

太湖沉积物再悬浮模拟方法*

尤本胜^{1,2}, 王同成³, 范成新^{1**}, 朱龙喜⁴, 钟继承^{1,2}, 李宝^{1,2}, 尹洪斌^{1,2}, 胡春华¹

(1: 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)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

(4: 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 无锡 214031)

摘要: 由于风浪对浅水湖泊底泥的强烈扰动作用, 底泥再悬浮的生态效应研究成为目前国际研究热点之一。但方法的缺乏极大地限制了有关底泥再悬浮环境效应的深入研究。本研究应用一种新的沉积物再悬浮装置, 模拟了太湖南部长兜港水域不同风浪影响下悬浮物的垂向分布, 获得水柱总悬浮物量(T)与扰动频率(n)的定量关系: $T = 19.77 \times \exp(n/2.61) - 71.7$ 。结合现场实测风情下的水柱总悬浮物量, 建立了室内水动力条件、水柱总悬浮物量和现场风情的定量关系。研究2004年10月至2005年10月太湖全年代表性小风、中风及大风与再悬浮装置的扰动频率对应关系, 估算了小风、中风和大风常规风情引起的总悬浮物量分别为159、230、425 g/m²。结果表明, 模拟获得的太湖悬浮物垂向分布规律与现场状况较为接近, 是目前较为适用的浅水水体沉积物再悬浮模拟方法。

关键词: 湖泊沉积物; 再悬浮; 风浪作用; 垂向分布; 模拟; 发生装置; 太湖

Quantitative simulative method of sediment resuspension in Lake Taihu

YOU Bensheng^{1,2}, WANG Tongcheng³, FAN Chengxin^{1**}, ZHU Longxi⁴, ZHONG Jicheng^{1,2}, LI Bao^{1,2}, YIN Hongbin^{1,2} & HU Chunhua¹

(1: *State Key Lab. of Lake Science and Environments, Nanjing Institute. of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *College of Environment Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(4: *Wuxi Branch, Jiangsu Hydrology-Water Resources Survey Bureau, Wuxi 214031, P. R. China*)

Abstract: Concerns on ecological effects of sediment resuspension are on the rise because the sediments in shallow lakes are frequently disturbed by winds. However, few methods could be suitable for supporting its related study. In this paper, Y-shape apparatus for simulating sediment resuspension was used to study vertical distribution of suspended sediments in water column and their total suspended amounts driving by different wind speed in Changdougang Harbor, southern Lake Taihu. The results showed that the relationship between the total suspended amount of sediments in water column (T) and the motor rotation frequency (n) could be expressed by $T = 19.77 \exp(n/2.61) - 71.7$. Based on the total suspended amounts in water column under field wind conditions, quantitative relationships were achieved among the simulated hydrodynamic conditions, the total suspended amounts of sediments and the field wind conditions. According to the correspondent frequency of motor rotation to field wind speed in Lake Taihu from October 2004 to October 2005, the total suspended amounts of sediments were estimated at 159, 230 and 425 g/m² for field light, moderate and strong winds, respectively. The estimated amounts, together with the vertical distribution of suspended sediments in water column, were consistent with those observed under field

* 国家自然科学基金(20577053, 40171083)和中国科学院知识创新课题(KZCX3-SW-348)联合资助。2006-10-26 收稿; 2007-01-22 收修改稿。尤本胜, 男, 1977年生, 博士研究生; E-mail: ybsh001@163.com.

** 通讯作者; E-mail: cxfan@niglas.ac.cn.

conditions. The Y-shape apparatus was thus recommended for use in studying the ecological effects of sediment resuspension in shallow aqueous system.

Keywords: Sediment; resuspension; wind effect; vertical distribution; simulation; apparatus; Lake Taihu

由于风浪易对底部沉积物产生动力扰动作用,有关浅水湖泊底泥再悬浮的生态效应研究已经成为目前国际湖泊学研究的热点课题之一^[1-3]. 沉积物-水界面是湖泊中最重要的界面之一,水动力作用下沉积物发生再悬浮,进而引起表层沉积物营养盐的释放、生物数量的变化、以及水体光照度的变化等^[4-6]. 因此,研究风浪引起的浅水湖泊沉积物再悬浮效应具有重要意义. 然而在底泥再悬浮的研究中,由于缺乏令人信服的室内模拟方法,使沉积物再悬浮的环境效应研究受到很大的限制. 因此,找到一个切实可行的方法是进行浅水湖泊再悬浮效应研究亟待解决的问题.

目前风浪条件下太湖沉积物再悬浮的研究方法主要有现场观测和室内模拟. 张运林等^[6]对太湖的悬浮物及风速等进行了长时间的观测,积累了一定的现场资料. 2003年胡春华等人^[7]对太湖南部长兜港和梅梁湾水域进行了现场观测,获得各种条件综合作用的现场实时数据,但受限于风情(风向和风力)的发生频率和持续时间等不可控因素,也需要耗费较大的人力和物力,难以推广. 风浪对沉积物作用的室内模拟主要有振荡法^[8]、波浪水槽法^[9]、环行槽法^[10]. 振荡法是在三角瓶中装入一定量沉积物和水样,以振荡频率模拟风速的大小. 该方法简单易控且可多组平行;但是体系过小,内含物不能随风浪增强而递增. 波浪水槽和环行槽法是采用机械方法产生上覆水的定向流动使底泥发生悬浮. 方法易于控制条件,但是实验底泥的原状性受到一定的破坏,较浅的上覆水与湖泊实际情况差异较大. 保持沉积物的原状性非常重要,它不仅关系到暴露于上覆水的界面及其结构的变化影响再悬浮量的结果,对营养物质的释放量的研究会带来不可预知的结果,进而在认识底泥再悬浮过程和对营养盐的“源”还是“汇”的问题难以统一.

本研究采用的Y型再悬浮发生装置法是用电动可调传动装置斜向和垂向对底泥界面和水柱产生动力扰动作用,克服了上述方法的底泥原状结构问题和水深与湖泊实际状况差异较大等问题,也可进行多组平行实验,因此是浅水湖泊沉积物再悬浮的研究较为适合的模拟方法. 该方法虽然有其突出特点,但是其与现场方法的差异、悬浮物的垂向分布的产生条件、再悬浮量与扰动强度、风浪强度关系等还缺乏研究. 本文系统地研究了长兜港沉积物的再悬浮过程,以期揭示大型浅水湖泊沉积物再悬浮的规律,为浅水湖泊沉积物再悬浮和内源动态释放等研究提供一种实用模拟方法.

1 材料与方法

1.1 再悬浮模拟装置原理

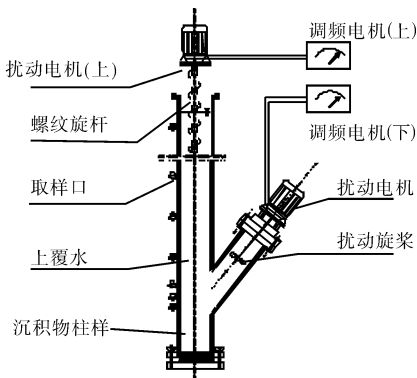


图1 Y型再悬浮发生装置剖面图
Fig. 1 Y-type chamber to resuspend sediments in the laboratory

Y型旋浆式沉积物再悬浮发生装置(专利号:ZL200420025427.9)由Y型聚乙烯管、侧位搅拌电机、上部扰动电机和调频电机等主件组成(图1). 原状底泥移入Y型管并注入上覆水后,调节各组下部和上部调频电机频率(0-60 Hz)来控制下部搅拌旋浆和上部螺纹旋杆转速. 上部和下部电机的起动频率分别为0和3.5 Hz. 下部旋浆通过推动水体主要获得沉积物再悬浮量;上部螺纹杆则通过旋转运动,增加悬浮颗粒物自由程,减低与管壁的碰撞几率,并推动水流产生垂向运动,使悬浮起来的沉积物在水柱中纵向交换,以达到或满足所需的悬浮物垂向分布.

1.2 风情统计方法

所有风速数据均取自设立于梅梁湾边太湖湖泊生态系统研究站的全自动风速测定仪(MODAS). 全年风速频率选用2004年10月31日至2005年10月30日每10 min一次的自动记录结果,对记录纸高倍数码拍照后,在计算机屏放大直读风速数据.

1.3 沉积物和水样采集

采样点位置(120°07'50"E;30°57'12"N)与文献[8]相同,即位于太湖南部湖州长兜港附近,距岸边约1 km的开阔水域,水深1.4-1.6 m. 采用进口大口径柱状采样器(Rigo Co. Φ110×500)采集若干沉积物样,用橡胶塞将柱样塞紧保存. 另用若干25 L聚乙烯塑料桶在采样点采集湖水作为实验系统的上覆水,所有泥样及水样于当天运往实验室,低温4℃下保存.

1.4 再悬浮模拟实验

1.4.1 悬浮物垂向分布模拟 按Y型再悬浮发生装置的实验操作步骤,将柱状底泥(高20 cm)慢慢移入Y型再悬浮发生装置,注入上覆湖水,根据实验需要设定调频电机电动频率(Hz),模拟不同风浪对底泥的扰动状态. 具体方案:(1)下部电机扰动频率固定为5.6 Hz,上部电机分别进行0、2、4、7、10、12、15 Hz的扰动实验. 选择扰动3 h时采样;(2)下部电机扰动频率固定为8.0 Hz,上部电机与(1)相同. 上覆水深度为现场采样点的水深160 cm. 考虑动力强度增加对再悬浮稳定时间的影响,选择扰动4 h时采样. 取样口距沉积物表面高度(从上至下)分别为:155 cm,105 cm,55 cm,10 cm和3 cm. 每实验组均设3次平行. 采样后向水柱中补充同体积已知悬浮物浓度的湖水,并根据体积修正其稀释作用产生的误差.

1.4.2 水体悬浮物总量平衡时间实验 分别设定下部电机扰动频率5.0、5.6、6.2、7.0、8.0、10.0 Hz,上部电机扰动频率固定为10.0 Hz. 考虑动力强度越大再悬浮稳定所需时间越长,估计5.0、5.6 Hz转速时选择扰动时间3 h,并分别在30、60、90、120、180 min时在各垂向采样口采样50 ml;在6.2、7.0、8.0 Hz转速时选择扰动4 h,分别在30、60、120、180、240 min采样;在10.0 Hz转速时选择扰动5 h,分别在30、60、120、180、240、300 min采样;取样口与前相同. 每实验组设3次平行.

1.5 悬浮物含量的测定

悬浮物含量的测定采用过滤法. 将水样摇匀,用Whatman GF/C玻璃纤维滤膜过滤,用恒重法(105℃,4 h)得悬浮物重量,再换算成含量(mg/L).

1.6 水柱总悬浮物量的计算方法

单位面积水柱总悬浮物量可通过下式进行计算:

$$T = \sum_{i=1}^n q_i \times h_i \tag{1}$$

其中, T 为单位面积水柱总悬浮物量(g/m^2); q_i 为第*i*水层悬浮物浓度(mg/L); h_i 为第*i*水层的厚度(m).

2 研究结果

2.1 太湖风速及风速过程特征

2.1.1 年风速特征 湖泊的风向特征是决定湖区温度场及沿岸风速分布状况的重要因素之一. 根据风向的频率统计(图2),太湖全年以E和ESE为主导风向,此二方位上的风向频率占22.7%. 其次,SSE和SE风向也占有相当数量,与孙顺才等^[11]的研究结果基本一致. 太湖风向总体上主要分布在E至SSE方向,占全部风向频率的39.5%. 太湖风速数据的分析表明(图3),仪器记录到的太湖全年最大风速为20.0 m/s,平均风速为3.6 m/s,众数和中值分别为2.7 m/s和3.3 m/s. 0-3.3 m/s的低风速所占比例较大,约占全年风速出现频率的54.2%. 太湖每10 min记录的平均风速以1.7-4.7 m/s的风速为主,占全年出现频率的61.7%. 而8.0 m/s以上的大风浪则相对较少,约占全年的3.2%.

2.1.2 不同风速过程分析 考虑到低风速对湖泊的水动力影响较小^[2,7],较难对沉积物产生再悬浮作用,因此重点研究对再悬浮贡献较大的大中风速情况. 选出累积频率95%以上的风速作为特殊风速过程,累积频率小于95%

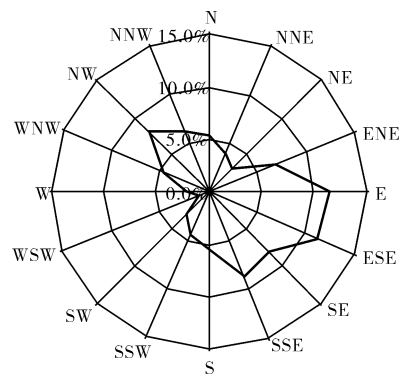


图2 太湖全年(Oct. 2004 - Oct. 2005) 风向频率分布

Fig. 2 Wind direction rose sketch in Lake Taihu

再悬浮贡献较大的大中风速情况. 选出累积频率95%以上的风速作为特殊风速过程,累积频率小于95%

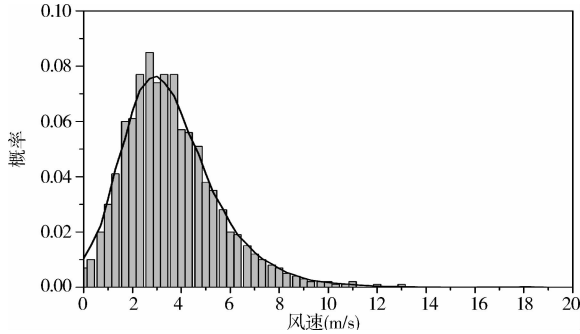


图3 太湖各风速概率分布(Oct. 2004 - Oct. 2005)

Fig. 3 Probability distribution of winds speed in Lake Taihu

则平均分为3等份,对落入每等份频率的风速分别进行累积加权平均统计,结果为:累计频率 $< 31.67\%$,风速 1.7 m/s ; $31.67\% - 63.33\%$,风速 3.2 m/s ; $63.33\% - 95\%$,风速 5.1 m/s . 参考浦氏风级表, 1.7 m/s 风速基本对应于轻风,水面仅能产生微小波浪,对再悬浮的贡献与静风等同,故作为背景风速; 3.2 m/s , 5.1 m/s 和 8.7 m/s 的风速则对应于微风(小波)、和风(轻浪)及清风(中浪),这里分别定义为小风、中风和大风. 范成新对1997-1999年的风速数据,将太湖风情分为4个常见风速段($0-1$, $2-4$, $5-7$ 和 8 m/s 以上)^[8]. 虽然选取风速的年份不同,但是太湖的代表性风速则基本一致.

从统计而言,风速不同其持续过程也不相同,由于太湖小风居多,历时很长,难以进行准确统计;太湖的中风过程全年则有237个,最长和最短历时分别为 800 min (13.3 h)和 30 min ,平均历时约 120 min ;大风过程51个,最长和最短历时分别为 1240 min (20.7 h)和 30 min ,平均历时为 155 min . 不同风速的起落时长也有差别,其过程也并非简单的单调增加或减小过程. 小风的起风落风过程可在 10 min 内完成;但是大都在 $20-30 \text{ min}$ 左右;中风大风过程相对复杂,起风过程一般在 3 h 左右完成,落风过程一般在 $2-4 \text{ h}$ 完成,大中风的起风落风过程大致呈对称分布.

2.2 水柱悬浮物垂向分布和总悬浮物量模拟分析

2.2.1 水柱悬浮物垂向分布规律

悬浮物在水柱中的垂向分布呈现一定的规律性,根据文献^[7]的现场工作(图4A,B),悬浮物在表层水体(距水-气界面 30 cm 内)和上层水体中分布相对均匀,变化不大. 而在底层水体(距水-沉积物界面 10 cm)中随水深的增加悬浮物浓度有明显的增大. 大风浪状态下底层悬浮物浓度随深度增加的曲线相对于无风状态平滑. 图4中C,D为在设定的两种再悬浮条件下,改变上部扰动状态的柱样水体悬浮物垂向分布. 结果表明下部电机的频率为 5.6 Hz 和 8.0 Hz 时,随着上部电机扰动频率由小至大的变化,悬浮物含量垂向分布向含量高的右边移动,同时浓度垂向变化的拐点位置也逐渐下移.

在小风浪(约 5.6 Hz)下,上部电机频率在 7 Hz 和 10 Hz 时线形与现场测定的小风浪情况相似(图4A,B),悬浮物垂向分布的拐点位置也接近于实测. 在大风浪(约 8.0 Hz)下,与实际线型最相近的条件是上部电机频率为 10.0 Hz 时. 其实测的距底部 1 cm 的悬浮物含量达到约 770 mg/L ,而模拟实验在此位置最大则仅为 570 mg/L ,相差约 200 mg/L . 两者差异可能与再悬浮发生机制的不同有关:用旋桨产生沉积物扰动是通过推力,而实际湖底扰动可能是水动力在湖底的切应摩擦作用^[12]. 虽然模拟和实测在距底部 1 cm 处的含量上差异较大,但是因其相对体积很小,对全水柱的总悬浮物的贡献也较小^[7]. 综合考虑上述大、小风浪两种情况,确定上部电机扰动频率为 10.0 Hz 来模拟现场的悬浮物垂向分布.

2.2.2 水柱总悬浮物量随扰动强度和时间的变化

下部电机不同控制频率下总悬浮物量的历时曲线如图5. 水柱总悬浮物量随频率增大呈逐级增加,时间延长则逐渐稳定或增加趋缓. 除在 180 min 时 6.0 Hz 和 7.0 Hz 扰动强度出现与期望变化相反外,各扰动频率下的水柱总悬浮物量过程线都不相交,说明水柱悬浮物量随下部电机频率增大变化较一致.

当下部电机扰动频率为 5.0 、 5.6 Hz 时,水柱的总悬浮物量在 60 min 内有明显的增加, 60 min 后变化不大;扰动频率为 6.2 、 7.1 和 8.0 Hz 的水柱总悬浮物量在 120 min 内有明显的增加,后趋于稳定;当下部电机

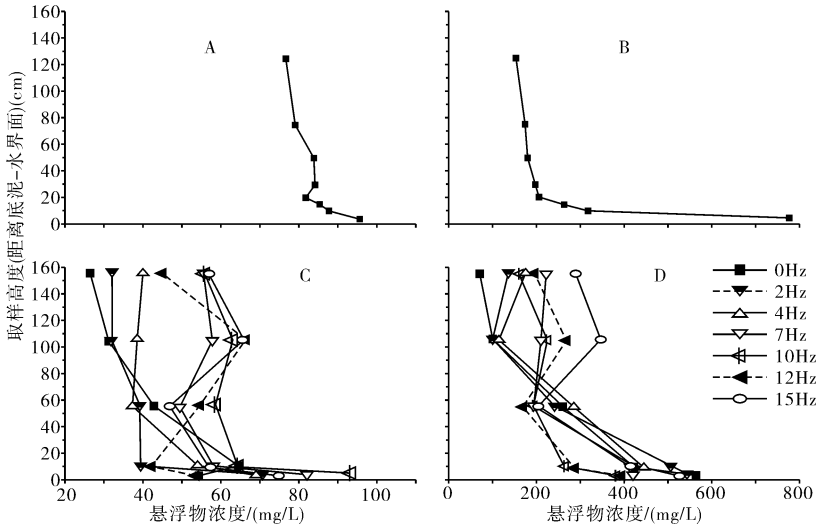


图4 不同扰动频率(上部电机)的悬浮物垂向分布(下)及现场状况(上)
(A,C小风;B,D大风)

Fig.4 Vertical distribution of SS for spot and simulation

扰动频率提高到 10.0 Hz 时,水柱的总悬浮物量在 180 min 内增加迅速,随后趋缓. 因此对于上述 ≤ 5.6 Hz、 $6.2 - 8.0$ Hz 和 ≥ 12 Hz 的不同扰动频率,可认为再悬浮达到稳定时间分别为 60 min、120 min 和 180 min.

2.3 水柱总悬浮物量、室内试验条件以及现场风浪条件之间关系分析

2.3.1 水柱总悬浮物量与扰动转速关系分析 在设计 的 6 个水动力强度中,5.0 - 8.0 Hz 的 5 个扰动强度下水柱总悬浮物量在 60 min 到 120 min 基本稳定,标准偏差差别不大;而 10.0 Hz 扰动频率下,水柱总悬浮物量随时间单调增加,历时增加趋势变缓. 为了减小取样所造成的误差,对前 5 个扰动历时的后 4 个数据和 10.0 Hz 扰动历时的后 3 个数据分别取均值,作为该扰动强度的水柱总悬浮物量,发现水柱总悬浮物量 - 扰动频率并非单纯的直线关系(图 6),两者的拟合方程如下:

$$T = 19.77 \exp(n/2.61) - 71.7, R^2 = 0.99 \quad (2)$$

其中, T 为水柱总悬浮物量 (g/m^2), n 为扰动转速 (Hz).

当 n 为 0 时,上式的 T 为 $-51.9 g/m^2$. 这主要因为扰动电机的起动频率为 3.5 Hz 左右,0 - 3.5 Hz 水柱总悬浮物量的计算值没有实际意义. 当电机以起动频率扰动时,式(2)的计算结果为 $4 g/m^2$,比较符合现实情况.

通过对本次试验沉积物表层粒度分析可知,粒径 $d(10\%)$ 为 $1.948 \mu m$,中值粒径 $d(50\%)$ 为 $11.452 \mu m$,粒径 $d(90\%)$ 为 $44.946 \mu m$. 表层的粒径较小的沉积物极易再悬浮,较大的颗粒需要的水动力较大^[8]. 当扰动频率较小时,水动力作用产生的切应力较小,引起的悬浮物量也较小. 随扰动频率的增加,当其在沉积物表面产生的剪切力大于沉积物的临界起动切应力时,粒径较大的沉积物逐渐起动,沉积物再悬浮量也随之显著增加.

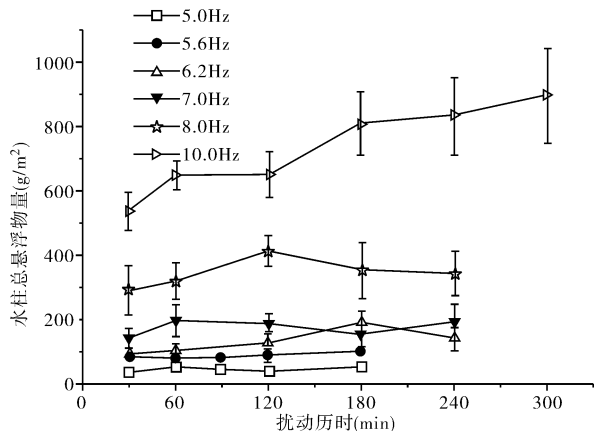


图5 总悬浮物量历时曲线

Fig.5 Duration curve of total suspended substance

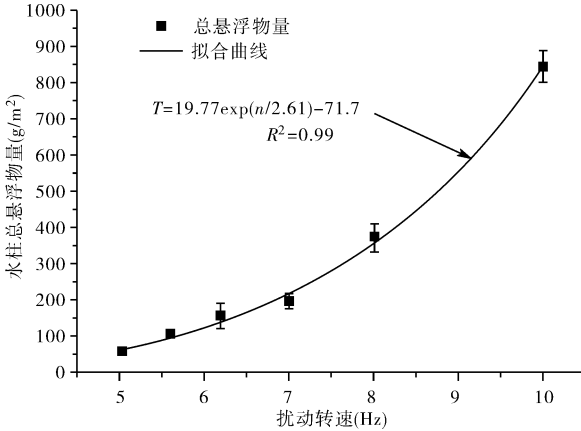


图6 水柱总悬浮物量 - 扰动转速关系曲线

Fig. 6 Relationship for total suspended substance and rotation frequency

2.3.2 室内实验条件与现场风浪关系分析 据胡春华等在长兜港现场观测数据,将现场的水柱总悬浮物量通过关系式(2)计算对应的扰动频率,建立了室内水动力条件与现场风速的定量对应关系如下:

$$v = 2.667n - 13.8 \quad (3)$$

现场风速与水体总悬浮物量的关系:

$$T = 181.31 \exp(v/8.0) - 113.1 \quad (4)$$

其中, v 为风速(m/s); n 为电机转速(Hz); T 为水柱总悬浮物量(g/m^2).

当风速 v 为 0 时,式(3)中电机转速 n 为 5.1 Hz;而据式(2)计算该扰动频率的总悬浮物量 T 为 $72 \text{ g}/\text{m}^2$. 在式(4)中,当风速 v 为 0 时, T 为 $68 \text{ g}/\text{m}^2$;都与实际情况存在一定的差别. 自然过程中,风速为 0 的情况很少发生,并且悬浮物的沉降相对于风速变化存在滞后效应,因此太湖水体的

悬浮物完全沉降的现象很难发生,在风速较小的情况下,监测的悬浮物量相对偏大,这是造成如上差别的主要因素. 另外,现场监测的风速与悬浮物对应关系数据较少,将电机的扰动频率与风速作为简单的线性关系处理以及电机的起动频率不为零都会给结果造成一定的误差. 随现场数据的积累,误差将得到一定程度的减少.

2.3.3 水柱总悬浮物量与现场风速条件的对应关系 根据以上得出的水柱总悬浮物量与室内试验条件及现场风浪条件之间的关系,可以计算出常规风情(小风、中风和大风状态)对应的室内模拟试验的电机扰动转速和水柱总悬浮物量(表1).

表1 现场风速对应扰动转速和总悬浮物量结果

Tab. 1 Rotating speed under wind and total suspended solids

参数	常规风速(计算值)				现场监测值	
风速(m/s)	1.7	3.2	5.1	8.7	1.4	6.2
扰动频率(Hz)	5.8	6.4	7.1	8.4		
总悬浮物量(g/m^2)	111	159	230	425	102	289

李一平等^[10]的研究中给出了“个别动”“少量动”和“普遍动”三种底泥悬浮状态的区分,计算了对应的水流流速分别为 37.9, 46.7, 59.8 cm/s. 秦伯强等^[13]研究发现太湖沉积物的悬浮主要由波动作用引起,湖流的作用很小. 因此用环形水槽研究太湖沉积物悬浮量可能会存在一定的差异. 朱广伟,孙小静等^[9,14]根据对波浪水槽底泥的“起动”“掀沙”的现象确定了小波 8.77 cm 和“大波”12.31 cm 的水动力状态,水体悬浮物量分别为 21.8 和 $358.4 \text{ g}/\text{m}^2$. 据式(4)计算,其“大波”状态相当于 7.6 m/s 的现场风速;而实际现场风速为 6.2 m/s 时波高已为 17.2 cm^[7],大于“大波”状态的 12.31 cm^[9],且悬浮物量却比其小. 其原因一方面是太湖梅梁湾^[9]与长兜港^[7]的沉积物再悬浮特性不同,最主要的可能是水槽实验所用沉积物不能保证原状性和水柱高度过浅(30-40 cm)^[9,14],而与实际状况存在差异有关.

3 结论

通过对太湖长兜港原状沉积物再悬浮规律的模拟研究,得出再悬浮底泥的垂向分布等较为接近现场的室内水动力条件及水柱总悬浮物量随时间的变化规律,初步建立了水柱总悬浮物量、室内水动力条件与现场风浪条件之间的定量关系,并估算了长兜港常规风情引起的总悬浮物量.

对比其他室内模拟实验手段,用Y型沉积物再悬浮发生装置进行模拟是目前较为接近现场且又能进行可控水动力条件的室内模拟方法.本研究重点考察的是沉积物再悬浮规律,有关营养盐等在这一过程中的相应变化规律还需要进一步研究.另外,该试验装置在力对沉积物表层作用机制上与现实湖体还存在一定的差异,以及横向运动的湖流和壁效应等,这些影响尚未全部消除,因此应存在一定的误差.应用于其它相似水体及其沉积物时,该装置的实验参数是否可继续使用,还需要进一步的工作来完善.

致谢:中国科学院太湖湖泊生态系统研究站提供了2004-2005年的太湖风情观测资料,在此表示感谢.

4 参考文献

- [1] Giffia D A. Impacts of sediment resuspension on water quality in the Pamlico and Neuse river estuaries[Dissertation]. Est Carolina University(USA), 2003:7-49.
- [2] John R J, Matthew F K. Suspended solid in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes. *Water Res*, 2005, **39**:3629-3635.
- [3] Herbrandson C, Bradbury SP, Swackhamer DL. Influence of suspended solids on acute toxicity of carbofuran to *Daphnia magna*; I. Interactive effects. *Aquat Toxicol*, 2003, **63**:333-342.
- [4] 张路,朱广伟,罗淑葱等.风浪作用下太湖梅梁湾水体磷负荷变化及与水体氧化还原特征关系.中国科学(D辑),2005,**35**(增II):138-144.
- [5] 胡维平,胡春华,张发兵等.太湖北部风浪波高计算模式观测分析.湖泊科学,2005,**17**(1):41-46.
- [6] 张运林,秦伯强,陈伟民等.太湖水体中悬浮物研究.长江流域资源与环境,2004,**13**(3):266-271.
- [7] 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.
- [8] 范成新,张路,秦伯强等.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),2003,**33**(8):760-768.
- [9] 朱广伟,秦伯强,张路等.太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验.湖泊科学,2005,**17**(1):61-68.
- [10] 李一平,逢勇,陈克森等.水动力作用下太湖底泥起动规律研究.水科学进展,2004,**15**(6):770-774.
- [11] 孙顺才,黄漪平主编.太湖.北京:海洋出版社,1993:7-12.
- [12] Grand W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J Geophys Res*, 1979, **84**(C4):1797-1808.
- [13] 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] 孙小静,朱广伟,罗淑葱等.浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究.中国科学(D辑),2005,**35**(增II):81-89.