

风浪作用下太湖改性沉积物对藻体絮凝去除效果研究

刘国锋^{1,2}, 范成新^{1*}, 钟继承¹, 白秀玲^{1,2}, 尹洪斌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)

摘要:以壳聚糖改性的太湖原位沉积物为分散介质,应用Y-型再悬浮发生装置,通过定量模拟太湖常见的中等级别风情,研究再悬浮作用下,改性沉积物对蓝藻水华的絮凝去除作用.结果表明,在黏土加入量为 $0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,壳聚糖分别为 0.100 和 $0.150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,其蓝藻的去除率分别为 93.55% 和 99.19% ;在静止 30 min 后,壳聚糖加入量为 $0.15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水体的浊度去除率达到 78.60% ;静止 8 h 后,水体的浊度去除率达到 93.88% .同时,短期内壳聚糖的加入对水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有一定的去除作用.初步结果表明,在中风风情下,壳聚糖的加入量为 $0.15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,能更有效地去除蓝藻.表明利用壳聚糖改性沉积物来絮凝沉降太湖水华藻体,具有较好的应用前景.对比研究表明,引入水动力强度和水柱高度定量模拟方法,在确定壳聚糖投加量絮凝除藻中,具有明显的方法优势.

关键词:改性沉积物;壳聚糖;絮凝作用;藻体去除;水动力影响

中图分类号:X131.2 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)01-0052-06

Algal-Flocculation Removal by Modified Sediment of Taihu Lake in Wind Action

LIU Guo-feng^{1,2}, FAN Cheng-xin¹, ZHONG Ji-cheng¹, BAI Xiu-ling^{1,2}, YIN Hong-bin¹

(1. State Key Laboratory of Lake & Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Removal effects of cyanobacteria algal cells in chitosan-mediated *in-situ*-sediment in the sediment resuspension was studied in the laboratory. The research simulated the sediment suspension through quantitative simulated the middle-grade wave of lake Taihu, which usually experienced, by using the Y-type sediment resuspended generator. The results showed that the blue-green algal's removal effect is 93.55% and 99.19% as the dosage adding of chitosan and sediment were $(0.100 + 0.200)\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $(0.150 + 0.200)\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The removal rate of turbidity of the water body reached 78.60% after still 30 min , in which the chitosan adding dosage was $0.150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; the removal rate of turbidity achieved 93.88% after 8 h of water body still. Furthermore, adding the chitosan could decrease the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration of water body in a short term. Preliminary results showed that the chitosan which adding dosage was $0.15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ could effectively remove the cyanobacteria cells in middle-grade wave situation; and also indicates using the chitosan-mediated sediment to flocculate the algal bloom of the Taihu Lake has a better application prospect. Contrast study shows that the quantitative simulation method of hydrodynamic intensity and the height of water has the obvious advantage to determine the dosage of chitosan in algal-flocculation removal.

Key words: modified clay; chitosan; flocculation; algal removal; hydrodynamic influence

当前,湖泊、水库等富营养化水体中出现的蓝藻水华是发达国家和发展中国家所共同面临的水污染问题.针对蓝藻水华的频繁暴发和毒素的产生,如何有效地去除,国内外的许多研究者进行了大量有益的工作^[1-6].应用改性黏土去除藻类水华已被认为是一种较好的从水体去除藻细胞的方法^[2,6,7],在我国一些受到藻华危害的污染水体已被作为一种有效的应急技术而较广泛应用^[1-3].有研究者利用壳聚糖改性的黏土对太湖中蓝藻水华进行模拟去除实验,黏土和壳聚糖的加入量都大大减少,而且利用酸改性的黏土去除太湖水华蓝藻时,投加量可以降低到 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,从而解决了需从外部输入大量黏土的问题^[1,8].在太湖的围隔中试实验结果表明,壳聚糖改性黏土有效地去除了藻华,水体透明度有较大改善,营养盐也显著降低^[9].也有研究者利用聚羟基氯

化铝、有机表面活性剂等材料改性的黏土来去除东海水体中的藻华,达到了较好的效果,并在此基础上建立了黏土表面改性对絮凝作用影响的理论模型^[7-11].Beaulieu等^[6]利用一个 17 m 长的水槽来模拟水动力条件下不同的流速对藻的去除效果影响.

由于实验条件的限制,目前大多数有关改性黏土对藻类的絮凝过程实验都是在垂直空间相对较小的容器内进行的^[1,2],这样就较难获得在同一风情下水柱不同层位的动力强度作用差异.Beaulieu等^[6]利用一个 17 m 长的水槽试验了在较低流速(≤ 10

收稿日期:2008-03-09;修订日期:2008-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40730528);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418105);江苏省科技厅太湖水污染治理科技专项(BS2007161)

作者简介:刘国锋(1979~),男,博士,主要研究方向为湖泊水环境污染治理, E-mail: gfliu@niglas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: cxfan@niglas.ac.cn

$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)下用磷酸盐黏土絮凝除藻的效率,并取得了较好的效果.其研究认为,烧杯内实验由于其垂向空间不足,扰动强度和幅度在定量上有很大局限性,所涉及的絮凝剂用量相对较大,难以获得实际情况下的结果,对改性黏土的性质以及与藻类的絮凝作用甚至其效果都有可能产生一定的影响.近些年来针对这些情况,有关水体再悬浮的方法已较多考虑定量问题,如振荡法^[12]、波浪水槽法^[6,13]、环行槽法^[14]等方法,这些方法虽较烧杯法有较大改进,但由于水深通常较浅($\leq 30\text{ cm}$)以及体系内的颗粒含量尚不能与风浪建立定量联系,因而仍有待改进.

本实验采用的是可在浅水湖实际水深下,能够定量模拟不同风浪条件体系中的水动力状态的 Y-型再悬浮发生装置(图 1),该装置是用电动可调传动装置斜向和垂向对底泥界面产生动力扰动作用,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.根据已对常见风浪条件的模拟^[15],研究再悬浮作用下,壳聚糖改性沉积物对太湖蓝藻的去除以及对营养盐含量变化的影响,以期对湖泊蓝藻水华的去除提供科学依据.

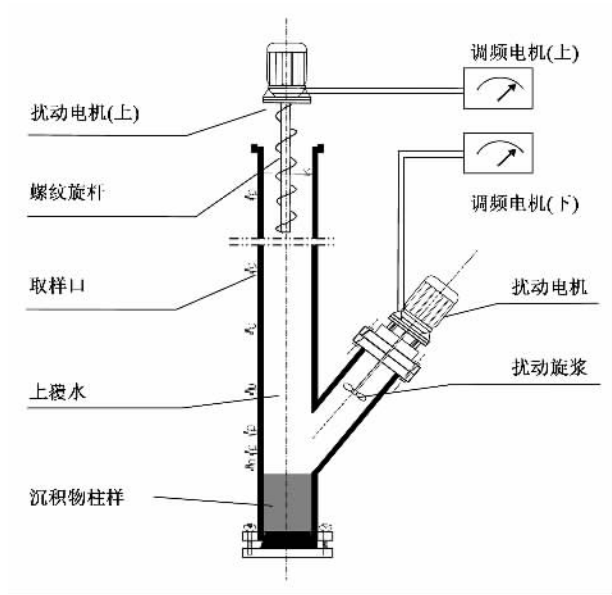


图 1 Y-型再悬浮发生装置剖面示意

Fig.1 Y-type chamber to resuspend sediments in the laboratory

1 材料与方法

1.1 主要试验材料

(1)藻类 实验所用蓝藻取自太湖梅梁湾水体中的成熟阶段的水华蓝藻,然后按照藻华发生时的密度进行配制.湖水用 25 L 大塑料桶盛放.

(2)壳聚糖 原料购自江苏镇江旋光生物科技有限公司.为片状的物质,不溶于水.首先把片状的壳聚糖溶解到 1% 的盐酸溶液中,然后在烘箱中 40℃ 下烘干,研磨、过筛.

(3)沉积物及其改性 采用大口径柱状采样器(Rigo Co. $\phi 1100\times 500$)于太湖鼋头渚附近样点($31^{\circ}31'33.9''\text{N}$, $120^{\circ}12'35.2''\text{E}$)采集若干沉积物样,用橡胶塞将柱样塞紧保存.所有柱样及水样于当天运回实验室,低温 4℃ 下保存.沉积物风干后研磨,过 100 目筛.然后根据实验需要在沉积物中加入所需要的壳聚糖量.拌匀,备用.

1.2 实验风浪条件的选取

根据 John 等^[16,17]的研究,低风速对湖泊的水动力影响较小,较难产生风浪及对沉积物产生再悬浮作用.根据太湖风速特征研究结果^[12],中等风浪是太湖最常见的水动力现象,考察中等风浪状况对本研究较具有代表性和参考价值.考虑藻华主要发生于夏季,因此本实验将选取夏季中风扰动情况下作为模拟实验风速.

再悬浮发生装置^[18]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(见图 1),共有 6 柱,分别命为 1 号~6 号柱.原状底泥缓慢从下端移入 Y 型管,并注入原位采集的上覆水,柱状底泥和上覆水柱长度分别为 20 cm 和 160 cm.通过上下部电机带动螺纹旋杆的旋动来扰动水体,使得水体表面的沉积物跟着扰动,从而模拟实际水体的风浪扰动引起的沉积物再悬浮.参照文献^[15,19]确定太湖中等风情下的实验参数,即在实验开始采用上下部电机的扰动频率分别为 3.5 Hz 和 0 Hz 进行扰动,模拟太湖起风时的小风浪情况.扰动 30 min 后,调整上下电机的频率分别为 8.1 Hz 和 6.4 Hz,连续扰动 1.5 h,模拟中风的扰动.扰动结束后再用小风速扰动 30 min,形成一个完整的起风和落风过程.

1.3 絮凝实验

研究材料间的质量比是模拟藻类絮凝效果的最基本参数.根据 Zou 等^[8]的研究结果,考虑太湖水柱的中等扰动强度,本实验中采取在不超过 $0.20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 沉积物的情况下,分别在 1、2 和 3 号实验柱中加入壳聚糖的量为 0、0.100 和 $0.150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,模拟如下絮凝实验:①按太湖蓝藻水华发生时的藻密度(用藻的吸光度来表示藻密度)配制实验用水,通过 Y-型装置下部取样口小心加入水样直至顶部,保持界面不被扰动.然后开动上部电机,扰动 30 min 后,调

整上下部电机频率分别为 10.0 Hz 和 6.4 Hz, 扰动 1 h 后, 从上部水体中加入用壳聚糖改性的黏土. 继续扰动 0.5 h 后关闭上下电机. 扰动结束静止 30 min 后开始采样, 采样点设置在距沉积物-水界面上 155 cm 取样口处. 取样时间根据文献[1]的 8 h 平衡除藻率来确定. 水样用 0.45 μm GF/C(Whatman)滤膜过滤后低温 4℃ 下保存至分析. ②为了研究短期内加入壳聚糖改性黏土对表层沉积物中磷含量变化的影响, 本实验中只取表层 0~4 cm 作为分析对象. 实验结束后小心取出实验柱中泥样后对泥柱进行分层, 按照 0~1 cm、1~2 cm、2~3 cm、3~4 cm 进行表层样分层, 供分析用. 每实验组设 3 个平行.

1.4 分析方法

主要分析水样的浊度(悬浮物)、叶绿素 a 和溶解性总磷(DTP)等. 参照文献[20], 利用分光光度计, 在 680 nm 处测其吸光度, 然后计算浊度; 乙醇的改进方法^[21]测定叶绿素 a; 用注射式流动分光光度分析仪(Skalar-SA 3000/5000, Netherlands)测定上覆水及沉积物间隙水中 DTP. 沉积物中 TP 含量的测定采用 550℃ 灼烧法^[22].

2 结果与讨论

2.1 浊度的变化

图 2 反映了在停止扰动不同时间段后, 不同壳聚糖添加量水体中的浊度变化情况. 可以看出, 壳聚糖添加量与水体浊度变化大致成反向关系. 扰动停止 30 min 后, 水柱中浊度仍然较高, 其中在没有加入壳聚糖的情况下, 水体浊度最高, 这与太湖中风浪扰动下的水体浊度状况相似. 扰动静止 100 min 后, 水体浊度明显减小, 即透明度增加. 根据潘纲等^[2]的架桥和网捕理论, 这个时候可能是壳聚糖与蓝藻细胞形成絮凝体正处在慢慢沉降的过程中. 在水体中表现为壳聚糖加入量越大, 浊度越小, 透明度越高. 而在静止 200 min 后加入 0.100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 壳聚糖的水体浊度略有下降, 而加入 0.15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 壳聚糖的水体浊度则基本上没有明显变化; 在水体中藻细胞沉降 8 h 后壳聚糖加入量 0.100 和 0.150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 对水体浊度去除效果已基本相同, 而对照实验组(0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)水柱中水体仍然表现得比较混浊, 水体中仍有大量的悬浮物. 说明壳聚糖的加入促进了悬浮物的快速下沉, 并加速了水体澄清. 由于水体中除了藻类, 还有黏土颗粒, 因此, 水体浊度的降低, 表明是藻细胞与黏土颗粒絮凝后沉降下来, 从而使得透明度增加.

壳聚糖是甲壳素脱乙酰基后的产物, 分子链上

的许多游离氨基, 其氮原子上还有一对未结合电子, 使氨基呈弱碱性. 溶于稀酸后, 这些氨基和质子结合而带正电荷, 从而使壳聚糖分子链上带有大量的正电荷, 分子链上的阳离子活性基团中和带负电荷的藻细胞^[23], 降低了藻细胞之间的相互排斥力, 通过架桥和网捕等作用^[2]从而有效地使得铜绿微囊藻细胞产生絮凝沉降^[24]. 水体中加入壳聚糖改性的黏土后, 在动力扰动下水体中壳聚糖分子与黏土颗粒结合通过吸附藻细胞而形成较大的絮凝体, 增大了细胞的重力, 增加了其在水体中的沉降速度, 同时也使得水体中悬浮颗粒物快速沉降, 水体透明度增加.

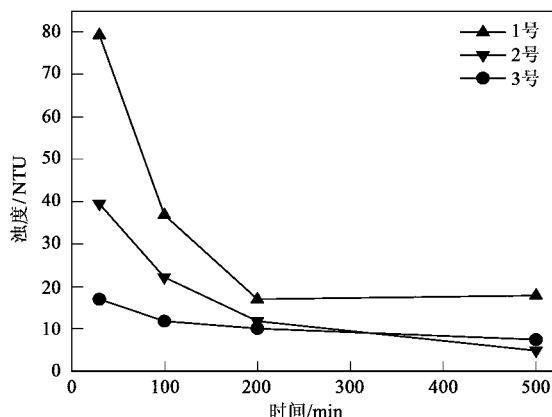


图 2 水体中浊度变化

Fig. 2 Changes of turbidity value in the water column

2.2 不同壳聚糖添加量对藻的去除效率及稳定性

从图 3 中可以看出, 壳聚糖添加量越大对藻的去除效果越明显. 扰动静止仅 30 min 后, 加壳聚糖的水体中以叶绿素 a 反映的藻体, 大部分已被絮凝沉降. 由于藻体均为活体藻细胞, 不可能马上经降解消失, 这从对照组上覆水中仍表现出较高含藻量得到验证. 因此藻类的去除是经过壳聚糖改性的黏土絮凝沉降到水体底部引起的. 随着时间的延长, 蓝藻的去除效率仍有增加, 但去除效率有所降低, 这可能是因为水体中藻细胞的密度下降引起的. 因为在藻细胞密度降低后, 壳聚糖的分子链上带有的氨基经絮凝沉降后减少, 其活性位点被大部分的藻体占用从而使得其吸附沉降效率降低. 至 200 min 后, 加入 0.15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的壳聚糖的水柱中已经基本上看不到蓝藻, 而加入 0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和对照组中仍有藻体, 而且对照组中在停止悬浮 200 min 后水体中藻细胞含量仍很高, 且其含量在 200 min 后仍然没有较大变化, 说明虽然未加壳聚糖的沉积物在再悬浮时也能将若干藻细胞通过吸附或裹挟, 通过沉降作用沉积到底部,

但这种沉降作用在本实验中仅能达到 60% 作用, 其余藻细胞仍存留在上覆水体中, 尚难满足对水体中藻类的去除要求. 实验发现, 在 500 min 后未加壳聚糖的水柱中藻类去除效果比 200 min 时明显降低, 表明在无壳聚糖加入的水体中仅通过黏土吸附作用使藻体粘附并沉降于水底的能力不会持续长久, 即随时间的延长一部分藻体摆脱了黏土的吸附作用后又回到了水体中. 而且藻体细胞在环境条件不利的情况下会在底泥中通过休眠孢子等形式来度过^[25, 26], 因此仅仅通过黏土的吸附或裹挟作用对藻体细胞的去除作用有限.

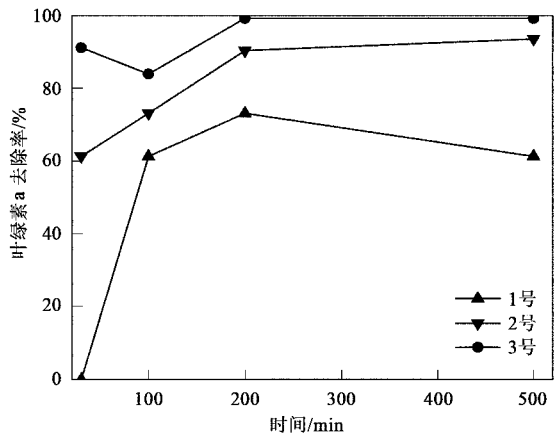


图 3 水体中叶绿素去除率

Fig.3 Removal efficiency of Chl-a in the water column

添加壳聚糖的改性黏土对蓝藻具有较好的絮凝沉降作用, 本实验研究结果与 Pan 等^[9]用围隔实验研究结果有类似之处, 但其投加量则显然较室内实验和围隔实验^[2, 9]结果增加很多, 且蓝藻的絮凝沉降率(或去除率)也难以达到完全. 出现这种差异的原因一方面可能是实验的空间尺度影响了藻类密度在水柱中的分布; 另一方面则可能是实验的水体未能仿真藻体在实际水体中所受的动力作用. 在实际水体中, 由于风浪的扰动作用引起的沉积物再悬浮过程中, 风浪对底层沉积物的扰动作用并不都是同烧杯实验那样强烈, 因而不可能使得黏土颗粒与藻细胞都进行充分的接触. 因此, 在容积相对较小, 特别是垂向空间烧杯中的实验较难反映实际水体的扰动强度^[6], 同时藻类在空间垂向的不均匀分布, 也会较大地影响藻的去除效率.

文献[2]表明, 在烧杯中研究藻体去除时对壳聚糖的需要量可以达到很低(最小只有 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但在本研究中模拟太湖中等风速条件下, 实际通过絮凝作用能够达到对藻体去除的壳聚糖投加量远高于

$1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这种差异主要来自以下原因: ①烧杯实验可以使得经壳聚糖改性的黏土颗粒能够充分地 与藻细胞接触并经电荷中和后产生物理化学吸附作用经絮凝沉降; 而实际水体中, 具有代表性的中等风浪所产生的扰动作用难以像在烧杯内产生那样强烈和充分的扰动作用, 因此实际水体中黏土颗粒与藻体的作用可能远弱于在小体积容器的控制条件. ②在烧杯尺度的实验中, 由于水柱垂向距离过小, 颗粒物的自重问题被忽视, 而本研究所考虑的实际水柱高度达到接近实际状况的 1.6 m, 不同粒径的黏土颗粒受重力作用将在水柱上出现如 Stock 公式描述的随时间的垂向分布. 由于藻体都有趋光性而喜居于水柱的上层或中上层, 黏土的沉降作用将减少其与藻体的接触几率, 从而影响絮凝作用对藻体的聚沉, 减少藻体的去除效果.

通过投加用壳聚糖改性的黏土, 有效地去除了蓝藻水华细胞. 但投加黏土后对水体生态系统的效应需要加以考虑, 特别是对底栖生物等的环境效更应加以关注. Shumway 等^[27]在实验室中用 7 种底栖动物来考察施加不同剂量($0.1 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)黏土后对底栖动物的短期效应, 研究发现, 黏土投加量越大, 底栖动物对其的净化效果越差. 因此, 黏土的投加量需控制在一定的范围才可能有效. 本实验中, 在施用原位底泥且黏土投加量不大于 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下, 可以有效地絮凝去除蓝藻水华, 并减少了黏土的投加量.

在用絮凝去除藻类的稳定性研究方面, Sun 等^[28]研究了单独使用黄土或魁糖脂来絮凝赤潮藻, 发现絮凝沉降 1 h 后赤潮藻细胞会回到水体中, 而使用黄土和魁糖脂的混合物后则没有藻细胞回到水体中. Lee 等^[29]在韩国的一个水产养殖场用表面活性剂和黄土来絮凝沉降赤潮鞭毛藻, 也得到了类似的结果. 而从本实验所获得的图 3 中可见, 在絮凝作用后 8 h (500 min), 藻细胞絮凝沉降到底部沉积物上并未发现再回到水体中的现象. 上述解释也可间接从沉积物表层总磷分层含量的变化得到证实(图 4).

从图 4 可以看出, 随着壳聚糖投入量增加, 实验后表层沉积物第 1 层中 TP 的含量逐步增大. 如对照 1 号柱中表层沉积物中 TP 含量为 $506.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而加入壳聚糖改性黏土的 2 号和 3 号柱的表层沉积物的 TP 含量则分别为 545.62 和 $558.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其增加的量与模拟太湖中等风情下壳聚糖改性黏土对藻体的去除百分比呈相应增长关系. 由于藻体内含

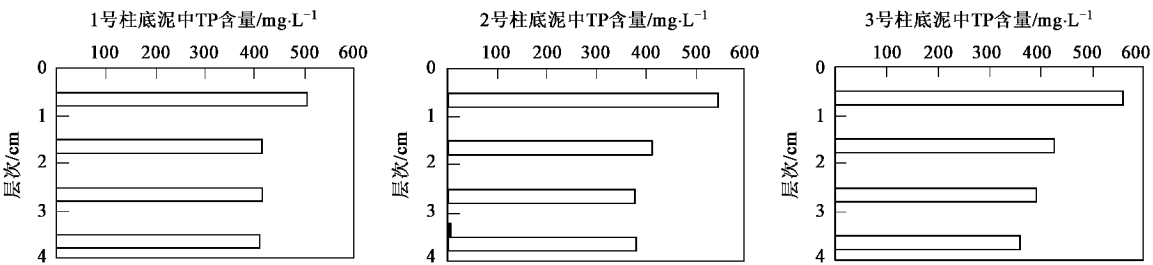


图 4 沉积物中 TP 含量变化

Fig.4 Changes of TP concentration in the sediments

有有机磷等磷素,因此藻体量的增加也反映着沉积物中 TP 含量的增加.这些说明,壳聚糖加入的沉积物中对藻体的絮凝效果可以有较高的持续作用能力.

2.3 上覆水及间隙水中 PO_4^{3-} -P的含量变化

图 5、6 表示的是利用壳聚糖改性黏土添加到水体后不同时间内上覆水和间隙水中 PO_4^{3-} -P的含量.可以看出,加入壳聚糖的柱子中,水体中的磷含量表现出随着时间的增加逐渐降低的趋势,虽然在 200 min 的时候,水体中磷的含量突然增加,可能是有部分的藻死亡扰动后有分解,释放出了溶解性磷.但总的趋势是磷的含量在下降,24 h 后水体中的 PO_4^{3-} -P含量极低,最低的仅为 $7.41\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而此时水体的透明度极高,水体中基本上没有藻类.说明利用壳聚糖改性的黏土在中风浪扰动的时候进行絮凝沉降具有较好的效果.但在对照水柱中,上覆水中磷的含量基本上没有变化,而水体中仍然有大量的藻分布在其中,水体中的透明度虽然有所提高(如图 2 所示),但水体仍然因为有大量的藻存在而表现的较为混浊.通过测定间隙水中的 PO_4^{3-} -P含量变化发现,

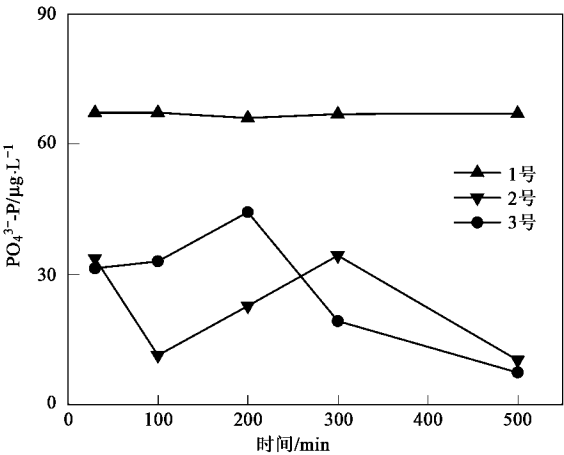


图 5 上覆水中 PO_4^{3-} -P 的浓度变化

Fig.5 Concentration of PO_4^{3-} -P in overlying water

在表层 1 cm 的沉积物表面中,间隙水所含的 PO_4^{3-} -P 非常的高,而在该层以下 PO_4^{3-} -P的浓度就会急剧下降,这种 PO_4^{3-} -P含量的变化表明是由于壳聚糖改性黏土把大量的藻体细胞沉降到底泥界面上,而藻细胞内含有的溶解性 PO_4^{3-} -P释放出来后,造成了 PO_4^{3-} -P浓度的变化.

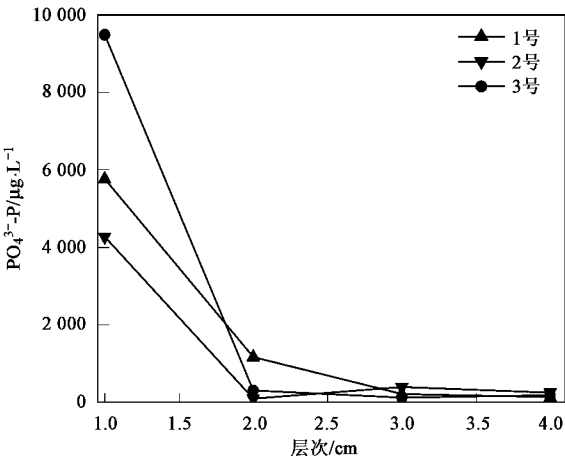


图 6 不同深度泥样中间隙水中 PO_4^{3-} -P 的浓度变化

Fig.6 Concentration of PO_4^{3-} -P in interstitial water of different depth in sediment

3 结论

(1)采用定量方法模拟接近实际湖水柱水动力作用下研究絮凝沉降藻体的效果,具有较好的实用性,特别是在确定壳聚糖的实际投加量时,采用定量再悬浮模拟方法将显示明显的优越性.

(2)在湖泊中等风情下,利用壳聚糖改性沉积物来絮凝沉降太湖水华藻体,可以因地制宜地采用太湖沉积物并适当加入壳聚糖来增强其中的黏土对藻体的絮凝效果.

(3)在加入量为 $0.15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 及在自然中等风浪状态下约 30 min,可去除藻体量达 90%左右.在絮凝

沉降 8 h 后,未出现藻体重回水体的现象,而且能快速去除水体的浊度.因此,在中等风情扰动下,加入壳聚糖 $0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 能够更有效地去除太湖实际水体中的藻体.

(4)结合湖泊风情统计资料,应用再悬浮装置定量模拟湖泊水动力扰动,有可能在兼顾实际水柱高度的情况下,有效地研究风浪影响下壳聚糖改性黏土对水华蓝藻絮凝沉降作用的影响.

参考文献:

- [1] 邹华,潘纲,陈灏.壳聚糖改性粘土对水华优势藻铜绿微囊藻的絮凝去除[J].环境科学,2004,25(6):40-43.
- [2] 潘纲,张明明,闫海,等.黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理[J].环境科学,2003,24(5):1-10.
- [3] 付军,闫海,王东升,等.聚铝及其加载粘土矿物高效沉降铜绿微囊藻的研究[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(1):76-79.
- [4] 苑宝玲,曲久辉.高铁酸盐氧化絮凝去除藻类的机制[J].中国环境科学,2002,22(5):397-399.
- [5] Han M Y, Kim W. A theoretical consideration of algae removal with clays[J]. Microchemical Journal, 2001, 68: 157-161.
- [6] Beaulieu S E, Sengco M R, Anderson D M. Using clay to control harmful algal blooms: deposition and resuspension of clay/algal flocs [J]. Harmful Algae, 2005, 4: 123-138.
- [7] 吴萍,俞志明,杨桂朋,等.新型表面活性剂改性粘土去除赤潮藻研究[J].海洋与湖沼,2006,37(6):511-516.
- [8] Zou H, Pan G, Chen H, *et al.* Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. II. Effective removal of *Microcystis aeruginosa* using local soils and sediments modified by chitosan[J]. Environmental Pollution, 2006, 141: 201-205.
- [9] Pan G, Zou H, Chen H, *et al.* Removal of harmful cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. III. Factors affecting the removal efficiency and an *in situ* field experiment using chitosan-modified local soils[J]. Environmental Pollution, 2006, 141: 206-212.
- [10] 高咏卉,俞志明,宋秀贤,等.改性粘土絮凝法对太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)稚贝的影响[J].海洋通报,2007,26(3):53-60.
- [11] 俞志明,宋秀贤,张波,等.粘土表面改性及对赤潮生物絮凝作用研究[J].科学通报,1999,44(3):308-311.
- [12] 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(D辑),2003,33(8):760-768.
- [13] 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[J].湖泊科学,2005,17(1):61-68.
- [14] 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.
- [15] 尤本胜,王同成,范成新,等.太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J].环境科学,2008,29(1):26-31.
- [16] John R J, Mathew F K. Suspended solid in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes [J]. Water Res, 2005, 39: 3629-3635.
- [17] 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.
- [18] 范成新.旋浆式沉积物再悬浮发生装置[P].中国专利:CN ZL200420025427.9,2004-09-27.
- [19] 尤本胜,王同成,范成新,等.太湖沉积物再悬浮模拟方法[J].湖泊科学,2007,19(5):611-617.
- [20] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.96-99.
- [21] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉.浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J].湖泊科学,2006,18(5):550-552.
- [22] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment[J]. J Environ Monit, 1999, 1: 51-56.
- [23] 郑必胜,蔡妙颜,郭祀远,等.壳聚糖在小球藻采收中的应用[J].海湖盐与化工,2002,32(1):7-9.
- [24] Strand S P, Nordengen T, Hstgaard K. Efficiency of chitosans applied for flocculation of different bacteria [J]. Water Research, 2002,36:4745-4752.
- [25] 吴生才,陈伟民,高光.太湖冬季底泥中活体藻类的检测[J].湖泊科学,1993,15(4):339-344.
- [26] 张晓峰,孔繁翔,曹焕生,等.太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究[J].应用生态学报,2005,16(7):1346-1350.
- [27] Shumway S E, Frank D M, Ewart L M, *et al.* Effect of yellow loess on clearance rate in seven species of benthic, filter-feeding invertebrates[J]. Aquacult Res, 2003, 34(15):1391-1402.
- [28] Sun X X, Lee Y J, Choi J K, *et al.* Synergistic effect of sophorolipid and loess combination in harmful algal blooms mitigation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48: 863-872.
- [29] Lee Y J, Choi J K, Kim E K, *et al.* Field experiments on mitigation of harmful algal blooms using a Sophorolipid-Yellow clay mixture and effects on marine plankton[J]. Harmful Algae, 2008, 7(2): 154-162.