

## 太湖梅梁湾湖区悬浮物动态沉降特征的野外观测\*

高小孟<sup>1,2</sup>, 李一平<sup>1,2\*\*</sup>, 杜薇<sup>1,2</sup>, 罗淑蕊<sup>3</sup>, 李慧贇<sup>3</sup>, 戴淑君<sup>3</sup>, 许益新<sup>1</sup>, 张兴通<sup>1</sup>, 邱勇军<sup>1</sup>

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 沉降运动是悬浮物主要运动形式之一, 是影响营养盐内源释放的主要运动过程, 研究悬浮物沉降速度对湖泊富营养化的研究具有重要意义. 为了解浅水湖泊悬浮物的沉降特征, 以太湖梅梁湾为例, 采用声学多普勒流速仪, 光学后向散射浊度仪以及风速风向仪在梅梁湾进行了连续 9 d 的野外观测. 采用扩散沉降平衡的方法计算小风速情况下悬浮物的沉降速度, 并对沉降速度与垂向流速、风速、悬浮物浓度的关系进行分析. 结果表明悬浮物平均沉降速度为 0.0785 mm/s, 表层垂向流速和悬浮物浓度对悬浮物沉降速度变化起主要作用; 而在底层, 风速、垂向流速、悬浮物浓度都对悬浮物运动有重要影响, 具体表现为风速 > 1.5 m/s 时, 垂向流速紊动增大, 悬浮物因起悬而浓度较大, 并且沉降速度波动较大; 风速 < 1.5 m/s 时, 垂向流速基本向下且流速较小, 沉降速度也较小. 本文揭示了大型浅水湖泊悬浮物的动态沉降特征, 为今后太湖污染物的输移、水环境数学模型和湖泊富营养化的深入研究奠定了必要的基础.

**关键词:** 沉降速度; 悬浮物浓度; 太湖; 梅梁湾

## Suspended solid settlement characteristics in Meiliang Bay of Lake Taihu: *in situ* observation

GAO Xiaomeng<sup>1,2</sup>, LI Yiping<sup>1,2\*\*</sup>, DU Wei<sup>1,2</sup>, LUO Liancong<sup>3</sup>, LI Huiyun<sup>3</sup>, DAI Shujun<sup>3</sup>, XU Yixin<sup>1</sup>, ZHANG Xingtong<sup>1</sup> & QIU Yongjun<sup>1</sup>

(1: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China*)

(2: *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China*)

(3: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

**Abstract:** Suspended solid settlement is one of the main transport forms, and plays an important role in lake nutrient release. Thus, study on suspended solid settling velocity is significant to understand the eutrophication. To study the suspended solid settling velocity, this paper takes Lake Taihu as an example. Field 9 days-*in situ* observations were conducted in Meiliang Bay using Acoustic Doppler Velocity, Optical Backscatter Sensor and PH-II Handheld weather stations. The suspended solid settling velocity was estimated by the balance of settling and diffusive flux, and we analyzed the relationship among wind speed, vertical velocity, suspended solid concentration (SSC) and settling velocity. The results were obtained: (1) the mean settling velocity is 0.0785 mm/s; (2) the vertical velocity and SSC has a great effect on sediment transport in the surface layer; (3) in the bed layer, the relationship among settling velocity, vertical velocity and SSC shows that when the wind speed was higher than 1.5 m/s, the vertical velocity with large fluctuations and high SSC and the settling velocity were slower; when the wind speed was lower than 1.5 m/s, the vertical velocity was slower and the SSC was small, but settling velocity was quicker, which means the more SSC the quicker

\* 中央高校基本科研业务项目基金项目(2014B07314)、国家自然科学基金项目(51579071, 51379061)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(2015B36614)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51421006)、江苏省“创新团队计划”项目和江苏省高校优势学科建设工程项目联合资助. 2016-03-06 收稿; 2016-05-11 收修改稿. 高小孟(1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1241907473@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn.

settling velocity. It reveals the characteristics of suspended solid settlement in large shallow lakes, which is the necessary foundation in further study of pollutants transport, water environmental mathematic and eutrophication.

**Keywords:** Settling velocity; suspended solid concentration; Lake Taihu; Meiliang Bay

近年来,湖泊的富营养化问题日益突出,引起了国内外研究人员的广泛关注. 导致湖泊富营养化的原因众多,主要包括入湖河流营养盐浓度高、水体交换缓慢、有机物降解慢以及底泥营养盐的释放等<sup>[1-3]</sup>. 大型浅水湖泊中,内源营养物质释放是水体中营养盐的重要来源,而沉积物的运动传输过程对营养盐释放有很大的贡献<sup>[4,6]</sup>. 大型浅水湖泊受风的作用影响较大,底泥在风浪扰动下与水体产生强烈交换,易发生再悬浮,导致底泥中的营养盐进入水体,这种动态内源释放严重影响水质<sup>[7-9]</sup>. Roberts 等<sup>[10]</sup>在日本琵琶湖观测了强台风作用下水体磷含量的变化,发现台风过后水体溶解态反应磷(SRP)浓度提高了2.5倍. 范成新<sup>[11]</sup>研究了漏湖底泥在扰动作用下营养盐释放对水体中营养盐浓度的影响,发现扰动作用使水体磷浓度增加约2~4倍,可见剧烈水动力过程对于内源释放影响显著. 而研究水体悬浮物浓度(Suspended Solid Concentration, SSC)和沉降速度的关系是探究水动力条件下内源释放的基础和前提,亦是研究太湖富营养化发生机理的一个关键性问题,也可以为模型模拟水动力和水质提供重要的参数.

太湖是我国典型的大型浅水湖泊,近年来水体富营养化问题突出<sup>[12-13]</sup>. 太湖悬浮物沉降速度主要通过实验室进行测量,胡开明等<sup>[3]</sup>通过室内静沉降实验建立了沉降通量与风速的关系,发现沉降速度基本呈现随沉降时间增加而减缓的规律,应用类似方法的还见于文献[14-15]. 但是水流的紊动作用对底泥起悬和水体悬浮物的运动有较大影响,这种静沉降的方法局限于底泥的静态释放,不能够准确反映悬浮物沉降与水动力之间的变化关系. 也有学者具体分析了水动力因素对底泥释放的影响,但都仅限于使用烧杯、锥形瓶、水槽等模拟湖体,使用的原状沉积物在采样和运输过程中会受到扰动而使其性质发生变化,不能准确地代表太湖湖体的实际情况,因此更好的方法便是在未经扰动的沉积物底床上直接进行原位监测<sup>[16-17]</sup>. 随着声学测量技术的发展,近年来 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)与 OBS(Optical Backscatter Sensor)频繁应用于测量水体流速及 SSC 的实验. Fugate 等<sup>[18]</sup>用 ADV 通过雷诺浓度通量法获得切萨皮克湾 Cherrystone 站点泥沙平均沉降速度为 1 mm/s 的量级. Voulgaris 等<sup>[19]</sup>用 ADV、LISST(laser in situ scattering and transmissometry)和 OBS 测得潮沟时期 SSC 和沉降速度. ADV 用于原位测量具有对测点周围流场无扰动的优势,可以高度真实地还原采样点的水体三维流速和 SSC,有效地避免了实验室模拟沉降实验的弊端,因而本文采用 ADV 仪器对太湖进行原位监测.

本文基于 2014 年 5 月 21 日—5 月 29 日太湖野外原位监测,用 ADV、OBS 等仪器获得同步高频的风速风向、三维流速、SSC 等数据,对悬浮物的沉降速度与垂向流速、风速、SSC 的关系进行研究,以揭示大型浅水湖泊水动力扰动条件下悬浮物的沉降特征,为今后太湖污染物的输移、富营养化的深入研究提供必要的基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点及时间

太湖是我国第三大淡水湖,水面面积 2338 km<sup>2</sup>. 梅梁湾位于太湖北部,水面面积 129.3 km<sup>2</sup>,平均水深 1.9 m<sup>[20]</sup>,近年来蓝藻暴发发现象严重,水质较差<sup>[21]</sup>,故而选择梅梁湾为本文的研究地点. 2014 年 5 月 21 日 08:30—5 月 29 日 08:30 在太湖梅梁湾拖山(31°23′34.29″N, 120°9′24.86″E)(图 1,其中 TELLR 为中国科学院太湖湖泊生态系统研究站,即水样实验室分析地点)水域进行了悬浮物沉降实验,观测期间平均水深 2.7 m,采样点区域沉积物厚度在 300 cm 以上<sup>[22]</sup>,表层沉积物平均含水率为 48.93%,中值粒径  $d_{50}$  为 25  $\mu\text{m}$ .

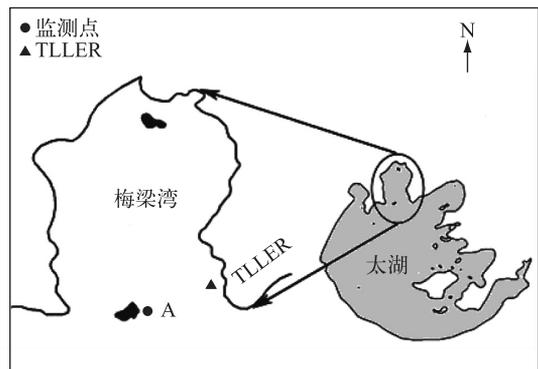


图 1 太湖监测地点

Fig.1 Study site in Lake Taihu

## 1.2 实验器材与分析项目

现场观测运用 SonTek 公司生产的 2 台声学多普勒流速仪 (ADV), 分别放置在水体表层 (水面下 50 cm) 与底边界层 (距离湖底 5 cm 处), 对三维流速和回声强度进行同步测量. 同时设置 2 台 OBS-3A, 与表、底层 ADV 层位一致. ADV 采样频率设为 10 Hz, OBS 采样频率为每 3 min 一次, 现场还同步观测了风速和风向 (频率为每 5 min 一次).

ADV 与 OBS 设置为同高度同时刻高频率监测, ADV 的测量参数有三维流速、信号强度、信噪比等, OBS 测量参数有浊度、温度、深度、盐度等. 在实验期间, 手动采集不同深度的水样带回实验室分析水样 SSC 并与其对应时间上 OBS 测得的浊度建立相关关系, 进行校准分析, 同时测定所采集的表层底泥 (0~10 cm) 的有机质含量及粒径大小等. 样品分析方法按照《湖泊富营养化调查规范》<sup>[23]</sup> 进行.

## 1.3 回声强度 (EI) 与 SSC 的相关性分析

由于 OBS 测得的浊度数据频率低, 不能满足计算瞬时沉降速度的需要, 因而用 ADV 回声强度与 OBS 测得的 SSC 数据进行反演, 来获得高频的 SSC 数据. ADV 为单点高频流速仪, 发射的高频声波在近底水体中传播虽会衰减却无需校正散射体的后向散射强度, 但需考虑其在近底层 SSC 变化剧烈的区域时悬浮物颗粒的吸收. 研究表明 SSC 和 ADV 的回声强度 EI 满足简单的对数关系<sup>[24-26]</sup>:

$$EI = a \cdot \log_{10} SSC + b \quad (1)$$

式中,  $a$  和  $b$  分别为回声强度 EI 和  $\log_{10} SSC$  线性拟合得到的斜率和截距.

ADV 数据筛选需要通过严格的预处理来进行质量控制, 运用斜率控制法去除异常值, 选取信噪比大于 40 dB、相关系数大于 70% 的有效数据, 空缺小于时间序列 1% 的数据通过相邻点位线性插值补齐, 否则剔除时间数据序列.

OBS-3A 测得的是水体浊度信息, 需结合现场采集的水样进行室内 SSC 分析, 建立起浊度与 SSC 的经验关系. 本次实验浊度与 SSC 具有较好的线性关系, 相关系数  $R^2$  为 0.9375 (图 2). 本文用上述关系标定近底层 OBS 浊度信息, 得到观测期间 SSC 变化范围在 20~300 mg/L 之间 (图 3). 同时通过 ADV 监测的回声强度 EI (dB) 每 3 min 平均数和对应时间上的 SSC 的关系来拟合上述公式, 得到可根据回声强度 EI 来反演高频 SSC 的公式.

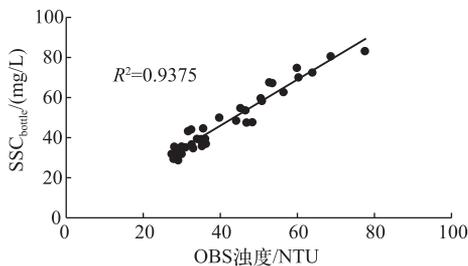


图 2 OBS 测得的浊度与底层悬浮物浓度关系的校正

Fig.2 Calibration of OBS turbidity with suspended solid concentration determined from bottle samples

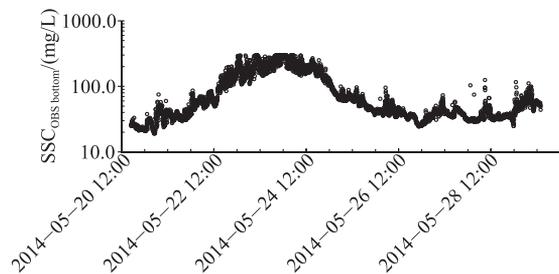


图 3 观测期间 OBS 悬浮物浓度变化

Fig.3 Time series of SSC by OBS during observation time

## 1.4 悬浮物沉降速度计算方法

Fugate 等<sup>[18]</sup> 提出用 ADV 测得的高频垂向流速脉动值和沉积物浓度脉动值 ( $w'$  和  $c'$ ) 来计算悬浮物沉降速度. 而采用 ADV 监测不干扰采样点周围水体的湍流运动, 较准确地还原了水体的真实状态. 在定常的、SSC 水平分布均匀的底边界层中有:

$$\langle w'c' \rangle = w_s \cdot C \quad (2)$$

式中,  $w_s$  为泥沙沉降速度,  $C$  为平均的悬浮物浓度,  $\langle \rangle$  代表系综平均.

## 2 结果与讨论

### 2.1 ADV 反演 SSC

监测期间 OBS 测得的 SSC 在 20~300 mg/L 之间(图 3),其中 5 月 22 日—5 月 24 日所得数据基本包含由低浓度到高浓度变化的所有浓度值,因此选取此段浓度数据与 ADV 回声强度数据进行反演,以获取高频 SSC 序列,其反演结果见图 4,  $\log_{10}(\text{SSC}_{\text{OBS}})$  和 EI 之间的  $R^2$  为 0.8745,表明 ADV 反演 SSC 具有可行性. ADV 所反演得到的浓度序列变化范围为 40~242 mg/L,与 OBS 测得的浓度序列 49~202 mg/L 变化一致(图 5),相对误差在 32% 以内,也表明了反演结果的可靠性. Fugate 等<sup>[18]</sup>的研究表明 OBS 对于粒径变化较敏感而影响其测量精度,而 ADV 对于粒径变化不敏感即粒径变化对 SSC 测量的影响不大. 梅梁湾悬浮物粒径在 16~17  $\mu\text{m}$  之间的占 50%~60%,粒径变化比较稳定,也说明了 OBS 和 ADV 测量 SSC 的可靠性和高质量. 可根据拟合得到的公式和 ADV 测得的声学信号反演得到高频(10 Hz)的 SSC 序列,以满足计算瞬时而精确的沉降速度需求.

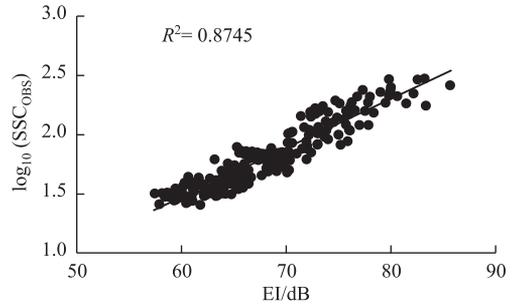


图 4 ADV 声学信号反演浓度

Fig.4 Calibration of ADV backscatter coefficient with OBS mass concentration

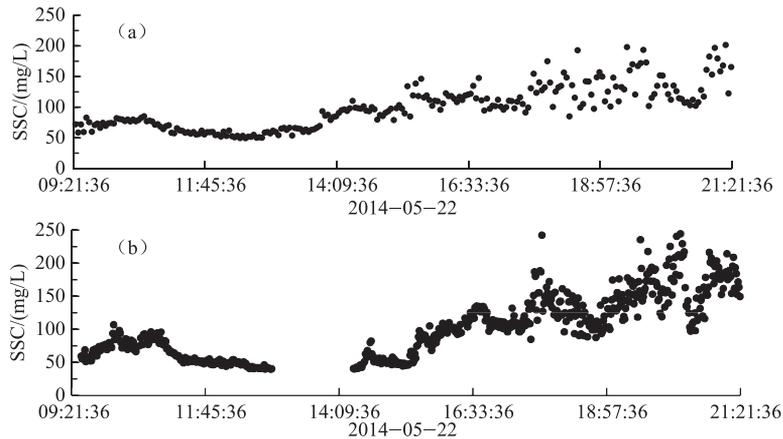


图 5 OBS 观测(a)和 ADV 反演(b)得到的悬浮物浓度时间序列

Fig.5 Time series of suspended solid concentration by OBS (a) and ADV (b)

### 2.2 悬浮物沉降速度与垂向流速、SSC 的关系

研究期间风速在 0.5~2.0 m/s 之间,属于小风速,基本上不会引起水体垂向上剧烈的波动,满足公式(2)的使用条件<sup>[18]</sup>. 表层 SSC 在 33.3~92.7 mg/L 之间,平均浓度为 51.4 mg/L,平均垂向流速为-0.085 cm/s;底层 SSC 在 23.8~79.3 mg/L 之间,平均浓度为 36.2 mg/L,平均垂向流速为-0.127 cm/s. 水体表层垂向流速与沉降速度的变化基本一致,垂向流速紊动大小会影响颗粒物的紊动运动. 水流向上运动时,悬浮物也向上运动;水体向下运动,悬浮物也向下沉降;SSC 值较高时,悬浮物沉降的速度也较大. 而表层沉降速度、垂向流速、SSC 三者与风速变化的关系并不明显(图 6a),可能是由于风速较小、风速变化范围小且风时较长,导致表层流场变化小,底层沉积物起悬不能到达表层,使得表层悬浮物组分变化较小(即风速对悬浮物垂向运动方向与大小影响不大,而垂向流速是其主要影响因素).

在底边界层,风速、垂向流速对悬浮物沉降有较大影响,风速、垂向流速与悬浮物沉降速度变化趋势基本一致. 本文截取 5 月 21 日 11:32—13:35 期间(图 6b)的监测数据进行分析说明. 对比 12:25 前后两个时

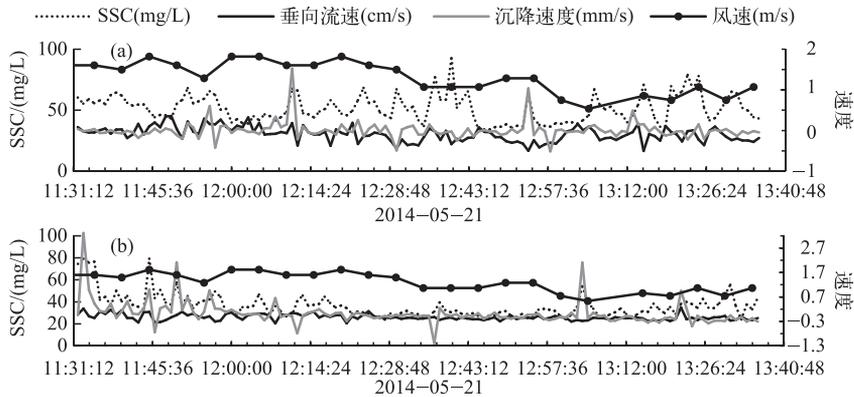


图6 表层(a)和底层(b)风速、垂向流速、悬浮物浓度与沉降速度的变化

Fig.6 Time series for wind speed, vertical flow velocity, suspended solid concentration and settling velocity in surface layer (a) and bed layer (b)

段, 11:32—12:25 这段时间, 风速在 1.5~2.0 m/s 之间波动, SSC 偏高, 垂向流速紊动较大, 流速方向不断变化, 沉降速度也上下波动; 12:25—13:35 这段时间风速相对较小, 垂向流速方向向下且大小变化平缓, 悬浮物主要表现为沉降, 沉降速度与 SSC 变化均较小. 当悬浮物运动速度较大时, SSC 也相对较高, 垂向流速和沉降速度会稍滞后于风速的变化. 在观测期间, 水体表层沉降速度在 -0.51~1.52 mm/s 之间, 底层沉降速度在 -1.19~3.3 mm/s 之间 (>0 表示悬浮物总体向上运动). 水体表层主要为悬浮态细颗粒物, 底边界层为大颗粒物, 且包含推移质和悬移质的翻滚、跳跃和平移等运动. 底层悬浮物的沉降速度要大于表层. 本文计算得到的最大向下沉降速度为 1.19 mm/s, 表、底层平均向下沉降速度为 0.0785 mm/s. 向军等<sup>[14]</sup>采集太湖水样进行静沉降实验, 初始 SSC 为 589.5 mg/L, 测得前 20 min 内悬浮物沉降速度在 0.22 mm/s 左右, 沉降速度较大, 是由于其初始浓度较大, 而且静沉降条件下高浓度悬浮物容易聚集为大颗粒物质, 更易沉降, 加快了沉降速度. 李一平<sup>[27]</sup>通过静沉降实验发现 50~250 mg/L 之间的 SSC 沉降速度在 0.02~0.18 mm/s 之间, 本文结果基本与之相符. 静沉降相当于无风条件下的静止水体中悬浮物沉降, 悬浮物容易聚集絮凝为大颗粒物质而使沉淀加速, 用时较短. 太湖波流综合作用下的悬浮物易受扰动而起悬或沉降, 悬浮物难以聚集, 沉降较慢. 本文所用方法描述了悬浮物瞬时连续的动态变化特征, 能较真实地反映梅梁湾湖区悬浮物的沉降过程.

结果表明, 对于水体表层, SSC 与水体垂向流速对悬浮物沉降有重要影响. 而对于底边界层, 风速 > 1.5 m/s 时, 水体垂向流速脉动较大, SSC 较高; 风速 < 1.5 m/s 时, 垂向流速脉动较小, SSC 较低. 说明风浪容易引起底泥起悬和沉降, 对底层颗粒物垂向运动影响较大, 而难以使底层颗粒物传输到表层, 对表层颗粒物沉降作用较小. 若只考虑悬浮物向下沉降的时刻 ( $w_s < 0$ ), 会发现在 SSC 较高时, 沉降速度较大; SSC 较低时, 沉降速度较小. 由于流速较大时, 受底边界层摩擦形成较大切应力的影响, 沉降速度较大的大颗粒物大量起悬然后又快速沉降, 使得总体沉降速度增大. Maa 等<sup>[26]</sup>揭示了沉降速度与 SSC 之间为幂函数关系, 并指出沉降速度会随着 SSC 的增大而增大; 邓伟铸等<sup>[28]</sup>在黄茅海河口湾发现, 急流时泥沙浓度较高, 沉降速度也较大; 憩流时, 泥沙浓度较低, 沉降速度也较小. 前人的研究主要集中在河口、海湾等泥沙粒径较大、流速较快的水体, 因此得到的悬浮物沉降速度较大. 由于湖泊中泥沙粒径较小, 水体运动缓慢, 因此本文得到的悬浮物沉降速度相对较小.

### 3 结论

本文基于太湖梅梁湾野外原位实测风场、流场和悬浮物等数据得到如下几点结论: (1) ADV 回声强度与 SSC 满足 Logistic 关系, 反演得到高频 SSC 序列具有可靠性, 得到 SSC 范围在 40~242 mg/L 之间; (2) 计算得到综合表、底层悬浮物平均沉降速度为 0.0785 mm/s; 沉降速度与垂向流速、SSC 有密切关系, SSC 较高

时沉降速度大;SSC 较低时,沉降速度也较小;(3) 风速对于底层悬浮物运动的影响比对表层悬浮物运动的影响大. 本文可为太湖模型提供沉降速度及 SSC 等参数,为太湖及其他大型浅水湖泊研究或管理奠定必要的基础.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Chen Xiaofeng, Chuai Xiaoming, Yang Liuyan. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 438-443. [ 陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 438-443. ]
- [ 2 ] Wang Xiaodong, Qin Boqiang, Liu Lizhen *et al.* Effects of experiment sediment suspension on the nutrients release and growth of algal bloom. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **12**: 1481-1487. [ 王小冬, 秦伯强, 刘丽贞等. 底泥悬浮对营养盐释放和水华生长影响的模拟. 长江流域资源与环境, 2011, **12**: 1481-1487. ]
- [ 3 ] Hu Kaiming, Wang Shui, Pang Yong. Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 191-199. DOI: 10.18307/2014.0204. [ 胡开明, 王水, 逢勇. 太湖不同湖区底泥悬浮沉降规律研究及内源释放量估算. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 191-199. ]
- [ 4 ] Li Y, Liu Y, Zhao L *et al.* Exploring change of internal nutrients cycling in a shallow lake: A dynamic nutrient driven phytoplankton model. *Ecological Modelling*, 2015, **313**: 137-148. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.025.
- [ 5 ] Bailey MC, Hamilton DP. Wind induced sediment resuspension: A lake-wide model. *Ecological Modelling*, 1997, **99**(2/3): 217-228. DOI: 10.1016/S0304-3800(97)01955-8.
- [ 6 ] Zhu G, Qin B, Gao G. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(6): 577-582. DOI: 10.1007/BF02897483.
- [ 7 ] Luo Liancong, Qin Boqiang. Comparison between wave effects and current effects on sediment resuspension in Lake Taihu. *Hydrology*, 2003, **23**(3): 1-4. [ 罗激葱, 秦伯强. 太湖波浪与湖流对沉积物再悬浮不同影响的研究. 水文, 2003, **23**(3): 1-4. ]
- [ 8 ] Fan Chengxin, Zhang Lu, Qin Boqiang. Estimation of phosphorus releasing from suspended sediment under wind-waver effect in Lake Taihu. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2003, **33**(8): 760-768. [ 范成新, 张路, 秦伯强. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学: D 辑; 地球科学, 2003, **33**(8): 760-768. ]
- [ 9 ] Hu Chunhua, Hu Weiping, Zhang Fabing *et al.* Sediment resuspension measurements in Lake Taihu. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(22): 2541-2545. [ 胡春华, 胡维平, 张发兵等. 太湖沉积物再悬浮观测. 科学通报, 2005, **50**(22): 2541-2545. ]
- [ 10 ] Roberts RD, Waiser MJ, Hadas O *et al.* Relaxation of phosphorus limitation due to typhoon-induced mixing in two morphologically distinct basins of Lake Biwa, Japan. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(6): 1023-1036. DOI: 10.4319/lo.1998.43.6.1023.
- [ 11 ] Fan Chengxin. Physiochemical characteristics of sediments in Gehu Lake and simulation of its phosphorus release. *J Lake Sci*, 1995, **7**(4): 341-350. DOI: 10.18307/1995.0408. [ 范成新. 太湖沉积物理化特征及磷释放模拟. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 341-350. ]
- [ 12 ] Chen Weimin, Chen Yuwei, Qin Boqiang *et al.* Experimental study on the biological community succession caused by water flow. *J Lake Sci*, 2000, **12**(4): 343-352. DOI: 10.18307/2000.0408. [ 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 343-352. ]
- [ 13 ] Qin Boqiang, Hu Weiping, Gao Guang *et al.* The dynamic mechanism of sediment suspension and conceptual model of internal release in Taihu Lake. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(17): 1822-1831. [ 秦伯强, 胡维平, 高光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831. ]
- [ 14 ] Xiang Jun, Pang Yong, Li Yiping *et al.* Hydrostatic settling suspended matter of large shallow lake. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(1): 111-115. [ 向军, 逢勇, 李一平等. 浅水湖泊水体中不同颗粒悬浮物静沉降规律研究. 水科学进展, 2008, **19**(1): 111-115. ]
- [ 15 ] Pang Yong, Yan Runrun, Yu Zhongbo *et al.* Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in

- Lake Taihu affected by wind. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2456-2464. [逢勇, 颜润润, 余钟波等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究. 环境科学, 2008, **29**(9): 2456-2464.]
- [16] Li Yiping, Pang Yong, Chen Kesen *et al.* Study on the starting principles of sediment by water force in Taihu Lake. *Advances in Water Science*, 2004, **15**(6): 770-774. [李一平, 逢勇, 陈克森等. 水动力作用下太湖底泥起动力规律研究. 水科学进展, 2004, **15**(6): 770-774.]
- [17] Xie Qianwen, Li Yiping, Kong Wen. Review on methods of measuring sediment re-suspension. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(6): 141-149. [谢倩雯, 李一平, 孔文. 沉积物再悬浮测量方法综述. 水资源保护, 2015, **31**(6): 141-149.]
- [18] Fugate DC, Friedrichs CT. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST. *Continental Shelf Research*, 2002, **22**(11): 1867-1886. DOI: 10.1016/S0278-4343(02)00043-2.
- [19] Voulgaris G, Meyers ST. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 2004, **24**(15): 1659-1683. DOI: 10.1016/j.csr.2004.05.006.
- [20] Huang Qinghui, Wang Donghong, Wang Chunxia *et al.* Vertical variation of the phosphorus form in the sediments of Meiliang Bay and Wuli Lake of Taihu Lake. *China Environmental Science-Chinese Edition*, 2004, **24**(2): 147-150. [黄清辉, 王东红, 王春霞. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 147-150.]
- [21] Liu J, Wang P, Wang C *et al.* The macrobenthic community and its relationship to the contents of heavy metals in the surface sediments of Taihu Lake, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, **23**(7A): 1697-1707.
- [22] Luo Liancong, Qin Boqiang, Zhu Guangwei. Sediment distribution and the maximum resuspension depth with disturbance in Lake Taihu. *Journal of Sediment Research*, 2004, (1): 9-14. [罗激葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖沉积物的分布和动力扰动下最大侵蚀深度的确定. 泥沙研究, 2004, (1): 9-14.]
- [23] Jin Xiangcan, Tu qingying eds. Specification for eutrophication investigation of lakes (second edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [24] Luo Liancong. Hydrodynamics and its effects on aquatic ecosystem in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2004. [罗激葱. 太湖水动力学及其环境效应研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2004.]
- [25] Scully ME, Friedrichs CT. The influence of asymmetries in overlying stratification on near-bed turbulence and sediment suspension in a partially mixed estuary. *Ocean Dynamics*, 2003, **53**(3): 208-219. DOI: 10.1007/s10236-003-0034-y.
- [26] Maa JPY, Kwon JI. Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **73**(1): 351-354. DOI:10.1016/j.ecss.2007.01.008.
- [27] Li Yiping. Study on the influence factors of transparency by experiment and numerical model in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2006. [李一平. 太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.]
- [28] Deng Weizhu, Wu Jiaxue, Liu Huan *et al.* ADV-based acoustical sediment inversion and diffusion mechanism in the Pearl River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, **36**(7): 57-69. [邓伟铸, 吴加学, 刘欢等. 基于 ADV 声学泥沙反演与扩散机制分析. 海洋学报, 2014, **36**(7): 57-69.]