

# 长江口滞流点洪、枯季移动的数值分析

顾 杰, 郑宇华, 王晓莉, 马丹青

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 为研究长江口滞流点位置的季节变化, 利用 Delft3D-Flow 模块建立长江口二维潮流数学模型, 通过实测水文资料对模型进行验证。在此基础上, 模拟长江口各汉道洪、枯季滞流点移动情况, 并从各汉道沿程断面的落潮量、涨潮量和落、涨潮量之比 3 个方面进行了水动力分析。结果显示: 洪季, 北支滞流点在八澳港东北方向约 1.9 km 处; 在南支各汉道中, 北港滞流点位于鸡骨礁东北方向约 10.0 km 处, 北槽滞流点位于牛皮礁东南方向约 3.8 km 处, 南槽滞流点位于大辑山东北方向约 14.1 km 处。枯季, 除北槽外, 其余各汉道均出现两个滞流点, 且北支的两个滞流点相距最远, 分别在灵甸港西南方向约 3.2 km 处和六澳港东北方向约 3.1 km 处; 北港滞流点分别在鸡骨礁西北方向约 25.8 km 和 20.2 km 处, 北槽滞流点在横沙以西约 5.3 km 处, 南槽滞流点分别在中浚西北方向约 6.5 km 和东北方向约 5.5 km 处。北支洪、枯季滞流点的移动距离为 4.6~53.3 km, 北港、南槽洪、枯季滞流点的移动距离分别为 22.0~27.7 km 和 34.6~39.2 km, 而北槽洪、枯季滞流点的移动距离最大, 为 57.1 km。长江口各汉道滞流点的移动反映了河流径流和海洋潮流的综合作用。

**关键词:** 数值模拟; 长江口; 滞流点; 洪、枯季移动

中图分类号: TV148.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)12-0114-09  
doi: 10.11759/hyxx20151217003

滞流点的概念最早见于 Simmons 等<sup>[1]</sup>对优势流的论述, 滞流点与河口最大浑浊带存在对应关系, 且滞流点附近是泥沙落淤的集中区域, 滞流区和滞流区将发展为河口拦门沙, 其位置变化也直接体现了河口水动力的变化过程。

对滞流点的研究, 国内学者主要以长江口南支及南北槽为研究重点。顾伟浩<sup>[2]</sup>根据优势流理论, 利用长江口南槽的水文资料, 分析了底层优势流与滞流点位置变化的关系, 认为滞流点位置与水深、流量和潮差存在一定的关系。张栋梁等<sup>[3]</sup>对长江口北槽 1984~1990 年相关水文资料进行了系统分析, 得出洪季小潮时滞流点移向挖槽段下游(横沙东滩串沟附近), 枯季小潮时滞流点移向挖槽段上游。刘高等<sup>[4]</sup>基于南汇边滩水域水文观测资料, 对优势流、潮流历时和含沙量等水沙变化特征进行了分析, 认为该水域洪、枯季优势流的变化对南汇边滩泥沙落淤会产生较大的影响。沈健等<sup>[5]</sup>和沈焕庭等<sup>[6]</sup>对长江口北港、北槽和南槽中滞流点位置移动情况进行了分析, 认为北港滞流区洪季一般在拦门沙外浅滩附近, 枯季在拦门沙内浅滩附近; 北槽滞流区洪季一般在其涨潮槽下口的航道拦门沙附近, 枯季在落潮槽附近; 南槽滞流区洪季一般在铜沙浅滩顶附近, 枯季则上

移, 在径流量特别小时会上移至九段沙附近。上海河口海岸研究中心利用长江口物理模型<sup>[6]</sup>, 也研究了北槽滞流点位置变化情况, 随着流量的增加滞流点会向外海移动, 而随着潮差的增大滞流点则向上移动。

随着计算机技术的发展, 数学模型在滞流点和最大浑浊带等研究上得到了广泛应用。姚运达等<sup>[7]</sup>利用数值模拟手段分析了拦门沙对盐水上溯的影响, 指出拦门沙使滞流点和最大泥沙浓度中心向外海移动。魏守林等<sup>[8]</sup>应用 Galerkin 权余法、沈焕庭等<sup>[6]</sup>采用有限差分方法及朱建荣等<sup>[9]</sup>利用改进的 ECOM 模型分别建立了理想河口二维最大浑浊带数学模型, 得出最大浑浊带位于涨、落潮优势流转换地带即滞流点附近的结论。Festa 等<sup>[10]</sup>利用垂向二维数学模型分析了河口环流的作用, 发现河口环流使水体表层泥沙向海输送、底层向陆输送, 而滞流点附近泥沙则作垂向运动, 且滞流点附近泥沙富集形成最大浑浊

收稿日期: 2015-12-17; 修回日期: 2016-02-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB957704)

[Foundation: National Key Basic Research Development Program of China, No.2012CB957704]

作者简介: 顾杰(1961-), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 主要从事水文、海岸工程和环境工程研究, E-mail: jgu@shou.edu.cn; 郑宇华, 通信作者, 硕士, 电话: 18516587308, E-mail: yuvaz@sina.com

带的特征。

随着长江口河口形态的不断演变,长江口地貌形势已发生了很大的变化,戴志军等<sup>[11-12]</sup>利用多变量特征函数的方法对长江口南北槽水深变化进行了深入的研究,发现近 30 a 来南槽已明显处于淤积状态,而北槽浅滩表现为淤积状态,深槽则处于冲刷状态。说明以往对长江口滞流点的研究与当前长江口的实际情况会存在一定的差异。

本文采用 Delft3D-Flow 模块建立了长江口二维潮流数学模型,分析长江口各汉道洪、枯季滞流点位置的移动变化情况。

## 1 长江口

长江口,上起徐六泾,下至拦门沙浅滩顶附近,全长约 181.8 km,呈三级分叉和四口入海的河势格局,有北支、北港、北槽和南槽 4 个入海通道(图 1)。

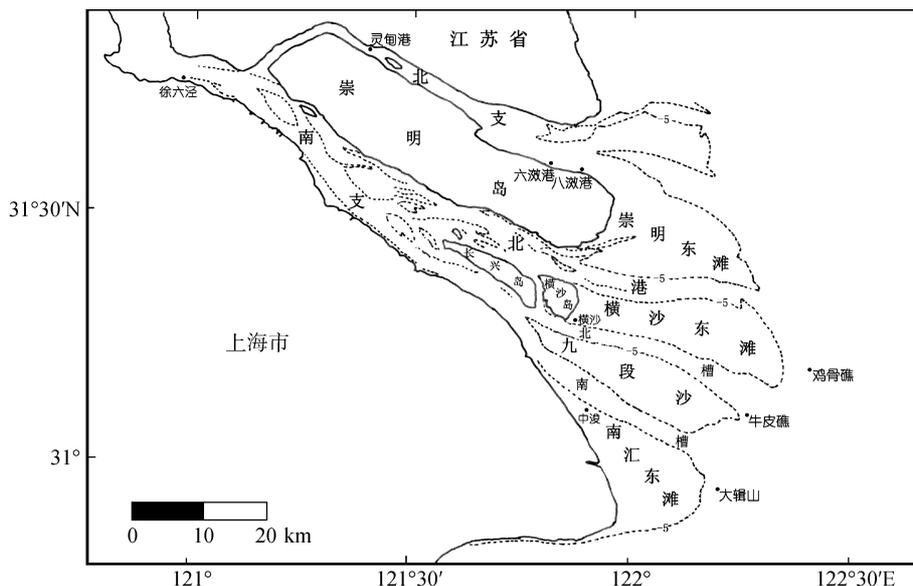


图 1 长江口河势现状图

Fig. 1 River regime of the Yangtze River Estuary

## 2 模型建立

### 2.1 计算模型

Delft3D 是荷兰 WL/Delft Hydraulics 研究所研制的关于水环境流动与物质运输的一套综合模拟系统。其二维水流运动连续性方程和动量方程可分别表示如下:

水深平均连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \zeta} + \frac{1}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \zeta} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\partial \eta} -$$

$$\frac{v^2}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} + \frac{u}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} - fv + \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\zeta\zeta}}} P_{\zeta} + F_{\zeta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\zeta} \quad (2)$$

$$\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\partial \eta} + \frac{u}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial v}{\partial \zeta} + fu + \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \quad (3)$$

其中,  $\zeta$  为参考水平面以上的水深;  $d$  为参考水平面以下的水深;  $t$  表示时间,  $u$ 、 $v$  分别代表  $\zeta$  和  $\eta$  方向的平均流速;  $\sqrt{G_{\zeta\zeta}}$ 、 $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  分别为  $\zeta$  和  $\eta$  方向的坐标变换系数;  $\rho_0$  为水的密度;  $P_{\zeta}$ 、 $P_{\eta}$  分别为  $\zeta$  和  $\eta$  方向的静水压力梯度;  $f$  为科氏力系数;  $F_{\zeta}$ 、 $F_{\eta}$  分别为  $\zeta$  和  $\eta$

方向的不平衡水平雷诺应力;  $M_s$ 和  $M_r$ 表示外部动力的源汇项。

## 2.2 计算网格

数学模型的计算范围(图 2)西起长江口的潮区界,东至外海-40 m 等深线,北至连兴港北侧,南至南汇嘴以东。网格东西向的长度大约为 280 km,南北向的长度大约为 210 km。总网格数为 277 个×152 个,水平空间网格宽度在 300~3 500 m。图中吴淞、高桥、CS1、CSW 为验证模型的观测点。

## 2.3 参数设置与模型验证

模型上边界采用实测流量数据,外海潮流边界

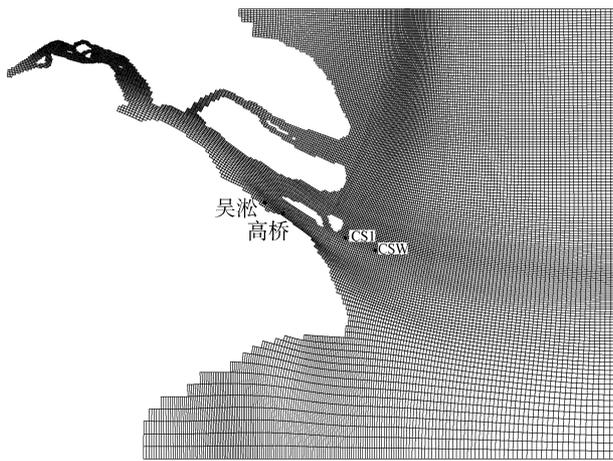


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational grid

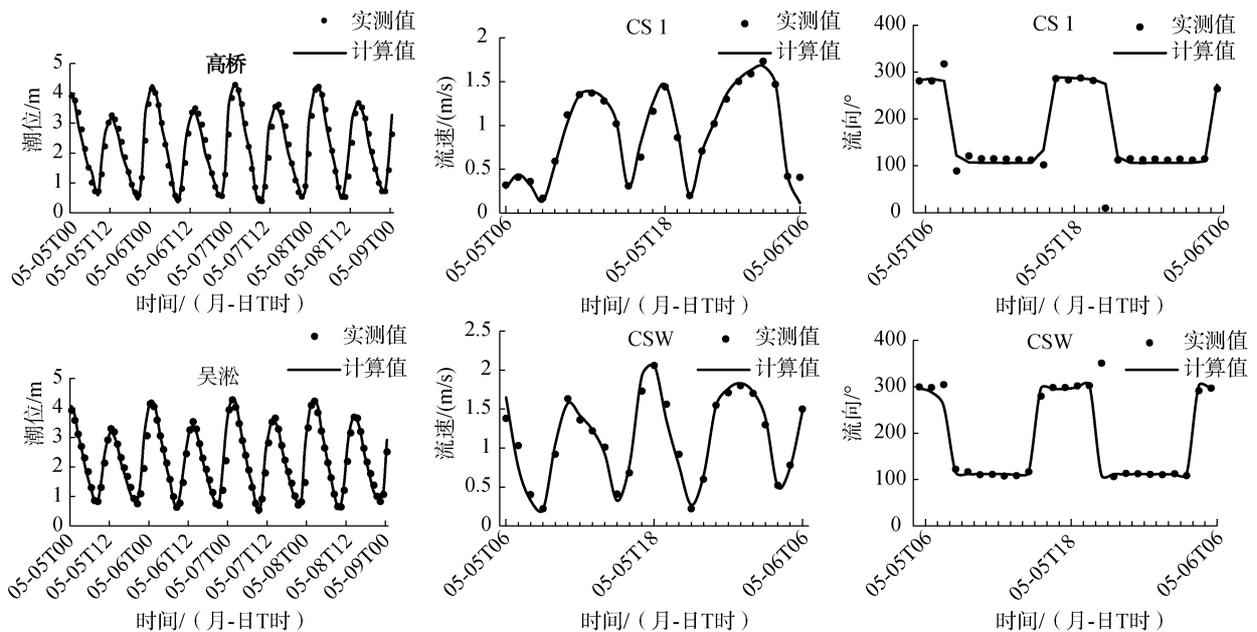


图 3 潮位、流速和流向验证

Fig. 3 Comparison of the measured and computed tidal levels, current velocity magnitudes, and directions

由 8 个主要分潮的调和常数计算求得。计算时间步长为 1 min,曼宁系数的取值范围为 0.01~0.02,水平涡黏度系数经调试后取  $20 \text{ m}^2/\text{s}$ 。模型验证选用 2004 年 5 月 4 日 6:00~2004 年 5 月 8 日 6:00 间主河道里两个潮位观测点及两个流速观测点的实测潮位及流速资料<sup>[13]</sup>,验证结果见图 3。从图中可以看出,高桥和吴淞测点的潮位计算值及 CS1 和 CSW 测点的流速、流向计算值均与实测值拟合较好,因此,本模型可用于计算分析长江口洪、枯季的滞流点位置的移动情况。

## 3 计算结果与分析

选取长江口大通水文站 2007 年枯季流量  $11\,270 \text{ m}^3/\text{s}$  和洪季流量  $45\,600 \text{ m}^3/\text{s}$  作为模型的上边界条件,其他条件不变,对长江口各汊道洪、枯季滞流点位置移动以及移动距离进行计算,分析观测点和观测断面的设置如图 4 所示。

### 3.1 滞流点位置的确定

根据水流优势程度(Predominance of flow)理论<sup>[14]</sup>,确定滞流点位置。

1) 计算优势度。绘出各观测点的流速过程线,分别求出该点的落潮流速曲线与时间轴包围的面积  $A_e$ (落潮流期间水质点净流程)和涨潮流速曲线与时间轴包围的面积  $A_f$ (涨潮流期间水质点净流程),并求出优势度(即  $A_e/(A_e+A_f)$ )。

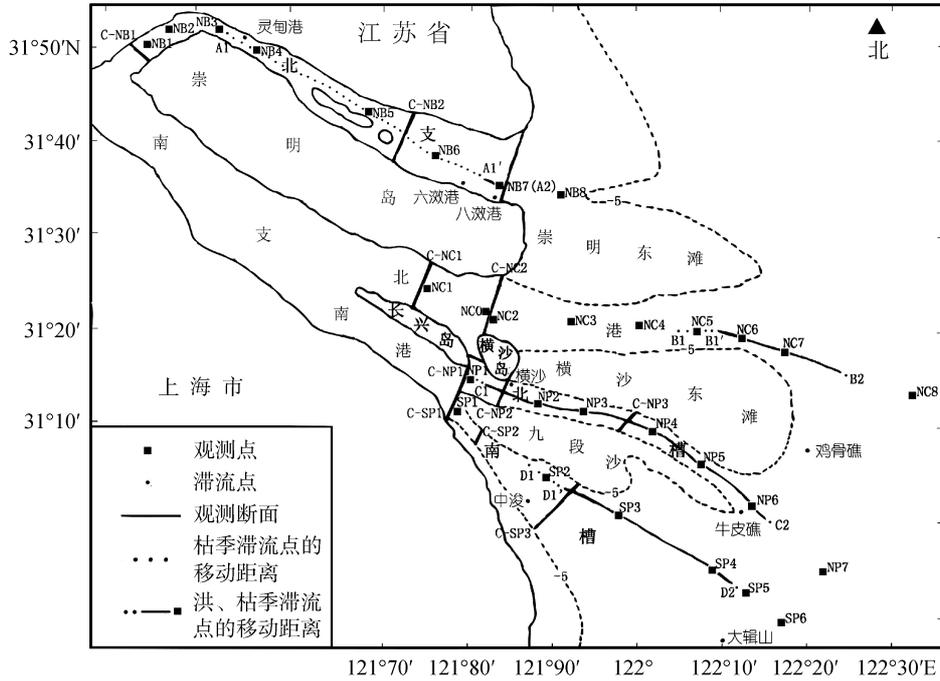


图 4 各观测点、观测断面以及滞流点的分布

Fig. 4 Distribution of observation points, observation sections, and stagnation point

2) 量取距离。选择各汉道中离海最远的一个观测点作为参考点，量出其他观测点距参考点的距离。在本次模拟中，选择测站 NB1、NC0、NP1 和 SP1 作为北支、北港、北槽和南槽汉道内计算滞流点移动距离的参考点，沿程向下量取距离。

3) 绘制落潮优势度-距离曲线。以各观测点落潮

优势度值作为纵坐标，距离作为横坐标，用光滑的曲线依次连接各汉道沿程设置的观测点，即得到各汉道沿程纵断面的优势流曲线。图 5 中曲线与纵坐标为 50%的横轴的交点即为滞流点，即北支滞流点为 A1、A1'和 A2，北港滞流点为 B1、B1'和 B2，北槽滞流点为 C1 和 C2，南槽滞流点为 D1、D1'和 D2，

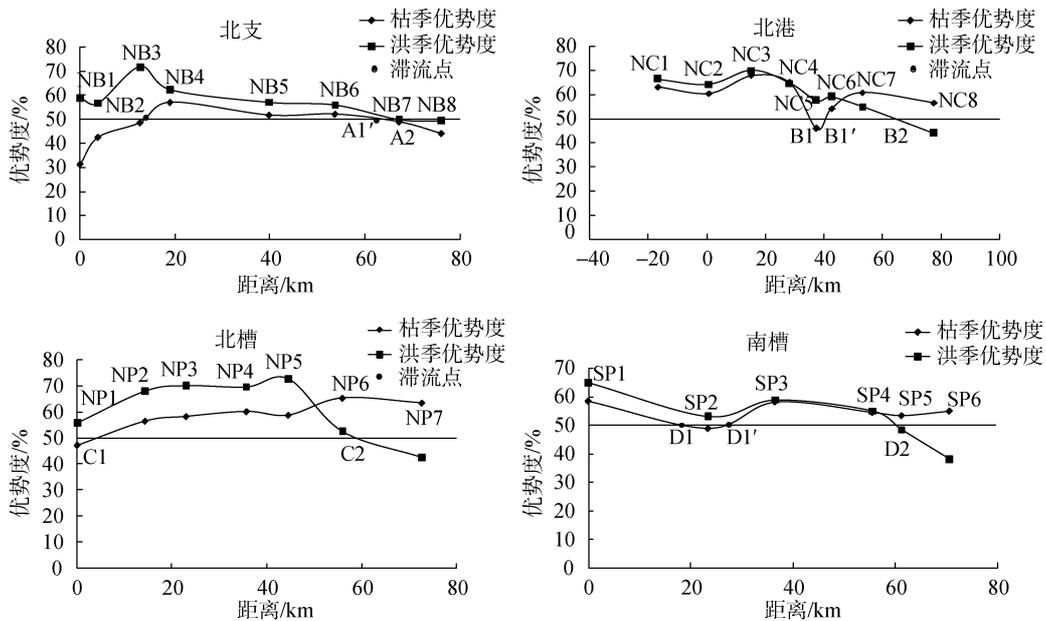


图 5 长江口各汉道沿程观测点优势流曲线以及滞流点的位置

Fig. 5 The curve of predominance of flow and position of the stagnation point in four channels of the Yangtze River Estuary

并计算得到各汉道枯、洪季滞流点的移动距离, 再将图 5 中滞流点所在位置投射到图 4 中, 即可得到各汉道滞流点的实际地理位置(表 1)。

### 3.2 枯、洪季滞流点位置移动分析

表 2 为模型计算得到的长江口各汉道观测断面的枯、洪季落潮量、涨潮量和落、涨潮量之比。从表 2 可以看出, 长江口四个汉道各断面洪季的落、涨潮量之比皆大于枯季的落、涨潮量之比, 说明滞流点都出现洪季下移、枯季上溯的现象(表 1)。但由于各汉道落、涨潮量之比在枯、洪季变化规律不同, 滞流点的位置和移动距离亦不相同(图 4 和图 5)。

北支各观测断面的枯、洪季落、涨潮量之比 $\leq 1$ (表 2), 说明北支以涨潮流为主。洪季, 滞流点(A2)出现在距离参考点(NB1)67.0 km 处, 在落涨潮量之比为 1.00 的断

面 C-NB3 附近, 即八淤港东北方向约 1.9 km 处(表 1)。北支断面枯、洪季的落、涨潮量之比都呈沿程增大的趋势, 但上断面 C-NB1 洪季落、涨潮量之比远大于枯季落、涨潮量之比, 说明北支洪季的落潮动力较枯季强, 而北支的潮差变化呈现从上段向中段逐渐增大, 再从中段向口门逐渐减小的规律<sup>[15-16]</sup>, 因此, 在上断面 C-NB1 和中断面 C-NB2、中断面 C-NB2 和下断面 C-NB3 之间皆出现滞流点(A1 和 A1'), 分别在距离参考点(NB1)13.7 km 和 62.4 km 处, 即灵甸港西南方向约 3.2 km 处和六淤港东北方向约 3.1 km 处, 从而计算得到北支洪、枯季的滞流点移动距离为 4.6~53.3 km(表 1)。

南支的各汉道中, 各观测断面(除南槽下断面 C-SP3 外)的落、涨潮量之比皆大于 1, 说明南支各汉道以落潮流为主(表 2)。

表 1 长江口各汉道枯、洪季滞流点位置及移动距离

Tab. 1 The position and moving distance of stagnation point in four channels of the Yangtze River Estuary during dry and flood seasons

汉道	季节	滞流点	距选定参考点位置	实际位置	滞流点枯、洪季移动距离(km)
北支	枯季	A1	距 NB1 点 13.7 km	灵甸港西南方向 3.2 km	4.6~53.3
		A1'	距 NB1 点 62.4 km	六淤港东北方向 3.1 km	
	洪季	A2	距 NB1 点 67 km	八淤港东北方向 1.9 km	
北港	枯季	B1	距 NC0 点 34.6 km	鸡骨礁西北方向 25.8 km	22.0~27.7
		B1'	距 NC0 点 40.3 km	鸡骨礁西北方向 20.2 km	
	洪季	B2	距 NC0 点 62.3 km	鸡骨礁东北方向 10 km	
北槽	枯季	C1	距 NP1 点 3.4 km	横沙正西方向 5.3 km	57.1
	洪季	C2	距 NP1 点 60.4 km	牛皮礁东南方向 3.8 km	
南槽	枯季	D1	距 SP1 点 20.8 km	中浚西北方向 6.5 km	34.6~39.2
		D1'	距 SP1 点 25.5 km	中浚东北方向 5.5 km	
	洪季	D2	距 SP1 点 60 km	大辑山东北方向 14.1 km	

表 2 长江口各汉道落、涨潮量计算值

Tab. 2 Computed flood and ebb flux in the channels of the Yangtze River Estuary

汉道	断面	落潮量( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ )		涨潮量( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ )		落、涨潮量之比	
		枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季
北支	C-NB1	45.7	146.4	167.5	173.8	0.27	0.84
	C-NB2	2 780.7	3 293.6	2 921.3	3 312.8	0.95	0.99
	C-NB3	6 162.6	7 169.9	6 343.6	7 155.8	0.97	1.00
北港	C-NC1	6 672.4	9 247.1	5 666.2	5 838.5	1.18	1.58
	C-NC2	7 194.9	9 676.7	6 410.7	6 699.8	1.12	1.44
北槽	C-NP1	3 132.8	4 248.3	3 033.0	3 191.8	1.07	1.33
	C-NP2	4 129.5	5 541.8	3 263.2	3 517.8	1.27	1.58
	C-NP3	5 014.0	6 415.9	3 333.1	3 638.6	1.51	1.76
横沙通道	C-HS	375.7	587.5	736.0	948.4	0.51	0.60
南槽	C-SP1	3 587.5	5 018.1	2 728.6	2 817.1	1.31	1.78
	C-SP2	3 826.2	5 282.7	3 340.8	3 628.7	1.15	1.46
	C-SP3	6 192.5	7 980.4	6 611.7	7 470.3	0.94	1.07

洪季, 南支各汉道各断面的落、涨潮量之比表现为: 北港上断面 C-NC1(1.58) > 下断面 C-NC2(1.44); 北槽上断面 C-NP1(1.33) < 中断面 C-NP2(1.58) < 下断面 C-NP3(1.76); 南槽上断面 C-SP1(1.78) > 中断面 C-SP2(1.46) > 下断面 C-SP3(1.07)。因此, 各汉道滞流点位置也有所不同, 北港位于下断面(C-NC2)下游, 北槽位于上断面(C-NP1)附近, 南槽位于下断面(C-SP3)下游。根据文献[2]的研究结果, 在潮差相近(相同季节)的情况下, 径流量大, 则混合程度较弱, 滞流点下移; 反之, 混合程度较强, 滞流点上移。由表 2 可知, 洪季, 北港上断面 C-NC1 的落潮量为  $9\ 247.1\ \text{m}^3/\text{s}$ , 而对于北槽, 应考虑横沙通道落潮流及南槽倒灌水流对北槽的影响(其落、涨潮量之比为 0.6), 选择北槽中断面 C-NP2 的落潮量  $5\ 541.8\ \text{m}^3/\text{s}$  较合理, 南槽上断面 C-SP1 的落潮量为  $5\ 018.1\ \text{m}^3/\text{s}$ 。比较这三个汉道的落潮量, 北港大于北槽大于南槽, 则其混合程度, 南槽大于北槽大于北港。故在洪季, 北港滞流点(B2)、北槽滞流点(C2)和南槽滞流点(D2)的位置分别在距参考点(NC0)62.3 km 处、距参考点(NP1)60.4 km 处和距参考点(SP1)60.0 km 处, 即鸡骨礁东北方向约 10.0 km 处、牛皮礁东南方向约 3.8 km 处和大辑山东北方向约 14.1 km 处。北港滞流点靠外, 南槽滞流点靠内, 而北槽滞流点居于两者之间(表 1)。

枯季, 南支各汉道各断面的落、涨潮量之比: 北港上断面 C-NC1(1.18) > 下断面 C-NC2 (1.12), 北港滞流点(B1、B1')出现在下断面 C-NC2 下游, 分别在距参考点(NC0)34.6 km 和 40.3 km 处, 即鸡骨礁西北方向约 25.8 km 和 20.2 km 处(表 2); 北槽上断面 C-NP1(1.07) < 中断面 C-NP2(1.27) < 下断面 C-NP3(1.51), 滞流点应出现在上断面 C-NP1 上游, 但是, 由于有通过横沙通道及从南槽倒灌进入北槽的水流, 增强了北槽的径流动力, 因此滞流点(C1)出现在上断面 C-NP1 下游附近, 在距参考点(NP1)3.4 km 处, 即横沙以西 5.3 km 处; 南槽上断面 C-SP1(1.31) > 中断面 C-SP2(1.15) > 下断面 C-SP3(0.94), 滞流点(D1、D1')位于中断面 C-SP2 和下断面 C-SP3 之间, 分别在距参考点(SP1)20.8 km 和 25.5 km 处, 即中浚西北方向约 6.5 km 和 5.5 km 处(表 1)。故在枯季, 北港滞流点分别在鸡骨礁西北方向约 25.8 km 和 20.2 km 处, 最靠外; 北槽滞流点在横沙以西 5.3 km 处, 最靠内; 南槽滞流点分别在中浚西北方向约 6.5 km 和东北方向 5.5 km 处, 居于两者之间(表 1)。

因此, 综合分析长江口南支各汉道(北港、北槽

和南槽)洪、枯季滞流点位置变化情况, 可以得到滞流点的移动距离分别为: 北港 22.0~27.7 km、北槽 57.1 km 和南槽 34.6~39.2 km, 北槽滞流点的移动距离最大, 南槽其次, 北港最小。

### 3.3 滞流点位置移动与泥沙淤积的关系分析

滞流点是河口最大浑浊带形成的重要原因之一, 也是表征河口拦门沙河段水动力的关键指标。长江口拦门沙洪季淤积、枯季冲刷的规律十分明显, 黄胜<sup>[16]</sup>认为这种规律与滞流点位置变化有关。洪季时, 径流量大, 水体挟带泥沙量多, 且水温高, 水体黏性小, 在合适的盐度条件下, 黏性泥沙易形成泥沙絮团, 在滞流点附近悬沙汇聚并且黏结成絮团迅速沉降于河底, 此时滞流点的位置一般与拦门沙的位置相对应, 所以洪季拦门沙地区普遍淤积<sup>[17]</sup>。枯季时, 径流量小, 水体挟带泥沙量也少, 水温低, 水体黏性大, 泥沙的絮凝程度和絮凝沉降的速度都较小, 泥沙淤积比洪季要小; 又因枯季滞流点在洪季滞流点的上游, 因此, 枯季时拦门沙上游淤积, 而拦门沙会受到冲刷<sup>[18]</sup>。

表 3 为长江口各汉道滞流点洪、枯季的位置与拦门沙泥沙淤积的关系, 从表中可以看出, 泥沙淤积的位置与滞流点的位置较一致。例如, 枯季时, 当大通水文站的流量(分别是: 17 872、17 637、12 300、17 637  $\text{m}^3/\text{s}$ )大于本文数值模拟设定的计算流量(11 270  $\text{m}^3/\text{s}$ )时, 各汉道泥沙淤积的河段分别在滞流点的下游附近。北支含沙量最大值出现的位置(灵甸港断面)位于滞流点 A1(灵甸港西南 3.2 km)下游 3.2 km 处; 北港含沙量最大值出现的位置(鸡骨礁西北方向 18.3 km 处)位于滞流点 B1 和 B1'(分别位于鸡骨礁西北方向 20.2 km 和 25.8 km 处)下游附近; 北槽滞流点出现的位置(横沙以上即以西 2.6 km)位于滞流点 C1(在横沙水文站以西 5.3 km)的下游附近 2.7 km 处; 南槽最大浑浊带中心出现的位置(中浚东南方向 9.4 km)位于滞流点 D1 和 D1'(分别在中浚西北方向 6.5 km 和东北方向 3.2 km)的下游附近。而在洪季时, 当大通水文站的流量(分别是: 41 336  $\text{m}^3/\text{s}$  和 42 800  $\text{m}^3/\text{s}$ )小于本文数值模拟设定的流量(45 600  $\text{m}^3/\text{s}$ )时, 北槽和南槽泥沙淤积的河段均在滞流点的上游附近。北槽回淤量峰值出现在横沙通道下游 47.0~51.0 km 处, 位于滞流点 C2(在牛皮礁东南方向 3.8 km, 相当于横沙水文站东南方向 51.7 km 处)的上游附近; 南槽悬沙有效沉速最大值出现在九段沙东水文站下游 15.0 km 处, 滞流点位置在大辑山东北 14.1 km 处, 由于九段

表 3 长江口各汉道滞流点的位置与泥沙淤积的关系

Tab. 3 Relation between the position of stagnation point and sedimentation in the Yangtze River Estuary

汉道	季节	时间 (年-月)	大通水文站 流量(m <sup>3</sup> /s)	泥沙淤积 表征量	泥沙淤积 位置	来源 文献	数值模拟的 滞流点位置
北支	枯季	2007-03	17 872 <sup>[19]</sup>	全潮含沙量 最大值	在灵甸港, 其次在连兴港	[19-20]	灵甸港西南 3.2 km, 六淤港东北 3.1 km
	洪季	—	—	—	—	—	八淤港东北 1.9 km
北港	枯季	2003-02	17 637 <sup>[21]</sup>	含沙量最大值	位于 122°4.8'E、31°20.4'N, 在鸡骨礁西北 18.3 km	[21-22]	分别在鸡骨礁西北 20.2 km 和 25.8 km
	洪季	—	—	—	—	—	鸡骨礁东北 10.0 km
北槽	枯季	2000-02	12 300	滞沙点	横沙以上 2.6 km	[23-24]	横沙以西(或以上)5.3 km
	洪季	2004-07	41 336	回淤量峰值	CS0 站(靠近横沙水文站) 以东 47.0~51.0 km	[21, 23, 25]	牛皮礁东南 3.8 km, 即横沙水文站东南 51.7 km
南槽	枯季	2003-02	17 637 <sup>[21]</sup>	最大浑浊带	位于 122°0'E、31°5.8'N, 在中浚东南 9.4 km	[26-28]	中浚西北 6.5 km, 东北 5.5 km
	洪季	2005-08	42 800 <sup>[29]</sup>	悬沙有效沉速 最大值	九段沙东水文站(122°10'E、 31°06'5"N)下游 15.0 km	[25]	大辑山东北 14.1 km

注: 表中“—”表示数据短缺

沙东水文站与大辑山位于同一个经度, 因此, 可以认为悬沙有效沉速最大值(实测)比较靠近滞流点(数值模拟)出现的位置。

综合上述研究结果, 可以确定滞流点附近是泥沙淤积的集中区域, 且泥沙淤积区域的变化与大通流量的变化密切相关, 因此可以用洪、枯季滞流点位置的移动来表征河口拦门沙地区泥沙淤积变化的情况。

## 4 结论

滞流点是表征河口拦门沙河段水动力的关键指标, 本文利用 Delft3D-Flow 模型对长江口各汉道枯、洪季滞流点位置移动距离进行了定量分析, 得出如下结论: (1)北支滞流点洪季出现在八淤港东北方向约 1.9 km 处, 枯季有两个滞流点且相距较远, 分别位于灵甸港西南方向约 3.2 km 处和六淤港东北方向约 3.1 km 处, 洪、枯季的移动距离约为 4.6~53.3 km; (2)南支各汉道中, 洪季时, 北港、北槽和南槽的滞流点分别位于鸡骨礁东北方向约 10.0 km 处、牛皮礁东南方向约 3.8 km 处和大辑山东北方向约 14.1 km 处。北港滞流点最靠外, 南槽滞流点最靠内, 北槽居于两者之间。枯季时, 北港出现两个滞流点, 分别位于鸡骨礁西北方向约 25.8 km 和 20.2 km 处; 南槽亦出现两个滞流点, 分别位于中浚西北方向 6.5 km 和东北方向 5.5 km 处; 北槽只有一个滞流点, 位于横沙以西 5.3 km 处。北港滞流点依然最靠外, 而北槽滞流点最靠内, 南槽居于两者之间。且北槽滞流点移动

距离最大, 北港滞流点移动距离最小, 南槽居中。这些现象与长江口各汉道的径流量分配情况和各河段的落、涨潮量之比的变化规律都存在内在的关系。

此外, 本文对滞流点的位置与拦门沙泥沙淤积的关系也进行了研究, 发现两者的位置较一致, 证明了滞流点附近往往容易引起河口泥沙淤积的结论。

参考文献:

- [1] Simmons H B, Broun F R. Salinity effect on hydraulics and shoaling in estuary[C]//International Association for Hydraulic Research. IAHR 13th Congress. Kyoto: World Scientific, 1969: 311-326.
- [2] 顾伟浩. 长江口滞流点位置的预测[J]. 水运工程, 1982, 9: 24-29.  
Gu Weihao. Prediction of the location of the stagnation point in the Changjiang Estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 1982, 9: 24-29.
- [3] 张栋梁, 姚金元. 长江口北槽挖槽段泥沙淤积特性研究[J]. 泥沙研究, 1993, 3: 66-78.  
Zhang Dongliang, Yao Jinyuan. A study on sediment in the North Branch of the Yangtze Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1993, 3: 66-78.
- [4] 刘高伟, 程和琴, 李九发, 等. 近期长江河口南汇南滩水域水沙变化特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 108-115.  
Liu Gaowei, Cheng Heqin, Li Jiufa, et al. Recent variations in tidal current and suspended sediment concentration in the Nanhui south Shoal of the Changjiang Estuary[J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 108-115.

- [5] 沈健, 沈焕庭, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析[J]. 地理学报, 1995, 5: 411-420.  
Shen Jian, Shen Huanting, Pan Dingan, et al. Analysis of transport mechanism of water and suspended sediment in the turbidity maximum zone of the Changjiang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 5: 411-420.
- [6] 沈焕庭, 朱建荣, 吴华林, 等. 长江河口陆海相互作用界面[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 55-68.  
Shen Huanting, Zhu Jianrong, Wu Hualin, et al. The interaction interface of sea and land in the Yangtze Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 55-68.
- [7] 姚运达, 沈焕庭, 潘定安, 等. 河口最大浑浊带机理的数值模型研究[J]. 泥沙研究, 1994: 4: 10-20.  
Yao Yunda, Shen Huanting, Pan Dingan, et al. Study of some mechanisms of turbidity maximum in Estuary with a numerical model[J]. Journal of Sediment Research, 1994, 4: 10-20.
- [8] 魏守林, 郑漓, 杨作升. 河口最大浑浊带的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报. 1990: 4: 14-21.  
Wei Shoulin, Zheng Li, Yang Zuosheng. A numerical simulation of the turbidity maximum zone in Estuaries[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1990, 4: 14-21.
- [9] 朱建荣, 傅德建, 吴辉, 等. 河口最大浑浊带形成的动力模式和数值试验[J]. 海洋工程, 2001, 22(1): 66-73.  
Zhu Jianrong, Fu Dejian, Wu Hui, et al. The dynamic model and numerical experiment of estuarine maximum turbidity zone[J]. Ocean Engineering, 2001, 22(1): 66-73.
- [10] Hansen D V, Rattray M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1965, 23: 104-122.
- [11] Dai Zhijun, Liu J T, Fu Gui, et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. Geomorphology, 2013, 187(4): 101-107.
- [12] Dai Zhijun, Liu J T, Wei Wen. Morphological evolution of the South Passage in the Changjiang (Yangtze River) estuary, China[J]. Quaternary International, 2015, 380: 314-326.
- [13] 孙波. 三峡与南水北调工程对长江口盐水楔影响的数值研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
Sun Bo. Numerical study on impact of the Three Georges Project and South-to-north Water Transfer Project on the Saline Wedge of Yangtze Estuary[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [14] Schultz E A, Simmons H B. Fresh water-salt water density currents, a major course of siltation in estuaries[C]//International Navigation Association. 19<sup>th</sup> International Navigation Congress. London: PIANC, 1957: 1-20.
- [15] 宋永港, 朱建荣, 吴辉. 长江河口北支潮位与潮差的时空变化和机理[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, 6: 10-19.  
Song Yonggang, Zhu Jianrong, Wu Hui. Spatial and temporal variations and mechanism of the tidal level and range in the North Branch of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011, 6: 10-19.
- [16] 黄胜. 长江口拦门沙淤积分析[C]//中国水利学会. 河流泥沙国际学术讨论会论文集(第一卷). 中国香港: 光华出版社, 1980: 1-8.  
Huang Sheng. Analysis of the sandbar deposition in the Yangtze Estuary[C]//Chinese Hydraulic Engineering Society. International Academic Discussion on River Sediment(Volume I). Hong Kong: Guanghua Press, 1980: 1-8.
- [17] 毕世普, 黄海军, 庄克琳, 等. 长江口河口锋的悬沙及动力特征初探[J]. 海洋科学, 2009, 33(12): 12-17.  
Bi Shipu, Huang Haijun, Zhuang Kelin, et al. Estuarine front of the Yangtze River Estuary and Dynamic characteristics of suspended sediment[J]. Ocean Science, 2009, 33(12): 12-17.
- [18] 匡翠萍. 长江口拦门沙冲淤及悬沙沉降规律研究和水流盐度泥沙数学模型[D]. 南京: 南京水利研究所, 1982.  
Kuang Cuiping. Investigation on regularities of Erosion-Siltation, settling velocity of cohesive fine sediments and numerical modeling of flow-salinity-sediment at mouth bar of Changjiang estuary [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1982.
- [19] 水利部长江水利委员会. 2007 年长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2007.  
The Commission of the Yangtze River Water Resources of Ministry of Water Resources. The Yangtze River Sediment Bulletin in 2007[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2007.
- [20] 李伯昌, 余文畴, 陈鹏, 等. 长江口北支近期水流泥沙输移及含盐度的变化特征[J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 31-34.  
Li Bochang, Yu Wenchou, Chen Peng, et al. Variation characteristics of sediment transport and salinity in north branch channel of Yangtze River estuary in recent year[J]. Water Resource Protection, 2011, 27(4): 31-34.
- [21] 翟晓鸣. 长江口水动力和悬沙分布特征初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.  
Zhai Xiaoming. Initial exploration in the distribution characteristics of hydrodynamic force and suspended sediment of the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [22] 翟晓鸣, 何青, 刘红, 等. 长江口枯季水沙特性分析——以 2003 年为例[J]. 海洋通报, 2007, 26(4): 23-33.  
Zhai Xiaoming, He Qing, Liu Hong, et al. Characteristics of current and sediment in the Yangtze Estuary during the dry seasons——take 2003 as an example[J]. Marine Bulletin, 2007, 26(4): 23-33.
- [23] 周海, 张华, 阮伟. 长江口深水航道治理一期工程实

- 施前后北槽最大浑浊带分布及对北槽淤积的影响[J]. 泥沙研究, 2005, 5: 58-65.  
Zhou Hai, Zhang Hua, Ruan Wei. Distribution of maximum turbidity and its influence on the sedimentation of North Passage before and after the Construction of the first stage of Yangtze Estuary Deepwater Channel Regulation Project[J]. Journal of Sediment Research, 2005, 5: 58-65.
- [24] 刘杰, 徐志杨, 赵德招, 等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化[J]. 泥沙研究, 2009, 2: 22-28.  
Liu jie, Xu Zhiyang, Zhao Dezhao, et al. Change of re-siltation in the Yangtze Estuary deepwater channel during 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> stages[J]. Journal of Sediment Research, 2009, 2: 22-28.
- [25] 杨云平, 李义天, 王冬, 等. 长江口悬沙有效沉速时空变化规律[J]. 水利水运工程学报, 2012, 5: 24-29.  
Yang Yunping, Li Yitian, Wang Dong, et al. Space-time variation in effective settling velocity of suspended sediment in Yangtze River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012, 5: 24-29.
- [26] 张文祥, 杨世伦, 杜景龙, 等. 长江口南槽最大浑浊带短周期悬沙浓度变化[J]. 海洋学研究, 2008, 26(5): 25-34.  
Zhang Wenxiang, Yang Shilun, Du Jinglong, et al. Concentration change of turbidity maximum zone in the South Passage of the Yangtze Estuary [J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(5): 25-34.
- [27] 时伟荣, 李九发. 长江河口南北槽输沙机制及浑浊带发育分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(4): 69-76.  
Shi Weirong, Li Jiufa. Mud transport calculation in Yangtze Estuary and analyses of formation of turbidity maximum zone[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(4): 69-76.
- [28] 李九发, 时伟荣, 沈焕庭. 长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律[J]. 地理研究, 1994, 13(1): 51-59.  
Li Jiufa, Shi Weirong, Shen Huanting. The sediment characteristics and transport regulation of the Yangtze Estuary[J]. Geographical Research, 1994, 13(1): 51-59.
- [29] 水利部长江水利委员会. 2005 年长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2005.  
The Commission of the Yangtze River Water Resources of Ministry of Water Resources. The Yangtze River Sediment Bulletin in 2005[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2005.

## Numerical analysis of the movement of stagnation points in the Yangtze River Estuary during the flood and dry seasons

GU Jie, ZHENG Yu-hua, WANG Xiao-li, MA Dan-qing

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Dec. 17, 2015

**Key words:** numerical simulation; the Yangtze River Estuary; stagnation point; movement during flood and dry seasons

**Abstract:** A two-dimensional tidal flow numerical model of the Yangtze River Estuary is established based on the Delft3D-FLOW model to study the seasonal changes of the stagnation points in the Yangtze River Estuary. First, the model is well calibrated with the field data and is subsequently employed to simulate and analyze the movement of the stagnation points in the Yangtze River Estuary during the flood and dry seasons. The results show that during floods, the stagnation point in the North Branch is located at 1.9 km northeast of the Bayao Port, whereas in the South Branch, the stagnation points in the North Channel and the North and South Passages are located at approximately 10.0 km northeast of Jigujiao, 3.8 km southeast of Niupijiao, and 14.1 km northeast of Dajishan, respectively. During the dry season, there are two stagnation points in every channel, except for the North Passage. The two points in the North Branch are far from each other and are located at approximately 3.2 km southwest of the Lingdian Port and 3.1 km northeast of the Liuyao Port. The stagnation points in the North Channel are located at 25.8 km and 20.2 km northwest of Jigujiao, whereas the stagnation point in the North Passage is located at 5.3 km west of Hengsha. Two stagnation points in the South Passage are located at 6.5 km northwest and 5.5 km northeast of Zhongjun. The seasonal moving range of stagnation points is from 4.6 to 53.3 km in the North Branch, from 22.0 to 27.7 km in the North Channel, and from 34.6 to 39.2 km in the South Passage; however, these ranges reach a maximum value of 57.1 km in the North Passage. The movements of stagnation points in four channels in the Yangtze River Estuary reflect the combined effects of river run-off and ocean tides.

(本文编辑: 李晓燕)