

ADP 在太湖沉积物再悬浮分析中的应用*

罗 澈 葱^{1,2} 张 发 兵^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

提 要 分析太湖的悬浮物浓度时, 使用传统的过滤与称重的方法, 难以在短时间内取得大量的数据, 并且进行大范围调查时困难较多, 特别是在计算悬浮物浓度随时间的变化率时, 根据导数的定义其时间间隔应足够小, 此时上述方法显然难以得出较为准确的结果. 本文从声学后散射原理出发, 通过对声学多普勒三维流速仪 (ADP) 所接收的回声强度在传播距离上的校正, 得出了当悬浮物粒径组成较为稳定时, 该强度能反映水体中悬浮物浓度 (SSC) 的结论, 并基于 2002 年在太湖乌龟山的一次为期一周的湖流观测结果, 分析了经校正后的回声强度与太湖中悬浮物浓度间的指数相关关系, 通过实测资料对上述关系进行了验证, 结果表明该经验公式适用于太湖, 其回声强度的变化能反映水体中 SSC 的变化规律, 为大范围调查水体中悬浮物浓度提供了更加快速而有效的方法.

关键词 ADP SSC 太湖 回声强度

分类号 P343.3

声学多普勒三维流速仪 (ADP) 是基于适用海洋观测的 ADCP 而开发出的, 其最初的开发目的是用以测量海岸、湖泊和河道河口等浅水区域的水流速度, 但由于其基于声学多普勒后散射原理, 因此现已被广泛应用于观测水体中悬浮物浓度^[1-4], 鱼类的活动^[5], 生物量的变化^[6-11], 水的流量变化^[12,13], 水体表面波动^[14], 风速风向^[15]以及海平面变化^[16,17]等, 特别是对水体中悬浮物浓度 (SSC) 的测量, 在技术上已经较为成熟, 其精度能与专用测沙仪相媲美^[1].

在浅水湖泊生态系统的研究中, 悬浮物中相当部分是由于风浪扰动和底流作用而从底泥进入水体, 在适当条件下释放营养盐, 能从很大程度上影响水环境的变化, 因此在太湖中对沉积物再悬浮的动力机制的研究至关重要. 当沉积物进入水体以后, 在重力与浮力的作用下, 会产生沉降, 而受水体水平平流的影响时, 出现迁移扩散现象, 导致水体中营养盐分布在时间与空间上的不均匀性, 这也是太湖中蓝藻水华爆发呈现出季节性和区域性特征的原因之一. 因此, 必须弄清太湖水体中 SSC 的时空变化规律, 为此应进行不同区域的时间序列观测, 但是仅依靠传统的采样、抽滤及称重等步骤难以满足需要, 且存在困难大和成本高的缺点. 目前国内外能连续进行时间序列 SSC 数据采集的主要仪器可以分为两类,

* 中国科学院 (KZCX1-SW-12) 和国家自然科学基金 (40071019) 联合资助.

2003-02-01 收稿; 03-04-20 收修改稿. 罗澈葱, 男, 1972 年生, 博士研究生.

一类基于光学原理, 如浊度仪^[18,19], 光学后散射探测器 (OBS)^[20-22] 等; 一类基于声学后散射原理, 如声学后散射探测器 (OABS)^[23-27] 和多普勒三维流速仪 (ADP & ADCP) 等. Glenn^[28] 等曾对上述两类仪器对 SSC 的测量精度进行过对比, 发现在非潮汐期间二者所采集的数据序列间的相关系数达 0.81, 而潮汐期间相关系数可达 0.94, 进一步证明了通过 ADP 回声强度来决定水体中 SSC 的可靠性. 本文通过对 ADP 所接收的回声信号的强度分析, 在进行衰减校正后, 初步建立了关于该回声强度与太湖水体中 SSC 的经验公式, 结果表明, 二者之间存在指数关系, 为大范围长时间调查 SSC 提供了快速有效的方法.

1 观测位置与方法

2002 年 7 月 23—28 日的观测点位于太湖中北部的乌龟山附近 (见图 1), 该处观测水深约为 2.5m, 水域开阔, 风浪发育无阻挡, 且湖沿岸对流场的影响不大. 流速测量采用适合于浅水的声学多普勒剖面仪 (ADP), 频率为 1.5MHz, 最大探测深度为 25m 左右, 剖面时间间隔设为 60s, 垂直方向以 20cm 分辨率共分成 12 层. ADP 通过钢管伸出固定在观测平台外, 垂直正立置于水中, 有效排除了观测平台对湖流及回声强度的影响. ADP 通过信号线与计算机串行口相连, 采集软件为 River-Surveyor 3.33, 采集完成后通过 ViewADP 3.92 直接处理, 可输出三维流场、方差、信噪比 (信号与噪音的比值) 及回声强度等数据.

2 通过 ADP 回声强度确定悬浮物浓度的理论依据

ADP 不断发射脉冲声波, 经过湖水中悬浮物质的散射后返回, 被 ADP 三个声学传感器接收 (见图 2), 该信号的强度称回声强度 (echo intensity), 在消除了信号随传播距离的衰减后, 经校正的回声强度可反映水中悬浮物的浓度, 其理论基础源于声学后散射原理^[2,29], 定义单位水体体积的后散射强度为 S_v , 则其表达式如下^[1, 29]:

$$S_v = 10 \lg S + 10 \lg(C) - 10 \lg(C_0) \quad (1)$$

其中 S 为总后散射截面, C 为悬浮物浓度, C_0 为环境参数, 若悬浮物中粒径不均匀, 可将其分成不同等级 (等级数为 n), 令每等级颗粒的后散射截面为 s_i , 颗粒数量为 n_i , 则式 (1) 可表述为:

$$S_v = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n n_i s_i \right) + 10 \lg(C) - 10 \lg(C_0) \quad (2)$$

在悬浮物中粒径组成稳定的情况下, 上式中 s_i 和 n_i 可取为常数. ADP 声学信号在距离上呈指数衰减的表达式为:

$$E = E_0 - 20 \lg(D) - 2\alpha D \quad (3)$$

E 为 ADP 传感器接收到的回声强度, E_0 为校正强度, D 和 α 分别代表传感器至所测水层单元的垂直距离和水体对声波的吸收系数. 而校正强度 E_0 、声源强度 S_0 和后散射强度 S_v 间的关系可用式 (4) 表述:

$$E_0 = k(S_v + S_0) \quad (4)$$

k 为常系数, 联立方程 (2) 和 (4) 可得,

$$\lg(C) = \frac{E_0}{10k} + b \quad (5)$$

其中常数 b 的表达式为:

$$b = \lg \frac{C_0}{\sum_{i=1}^n n_i S_i} - \frac{S_0}{10} \quad (6)$$

由式 (5) 可看出, 悬浮物浓度 C 与校正后的回声强度 E_0 呈指数关系.



图 1 2002 年 7 月 23-28 日波流观测点(三角形)

Fig.1 Mooring site for observation during 23-28 July 2002

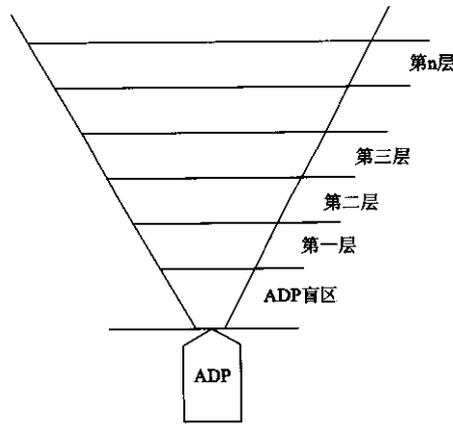


图 2 ADP 工作示意图

Fig.2 ADP beam geometry

3 水体波吸收系数的确定

因 ADP 所接收到回声强度没有消除距离的衰减, 故必须在式 (3) 的基础上予以校正, 然后才能建立校正后的回声强度与 SSC 间的相关关系. 式 (5) 中 b 及 k 在相同环境中可取常数, 故该式亦可写成如下形式:

$$\lg C = A(E + 20 \lg D + 2 \alpha D) + B \quad (7)$$

其中 C 为根据回声强度计算出的悬浮物浓度, A 和 B 为仅依赖于观测环境的常数, E 代表 ADP 所接收到的未经校正的信号强度 (单位为 dB), D 为观测点水深, α 为待求的水体对声波的吸收系数. 在观测期间, 7 月 28 日上午 9:00 在分别位于水下 50cm 和 75cm 的位置采样分析后的 SSC 俱为 10mg/L, 其相应的回声强度分别为 80.697dB 和 77.113dB, 将以上数据分别代入式 (7), 两式相减可得观测时刻太湖水体对声波的吸收系数为 0.042dB/m, 然后根据式 (3) 可将所有回声强度进行校正.

4 悬浮物浓度 (SSC) 的实验室测定

与 ADP 湖流测量同步采不同深度的水样, 在实验室中分析其 SSC, 测定时取水样 250mL, 用 0.45 μm 孔径的滤膜过滤后, 置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中烘干, 称重后依下式进行计算,

$$C = (m_2 - m_1) \times 4 \times 1000 \quad (8)$$

上式中, C 为悬浮物浓度 (单位为 mg/L), m_1 、 m_2 分别为过滤前滤膜的重量和过滤烘干后滤膜与悬浮物的重量. 对 SSC 结果进行分析, 发现当风速增大至 5.0m/s 以上时, 底层 SSC 明显增大, 但在从下往上的垂直方向上并没出现依次递减的规律, 而是上层和下层较大, 中间相对较小, 可能与上层受湍流波动影响而下层与底泥直接进行交换有关. 考虑到 ADP 有效信噪比的极限及其所测有效深度与取样深度的吻合程度, 本文中仅取经实验室分析的 51 组 SSC 数据进行回归分析.

5 回声强度与 SSC 间的相关分析

根据式 (7), SSC 与经过水深校正的回声强度间的关系可表示为

$$\lg(C) = A E_0 + B \quad (7)$$

其中 C 与 E_0 的含义与式 (5) 中相同. 通过对 SSC 的对数与 E_0 的拟合, 可得到如下关系式,

$$\lg(C) = -0.55184 + 0.02561 E_0 \quad (8)$$

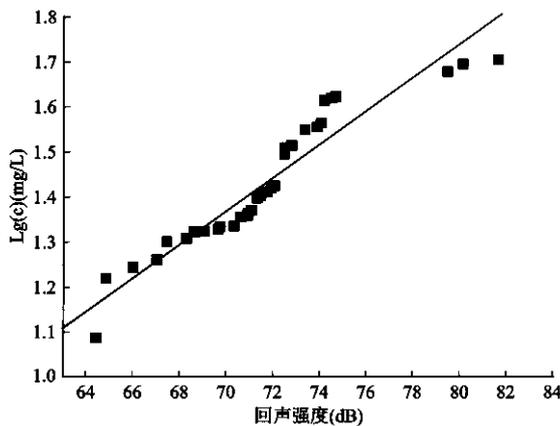


图3 SSC 与回声强度间的拟合曲线

Fig.3 Relationship between suspended sediment and echo intensity

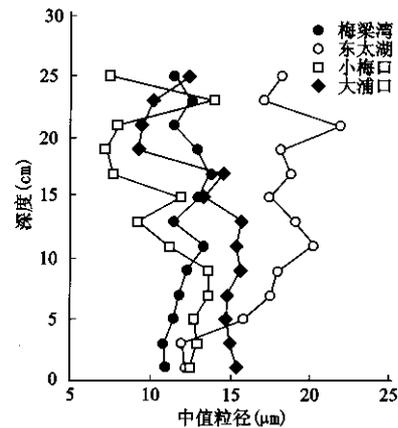


图4 太湖不同区域中值粒径的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of medium-size sediment in different areas of Lake Taihu

其拟合曲线见图 3, 相关系数为 0.75, 达到 0.01 的显著性水平, 说明在太湖中用 ADP 回声强度来确定 SSC 具有可靠性. 汪亚平等^[1]曾通过 10s 和 30s 平均的校正回声强度对胶州湾的实测悬沙浓度进行了拟合, 分析出的相对误差为 32%, 与光透式浊度计的误差相当, 因此 ADP 能达到专用测沙仪的精度.

根据高光对太湖不同区域沉积物粒径的分析结果 (图 4), 深度在 10cm 以上的沉积物中粒径组成较为稳定, 10cm 以下则出现波动. 南京水科院河港研究所张金善等亦对太湖沉积物的粒径组成进行了分析, 发现占总量 50%—60%的颗粒的粒径约为 $16-17\mu\text{m}$, 而小于 $5\mu\text{m}$ 和大于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒所占总量的比例很小, 故可认为太湖中悬浮物的组成较为稳定. 此外, 在切应力作用下能产生悬浮的也是上层沉积物, 因为较深处的底泥, 由于其本身的物

理特性，产生悬浮所需要的切应力也越大，这也是在大多数沉积物迁移输送模型将沉积物分成若干层，每层采用不同的临界切应力的主要原因之一。由此可见，太湖表层沉积物中粒径组成稳定，进一步增加了使用 ADP 在太湖中测定悬浮物浓度的可能性与准确性。

6 回声强度反映 SSC 变化的可信度分析

测量湖流时，同步对波浪数据进行了采集。根据 Jing Lou^[30] 和 Kang-Ren Jin^[31] 分别对 Michigan 湖和 Okeechobee 湖的研究，在深度不同的湖泊中，波动和底流对沉积物悬浮与迁移的贡献存在很大的差别，在不深于 2 米的浅水湖泊中，底流所产生的切应力几乎可以忽略，本文基于观测得到的有效波要素数据，通过计算不同时刻的切应力而判断底层沉积物是否悬浮及其悬浮程度，来验证此次测量得到的回声强度是否能反映太湖水体中悬浮物的浓度，切应力的计算方法参见文献 Sheng 等^[32]，Jing Luo 等^[30-33]，Nanthan^[34]，对观测期间所采集的波面记录以每 20 分钟为时间间隔进行处理后(图 5)，对位于水体中层即水面以下 1.0m 和 1.2m 处的回声强度作时间序列曲线(图 6)。

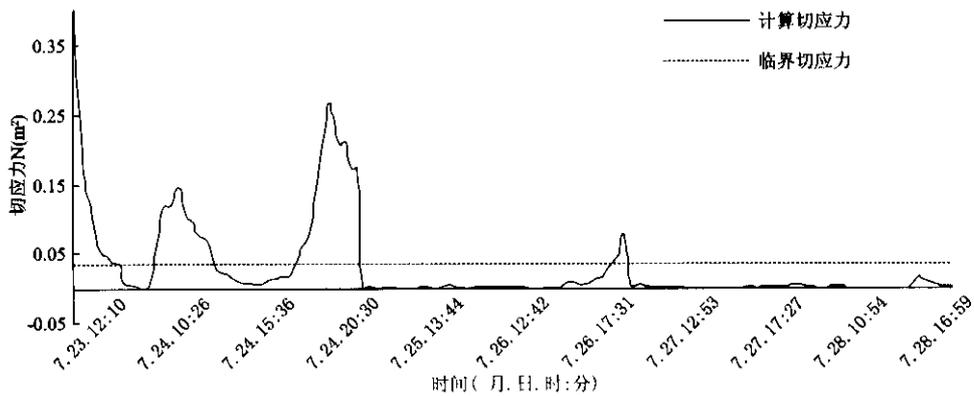


图 5 临界切应力与计算出的切应力

Fig.5 Critical stress for sediment resuspension and time series of wave stress

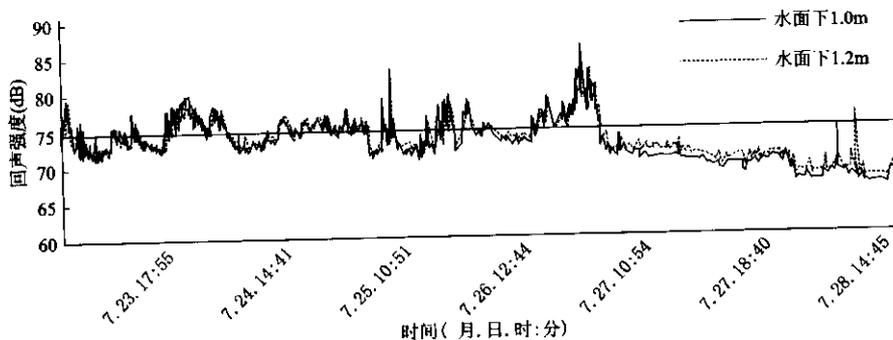


图 6 水面以下 1.0m 及 1.2m 处回声强度时间变化曲线

Fig.6 Time serials of echo intensity at 1.0m and 1.2m below water surface during observation

由以上两图可知, 切应力与回声强度的变化均呈现多峰特征, 即部分时段切应力和回声强度的值都比较大. 为了便于对比, 将所观测计算得到的切应力大于太湖中沉积物再悬浮临界应力 ($0.037\text{N}/\text{m}^2$) 的相应时段和回声强度大于 75dB 的相应时段列于表 1, 可以得到, 有 4 个时段引起了沉积物的悬浮, 分别为 7 月 23 日上午, 24 日中午及傍晚和 26 日傍晚, 对应于图 4 上的 4 个峰值, 其相应风速约为 $4.0\text{m}/\text{s}$ 、 $4.2\text{m}/\text{s}$ 、 $4.5\text{m}/\text{s}$ 和 $5.0\text{m}/\text{s}$, 而 25 日、27—28 日基本没有引起悬浮, 三天的日平均风速俱在 $3.0\text{m}/\text{s}$ 以下, 相应的回声强度值均在 75dB 以下, 特别是 27—28 日, 回声强度很小 (图 6). 本文中所选定的比较值 75dB 并非太湖中层能反映沉积物是否悬浮的 ADP 回声强度临界值, 而是便于判断回声强度的波动特征, 以寻求 ADP 回声强度和切应力间的相关关系, 进而证明该指标能反映水体中悬浮物浓度的变化. 由以上分析及表 1 可知, 当由于风扰动而引起悬浮时, 水体中层 ADP 的回声强度随 SSC 的增加而增大, 证明了该回声强度的变化能完全反映水体中 SSC 浓度的变化特征.

表 1 观测期间切应力大于临界切应力和回声强度大于 75dB 的相应时段

Tab.1 The periods when resuspension occurred and echo intensity was larger than 75dB

	7 月 23 日	7 月 24 日	7 月 25 日	7 月 26 日	7 月 27 日	7 月 28 日
悬浮时段		09:25-11:42 17:22-20:30		17:51-18:11		
回声强度大于 75dB 的时段	10:40-10:53 11:30-11:31 15:49-15:54 16:05-16:06 18:51-20:20	09:24-10:00 10:30-11:25 14:50-15:30 16:28-16:47 17:20-18:14 19:19-19:28	10:34-10:39 13:56-14:12 14:19-14:38	09:34-10:01 14:26-14:44 14:50-15:13 16:19-18:20		

7 讨论

本文从声学后散射原理出发, 阐述了 ADP 所接收到的回声强度经过距离校正后, 能反映水体中的悬浮物浓度, 并利用 2002 年 7 月 23—28 日间在太湖乌龟山所观测的湖流、波浪和气象资料及相应的 SSC 分析数据, 初步拟合了 SSC 的常用对数和校正后的回声强度间的线性关系, 得出了二者之间的经验公式, 并通过波浪资料计算所得到的切应力与临界应力的比较及太湖水体中层 ADP 回声强度在观测期间的变化情况, 进一步证明了所校正后的回声强度的确能反映水体中悬浮物浓度的变化, 当风速较大时, 波浪产生的切应力增加, 若大于临界应力, 则造成湖底沉积物的悬浮, 水体中 SS 的浓度增加, 相应地, 对 ADP 所接收到的回声强度进行水深校正后的值亦会增大, 从而反映了 SSC 的常用对数和校正后的回声强度间的线性相关关系. 此外, 国内外不少专家学者也已经证明, 使用 ADP 回声强度来计算 SSC 能达到浊度计、OBS 及 ABS 等专用仪器的测量精度. 因此, 该方法不仅具有充分的理论依据, 而且已为实践所证明, 它能解决通过传统方法所难以解决的问题, 其应用前景广阔.

值得注意的是, 本文中采用 75dB 作为校正后回声强度的判断标准, 但并非判断是否悬浮的临界值, 而是为证明切应力与回声强度间关系的临时估算值. 但是从理论上推断, 正如临界切应力的存在, 回声强度在水体中不同深度亦存在一临界值, 该值也能完全反映水体中是否出现悬浮状态, 并且能从回声强度的大小在量上推断 SSC 的变化值, 不过需经长期观测及反复验证, 也是即将开展的工作之一.

参 考 文 献

- 1 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
- 2 程 鹏,高 抒. ADCP 测量悬沙浓度的可行性分析与现场标定. 海洋与湖沼, 2001, 32(2):168-176
- 3 Glenn P Holdaway, Peter D Thorne, David Flatt et al. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 1999,19:421-441
- 4 D C Hill, S E Jones, D Prandle. Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters. *Continental Shelf Research*, 2003, 23:19-40
- 5 David A Demer, Manuel Barangeb, Alan J Boyd, Measurements of three-dimensional fish school velocities with an acoustic Doppler current profiler. *Fisheries Research* , 2000,47:201-214
- 6 Patrick H Ressler, Ann E Jochens. Hydrographic and acoustic evidence for enhanced plankton stocks in a small cyclone in the northeastern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 2003,23: 41-61
- 7 Patrick H Ressler. Acoustic backscatter measurement with a 153 kHz ADCP in the northeastern Gulf of Mexico: determination of dominant zooplankton and micronekton scatterers. *Deep-Sea Research I*, 2002,49:2035-2051
- 8 Andrew J Pershing, Peter H Wiebe, James P Manning et al., Evidence for vertical circulation cells in the well-mixed area of Georges Bank and their biological implications. *Deep-Sea Research II*, 2001, 48:283-310
- 9 Andrew S Brierley, Mark A Brandon, Jonathan L Watkins. An assessment of the utility of an acoustic Doppler current profiler for biomass estimation. *Deep-Sea Research I*, 1998, 45:1555-1573
- 10 Point J M, Jansa J. Time variability of acoustic backscatter from zooplankton in the Ibiza Channel (western Mediterranean). *Deep-Sea Research I*, 2001, 48:1651-1670
- 11 Kaneda A, Takeoka H, Koizumi Y. Periodic occurrence of diurnal signal of ADCP backscatter strength in Uchiumi Bay, Japan. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 2002, 55:323-330
- 12 Podsetchine V, Huttula T, Filatov N. Water exchange in the straits of northern Ladoga: results of field studies and numerical simulations. *Phys Chem Earth*,1995,20(2):207-213
- 13 Adler M, Nicodemus U. A new computer model for the evaluation of data from acoustic Doppler current profilers(ADCP). *Phys Chem Earth(C)*, 2001,26(10-12):711-715
- 14 Pinkel R, Smith R A. Open ocean surface wave measurement using Doppler sonar. *J Geophys Res* , 1987, 92:12967-12973
- 15 Schott F. Measuring winds from underneath the ocean surface by upward looking acoustic Doppler current profilers. *J Geophys Res*, 1989, 94: 8313-8312
- 16 Visbeck M, Fischer J. Sea surface conditions remotely sensed by upward-looking ADCPs. *J Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12:141-149
- 17 Haren Hans Van. Estimates of sea level, waves and winds from a bottom-mounted ADCP in a shelf sea. *Journal of Sea Research*, 2001, 45:1-14
- 18 Nathan Hawley, Barry M Lesht. Sediment resuspension in Lake St. Clair. *Limnol & Oceanogr*, 1992, 37(8):1720-1737
- 19 Jago C F, E Jones S. Observation and modeling of the dynamics of benthic fluff resuspended from a sandy bed in the southern North Sea. *Continental Shelf Research*, 1998, 18:1255-1282
- 20 Evan Weering T C, de Stigter H C, Boer W et al. Recent sediment transport and accumulation on the NW Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 2002,52:349-371
- 21 Green M O, Vincent C E, Mccave I N et al. Storm sediment transport: observations from the British North Sea shelf. *Continental Shelf Research*, 1995,15(8):889-912
- 22 Christie M C, Dyer K R, Turner P. Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*,1999, 49:667-688
- 23 Williams J J, Rose C P, Thorne P D. Role of wave groups in resuspension of sandy sediments. *Marine Geology*,

- 2002, 183:17-29
- 24 Williams J J, Rose C P, Thorne P D et al. Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions. *Continental Shelf Research*, 1999, 19:507-536
- 25 Black K P, Vincent C E. High-resolution field measurements and numerical modeling of intra-wave sediment suspension on plane beds under shoaling waves. *Coastal Engineering*, 2001, 42:173-197
- 26 Obhrai C, Nielsen P, Vincent C E. Influence of infiltration on suspended sediment under waves. *Coastal Engineering*, 2002, 45: 111-123
- 27 Rose Christopher P, Peter D Thorne. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary. *Continental Shelf Research*, 2001,21:1551-1575
- 28 Glenn P Holdaway, Peter D Thorne, David Flatt et al. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 1999, 19:421-441
- 29 SonTek. SonTek Doppler current meters-using signal strength data to monitor suspended sediment concentration. Application Note, 1997, California: SonTek
- 30 Lou Jing, Schwa David J. A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (C3):6591-6610
- 31 Jin Kang-Ren, Ji Zhen-Gang. Calibration and verification of a spectral wind-wave model for lake Okeechobee. *Ocean Engineering*, 2001,28:571-584
- 32 Sheng Y P, Lick W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84.1809-1826
- 33 Lou Jing, Peter V Ridd. Wave-current bottom shear stress and sediment resuspension in Cleveland Bay, Australia. *Coastal Engineering*, 1996, 29:169-186
- 34 Nathan Hawley. Sediment resuspension near the Keweenaw Peninsula, lake superior during the fall and winter 1990-1991. *J Great Lakes Res*, 2000, 26 (4):495-505

Application of ADP in the Study of Sediment Resuspension in Lake Taihu

LUO Liancong^{1,2} & ZHANG Fabing^{1,2}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China;

2: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P.R.China.)

Abstract

Traditionally, it is absolutely difficult to collect SSC data(suspended sediment concentration) in the whole lake and impossible to decide the time derivation of SSC with small time interval either. Based on acoustic backscatter theory, this paper presents the denary logarithmic relationship between SSC and the emended ADP signal strength in Lake Taihu on condition that the components of suspended sediment do not change dramatically. Verification is also conducted based on the observation made at Wugui island in July 2002. The satisfactory results suggest the method is available in Lake Taihu and has bright prospect in determining SSC.

Keywords: ADP; SSC; Lake Taihu; echo intensity