ 7x + 1\ 232.9$  ( $R^2 = 0.984\ 2$ ). 洪季潮流界位置随着上游流量的增加, 下移的幅度逐渐变缓, 变化范围在江阴上游太平洲叉道中段至民主沙之间  $100\ \text{km}$  范围内, 潮流界与径流量的定量关系为  $y = 2 \times 10^{-13} x^3 + 3 \times 10^{-8} x^2 - 0.007\ 4x + 359.35$  ( $R^2 = 0.996\ 9$ ). 本文给出了长江潮流界与径流量的定量关系, 对长江潮流界的确定提供了科学依据.



注:断面 1—11 位置分别对应于频率为 5%~95% 下的潮流界的位置

图 9 不同径流量保障率下长江河口洪季潮流界位置

Fig. 9 Location of tidal current limit of the Changjiang River estuary in various guarantee rate river discharge in flood season

### [参 考 文 献]

- [1] 余文涛. 长江河道演变与治理[M]. 北京:水利水电出版社,2005.
- [2] 罗秉征,沈焕庭. 三峡工程与河口生态环境[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [3] 开明书店,中国地理学会,中国科学院地理研究所. 中国国家地理杂志[M]. 上海:开明书店,1984:30.
- [4] 杨达源,严庠生. 全新世海面变化与长江下游近河口段的沉积作用[J]. 海洋科学,1990(1):9-13.
- [5] 万新宁,李九发,沈焕庭. 长江口外海滨悬沙分布及扩散特性[J]. 地理研究,2006,25(2):294-302.
- [6] 宋兰兰. 长江潮流界位置探讨[J]. 水文,2002,22(5):25-26,34.
- [7] 李佳. 长江河口潮区界和潮流界及其对重大工程的响应[D]. 上海:华东师范大学,2004.
- [8] 朱建荣,朱首贤. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼,2003,34(4):364-374.
- [9] WU H, ZHU J R. Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. Ocean Modelling, 2010, 33:33-51.
- [10] CHEN B R, ZHI J R, FU L H. Formation mechanism of the freshwater zone around the Meimao Sandbank in the Changjiang Estuary[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(16):1329-1339.
- [11] WU H, ZHU J R, CHOI B H. Links between saltwater intrusion and subtidal circulation in the Changjiang Estuary: A model-guided study[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30:1891-1905.
- [12] LI L, ZHU J R, WU H, et al. A numerical study on the water diversion ratio of the Changjiang Estuary during the dry season[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(3):700-712.
- [13] LI L, ZHU J R, WU H. Impacts of wind stress on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary[J]. Sci China Earth Sci, 2012, 55:1178-1192.
- [14] QIU C, ZHI J R, GU Y L. Impact of seasonal tide variation on saltwater intrusion in the Changjiang River estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(2):342-351.
- [15] XU K, ZHU J R, GU Y L. Impact of the eastern water diversion from the south to the north project on the saltwater intrusion in the Changjiang Estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(3):47-58.



- [16] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[M]// HEAPS N S. Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987:1-16.
- [17] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem[J]. Rev Geophys Space Phys, 1982, 20:851-875.
- [18] 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集(水文)[M]. 北京:海洋出版社,1992:13-168.

(上接第 8 页)

- [13] 茅志昌, 沈焕庭, 肖成献. 长江口北支盐水倒灌南支对青草沙水源地的影响[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 58-66.
- [14] 顾玉亮, 吴守培, 乐勤. 北支盐水入侵对长江口水源地影响研究[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 1-3.
- [15] WU H, ZHU J R, CHEN B R, et al. Quantitative relationship of runoff and tide to saltwater spilling over from the North Branch in the Changjiang Estuary: A numerical study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69:125-132.
- [16] 吴辉, 朱建荣. 长江河口北支倒灌盐水输送机制分析[J]. 海洋学报, 2007, 29(1): 17-25.
- [17] 朱建荣, 吴辉, 李路, 等. 极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2010(4): 1-6, 25.

## 关于作者姓名和排名顺序的更正启事

编辑部

本刊发表在 2012 年第 4 期 67—74 页的上论文《 $\alpha$ -N-乙酰半乳糖胺酶的表达及活性检测》(Overexpression and characterization of a bacterial  $\alpha$ -N-acetylgalactosaminidase), 其作者的中英文名称和排名顺序应为

林毅刚, 王宇萌, 夏刚

LIN Yi-gang, WANG Yu-meng, XIA Gang

特此更正。