

长江河口北槽弯道环流的涡度研究*

李为¹ 时钟¹ 浦祥¹ 胡国栋²

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院海洋工程国家重点实验室和高新船舶与深海开发装备协同创新中心
上海 200030; 2. 长江口水文水资源勘测局 上海 200136)

摘要 基于 ADCP 走航观测得到长江河口北槽弯道附近 3 个横向断面(AD3、AD5 和 AD6)的流速资料, 采用涡度方法, 本文计算、分析了弯道环流与混合在垂直横向上的时空分布、影响因素及其重要性。3 个横向断面上均存在由不规则界面分开的二层结构的横向环流。半拉格朗日余流的计算结果显示: (1)小潮期间, AD3、AD5 和 AD6 断面呈现表层向海、底层向陆的纵向环状半拉格朗日余流; 大潮期间, 呈现表、底层均向海的纵向半拉格朗日余流; (2)小潮期间, AD3 断面呈现表层向北导堤、底层向南导堤的横向环状半拉格朗日余流; 大潮期间, AD3 断面中间区域呈现表层向北导堤、底层向南导堤的、而断面两端区域则呈现表层向南导堤、底层向北导堤的横向环状半拉格朗日余流; (3)小、大潮期间, 横向断面 AD5 和 AD6 均呈现表层向北导堤、底层向南导堤的横向环状半拉格朗日余流; (4)“纵向半拉格朗日余流”在 $-0.2\sim 0.7\text{m/s}$; 横向半拉格朗日余流”在 $-0.15\sim 0.2\text{m/s}$; (5)纵向半拉格朗日余流在横向上有明显变化。对弯道环流的进一步分析表明: (1)斜压梯度、内部摩擦致混合和底部摩擦致混合这三项各自的纵向分量是驱动纵向环流形成的主要因素, “纵向动量的横向重新分布项”次之, 离心力和地转的影响可忽略; (2)横向斜压梯度和内部摩擦致混合项是驱动横向环流形成的主要因素, 离心力、地转和底部摩擦致混合次之; (3)横向环流可能通过“纵向动量的横向重新分布项”减弱纵向动量, 从而可能减弱纵向环流。

关键词 长江河口; 北槽弯道; 横向环流; 纵向环流; 涡度方法; 半拉格朗日余流

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20161000217

潮汐河口纵向、横向环流与混合控制着河口营养物质、污染物以及泥沙的输移, 进一步理解其时空变化规律和生成机制以及它们之间的相互影响, 具有一定的科学和工程意义。

基于现场观测资料, Pritchard(1952)发现詹姆斯河口(the James River estuary)存在明显的由顺河纵向密度梯度造成的表层向海、底层向陆的水流结构, 这就是经典的“重力环流(gravitational circulation)” (Pritchard, 1952, 1954, 1956)、“河口环流(estuarine circulation)” (Hansen *et al.*, 1965; MacCready *et al.*, 2010; Geyer *et al.*, 2014)。除重力之外, 潮汐混合的不对称性, 即潮汐应变作用(Simpson *et al.*, 1990; Jay *et al.*, 1994), 也可能产生潮周期平均的河口环流。

一般而言, 虽然垂直于河流的横向流的强度小于顺河的纵向流的强度, 但是, 横向环流在物质的输

移以及驱动河口环流方面的作用不容忽视。横向环流的影响因素包括: 地转效应、河槽曲率、差异平流等等。

关于地球自转对水流运动的影响, Kalkwijk 等(1986)将科氏力加入到横向次生流的动量平衡方程中, 给出了科氏力产生次生流的解析解。在河口地区, Geyer(1993)基于现场观测发现弯道曲率能产生横向环流, 并且水体层化对其有增强作用。Chant 等(1997)推导得到了包含横向斜压梯度影响的横向动量方程, 定性分析了河槽曲率和横向密度梯度对横向环流的影响。基于现场观测和数学模拟的方法, Nunes 等(1985)发现横向水深的变化能引起沿槽密度梯度的差异平流, 从而产生表层向中间汇聚、底层向两边辐射的横向环流结构。Becherer 等(2015)采用涡度方法(vorticity approach)分析现场观测资料, 发现弯曲潮汐河道内部摩擦致混合、横向斜压梯度和离心力是影

* 海洋工程国家重点实验室自主研究项目, GKZD010068 号, GKZD010071 号。李为, 硕士研究生, E-mail: 1183234007@qq.com

通讯作者: 时钟, 博士, E-mail: zshi@mail.sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-15, 收修改稿日期: 2017-06-01

响横向环流生成的主要因素。

也有不少学者研究了横向环流对于纵向环流的影响。Lacy 等(2003)通过现场观测发现: 河口的横向环流对纵向动量平衡有很大的影响。基于恒定涡黏性系数的数学模型的研究, Lerczak 等(2004)发现横向环流会造成纵向动量的横向平流, 比斜压梯度引起的河口环流更强。Becherer 等(2015)发现横向环流是生成河口环流的主导项, 将横向环流对河口环流的影响定义为纵向动量的横向重新分布项: 纵向流速有横向剪切时, 横向环流会增大(绿色)或减小(红色)纵向流速的垂向梯度, 从而增强或减弱纵向环流(图 1)。

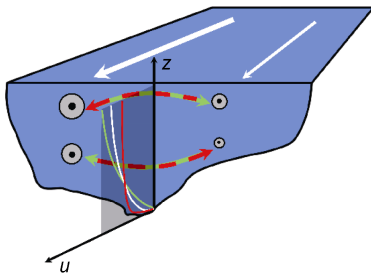


图 1 纵向动量的横向重新分布(据 Becherer, 2014, 图 3.3)。

Fig.1 Schematic of the lateral redistribution of along-channel momentum (Becherer, 2014, Fig. 3.3)

注: 白色箭头表示涨潮流的方向, 线条的粗细、圆圈的大小表示流速的大小; 红色和绿色虚线圈表示横向环流

Becherer 等(2015)采用的涡度方法能够同时计算纵、横向环流, 并且能定量分析横向环流对纵向环流的影响, 可供长江河口北槽的相关研究借鉴。

目前, 对于长江河口, 现有研究多关注纵向上的河口环流及其与盐度层化之间的相互影响。例如: 沈焕庭等(1986)发现长江河口在径流、潮流和盐淡水异重流共同作用下, 形成表层水流净向海、底层水流净向陆的河口环流。时钟(2001)回顾了长江河口余流、环流等的研究进展以及今后数学模型发展的方向。张重乐等(1988)、倪智慧等(2012)、李霞等(2013)、Pu 等(2015)研究了长江河口环流对混合与层化的时空变化的影响。邵聪颖等(2016)对北槽弯道附近横向次生流、环流形成的影响因素及其与混合、层化的关系进行了定量研究。基于长江河口的数学模型和理论计算, 许多学者也开展了研究, 例如: 匡翠萍(1997)、罗小峰等(2004)、熊龙兵等(2014)、刘兴泉等(2015)、Pu 等(2016)。另外, 在其他河口如: 象山港(董礼先等, 2000)、泉州湾(刘浩等, 2009)、伶仃洋(易侃等, 2015), 也有相关报道。以上均缺少横向环流以及横向环流对

纵向环流影响的研究。

近年来, 走航式 ADCP 测量技术得到了应用, 于东生等(2003)发现断面上有三个方向环流的产生, 即纵向环流、横向环流和平面环流, 并分析了环流的成因; 张俊勇等(2013)在北槽弯道附近观测到纵向环流、横向环流和平面环流, 以及越堤流造成的横向水流。除了采用 Navier-Stokes 方程中的 u 和 v 动量方程 (Chant *et al*, 1997; Nidzieko *et al*, 2009), 一些学者用流的剪切表示环流的强度, 得到涡度的动量方程, 进而可以同时分析横向环流和纵向流形成的影响因素以及它们之间的相对大小(Collignon *et al*, 2012; Li *et al*, 2014; Becherer *et al*, 2015)。Becherer 等(2015)采用的涡度方法, 不仅能够同时分析生成纵、横向环流形成的影响因素, 而且涡度动量方程中非线性的“纵向动量的横向重新分布项”有助于理解横向环流是如何影响纵向环流的(图 1)。本文直接用流速大小来表示环流的结构及强度, 以探讨长江河口北槽弯道横向环流的结构形态, 并采用涡度方法来分析纵、横向环流的成因及横向环流对纵向环流的影响。

1 现场观测与数据处理

1.1 观测时间、位置及方法

如图 2(a, b)所示, 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局于 2014 年 2 月 23 日至 24 日(枯季, 小潮)和 2 月 28 日至 3 月 1 日(枯季, 大潮)沿着 3 条断面(AD3、AD5、AD6)进行了观测, 采用的观测仪器是 ADCP, 观测变量包括潮流量、流速、流向等。另外, 与 ADCP 走航测量的同时, 如图 2b 中, 还在 CSW_N 、 CSW_M 和 CSW_S 这 3 个固定垂向测线上观测了流速、流向和盐度。

1.2 ADCP 流速、流向数据

根据长江口航道养护工程 2014 年枯季北槽 ADCP 固定断面测流观测技术报告, 沿用标准的流速垂直分布数学模型结合实际流场形态, 经比测分析得出上、下盲区的流速估算关系式。水面流速和 ADCP 实测第一个单元流速之间的关系式为

$$v_{\text{水面}} = v_{1c} \times \zeta_1, \quad (1)$$

v_{1c} 为 ADCP 在垂直方向所测得第一个单元流速, ζ_1 为常数, 值在 0.98—1.03, 本文取 1.0。

水底流速和 ADCP 实测最后一个单元流速之间的关系式为

$$v_{\text{水底}} = v_{cL} \times \zeta_2, \quad (2)$$

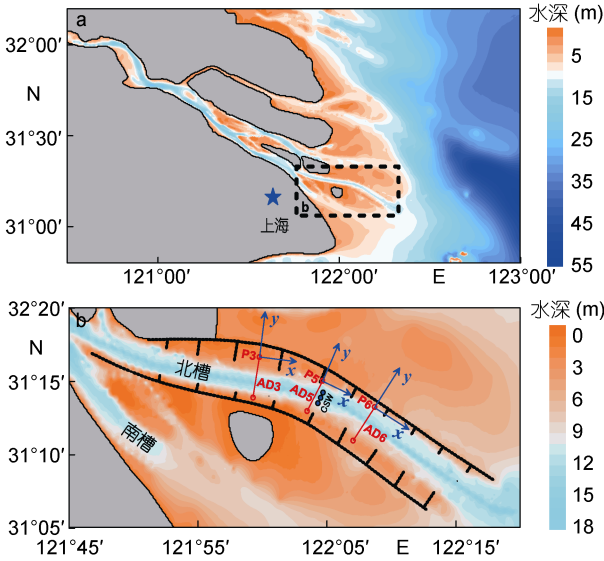


图2 长江河口(a)和北槽水下地形(b)

Fig.2 Bathymetry of the Changjiang (Yangtze) River estuary (a) and the North Passage (b)

注: 黑色点线表示导堤和丁坝; AD3、AD5和AD6表示3条船载 ADCP 走航断面; P3、P5和P6则是相应的测量起点; 蓝色坐标系表示3条横向断面分别对应的笛卡尔坐标系; 蓝色圆点分别表示北、中、南3个垂线站位 CSW_N、CSW_M和CSW_S

v_{cL} 为 ADCP 在垂直方向所测最后一个单元流速, ζ_2 的值与河床特性及断面水深有关, 经对大量的比测资料分析, 值在 0.79—0.85, 本文取 0.795。

船载 ADCP 频率为 300kHz, 测深单元深度为 100cm, 测船航速小于 2.5m/s。上、下游各断面同步施测, 每一次测流历时基本在 25 分钟以内。小潮、大潮, 每条断面上均进行了 134 次观测。资料按照 GB 50179-93《河流流量测验规范》进行收集和处理。本文数据按“六点法”处理: 输出相对水深 H 为水面、 $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$ 和水底的流速、流向。

1.3 坐标变换和流速分解

原始流速、流向以正东为 x 轴正向, 正北为 y 轴正向。为了便于计算和分析, 本文对原始坐标系进行

变换, 取沿主航槽方向为 x 轴正向, 垂直于主航槽方向为 y 轴正向, 沿水深垂直向上为 z 轴正向, 坐标原点取在走航测量的起点(图 2b)。根据各固定测流断面的坐标位置, 可计算出变换后的坐标系 y 轴正向与原坐标系 y 轴正向(即正北方向)的夹角, 进而可以将原始的流速、流向分解为沿纵向 x 轴的 u 和沿横向 y 轴的 v 。

2 理论方法

2.1 涡度方法

Thomson(1868)提出的涡度想法, 启发了河流、河口动力学家用涡度方法来研究环流。本文采用 Becherer 等(2015)的涡度方法, x 、 y 和 z 方向的涡度如下:

$$\omega_x = \partial_y w - \partial_z v, \omega_y = \partial_z u - \partial_x w, \omega_z = \partial_x v - \partial_y u, \quad (3)$$

式中 u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的流速分量, 分别表示横向环流、纵向环流和平面环流的大小和方向。

需要特别指出的是: 在河口中, 用 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 分别表示横向环流、纵向环流和平面环流的大小和方向。本文纵向环流指的是 Becherer 等(2015, 式 7)中定义的横向涡度; 而横向环流指的是 Becherer 等(2015, 式 6)中定义的纵向涡度。

将水体沿深度方向等分表层和底层水体。沿槽的“总体涡度”与表层水体和底层水体横向速度的关系可表示为(Becherer *et al*, 2015, 式 A11):

$$[\omega_x] = -[\partial_z v] = -\frac{2}{D}(\langle v \rangle_{SL} - \langle v \rangle_{BL}). \quad (4)$$

式中 $[\cdot]$ 表示总体值; $D=H+\eta$ 为水深, H 为静水面到水底的深度, η 为水面高度。在本文中, 不考虑横向的水位变化, 即 $D=H$ 。

类似地, “总体横向涡度”定义为(Becherer *et al*, 2015, 式 A12):

$$[\omega_y] = -[\partial_z u] = -\frac{2}{D}(\langle u \rangle_{SL} - \langle u \rangle_{BL}). \quad (5)$$

“总体纵向涡度”(横向环流)的输运方程(Becherer *et al*, 2015, 式 8):

$$\partial_t[\omega_x] = \underbrace{\frac{4}{D^2}\langle v'w' \rangle|_{-H}}_{\text{横向底部摩擦致混合项}} + \underbrace{\partial_y \langle b \rangle_z}_{\text{横向斜压梯度项}} + \underbrace{f[\omega_y]}_{\text{横向科氏力项}} - \underbrace{\frac{2}{R}\langle u \rangle_z[\omega_y]}_{\text{横向离心力项}} - \underbrace{\frac{8}{D^2}\langle v'w' \rangle|_{1/2(\eta-H)}}_{\text{横向内部摩擦致混合项}}, \quad (6)$$

相应地, “总体横向涡度”(纵向环流)的输运方程(Becherer *et al*, 2015, 式 9):

$$\partial_t[\omega_y] = \underbrace{-\frac{4}{D^2}\langle u'w' \rangle|_{-H}}_{\text{纵向底部摩擦致混合项}} - \underbrace{\partial_x \langle b \rangle_z}_{\text{纵向斜压梯度项}} - \underbrace{f[\omega_x]}_{\text{纵向科氏力项}} + \underbrace{\frac{1}{R}\langle u \rangle_z[\omega_x]}_{\text{纵向离心力项}} + \underbrace{\partial_y \langle u \rangle_z[\omega_x]}_{\text{纵向动量的横向重新分布项}} + \underbrace{\frac{8}{D^2}\langle u'w' \rangle|_{1/2(\eta-H)}}_{\text{纵向内部摩擦致混合项}}. \quad (7)$$

由径流引起的正压项是包含在“底部摩擦致混合项”中, 径流在底摩擦的作用下形成剪切, 从而直接

影响了横向涡度(纵向环流)的大小; 科氏力、离心力对纵向环流的偏转作用间接影响了纵向涡度(横向环

流)的大小。

2.2 参数计算

2.2.1 科氏参数 常用的科氏参数:

$$f = 2\Omega \sin \varphi, \quad (8)$$

式中 Ω 为地球自转角速度且 $\Omega=7.29\times 10^{-5}$ rad/s; φ 为地理纬度, AD5 断面的纬度范围是 $31^{\circ}12'42.12''-31^{\circ}14'19.63''$, 取其平均值 $31^{\circ}13'30.88''$, 计算得到 $f=7.56\times 10^{-5}$ /s。

2.2.2 弯道曲率半径 鉴于 AD5 断面与邵聪颖等(2016)中长江口北槽的 CSWs 测点相距约 0.5km, 因此, AD5 断面处的弯道曲率半径可以采用邵聪颖等(2016)曲率半径 $R=15$ km。

2.2.3 内部摩擦致混合项 纵向、横向内摩擦致混合项(Becherer *et al*, 2015):

$$\omega_x^{\text{mix}_i} = -\frac{8}{D^2} v_t^i [\omega_x], \quad (9)$$

$$\omega_y^{\text{mix}_i} = -\frac{8}{D^2} v_t^i [\omega_y]. \quad (10)$$

式中 v_t^i 表示层化型河口上、下层水体界面处的湍流黏性系数:

$$v_t^i = -ku_*z(1+z/H)|_{z=-(1/2)D} (1+10Ri(z)|_{z=-(1/2)D})^{-1/2}, \quad (11)$$

式中 $k=0.4$ 表示冯卡门常数; u_* 表示摩阻流速; Ri 为理查德森数(Bowden, 1967, 式 4):

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (12)$$

式中河口水体密度 $\rho = \rho_f(1+k'S)$, 其中 $\rho_f=1000$ kg/m³; $k'=7.8\times 10^{-4}$ (Burchard *et al*, 2011); S 为盐度。

2.2.4 底部摩擦致混合项 纵向、横向底部摩擦致混合项 $\omega_x^{\text{mix}_b}$ 和 $\omega_y^{\text{mix}_b}$ 可以分别表示为:

$$\omega_x^{\text{mix}_b} = -\frac{4}{D^2} u_*^2 \sin(\alpha_{u_{b1}}), \quad (13)$$

$$\omega_y^{\text{mix}_b} = \frac{4}{D^2} u_*^2 \cos(\alpha_{u_{b1}}). \quad (14)$$

式中 $\alpha_{u_{b1}}$ 表示下层水体的流速与 x 方向的夹角。

2.3 半拉格朗日余流的计算

对纵向流速 u 和横向流速 v 取欧拉平均(Eulerian average), 得到潮周期平均的净流(McDowell *et al*, 1977)。鉴于本文 ADCP 的流速按相对水深“六点法”的测验要求转换成了六个固定层, 对纵向流速 u 和横向流速 v 取潮周期的平均值, 近似地得到各固定层运

动的半拉格朗日平均速度(Cheng *et al*, 2013), 即半拉格朗日余流:

$$u_{\text{SL}} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad (15)$$

$$v_{\text{SL}} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt. \quad (16)$$

鉴于长江河口的潮汐是非正规半日潮, 为此, T 表示潮水两涨、两落的总时间, 满足了潮流闭合要求。

3 数据分析

选取长江河口北槽弯道附近 AD3(弯道上段)、AD5(弯道处)和 AD6(弯道下段)3 个横向断面, 绘制速度时间序列, 分析各断面处横向次生流的结构。结果显示 3 个横向断面上随时、空变化的横向次生流“二层”结构, 其结构具有明显的小、大潮变化, 在不同的潮流时刻、横向断面不同位置处, 其结构形态各异。某些时刻和位置会形成横向环流。在小、大潮期间, 第一、二个涨落潮周期内, 横向次生流的结构变化较小, 其强度、流向及分布具有一定的相似性。横向次生流在 $-0.4-0.4$ m/s 之间变化, 随时空的变化较小, 呈现一定的间歇性(图 3—5)。

河口横向次生流是指垂直于纵向流的水流(Chant, 2010), 而横向环流是指表、底层流速方向相反的横向次生流(Becherer *et al*, 2015)。如图 3 所示, AD3 断面上的横向次生流的结构是随时、空不断变化的。枯季小潮第一、二涨、落潮周期内(图 3a, b)的落憩, 呈现出整体向北导堤的横向次生流; 初涨, 呈现出整体向南导堤的横向次生流, 并在断面中部区域出现一定范围的表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流; 涨急, 表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流更加显著; 涨憩、初落和落急, 整体向北导堤和向南导堤的横向次生流相互竞争、交替变化。枯季大潮落憩、初涨和涨急, 横向次生流和横向环流与小潮情况相似; 落憩, 出现与小潮横向环流方向相反的表层向南导堤、底层向北导堤的顺时针横向环流, 并一直持续到落急, 但是, 横向环流的强度有所减弱(图 3c, d)。

枯季小潮(图 4a, b)落憩, AD5 断面上靠近南导堤区域的水流呈现向北导堤的横向次生流和靠近北导堤的局部区域呈现表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流; 初涨至涨憩, 呈现整体向南导堤的横向次生流; 初落, 在中间区域呈现表层向南导堤、底层向北导堤的顺时针横向环流; 落急, 则呈现出整

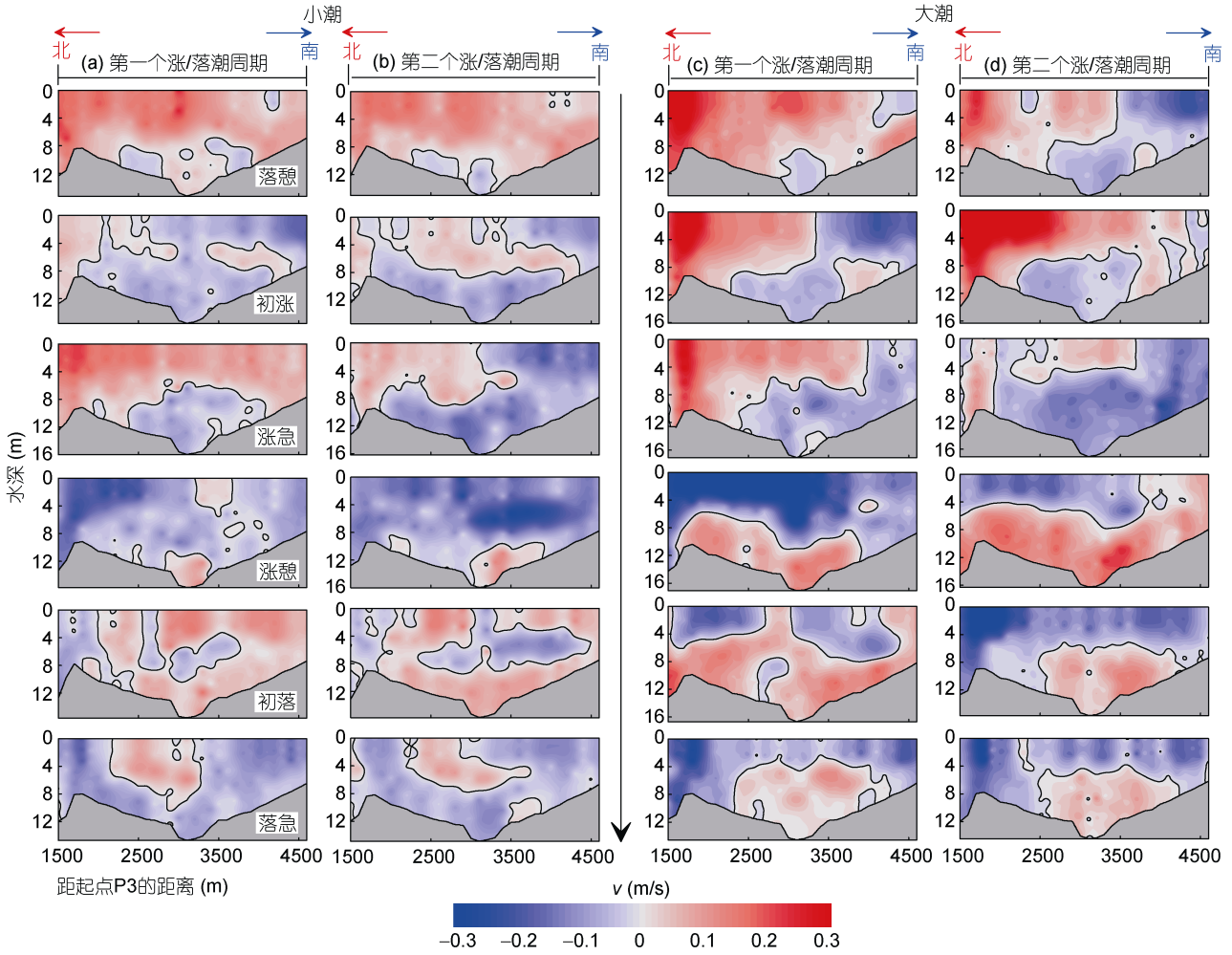


图3 AD3断面枯季小、大潮第一个(a, c)和第二个(b, d)涨、落潮周期内六个潮流时刻的横向次生流

Fig.3 Lateral secondary flow of the cross-channel section AD3 at the first (a, c) and second (b, d) flood/ebb tidal cycle on a neap/spring tide in dry season

注: 该横剖面是向海看的; P3表示AD3断面的起点(图2b); 图中黑色线表示速度为0的等值线; 向下的箭头表示涨、落潮周期

体向北导堤的横向次生流。枯季大潮(图4c, d)落憩, 靠近北导堤的局部区域呈现表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流; 初涨、落急, 呈现出向中间汇聚的横向次生流; 涨憩, 呈现大范围的表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流。初落至落急, 该逆时针的横向环流逐渐减弱直至发展成整体向南导堤的横向次生流。

枯季小潮(图5a, b)落憩, 第一、第二个涨、落潮周期内, AD6断面上, 呈现了完全相反的情况。第一周期内呈现整体向北导堤、第二周期内呈现整体向南导堤的横向次生流。初涨, 横向次生流开始减弱, 并有整体向北导堤流动的趋势。涨急, 整体向北导堤的横向次生流开始占主导。涨憩, 第一、第二个涨、落潮周期内又呈现了不同的情况: 第一个周期内呈现大范围的表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流, 第二次呈现了整体向北导堤的横向次生流。初

落, 与落憩的横向次生流结构相同。落急, 与初落相比, 横向次生流有逆转的趋势。枯季大潮(图5c, d)落憩至涨急, 横向次生流的形态与小潮类似。涨憩, 呈现大范围的表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环流。初落至落急, 该逆时针的横向环流逐渐减弱直至发展成整体向南导堤的横向次生流。

本文计算、分析了3个断面AD3, AD5和AD6纵向和横向的半拉格朗日余流(图6)。小潮, AD3、AD5和AD6断面呈现表层向海、底层向陆的纵向半拉格朗日余流(图6a); 大潮, 呈现表、底层均向海的纵向半拉格朗日余流(图6b)。小、大潮期间, AD3, AD5和AD6断面的中部区域均呈现表层向北导堤、底层向南导堤的逆时针横向环状半拉格朗日余流(图6c, d)。纵向半拉格朗日余流在-0.2—0.6m/s; 横向半拉格朗日余流在-0.15—0.15m/s。

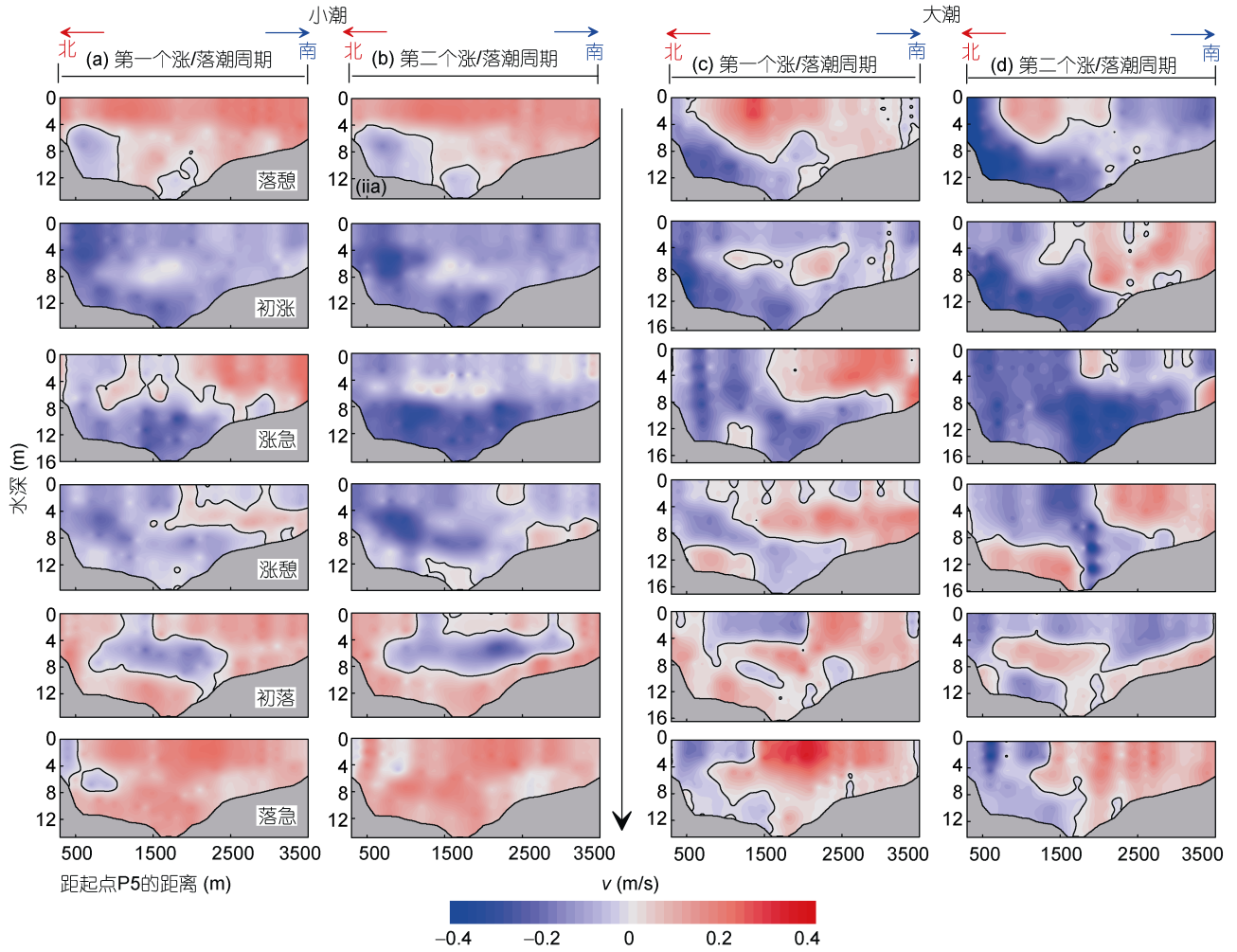
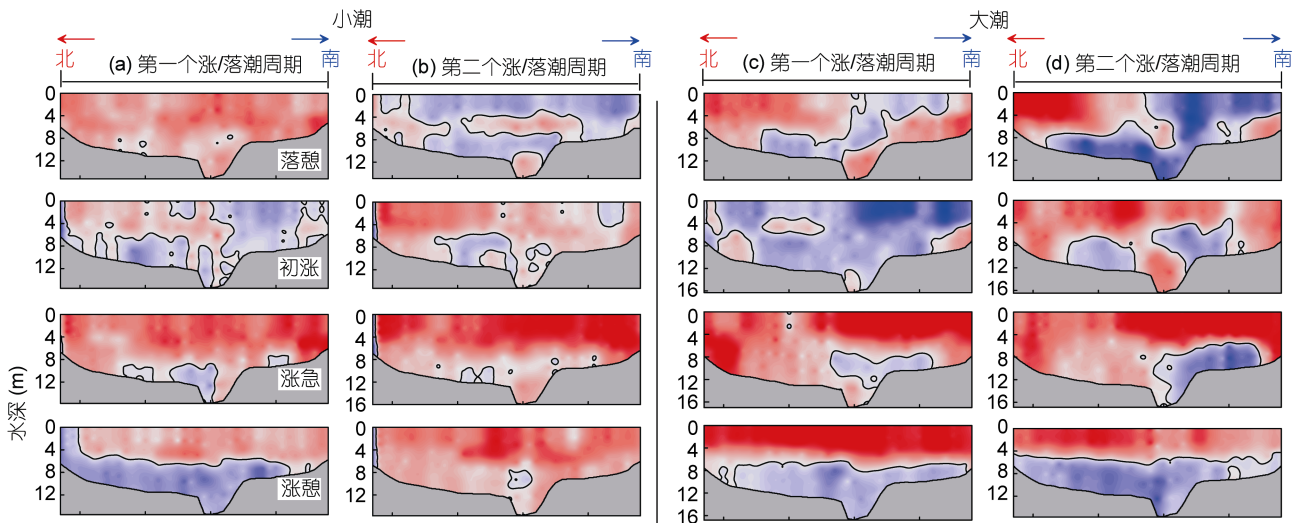


图 4 AD5 断面枯季小、大潮第一个(a, c)和第二个(b, d)涨、落潮周期内六个潮流时刻的横向次生流

Fig.4 Lateral secondary flow of the cross-channel section AD5 at the first (a, c) and second (b, d) flood/ebb tidal cycle on a neap/spring tide in dry season



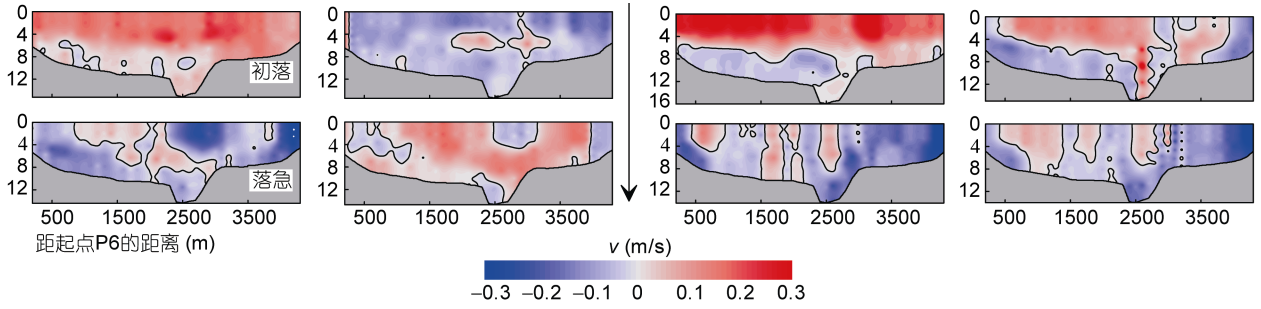


图 5 AD6 断面枯季小、大潮第一个(a, c)和第二个(b, d)涨、落潮周期内六个潮流时刻的横向次生流

Fig.5 Lateral secondary flow of the cross-channel section AD6 at the first (a, c) and second (b, d) flood/ebb tidal cycle on a neap/spring tide in dry season

图 6 也显示了长江河口北槽三个横向—垂向面 (AD3、AD5 和 AD6)上的纵向半拉格朗日余流的横向

分布, 分析显示: 小潮, 在 AD3、AD5 和 AD6 侧线靠近南导堤处始终呈现整体向海的纵向半拉格朗日余

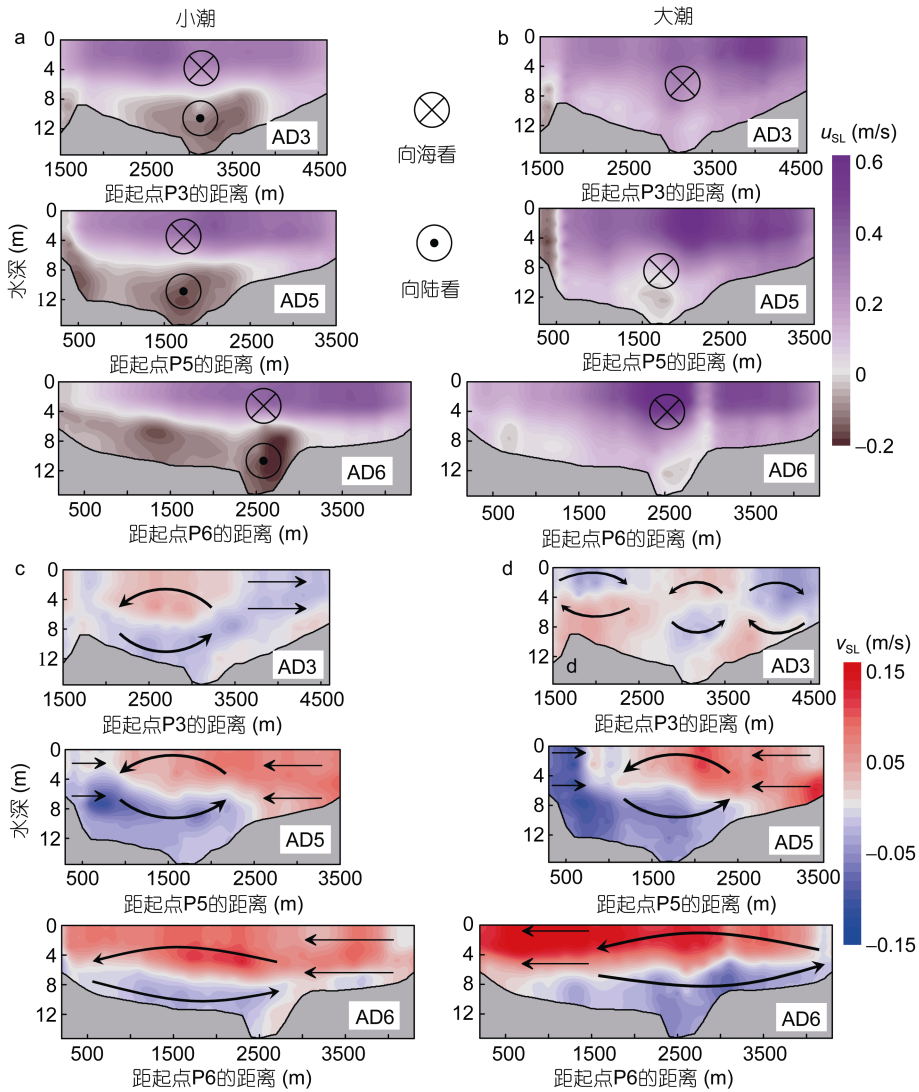


图 6 AD3、AD5 和 AD6 断面枯季小、大潮的纵向半拉格朗日余流(a, b), 横向半拉格朗日余流(c, d)

Fig.6 Longitudinal semi-Lagrangian mean velocity(a, b), lateral semi-Lagrangian mean velocity(c, d) along the cross-channel sections AD3, AD5, and AD6 on a neap/spring tide in dry season

流,而在中部及靠近北导堤则呈现表层向海、底层向陆的形态(图 6a)。大潮,在 AD5 断面上,靠近南导堤及中部区域呈现整体向海,而靠近北导堤处呈现整体向陆的纵向半拉格朗日余流(图 6b)。纵向半拉格朗日余流在横向上存在一定差异,控制着纵向物质净输移的横向变化。

4 环流的影响因素分析

4.1 AD5 横向断面总体涡度

本次 ADCP 走航测量流速资料时,没有同步地测量得到相应的盐度资料,只在 CSWs 垂线上(与 AD5 断面的垂直距离约 0.5km)测得了与 AD5 断面相匹配的流速和盐度资料。为此,本文只探讨和分析 AD5 断面处横向环流和纵向流的影响因素。

考虑层化对湍流黏性系数的影响时,需要相应的盐度资料来计算 AD5 断面处的 Ri 数。计算时进行了一些简化:

(1) 根据 Becherer 等(2015),将相邻的、不同位置测得的流速和盐度资料投影到同一个坐标位置上;

(2) 根据 Pu 等(2015),长江河口北槽弯道附近枯季小、大潮期间计算得到的 Ri 随距离的变化较小,而本文中 CSW_s 与 AD5 断面的垂直距离约 0.5km,两处的 Ri 可以认为相近。

值得注意的是,总体纵向涡度 $[\omega_x]$ 表示横向环流的强度,总体横向涡度 $[\omega_y]$ 表示纵向环流的强度。整个枯季小、大潮,总体纵向涡度(横向环流)的值均较小,变化较复杂;涨潮,总体横向涡度(纵向环流)较小,而在落潮较大。总体上,横向环流的变化虽复杂,但是其强度的变化较小;纵向环流在落潮的值大于小潮时的,一定程度上反映了涨、落潮流的不对称性。

小、大潮期间,纵向环流表现为:涨潮,向陆的剪切较小;落潮,向海的剪切较强(图 7a, b)。造成这种纵向环流结构的原因,可能在式(7)中这 6 个产生总体横向涡度 $[\omega_y]$ 的影响因素的变化。在绝大部分时间里,纵向斜压梯度项是促进纵向环流产生的,即促进生成表层向海、底层向陆的重力环流(Hansen *et al*, 1965; Burchard *et al*, 2010)。

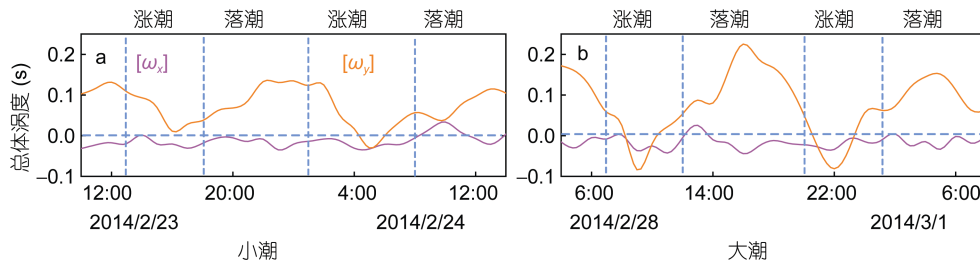


图 7 AD5 横向断面枯季小、大潮在距离起点 P5(图 2b)2000 m 总体涡度的时间序列

Fig.7 Time series of the bulk vorticity at 2000m from the starting point P5 (Fig.2b) of the cross-channel section AD5 on a neap/spring tide in dry season.

注: $[\omega_x]$ 表示总体纵向涡度(横向环流的强度); $[\omega_y]$ 表示总体横向涡度(纵向环流的强度); 垂向蓝色虚线表示涨憩或落憩时刻

4.2 AD5 横向断面纵向环流的不同影响因素及作用

图 8 中从左到右各影响因素的作用依次减小:纵向斜压梯度项、纵向内部摩擦致混合项和底部摩擦致混合的涨、落潮不对称是造成总体横向涡度(纵向环流)涨、落潮不对称的主要机制,纵向动量的横向重新分布项(横向环流对纵向环流的影响)的影响其次,离心力和地转的影响可忽略。

纵向内部摩擦致混合项表示湍动能的通量,它总是与 $[\omega_y]$ 的方向相反,表明它具有使水体混合均匀的作用,能够减小速度的垂向剪切。涨急、落急,该项达到峰值,表明此时其混合作用最强;涨憩、落憩,该项减小接近 0,表明水体混合作用减弱。涨急、落急,湍流增加,湍流黏性系数增大。涨憩、落憩,由

于潮流强度减弱,湍流减小,湍流黏性系数也减小(Geyer *et al*, 2014)。斜压混合的涨、落潮不对称性(Jay *et al*, 1994),在潮汐应,即水平斜压梯度和水平速度梯度的垂向剪切作用下:涨潮,密度大的海水在表面的运输更快,减小了垂向上的斜压梯度,从而减弱了层化;落潮,密度小的淡水在表面运输得更快,增大了垂向上的斜压梯度从而增强了层化。这种涨潮促进混合、落潮促进层化的现象就是河口的“应变致周期性层化”现象(Simpson *et al*, 1990)。因为层化会抑制垂向动量的通量,因此“应变致周期性层化”会造成内部摩擦致混合项的涨、落潮不对称性。但是,在长江河口北槽,根据图 8(a, b)中纵向内部摩擦致混合项 $\omega_y^{\text{mix}_i}$ 和纵向底部摩擦致混合项 $\omega_y^{\text{mix}_b}$ 的计算结果可知:涨潮,这

两项作用小; 落潮, 其作用强(Pu *et al.*, 2015)。

与纵向内部摩擦致混合项相比, 纵向底部摩擦致混合项相对较小。涨潮, 底摩擦致混合项促进表层

向陆、底层向海的纵向环流; 落潮, 促进表层向海、底层向陆的纵向环流。离心力和地转效应对产生总体横向涡度(纵向环流)的贡献几乎为零(图 8)。

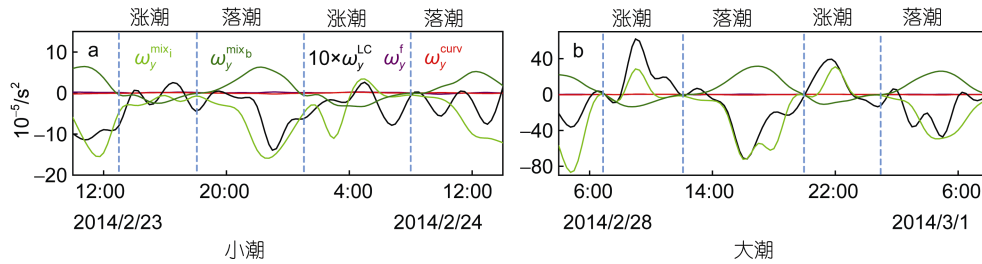


图 8 AD5 横向断面枯季小、大潮在距离起点 P5(图 2b) 2000m 处表征生成纵向环流的 5 种不同影响因素的各个项的的时间序列

Fig.8 Time series of five different physical mechanisms driving longitudinal circulation at 2000m from the starting point P5 (Fig.2b) of the cross-channel line AD5 on a neap/spring tide in dry season

注: $\omega_y^{mix_i}$ 表示纵向内部摩擦致混合项; $\omega_y^{mix_b}$ 表示纵向底部摩擦致混合项; ω_y^{LC} 为纵向动量的横向重新分布项; ω_y^{curv} 为离心力项; ω_y^f 为科氏力项; 垂向蓝色虚线表示涨憩或落憩时刻

以往的河口环流相关研究中都是分别考虑横向环流和纵向环流而忽略非线性项。近年来, 许多学者发现: 横向环流引起的横向动量平流对纵向的动量方程有显著的影响, 从而影响了纵向环流的形成(Lerczak *et al.*, 2004; Scully *et al.*, 2009)。

通过计算 AD5 横向断面纵向环流 $\langle [\omega_y] \rangle_T$ 的潮周期平均值, 得到河口环流 $\langle [\omega_y] \rangle_T$ 的强度, 小潮时, $\langle [\omega_y] \rangle_T = 6.85 \times 10^{-2}/s$ 纵向内部摩擦致混合项 $\langle \omega_y^{mix_i} \rangle_T = -4.58 \times 10^{-5}/s^2$ 、纵向底部摩擦致混合项 $\langle \omega_y^{mix_b} \rangle_T = 7.10 \times 10^{-6}/s^2$ 、纵向动量的横向重新分布项 $\langle \omega_y^{LC} \rangle_T = -2.89 \times 10^{-6}/s^2$ 科氏力项 $\langle \omega_y^f \rangle_T = 9.05 \times 10^{-7}/s^2$ 和离心力项 $\langle \omega_y^{curv} \rangle_T = 1.36 \times 10^{-7}/s^2$; 大潮时, $\langle [\omega_y] \rangle_T = 7.10 \times 10^{-2}/s$ 、 $\langle \omega_y^{mix_i} \rangle_T = -1.40 \times 10^{-4}/s^2$ 、 $\langle \omega_y^{mix_b} \rangle_T = 5.67 \times 10^{-5}/s^2$ 、 $\langle \omega_y^{LC} \rangle_T = -5.38 \times 10^{-6}/s^2$ 、 $\langle \omega_y^f \rangle_T = 1.28 \times 10^{-6}/s^2$ 、 $\langle \omega_y^{curv} \rangle_T = -3.17 \times 10^{-7}/s^2$ 。显然, 沿着 AD5 横向断面, 无论小潮、大潮, 长江河口北槽弯道环流的强度 $\langle [\omega_y] \rangle_T$ 为正值, 表明为表层向海、底层向陆的环流; 而纵向动量的横向重新分布项 $\langle \omega_y^{LC} \rangle_T$ 为负值, 与 Becherer 等(2015)一致, 表明该处横向环流可能通过 $\langle \omega_y^{LC} \rangle_T$ 削弱纵向环流。今后, 仍需计算其他横向断面, 以了解北槽弯道横向环流对纵向环流的作用。

4.3 AD5 横向断面横向环流的各种影响因素及作用
基于部分混合型的理想河口研究, Chen 等(2009)发现涨、落潮期间始终存在一对旋转方向相反的横向次生环流。长江河口由于其复杂的水下地形和人工结构物(图 2), 使得北槽弯道附近 3 个横向断面上的横向次生流结构具有很强的涨、落潮不对称性, 而且横向次生流随时、空变化复杂。整体向北导堤、整体向南导堤, 向中间汇聚、向两边辐射, 表层向北导堤、底层向南导堤以及表层向南导堤、底层向北导堤的横向次生流不定时出现, 并共存交织(图 3—图 5)。造成这种复杂横向次生流结构的原因是因为式 6 中这 5 个产生总体纵向涡度 $[\omega_x]$ 的影响因素。

实测资料中缺乏相应的横向断面上的盐度资料, 横向斜压梯度项无法直接计算。然而, 横向斜压梯度是由纵向密度梯度的差异平流造成的(Nunes *et al.*, 1985; Geyer, 1993; Lerczak *et al.*, 2004; MacCready *et al.*, 2010; Becherer *et al.*, 2015), 因此, 通过分析纵向流速的横向剪切进行可以研究横向斜压梯度对横向环流的作用。小潮期间, 距离起点 P5 有 500m 和 1000m、3000m 和 3500m 两点之间纵向水深平均流速的横向剪切 $\partial_y \langle u \rangle_z$ 分别约为 $-1.8 \times 10^{-4}/s$ 和 $1.17 \times 10^{-4}/s$; 大潮期间, 约为 $-5.9 \times 10^{-4}/s$ 和 $3.07 \times 10^{-4}/s$ (图 9)。Becherer 等(2015)认为当纵向水深平均流速的横向剪切的平均值达到 $5 \times 10^{-4}/s$ 时, 它足以在 4 个小时内将纵向密度梯度变为其横向密度梯度的 7 倍。显然, 在长江河口 AD5 横向断面处, 横向斜压梯度项不仅对横向次生流生成具有重要作用, 它在落潮时大于涨潮时, 在大潮时的大于小潮时(图 9)。

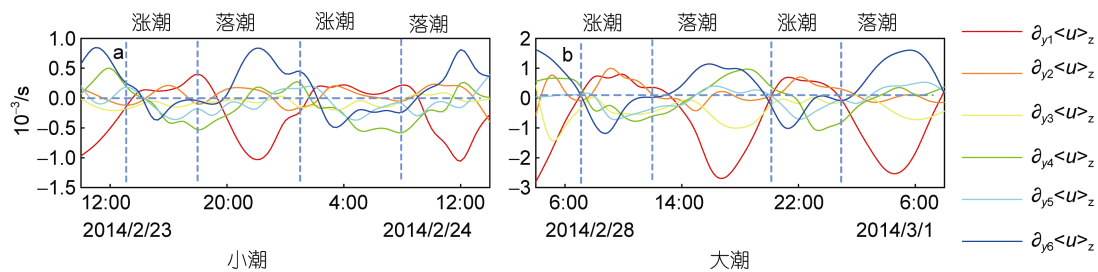


图 9 AD5 横向断面枯季小、大潮期间纵向水深平均流速的横向剪切的时间序列

Fig.9 Time series of lateral shear of the along-channel depth-averaged velocities on neap/spring tides in dry season along the cross-channel line AD5

注: 红色线表示距离起点 500m 和 1000m 两点之间的纵向水深平均流速的横向剪切, 橙色表示 1000m 和 1500m 两点之间, 黄色表示 1500m 和 2000m 两点之间, 绿色表示 2000m 和 2500m 两点之间, 青色表示 2500m 和 3000m 两点之间, 蓝色表示 3000m 和 3500m 两点之间

横向内部摩擦致混合项总是与 $[\omega_x]$ 的方向相反, 表明它具有使水体混合均匀的作用, 能够减小速度的垂向剪切。如图 10 所示, 涨急、落急, 其达到峰值, 表明此时其混合作用最强; 涨憩、落憩, 其减小接近 0, 表明水体混合作用减弱。涨急、落急, 湍流增加, 湍流黏性系数增大。涨憩、落憩, 由于潮流强度减弱,

湍流相应减小, 湍流黏性系数也减小(Geyer *et al*, 2014)。离心力项与水深平均速度和总体横向涡度成正比, 由涨潮到落潮时, 后两者方向同时改变。在整个小、大潮期间, 离心力方向基本不变。科氏力与总体横向涡度成正比, 涨潮为负值、较小, 落潮为正值、较大。

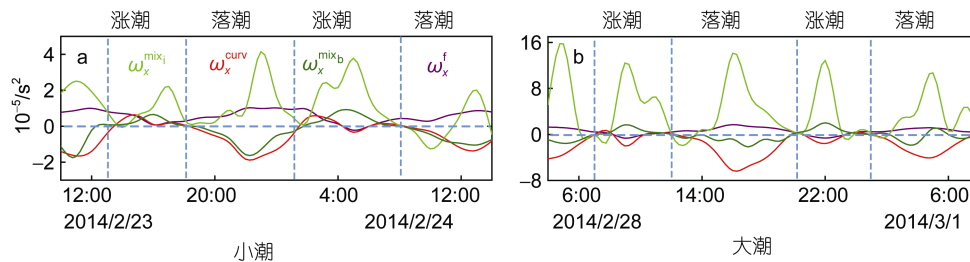


图 10 AD5 横向断面枯季小、大潮在距离起点 P5(图 2b)2000m 处表征生成横向环流的 4 种不同影响因素的各个项的的时间序列

Fig.10 Time series of the physical mechanisms driving lateral circulation at 2000m from the starting point P5 (Fig.2b) of the cross-channel line AD5 on a neap/spring tide in dry season

注: $\omega_x^{\text{mix}_i}$ 表示横向内部摩擦致混合项; ω_x^{curv} 表示离心力项; $\omega_x^{\text{mix}_b}$ 表示横向底部摩擦致混合项; ω_x^f 表示科氏力项

基于以上长江河口横向环流的计算结果, 并受 Becherer(2014)的启发, 本文提出各种不同影响因素引起的北槽弯道横向环流的概念性图(图 11)。由于河槽曲率所产生的离心力的影响, 在涨、落潮期间, 北槽弯道南岸的流速始终大于北岸。涨潮, 密度大的水体在南岸流动得更快, 使得南岸的水体密度大于北岸, 横向浮力梯度产生逆时针的横向环流(图 11a); 落潮, 密度小的水体在南岸流动得更快, 使得南岸的水体密度小于北岸, 横向密度梯度产生顺时针的横向环流(图 11c)。另外, 涨、落潮时, 河槽曲率单独作用下产生均为逆时针的横向环流(图 11a, c)。

涨潮时, 在科氏力的影响下, 密度大的水体在北

槽弯道北岸(相对于水流运动的方向)流动得更快, 使得北岸的水体密度大于南岸的, 横向浮力梯度产生逆时针的横向环流(图 11b); 落潮时, 在科氏力的影响下, 密度小的水体在北槽弯道北岸流动得更快, 使得北岸的水体密度小于南岸, 横向浮力梯度产生顺时针的横向环流(图 11d)。另外, 涨潮时, 科氏力单独作用下形成逆时针的横向环流; 落潮时, 形成顺时针的横向环流。与内部摩擦致混合项相比, 底部摩擦致混合项相对较小, 具有增强横向环流的趋势。

若仅有横向斜压梯度、离心力和科氏力这三项, 则长江河口中的横向环流的结构会像很多国外河口那样形成比较简单和稳定的横向环流结构(Geyer,

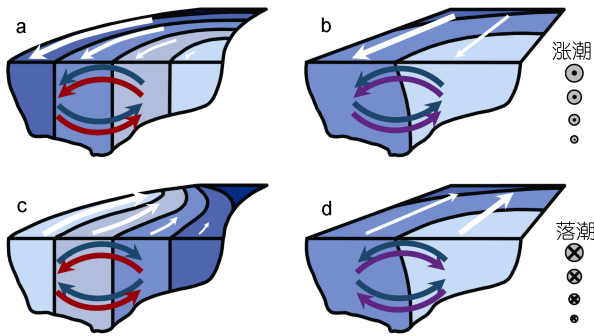


图 11 涨、落潮周期内不同影响因素所致北槽弯道横向环流概念图

Fig.11 Conceptual models of lateral circulations induced by the different physical mechanisms during a flood/ebb tidal cycle within the Curved Channel of the North Passage

注: 子图 a 和 c 分别表示由河槽曲率和纵向密度梯度所致, b 和 d 分别表示由地转和纵向密度梯度所致。白色箭头表示涨、落潮流的方向, 线的粗细和圆圈的大小表示流速的大小; 蓝色、红色和紫色分别表示由斜压梯度、离心力和科氏力引起的横向环流; 河道中蓝色的深浅表示密度大小

1993; Chant *et al.*, 1997; Huijts *et al.*, 2009; Becherer *et al.*, 2015), 而实际上长江河口的横向环流随时空变化复杂(图 3—图 5)。原因可能是长江河口具有复杂的水下地形、岸线和人工结构物, 潮汐与之相互作用, 使得作为影响横向环流的主要机制——内部摩擦致混合的时空变化复杂。

此外, 在更大的空间尺度上, 长江河口横向环流是从南槽至北槽, 再从北槽至北港, 出现穿越潮滩的河口横向环流。北槽处于其中, 会受其影响。然而, 一方面, 枯季径流小, 涨、落潮, 导堤时而淹没, 时而露出水面, 横向环流在空间上不连续, 形成了若干个局部的横向环流, 难以得到描述该横向环流的动量方程, 更难以分析其影响因素。另一方面, 即使在潮滩被淹没期间, 由于水位较浅, 也很难测得其流速分布。因此, 基于观测得到的资料, 本文研究的枯季只考虑了由河槽曲率、科氏力和混合所造成的北槽局部区域的横向环流。对于潮致 Stokes 余流是否对横向环流产生影响, 有待未来深入研究。

5 结论和展望

(1) 鉴于 ADCP 的高时、空分辨率, 长江河口北槽弯道 3 条横向断面均能够揭示明显的横向次生流和横向环流小潮、大潮、涨、落潮变化。然而, 横向次生流和横向环流的时空结构非常复杂, 其详细分析仍十分困难。在涨、落潮周期内, 有时存在“二层结构”, 有时存在更加复杂的结构。

(2) 除了横向斜压梯度外, 离心力和地转效应是横向环流形成的主要影响因素, 而横向内部和横向(含径流影响的)底部摩擦致混合项则是破坏横向环流结构的主要影响因素。长江河口复杂的水下地形、岸线和人工结构物与潮汐相互作用, 使得内部和底部摩擦致混合项的时空变化复杂, 从而破坏了横向环流的形成, 进而造成长江河口的横向环流表现出随时空变化复杂的结构形式。

(3) 就长江河口纵向环流形成的主要影响因素而言, 其不仅受正压梯度、斜压梯度和潮汐应变的影响, 而且还受横向环流的影响。基于“涡度方法”, 本文分析了北槽弯道附近横向环流对纵向环流的影响。具体地说, 在影响纵向环流形成的影响因素中, “纵向动量的横向重新分布项”能够在纵向流速有横向剪切时, 可能通过横向环流减弱纵向动量的重新分布, 从而减弱纵向环流。

今后, 可以考虑采用概化的地形, 相对简化的上下游边界条件, 用三维有限元数学模拟软件进一步探究长江河口弯道环流的形成和演变过程; 通过改变河槽曲率的大小, 来研究河槽曲率对环流的影响; 通过改变河口的不同层化强度, 来探究层化对环流的影响; 通过忽略地球自转效应的影响, 来探究地球自转对环流的影响。

参 考 文 献

- 于东生, 田 淳, 2003. 基于 ADCP 的长江口流场分析. 第十一届中国海岸工程学术讨论会暨 2003 年海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集. 三亚: 中国海洋工程学会, 80—84
- 匡翠萍, 1997. 长江口盐水入侵三维数值模拟. 河海大学学报, 25(4): 54—60
- 刘 浩, 骆智斌, 潘伟然, 2009. 泉州湾水体结构的潮周期变化. 台湾海峡, 28(3): 316—320
- 刘兴泉, 侯一筠, 尹宝树等, 2015. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究 IV. 盐度结构. 海洋与湖沼, 46(3): 534—540
- 李 霞, 胡国栋, 时 钟等, 2013. 长江口南支南港的北槽枯季水体中混合、层化与潮汐应变. 水运工程, (9): 79—88
- 时 钟, 2001. 长江口水动力过程的研究进展(1979—1999). 海洋科学, 25(6): 54—56
- 沈焕庭, 朱慧芳, 茅志昌, 1986. 长江河口环流及其对悬沙输移的影响. 海洋与湖沼, 17(1): 26—35
- 张重乐, 沈焕庭, 1988. 长江口咸淡水混合及其对悬沙的影响. 华东师范大学学报(自然科学版), (4): 83—88
- 张俊勇, 吴华林, 赵德招, 2013. 潮汐河口宽浅弯道的水流动力特性分析. 水运工程, (11): 119—123
- 邵聪颖, 浦 祥, 时 钟等, 2016. 长江河口北槽弯道横向次生流、混合与层化. 海洋工程, 34(3): 80—98

- 易 侃, 龚文平, 2015. 伶仃洋河口横向环流. 海洋学报, 37(3): 1—14
- 罗小峰, 陈志昌, 2004. 长江口水流盐度数值模拟. 水利水运工程学报, (2): 29—33
- 倪智慧, 陈 辉, 董礼先等, 2012. 长江口外羽状流水体中的垂向混合与层化的观测与分析. 上海交通大学学报, 46(11): 1862—1873
- 董礼先, 苏纪兰, 2000. 象山港盐度分布和水体混合 I. 盐度分布和环流结构. 海洋与湖沼, 31(2): 151—158
- 熊龙兵, 浦 祥, 时 钟等, 2014. 潮汐应对对长江口北槽枯季湍流混合与层化的影响. 海洋工程, 32(4): 41—57
- Becherer J, 2014. Estuarine circulation in well-mixed tidal inlets. Rostock: Doctor Dissertation of Universitaet Rostock, 123
- Becherer J, Stacey M T, Umlauf L *et al*, 2015. Lateral circulation generates flood tide stratification and estuarine exchange flow in a curved tidal inlet. *Journal of Physical Oceanography*, 45(3): 638—656
- Bowden K F, 1967. Stability effects on turbulent mixing in tidal currents. *Physics of Fluids*, 10(9): S278—S280
- Burchard H, Hetland R D, 2010. Quantifying the contributions of tidal straining and gravitational circulation to residual circulation in periodically stratified tidal estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 40(6): 1243—1262
- Burchard H, Hetland R D, Schulz E *et al*, 2011. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: straight and irrotational channels with parabolic cross section. *Journal of Physical Oceanography*, 41(3): 548—570
- Chant R J, 2010. Estuarine secondary circulation. In: Valle-Levinson A ed. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 100—124
- Chant R J, Wilson R E, 1997. Secondary circulation in a highly stratified estuary. *Journal of Geophysical Research*, 102(C10): 23207—23215
- Chen S N, Sanford L P, 2009. Lateral circulation driven by boundary mixing and the associated transport of sediments in idealized partially mixed estuaries. *Continental Shelf Research*, 29(1): 101—118
- Cheng P, de Swart H E, Valle-Levinson A, 2013. Role of asymmetric tidal mixing in the subtidal dynamics of narrow estuaries. *Journal of Geophysical Research*, 118(5): 2623—2639
- Collignon A G, Stacey M T, 2012. Intratidal dynamics of fronts and lateral circulation at the shoal-channel interface in a partially stratified estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 42(5): 869—883
- Geyer W R, 1993. Three-dimensional tidal flow around headlands. *Journal of Geophysical Research*, 98(C1): 955—966
- Geyer W R, MacCready P, 2014. The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46(1): 175—197
- Hansen D V, Rattray M, 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. *Journal of Marine Research*, 23(2): 104—122
- Huijts K M H, Schuttelaars H M, de Swart H E *et al*, 2009. Analytical study of the transverse distribution of along-channel and transverse residual flows in tidal estuaries. *Continental Shelf Research*, 29(1): 89—100
- Jay D A, Musiak D, 1994. Particle trapping in estuarine tidal flows. *Journal of Geophysical Research*, 99(C10): 20445—20461
- Kalkwijk J P T, Booij R, 1986. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow. *Journal of Hydraulic Research*, 24(1): 19—37
- Lacy J R, Stacey M T, Burau J R *et al*, 2003. Interaction of lateral baroclinic forcing and turbulence in an estuary. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3, 3089): 1—15
- Lerczak J A, Geyer W R, 2004. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 34(6): 1410—1428
- Li M, Cheng P, Chant R *et al*, 2014. Analysis of vortex dynamics of lateral circulation in a straight tidal estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 44(10): 2779—2795
- MacCready P, Geyer W R, 2010. Advances in estuarine physics. *Annual Review of Marine Science*, 2(1): 35—58
- McDowell D M, O'Connor B A, 1977. *Hydraulic Behavior of Estuaries*. London: The Macmillan Press, Ltd, 292
- Nidzicko N J, Hench J L, Monismith S G, 2009. Lateral circulation in well-mixed and stratified estuarine flows with curvature. *Journal of Physical Oceanography*, 39(4): 831—851
- Nunes R A, Simpson J H, 1985. Axial convergence in a well-mixed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 20(5): 637—649
- Pritchard D W, 1952. Estuarine hydrography. In: Landsberg H E ed. *Advances in Geophysics*. New York: Academic Press, 1: 243—280
- Pritchard D W, 1954. A study of the salt balance in a coastal plain estuary. *Journal of Marine Research*, 13: 133—144
- Pritchard D W, 1956. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *Journal of Marine Research*, 15: 33—42
- Pu X, Shi J Z, Hu G D *et al*, 2015. Circulation and mixing along the North Passage in the Changjiang River estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 148: 213—235
- Pu X, Shi J Z, Hu G D, 2016. Analyses of intermittent mixing and stratification within the North Passage of the Changjiang (Yangtze) River estuary, China: A three-dimensional model study. *Journal of Marine Systems*, 158: 140—164
- Scully M E, Geyer W R, Lerczak J A, 2009. The influence of lateral advection on the residual estuarine circulation: A numerical modeling study of the Hudson River estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 39(1): 107—124
- Simpson J H, Brown J, Matthews J *et al*, 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13(2): 125—132
- Thomson W, 1868. VI.—on vortex motion. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 25(1): 217—260

CIRCULATION WITHIN CURVED CHANNEL OF THE NORTH PASSAGE IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY: A VORTICITY APPROACH

LI Wei¹, John Z. SHI¹, PU Xiang¹, HU Guo-Dong²

(1. *State Key Laboratory of Ocean Engineering and Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*; 2. *Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of the Changjiang River Estuary, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China*)

Abstract Vessel mounted ADCP measurements were made of tidal currents along the cross-channel sections AD3, AD5, and AD6 within the Curved Channel of the North Passage in the Changjiang (Yangtze) River estuary on Feb. 23—24, 2014 (dry season, neap tide) and Feb. 28 to Mar. 1, 2014 (dry season, spring tide). These data were analyzed by using a vorticity approach to examine the temporal and spatial variability of circulation and mixing in the vertical-lateral plane, their physical mechanisms, as well as the relative importance of each mechanism. Lateral secondary flows, which have “two-layered” structure separated by irregular interfaces, are present along the three sections. Calculated semi-Lagrangian residual flows show that: (1) along the three sections during neap tide, longitudinal circulating semi-Lagrangian residual flows at the surface are seaward, and landward at the bottom; during spring tide, longitudinal semi-Lagrangian residual flows at both the surface and bottom are seaward. (2) Along the section AD3 during neap tide, lateral circulating semi-Lagrangian residual flows at the surface are towards the Northern Dikes and at the bottom towards the Southern Dikes, while in the middle part of the section AD3 towards the Northern Dikes at the surface and towards the Southern Dikes at the bottom; at the two ends of the section AD3 during spring tide, towards the Southern Dikes at the surface and towards the Northern Dikes at the bottom. (3) Along sections AD5 and AD6, lateral circulating semi-Lagrangian residual flows are towards the Northern Dikes at the surface layer and towards the Southern Dikes at the bottom during both neap and spring tides. (4) The magnitudes of longitudinal semi-Lagrangian residual flows range from -0.2 to 0.7 m/s and those of lateral semi-Lagrangian residual flows from -0.15 to 0.2 m/s. (5) Apparent lateral variability of longitudinal semi-Lagrangian residual flow is present. Further analyses of circulations within the Curved Channel show that: (1) Longitudinal baroclinic pressure gradient, longitudinal internal friction induced mixing, and longitudinal bottom friction induced mixing seem to be the primary physical mechanisms driving longitudinal circulation, while the lateral redistribution of along-channel momentum the secondary one, and the centrifugal force and the Coriolis force can be neglected. (2) Lateral baroclinic pressure gradient and the internal friction induced mixing are the primary physical mechanisms driving lateral secondary flows, while the centrifugal force, the Coriolis force, and the bottom friction induced mixing the secondary ones. (3) The lateral circulation may weaken longitudinal momentum and then circulation via lateral redistribution of along-channel momentum.

Key words Changjiang River estuary; the Curved Channel of the North Passage; lateral circulation; longitudinal circulation; vorticity approach; semi-Lagrangian residual flow