第5卷 第9期 环境工程学报 Vol. 5, No. 9
2011年9月 Chinese Journal of Environmental Engineering Sep. 2011

赤泥复合剂絮凝处理太湖水华藻与海洋赤潮藻

陈 静[1,2] 王 军[3] 赵 颖[3] 栾兆坤[3]
(1. 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049;
3. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘 要 研究了一种新型赤泥复合剂对太湖夏季水华原水、实验室培养海洋赤潮藻及模拟海水的絮凝除藻降浊性能。结果表明,赤泥复合剂具有良好的除藻降浊效果,对太湖水华藻去除率为97.3%,原水浊度去除率为95%;对海洋小球藻和三角褐指藻2种赤潮藻去除率分别高达99.1%和98.9%;对2种模拟海水的最高除浊率分别为96.3%和95.3%,其剩余浊度均低于4 NTU,从而为治理淡水水华与海洋赤潮提供一种新技术,同时为赤泥综合利用提供一种新途径。

关键词 赤泥 水华 赤潮 絮凝 除藻

中图分类号 X524 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2011)09-1933-04

Algae flocculation in water bloom and red tide using red mud amelioration

Chen Jing[1,2] Wang Jun[3] Zhao Ying[3] Luan Zhaokun[3]
(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract The removal of algal cells and turbidity from the raw water of Taihu Lake, the laboratory culture of marine algae and synthetic seawater using a novel red mud amelioration were studied. The results showed that excellent effects on algae and turbidity removal were achieved. For the raw water of Taihu Lake, 97.3% of freshwater algae and 95% of turbidity were removed. The removal efficiency of marine *Chlorella* sp. and *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin from the laboratory culture was 99.1% and 98.9%, respectively. The 96.3% and 95.3% the of turbidity was removed from the two kinds of synthetic seawater and the residual turbidity was less than 4 NTU. Therefore, the red mud amelioration supplies a new method for freshwater algal bloom and seawater red tide mitigation and a new way for the multipurpose utilization of red mud.

Key words red mud; water bloom; red tide; flocculation; algal removal

近年来,由于自然和人为因素的影响,排入湖泊、海洋的氮、磷等营养物质不断增加,致使水体富营养化状况加剧,进而导致淡水水华与海洋赤潮频繁暴发,对水生生态造成灾害性破坏,严重恶化了水质,影响了水体的供水、渔业和景观等功能[1,2]。面对这一重大环境问题,国内外学者已先后研究了多种综合除藻方法和应急除藻技术,其中,絮凝沉降法除藻迅速,对非藻类生物的影响小,同时也可消除水体其他悬浮物,净化水质,是一种比较有效、可行的方法[3-5]。

赤泥是用铝土矿冶炼氧化铝生产过程中的一种强碱性矿物残渣,每生产1 t氧化铝则有0.6~1.5 t赤泥产生[6,7]。随着铝工业的快速发展,赤泥的堆积量不断增加,不仅占用大量土地,而且严重威胁水体、大气和土壤环境,赤泥的综合利用一直是铝工业亟待解决的课题[8,9]。

本研究以赤泥为原料,充分利用赤泥中各种有效成分及强碱性,将其与铝土矿酸浸液反应制备一种新型赤泥复合剂,应用于太湖夏季水华藻与实验室培养海洋赤潮藻絮凝去除研究,并考察对水体浊度的去除效果,从而为迅速、高效、经济治理淡水水华与海洋赤潮提供一种新技术,同时为赤泥综合利

基金项目:国家"863"高技术研究发展计划项目(2008AA06A409-3);国家"973"重点基础研究发展规划项目(2008CB418105)
收稿日期:2010-03-18; 修订日期:2010-04-20
作者简介:陈静(1981~),女,博士研究生,主要从事淡水水华与海洋赤潮治理技术研究工作。E-mail: jingchen2004126@126.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用提供一种新途径。

1 材料与方法

1.1 赤泥复合剂的制备

1.1.1 赤泥复合剂原料

制备赤泥复合剂的原料为普通赤泥和铝土矿酸浸液。

赤泥来源于山东铝业股份有限公司,灰色固体,主要成分(以金属离子表示)如下: Na 8.73%,Mg 0.36%,Al 8.43%,Si 27.82%,K 1.64%,Ca 8.12%,Fe 7.41%,Ti 3.59%。

铝土矿酸浸液由天津大港化学试剂厂提供,黄色液体,铝浓度(以 Al_2O_3 计)约为 13%,pH 为 1.7 左右。

1.1.2 赤泥复合剂的制备

向 500 mL 的三口烧瓶中加入铝土矿酸浸液,按比例加入焙烧、研磨后赤泥,于加热条件下搅拌一定时间,即合成赤泥复合剂,冷却后待用。制备后赤泥复合剂主要成分如下: Mg 1.32 g/L,Al 80.5 g/L,Si 16.1 g/L,Ca 52.8 g/L,Fe 18.8 g/L。

实验中采用的赤泥复合剂为制备后药剂稀释 15 倍后赤泥复合剂,文中投加量均为稀释后赤泥复合剂投加量。

1.2 太湖原水的采样与絮凝实验

1.2.1 太湖原水的采样

采样时间为 2009 年 8 月下旬,采样地点无锡太湖十八湾水华治理示范区,浮游藻类中优势藻为蓝藻,占总浮游藻类的 95.9%。

1.2.2 太湖原水的絮凝实验

取太湖原水各 200 mL 于烧杯中,加入不同量的赤泥复合剂,采用 ZR3-6 型混凝实验仪(深圳中润水工业科技发展有限公司)进行絮凝除藻降浊实验。过程如下: 快搅 200 r/min,2 min; 慢搅 30 r/min,5 min; 静沉 30 min 后,液面下 2 cm 处取样,测定样品中的叶绿素 a 含量[10],通过叶绿素 a 含量的降低计算藻去除率; 同时测量剩余浊度[10],计算浊度去除率。

1.3 海洋赤潮藻的培养与絮凝实验

1.3.1 海洋赤潮藻培养

实验用海洋赤潮藻包括海洋小球藻(marine *Chlorella* sp.)和三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum* Bohlin)。海洋小球藻藻种由山东东方海洋科技股份公司海岸带生物资源实验室提供,三角褐指藻藻种源自中国科学院海洋研究所藻种库。

赤潮藻培养采用 f/2 培养基[11],培养液由灭菌后人工海水加营养盐配置而成,初始 pH = 8.2。藻液置于温度 25 ± 1 ℃,光照 2 000 ~ 3 000 lux,光暗比 12∶12 的智能光照培养箱(PGX-350,宁波海曙赛福实验仪器厂)培养,接种扩养后,待用。

1.3.2 海洋赤潮藻絮凝实验

取生长对数期的海洋小球藻和三角褐指藻各 200 mL 于烧杯中,加入不同量的赤泥复合剂后搅拌,过程如 1.2.2,静沉 30 min 后,液面下 2 cm 处取样,Lugol 试剂固定,电动显微镜(Axioskop 2 mot plus,Carl ZEISS)下用浮游植物计数框计数,取 3 次平均值计算藻去除率。

1.4 模拟海水除浊实验

1.4.1 模拟海水的配制

模拟海水由人工海水与高岭土、石英砂组成。高岭土、石英砂为市售化学纯,烘干后过筛 180 目。

模拟海水(1): 称取定量高岭土于人工海水中,搅拌均匀后待用,其中高岭土浓度为 100 mg/L,模拟由粘土类物质引起水体浑浊的海水。

模拟海水(2): 称取定量高岭土与石英砂于人工海水中,搅拌均匀后待用,其中高岭土与石英砂浓度均为 50 mg/L,模拟由泥沙类物质引起水体浑浊的海水。

1.4.2 模拟海水的絮凝实验

取搅拌均匀的模拟海水各 200 mL 于烧杯中,加入不同量的赤泥复合剂后搅拌,过程如 1.2.2,静沉 30 min 后,液面下 2cm 处取样测剩余浊度[10],计算浊度去除率。

2 结果与讨论

2.1 太湖水华藻的絮凝去除效果

太湖原水取自夏季十八湾水华治理示范区,其中蓝藻为优势藻,占总浮游藻类的 95.9%,水质情况如下: 温度 32.2 ℃,pH 8.88,DO 3.1 mg/L,TN 2.24 mg/L,TP 0.26 mg/L,叶绿素 a 71.5 μg/L。

图 1 是太湖原水中水华藻的去除率随赤泥复合剂投加量的变化情况,由图 1 可知,赤泥复合剂对太湖原水中蓝藻具有较好的絮凝去除效果。当复合剂投加量低于 1.25 mg/L 时,藻去除率随着药剂投加量的增加迅速增大,进一步提高赤泥复合剂的投加量,藻去除率则缓慢增至 97.3%。因此,对于此原水水样赤泥复合剂最佳投加量为 1.25 mg/L,此时

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

优势藻去除率为 92.5%。

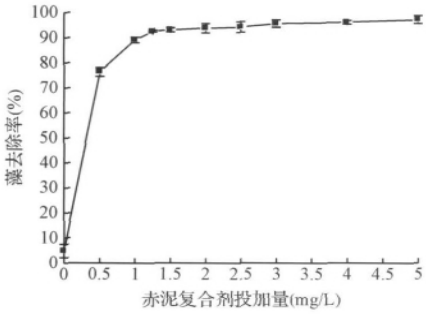

图 1　太湖水华藻的絮凝去除效果

Fig. 1　Effect of algal removal from raw water of Taihu Lake

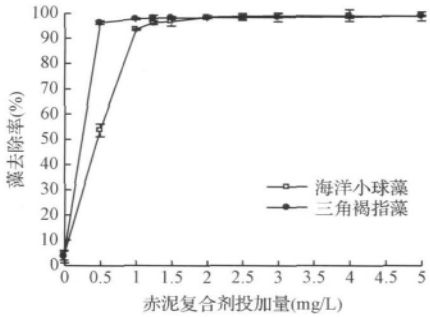

图 3　海洋赤潮藻的絮凝去除效果

Fig. 3　Effect of marine algal removal from the laboratory culture

2.2　太湖原水的絮凝降浊效果

絮凝去除太湖水华藻的同时,实验还考察了赤泥复合剂对太湖原水浊度的去除效果,结果如图 2 所示。

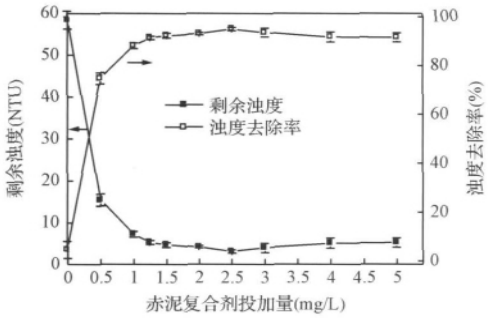

图 2　太湖原水的絮凝降浊效果

Fig. 2　Effect of turbidity removal from raw water of Taihu Lake

对于初始浊度为 61.3 NTU 的太湖原水,当复合剂投加量在 0 ~ 2.5 mg/L 范围内时,原水浊度去除率随着药剂投加量的增加而增大,其最佳投加量也为 1.25 mg/L,此时太湖原水浊度去除率为 91.5%,当药剂投加量增加至 2.5 mg/L 时,浊度去除率增高至 95%,此时溶液的浊度降至最低,为 3.1 NTU。

由于该复合剂由赤泥和铝土矿酸浸液制备而成,带有一定的浊度,在此基础上,若进一步增加复合剂的用量,溶液的浊度则会增加 1 ~ 2 NTU。

2.3　海洋赤潮藻的絮凝去除效果

赤泥复合剂对 2 种海洋赤潮藻海洋小球藻和三角褐指藻絮凝效果如图 3 所示。

对于初始浓度为 18.3×10^6 cells/mL 海洋小球藻,藻去除率随着赤泥复合剂投加量的增加而增大。当赤泥复合剂投加量为 0.5 mg/L 时,海洋小球藻去除率为 53.6%。复合剂投加量增加至 1 mg/L 时,藻去除率迅速增至 93.5%。在此基础上进一步增加赤泥复合剂投加量,藻去除率增加幅度则趋于平缓,当投加 3 mg/L 赤泥复合剂时,小球藻去除率增至为 99.1%。

赤泥复合剂对初始浓度为 5.0×10^6 cells/mL 三角褐指藻也具有良好的絮凝去除效果。当复合剂投加量仅为 0.5 mg/L 时,絮凝沉降 30 min 后,三角褐指藻去除率高达 96.3%。继续增加赤泥复合剂的投加量,三角褐指藻去除率缓慢增至 98.9%。因此,对于实验中该浓度的三角褐指藻,赤泥复合剂最佳投加量为 0.5 mg/L。

2.4　模拟海水的絮凝降浊效果

高浊度海水区域易于有害赤潮的发生,且在赤潮暴发过程中,常导致海水浊度的进一步增加。实验室利用人工海水、高岭土和石英砂配制 2 种不同组分的模拟海水,考察了赤泥复合剂对海水的絮凝除浊性能。

对于初始浊度分别为 97 NTU 与 74 NTU 的模拟海水(1)与模拟海水(2),赤泥复合剂的絮凝除浊效果如图 4 所示。

当赤泥复合剂投加量为 1 mg/L 时,由粘土类物质引起水体浑浊的模拟海水(1)的浊度去除率为 93.3%,增加药剂投加量至 2 mg/L 时,浊度去除率随之提高至 96.3%,此时海水(1)剩余浊度最低,为 3.6 NTU。对于泥沙类物质引起水体浑浊的模拟海水(2),赤泥复合剂最佳投加量为 1.25 mg/L,此时浊度去除率最高,为 95.3%,海水剩余浊度为 3.5 NTU。

2.5　赤泥复合剂的絮凝机理

赤泥复合剂是以赤泥为原料,与铝土矿酸浸液

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

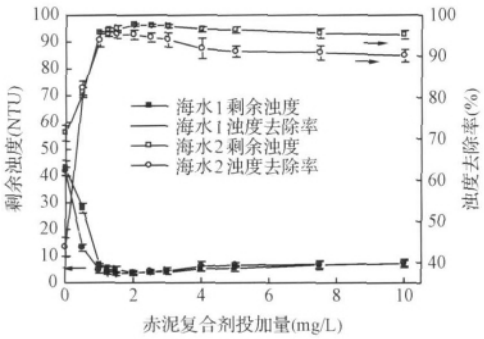

图4 模拟海水的絮凝降浊效果

Fig. 4 Effect of turbidity removal from synthetic seawater

反应制备而成的一种新型复合絮凝剂，含有钙、铝、铁、硅和镁等多种有效成分，其中铝含量高于 80 g/L，钙含量高于 50 g/L，硅、铁含量均高于 16 g/L，使得该复合剂具有较强的絮凝性能，同时其絮凝机理比其他普通的无机絮凝剂更为复杂。

在高效、快速絮凝去除水体中藻类、悬浮颗粒物的复杂机理中，发挥主要作用的机理可能包括以下两个方面：一方面是当赤泥复合剂投加到溶液中后，复合剂中的铝、铁、钙和镁等金属离子迅速发生水解，生成多种水解-聚合形态的化合物，它们表面带有正电荷，而水体中的藻类、悬浮颗粒物带有负电荷，由于相反电荷的吸引力作用使悬浮的藻类、颗粒物等粒子脱稳、凝聚、沉淀；另一方面是由于赤泥中硅含量较高，约占 27.8%，存在形式多为带负电荷的阴离子，在赤泥复合剂制备的过程中，与阳离子型的铝离子、铁离子可以相互结合，成为具有分形结构的聚集体[12]。该类聚集体在溶液中既有铁、铝、硅各自的水解-聚合，又有铁、铝、硅交错水解-聚合[12]，使得赤泥复合剂在絮凝过程中吸附架桥、卷扫网捕作用增强，絮凝性能提高。

3 结 论

以赤泥为原料，与铝土矿酸浸液反应制备而成的赤泥复合剂，具有良好的絮凝除藻降浊性能：

(1) 对于太湖夏季水华原水，当赤泥复合剂的投加量为 1.25 mg/L 时，太湖优势藻去除率为 92.5%，原水浊度的去除率为 91.5%；增加药剂投加量，藻去除率增高至 97.3%，浊度去除率增高至 95%。

(2) 高离子强度的海水体系中，赤泥复合剂也具有良好的絮凝除藻降浊效果。当赤泥复合剂投加量仅为 0.5 mg/L 时，三角褐指藻去除率高达 96.3%；对于高浓度海洋小球藻，赤泥复合剂投加量为 1 mg/L 时，藻去除率达 93.5%。对于 2 种不同组分模拟海水的除浊率分别高达 96.3% 和 95.3%，其剩余浊度均低于 4 NTU。

参 考 文 献

[1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake. Science, **2007**, 317(5842): 1166

[2] 吕颂辉. 赤潮的危害、成因及其防治. 科技中国, **2004**, (8): 70-73

[3] Anderson D. M. Turning back the harmful red tide. Nature, **1997**, 388(6642): 513-514

[4] 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. Environmental Pollution, **2006**, 141(2): 206-212

[5] 张木兰，潘纲，陈灏，等. 改性沉积物除藻对水质改善的效果研究. 环境科学学报, **2007**, 27(1): 13-17
Zhang M. L., Pan G., Chen H., *et al*. Study of the effect on water quality improvement by removal of algal bloom using modified sediment. Acta Scientiae Circumstantiae, **2007**, 27(1): 13-17(in Chinese)

[6] Hind A. R., Bhargava S. K., Grocott S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: A review. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, **1999**, 146(1-3): 359-374

[7] 景英仁，杨奇，景英勤. 赤泥的基本性质及工程特性. 山西建筑, **2001**, 27(3): 80-81, 108
Jing Y. R., Yang Q., Jing Y. Q. Basic properties of red mud and engineering characteristics of it. Shanxi Architecture, **2001**, 27(3): 80-81, 108(in Chinese)

[8] 彭光菊，张健伟，韦山桃，等. 铝土矿赤泥的开发利用. 矿产与地质, **2008**, 22(3): 273-276
Peng G. J., Zhang J. W., Wei S. T., *et al*. Exploitation and utilization of bauxite red mud. Mineral Resources and Geology, **2008**, 22(3): 273-276(in Chinese)

[9] Zhao Y., Wang J., Liu C. J., *et al*. Characterization and rish assessment of red mud derived from the sintering alumina process. Fresenius Environmental Bulletin, **2009**, 18(6): 989-993

[10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**. 96-97, 670-671

[11] Guillard R. R. L., Hargraves P. E. Stichochrysis-immobilisis is a diatom, not a chyrsophyte. Phycologia, **1993**, 32(3): 234-236

[12] 徐晓军. 化学絮凝剂作用原理. 北京: 科学出版社, **2005**. 157-169

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net