

长江河口北槽的周期性层化对潮流椭圆垂向结构的影响

浦祥^{1,2,3}, 时钟^{1,2,3}, 胡国栋⁴

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030;
3. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200030; 4. 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 基于现场观测流速、盐度资料, 通过采用整体理查森计算公式、潮汐调和理论, 本研究定量分析了长江河口北槽的周期性层化对 M_2 半日分潮潮流椭圆垂向结构的影响。结果显示: 小潮期间层化显著强于大潮, 仅小潮出现密度跃层。在向陆端位于导堤和丁坝内的各站位, 各层的潮流椭圆均退化为往复流形式; 然而, 在向海端位于导堤和丁坝外的站位, 各层的潮流椭圆均呈顺时针旋转。小潮期间整体理查森数与表、底层潮流椭圆率之差呈现清晰的正线性相关关系, 表明层化对潮流椭圆的垂向结构有显著影响。在向海端位于导堤和丁坝外的站位, 小潮期间表、底层潮流椭圆倾角差达到约 40° , 而大潮为 10° 以下。小潮期间大多数站位的表、底层潮流椭圆相角差达到 $20^\circ \sim 50^\circ$, 而大潮为 10° 以下, 小、大潮周期性变化明显。潮流椭圆倾角和相角都在密度跃层处存在明显的垂向突变。在强层化的小潮期间, 层化导致的密度跃层处垂向涡动粘性系数的剧烈衰减可能是潮流椭圆椭圆率、倾角和相角垂向变化的主要物理因素。

关键词: 潮流椭圆; 层化; 密度跃层; 椭圆率; 长江口北槽

中图分类号: P731.26

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)03-0352-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.002

潮汐河口潮流垂向结构形成的物理机制及其与混合、层化相互关系的进一步理解, 对于河口物理学、生态学等有一定科学意义。

受多种物理因素的影响, 陆架海^[1-3]、淡水影响的区域 (Regions of Freshwater Influence, ROFI)^[4-5] 和河口^[6-8] 的潮流结构都有明显的垂向变化。基于对无限深海风生流垂向结构的分析, 瑞典 Ekman^[9] 揭示了地转效应对水流垂向结构的重要影响。基于对北西伯利亚陆架海潮流的分析, 美国 Sverdrup^[10] 认为底摩擦是导致潮流振幅垂向衰减的主要物理因素。值得注意的是, 在无层化的情况下, 基于均一垂向涡动黏性系数的数学模型能够较好地模拟潮流的垂向结构^[11-14]。然而, 在层化的陆架海和淡水影响的区域, 模拟与观测结果存在明显的偏差^[15], 表明层化是影响潮流垂向结构的重要物理因素。

潮流椭圆的参数变化可以用来分析潮流垂向结构的变化^[12-13]。在淡水影响的区域的层化期间, 水体表层潮流椭圆呈顺时针旋转而底层呈逆时针旋转; 然而, 在混合均匀期间, 水体表层潮流椭圆退化为往复流形式, 这些表明层化能够增大表层潮流椭圆的横向分量, 导致更强的垂向流速剪切^[15-17]。整体理查森数与表、底层潮流椭圆率之差的正线性相关关系也显示了层化对潮流垂向结构的影响^[16,18]。另外, 层化对潮流椭圆倾角和相角的垂向结构也有显著的影响, 例如: 在冬季期间 (混合均匀状态), 北海的潮流椭圆倾角和相角的垂向结构没有明显的变化, 而在夏季期间 (层化状态), 它们出现表底层 25° 的倾角差和 30° 的相角差^[19]。类

收稿日期: 2017-01-05

资助项目: 海洋工程国家重点实验室自主研究课题——小尺度海洋湍流 (GKZD010071/021)

作者简介: 浦祥 (1985-), 江苏南京人, 博士, 主要从事河口物理学方面研究. E-mail: xiangpu1985@126.com

*** 通讯作者:** 时钟 (1965-), 江苏泗阳人, 英国威尔士大学哲学博士, 主要从事环境流体力学 (包括河口物理学) 方面研究.

E-mail: zshi@sjtu.edu.cn

(李燕 编辑)

似地,谭伟等^[20]在中国东海大陆架观测到了潮流椭圆率和倾角在密度跃层处的明显改变。

相比陆架海和淡水影响的区域,河口的层化具有更加明显的时间、空间变化^[21-25]。那么,河口潮流的垂向结构有怎样的时间、空间变化?是否受到层化的影响?与层化的陆架海和淡水影响的区域有何异同?海洋学家已对此开展了研究,例如:美国 Ryan 等^[26]观测了阿拉巴马州莫比尔湾河口的潮流剪切,发现淡水径流导致的强层化能够显著改变潮流椭圆倾角的垂向结构。美国 Codiga 等^[27]观测了布鲁克岛海峡和长岛海峡的河口系统,发现春季的层化能够改变上层潮流椭圆的垂向结构,导致中层潮流椭圆变大。

长江河口是一个中潮河口(图 1a),由于径流、潮汐、风、水下地形、岸线和人工结构物的复杂相互作用,其水体的混合与层化具有剧烈的时间、空间变化^[28-30]。虽然已有一些研究关注了长江河口及邻近海域的潮流椭圆的纵向分布^[31-33],但是,层化对潮流椭圆垂向结构的影响及其物理机制尚不清晰。本文旨在探讨长江河口北槽的周期性层化对潮流椭圆垂向结构的影响。

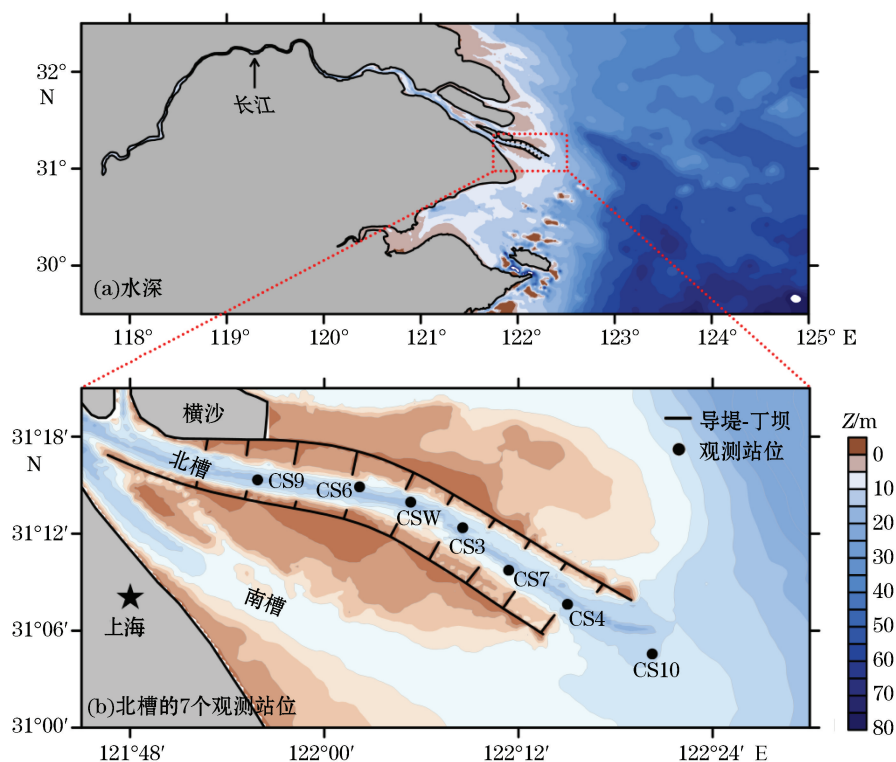


图 1 长江河口示意图

Fig.1 The Changjiang River estuary

1 现场观测

2012-02-17—24(枯季)、2012-08-12—18(洪季)、2013-02-25—26(枯季)和 2013-07-23—24(洪季),水利部长江水利委员会长江口水文水资源勘测局在长江口北槽开展了多站位同步水文观测,2012 年枯季和洪季包括 10 个站位小、中、大潮的水位、流速、流向、盐度和含沙量^[28],2013 年枯季和洪季包括 8 个站位大潮的水位、流速、流向、盐度和含沙量。各站位垂向 6 层(0.0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H 和 1.0H)的水平流速和流向每小时采用电磁海流计测量,盐度基于硝酸银滴定法分析。鉴于北槽上段层化并不显著^[28],因此将 CS9 站位作为参考站位。本研究主要分析北槽上段 1 个站位(CS9)和中、下段 6 个站位(CS6, CSW, CS3, CS7, CS4 和 CS10)的现场观测资料(图 1b),以研究层化对潮流椭圆垂向结构的影响。

2 理论与计算

2.1 密度

北槽水域水体密度(ρ)依据以下状态方程计算^[34-35]:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta S), \quad (1)$$

式中, ρ_0 为纯水密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), β 为盐度膨胀系数(7.8×10^{-4})^[36], S 为海水盐度。

2.2 潮流椭圆参数

鉴于 M_2 半日分潮的主导性,本研究主要关注其潮流椭圆的垂向结构。基于各站位各层观测的流速和流向,使用潮流调和程序 T-Tide^[37] 分别计算得到 M_2 分潮的潮流振幅(u, v)和迟角(g_u, g_v)。然后,基于这些参数,将 M_2 分潮的潮流矢量分解为顺时针和逆时针的圆周旋转矢量,2 个分量的振幅(U_{ac}, U_c)和迟角(g_{ac}, g_c)依据以下公式计算^[16]:

$$\begin{cases} U_{ac} = \frac{1}{2} [u^2 + v^2 + 2uv \sin(g_v - g_u)]^{1/2} \\ U_c = \frac{1}{2} [u^2 + v^2 - 2uv \sin(g_v - g_u)]^{1/2} \\ g_{ac} = \tan^{-1} \left(\frac{v \cos g_v - u \sin g_u}{u \cos g_u + v \sin g_v} \right) \\ g_c = \tan^{-1} \left(\frac{v \cos g_v + u \sin g_u}{u \cos g_u - v \sin g_v} \right) \end{cases} \quad (2)$$

在此基础上依据以下公式计算 M_2 分潮潮流椭圆的半长轴(M)、半短轴(m)、椭圆率(ϵ)、倾角(ψ)和相角(φ)^[16]:

$$\begin{cases} M = U_{ac} + U_c \\ m = U_{ac} - U_c \end{cases}, \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{m}{M}, \quad (4)$$

$$\psi = \frac{g_{ac} + g_c}{2}, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{-(g_{ac} - g_c)}{2}. \quad (6)$$

以上 5 个潮流椭圆参数可以具体描述潮流椭圆的主要性质。式中,半长轴 M 为分潮的最大潮流流速;半短轴 m 为分潮的最小潮流流速; ϵ 为半短轴与半长轴的比值,正的值表示潮流椭圆逆时针旋转,负的值表示顺时针旋转; ψ 为东方向 x 轴与半长轴之间的夹角; φ 为最大流速出现时间相对于初始时间的间隔。

2.3 整体理查森数

为定量分析水体的层化(与混合)状态,基于各站位观测的水流和盐度资料,依据以下公式计算整体理查森数(Ri_o)^[18]:

$$Ri_o = \frac{gh\Delta\rho}{\rho U^2}, \quad (7)$$

式中, g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), h 为水深(m), $\Delta\rho$ 为表、底层密度差, U 为潮流流速。总体来说, Ri_o 的值越大表示水体层化越强,反之则越弱。

3 结 果

3.1 长江河口北槽的层化

不同观测期间,北槽中段和下段 6 个站位的密度剖面时间序列如图 2 所示。显然,北槽水体的密度具有十分明显的时空变化。例如:2012 年枯季小潮,CSW 站位潮平均的表底层密度差 $\Delta\rho$ 为 $9.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2a2),而在 2012 年洪季小潮,其值为 $15.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2c2)。显然,此站位洪季的表、底层密度差大于枯季,其它站位的情况与 CSW 站位类似,表明北槽洪季的层化强于枯季。另一方面,2012 年枯季小潮,CS3 站位的 $\Delta\rho$ 为 $13.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2a3),而 2012 年枯季大潮,其值仅为 $3.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2b3),小潮明显高于大潮。其它站位的情况与 CS3 站位类似,2013 年枯季和洪季大潮各站位的 $\Delta\rho$ 与 2012 年同期的情况类似(图 2e1~2e6,图 2f1~2f6),表明小潮北槽的层化显著强于大潮。值得注意的是,无论枯季或洪季,小潮期间密度跃层十分明显(图 2a1~2a6,图 2c1~2c6),但是,大潮期间不明显(图 2b1~2b6,图 2d1~2d6,图 2e1~2e6,图 2f1~2f6)。此外,各站位密度跃层的位置明显不同,一方面呈现出由陆向海逐渐变浅的趋势,例如:2012 年洪季小潮,CS6,CSW 和 CS3 站位的密度跃层位于中、下层(图 2c1~2c3),而 CS4 和 CS10 站位的密度跃层位于中、上层(图 2c5~2c6);另一方面又呈现出明显的半日周期变化,例如:2012 年洪季小潮,涨憩时刻 CS7 站位的密度跃层深度明显浅于落憩时刻。

3.2 长江河口北槽潮流椭圆的垂向结构

不同观测期间,北槽 7 个站位 6 个相对水深计算的潮流椭圆参数如图 3 所示。基于半长轴、半短轴、椭圆率、倾角和相角五个潮流椭圆参数,本节探讨长江河口北槽潮流椭圆垂向结构的时间、空间变化。

3.2.1 半长轴与半短轴

如图 3a1~图 3a6 和图 3b1~图 3b6 所示,总体来看,北槽各站位潮流椭圆的半长轴和半短轴从表层至底层均呈现出逐渐缩短的趋势,值得注意的是小潮期间半长轴存在次表层最大现象。洪季的情况与枯季类似。另外,CS6,CSW,CS3 和 CS7 站位半短轴的长度较短,而 CS4 和 CS10 站位则明显较长(图 3b1~图 3b6)。

3.2.2 椭圆率

受到地形、岸线和人工结构物的影响,CS6,CSW,CS3 和 CS7 站位的水流呈现出明显的往复流形态,潮流椭圆率很小(图 3c1~图 3c6),旋转方向不易分辨。然而,向海端的 CS4 和 CS10 站位各层的潮流椭圆率明显较大(图 3c3),无论在枯季或洪季的小潮或大潮,CS4 和 CS10 站位各层的潮流椭圆均呈现出明显的旋转性,且潮流椭圆的顺时针分量均大于逆时针分量,因此潮流椭圆呈现出明显的顺时针旋转。

3.2.3 倾角

同样,受到地形、岸线和人工结构物的影响,CS6,CSW,CS3,CS7 和 CS4 站位潮流椭圆的表、底层倾角差($\Delta\psi$)较小,小潮的值略大于大潮(图 3d1~3d6)。但是,在岸线和人工结构物影响较小的 CS10 站位,2012 年枯季小潮和大潮,表、底层的 $\Delta\psi$ 分别为 40° 和 3° (图 3d1~3d2),2012 年洪季小潮和大潮,表、底层的 $\Delta\psi$ 分别为 38° 和 1° (图 3d3~3d4),2013 年枯季大潮和洪季大潮,表、底层的 $\Delta\psi$ 分别为 2° 和 10° (图 3d5~3d6)。这些表明:小潮 CS10 站位潮流椭圆倾角的垂向变化显著强于大潮。具体来说,2012 年枯季小潮,CS10 站位 $0.0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H$ 和 $1.0H$ 的潮流椭圆倾角(相对于底层)分别为 $40^\circ, 40^\circ, 21^\circ, 7^\circ, 1^\circ$ 和 0° (图 3d1),这些表明:在 $0.2H$ 到 $0.6H$ 之间,倾角存在 33° 的突变。特别值得注意的是,倾角垂向突变的位置与密度跃层的半日周期变化的位置一致(图 2a6)。类似地,洪季小潮,CS10 站位各层的潮流椭圆倾角(相对于底层)分别为 $38^\circ, 38^\circ, 18^\circ, 3^\circ, 1^\circ$ 和 0° (图 3d3),突变同样发生在 $0.2H$ 到 $0.6H$,与密度跃层的位置一致(图 2c6)。

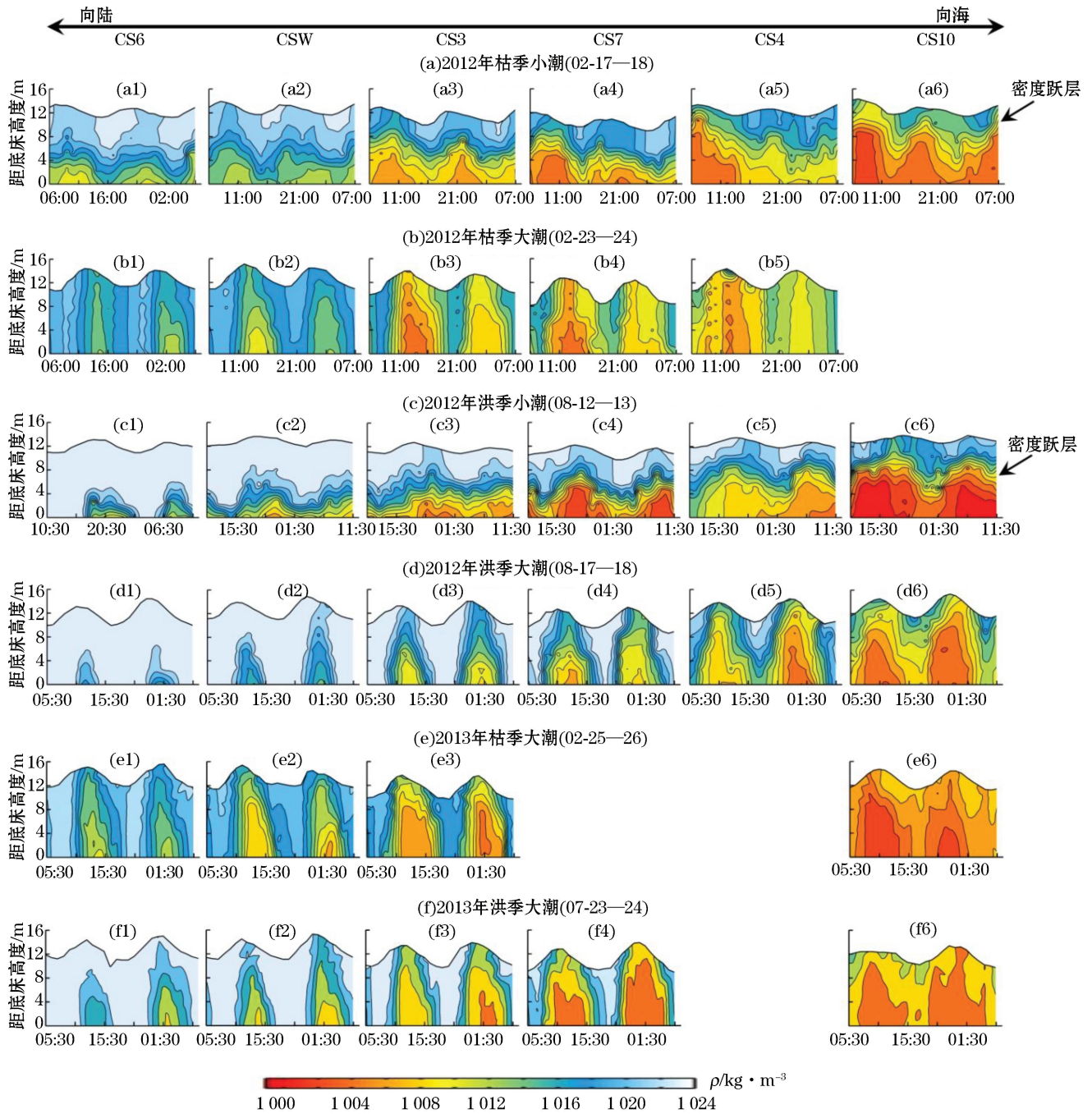
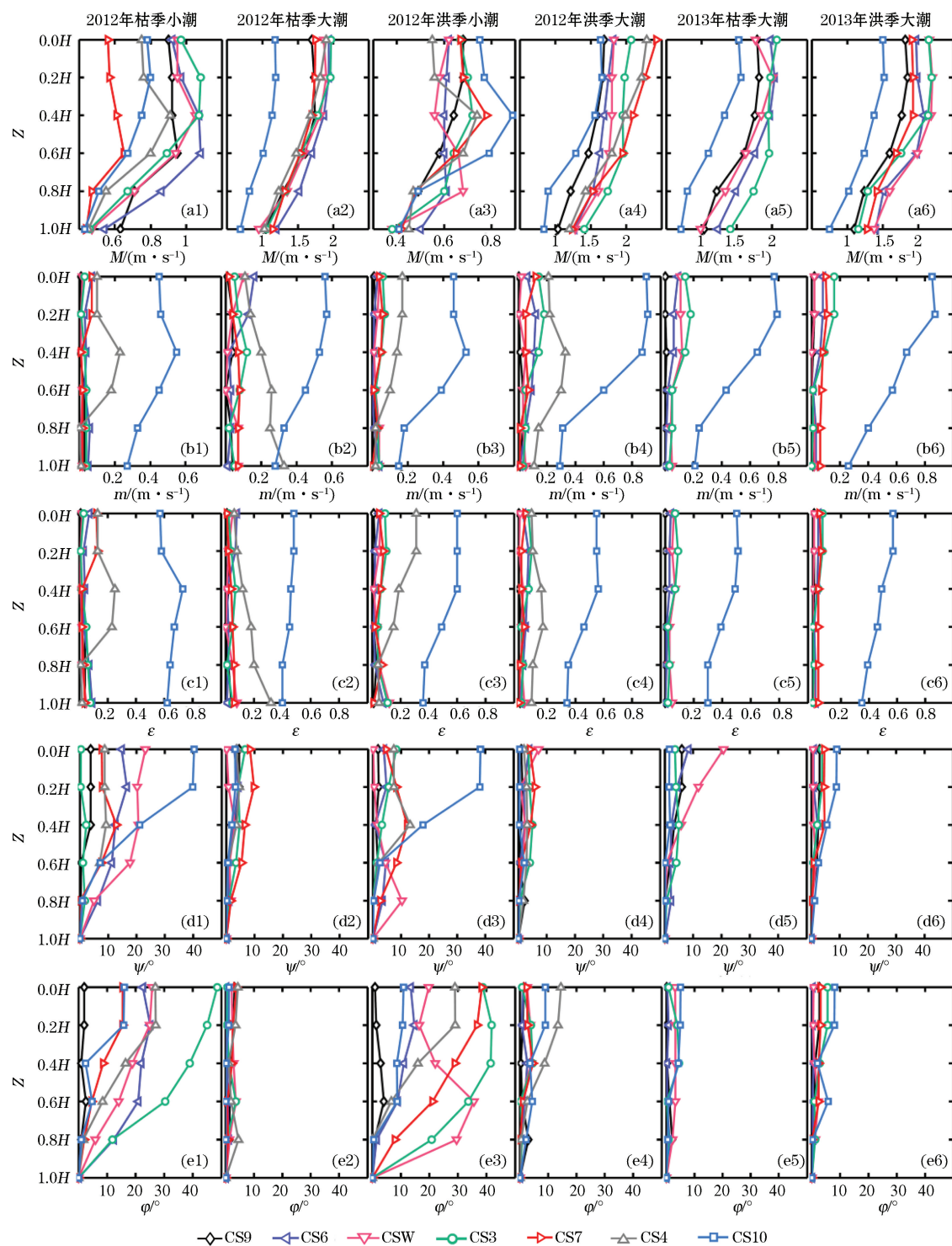


图2 长江河口北槽 CS6, CSW, CS3, CS7, CS4 和 CS10 站位的密度时间序列

Fig.2 Time series of calculated densities at stations CS6, CSW, CS3, CS7, CS4 and CS10



注:2013年枯季大潮 CS7 和 CS4 站位无数据,2013年洪季大潮 CS4 站位无数据

图3 长江河口北槽7个观测站位6个相对水深计算的潮流椭圆半长轴 M 、半短轴 m 、椭圆率 ϵ 、倾角(相对于底层) Ψ 和相角(相对于底层) φ

Fig.3 Calculated tidal ellipse parameters at six relative depths at seven gauging stations along the North Passage in the Changjiang River estuary: the semi-major axis M ; the semi-minor axis m ; the ellipticity ϵ ; the inclination angle Ψ (relative to the bottom layer) and the phase φ (relative to the bottom layer)

3.2.4 相角

如图 3e1~3e6 所示,各层化站位潮流椭圆的表、底层相角差 ($\Delta\varphi$) 具有十分明显的小、大潮变化。例如:2012 年枯季小潮,CS6,CSW,CS3,CS7 和 CS4 站位的表、底层相角差 ($\Delta\varphi$) 分别为 23° , 26° , 49° , 25° 和 27° ,而大潮,它们仅分别为 0° , 2° , 1° , 4° 和 4° 。在无层化的 CS9 站位,2012 年枯季小潮和大潮的表、底层相角差 ($\Delta\varphi$) 分别为 2° 和 3° (图 3e1 和图 3e2),数值较小且无明显的小/大潮变化。2013 年枯季大潮,CS6,CSW,CS3 和 CS7 站位的 $\Delta\varphi$ 分别为 0° , 0° , 3° 和 1° ,洪季大潮,CS6,CSW,CS3,CS7 和 CS4 站位的 $\Delta\varphi$ 分别为 3° , 0° , 1° , 6° 和 3° ,与 2012 年枯季和洪季大潮的情况类似。小潮期间,潮流椭圆相角存在垂向的突变现象,例如:2012 年枯季小潮,CS6 站位 $0.0H$, $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$ 和 $1.0H$ 的相角(相对于底层)分别为 23° , 25° , 22° , 21° , 12° 和 0° ,而 CS4 站位的相角分别为 27° , 27° , 17° , 8° , 2° 和 0° 。这些表明:CS6 站位潮流椭圆相角的垂向突变出现在近底层,而 CS4 站位出现在中层,两个站位潮流椭圆相角的垂向突变位置均与密度跃层的位置一致(图 2a1、图 2a5)。

4 讨论

4.1 层化对椭圆率垂向结构的影响

在受淡水影响的区域,层化能够显著改变椭圆率的垂向结构^[5],这可以通过整体理查森数 Ri_o 与表、底层椭圆率之差 $\Delta\epsilon$ 的正线性相关关系证明^[16, 18]。图 4 展示了长江河口北槽各站位 Ri_o 与 $\Delta\epsilon$ 之间的关系,总体来说,小潮和大潮的数据呈现出完全不同的特征。小潮期间, Ri_o 与 $\Delta\epsilon$ 之间存在显著的正线性相关关系 ($r^2=0.74$, $p=0.006$),而大潮期间的正线性相关关系明显弱于小潮 ($r^2=0.48$, $p=0.03$)。这些表明:长江河口潮流椭圆的垂向结构对密度跃层有明显的响应。基于室内实验,流体力学家揭示了稳定分层流中密度界面对动量垂向输移的抑制作用^[38-42]。类比于这些研究,Souza 等^[16]认为层化导致的密度跃层处垂向涡动黏性系数的急剧衰减是椭圆率垂向结构变化的主要物理机制(图 5)。

另外,被层化改变的潮流椭圆率可能会通过影响底边界层的厚度的大小、从而对混合与层化产生反向作用^[43-46]。由于缺乏相应的观测数据,本文并未对此展开进一步的研究。

4.2 层化对倾角垂向结构的影响

在持续性强层化的小潮期间,北槽 CS10 站位的半长轴从表层至底层呈现出明显的顺时针旋转趋势,但是,在层化相对较弱的大潮期间并不明显。这种现象也存在于其他河口,例如:美国 Ryan 等^[26]长期观测了一个强层化的河口,发现潮流椭圆存在 30° 的表底层倾角差,这与北槽 CS10 站位小潮的情况一致。此外,CS10 站位的潮流椭圆倾角在强层化的小潮期间存在明显的垂向突变,且与密度跃层的位置一致(图 3d1,图 3d3,图 2a6 和图 2c6)。

在淡水影响的区域和陆架海,例如:Rhine ROFI 和北海,潮流椭圆倾角的垂向变化同样存在于层化期间而不存在于混合均匀期间^[15-16, 19, 47]。为研究层化对倾角垂向结构影响的物理机制,海洋学家采用一种简化

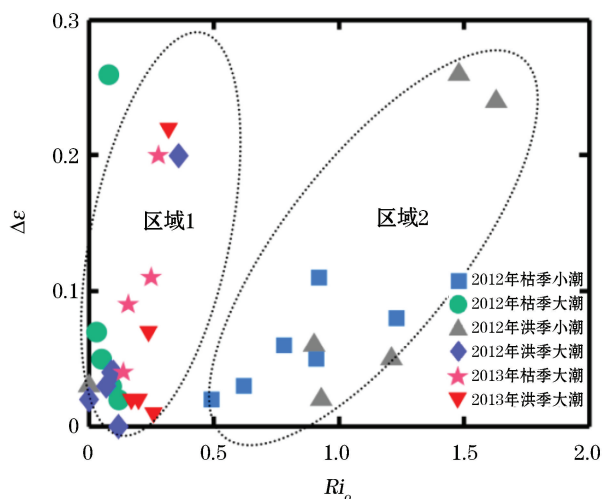


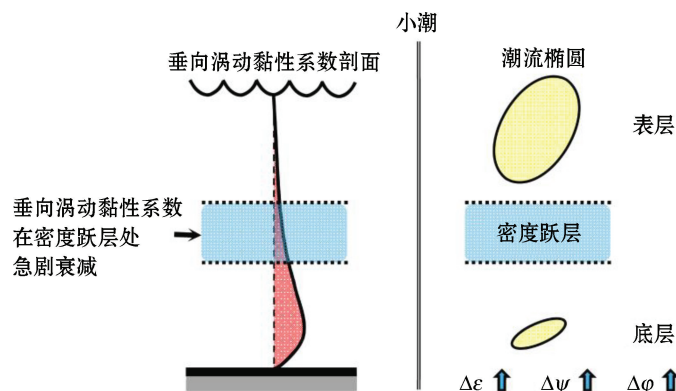
图 4 长江河口北槽表底层椭圆率之差 ($\Delta\epsilon$) 与整体理查森数 (Ri_o) 之间的关系

Fig.4 The relationship between the surface-to-bottom ellipticity difference ($\Delta\epsilon$) and the bulk Richardson number (Ri_o) at the North Passage in the Changjiang River estuary

的三层密度模型^[47],有的则基于垂向涡动粘性系数随深度变化的数学模型^[19],他们的研究结论是一致的,都认为层化导致的密度跃层处涡动粘性系数的剧烈衰减是潮流椭圆倾角垂向变化的主要物理因素(图 5)。这些相关研究能够较好地解释为何 CS10 站位椭圆倾角的垂向突变只出现在具有密度跃层的小潮期间,而不出现在没有稳定密度跃层的大潮期间,同时能够解释为何倾角的垂向突变发生在密度跃层处。

4.3 层化对相角垂向结构的影响

无论枯季或洪季,在强层化的小潮期间,北槽大多数站位的潮流椭圆相角均存在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的垂向变化,然而,在弱层化的大潮期间,相角降到 10° 以下(图 3),小大潮变化十分明显,而在淡水控制的 CS9 站位,无论小潮或大潮,相角都接近 0° (图 3e1 和图 3e2)。这些表明:小潮,密度跃层显著改变了潮流椭圆相角的垂向结构。此现象在陆架海也有报道,例如:荷兰 Maas 等^[47]发现层化能够使北半球陆架海潮流椭圆的顺时针分量产生额外的垂向相角差。类似的,英国 Howarth^[19]发现陆架海潮流椭圆相角的垂向变化在层化期间十分明显,但是,在混合均匀期间很小。随后,基于数学模型,他反演了观测现象,并验证了层化对潮流椭圆相角垂向结构的重要影响。值得注意的是,陆架海的层化主要受温度跃层的控制,而淡水影响的区域和河口的层化主要受盐度跃层的控制。尽管层化产生的物理机制不同,但是,陆架海、淡水影响的区域和河口的层化对潮流垂向结构影响的物理机制是一致的,即层化通过改变垂向涡动粘性系数的垂向结构,进而改变潮流的垂向结构(图 5)。北槽密度跃层的小、大潮变化,不仅能够解释潮流椭圆相角垂向结构的小大潮变化,而且也能够解释相角垂向突变位置的变化。



注:垂向涡动粘性系数在密度跃层处急剧衰减,使潮流椭圆的椭圆率、倾角和相角出现明显的表底层之差

图 5 强层化的小潮期间长江河口垂向涡动粘性系数剖面与潮流椭圆垂向结构变化相互关系

Fig.5 A conceptual model for the interrelationship between the vertical eddy viscosity profile and the vertical variability of the tidal ellipse in the Changjiang River estuary on a strongly stratified neap tide

美国 Valle-Levinson 等^[48]在 Chesapeake 湾下游也观测到了潮流椭圆相角的垂向变化,不同的是此区域并不存在层化现象,他们将相角的垂向变化归因为底摩擦的作用。虽然底摩擦能够在一定程度上影响潮流椭圆相角的垂向结构^[47],但是,无法解释长江河口潮流椭圆相角垂向结构明显的小、大潮差异,也无法解释小潮潮流椭圆相角的垂向突变位置。此外,虽然小潮北槽的重力环流较强^[29],但是,潮流椭圆相角的垂向变化并非是重力环流导致的,主要原因是重力环流的周期远大于半日潮周期^[28],在潮流调和分析的过程中已与半日潮流分离。因此,长江河口北槽的密度跃层是影响潮流椭圆相角垂向结构的主要物理因素。

此外,小潮期间北槽中段和下段的垂向流速剪切显著强于上段^[28],而与之对应的是中段和下段的层化显著强于上段(图 2),表明:层化导致的潮流椭圆的垂向变化可能会反向影响水体的混合过程。类似地,荷兰 van Haren^[49]在北海中部的观测研究发现层化导致的潮流椭圆相角的垂向变化能够产生更强的流速剪切,这与长江河口小潮的现象基本一致。

在今后的研究工作中,仍需基于数学模型进一步定量研究长江河口的层化对潮流椭圆垂向结构的影响,

以拓展观测研究的时间和空间精度。另外,潮流椭圆垂向结构的改变对混合与层化的反向影响及其物理机制也有待进一步研究。本文部分内容已经在 Pu 等^[50]中发表。

5 结 论

基于长江河口北槽多个站位不同年份的枯洪季、大小潮观测的潮流和盐度数据,计算并分析了长江河口北槽的层化和潮流垂向结构的变化,及其相互之间的关系,主要得到以下结论:

1) 长江河口北槽 7 个站位不同观测期间的密度时间序列显示:层化的周期性变化明显,小潮的表、底层密度差显著高于大潮,表明小潮期间层化显著强于大潮。

2) 小潮期间北槽出现明显的密度跃层,但是,大潮期间并不明显。小潮期间北槽密度跃层的深度具有明显的空间变化,在北槽中段位于中下层,而下段位于中上层。

3) 与层化的淡水影响的区域类似,长江河口北槽的层化能够显著地改变椭圆率的垂向结构,这可以通过整体理查森数与表、底层椭圆率之差的正线性相关关系证明。

4) 与具有温度跃层的陆架海类似,长江河口北槽的密度跃层能够显著的改变潮流椭圆倾角和相角的垂向结构,并使倾角和相角出现垂向突变现象。

5) 密度跃层处垂向涡动粘性系数的急剧衰减可能是小潮期间潮流椭圆的椭圆率、倾角和相角垂向变化的主要物理因素。

参考文献(References):

- [1] ALLEN J S. Models of wind-driven currents on the continental shelf[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1980, 12(1): 389-433.
- [2] DICKEY T D, VAN LEER J C. Observations and simulation of a bottom Ekman layer on a continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 1983-1988.
- [3] LEE S, LIE H J, CHO C H, et al. Vertical structure of the M_2 tidal current in the Yellow Sea[J]. *Ocean Science Journal*, 2011, 46(2): 73-84.
- [4] SIMPSON J H, SOUZA A J. Semidiurnal switching of stratification in the region of freshwater influence of the Rhine[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C4): 7037-7044.
- [5] SIMPSON J H. Physical processes in the ROFI regime[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 12(1-4): 3-15.
- [6] JOHNS B, ODD N. On the vertical structure of tidal flow in river estuaries[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1966, 12(1): 103-110.
- [7] UNCLES R J, STEPHENS J A. The structure of vertical current profiles in a macrotidal, partly-mixed estuary[J]. *Estuaries*, 1990, 13(4): 349-361.
- [8] THOMSON R E. Tidal currents and estuarine-type circulation in Johnstone Strait, British Columbia[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1976, 33(10): 2242-2264.
- [9] EKMAN V W. On the influence of the earth's rotation on ocean currents[J]. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 1905, 2(11): 1-53.
- [10] SVERDRUP H U. Dynamics of tides on the North Siberian shelf. Results from the Maud expedition[J]. *Geofysiske Publikationer*, 1927, 4(5): 1-75.
- [11] BOWDEN K F, FAIRBAIRN L A, HUGHES P. The distribution of shearing stresses in a tidal current[J]. *Geophysical Journal International*, 1959, 2(4): 288-305.
- [12] PRANDLE D. The vertical structure of tidal currents and other oscillatory flows[J]. *Continental Shelf Research*, 1982, 1(2): 191-207.
- [13] PRANDLE D. The vertical structure of tidal currents[J]. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 1982, 22(1-2): 29-49.
- [14] FANG G H, ICHIYE T. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1983, 73(1): 65-82.
- [15] VISSER A W, SOUZA A J, HESSNER K, et al. The effect of stratification on tidal current profiles in a region of freshwater influence[J]. *Oceanologica Acta*, 1994, 17(4): 369-381.
- [16] SOUZA A J, SIMPSON J H. The modification of tidal ellipses by stratification in the Rhine ROFI[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(8): 997-1007.

- [17] SOUZA A J, SIMPSON J H. Controls on stratification in the Rhine ROFI system[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 12(1-4): 311-323.
- [18] VERSPECHT F, SIMPSON J H, RIPPETH T P. Semi-diurnal tidal ellipse variability in a region of freshwater influence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): L18602.
- [19] HOWARTH M J. The effect of stratification on tidal current profiles[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(11): 1235-1254.
- [20] TAN W, ZUO J C, LI J, et al. Effect of stratification on tidal current vertical structure on continental shelf of the East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(2): 265-271. 谭伟, 左军成, 李娟, 等. 层化对东海大陆架潮流垂向结构的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(2): 265-271.
- [21] SIMPSON J H, BROWN J, MATTHEWS J, et al. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification[J]. *Estuaries*, 1990, 13(2): 125-132.
- [22] NEPF H M, GEYER W R. Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C5): 12079-12086.
- [23] BURCHARD H. Combined effects of wind, tide, and horizontal density gradients on stratification in estuaries and coastal seas[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(9): 2117-2136.
- [24] LI M, ZHONG L J. Flood-ebb and spring-neap variations of mixing, stratification and circulation in Chesapeake Bay[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(1): 4-14.
- [25] UNCLES R J, ONG J E, GONG W K. Observations and analysis of a stratification-destratification event in a tropical estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 31(5): 651-665.
- [26] RYAN H F, NOBLE M A, WILLIAMS E A, et al. Tidal current shear in a broad, shallow, river-dominated estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(6): 665-688.
- [27] CODIGA D L, REAR L V. Observed tidal currents outside Block Island Sound: offshore decay and effects of estuarine outflow[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C7): C07S05.
- [28] PU X, SHI J Z, HU G D, et al. Circulation and mixing along the North Passage in the Changjiang River estuary, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 148(C): 213-235.
- [29] PU X, SHI J Z, HU G D. Analyses of intermittent mixing and stratification within the North Passage of the Changjiang (Yangtze) River estuary, China: a three-dimensional model study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 158: 140-164.
- [30] GAO L, LI D J, DING P X. Quasi-simultaneous observation of currents, salinity and nutrients in the Changjiang (Yangtze River) plume on the tidal timescale[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 75(1-2): 265-279.
- [31] UEHARA K, SAITO Y, HORI K. Paleotidal regime in the Changjiang (Yangtze) Estuary, the East China Sea, and the Yellow Sea at 6 ka and 10 ka estimated from a numerical model[J]. *Marine Geology*, 2002, 183(1-4): 179-192.
- [32] RONG Z, LI M. Tidal effects on the bulge region of Changjiang River plume[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 97: 149-160.
- [33] HU Z F, WANG D P, PAN D L, et al. Mapping surface tidal currents and Changjiang plume in the East China Sea from Geostationary Ocean Color Imager[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(3): 1563-1572.
- [34] HANSEN D V, RATTRAY M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. *Journal of Marine Research*, 1965, 23: 104-122.
- [35] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1): 175-197.
- [36] HAMILTON P. A numerical model of the vertical circulation of tidal estuaries and its application to the Rotterdam Waterway[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1975, 40(1): 1-21.
- [37] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [38] ELLISON T H, TURNER J S. Turbulent entrainment in stratified flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 6(3): 423-448.
- [39] THORPE S A. Experiments on instability and turbulence in a stratified shear flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 61(4): 731-751.
- [40] LINDEN P F. Mixing in stratified fluids[J]. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 1979, 13(1): 3-23.
- [41] CSANADY G T. Turbulent diffusion in a stratified fluid[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1964, 21: 439-447.
- [42] MCEWAN A D. Internal mixing in stratified fluids[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 128: 59-80.
- [43] SIMPSON J H, SHARPLES J. Does the earth's rotation influence the location of the shelf sea fronts?[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C2): 3315-3319.
- [44] SIMPSON J H, TINKER J P. A test of the influence of tidal stream polarity on the structure of turbulent dissipation[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(1): 320-332.

- [45] MAKINSON K. Modeling tidal current profiles and vertical mixing beneath Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(1): 202-215.
- [46] MAKINSON K, SCHRÖDER M, ØSTERHUS S. Effect of critical latitude and seasonal stratification on tidal current profiles along Ronne Ice Front, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C3): C3022.
- [47] MAAS L R M, VAN HAREN J J M. Observations on the vertical structure of tidal and inertial currents in the central North Sea[J]. *Journal of Marine Research*, 1987, 45(2): 293-318.
- [48] VALLE-LEVINSON A, LWIZA K M M. The effects of channels and shoals on exchange between the Chesapeake Bay and the adjacent ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C9): 18551-18563.
- [49] VAN HAREN H. Properties of vertical current shear across stratification in the North Sea[J]. *Journal of Marine Research*, 2000, 58(3): 465-491.
- [50] PU X, SHI J Z, HU G D. The effect of stratification on the vertical structure of the tidal ellipse in the Changjiang River estuary, China [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2017, 15C: 75-94.

The Effect of Periodic Stratification on the Vertical Structure of the Tidal Ellipse at the North Passage in the Changjiang River Estuary

PU Xiang^{1,2,3}, SHI John Z^{1,2,3}, HU Guo-dong⁴

(1. *School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030;*

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200030;

3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200030;

4. Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of the Changjiang River Estuary,

Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136)

Abstract: Based on the field data of current velocities and salinities, by using the equation of the bulk Richardson number and the theory of harmonic tidal analysis, this study quantitatively analyzes the possible effect of stratification on the vertical structure of the M_2 semidiurnal tidal ellipse at the North Passage in the Changjiang River estuary. Results show that stratification is much stronger on a neap tide than that on a spring tide. A pycnocline occurs at each station on a neap tide only. The tidal ellipses degenerate to rectilinear motion at each layer of the water column at landward stations within the dike-groyne system, while they rotate clockwise at seaward stations outside the dike-groyne system. The surface-to-bottom ellipticity difference appears to have a clear positive and linear relationship with the bulk Richardson number mainly on a neap tide, indicating the significant effect of stratification on vertical structure of the tidal ellipse. The surface-to-bottom inclination angle difference of the tidal ellipse could reach up to about 40° at a seaward station outside the dike-groyne system on a neap tide but less than 10° on a spring tide. Vertical phase shifts of the tidal ellipses range from 20° to 50° at most stations on a neap tide, while they are less than 10° on a spring tide, indicating significant neap-spring variability. Sudden inclination and vertical phase shift of the tidal ellipses, which account for the most part of the entire vertical variability, occur at the pycnocline. A significant reduction in the eddy viscosity at the pycnocline seems to be the major physical factor responsible for the vertical variability of ellipticity, inclination and phase of the tidal ellipses on a strongly stratified neap tide.

Key words: tidal ellipse; stratification; pycnocline; ellipticity; the North Passage; the Changjiang River estuary

Received: January 5, 2017