第 36 卷 第 1 期 海 洋 学 报 Vol. 36, No. 1
2014 年 1 月 ACTA OCEANOLOGICA SINICA January 2014

王亚,何青,沈健. 长江河口水流输运时间研究[J]. 海洋学报,2014,36(1):45－55,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.01.006
Wang Ya, He Qing, Shen Jian. The study of the transport timescale in the Changjiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese),2014,36(1):48－55,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.01.006

长江河口水流输运时间研究

王亚[1],何青[1*],沈健[2]

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室,上海 200062; 2. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, Gloucester Point,VA., 23062,USA)

摘要:利用水龄理论的新方法,借助环境水动力学模型定量讨论了多年平均径流条件下长江河口径流和潮汐作用对河口水流输运时间的影响。研究给出了长江河口水流输运时间的时空格局:多年平均流量条件下,水流从徐六泾输出至河口(122.5°E)大约需要 24 d,南、北槽分流口以上河段水流输运时间主要由径流控制,水流输运时间为 8 d,向下至拦门沙滩顶水域由径流和潮汐共同控制,水龄为 16 d,说明最大浑浊带区域的水流输运速度较上下游为慢,从一个侧面阐述了最大浑浊带区域水动力的特征;长江河口水流输运时间存在明显的层化现象,表底层相差最大值可达 6 d。数值模拟试验结果表明长江河口的潮汐作用是影响河口水流输运时间的关键要素,河口巨大的进潮量增强河口水流交换能力并减小水流输运时间,从而显著影响随水体运动的物质输运格局。水流输运时间研究,不仅可以成功应用于河口水动力环境的量化研究,而且可以为泥沙输运及污染物输运等环境变化研究提供动力的基础。

关键词:长江口; 潮汐作用; 水流输运时间; 水龄; 数学模型

中图分类号:P343.5 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-4193(2014)01-0048-08

1 引言

在水环境系统中,绝大多数生物、溶解营养盐、污染物和悬浮颗粒均随水体运动;在过去的几十年,过量的营养盐排放导致近岸海域、河口、湖泊的严重的环境问题。近 30 a 来,人们普遍认识到水体物理过程和生物化学过程相互影响并控制污染物的归宿,在近海水域生态系统问题中起着重要的作用[1-2]。因此,在研究河口环境问题之前,定量研究水体输运过程至关重要。

多数海洋运动过程非常复杂,常规的现场观测和数值模拟,多着眼于常规的状态变量及其过程,难以衡量它们之间的内在机理,因此就需要一些特定的解读方法,引入一些辅助性的变量来说明,水龄(water age)就是这一类的辅助变量。以水龄、滞留时间(residence time)和通过时间(transit time)为代表的时间尺度,提供了一个量化动力与系统功能之间联系的可能性,这些变量不仅可以进一步理解模型计算结果,更重要的是在跨学科交叉研究特别是水环境管理方面是一个极其有益的方法[3-5]。

收稿日期:2011-04-17;**修订日期:**2013-02-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(41076051;41276080);水利公益专项(201201068);上海市科委重点基金(12231203101);博士研究生学术新人奖(XRZZ2010028)。

作者简介:王亚(1982—),男,安徽省亳州市人,博士,主要从事河口海岸物质输运过程研究。E-mail:ricowangya@gmail.com

* **通信作者:**何青,教授,主要从事河口海岸水沙运动。E-mail:qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

水交换一直是海洋学科中基础的科学问题之一。目前,箱式、质点追踪和保守物质的扩散模型在我国得到广泛的应用,使得水体交换能力的研究得到长足发展。匡国瑞等[6]以高低潮盐度变化给出了乳山湾一个潮周期内的水交换率。朱小兵等[7]依据全潮水文观测资料,采用平均滞留时间研究海南岛博鳌港水体交换能力。姬厚德等[8]利用实测水文资料采用纳潮量的方法进行了篔筜湖海水平均半交换时间的研究。对于岸线和水深变化相对简单区域,以上方法计算简单,不失为有效的方法,但是对于岸线和水深变化复杂的区域,上述方法计算结果精度较差。水交换的另一重要方法保守性物质的扩散的方法常被用来计算河口、海湾的水交换,董礼先和苏纪兰[9]应用于象山港水交换的研究;Liu 等[10]应用此方法研究胶州湾的平均滞留时间;王聪等[11]采用保守物质扩散方法研究平均风场作用下大亚湾水体交换能力。由于保守物质浓度存在复杂时空变化,在研究海湾河口的交换能力时,需要对时间和空间进行积分,所以此方法难以表达在河口海湾区域水流交换能力的时空差异,在近岸海域的水流交换能力研究方面存在局限性。

针对上述水交换方法的不足,科学家先后提出了一系列新的水交换的计算方法,其中最具有代表性并被广泛采用的是“水龄”法。空间上某点的水龄定义为水体进入研究区域到该点所需要的时间;在 Bolin 与 Rohde[12]和 Takeoka[1-2]研究中,水体滞留时间定义为从该点到离开研究区域所需要的时间。近年来,这些概念被发展和应用在潟湖、河口、湖泊和深海的输运时间的研究中。

Deleersnijder 等[3]首先引入计算水龄的欧拉理论,并将其运用在英吉利海峡和北海南部平均水龄的空间分布。从此数值模拟在水龄和滞留时间的研究中得到广泛的应用。Shen 和 Hass[13]与 Shen 和 Lin[4]分别利用水龄理论研究美国 Chesapeake 湾中 York 河口和 James 河口的水流输运,发现河口区的水龄垂向分布存在与盐度类似的层化现象,径流是控制水龄的主要因素,河口汛期的水龄比平均流量条件下缩短 2 个月左右。Gong 等[5]利用水龄理论,研究了风对 Rappahannock 河河口环流的影响,发现风对河口水流输运时间的作用在很大程度上取决于风应力与浮力之间的对比和河口环流的初始状态。Wang 等[14]利用水龄理论探讨了长江河口水流输运时间的洪枯季变化,并系统探讨了长江口北槽深水航道工程对河口水流输运时间的影响。本文集中讨论多年平均径流条件下,潮汐作用对长江河口水流输运时间的影响。

2　研究区域与研究方法

长江河口水量丰沛,据大通水文站资料,多年平均年径流总量 9 034×10^8 m^3(1950—2005 年),最大年径流量 13 600×10^8 m^3(1954 年),最小径流量 6 760×10^8 m^3(1978 年)。长江径流量具有明显的洪、枯季变化,每年 5—10 月为洪季,径流占年径流量的 71.7%,11—4 月为枯季,径流量占年径流量的 28.3%。年内最小径流量出现在 1—3 月,最大出现在 7、8 月[15]。

长江河口是中等强度的潮汐河口,口外为正规半日潮,口内为非正规半日浅海潮,平均周期为 12 时 25 分。口门多年平均潮差 2.66 m,最大潮差达 4.62 m。潮波向口内传播过程中(传播方向 305°),由于科氏力作用,北岸潮差比南岸大,如南港北岸潮差比南岸高 0.4～0.5 m。由于口门较宽,纳潮量巨大,枯季小潮进潮量为 13×10^8 m^3,洪季大潮纳潮量为 53×10^8 m^3,两者相差近 4 倍。在口外近于平均潮差上游径流量接近于年平均值时,河口进潮量达 266 300 m^3/s,约为大通站多年平均径流量的 9 倍。

本文采用环境水动力学模型(Environmental Fluid Dynamic Code,EFDC)对长江口水龄进行研究。EFDC 是在美国国家环保署资助下弗吉尼亚海洋研究所(VISM, Virginia Institute of Marine Science at the College of William and Mary)的 John Hamrick 等[16]根据多个数学模型集成开发的综合模型,该模型集水动力、泥沙输运、污染物扩散和水质预报于一体,可用于模拟三维动力、物质输运(包括温度、盐度、非黏性和黏性泥沙的输运)、生态过程和淡水取水、排水等等。其模拟范围包括河流、湖泊、水库、湿地、河口以及自近岸到陆架的海域。模式可综合考虑风、浪、潮、径流等多因素的影响[13]。

2.1　模型设置

长江河口和杭州湾毗邻,水沙交换非常频繁,将它们作为一个整体进行计算不但能更容易给出边界,而且还可以消除边界对研究区域的影响,计算区域如图 1,计算网格如图 2。长江口上边界取在长江中下游最后一个径流控制站,潮区界安徽大通,距离河口

约 600 km。杭州湾上界取到闸口附近，其余 3 个外海边界为东边界到123°E，北边界到 32°11′N，南边界到 29°53′N。模型区域共有 39 727 个计算网格，网格的分辨率相差很大，其中最大格距为 2 219 m(在外海)，最小格距仅为 254 m。在垂直方向分为等间距 8 层。曲线正交网格在走向上兼顾了长江口的 4 个入海通道，并兼顾了北槽深水航道工程。这样一套网格在不过多地增加计算量的同时，却能保证了关键区域的计算精度。时间步长为 20 s，模型计算 90 d 后，模型达到准稳定条件下，重新启动，对计算结果进行分析。在数值模拟实验中，温度设为常数 20℃。

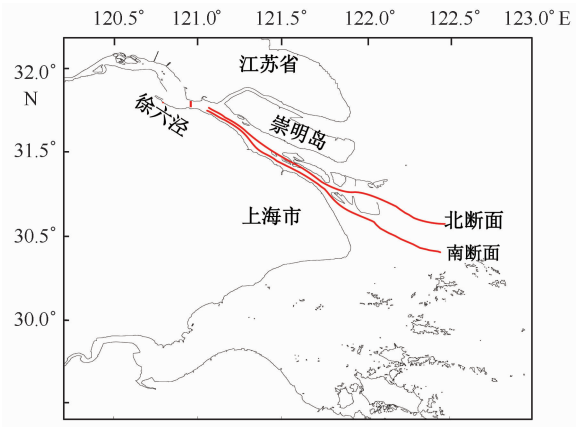

图 1 研究区域与选定断面

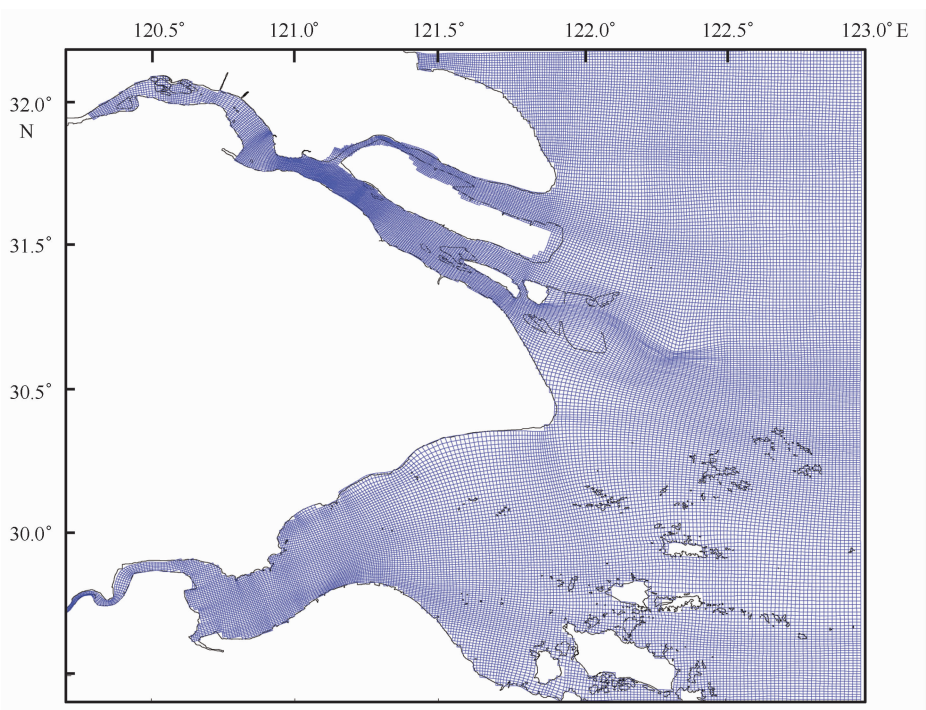

图 2 模型计算区域网格

计算区域的初始条件涉及水位、流速和盐度，由于水位和流速对外界动力响应较快，初值均取为零；盐度取洪季或枯季的典型分布值。

外海开边界通过水位变化作为模式的驱动，水位 ζ 的表达式为：

$$\zeta = A + \sum_{i=1}^{M} f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_0 + u)_i - g_i], \quad (1)$$

式中，A 为余水位；f_i 为各分潮的交点因子；$(V_0 + u)_i$ 为分潮的天文相角，它们可由地理位置以及具体的年、月、日求得；ω_i 为分潮的角频率；H_i 和 g_i 为潮波的振幅和地方迟角；M 为分潮个数，在本研究中，$M=6$，包括 S_2、M_2、N_2、K_1、O_1、P_1。

外海开边界盐度设为平均流量下全潮平均特征值，其中底层设为恒定值 34，表层设为 25，通过调节恢复时间 T_{rec} 使得计算值和实际测量值最接近。

$$c(t) = c^{out} + \frac{1}{2}(c^{bnd} - c^{out})\left[\cos\left\{\pi \frac{T_{rec} - t_{out}}{T_{rec}}\right\} + 1\right],$$
$$0 \leqslant t_{out} \leqslant T_{rec}, \quad (2)$$

式中，c^{out} 为开边界上一次出流时刻的浓度值，c^{bnd} 为指定边界上的浓度值，t_{out} 为由出流转为入流的时间，T_{rec} 为恢复时间[17-18]，在该研究中，恢复时间为 1 h。

本研究主要着重讨论长江河口潮汐作用对河口

水流输运时间的影响,长江口上游边界取多年平均流量(29 000 m^3/s),盐度取 0,杭州湾上边界取多年平均流量 1 280 m^3/s,盐度取 0。

河口是由河流进口段、河流河口段和口外海滨组成的一个特殊的水域。就长江河口而言,河流近口段在安徽的大通到江苏的江阴之间,前者是潮区界,后者为潮流界;河流河口段在江阴到河口拦门沙滩顶之间,也就是滞流点附近。徐六泾在地形上是河口的节点所在,自徐六泾以下河口开始分汊,研究长江口的问题,常以徐六泾作为起点,本文也选择徐六泾作为水流输运时间的起点,长江河口水流的输运时间为相对于徐六泾为起点的时间。

2.2　模型方法

在数学模型中,利用输运方程计算示踪物浓度和年龄浓度,考虑示踪物仅从一个河流边界进入,不考虑其他源和汇项,因此,示踪物浓度和年龄浓度可以通过如下方程表示:

$$\frac{\partial C(t,\vec{x})}{\partial t}+\nabla(uC(t,\vec{x})-K\nabla C(t,\vec{x}))=0,$$

$$\frac{\partial \alpha(t,\vec{x})}{\partial t}+\nabla(u\alpha(t,\vec{x})-K\nabla \alpha(t,\vec{x}))=C(t,\vec{x}), \tag{3}$$

式中,$C(t,\vec{x})$ 表示踪物浓度,$\alpha(t,\vec{x})$ 为年龄浓度,u 为流速,K 为扩散系数张量,t 表示时间,$\vec{x}$ 表示空间位置。因此平均年龄可以表示为:

$$a(t,\vec{x})=\frac{\alpha(t,\vec{x})}{C(t,\vec{x})}. \tag{4}$$

在边界的设置上,上游边界示踪物浓度设为 1,年龄浓度设为 0,其他的开边界示踪物浓度和年龄浓度均设为 0。由各层的水龄平均得到垂向平均水龄。

长江河口水动力模型经过大量野外实测数据验证,具体验证情况可参考 Wang 等[14],结果表明该模型能够全面反映本海区的主要动力特征,为数值模拟试验精度提供了保障。选定从徐六泾至河口(122.5°E)通过南港－南槽和南港－北槽的南北两个纵断面分析长江河口水流输运时间的沿程变化(见图 1)。

3　结果与讨论

3.1　水龄平面分布

水龄通常用来衡量水体或溶解性物质从进入起到河口某处所需要的时间。图 3 给出了多年平均流量下长江河口大小潮全潮平均的垂向平均水龄分布,结果表明,在多年平均流量条件下,水流从进入河口(徐六泾)到南、北港分流口大约需要 4 d,到最大浑浊带海域(约 122°～122.5°E)需要 16 d,出长江口(122.5°E)大约需要 24 d。水龄等值线分布在口门处开始右偏,长江河口水团从徐六泾输送至杭州湾水域一般需要 48 d。Wang 等[14]研究表明长江下泻径流在洪、枯季分别需要 20 和 36 d 从徐六泾传输出长江河口。

长江河口水流输运在空间分布上具有明显的横向结构:受河床摩擦的影响,在大小潮期间均为边滩水体输运速度要比主泓处慢。垂向平均水龄在横向表现为左岸大于右岸(向海方向),水龄等值线右偏,说明水流输运右岸比左岸更快(图 3)。同时长江河口水龄空间分布存在与余流分布类似的舌状结构,水龄则表现为主槽小,相邻浅滩值大。

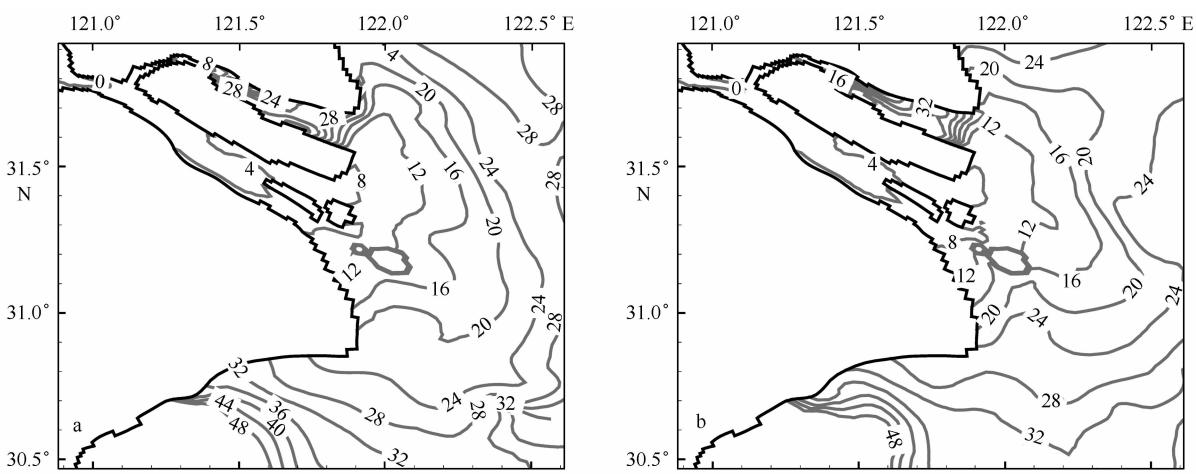

图 3　多年平均径流条件下,长江河口垂向平均水龄的分布

a. 大潮,b. 小潮

长江河口水龄等值线由徐六泾向下游至口门基本平行分布，水平梯度逐渐变大，在河口口门存在一个水平梯度最大的区域(122°～122.5°E 之间)，说明此河段水流输运速度比上、下河段更慢，与长江口最大浑浊带主体部分吻合，水体输运速度与最大浑浊带的形成应该有密切的关系。南汇边滩位于长江口和杭州湾的分界，潮汐、径流和滩槽相间的地形决定了本区域复杂的余流结构，水流主槽净向海，边滩净向陆。南汇边滩处水龄值明显高于周围的区域，表明该区域动力条件并不利于水体向外输运。此外模型结果还表明该区域存在明显边滩向陆，主槽向海的顺时针环流，前人基于野外观测数据的分析结果也曾发现类似的结构[19-20]。

3.2 水龄垂向分布

通过分析南北两个断面的纵向水龄分布(图 4)，发现徐六泾至南北槽分流口附近，水龄垂向分布均匀，水流方向均指向下游；南北槽分流口往下，水龄出现和盐度相似的分层现象，水龄表层小底层大；水体余流方向表层向海，底层向陆(图 4、图 5)。大潮南北断面的水龄分层不明显，垂向上水流方向基本均向海；小潮水龄分层明显，水流表层向海，底层向陆；北槽上段是底层余流方向转化的区域，上游部分底层余流向海，下游部分底层余流向陆，即此处为滞留点区域所在，也是拦门沙滩顶。水龄的水平梯度最大的位置也位于此处，说明了本区域水流传输速度比上、下河段都要慢。

水流输运时间的层化与盐度分层类似，小潮分层更加明显(图 4)。南北两个纵断面水龄分布表明北断面大潮表底层水龄相差约为 2 d，其中表层为 20 d，底层为 22 d；在小潮期间，表层为 16 d，而底层为 24 d，表底层的水龄差异可达到 8 d。南断面在大潮期间表底层水龄差异不足 2 d，而在小潮时段，表底层水龄差异最大可至 6 d，其中表层水龄 18 d，底层水龄 24 d。上述结果表明小潮潮汐混合作用较弱，河口重力环流增强，表层水流向海输运更快，底层输运速度则慢。

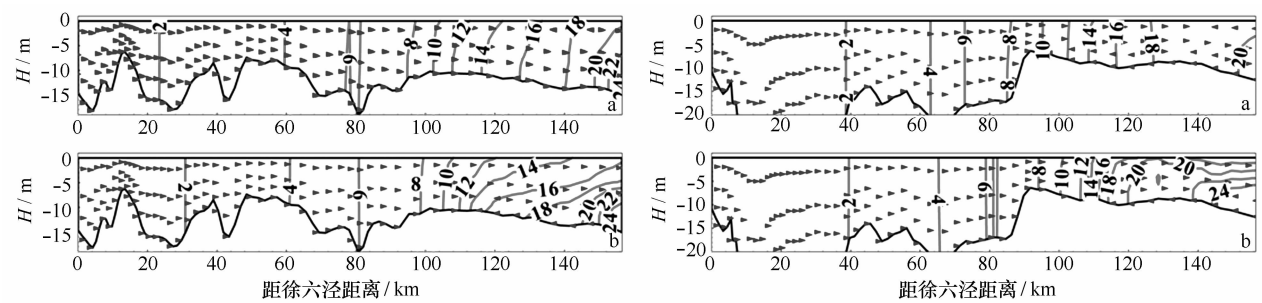

图 4 多年平均径流条件下，长江河口水龄的沿程分布(单位：d)

上：大潮，下：小潮；左：北断面；右：南断面

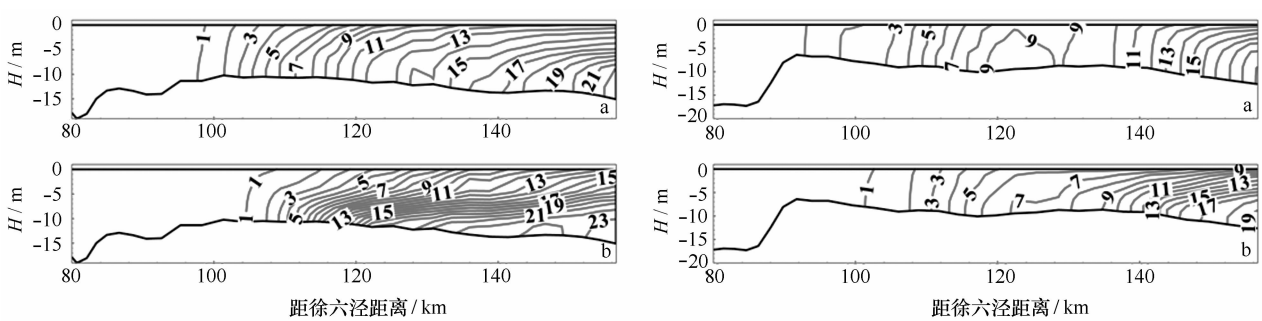

图 5 多年平均径流条件下盐度的沿程分布

上：大潮，下：小潮；左：北断面，右：南断面

3.3 垂向平均分布

分析南北纵断面垂向平均水龄的沿程分布(见图 6)，从徐六泾至南北港分流口，水体主要受到淡水控制，且水面宽度变化明显，在这个河口段水龄与水体输移的路径线性增加，对于径流控制的区域，基本上可用 $L/\bar{u}$ 粗略估算水流的输运时

间,其中 L 为该点与徐六泾的距离,$\bar{u}$ 为断面平均的余流速。南北港分流口向下游至南北槽分流口区段,由于长兴岛和横沙岛的影响,水面宽度略微缩窄,水流输运速度相应增加,该段水龄的梯度略微减小。进入南北槽后,在水面变宽和潮汐混合作用多重影响下,水龄显著增加,垂向平均水龄的水平梯度变大,在该段水流输运速度减小,在南北槽下段,水龄增加的速度再次放慢。

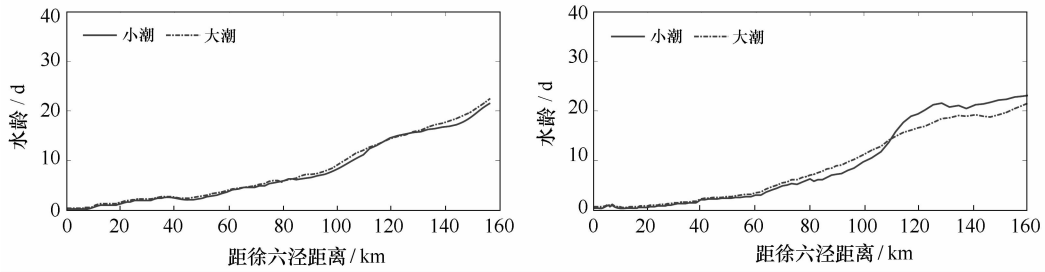

图 6　多年平均径流条件下,长江河口垂向平均水龄的沿程分布

左:北断面;右:南断面

长江河口垂向平均水龄在南北断面的大小潮过程中表现出相同的变化趋势。具体表现为多年平均流量条件下,徐六泾至南、北港分流口之间,两个纵断面大小潮全潮平均水龄几乎相等,从南北港分流口向下,大小潮差异越来越明显,南北断面,最东端大潮输移时间比小潮减小 3 d(图 6)。因此可以认为在南北港分流口以上,长江河口水流输运时间基本上由河流作用控制,向下开始逐渐受潮汐作用的影响。

从南北两个纵断面水龄沿程增加的速度可以发现在距离徐六泾约 100 km 至 120 km 之间,水龄的水平梯度最大,说明该段水流输运速度比上、下河段都慢,其出现的位置与长江口最大浑浊带及拦门沙系的主体位置一致。可以认为此段为河口水流输运时间的径流主控向潮汐控制的过渡地带,愈往下游,潮汐作用对水流输运影响愈加明显。

3.4　无潮汐作用的水龄垂向分布

为了研究长江河口潮汐作用对水流输运时间的影响,保持其他条件一致,通过改变开边界动力边界条件设置。对比数值计算和实验结果分析两种设置下长江河口水流输运时间变化,确定潮汐作用对该河口水体输运的作用。不考虑潮汐的振荡作用时,长江河口水流输运时间表现出高度的分层,在多年平均流量条件下,表底层水流输运时间相差高达 30 d(图 7)。在整个河口段主槽均可以发现表层净向海,底层净向陆的垂向环流。距离徐六泾以下 80 km 以下水龄梯度开始显著增加,水龄等值线非常密集。上述结果表明长江河口的潮汐作用是影响河口水流输运时间的关键要素,河口巨大的进潮量显著增强河口水流交换能力,影响输运格局。潮汐混合作用促进上游水体向外海输运。此外其他的研究也发现长江河口潮致余流非常明显。Wu 等[21]研究表明潮汐的非线性作用与河口浅滩的地形相互影响,潮汐作用加强,潮致余流增加,所以大潮时潮致余流大于小潮。这个结果与斜压作用占主导作用的弱潮河口不同[4]。

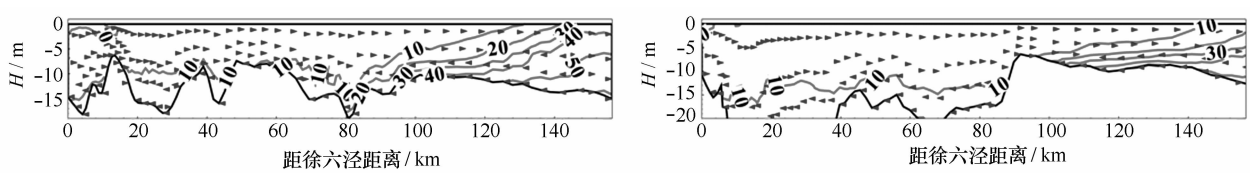

图 7　多年平均径流,无潮汐作用下长江河口水龄的沿程分布(单位:d)

左:北断面;右:南断面

3.5　无潮汐作用下垂向平均水龄的沿程分布

无潮汐作用下,垂向平均水流输运时间由潮汐作用下的 20 d 增加至 50 d,增幅 150%。同时,垂向平均水龄的沿程分布也发生了明显的变化,徐六泾向下 20 km 到 80 km 段水流输运时间缓慢增加。再向下段,水流输运显著减慢,水龄增加速度明显加快(图

8)。纵断面自上而下水龄梯度最大的过渡区域在无潮条件并未发现,说明潮汐振荡作用对最大浑浊带的形成有重要的影响。通过对比有无潮汐作用的结果发现,当潮汐作用存在的时候,由于潮汐的非线性作用和河口地形相互影响,河口浑浊带区域水龄梯度大于上下游河段,表明在这个河段,水流输运速度显著慢于上下河段,有利于泥沙在此河段堆积,为河口最大浑浊带形成提供动力支持。上述结果表明:长江河口潮汐的周期性混合作用在调节河口水流输运时间及物质输运过程起关键的作用。

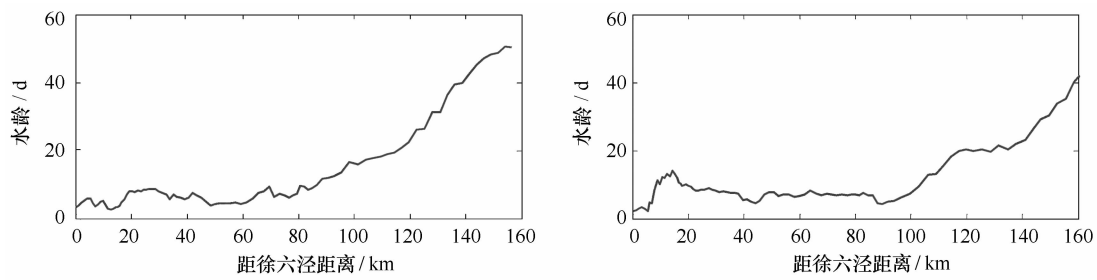

图 8 多年平均径流,无潮汐作用下长江河口垂向平均水龄的沿程分布

左:北断面; 右:南断面

4 结语

利用长江河口水动力数学模型,研究了多年平均流量条件潮汐作用对长江河口水流输运时间的影响。研究得出如下主要认识:

(1)在多年平均径流流量和潮汐作用共同作用下,水流从进入河口到南、北港分流口大约需要 4 d,到最大浑浊带海域需要 16 d,出长江口大约需要 24 d。南、北港分流口以上,长江河口水流输运时间基本由河流控制,往下游至最大浑浊带及拦门沙系存在一个水流输运速度比上、下游都慢的过渡带,再向下游潮汐影响比较明显。

(2)径流、潮汐共同作用下,长江河口水流输运时间存在明显的分层结构,小潮分层比大潮明显,表底层水龄差异,最大可达 6 d。

(3)长江河口潮汐的周期性混合作用在调节河口水流输运时间及物质输运过程起到了关键的作用,无潮条件下水龄表底差异最大可达 30 d,径流、潮汐共同作用下水龄水平梯度最大的区域消失,说明潮汐作用与河口最大浑浊带的形成有密切的关系。

本文利用水流输运概念量化河口动力过程,成功应用于长江河口。通过数值试验研究了潮汐作用,可以量化动力条件对河口关键过程影响,有助于丰富河口海岸的基本理论。本文研究仅限于多年平均流量与潮汐作用下长江河口水流输运时间分布特征,风和科氏力作用在大型分汊河口的水流输运时间作用也有十分重要的意义。

参考文献:

[1] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3:322-326.

[2] Takeoka H. Exchange and transport time scales in the Seto Inland Seas[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3: 327-341.

[3] Deleersnijder E, Campin J M, Delhez E J M. The concept of age in marine modeling:I. Theory and preliminary model results[J]. Journal of Marine Systems, 2001,28: 229-267.

[4] Shen J, Lin J. Modeling study of the influences of tide and stratification on age of water in the tidal James River[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006,68 (12): 101-112.

[5] Gong W, Shen J, Hong B. The influence of wind on the water age in the tidal Rappahannock River[J]. Marine Environmental Research, 2009,68: 203-216.

[6] 匡国瑞,杨殿荣,喻祖祥,等. 海湾水交换研究——乳山东湾环境容量初步探讨[J]. 海洋环境科学,1987,6:13-23.

[7] 朱小兵,高抒,陈妙红,等. 海南岛博鳌港水体交换的初步研究[J]. 热带海洋学报,2003,22:71-77.

[8] 姬厚德,潘伟然,张国荣,等. 贇笃湖纳潮量与海水交换时间的计算[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2006,45:660-663.

[9] 董礼先,苏纪兰. 象山港水交换数值研究:II. 模型应用和水交换研究[J]. 海洋与湖沼,1999,30(5):465-470.

[10] Liu Z, Wei H, Liu G, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. Estuarine, Coastal and Shelf

Science,2004,61:25－35.

[11] 王聪,林军,陈丕茂,等. 年平均风场作用下大亚湾水交换的数值模拟[J]. 上海海洋大学学报,2009,18(3):351－358.

[12] Bolin B,Stommel H. On the abyssal circulation of the world ocean:Ⅳ. Origin and rate of circulation of deep ocean water as determined with aid of tracers[J]. Deep-Sea Research, 1961,8:95－110.

[13] Shen J, Haas L. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2004,61: 449－461.

[14] Wang Y, Shen J, He Q. A numerical model study of the transport timescale and change of estuarine circulation due to waterway constructions in the Changjiang Estuary ,China[J]. Journal of Marine Systems, 2010,82: 154－170.

[15] 陈吉余,沈焕庭,恽才兴,等. 绪论[M]//长江河口动力过程和地貌演变. 上海:上海科学技术出版社,1988:1－4.

[16] Hamrick J M. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects[R]. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering. No. 317 College of William and Mary, VIMS, 1992:63.

[17] Leendertse J J, Gritton E C. A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas: Vol. Ⅱ, Computation Procedures[R]. Report R－708－NYC,The Rand Corporation (Santa Monica), 1971.

[18] Thatcher M L, Harleman R F. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries[R]. Massachusetts Institute of Technology, Report no. 144, 1972.

[19] 恽才兴. 长江河口潮滩冲淤和滩槽泥沙交换[J]. 泥沙研究, 1983,4: 43－52.

[20] 李九发,茅志昌,孙介民. 长江口南汇边滩及邻近水域洪季水文泥沙条件分析[M]// 长江河口动力过程和地貌演变. 上海: 上海海洋学科技出版社,1998:253－267.

[21] 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 (17):1891－1905.

The study of the transport timescale in the Changjiang Estuary

Wang Ya[1], He Qing[1], Shen Jian[2]

(1. *State Key Laboratory of Estuary & Coastal Research*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200062, *China*; 2. *Virginia Institute of Marine Science*, *College of William and Mary*, *Gloucester Point*, *VA*., 23062, *USA*)

Abstract: The water age concept is applied to the Changjiang Estuary to quantitatively study the influences of tide and river discharge on the transport timescale under the long-term mean flow discharge condition based on numerical model simulations. The study provides the spatial structure of the mean transport timescale of freshwater in the estuary. The result shows that it takes approximately 24 days for the water to be transported from the Xuliujing to the mouth of the Changjiang Estuary(122.5°E). The transport timescale is dominated by the river discharge on the upstream portion of the estuary prior to the bifurcation between the South Channel and the North Channel. The mean transport time is 8 day in this area. From the bifurcation location to the middle portion of the North Passage, both the river runoff and tide affect the transport timescale, and the transport time is about 16 days in this area, indicating that the transport rate is slower than both the upstream and the downstream. The stratification impact on transport timescale is evident in the Changjiang Estuary. A 6 day difference of transport timescale between the surface and bottom is observed. The numerical experiment results indicate that the tide is the key forcing affecting the transport timescale in the estuary, which increase exchange rate and decreased the transport time in the Changjiang Estuary. This study illustrates that the water age concept can not only be used to investigate the transport of water, but also provide the underlying hydrodynamics for the transport of pollutants and suspended sediment in the Changjiang Estuary.

Key words: the Changjiang Estuary; tidal effect; transport timescale; water age;numerical model