

模拟扰动条件下太湖水体悬浮物的结构特性

张彬, 李涛, 刘会娟, 王东升, 曲久辉*

(中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 设计了 1 个水体扰动模拟实验装置, 通过该装置中的光散射分析仪和图象采集、分析系统, 能在线记录底泥受到不同强度扰动时水体中悬浮颗粒物的变化过程. 利用该装置, 研究了太湖梅梁湾 3 个采样点的底泥在受到不同强度扰动后, 水体浊度变化规律和悬浮颗粒物结构特性. 结果表明, 底泥含水率及粒度分布对底泥受扰动后再悬浮的潜力有较大影响, 含水率越高, 再悬浮的潜力越大. 随着扰动强度增大, 水体的浊度相应增加, 水体中悬浮颗粒物中值粒径也增大, 分别从 6.63, 5.79, 5.51 μm 上升到 12.49, 11.38, 13.33 μm . 悬浮颗粒物图象分析表明, 颗粒物在扰动中发生聚集、絮凝过程. 颗粒物图象的形态学分析表明, 悬浮颗粒物形状呈现分形现象, 颗粒物的长短比在 1.27 ~ 1.52 之间, 分形维数 D_2 则在 1.72 ~ 1.94 之间.

关键词: 扰动强度; 絮凝指数; 粒径分布; 形态学

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0070-05

Structural Characteristics of Suspended Solids in Taihu Lake Under Simulative Disturbing Conditions

ZHANG Bin, LI Tao, LIU Hui-juan, WANG Dong-sheng, QU Jiu-hui

(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract An equipment was designed to simulate the disturbance of water. The equipment includes photometric dispersion analyzer (PDA2000), images gathering and analysis system which can record the change process of suspended particulate under different intensity conditions. Using this installment, the change of water turbidity and structural characteristics of suspended particulate of three sediments in Meiliang Bay, Taihu Lake, were studied under different disturbing intensities. The results showed that the re-suspension potential of sediment was influenced by moisture content and distribution of granularity, the moisture content is higher, the re-suspension is more possible. With the increasing of disturbance intensity, the turbidity increased, the median granularity of particulate matter in the water increased from 6.63 μm , 5.79 μm and 5.51 μm to 12.49 μm , 11.38 μm and 13.33 μm respectively. The morphological analysis of particulate images showed that the shape of the particulate presents fractal phenomenon, the long-short ratio of particulate were between 1.27 to 1.52 and fractal dimension were between 1.72 to 1.94.

Key words: disturbed intensity; flocculation index; granularity; particle morphology

太湖位于长江三角洲南翼坦荡的太湖平原上, 实际水面面积为 2 338.1 km^2 , 湖泊平均水深 1.9 m, 最大水深 2.6 m, 是一个典型的浅水湖泊, 因而很容易受到风浪的扰动作用^[1]. 在风浪作用下底泥极易发生再悬浮, 使得湖水中悬浮物浓度增加^[2], 而湖水中悬浮物浓度的变化将影响水体的透明度, 进而影响太阳光在水下的分布和浮游植物对光照的利用, 最终将导致湖泊初级生产力的改变^[3]. 一般情况下, 太湖受到的风浪扰动可分为小风、中等风和大风.

水体中的颗粒物并非理想的球体, 扰动条件下会发生悬浮、絮凝、破碎、再絮凝、沉降等过程. 通过对水体中颗粒物絮凝体的形态学分析, 获取絮凝体的分形参数, 进而可了解水动力与水体中悬浮物絮凝速度及絮凝团大小等的关系.

利用全球定位系统(GPS)于 2004-07, 在太湖北部梅梁湾水域太湖站常规监测点中的三山岛边 T1 (N31°30'47", E120°11'29")、4 号航标 T5 (N31°24'41", E120°11'15")、直湖港入口 T6 (N31°30'19", E120°7'56") 3 点用抓斗采集底泥, 具体采样点位如图 1 所示. 将底泥清除较大杂物后放入聚乙烯密实袋中, 密封好的样品存放于装有冰袋的 Igloo 保温箱中, 随即带回实验室在 0 ~ 4℃ 下保存备用.

扰动模拟实验装置见图 2. 装置中的搅拌器由圆柱形烧杯 ($\phi 100 \text{ mm} \times 1 800 \text{ mm}$) 和扰动桨 (50 mm $\times$ 10 mm) 组成. 扰动桨下沿距泥面 10 cm. 扰动实验前, 测量了底泥的粒度、含水率以及有机质含量.

1 材料与方法

1.1 样品采集和实验装置

收稿日期: 2005-12-08; 修订日期: 2006-01-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-12)

作者简介: 张彬 (1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水力学.

* 通讯联系人, E-mail: jhqu@cees.ac.cn

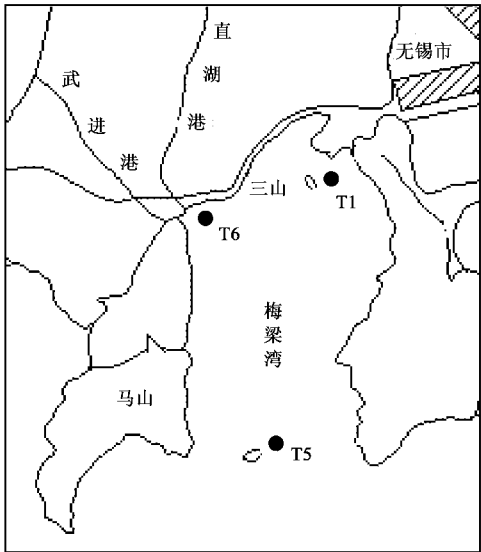


图1 采样点位置
Fig.1 Sampling site

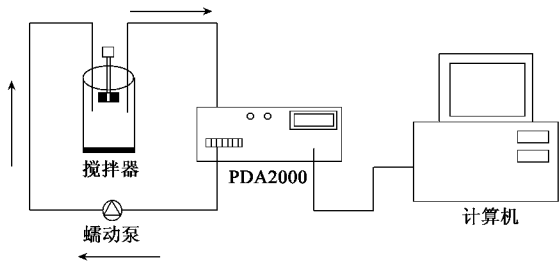


图2 试验装置
Fig.2 A schematic view of the apparatus

1.2 分析方法

颗粒粒度用激光粒度分析仪 (Laser Particle Analyzer, Mastersizer 2000, Malvern, UK) 测量;底泥的含水率和有机质含量测定:用坩埚取一定量的底泥,置于烘箱中,105℃烘烤 4 h,把烘烤过程中的重量损失当作底泥含水率;再将烘烤后的底泥在马福炉中 550℃灼烧 6 h,灼烧过程中的重量损失视为底泥的有机质含量^[4].

1.3 模拟实验

将冰冻的底泥于室温下融化、除杂质,然后混合均匀.分别称取 100 g 湿底泥,平铺于 3 个烧杯底部,泥厚约 1 cm,然后用蠕动泵将 1 000 mL 去离子水沿壁缓慢注入烧杯中,静置 12 h 待用;通过调整搅拌器的转速模拟底泥在不同风浪大小条件下的再悬浮过程.根据太湖地区常年风浪大小变化经验,搅拌器的转速分别设定为 60、80、120 r/min,搅拌时间为 30

min;用光散射分析仪 (Photometric Dispersion Analyser, PDA200, Rank Brothers Ltd, Cambridge, UK) 在线观察底泥泛起后水中的悬浮颗粒物的变化.开始扰动后的 10、20、30 min 时,分别取水样,并用 Motic 显微镜 (B2 Series System Microscopes, Motic Incorporation, USA) 和图象采集软件 (10Moons SDK-2000, 深圳天敏) 采集图象,利用 MiVnt 图象分析软件 (MiVnt, 上海蔡康光学仪器厂) 分析图象;同时于水面下 2 cm 处取水样测定浊度,在每一扰动过程的开始和结束时分别取水样进行粒度分析.

2 结果与讨论

2.1 底泥含水率、有机质含量及粒度分布

含水率和容重是反映沉积物再悬浮潜力的重要参数,沉积物的含水率越高,容重越小,在风浪扰动下沉积物的再悬浮也就越容易^[1].据此测定 T1、T5、T6 底泥的含水率分别为 47.6%、48.1%、42.9%,有机质为 3.95%、5.10%、4.18%.因而 T1、T5 底泥再悬浮潜力较大,T6 点相对较小.3 点底泥具体的粒度分布如图 3 所示,中值粒径分别是 30.4、25.6、25.4 μm,3 点沉积物都属于粉砂类型,T1、T5 点粒度分布较为类似,与 T6 相差较大.

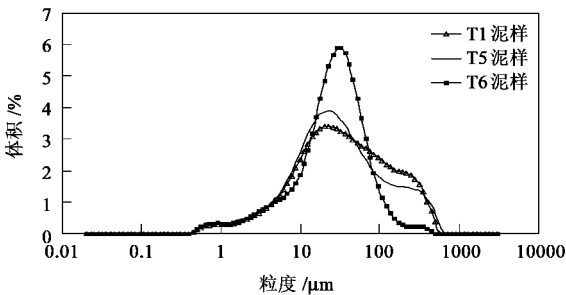


图3 3点泥样的粒度分布
Fig.3 Granularity distribution of three sediment

2.2 模拟实验

2.2.1 浊度的变化

已有研究表明,太湖底泥的再悬浮存在临界风速(5~6 m/s),即一旦超过临界风速底泥就会大量发生再悬浮^[5].不同扰动强度下水体浊度的变化如表 1 所示.从表 1 可看出,60 r/min 对浊度的影响很小,浊度稍微增加后又略微下降,表明还没有达到底泥启动所需能量.80 r/min 下 T1、T5 浊度有较为明显的增加,说明该扰动强度下底泥已有部分泛起,但由于转速较小增幅有限,而 T6 浊度变化不大,可能是 T6 点含水率较低,底泥黏性相对较强,再悬浮所需

能量更大所致.120 r/min时转速的增幅较大,浊度有大幅度增高,T1、T5 点初始增速很大随后增速逐渐下降而 T6 点增速一直较大.尽管 T6 点在扰动前水体浊度较高,但 T6 点在 60 r/min扰动时出现下降,在 80、120 r/min扰动时,相同时刻的浊度值始终小于 T1、T5 点,这也说明 T6 点再悬浮潜力较弱.对应 3 点底泥分布可见粒度分布越均匀,受扰动强度的影响越明显.

表 1 不同扰动强度下各点浊度随时间的变化

Table 1 Turbidity change at different disturbed intensity

转速/r·min ⁻¹	时间/s	T1/NTU	T5/NTU	T6/NTU
60	0	72.6	55	91.7
60	600	99.3	69	90.9
60	1 200	99.1	71	88.2
60	1 800	91.3	68	87.7
80	0	57.8	68.8	87.2
80	600	127	139	95.1
80	1 200	232	276	95.1
80	1 800	241	290	89.8
120	0	53.3	54.3	73.9
120	600	658	352	292
120	1 200	1 098	816	492
120	1 800	1 188	952	705

总体上,随着扰动强度的加大,浊度增加明显并且强度越大浊度增加启动越快,同时尽管最后浊度未达到平衡仍有上升的趋势,但扰动后期浊度的增加趋于平缓已经比较接近平衡状态.这是由于随着沉积物深度的增加,底泥再悬浮困难,当表层那些易于再悬浮沉积物泛起后,很难有足够的能量克服更深层次沉积物的粘滞力而发生再悬浮.

2.2.2 粒度的变化

通过对扰动后水体悬浮颗粒物的粒度测定可以看出,随着扰动强度的增加,水体中颗粒物的粒度分布(见图 4)逐渐右移,水体中颗粒物中值粒径的变化为 T1:6.63、6.97、11.58、12.49 μm;T5:5.79、6.99、8.36、11.38 μm;T6:5.51、6.36、6.69、13.33 μm.

水体中的悬浮物大体上由有机颗粒物(主要是浮游植物、浮游动物残体)和无机颗粒物(主要是碎屑矿物、粘土矿物)等组成.由于沉积物表层那些结构疏松、无定形的无机大分子和有机碎屑其比重较小,在几种扰动强度下这些疏松物都悬浮^[6].随着扰动进行引起了底泥的再悬浮,使得水体中颗粒物的数量显著增加,而平均粒径的增大除了部分大颗粒因扰动而再悬浮到水体中之外,也有可能是大量的细小颗粒物发生了聚集和絮凝所致.

2.2.3 絮凝指数的变化

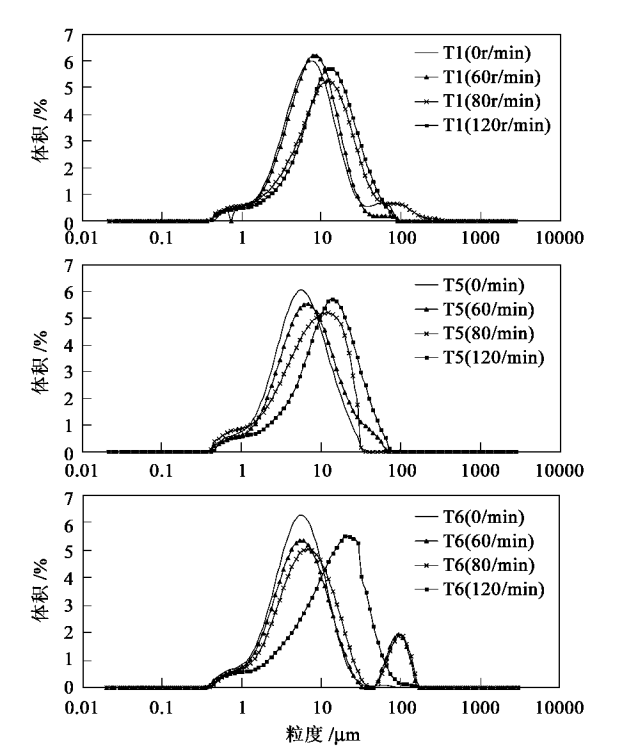


图 4 不同扰动下水体颗粒物粒度分布

Fig.4 Granularity distribution at different disturbed intensity

利用光散射分析仪得到的絮凝指数 FI 可用来反映水体中颗粒粒径和颗粒浓度发生的变化.

$$V_{ms}/\bar{V} = (N_T L/A)^{1/2} \times \pi \left[\int_0^\infty a^2 f(a) Q^2(a) da \right]^{1/2}$$

其中, $V_{ms}/\bar{V}$ 是以电压形式输出的 FI 值, N_T 为颗粒总数, L 为光路长度, A 为光线的有效截面积, $f(a)$ 为颗粒的粒径分布, $Q(a)$ 为粒径为 a 的颗粒散射系数^[7].随着水体中颗粒粒径的增加,絮凝指数的变化呈增加趋势.不同扰动条件下各点的絮凝指数变化趋势如图 5.对照图 5 和表 1 可以看出絮凝指数的变化趋势与浊度的变化趋势类似.

从图 5 可以看出, T1、T5 点的变化趋势较为类似而与 T6 点有一定的差别.60 r/min 转速下由于底泥并未启动,絮凝指数在初始稍微增加后基本处于围绕某一值略微波动;80 r/min 转速下 T1、T5 点在前 15 min 内絮凝指数一直缓慢增长随后处于平稳波动阶段,说明部分底泥经扰动后发生了再悬浮,但限于扰动强度增大程度有限, T6 点略微增加后即处于平稳阶段,说明底泥再悬浮程度不如 T1、T5 点;120 r/min 转速下 T1、T5 点絮凝指数很快就增加到相当高的程度随后略有下降, T6 点絮凝指数一直处于增

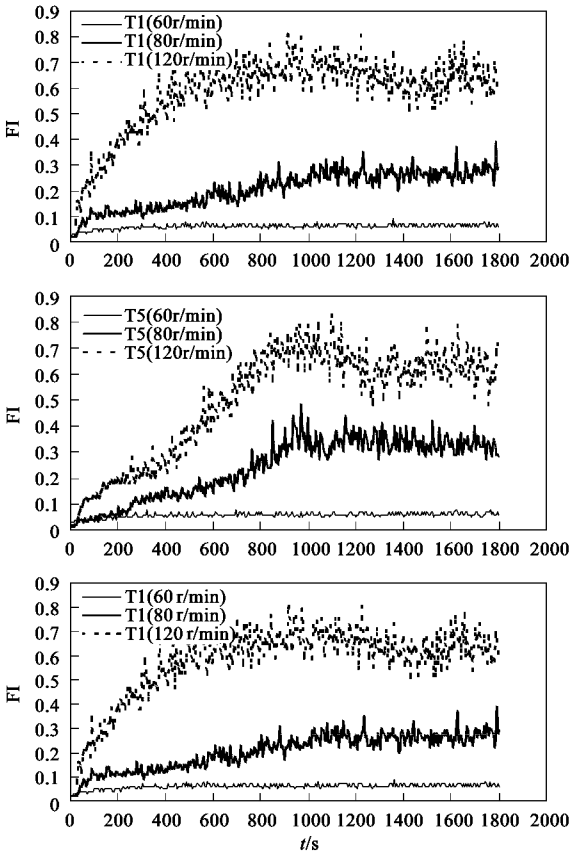


图5 不同扰动强度下各点的絮凝指数变化
Fig.5 Flocculation index change at different disturbed intensity

长阶段,说明该强度下底泥得到了充分的再悬浮.总之随着扰动的进行絮凝指数总的变化趋势是增加的.扰动作用增加了水体颗粒物质的数量,扰动强度越大水体中颗粒物越多,而颗粒物质的增加促进了颗粒物的运动、碰撞从而使得底泥颗粒物再悬浮的同时也可能发生颗粒物的絮凝增大的过程,尺度增大的颗粒物更易于沉降,这也可能是 120 r/min 时 T1、T5 点后期絮凝指数略有下降的原因.

2.2.4 颗粒物图象

图 6 中所示为各点在 3 种扰动强度稳定下具有

代表性的悬浮颗粒物的图象,从中可以明显看出上覆水中颗粒物尺寸和浓度随着扰动强度和时间的变化情况.在 60 r/min 扰动下,水体中颗粒物较少并且粒径也较小;80 r/min 时,水体中颗粒物并没有明显增多,但出现一些较大颗粒这可能是那些密度较小的动植物残体;120 r/min 时水体中颗粒明显增多,一些无机大颗粒出现的同时也出现一些孔洞结构较多的絮状颗粒,这说明颗粒间发生了絮凝的可能.图 6 显示的颗粒物数量和粒径的变化情况与浊度和絮凝指数的变化是一致的.

2.2.5 颗粒物形态学特征

上覆水中的悬浮颗粒物是形状不规则的分形体,具有分形体的特征.对颗粒物图象进行形态学分析,可以得到颗粒的投影面积、周长、当量椭圆长轴等一系列参数,从而得到颗粒物的形态学特征.在此以长短比(当量椭圆长轴和短轴比)和二维分形维数来表征悬浮颗粒物絮凝体的分形特征.影象分析法的二维分形维数可以由式 $A \propto L^{D_2}$ 得到,其中, A 为影象投影面积; L 为特征长度^[8,9].分析时以 L 和 A 做双对数曲线,曲线的斜率即为二维分形维数 D_2 .分形维数可以用来表征颗粒形态的规则程度,若颗粒是严格的欧几里德几何体系的二维体,那么由影象分析法得到的二维分形维数值等于 2;若颗粒的形状不规整,不遵循二维实体的特征,那么它的二维分形维数值将小于 2.

根据这些分析得到的颗粒物形态学特征如表 2.从表 2 可以看出,各种条件下颗粒物的长短比在 1.27~1.52 之间,说明颗粒物是非规则的球体,总体上随着扰动长短比是增大的趋势.分形维数 D_2 则在 1.72~1.94 之间,并且呈现出先增大后下降的趋势,说明悬浮颗粒物是较为复杂的聚集体,颗粒物本身存在一定的孔洞和絮状结构.大量再悬浮的颗粒发生了破碎、絮凝、沉降等过程使得颗粒物的形态学参数发生了诸多变化.

表 2 不同扰动条件下不同时间悬浮颗粒的形态学特征
Table 2 Morphology characteristics of particles at different disturbed intensity

编号	0/min		10/min		20/min		30/min	
	长短比	D_2	长短比	D_2	长短比	D_2	长短比	D_2
T1(60 r·min ⁻¹)	1.32	1.81	1.37	1.88	1.34	1.79	1.45	1.72
T1(80 r·min ⁻¹)	1.27	1.80	1.40	1.81	1.40	1.91	1.45	1.81
T1(120 r·min ⁻¹)	1.29	1.81	1.47	1.86	1.48	1.86	1.52	1.82
T5(60 r·min ⁻¹)	1.34	1.77	1.33	1.80	1.36	1.82	1.39	1.77
T5(80 r·min ⁻¹)	1.35	1.79	1.39	1.86	1.41	1.90	1.47	1.83
T5(120 r·min ⁻¹)	1.33	1.76	1.45	1.88	1.47	1.88	1.50	1.88
T6(60 r·min ⁻¹)	1.30	1.83	1.35	1.84	1.28	1.88	1.34	1.79
T6(80 r·min ⁻¹)	1.35	1.83	1.37	1.88	1.34	1.86	1.39	1.76
T6(120 r·min ⁻¹)	1.32	1.84	1.45	1.91	1.44	1.94	1.48	1.82

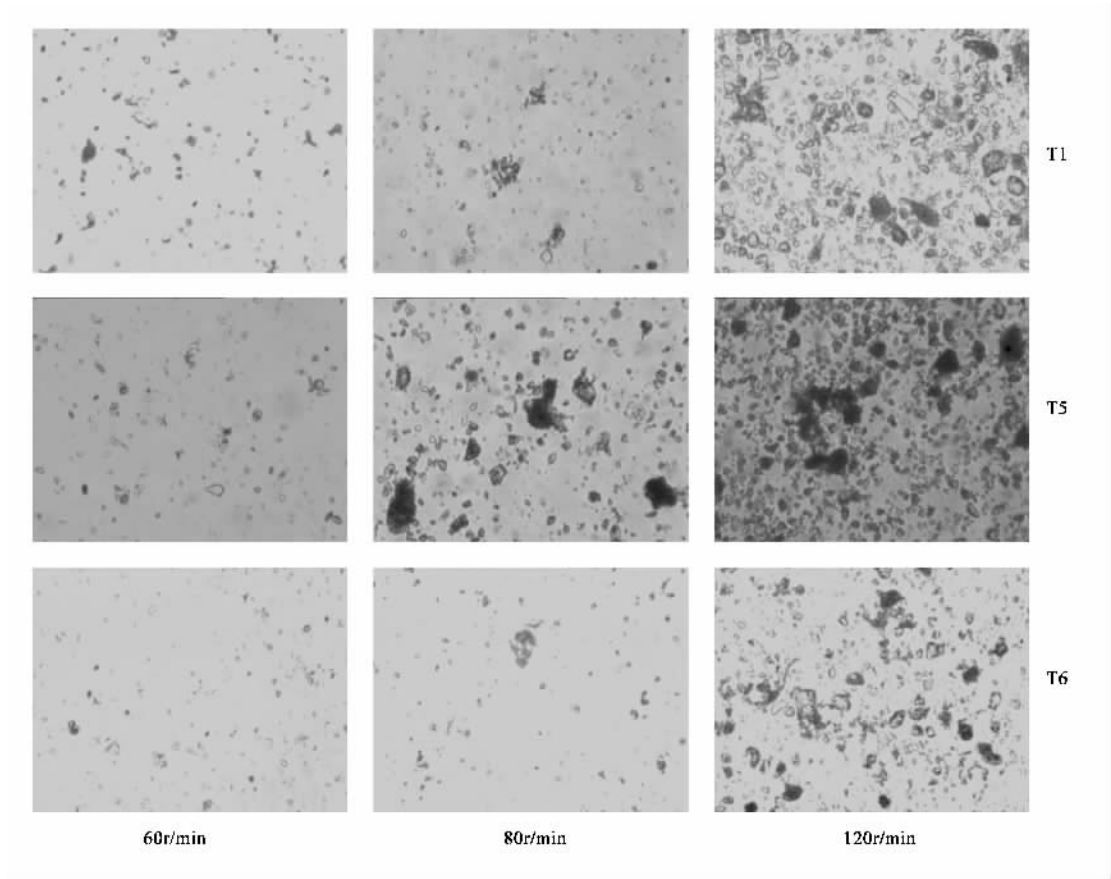


图 6 T1、T5、T6 不同搅速下水体颗粒物的图像

Fig.6 Images of the particles in water at different disturbed intensity

3 结论

(1)在本实验条件下,底泥含水率及粒度分布对底泥受扰动后再悬浮的潜力有较大影响,含水率越高,再悬浮的潜力越大.粒度分布越均匀,受扰动强度的影响越明显.

(2)随着扰动强度增大,水体的浊度相应增加,水体中悬浮颗粒物中值粒径也增大,分别从 6.63、5.79、5.51 μm 上升到 12.49、11.38、13.33 μm .

(3)悬浮颗粒物图象分析表明,颗粒物在扰动中发生聚集、絮凝过程;颗粒物图象的形态学分析表明,悬浮颗粒物形状呈现分形现象,颗粒物的长短比在 1.27 ~ 1.52 之间,分形维数 D_2 则在 1.72 ~ 1.94 之间.

参考文献:

[1] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理

[M].北京:科学出版社,2004.2 ~ 14.

[2] 秦伯强,范成新.大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J].中国环境科学,2002,22(2):150 ~ 153.

[3] 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.

[4] 黄祥飞主编.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1999.24 ~ 25.

[5] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J].湖泊科学,2000,12(4):327 ~ 334.

[6] 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实验研究[J].湖泊科学,2005,17(1):61 ~ 68.

[7] Chakraborti R K, Atkinson J F, Van Benschoten. Characterization of alum floc by image analysis[J]. Environmental Science and Technology, 2000,34,3969 ~ 3976.

[8] Kilps J R, Logan B E, Alldredge A L, Fractal dimensions of marine snow determined from image analysis of in situ photographs[J]. Deep-Sea Research, 1994,41(8):1159 ~ 1169.