

太湖长兜港固体悬浮物再悬浮的室内模拟

王同成¹, 尤本胜^{2,3}, 范成新², 逢 勇¹, 赵艳艳⁴

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 南京交通职业技术学院, 江苏 南京 210032)

摘要 定量研究浅水湖泊动力扰动与沉积物再悬浮的关系, 目前仍是湖泊研究中的难点之一。实验利用再悬浮发生装置, 对太湖长兜港沉积物风浪扰动进行室内模拟, 建立扰动强度与有效波高之间的关系, 定量分析风浪对太湖水体中悬浮物的影响及固体悬浮物在水体中的垂向分布, 初步得出风浪对太湖沉积物扰动深度一般在毫米级的结论。

关键词 再悬浮; 波高; 固体悬浮物; 扰动深度; 模拟实验

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)02-0013-03

Laboratory simulation of resuspension of suspended solids in Changdou Harbor of Taihu Lake

WANG Tong-cheng¹, YOU Ben-sheng^{2,3}, FAN Cheng-xin², PANG Yong¹, ZHAO Yan-yan⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Nanjing Communications Institute of Technology, Nanjing 210032, China)

Abstract Quantitative study on the relationship between hydrodynamic conditions and sediment resuspension in shallow lakes is still a difficult problem. In this experiment, resuspension equipment was used to simulate the effects of wind waves on resuspension of sediments in Changdou Harbor of Taihu Lake. The relationship between disturbance intensity and effective wave height was presented, and the effects of wind waves on the sediments and the vertical distribution of suspended solids in water were analyzed quantitatively. The results showed that the disturbance depth of wind waves on sediments in Taihu Lake was generally in millimeters.

Key words resuspension; wave height; suspended solid; disturbance depth; simulation experiment

湖泊现代沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分, 是入湖有机质、营养盐、重金属等的主要蓄积场所。浅水湖泊单位体积的湖水具有水土接触面大、波浪等水动力作用, 易对湖底沉积物产生强烈扰动。与湖流的切应力相比, 波浪切应力是导致底泥再悬浮的主要影响因素, 占主导地位^[1-5]。国内外的学者通过野外观测、试验模拟及数学模型对沉积物再悬浮做了一些研究工作, 取得了许多有意义的成果^[6-9]。胡春华等^[8]曾对太湖沉积物再悬浮进行现场观测, 得出了太湖梅梁湾、长兜港等太湖水域不同风情或波浪强度下, 水动力与水柱中悬浮物量的关系, 并初步得出了风浪扰动沉积物的厚度在毫米级

范围。但是, 野外观测存在着试验条件不可控、被动地获得数据、较难重现结果等问题, 李一平等^[9]利用环形水槽模拟了底泥的起动规律, 虽然能定量分析太湖上层水运动与底泥起动的关系, 但在其实验过程中不能保持沉积物的原状, 上层水体过浅, 与实际情况相差很远。为了解决这些问题, 本实验利用进口大口径封底式柱状采样器(保证了沉积物的原状)及再悬浮发生装置^[10], 对太湖长兜港沉积物风浪扰动进行室内模拟, 建立扰动强度与有效波高之间的关系, 定量分析风浪对太湖水体中悬浮物的影响, 以揭示该地区湖水中悬浮物在不同的水动力条件下的变化过程, 为治理太湖提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 泥样采集

2005 年 9 月 23 日,用全球卫星定位系统 GPS 导航,进口大口径封底式柱状采样器(日产 Rigo HR5171, $\varnothing = 110\text{ mm}$),在太湖南部长兜港(30°57'12"N, 120°7'50"E)采集 30 多根柱状样,采样点位置示意图见图 1),两端用橡皮塞塞紧,垂直放置,带回实验室。



图 1 采样点位置示意图

1.2 水样采集

实验所需的水样用 25 L 聚乙烯桶储存,采集若干桶,水样与泥样一并于当天运达中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊界面过程实验室进行保存、处理和模拟实验。

1.3 再悬浮实验模拟方法及步骤

将从野外采集的柱状沉积物小心移入 Y 型再悬浮发生装置(图 2),沉积物高度为 20 cm,3 柱一组平行,共设置 5 个取样口,以各取样口位置,自下而上缓慢加入上覆水于指定高度 1.6 m,设置上下电机的频率,启动调频电机于指定频率(下部电机对沉积物进行扰动,上部电机调节管中悬浮物的垂向分布),于不同时间(0.5 h、1 h、2 h、3 h、4 h)通过取样嘴,采集距水-土界面不同高度的水样。样品采集后立即分析或保存。

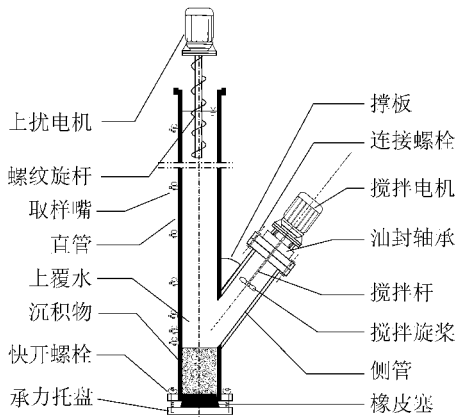


图 2 Y 型再悬浮发生装置示意图

1.4 样品分析方法

样品分析方法主要参照《湖泊富营养化调查规

范》、国家分析测试标准和国内外文献提供的方法。采集的水样用玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)抽滤,用恒重法 105℃烘 4 h, 10^{-5} 电子天平称量,获得悬浮物量(SS)。

2 计算

2.1 水柱悬浮物累积浓度计算

根据水样所处各水层水样的悬浮物浓度,计算单位面积水柱悬浮物累积浓度,计算公式如下:

$$q = \sum_{i=1}^5 \rho(SS_i) \Delta Z_i \quad (1)$$

式中: q 为水柱悬浮物累积浓度, g/m^2 ; $\rho(SS_i)$ 为第 i 取样点悬浮物质量浓度, g/m^3 ; ΔZ_i 为第 i 水层的厚度, m 。由于取样嘴距离不等, ΔZ_i 的获取采用其取样嘴上、下两层水高度和的一半,其中最高和最低取样嘴 ΔZ_i 的获取分别为最高水层高度加二层高度一半,最低水层高度加次低二层高度一半。

2.2 电机频率与波高关系的建立

根据室内模拟所得数据及胡春华等^[8]在长兜港现场监测数据:波高为 2.8 cm 时, $\rho(SS)$ 为 0.102 kg/m^3 ,波高为 17.2 cm 时, $\rho(SS)$ 为 0.289 kg/m^3 ;得出室内电机扰动频率与波高之间的关系为

$$y = 8x - 42.8 \quad (2)$$

式中: y 为波高, cm ; x 为下部电机扰动频率, Hz 。

2.3 风速与波高之间的关系

罗激葱等^[11]在太湖长兜港进行了野外波浪观测,验证了浅水波动(SMB)模式能用来计算太湖长兜港的波高。该 SMB 模式为

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.530 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{0.75} \right] \times \tanh \frac{0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42}}{\tanh \left(0.530 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{0.75} \right)} \quad (3)$$

式中: U 为高于水面 10 m 处的风速, m/s ; F 为湖面风区长度, m ; D 为实际水深, m ; H 为波高, m ; F 取 1500 m; D 取 1.6 m。

3 结果讨论

3.1 不同风速条件下悬浮物浓度的垂向分布

根据公式(2)(3)计算得出,在不同风速条件下,试验水柱中不同水深的悬浮物浓度的分布情况(图 3)。由图 3 可知,水体中的悬浮物浓度垂向变化很大,风速为 7 m/s 时,最小为 133.6 mg/L,最大达到 320 mg/L。表层水体(即距水-气界面 1.5 m 内的水体)变化范围较小,而底层水体(距水-土界面 0.1 m 内的水体)变化范围很大,说明底层水体悬浮物浓度的变

化要比表层水体剧烈得多。在小风状态,悬浮物浓度变化范围较小,而在大风状态,悬浮物浓度变化范围较大。因此,风浪是驱动大型浅水湖泊复杂多变的重要因素。这一结果与胡春华等^[8]在太湖长兜港现场测定的悬浮物垂向浓度分布较为吻合,表明用此方法可以有效地模拟风浪对太湖沉积物的扰动。

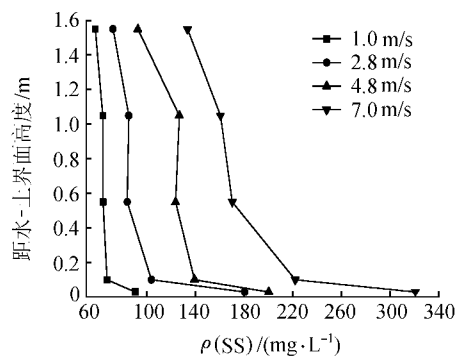


图3 不同风速条件下悬浮物浓度垂向分布

3.2 不同风速下不同历时悬浮物累积浓度的变化

根据公式(1)(2)(3)计算得出在不同风速条件下不同历时试验水柱单位面积悬浮物累积浓度的变化(图4)。由图4可知,试验水柱的单位面积悬浮物累积浓度随扰动时间增加而缓慢增长,在小至中风条件下,扰动2h后,悬浮物累积浓度达到稳定,基本保持不变;在大风(7 m/s)条件下,悬浮物累积浓度虽然随扰动时间变化缓慢,但其一直随时间的增加而增大。通过对本次试验沉积物表层粒度分析可知,粒径 $d(10\%)$ 为 $1.948\mu\text{m}$,中值粒径 $d(50\%)$ 为 $11.452\mu\text{m}$,粒径 $d(90\%)$ 为 $44.946\mu\text{m}$ 。这说明,在小至中风条件下,表层粒径较小的沉积物极易再悬浮,而由于风速较小,波浪产生的切应力较小,沉积物的临界起动切应力较大,只有在大风条件下,粒径较大的沉积物才有可能逐渐被起动。

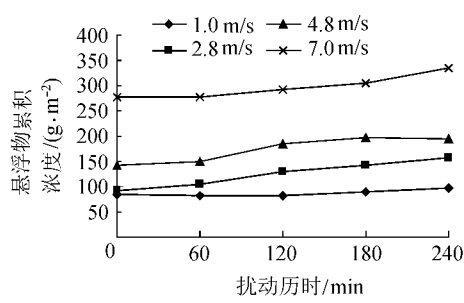


图4 单位面积悬浮物累积浓度

3.3 风浪扰动沉积物的深度

根据试验水柱单位面积悬浮物总量,可以计算风浪作用导致的湖底沉积物扰动深度。计算方法为:

$$L = M / (\rho_{\text{wet}} g (1 - W)) \quad (4)$$

式中: L 为扰动深度; M 为单位面积悬浮物总量; $\rho_{\text{wet}} g$ 为沉积物湿密度; g 为重力加速度; W 为沉积物含水率。

经计算可得试验水柱在不同风速下的扰动深度,当风速分别为1.0 m/s、2.8 m/s、4.8 m/s、7.0 m/s时,扰动深度分别达到0.232 mm、0.375 mm、0.462 mm、0.800 mm。

上述计算所得的扰动深度,与实验时柱内测量的扰动深度基本一致。由此可知,风浪对太湖沉积物扰动深度一般在毫米级范围内,这也与胡春华等^[8]在太湖长兜港野外观测所得的结果一致。

4 结 语

本实验利用再悬浮发生装置,能较好地模拟实际风浪对沉积物再悬浮扰动的垂向分布,从而为定量分析波浪对沉积物的影响,特别是在模拟实际湖体底泥沉积原状下和实际水深下的界面行为提供了可能性。但本试验装置与现实湖体还存在一定的差异,比如横向运动的湖流和壁效应等,这些影响尚无法模拟,因此会带来一定的误差。

致谢:本文在野外采样和室内实验中,得到了钟继承、丁士明、李宝和尹洪斌等博士的帮助,所有实验设备和材料均由中国科学院南京地理与湖泊研究所提供,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 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[J].中国科学,2003,33(8):760-768.
- [2] 朱广伟,秦伯强,高光.强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J].水科学进展,2004,15(6):775-780.
- [3] 鲁有铭,吴培江,胡金桥.长兜港入湖口门泥沙淤积成因初探[J].浙江水利科技,2005(2):4-6.
- [4] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体中悬浮物研究[J].长江流域资源与环境,2004,13(3):266-271.
- [5] 朱广伟,秦伯强,高光.风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J].科学通报,2005,50(1):66-71.
- [6] MARK G C, ROBERT M B. Variability of parameters measured during the resuspension of sediments with a particle entrainment simulator[J]. Chemosphere, 2004, 56:51-58.
- [7] JOACHIM R, PETER E H. A model of suspended sediment transport by internal tides[J]. Continental Shelf Research, 2001, 21:395-422.
- [8] 胡春华,胡维平,张发兵,等.太湖沉积物再悬浮观测[J].科学通报,2005,50(22):2541-2545.
- [9] 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[J].水科学进展,2004,15(6):770-774.
- [10] 范成新.一种室内模拟水下沉积物再悬浮状态的方法及装置:中国,ZL20041001432[P]. 2005-01-12.
- [11] 罗淑葱,秦伯强,胡维平,等.太湖波动特征分析[J].水动力学研究与进展,2004,19(5):664-670.