

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.019

壳聚糖改性黏土作用下湖泛致黑悬浮物的沉降特性研究

徐磊¹, 逢勇^{1,2}, 黄亚文¹, 张鹏¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 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, 江苏 南京 210098)

摘要:为了探讨湖泛致黑物质在壳聚糖改性黏土作用下的絮凝沉降以及再悬浮的规律,利用柱状水槽再悬浮发生模拟装置,选取壳聚糖改性黏土(1 g/L 硅藻土+0.2 g/L 壳聚糖)作为絮凝剂,进行了风浪扰动作用下太湖湖泛的絮凝及再悬浮过程的室内模拟试验。结果表明:当模拟流速产生的切应力超过 0.042 N/m² 时,低浊度组中的黏土絮体产生了明显的再悬浮现象;当流速产生的切应力超过 0.109 N/m² 时,高浊度组发生再悬浮。对比太湖不同风速所产生的切应力,发现 4 m/s 以下的太湖风情产生的湖流切应力不会使黏土絮体发生再悬浮。研究旨在为太湖湖泛的应急处置提供参考。

关键词:太湖湖泛;壳聚糖改性黏土;模拟流速实验;絮凝沉降;再悬浮;风浪扰动

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0097-06

Study on deposition of algal bloom-induced black suspended matter using chitosan-modified clay

XU Lei¹, PANG Yong^{1,2}, HUANG Yawen¹, ZHANG Peng¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the regularities of flocculation, settlement, and resuspension of algal bloom-induced black suspended matter in Taihu Lake when using chitosan-modified clay, an indoor experiment was conducted to simulate the flocculation and resuspension processes under the effects of wind and wave disturbances. A cylindrical tank was used in the experiment, and chitosan-modified clay with doses of 0.2 g/L of chitosan and 1 g/L of diatomite was selected as the flocculant. The experimental results show that, when shear stress exceeded 0.042 N/m², resuspension occurred in the low-turbidity group; when shear stress exceeded 0.109 N/m², resuspension occurred in the high-turbidity group. Comparison of shear stresses induced by different wind velocities shows that a wind speed of below 4 m/s would not cause floc resuspension. This study aims to provide references for disposal of algal blooms in emergencies in Taihu Lake.

Key words: algal bloom in Taihu Lake; chitosan-modified clay; simulation of flow velocity; flocculation and settlement; resuspension; wind and wave disturbances

2007 年由太湖蓝藻大规模暴发所引起的湖泛现象直接影响了无锡市百万居民的饮水安全,引起了国内外的广泛关注。陆桂华等^[1]将湖泛(亦称黑水团或污水团)定义为湖泊富营养化水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,在适宜的气象、水文条件下,与底泥中的有机物在缺氧条件下产生厌氧生化反

应,释放硫化物、甲烷和二甲基三硫等硫醚类物质,形成褐黑色伴有恶臭的黑水团,从而导致水体水质迅速恶化、生态系统受到严重破坏的现象。太湖湖体污染负荷加重、水体藻类含量增高为湖泛形成提供了物质基础,受污染的流泥是湖泛形成的重要因子,湖泛发生的物质基础是湖区表层底泥营养盐累

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-006,2012ZX07101-010)
作者简介:徐磊(1992—),男,硕士研究生,研究方向为水体污染治理。E-mail:xuleihu@163.com
通信作者:逢勇,教授。E-mail:pangyonghhu@163.com

积。在温度较高时,由于风浪的搅动作用,底泥易于悬浮。频繁的动力扰动会使得太湖沉积物表层的数厘米或数十厘米的底泥发生悬浮,并在微生物、营养盐和合适的环境共同作用下形成湖泛。湖泛发生的气象条件是一定的光照条件、气温(一般大于 20℃)和风速(3~5 m/s)等。

目前国内外对于湖泛的研究中,黏土絮凝除藻技术因其“高效率、低投入”的特点被认为是最有前景的一种湖泛治理方法^[2]。在过去的十几年中,包括美国、日本、中国、韩国在内的多个国家,利用黏土絮凝技术对湖泛去除进行了一系列的研究。在早期的研究过程中,这项技术存在两个主要问题,一是黏土用量大,二是离子浓度降低导致絮凝效果急剧下降。经过几年的研究,潘纲等^[3-5]利用了壳聚糖的“架桥网捕”能力,解决了以上难题,大大提升了黏土絮凝除藻的效率,而且成功地将改性当地土壤絮凝技术应用到太湖蓝藻的应急治理中,收到了较好的成效。

在湖泛产生过程中,引起湖泛水体在视觉上发黑的主要物质并非再悬浮的沉积物,而是主要成分为 FeS 及 SiO₂ 的悬浮颗粒物质^[6],因此,利用黏土絮凝技术针对湖泛悬浮颗粒物质去除的应急治理是可行的。目前国内针对湖泛水体致黑颗粒物的絮凝实验,大部分为烧杯试验,烧杯试验能够较为便捷地框定黏土投加量范围,但也存在一些缺点,如尺度过小无法反应自然条件下的水流状况,以及絮凝过程中的快速搅拌和慢速搅拌与野外实际状况不符。在某些黏土絮凝除藻的试验过程中发现,水流对于絮体的粒径、沉降速度以及去除效率有很大的影响^[7]。Hill^[8]的试验也证明,过高的切应力会影响絮体粒径的增大和絮体的沉降速率。然而,作为一种受气象条件影响很大的突发性事件,湖泛发生的偶然性又给实地试验带来了很大的困难。因此,针对以上几个方面问题,本文利用能够模拟野外实际流速、尺度更大的柱状水槽,进行湖泛致黑物质的絮凝沉降及再悬浮的室内试验。

1 试验材料与方法

1.1 采样地点与湖泛的模拟

试验所用的蓝藻、水体及底泥采自于梅梁湾西岸(31°25′45.33″N,120°7′44.90″E)。采集底泥所用工具为实验室自行设计的软布封底式浅水域原状表层沉积物采样器,该采样器由采样套筒、采样机构和采样内胆组成,具有采样成功率高、采样面积大和不破坏表层高沉积物结构等优点。

采集两种不同浊度的水样及藻体 24 h 内运回

实验室,先将底泥不破坏层序地放置进 100 L 大桶中,接着把取回的原水缓慢加入桶中,蓝藻用离心设备去除多余水分之后,迅速转移至 100 L 大桶中,蓝藻投加量为 5 kg/m²,控制室温在 (29±1)℃ 左右,遮光静止连续培养 14 d。

1.2 絮凝剂改性黏土的配置

目前市面上主要使用的净水材料为聚合氯化铝(PAC)。PAC 是一种无机高分子混凝剂,有着吸附能力强、处理成本低的优点,但 PAC 投加量大,且生成的絮体易碎,处理后的水中仍含有较高浓度的金属离子。相比无机絮凝剂,天然有机高分子絮凝剂原料来源丰富,价格低廉,选择性大,投药量小,安全无毒,无二次污染,具有生态安全、易生物降解的特性,对湖泊底泥无有害影响。以虾、蟹壳为原料制备的壳聚糖作为一种有机高分子絮凝剂,因其天然无毒,且对水中的浊度、有机物和重金属离子均有较好的去除作用的特性,在水处理中有很大的潜力和应用前景^[9]。室内研究结果表明,壳聚糖改性土壤对湖泛水体黑物质的絮凝去除效果比 PAC 更佳^[5],因此选取壳聚糖作为本次试验的絮凝剂。

壳聚糖购自青岛海维康生物科技有限公司,黏土选用嵊州市华力硅藻土制品有限公司的硅藻土。选取不同分量壳聚糖加入 1% 醋酸溶液搅拌至壳聚糖完全溶解,加水定容至 1 L,配制成质量浓度分别为 50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L、200 mg/L 和 250 mg/L 的壳聚糖溶液,取配置成的壳聚糖溶液 100 mL 溶液置于 5 个相同的烧杯中,分别加入 0.1 g 硅藻土,开启搅拌器,在 120 r/min 转速下搅拌 30 min,使黏土充分改性。搅拌结束后加入蒸馏水配置成用于试验的改性黏土溶液。

取配置成的壳聚糖溶液对同样浊度的湖泛水进行絮凝试验,水体浊度随时间变化情况见表 1。由表 1 可知,200 mg/L 的壳聚糖溶液在短时间内极大地降低了水体浊度,且 3 h 后水体浊度不发生反弹现象,因此选取 200 mg/L 作为壳聚糖的投加量。

表 1 不同质量浓度壳聚糖溶液的絮凝效果对比

质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	水体浊度/NTU					
	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	8 h
50	304	192	128	108	80	28
100	170	121	106	76	33	27
150	112	93	85	66	29	26
200	58	57	46	39	22	22
250	43	39	40	39	31	29

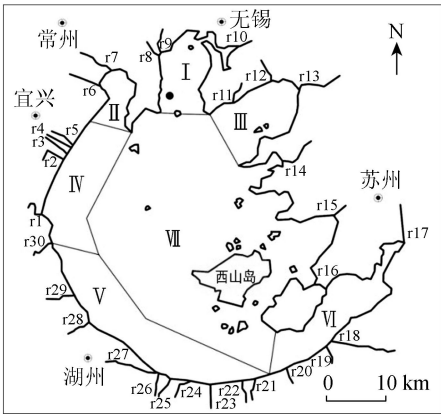
1.3 絮凝沉降试验扰动条件的确定

太湖藻源性湖泛是一种突发性事件,尽管湖泛的发生与发展需要一定的时间,但只有在黑臭水团聚集时才能被准确发现,也只有这个阶段才有机会

采用改性黏土进行应急治理。在这个阶段下,要想利用改性黏土对湖泛黑物质进行有效控制,就必须了解该风速情况下的水动力扰动情况。根据相关文献^[10],黑臭水团大范围聚集时的风速为 2.07~2.39 m/s,而在这个范围的风速下湖底流速所提供的切应力占主导地位,所以湖流大小就成为絮凝过程至关重要的控制条件。2013 年 7 月 7—8 日,10 月 13—15 日,利用 ADV 流速仪对湖泛易发区(图 1)沉积物界面以上 2 cm 的区域进行湖流的连续监测,同时对监测过程中的风速风向进行记录。根据监测的结果,该区域风速与湖流的关系^[11]可以用 quadratic formula ($R^2=0.969$) 表示:

$$\bar{u}=0.262v^2+0.041v+0.733 \tag{1}$$

式中: $\bar{u}$ 为湖流流速,cm/s; v 为风速,m/s。



注: I—梅梁湾; II—兰山湾; III—贡湖湾; IV—西部沿岸区; V—南部沿岸区; VI—太湖东湖区; VII—湖心区; r—入湖河流

图 1 采样点位示意图

通过计算,此时湖底 2 cm 以上的流速为 1.9~2.3 cm/s。

因为湖泛的发生具有偶然性,无法随时进行原位试验,为了保证能够在控制的流速条件下进行改性黏土的絮凝试验,选择本实验室自行研制的柱状水槽进行试验。该水槽由水槽主体、水平流速模拟装置、垂直流速模拟装置及流速测量装置组成(图 2),能够在产生水平流速的同时,利用水泵模拟

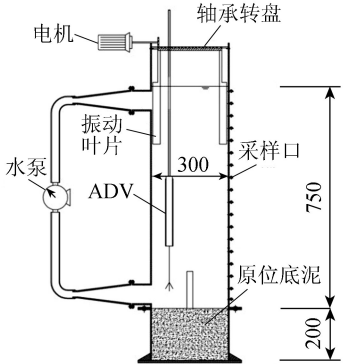


图 2 柱状水槽模拟装置示意图(单位:mm)

垂直流速。利用 ADV 流速仪测量柱状水槽内水体的流速、流向与电机转速的实际对应关系。

根据文献[12],计算柱状水槽的流速及底流切应力之间的关系,底流切应力的计算方法为

$$T_c^b=\rho(u_b^*)^2 \tag{2}$$

式中: T_c^b 为底流切应力, N/m²; ρ 为水的密度, kg/m³; u_b^* 为摩擦速度, m/s。

$$u_b^*=ku_z/[\ln(z/Z_0)] \tag{3}$$

式中: k 为卡曼常数(取为 0.4); u_z 为模拟容器底部以上 z 高度(0.05 m)处的流速, m/s; Z_0 为湖底粗糙度,取 0.2 mm。

根据式(2)和式(3),可以计算出柱状水槽电机转速与流速、底流切应力之间的关系,如图 3 所示。

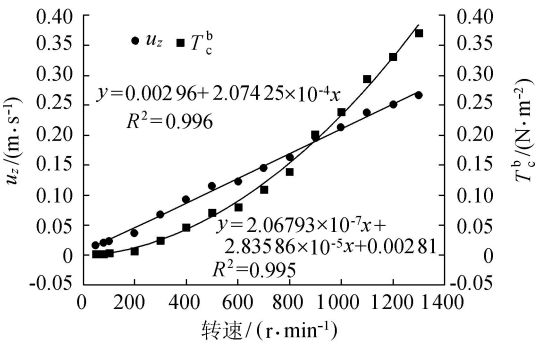


图 3 电机转速与底流切应力的关系

根据 2013 年对太湖湖泛易发区的实际监测结果:湖底 2 cm 以上的流速为 1.9~2.3 cm/s,通过式(1)和式(2),计算出此流速下黑臭水团大范围聚集时底流的切应力为 0.0027~0.0040 N/m²。此时对应柱状水槽的电机转速的范围在 100~120 r/min,为了便于调节,选择电机转速为 100 r/min,作为改性黏土絮凝试验的流速控制条件。

1.4 不同浊度湖泛水的絮凝沉降与再悬浮试验

用 HACH2100Q 浊度仪测量取回的两种水样,其初始浊度分别为 299 NTU 与 660 NTU。将采集的 20 cm 底泥装入模拟柱状水槽的底部,然后缓慢注入低浊度湖泛水体 50 L,开动电机,将转速控制在 100 r/min 左右,然后用泵以 1 L/min 流量将配置好的 5 L 改性黏土溶液喷洒在模拟柱状水槽中,喷洒结束后,保持流速不变,进行水样采集,采样的高度为距离底部沉积物 45 cm,每 10 min 进行 1 次采样,连续采样 70 min,水样采集体积为 20 mL,利用 HACH2100Q 浊度仪进行水样浊度测量,采样高度分别为距离底部沉积物 5 cm,10 cm,25 cm,45 cm,70 cm。

絮凝沉降试验结束后,调整电动机转速范围(100~900 r/min),每增加 50 r/min 保持 10 min,在调整至下一转速前进行水样采集,采样的高度、体积与模拟沉降试验相同,采集的样品利用浊度仪进行

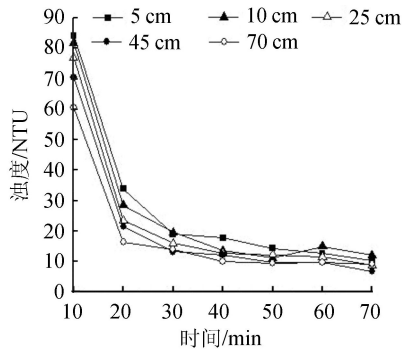
浊度测量。

取高浊度湖泛水 50 L,试验步骤如上文所述,进行絮凝沉降试验与再悬浮试验。

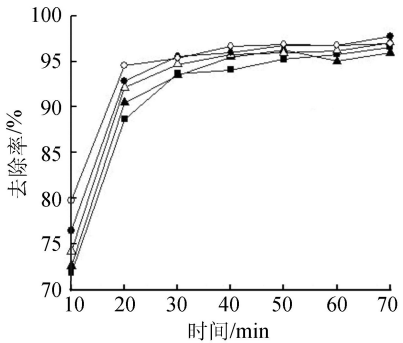
2 结果与讨论

2.1 不同浊度湖泛水模拟流速絮凝试验

图 4 为低浊度湖泛水絮凝试验结果。从水体浊度的剖面变化来看,在播撒絮凝剂后 20 min 便能达到 50% 的浊度去除率;当试验进行超过 50 min 后,水体浊度趋于平衡。在试验过程中,还发现整个沉降过程中均有浊度分层现象出现,尤其是絮凝开始的前 40 min;随着时间的推移,水体在 40 min 后浊度逐渐趋于稳定,浊度去除率为 90% 左右。



(a) 低浊度湖泛水水体的浊度变化情况



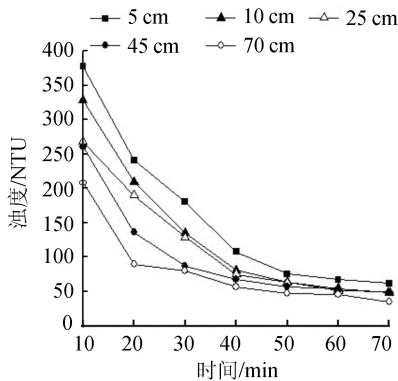
(b) 浊度去除率变化情况

图 4 低浊度湖泛水絮凝试验结果

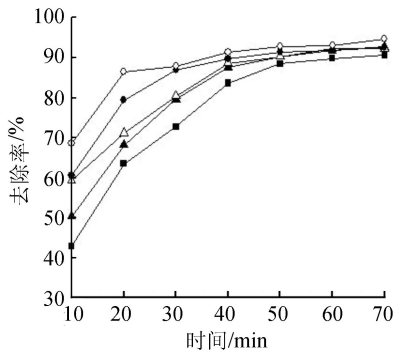
高浊度湖泛水絮凝试验中,在播撒壳聚糖改性黏土的 10 min 后,剖面从上到下基本能达到 50% 的浊度去除率,试验进行到 50 min 后,水体浊度趋于平衡(图 5)。与低浊度湖泛水絮凝试验相同,试验阶段的前 40 min 水体分层现象比较明显,随着时间的推移,70 min 时低浊度湖泛水浊度去除率能达到 95% 以上,水体浊度基本维持在 10 NTU,而高浊度湖泛水浊度去除率稳定在 90%,水体浊度稳定在 50 NTU 左右。

2.2 不同浊度湖泛水的再悬浮试验

在低浊度湖泛水的再悬浮试验(图 6)中,随着电机转速的增加,装置中模拟流速不断增大,当电机转速达到 300 r/min 后,水体各层浊度开始逐渐升



(a) 高浊度湖泛水水体的浊度变化情况



(b) 浊度去除率变化情况

图 5 高浊度湖泛水絮凝试验结果

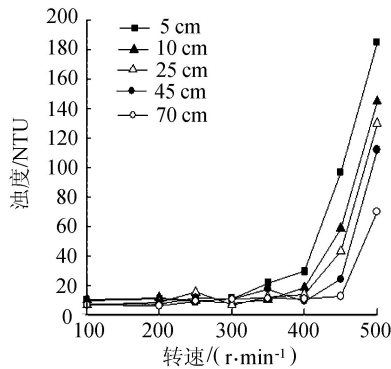


图 6 低浊度湖泛水再悬浮试验结果

高。电机转速达到 400 r/min 时,水体各层浊度发生突然的升高,表层水体浊度由 6 NTU 上升到 11 NTU,底层水体浊度由 10 NTU 上升到 30 NTU,说明此转速下水体流速所提供的切应力为黏土絮体再悬浮的临界切应力。通过计算,300 r/min 与 400 r/min 时的底流切应力分别为 0.022 N/m² 和 0.042 N/m²。

在高浊度湖泛水的再悬浮试验(图 7)中,随着电机转速的增加,当电机转速达到 500 r/min 之后,水体各层的浊度开始逐渐升高,当电机转速超过 700 r/min 之后水体浊度突然发生跃迁,底层从 50 NTU 上升至 275 NTU,表层从 25 NTU 上升至 50 NTU,说明此转速下的流速所提供的切应力是黏土絮体再悬浮的临界切应力。通过计算,500 r/min 与 700 r/min 时的底流切应力分别为 0.065 N/m² 和 0.109 N/m²。

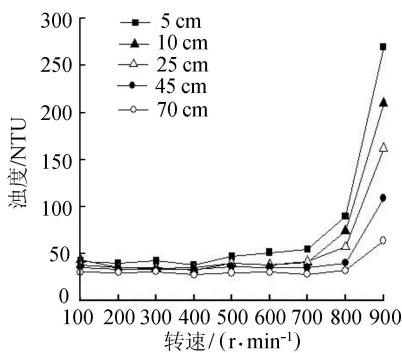


图7 高浊度湖泛水再悬浮试验结果

试验过程中黏土絮体的沉降及再悬浮呈现如下过程:投加壳聚糖改性黏土后,在极短的时间内将悬浮的致黑颗粒絮凝在一起,与此同时壳聚糖利用网捕架桥作用使絮体与絮体之间连接紧密。增大的絮体沉降至底部后,由最初悬浮松散的絮体结构形成松散的较大面积的絮体结构,当流速增大时,切应力随之增大,较小的絮体就从大絮体上不断剥蚀下来,剥蚀出的絮体在水流的作用下,向上悬浮,随着切应力增大,剥蚀程度增大,浊度分层现象越明显,当到达临界切应力时,整个松散的大絮体会完全破碎,从而导致了絮体的完全再悬浮。

2.3 模拟流速下絮体的形成过程

在模拟野外湖底流速条件下,改性黏土的投加量要大大超过代立春等^[5]试验投加量(2 mg/L 壳聚糖,1 g/L 硅藻土),原因在于本试验是在模拟实际流速状况下进行试验的,扰动状态与烧杯试验存在较大差异。试验过程中,存在快速搅拌过程和慢速搅拌过程,在快速搅拌过程中,改性黏土与黑色悬浮物能够进行充分接触,进而通过壳聚糖的架桥网捕作用形成较大的絮体,而较大的絮体通过慢速搅拌过程形成更大的絮体进而发生沉降,而在模拟流速下不存在这两种过程,改性黏土与黑色悬浮物间的碰撞与结合靠的是喷洒絮凝剂时的初动能,这种方式所产生的扰动不能使改性黏土与致黑悬浮物发生充分的接触与碰撞,那么絮体形成的速度较烧杯试验慢,絮体的粒径也小于烧杯试验^[13]。由于模拟流速试验在垂向尺度方面大大超过了烧杯试验,因而出现了烧杯试验所没有的浊度分层现象。由于太湖是大型的浅水湖泊,常年处在风浪扰动的状况下,水体很少出现完全静止的状态,即使湖体没有风浪,也会由于气温和湖底地形的差异导致水流的产生^[12]。由于水平和垂直方向存在流速,絮体就无法完全沉降,小部分絮体会散落分布在水体的某个高度内,而浊度分层的现象也会随着流速的增大而越发明显。

2.4 太湖风浪与絮体再悬浮

科学家对于美国五大湖的研究表明,湖底的切

应力大小对水土界面悬浮物的浓度有很大影响^[14]。太湖作为大型浅水湖泊,由风所引起的切应力对湖底沉积物的再悬浮有着直接的作用^[15]。黏土絮体进入湖底后会因为切应力的缘故会产生再悬浮,而在本次试验过程中发现,两种不同浊度的湖泛水在电机转速为 80 ~ 300 r/min 范围内,底部切应力为 0.002 ~ 0.022 N/m²(图 3),水体各层浊度均无明显变化;当电机转速超过 400 r/min,切应力超过 0.042 N/m²后,低浊度试验组发生了非常明显的再悬浮现象;当电机转速超过 700 r/min,即切应力超过 0.109 N/m²,高浊度试验组发生了明显的再悬浮现象。试验中发现,高浊度试验组中播撒絮凝剂后生成的絮体较低浊度试验组体积更大,且结构更为紧密,电机转速达到 400 r/min,低浊度组的絮体便开始破碎,而高浊度组中的絮体仅发生些许瓦解,水体浊度略微上升,当电机转速达到 700 r/min 时提供的切应力才使高浊度组中生成的絮体发生破碎。因为室内试验是通过电机的均匀扰动来模拟野外湖流,而太湖作为大型湖泊,其水流远比室内试验复杂,野外絮凝试验时发现生成的絮体并不会聚集成大块紧密的结构,而是以低浊度试验组生成的小体积且松散的絮体结构为主。

在湖泊研究中,切应力主要来自波流和湖流。秦伯强等^[12]研究发现,当风速较大时,波浪作用占主导,导致沉积物悬浮所需的临界切应力约为 0.03 ~ 0.04 N/m²,相当于野外风速达 4 m/s 以上的情况。本次低浊度湖泛再悬浮试验也证实了这一点。所以,当湖泛大规模暴发时(风速 < 2.5 m/s),此时播撒壳聚糖改性黏土,则发生絮体再悬浮的几率较小;而当湖泛刚刚生成,厌氧产物刚刚泛起的时候(风速为 3 ~ 5 m/s)^[10],播撒壳聚糖改性黏土,絮体发生再悬浮的几率较大。

3 结 论

本文通过模拟野外流速,利用壳聚糖改性黏土对湖泛水体中的致黑颗粒物质进行絮凝试验,对试验当中的絮凝、沉降、再悬浮过程进行了研究,得出如下结论:

a. 壳聚糖改性黏土对湖泛致黑物质有较强的絮凝作用,在不同浊度试验中,均能够高效且快速地去去除水体当中的黑色悬浮物质,1 h 内都能达到 90% 的浊度去除率。

b. 试验中观察发现,模拟流速条件下,黏土絮体无法完全沉降,在水槽下部有较为明显的浊度分层现象;在后续的再悬浮试验中,黑色絮体的再悬浮也呈现明显的分层现象。

c. 通过实验室的试验与计算可以确定,在太湖风速小于 4 m/s 时播撒絮凝剂,产生的风浪作用使絮体发生再悬浮的几率较小。

参考文献:

[1] 陆桂华,马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. 水科学进展, 2009, 20 (3): 438-442. (LU Guihua, MA Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 438-442. (in Chinese))

[2] ANDERSON D M. Turning back the harmful red tide[J]. Nature, 1997, 388: 513-514.

[3] 潘纲,代立春,李梁,等. 改性当地土壤技术修复富营养化水体综合效果研究: I. 水质改善的应急与长期效果与机制[J]. 湖泊科学, 2012, 24 (6): 801-810. (PAN Gang, DAI Lichun, LI Liang, et al. Eutrophication control using modified local soil/sand induced ecological restoration technology: I. Effect and mechanism on short and long term improvement of water quality[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 801-810. (in Chinese))

[4] 丁艳青,朱广伟,秦伯强,等. 波浪扰动对太湖底泥磷释放影响模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22 (2): 273-278. (DING Yanqing, ZHU Guangwei, QIN Boqiang, et al. Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 273-278. (in Chinese))

[5] 代立春,潘纲,李梁,等. 改性当地土壤技术修复富营养化水体的综合效果研究: III. 模拟湖泛水体的应急治理效果[J]. 湖泊科学, 2013, 25 (3): 342-346. (DAI Lichun, PAN Gang, LI Liang, et al. Eutrophication control using modified local-soil-induced ecological restoration technology: III. The emergency mitigation effect on the black spots[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 342-346. (in Chinese))

[6] 申秋实. 藻源性湖泛致黑物质的物化特征及其稳定性研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2011.

[7] JACKSON G A, LOCHMANN S E. Modeling coagulation of algae in marine ecosystems [J]. Environmental Particles, 1993, 2: 387-414.

[8] HILL P S. Controls on floc size in the sea [J]. Oceanography Society, 1998, 11: 13-18.

[9] 刘秉涛. 壳聚糖复合剂在水处理中的净化效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[10] 王成林,陈黎明,潘维玉,等. 适宜太湖蓝藻水华形成的风场辐散特征及其形成机制[J]. 中国环境科学, 2010 (9): 1168-1176. (WANG Chenglin, CHEN Liming, PAN Weiyu, et al. Divergence characteristics and formation mechanism of wind field appropriate for the

cyanobacteria bloom in Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2010 (9): 1168-1176. (in Chinese))

[11] WANG J, PANG Y, LI Y, et al. The regularity of wind-induced sediment resuspension in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Water Science & Technology, 2014, 70 (1): 167-174.

[12] 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[J]. 科学通报, 2003, 48 (17): 1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. The conceptual model of the dynamic mechanism and suspended sediment in Taihu Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (17): 1822-1831. (in Chinese))

[13] HUANG Y, XU L, HAN R, et al. Using chitosan-modified clays to control black-bloom-induced black suspended matter in Taihu Lake: deposition and resuspension of black matter/clay flocs [J]. Harmful Algae, 2015, 45: 33-39.

[14] LICK W. The flocculation, deposition, and resuspension of fine-grained sediments [M]. Boca Raton, Fla. : Lewis Publishers, 1994: 35-57.

[15] QIAN J, ZHENG S. Experimental study on sediment resuspension in Taihu Lake under different hydrodynamic disturbances [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23 (6): 826-833.

(收稿日期: 2015 - 11 - 20 编辑: 彭桃英)

(上接第 96 页)

[17] 罗进洲. 基于 SMS 及 RS 的闽江福州段水污染控制研究 [D]. 福州: 福州大学, 2004.

[18] 张鹏,石成春,逢勇,等. 闽江下游径流量和北港分流比变化及其对水龄的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (5): 40-45. (ZHANG Peng, SHI Chengchun, PANG Yong, et al. The evolution of split ratio of North Channel and its impact on water age in Minjiang River downstream [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(5): 40-45. (in Chinese))

[19] LI Yiping, TANG Chunyan, WANG Chao, et al. Improved Yangtze River diversions: are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? [J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 104-116.

[20] RICH P, BOB B, STEVE L. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28 (8): 929-937.

(收稿日期: 2015 - 11 - 23 编辑: 徐 娟)