

长江口水沙入海通量的观测与分析

汪亚平¹, 潘少明¹, H.V. Wang², 高建华¹, 杨 旻¹, 王爱军³, 李占海⁴, 吴 中⁵

- (1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093; 2. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, Gloucester Point, VA 23062, USA; 3. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 4. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 5. 河海大学交通学院、海洋学院, 南京 210098)

摘要: 在长江口用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 进行走航式断面观测, 结果表明, 采集水样获取的悬沙浓度与 ADCP 记录的声学信号 (后向散射强度) 之间存在显著相关关系, 因此可根据 ADCP 声学数据获得沿观测断面的高时空分辨率的悬沙浓度剖面。分析结果表明, 在徐六泾附近断面以往复流占优势, 大潮期间单位时间最大水、悬沙通量值出现于涨潮期, 落潮历时较长, 落潮期水、悬沙通量分别大于涨潮期水、悬沙通量, 净通量向海。长江口南槽拦门沙外侧主要为旋转流, 涨潮期间内的水、悬沙通量均分别大于落潮期间的水、悬沙通量。2003 年 11 月 12 日的观测结果表明, 潮周期内通过徐六泾断面向海输运的水与悬沙通量分别为 10^9 m^3 和 10^8 kg 量级; 径流量与悬沙输运率分别为 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 10^3 kg/s 量级。1998 年以来徐六泾 ADCP 流量观测数据与同时间的大通径流量之间存在着显著的相关关系, 故可由大通径流量估算徐六泾径流量, 作为长江入海径流量, 以作为历史资料整编的一种手段。结果表明, 长江入海年径流总量略大于大通年径流总量; 而在枯水期间入海径流量小于大通径流量。

关键词: 径流量; 悬沙浓度; ADCP; 潮流; 长江口

1 引言

长江流域长期以来受人类活动影响较大, 水土流失日益严重, 经长江入海的细颗粒物数量巨大, 在世界各大河中位居第四^[1, 2]; 巨量的水沙输运可引起河口区域 (如河槽、三角洲等) 的地貌、沉积体系发生快速演化^[3, 4], 并对邻近海岸带及大陆架的自然环境、生态环境有重要影响^[5, 6]。因此, 长江一直是中外学者研究物质通量和循环过程的重要区域^[7-11]。尽管在这方面已经取得一些定性到定量的研究成果, 但多是根据大通站及其上游水文站的测量结果。长期以来, 长江口的科学研究和工程设计也都依赖于大通水文站的观测结果。然而, 大通水文站至长江入海口尚有 642 km, 其间仍有较大的流域系统, 其水沙交换不容忽视。此外, 由于人类活动导致的水文过程变化, 枯水期大通流量现已不能代表长江入海流量^[12]。目前大通—河口段之间的取水工程总量已达 64 个, 抽、引水的能力达 $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右, 根据不同的特性, 折合日平均抽引水能力高达 4600 多 m^3/s , 相当于历史上大通实测最低流量水平; 其实际取水量随着需求的变化波动很大, 在特枯年已对大通实测最低流量产生显著影响^[13, 14]。另外, 由于河口的“过滤器”效应, 长江径流携带的沉积物中有很大部分在河口区沉降下来, 仅有部分入海^[10, 15]。因此, 用大通水文站的水沙通量来代表河口区通量甚至入海通量都是不严格的, 尤其在人类活动影响日益加剧的情况下更是如此。

计算河口区水沙通量, 关键是获取主要控制断面的流速、悬沙浓度数据。传统的观

收稿日期: 2005-07-17; 修订日期: 2005-10-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412401); 国家自然科学基金项目 (40106009) [Foundation: National Basic Research Program of China, No. 2002CB412401; National Natural Science Foundation of China, No. 40106009]

作者简介: 汪亚平 (1972-), 男, 博士, 副教授, 从事海洋沉积动力学、自然地理学研究。E-mail: ypwang@nju.edu.cn

测方法既耗费人力物力，其空间分辨率和精度均难以令人满意^[15]。相对而言，流速的观测技术较为成熟，而悬沙浓度的观测在空间分辨率、精度等方面，均有较大的发展潜力。自 1975 年 Proni 等提出用声学技术探测海水中的悬沙浓度以来，这项技术近年来获得了较大发展^[16]。为测定流速而设计的声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, 简称 ADCP)，除了可获得三维的流速剖面数据外，其输出数据中还含有声学的浊度或悬沙浓度信息，因而可用于同步测定水沙通量。从原理上讲，用美国 RDI 公司生产的宽幅 ADCP 测量悬沙浓度可达到± 2% 的精度，考虑到海洋环境中复杂因素的影响，其测量精度实际可达目前的光学浊度计水平^[17, 18]。已有的研究表明，其测量结果可达到专用悬沙测量仪器的精度^[19, 20]；而常规浊度计或采水样的方法只能获得单点悬沙浓度数据。本项研究使用 RDI Rio Grande WHR600 型 ADCP (频率 600kHz) 在长江口徐六泾断面和口门断面作走航式观测，并同步获取水样，以确定声学—悬沙关系中的系数，获取沿断面的高分辨率的流速、悬沙浓度剖面，计算长江河口区的水沙通量。

2 研究区概况

长江是中国的第一大河，干流全长 6300 余 km，自河源至宜昌通称上游 (4500 km)，宜昌至湖口为中游 (955 km)，湖口至大通为下游 (388 km)，大通以下为感潮河段 (642 km)。以大通水文站为例，多年 (1923~2004 年间共 62 年数据) 平均径流量为 $9156 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，多年 (1951~2004 年间共 53 年数据) 平均输沙量为 $4.175 \times 10^8 \text{ t}$ 。根据不同的分类标准，河口的定义可多达 40 余种^[21]。从广义与狭义的角度来看，又可归为两种。广义河口是指“潮汐上涨所能到达的河流上界到口外海滨冲淡水有显著影响的范围”^[22]，即上文所指的感潮河段；其又可分为三个区段：(1) 近口段：安徽省大通至江苏江阴，长 400 km，基本受径流控制；(2) 河口段：江阴至口门 (拦门沙滩顶)，长 240 km，以径流、潮流相互作用为基本特征；(3) 口外海滨段：口门至 30~50 m 等深线附近，以潮流作用为主，但亦受长江冲淡水的显著影响。狭义的河口是指“河流入海处的半封闭水体，其盐度因陆地径流掺入而显著淡化”^[23]，即从徐六泾至口门拦门沙外缘的范围，全长约 160 km。20 世纪 50 年代以后徐六泾河段因大量围垦，河宽由 13 km 缩窄到 5.8 km，形成节点河段。在口门处，从启东咀至南汇咀江面宽达 90 km。长江口目前是三级分汊四口入海 (图 1)。如不特别说明，本文中河口均指狭义定义。

长江流域虽已修建大量水库，但长江干流至今仅建成一座低坝—闸坝式的葛洲坝工程，另一重大工程“三峡工程”已于 2003 年开始蓄水，将于 2009 年完成并开始全面运转。工程完成后，三峡大坝对径流和沉积物将产生一定的截留作用，即使采取疏浚或下泄高含沙量水体，也将会使长江流量、悬浮颗粒态物质 (包括化学物质) 入海通量发生时空上的变化，这种变化将可能对长江口邻近陆架及海岸带的自然环境、生态环境产生十分深远和重大的影响。在工程建设期间、完全建成以前对这些

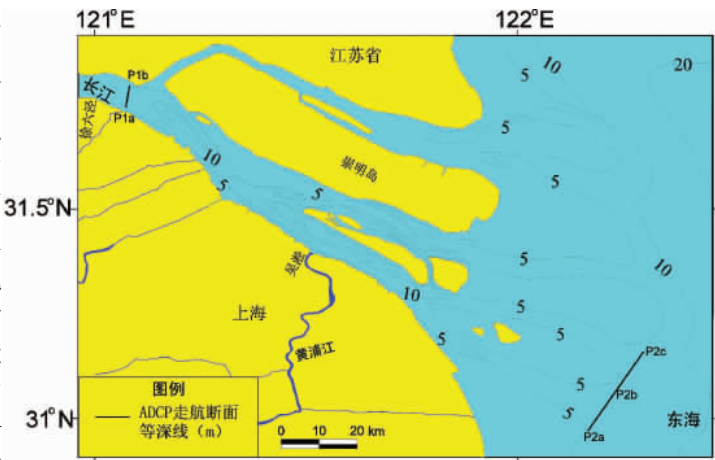


图 1 研究区位置图与野外观测断面
Fig. 1 Location map showing the study area and navigation cross-sections

问题进行现场观测与研究，不但有助于对长江水、悬浮颗粒态物质入海通量的监测与重新认识，还将有助于为评价三峡工程对自然环境、生态环境的影响提供高质量的科学数据。

3 研究方法

因徐六泾附近既是枯季盐水入侵界线^[15]，也是河口展宽的节点，因此是最合适的入河口通量观测断面。2002 年 10 月 27~28 日（小潮），2003 年 11 月 12~14 日（大潮至中潮），用 Rio Grande WHR600 型 ADCP（美国 RDI 公司产品）在长江河口区域徐六泾附近断面（P1a-P1b）及南槽拦门沙口门断面（P2a-P2b-P2c）进行走航式的观测（图 1），观测过程中按 15~30 分钟间隔同步采集水面至海底不同水层处的水样。2002 年 10 月 27~28 日，2003 年 11 月 12 日分别与 ADCP 观测同步，在 P1 断面及其附近获取了 62 个和 57 个水样，2003 年 11 月 14 日在 P2 断面采集了 34 个样品。水样经过滤获得悬沙浓度数据。

悬沙浓度与后向散射强度之间存在如下关系^[17, 19, 24]：

$$\log_{10}(C) = K + 0.1\beta E_t$$

(1)

式中： C 为悬沙浓度， E_t 为 ADCP 接收到的声学后向散射强度， K 和 β 分别为与 ADCP 换能器特性、环境背景参数（水体温盐度等）、悬沙粒径等有关系数。其中 K 可表达为^[17]：

$$K = \log_{10} \left[\frac{C_0}{\sum_i n_i \sigma_i} \right] - 0.1S_L$$

(2)

式中： n_i 是第 i 级悬沙的数量， σ_i 是第 i 级悬沙的反散射横断面面积， C_0 是与环境特征有关的常数， S_L 是与发射功率有关的参数。悬沙粒度分析结果表明，悬沙平均粒径为 0.019 mm、粒度组成较为稳定，而且在潮周期内基本保持不变，故 K 和 β 可视为常数，通过建立悬沙浓度与相应时刻水深的后向散射强度之间的关系来确定（图 2）。

ADCP 数据在导出以后，需要作 30 秒平均化处理（原始数据采集周期约为 2 秒），以去除高频噪声^[17, 29]。基于冯卡门 - 普朗特流速对数分布模型与 Rose 悬沙剖面模型及海底边界层理论^[25, 26]，和已有的 ADCP 盲区分析成果^[27]，并参考已有的长江河口区的历史观测数据，使流速与悬沙浓度在合理范围内闭合（即外插最大数值不高于最大历史观测数据），对表层盲区（约占水深 10%左右）和底部盲区（约占水深 6%左右）数据进行外插，从而可获得完整剖面的流速与悬沙浓度分布（图 3）。

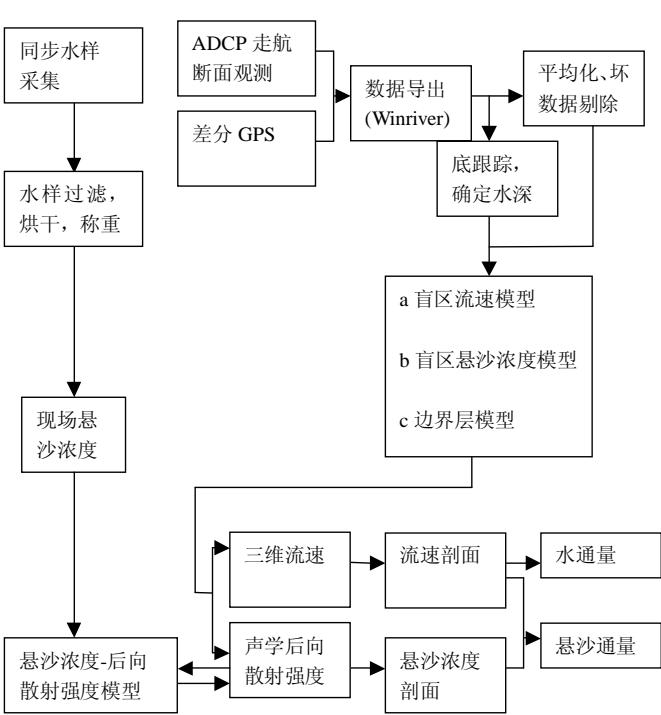


图 2 ADCP 声学悬沙浓度模型建立与水沙通量计算流程
Fig. 2 Flow diagram showing establishment of ADCP acoustic SSC model and water-sediment fluxes calculations

4 结 果

4.1 流速与悬沙剖面

因悬沙粒度、水体温盐度等环境因素是随时间和观测区域而变化的，故公式 (1) 中的参数需要每次观测时现场采集水样、建立声学模型来确定。分析结果表明，在 2002 年、2003 年的 P1、P2 断面，悬沙浓度与后向散射强度之间均存在显著的相关关系 (图 3)，相应声学模型系数见表 1。可见，系数 K 和 β 在不同的观测时段是变化的，其中的 β 范围为 0.0369~0.0986， K 范围为 -1.19~-6.54。

P1 断面河段被中央隆起沙体分割为南北两个水道。2002 年 10 月 27 日 12:00~18:00 观测了一个完整的涨潮期。涨急时刻，主流偏于南部水道，穿过断面的最大流速 (纵向流速) 达 1.1 m/s，横向流速向北，即水流流向为西偏北向 (图 4a)，与河势基本一致。此时悬沙浓度峰值出现在北水道的底部，可达 260 mg/L。因夜晚无法观测，故至 28 日 5:00~13:00 作一个完整落潮期的观测。5:34~6:08 为涨潮向落潮转换的憩流期，流速仅为 0.1m/s，悬沙浓度也较低，15 m 水深以下悬沙浓度仅为 100 mg/L (图 4b)。图 4c 显示，落潮最先从北水道开始，此时悬沙浓度最低，大多 < 100 mg/L。在落潮中期，落潮流达到最强，北水道最大流速为 1.3 m/s，15 m 水深以下最大悬沙浓度达 290 mg/L (图 4d)。

2003 年 11 月 12 日在 P1 断面作了完整涨落潮周期的观测，共获得准同步剖面 16 个。结果显示，落潮期间，主流大多停留在北水道 (图 5a)，而涨潮期间，主流从南水道向北水道移动，这种流态很可能与北岸向南凸出的地形 (或河势) 有关。涨、落潮期间，最大流速均达 1.4 m/s，但落急期间的底部悬沙浓度相对较高，可达 1800 mg/L，而涨潮期间最大仅为 1500 mg/L (图 5b, c)。其他流速较低的时期，底部悬沙浓度均 < 1000 mg/L。可见，此区域附近悬沙浓度峰值主要是由于高流速产生的再悬浮效应引起的。在涨潮向落潮转换的过程中，在中央沙脊附近出现一个流速切变的界面，其南部水流指向

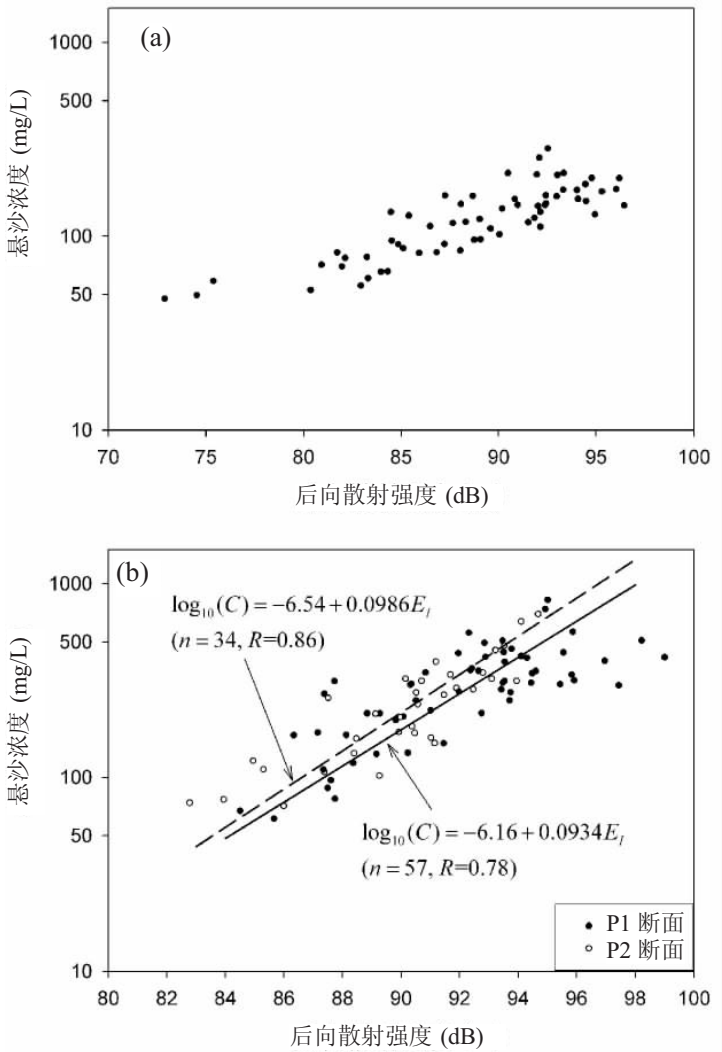


图 3 悬沙浓度与后向散射强度之间的关系: (a) 2002 年 10 月 27-28 日 P1 断面; (b) 2003 年 11 月 12-14 日 P1、P2 断面
Fig. 3 Relationship between suspended sediment concentrations and acoustic backscatters measured over cross-sections: (a) P1 on October 27-28, 2002 and (b) P1 and P2 on November 12-14, 2003

海, 而北部水道则指向上游(涨潮流), 南部向海的流速较强(图 5d, e)。此外, 在潮周期内, P1 断面的横向流速均远小于纵向流速, 表明此处以往复流占优势。

2003 年 11 月 14 日在拦门沙附近的口门断面作走航式观测。结果表明, 涨、落潮主轴均偏于北槽, 北槽口门附近的最大流速远大于南槽口门附近(图 6a, b, c, d)。本次观测到的最大涨潮流速为 1.37 m/s, 最大落潮流速为 1.54 m/s。断面上纵向流速与横向流速数值相近, 而且最大与最小值在潮周期内交替出现, 表明拦门沙附近主要为旋转流, 这与其他学者的研究结果一致^[28]。

4.2 水沙通量

通过控制断面的水、沙通量可由下式计算^[29]:

$$F_T = F_b + F_{b'} + \sum_k \sum_j \sum_i C_{i,j,k} V_{i,j,k}$$

(3)

式中: $V_{i,j,k}$ 与 $C_{i,j,k}$ 分别为第 i 水层、距离左岸距离为 j 、时刻 k 的流速与悬沙浓度, 当计算水通量时去掉 $C_{i,j,k}$ 项即可。 F_T 为在某一较短时段内(准同步走航时间长度, 远小于潮周期尺度)通过断面的水或悬沙通量; F_b 与 $F_{b'}$ 分别为该时段内通过断面两侧、走航观测未能达到的浅水区域的水或悬沙通量, 根据海底地形图、ADCP 测量的水深数据与差分 GPS 观测数据估算。

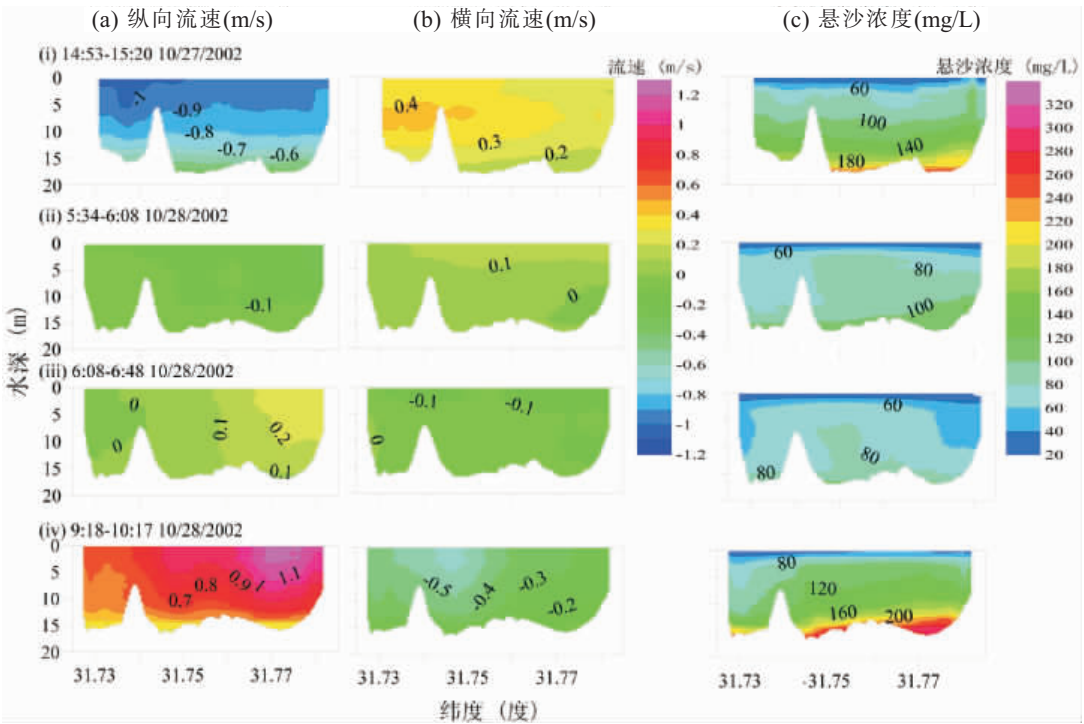


图 4 2002 年 10 月 27~28 日 P1 断面 (向海方向为正值, 向陆方向为负值)

Fig. 4 (a) Longitudinal speeds, (b) lateral speeds and (c) suspended sediment concentrations measured over P1 cross-section on October 27-28, 2002 (positive contour denotes the seaward direction and negative the landward direction)

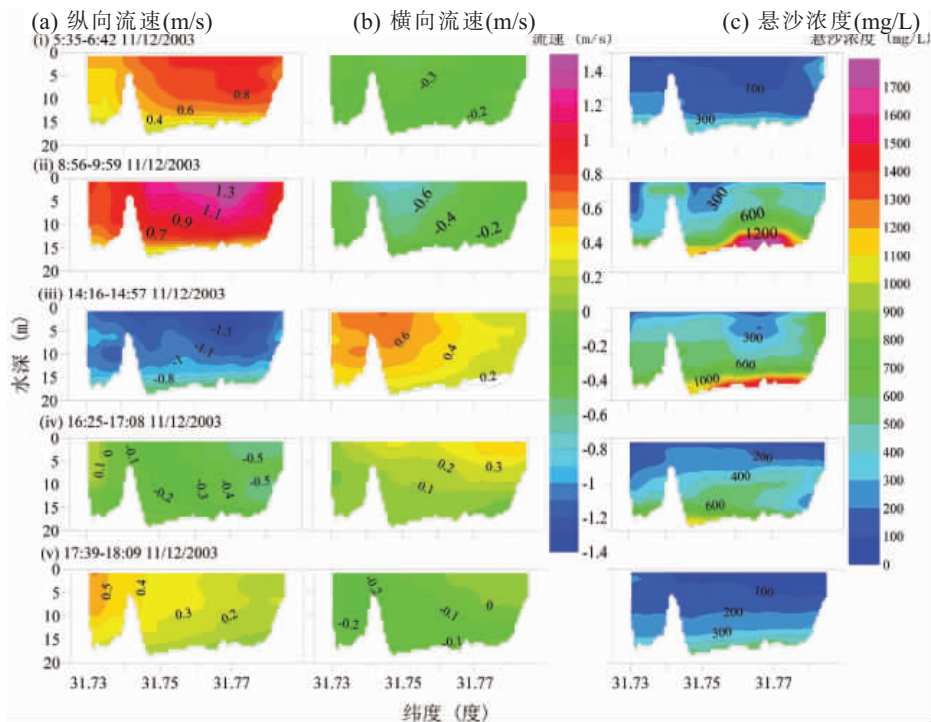


图 5 2003 年 11 月 12 日 P1 断面 (向海方向为正值, 向陆方向为负值)

Fig. 5 (a) Longitudinal speeds, (b) lateral speeds and (c) suspended sediment concentrations measured over P1 cross-section on November 12, 2003 (positive contour denotes the seaward direction and negative the landward direction)

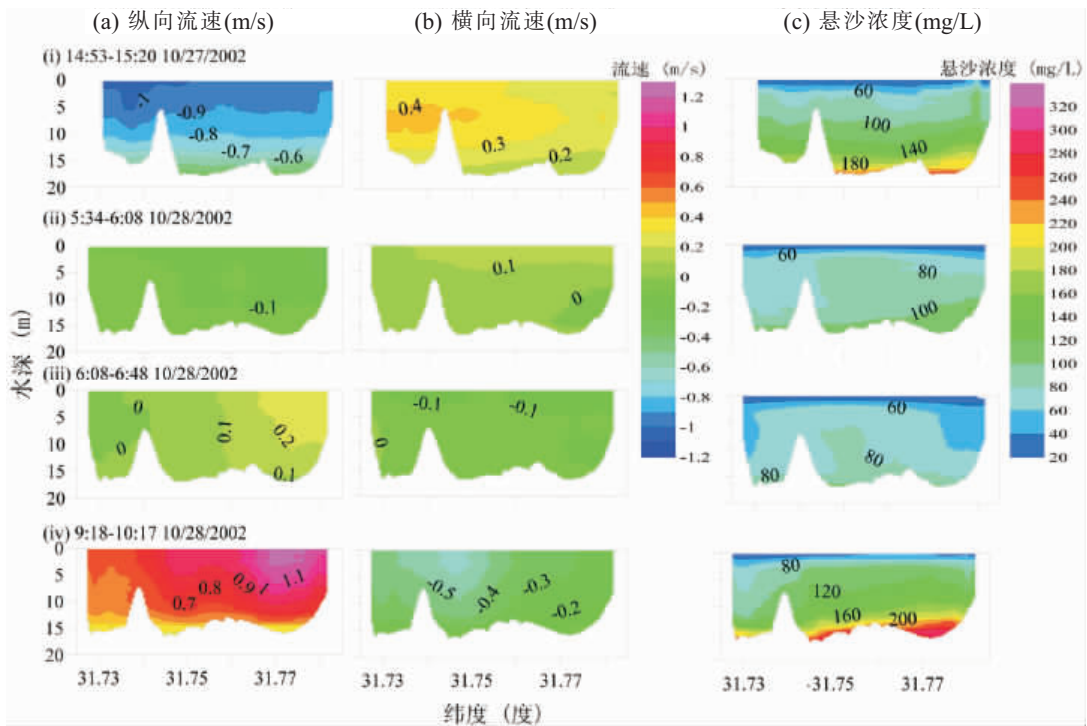


图 6 2003 年 11 月 14 日 P2 断面: (向海方向为正值, 向陆方向为负值)

Fig. 6 (a) Longitudinal speeds, (b) lateral speeds and (c) suspended sediment concentrations measured over P2 cross-section on November 14, 2003 (positive contour denotes the seaward direction and negative the landward direction)

表 2 长江口断面在潮周期内的水-悬沙通量 (北京时间; 垂直断面向海方向为正, 向陆方向为负)
Tab. 2 Water and suspended sediment fluxes during tidal cycles over cross-sections in Changjiang Esutary (in Beijing Time; positive value denotes the seaward direction and negative the landward direction)

断面名称	日期 (年/月/日)	时间 (时:分)	水通量 (10^9 m^3)		水净输运量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)	悬沙通量 (10^8 kg)		净悬沙输运率 (10^3 kg/s)
			涨潮	落潮		涨潮	落潮	
P1	2002/10/27	12:29-18:13	-1.07			-1.22		
	2002/10/28	5:36-12:38		+1.91			+2.04	
	2003/11/12	5:00-18:36	-0.64	+1.35	+0.71	+1.46	-1.80	+4.30
P2ab	2003/11/14	7:00-15:41	-2.26	+1.57?		-8.14	+4.51?	+2.50
P2bc	2003/11/14	5:43-16:32	-1.44	+0.93?		-6.58	+3.45?	+5.11

径、潮流的相互消长, 流速与悬沙浓度在一个潮周期内随时间变化, 通过断面的水、沙通量的数值取决于此二者的时空组合。在 P1 断面, 2002 年 10 月 27 日的一个涨潮期, 水、悬沙通量分别随流速增大而增大, 在涨急期间 16:00 左右均达到最大, 分别为 $82.83 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10.83 \times 10^3 \text{ kg/s}$ (图 7), 整个涨潮期水通量与悬沙通量分别为 $1.07 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $1.22 \times 10^8 \text{ kg}$ (表 2); 10 月 28 日的一个落潮期, 通过断面的水、悬沙通量最大值出现的时刻不一致, 前者出现在落急 11:00 左右, 而后者则在其之后出现, 而且从数值上看, 均分别小于 10 月 27 日涨潮期的水、悬沙通量 (图 7)。然而, 徐六泾附近落潮时间远大于涨潮时间, 完整落潮期内水、悬沙通量亦大于涨潮期内的水、悬沙通量 (表 2)。在计算完整潮周期内的水沙通量时, 采取水位闭合的原则, 即起始时刻的水位与结束时刻的水位一致 (图 8a)。2003 年 11 月 12 日在 P1 断面潮周期内 (大潮) 的观测结果与 2002 年 10 月 27~28 日的结果类似, 单位时间最大水、悬沙通量出现于涨潮期, 潮周期内的水、悬沙通量以落潮期的结果为大 (图 8b, c), 故净通量均向海方向输运, 其中水净输运量为 $1.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ (表 2), 与当天大通流量 ($1.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$) 大致相当; 通过 P1 断面的净悬沙输运率为 $5.11 \times 10^3 \text{ kg/s}$ (表 2)。

在长江口拦门沙外侧的 P2 断面, 涨、落潮期单位时间内通过断面的水、悬沙通量量级大致相当, 但涨潮期间内的通量数值显著大于落潮期的结果, 加之该区域涨、落潮时间相差较小, 表明观测期间 (中潮) 水、悬沙可能由外海通过 P2 断面向南槽方向净输运 (图 9, 表 2)。

4.3 长江口入海流量

大通水文站早在 1923 年就有流量观测资料, 自 1951 年始有完整的水、沙观测资料 (仅 1952 年缺悬沙观测); 而徐六泾及其附近较则是最近几年来才开始进行完整的水、沙通量观测, 尤其精确的 ADCP 观测是 1998 年以后才陆续引进的, 故数据时间系列较短。

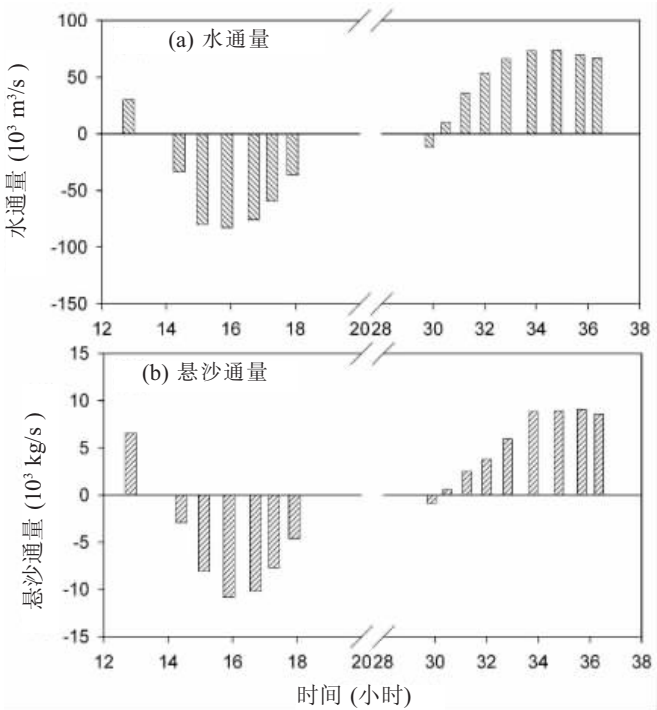


图 7 2002 年 10 月 27-28 日 P1 断面
Fig. 7 (a) Water fluxes and (b) suspended sediment fluxes measured over P1 cross-section on October 27-28, 2002

建立大通站水沙通量与徐六泾站水沙通量之间的关系, 将使较长时期的长江入海水沙通量的研究成为可能。已有的研究结果和数值计算模型结果表明, 长江口内的余流主要是由径流组成(沈焕庭等, 2003), 尤其在观测期间, 无大风、风暴潮等异常天气过程, 风生流、热盐环流和潮致余流与径流相比其量级非常小, 可忽略不计。故可将潮周期内通过断面的余流(或水净输运量)作为单位时间内的径流量。

根据徐六泾水文站以及本项目组自 1998 年以来用 ADCP 观测的共 78 个完整潮周期的流量数据, 建立河口区径流量的估算关系式:

$$Q_x = 0.893 \times Q_d + 3992$$
$$n = 78, R = 0.92 \tag{4}$$

$$Q_x = 21681 \times \ln(Q_d) - 189334$$
$$n = 78, R = 0.92 \tag{5}$$

式中: Q_x 、 Q_d 分别为徐六泾站及大通站单位时间内穿过断面的水通量(即径流量), n 为数据个数, R 为相关系数。二者的相关系数在 0.01 的水平上显著相关, 故徐六泾站及大通站的径流量之间存在着显著的相关关系(图 10)。部分较离散的数据点, 可能与洪枯季径流在河道中的传播过程不同、径流的测量误差等有关。根据此关系式, 可由大通径流量获得进入河口区的径流量, 作为长江入海径流量(表 3)。从数据的离散程度看, 当大通流量大于 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 线性拟合结果式更能吻合二者之间的关系, 故文中采用(4)式计算(图 10b); 当大通流量小于 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 对数拟合结果与数据吻合较好(图 10c), 故采用(5)式计算。

长江流域的气候具有显著的季节变化, 故降水、径流量也呈季节

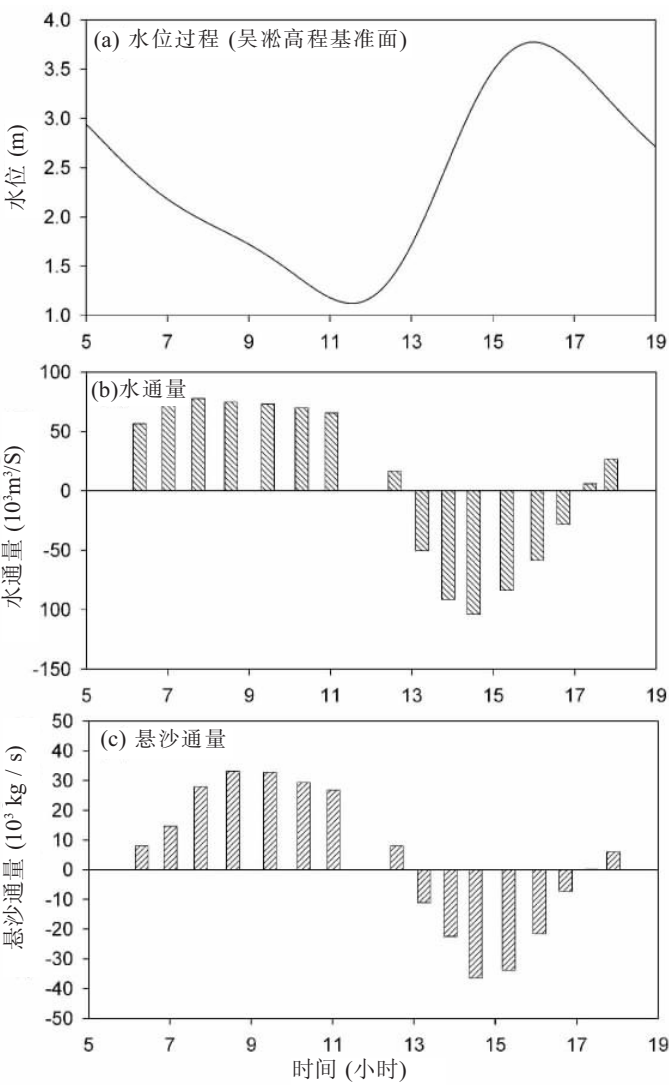


图 8 2003 年 11 月 12 日 P1 断面

Fig. 8 (a) Time series of water level, (b) water fluxes and (c) suspended sediment fluxes measured over P1 cross-section on November 12, 2003

表 3 1998–2004 年大通与徐六泾径流总量
Tab. 3 Total water discharges at Xuliujing and Datong stations in 1998–2004

时间 (年)	大通 (10^{12} m^3)				徐六泾 (10^{12} m^3)			
	枯季	过渡	洪季	年	枯季	过渡	洪季	年
1998	0.24	0.13	0.88	1.24	0.28	0.15	0.86	1.29
1999	0.12	0.12	0.80	1.04	0.13	0.14	0.79	1.06
2000	0.17	0.14	0.61	0.93	0.21	0.17	0.63	1.01
2001	0.16	0.12	0.55	0.83	0.20	0.14	0.59	0.93
2002	0.15	0.12	0.72	0.99	0.18	0.15	0.72	1.05
2003	0.18	0.11	0.64	0.92	0.23	0.13	0.65	1.01
2004	0.13	0.10	0.57	0.79	0.14	0.12	0.60	0.86
平均	0.16	0.12	0.68	0.96	0.20	0.14	0.69	1.03

变化^[15]。将 5~10 月作为洪季，1~3 月和 12 月作为枯季，4 月和 11 月为过渡期，计算 1999~2004 年大通与徐六泾径流总量。结果表明，枯季和过渡期，徐六泾径流总量略大于大通径流总量，而洪季则二者大致相当。此外，徐六泾年径流总量略大于大通站的年径流总量，可能与大通至徐六泾河段之间的流域盆地积水、陆地径流有关。

以大通流量 $< 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 为长江下游枯水期标准，统计结果表明，2000~2003 年均未出现显著的枯水期，仅在 2002 年 1 月 10 日至 2 月 25 日，大通流量较低，约为 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。1998、1999 及 2004 年，枯水期分别出现约数天、半月、一个月，在此期间，徐六泾平均流量比大通平均流量小 400-800 m^3/s (表 4)。从 (5) 可知，当大通流量大于 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，徐六泾流量大致与之相当，而当大通流量小于 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，随着流量降低时，徐六泾的流量下降幅度增大。例如，大通流量为 $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，徐六泾流量为 $8070 \text{ m}^3/\text{s}$ ，比大通下降了约 10%。

研究表明，由于大通以下枯季流域内调水、抽引水等工程，枯季月平均减少流量可达到 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上^[13]。长江大通以下地区目前规划实施中的各大引水工程(如引江济太工程、江水北调工程中的泰州引江工程以及南水北调东线工程等)，将使 2030 年以后大通以下长江的抽引水流量达到 $5416 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[13, 14]。由于抽引水工程等导致入海流量的降低，将可能造成长江口盐水入侵的频率与强度增加^[12, 30]。因此，今后应当建立长江枯季入海流量的监测系统，对沿江抽引水量开展详细调查，高度重视研究大通以下长江径流量的变化。

5 结论

(1) 在长江口用 ADCP 进行走航式断面观测，并同步采集不同水层与时间的水样获取悬沙浓度。分析结果表明，悬沙浓度与后向散射强度之间存在显著的相关关系，故可将后向散射强度数据转换为高时空分辨率的悬沙浓度剖面。因此，在咸淡水交汇、悬沙浓度较高的河口区用 ADCP 进行悬沙浓度观测，甚至是水沙通量的监测是可行的。

(2) 2002 年 10 月小潮期与 2003 年 11 月大潮期在徐六泾附近 P1 断面的观测结果表明，该断面以往复流占优势。单位时间最大水、悬沙通量出现于涨潮期，但落潮期间的

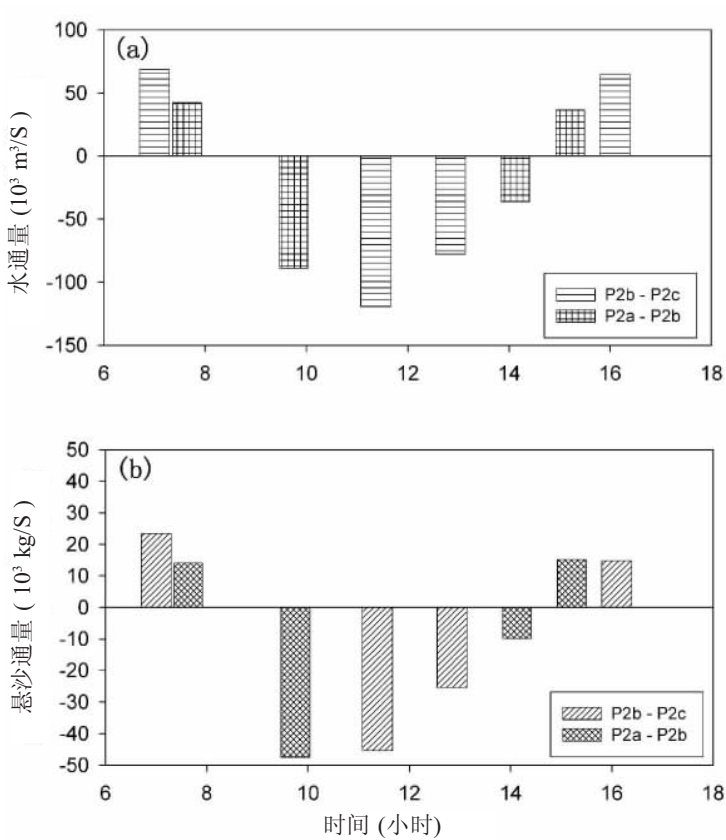


图 9 2003 年 11 月 14 日 P2 断面：(a) 水通量；(b) 悬沙通量
Fig. 9 (a) Water fluxes and (b) suspended sediment fluxes measured over P2 cross-section on November 14, 2003

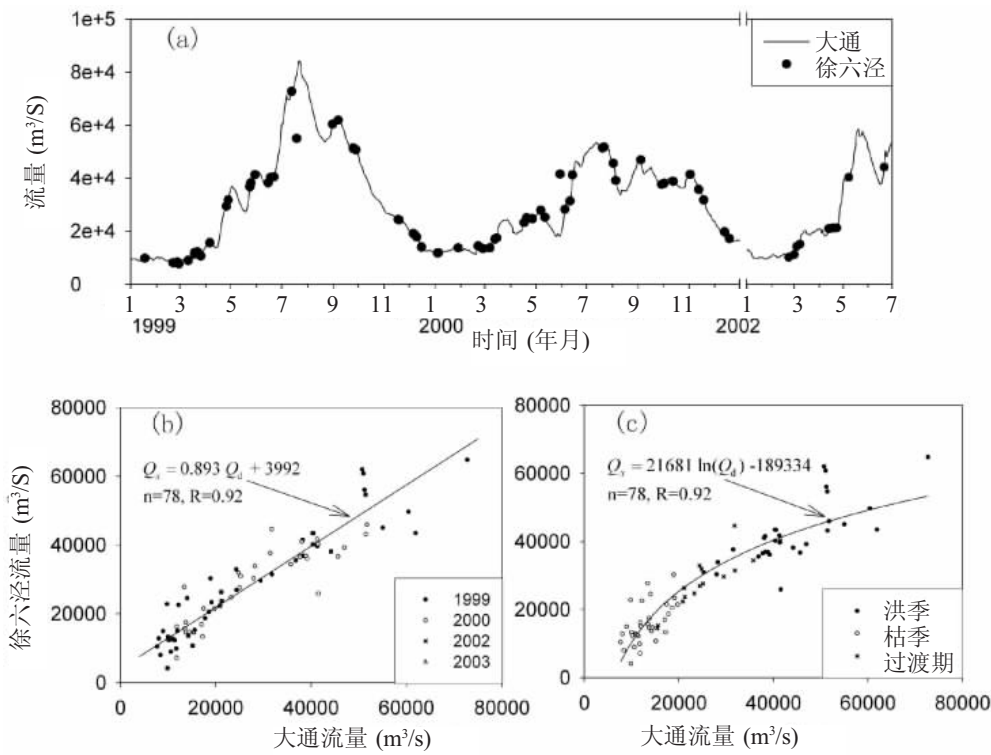


图 10 徐六泾与大通径流量之间的关系：(a) 时间系列；(b) 线性拟合；(c) 对数拟合
Fig. 10 Relationship between water discharges measured at Xuliujing and Datong Stations:
(a) time series, (b) linear fitting and (c) logarithm fitting

水、悬沙通量较大，净通量均向海方向运输，其中水净输运量为 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 量级，净悬沙输运率为 10^3 kg/s 量级。2003 年 11 月中潮期间长江口南槽拦门沙东侧 P2 断面观测结果表明，涨潮期间内的水、悬沙通量均分别大于落潮期间的水、悬沙通量。

(3) 徐六泾断面流量与大通流量之间存在着显著的相关关系，从而可由大通流量计算出徐六泾流量，作为长江入海流量。用此方法估算的 1998~2004 年长江入海年径流总量为 $0.86\sim1.29\times10^{12} \text{ m}^3$ ，略大于相应年份的大通年径流总量。而当大通流量小于 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 的枯水期间，入海径流量均小于大通径流量。

表 4 1998–2004 年大通与徐六泾枯水期
(大通流量 $< 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$) 平均流量

Tab. 4 Mean water discharges at Datong and Xuliujing stations during dry period (water discharges $< 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ at Datong Station) in 1998–2004

时间 (年)	枯水期	大通 ($10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)	徐六泾 ($10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)
1998	12/27-12/31	0.93	0.89
1999	1/1-3/16	0.91	0.83
2004	1/31-3/4	0.91	0.84

致谢：南京大学高抒教授、华东师范大学丁平兴教授、程和琴教授为野外工作提供了支持与协助；贾建军、蒋智勇、左浩、王柳柱参加野外观测，刘运令帮助查找部分参考文献。一并致谢！

参考文献 (References)

[1] Shi Y L, Yang W, Ren M E. Hydrological characteristics of the Changjiang and its relation to sediment transport to the sea. Continental Shelf Research, 1985, 4(1): 5-15.
[2] Milliman J D, Sheng H T, Yang Z S et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 37-45.
[3] Chen J Y. Notes on the development of the Yangtze Estuary. Acta Geographica Sinica, 1957, 23(3): 241-253. [陈吉余.

- 长江三角洲江口段的地形发育. 地理学报, 1957, 23(3): 241-253.]
- [4] Chen J Y, Zhu H F, Dong Y F et al. Development of the Changjiang estuary and its submeraged delta. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1/2): 47-56.
- [5] Su J L, Wang K S. Changjiang river plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay. *Continental Shelf Research*, 1989, 9(1): 93-111.
- [6] Yang Z S, Milliman J D, Fitzgerald M G. Transfer of water and sediment from the Yangtze River to the East China Sea, June, 1980. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, 40(suppl.): 72-82.
- [7] Lin Chengkun. A study on the source and quantity of sediment at the Yangtze River Estuary. *Journal of Sediment Research*, 1984, (2): 22-32. [林承坤. 长江口泥沙的来源分析与数量计算. 泥沙研究, 1984, (2): 22-32.]
- [8] Lin Chengkun. The amount and transport of cohesive sediments in the Changjiang River estuary and its near sea. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(2): 108-118. [林承坤. 长江口及其邻近海域粘性泥沙的数量与输移. 地理学报, 1992, 47(2): 108-118.]
- [9] Cheng Tianwen, Zhao Chunian. The estimation of discharge and loads from the rivers flowing into littoral seas of China. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(4): 418-427. [程天文, 赵楚年. 我国沿岸入海河川径流量与输沙量的估算. 地理学报, 1984, 39(4): 418-427.]
- [10] Shen Huanting, Zhang Chao, Mao Zhichang. Patterns of variations in the water and sediment fluxes from the Changjiang River to the estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(3): 288-294. [沈焕庭, 张超, 茅志昌. 长江入河口区水沙通量变化规律. 海洋与湖沼, 2000, 31(3): 288-294.]
- [11] Wright L D. Dispersal and deposition of river sediments in coastal seas: models from Asia and the tropics. *The Netherlands Journal of Sea Research*, 1989, 23: 1-40.
- [12] Chen Xiqing, Chen Jiyu. Proposal to study and control of the decrease tendency in discharge of the Changjiang River entering the sea in the dry season. *Science and Technology Review*, 2000, (2): 39-40. [陈西庆, 陈吉余. 关于研究与控制长江枯季入海流量下降趋势的建议. 科技导报, 2000, (2): 39-40.]
- [13] Zhang Erfeng, Chen Xiqing. Changes of water discharge between Datong and the Changjiang Estuary during the dry season. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 231-238. [张二凤, 陈西庆. 长江大通 - 河口段枯季的径流量变化. 地理学报, 2003, 58(2): 231-238.]
- [14] Chen Jiyu, Chen Xiqing. Impacts and Countermeasures of the South-to-North Water (East Route) Diversion Projects on the Ecosystem and Environment of the Yangtze Estuary. Shanghai: East China Normal University Press, 2003. [陈吉余, 陈西庆. 南水北调 (东线) 对长江口生态环境影响及其对策. 上海: 华东师范大学出版社, 2003.]
- [15] Shen Huanting et al. Material Flux of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2001. [沈焕庭 等. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社, 2001.]
- [16] Lynch J F, Gross T F, Sherwood C R et al. Acoustical and optical backscatter measurement sediment transport in the STRESS experiment. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(4): 337-366.
- [17] Wang Yaping, Gao Shu, Li Kunye. A preliminary study on suspended sediment concentration measurements using an ADCP mounted on a moving vessel. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 758-763. [汪亚平, 高抒, 李坤业. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 758-763.]
- [18] DRL. Measurement of suspended solids using Acoustic Doppler Current Profilers. Technical Report of Dredging Research Ltd., UK. 2000.
- [19] Wang Y P, Chu Y S, Lee H J. Estimation of suspended sediment flux from Acoustic Doppler Current Profiling along the Jinhae Bay entrance. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(2): 16-27.
- [20] Glenn P H, Thorne P D, Flatt D et al. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 1999, 19: 421-441.
- [21] Dyer K R. Estuaries: A Physical Introduction (2nd edn.). England: John Wiley & Sons, Ltd., 1997.
- [22] Fairbridge R W. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olausson E, Cato I (eds.), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, 1980. 1-36.
- [23] Pritchard G L. Observations of circulation in coastal plain estuaries. In: Lauff G H (ed.), *Estuaries*, American Association for the Advancement of Science, 1967.
- [24] Thevenot M M, Kraus N C. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary. *Journal of Marine Environment Engineering*, 1993, 1: 65-79.
- [25] Soulsby R. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. London, Thomas Telford, 1997.
- [26] van Rijn L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam, Aqua Publications. 1993.
- [27] Wang Aijun, Wang Yaping, Gao Shu. Determination of current velocity in blank layer of ADCP. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (10): 77-82. [王爱军, 汪亚平, 高抒. 声学多普勒流速剖面仪盲区数据处理及其在长江河口区的

应用. 水利学报, 2004, (10): 77-82.]

- [28] Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2004. [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [29] Wang Yaping. Sediment dynamics in Jiaozhou Bay and adjoining areas. Ph.D Thesis. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000. [汪亚平. 胶州湾及邻近海区沉积动力学. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2000.]
- [30] Shen Huanting, Mao Zhichang, Zhu Jianrong. Saltwater Intrusion in the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2003. [沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵. 北京: 海洋出版社, 2003.]

Measurements and Analysis of Water Discharges and Suspended Sediment Fluxes in Changjiang Estuary

WANG Yaping¹, PAN Shaoming¹, WANG H.V.², GAO Jianhua¹,
YANG Yang¹, WANG Aijun³, LI Zhanhai⁴, WU Zhong⁵

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, Gloucester Point, VA 23062, USA;

3. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;

4. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

5. College of Transportation, College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An RDI WH600 ADCP has been deployed on a moving vessel for the water and suspended sediment fluxes measurements in the Changjiang Estuary. The acoustic signals recorded have a significant relationship with the suspended sediment concentrations (SSCs) obtained by in-situ water sampling during the measurements. Then the acoustic SSC models established were used to convert ADCP acoustic signals into high-resolution SSCs along the cross-sections at Xuliujing and the bar shoal at South Trough in the Changjiang Estuary. The analysis of current velocity profiles shows that the study area is characterized by the rectilinear current at the Xuliujing area. The maximum water and suspended sediment fluxes present during the flood period. However, since the ebb period is much longer than the flood period and the river discharge is huge, the water and suspended sediment fluxes are larger during the ebb than those during the flood. Thus, the net water and suspended sediment transport towards the sea. For example, the net water and suspended sediment are $0.71 \times 10^9 \text{ m}^3$ and $2.5 \times 10^8 \text{ kg}$ during a tidal cycle on November 12, 2003, respectively. Nevertheless, the current is with a rotary pattern at the bar shoal at South Trough of the Changjiang Estuary. The surveyed data also shows that the water and suspended sediment fluxes are larger during the flood than those during the ebb. We also find that a significant relationship exists between the water discharge measured at Datong Station and that at Xuliujing cross-sections from 1998 to 2004. Hence, the derived equations could be used to estimate the daily water discharge through Xuliujing, which can represent the discharge into the sea from the Changjiang River. And the historic water discharge into the sea can be retrieved by using this method. In addition, the annual water discharge into the sea is slightly larger than the annual discharge at Datong Station. However, during the dry period (water discharge $< 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ at Datong Station), the discharge into the sea is smaller than that measured at Datong Station, which may be resulted from the human activities.

Key words: river discharge; suspended sediment concentration; ADCP; tidal current; Changjiang