

活化粉煤灰改性壳聚糖絮凝除藻的研究*

施国键¹ 乔俊莲^{2,3#} 王国强¹ 郭健伟^{2,3} 张普¹ 高乃云^{2,3}

(1. 同济大学化学系, 上海 200092; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;

3. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要 将活化后的粉煤灰滤液对壳聚糖进行改性, 研究其絮凝除藻性能。实验表明, 改性后的壳聚糖除藻性能优良, 较少的用量(0.5 mL)可去除接近 90% 的藻, 而分泌可溶性的胞外有机物(EOM)会优先争夺絮凝剂——壳聚糖, 导致其投加量增加。适当增加改性壳聚糖投加量可以使藻絮体密实, 增强抗水流冲击能力, 由此展开改性壳聚糖投加量与絮凝除藻的动力学研究。最后, 测定了絮凝上清液的藻光合活性, 发现投加改性壳聚糖后有效降低了藻光合活性, 防止水华二次爆发。

关键词 铜绿微囊藻 粉煤灰 壳聚糖 胞外分泌有机物 动力学

Study on flocculation and removal of *Microcystis aeruginosa* by the activated fly ash modified Shi Guojian¹, Qiao Junlian^{2,3}, Wang Guoqiang¹, Guo Jianwei^{2,3}, Zhang Pu¹, Gao Naiyun^{2,3}. (1. Department of Chemistry, Tongji University, Shanghai 200092; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The Chitosan was modified by activated fly ash and the obtained Chitosan was used for flocculation and removal of *Microcystis aeruginosa*. The modified Chitosan exhibited perfect efficiency for algae flocculation, and more than 90% of algae were removed with flocculant dosage of 0.5 mL. More flocculant dosage was needed when extracellular organic matter (EOM) existed, for EOM was more competitive of flocculant combining. Increasing the flocculant dosage to a certain extent was benefit for forming dense floc, which was more capable in anti rush current. The process of flocculation could be better fitted by exponent model than by second order reaction model. The cationic flocculant could change the surface potential of algae and further reduce its photosynthetic activity, which means the modified chitosan could prevent the secondary outbreak of algae blooms.

Keywords: *Microcystis aeruginosa*; fly ash; chitosan; extracellular organic matter (EOM); kinetics

随着工业的发展, 我国水体富营养化状况日益严重。在水华爆发应急处理上, 机械打捞耗费大量人力, 生物法启动运行时间又较长。天然絮凝剂安全、无毒, 不造成二次污染。其中, 絮凝效果较好的是壳聚糖。ZOU 等^[1]用粘土改性壳聚糖可以除藻 90% 以上。柳丹等^[2]研究了磁场作用下壳聚糖与 Fe₃O₄ 复配去除淡水藻华, 也取得了较好的效果。但是壳聚糖价格昂贵, 限制了其大规模的应用。

粉煤灰是指企业在生产时煤粉燃烧过程中排出灰渣的总称。截至 2008 年, 粉煤灰年产生量约 3 亿 ~ 4 亿 t, 因此粉煤灰的综合利用是我国工业固体废物处理的重点之一。目前, 在环保上, 粉煤灰主要应用于对染料废水的脱色、对水体的除磷等^[3,4]。而蔡冬清等^[5]将粉煤灰超纯磁铁矿粉复配物絮凝除藻, 对藻液浊度、COD 等处理效果最佳。笔者将活化后的粉煤灰滤液对壳聚糖进行改性, 用其絮凝除

藻, 取得较好的絮凝效果, 且大大降低壳聚糖的用量, 与聚合氯化铝(PAC)相比还节省了处理费用。

1 材料与方法

1.1 实验材料

壳聚糖, 脱乙酰度 > 90%; 粉煤灰; 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 购自中国科学院水生生物研究所(武汉)国家淡水藻种库。

1.2 叶绿素 a 的测定

用 PAM 系列调制叶绿素荧光仪(德国 WALZ 公司)测定叶绿素 a 含量变化来表征藻去除率, 同时测量其即时荧光及光合活性。

1.3 浊度的测定

采用 UV-1800 分光光度计在波长为 680 nm 处测定浊度。其方程为: $y = 948.67x$ (式中: y 为浊度, NTU; x 为吸光度), $R^2 = 0.9996$ 。

第一作者: 施国键, 男, 1985 年生, 硕士研究生, 主要从事水华治理的研究。# 通讯作者。

* 上海市科委科研项目(No. 072312001)。

1.4 溶解性有机碳(DOC)的测定

将预处理后的藻原液和絮凝后上清液分别经过 0.45 μm 的滤膜过滤后,用 TOCV-CPN 总碳分析仪(日本岛津)直接测定水中 DOC。

1.5 Zeta 电位的测定

将预处理后的藻原液和加入壳聚糖快速搅拌结束后的藻液分别用 Zeta 电位分析仪(英国马尔文仪器有限公司)测定藻细胞表面的 Zeta 电位,比较随改性壳聚糖投加量变化藻细胞 Zeta 电位的变化。

1.6 实验方法

1.6.1 改性壳聚糖的配制

将 15.0 g 粉煤灰与 20.0 mL 浓盐酸混合搅拌,在温度为 65 °C 于广口瓶封闭条件下反应 2 h。将粉煤灰过滤弃去滤渣,得到活化后的滤液并定容至 500 mL,在滤液中加入定量壳聚糖,使壳聚糖质量浓度为 0.25 mg/mL,混合 1 h 后,即为改性壳聚糖。

1.6.2 藻原液预处理

取对数生长期的藻细胞,用蒸馏水稀释控制藻原液吸光度 OD_{680 nm} = 0.150,藻细胞数为 3.48 × 10⁶ 个/mL,接近水华发生时水体中的藻细胞数。

1.6.3 絮凝效果的测定

在 600 mL 烧杯中,加入 500 mL 预处理后的藻原液,投加定量的改性壳聚糖,250 r/min 快速搅拌 3 min,30 r/min 慢速搅拌 10 min,静沉 1 h 后,于液面下 2 cm 处取样测定叶绿素 a。

2 结果与讨论

2.1 改性壳聚糖溶液的絮凝效果

将用 1% (质量分数) 盐酸配置的质量浓度均为 0.25 mg/mL 的壳聚糖溶液和改性壳聚糖溶液以及活化粉煤灰滤液分别加入 500 mL 预处理后的藻原液絮凝除藻,考察藻的去除效果,结果见图 1。由图 1 可知,投加壳聚糖溶液和活化粉煤灰滤液对藻的去除效果均有限,而改性壳聚糖溶液的絮凝性能大幅

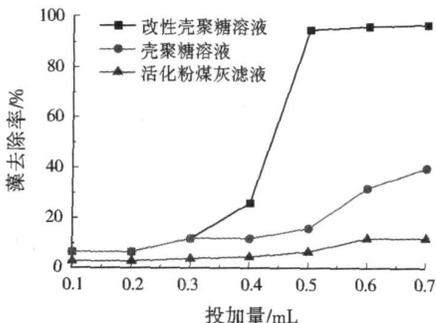


图 1 3 种物质的藻去除率

Fig. 1 The effect of different solutions on algae removal

提升,投加 0.5 mL 就可以去除 90% 的藻。

同时可以发现,改性壳聚糖溶液投加量对藻去除影响很大,在投加量为 0.4 mL 时,藻的去除率不到 30%,但当投加量大于 0.5 mL 时,藻的去除率上升到 90% 以上,继续增大投加量,藻的去除率变化平缓。可见,改性壳聚糖溶液絮凝除藻在投加量上存在一个阈值,即当投加量大于某个值之后,藻的去除率迅速上升。

藻类在生长过程中会分泌可溶性的胞外有机物(EOM),主要由含氮物质和戊糖胶类物质组成^[6],而此类有机物多半为致癌前驱物,并且在常规氯氧化过程中生成如三卤甲烷和卤乙酸等“三致”物质^[7]。因此,EOM 的存在极大影响了饮水的安全性。采用 DOC 来表征 EOM 含量,结果见图 2。由图 2 可知,随着改性壳聚糖溶液投加量的增加,DOC 先急剧下降,下降至 3 mg/L 左右后趋于稳定。实验也发现,当改性壳聚糖溶液投加量为 0.4 mL 时,藻的去除率不到 20%,但是 DOC 已由初始的 13.3 mg/L 下降至 5.1 mg/L,继续增加改性壳聚糖溶液投加量,藻的去除率开始大幅上升,到 90% 左右之后趋于平缓,而 DOC 则基本稳定不变,表明 EOM 对絮凝除藻影响很大,改性壳聚糖优先和 EOM 结合,当 DOC 下降到一定浓度后,改性壳聚糖才吸附到藻表面发挥絮凝除藻的作用。可见,改性壳聚糖在除藻的同时对 EOM 也有很好的去除,这解释了改性壳聚糖絮凝除藻出现阈值的原因。

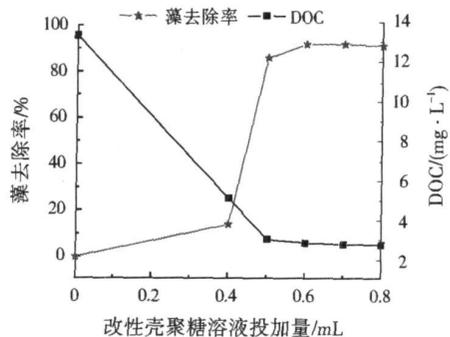


图 2 EOM 对藻絮凝的影响

Fig. 2 The effect of modified chitosan dosage on algae and DOC removal

由图 3 可知,铜绿微囊藻生长时分泌多糖类有机物使细胞表面成电负性^[8]。当改性壳聚糖溶液投加量大于 0.4 mL 时,藻表面 Zeta 电位才开始由 -40.6 mV 迅速上升,此时对应的藻去除率也开始上升到 90% 以上,所以这就进一步印证了改性壳聚糖优先和 EOM 结合,之后再通过电性吸附等作用结合到藻细胞的表面,降低藻表面 Zeta 电位,减弱

藻细胞间静电排斥作用^[9],破坏藻液的稳定性,进而发挥网捕架桥作用絮凝去除藻细胞。

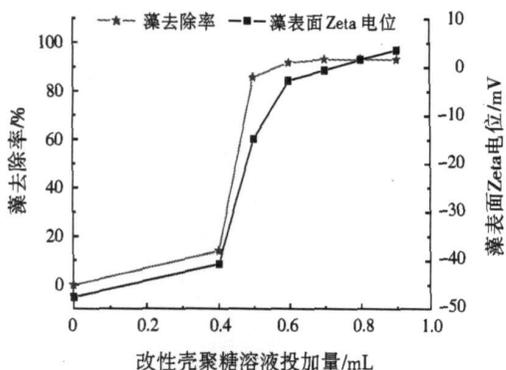


图3 藻表面 Zeta 电位对藻絮凝的影响

Fig.3 The effect of Zeta potential on algae removal

2.2 改性壳聚糖溶液投加量对静置时间的影响

改性壳聚糖溶液的投加量对静置时间有较大影响(见图4)。由图4可知,当改性壳聚糖溶液投加量为0.5 mL,静置时间为60 min时才有接近85%的藻去除率,而当投加量上升到0.7 mL以上时,静置20 min即可去除90%左右的藻。从沉淀下来的藻絮体可以看出,虽然改性壳聚糖溶液投加量为0.5、0.7 mL都能去除90%左右的藻,但是前者沉淀下来的藻絮体小而松散,后者藻絮体大而密实。

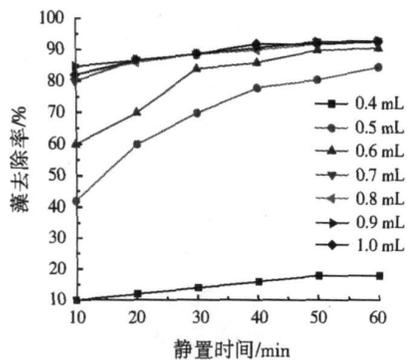


图4 改性壳聚糖溶液投加量对静置时间的影响

Fig.4 The effect of modified chitosan dosage on flocculation time

这可能因为在絮凝过程中改性壳聚糖发挥了强烈的网捕卷扫作用。首先,活化粉煤灰滤液中的

H_2SiO_3 可捕收悬浮颗粒,起混凝吸附架桥作用^[10];其次,改性壳聚糖在酸性条件下从溶液中结合氢质子,使自身成为高分子阳离子絮凝剂,增大其投加量可以强化网捕架桥作用,使藻絮体变得更大,更容易在短时间内沉淀下来^[11]。此外,由EOM优先争夺改性壳聚糖可知,初始加入的改性壳聚糖大部分和EOM结合,所以利用率低,当其投加量超过EOM所能结合的量之后,改性壳聚糖就专一作用于藻细胞,使藻絮凝密实且易沉降。

2.3 絮凝动力学研究

分别用二级反应模型和指数级反应方程来拟合改性壳聚糖絮凝除藻,发现相关性都较高,2种动力学研究的方法各有优势。用二级反应模型、指数级反应方程拟合得到各动力学参数,结果见表1、表2。从除藻速率常数、藻去除率为50%所需要的时间(t_{50})、藻去除率为80%所需要的时间(t_{80})均可以得到改性壳聚糖溶液投加量为0.9 mL时,除藻效率最高,大于0.9 mL除藻效率反而有所下降。

$$1/c_t - 1/c_0 = kt \quad (1)$$

式中: c_t 为 t 时刻的藻细胞数,个/mL; c_0 为起始藻细胞数,个/mL; k 为除藻速率常数; t 为静置时间,min。

用指数级反应方程拟合改性壳聚糖絮凝除藻,得到式(2)、式(3)。

$$c_t = A \exp(-t/B) + C \quad (2)$$

$$V_t = A/B \exp(-t/B) \quad (3)$$

式中: V_t 为 t 时刻的除藻速率,个/(mL·min); A 、 B 、 C 为动力学常数。

由表2可知,在指数级反应方程的改性壳聚糖溶液投加量与二级反应模型相同时,前者相关性较高,所得 t_{50} 、 t_{80} 、30 min藻的去除率更接近实际处理效率,且可以得到除藻极限,有利于判断改性壳聚糖溶液投加量对除藻效果的影响,如投加量为0.4 mL时除藻极限为18.15%,表明即使增加静置时间也不可能得到好的处理效果,这个结论比二级反应模

表1 二级反应模型的动力学参数

Table 1 The kinetics parameters of second order reaction model

投加量/mL	方程	k	R^2	t_{50}/min	t_{80}/min	30 min的藻去除率/%
0.4	$c_t = 100 / (0.004t + 1)$	0.004	0.938 9	250.00	1 000.00	10.71
0.5	$c_t = 100 / (0.117t + 1)$	0.117	0.967 3	8.54	34.16	77.82
0.6	$c_t = 100 / (0.165t + 1)$	0.165	0.991 3	6.06	24.24	83.19
0.7	$c_t = 100 / (0.229t + 1)$	0.229	0.987 8	4.37	17.48	87.29
0.8	$c_t = 100 / (0.240t + 1)$	0.240	0.979 5	4.17	16.68	87.80
0.9	$c_t = 100 / (0.275t + 1)$	0.245	0.985 6	3.63	14.52	89.19
1.0	$c_t = 100 / (0.237t + 1)$	0.237	0.984 4	4.22	16.88	87.67

表 2 指数级反应方程的动力学参数
Table 2 The kinetics parameters of exponent model

投加量/mL	方程	R^2	t_{50}/min	t_{80}/min	30 min 的藻去除率/%	除藻极限 ¹⁾ /%
0.4	$V_t = 1.036\exp(-0.059t)$	0.963 9			15.13	18.15
0.5	$V_t = 5.247\exp(-0.062t)$	0.996 3	14.12	45.44	71.97	85.98
0.6	$V_t = 8.457\exp(-0.096t)$	0.983 7	8.48	23.78	84.10	89.16
0.7	$V_t = 15.249\exp(-0.168t)$	0.997 5	4.75	12.67	90.19	90.78
0.8	$V_t = 18.677\exp(-0.206t)$	0.995 7	3.88	10.34	90.80	90.82
0.9	$V_t = 19.804\exp(-0.216t)$	0.995 2	3.64	9.53	91.51	91.68
1.0	$V_t = 17.621\exp(-0.194t)$	0.994 7	4.10	10.99	90.41	90.68

注: ¹⁾表示静止时间无限长所得的藻去除率。

型更符合实际所测, 而改性壳聚糖溶液投加量大于 0.5 mL 时, 30 min 已接近处理极限, 可以为最佳静置时间做出预判。

2.4 投加量与絮体抗水流冲击的关系

将改性壳聚糖溶液投加量分别为 0.5、0.6、0.7 mg/L 的藻絮体沉淀稳定后重新置于搅拌器中, 以 20 r/min 搅拌 30 s 后, 静置一定时间, 测定上清液浊度, 结果见图 5。由图 5 可知, 投加量少的藻絮体易受水体流动影响, 易被扬起; 而投加量多的藻絮体抗水流冲击能力强, 藻絮体大而密实且沉淀性能强, 上清液返清快。实际应用中, 对于流速较小、活动不剧烈的水体如景观水体等, 可以用较少的投加量取得较高的藻去除率; 而水流较快、活动较剧烈的河流湖泊可以考虑增加投加量, 防止藻絮体沉淀后被扬起再次带入水体中。

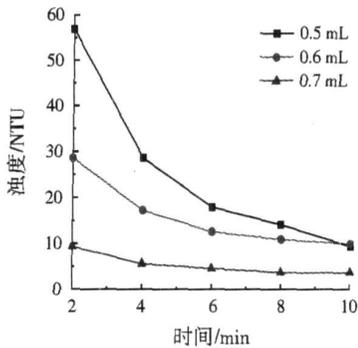


图 5 投加量对絮体抗水流冲击的影响

Fig. 5 The effect of modified chitosan dosage on flocculation impact resistance ability

2.5 藻光合活性研究

在预处理后的藻原液中投加 0.6 mL 改性壳聚糖溶液, 絮凝后取上清液, 测定藻光合量子产率 (Y) 和光能利用率 (α), 以表征藻光合活性, 结果见图 6。由图 6 可知, 藻经改性壳聚糖溶液絮凝处理 2 d 后, Y 和 α 均接近 0, 藻光合活性下降明显, 光合作用近乎停止。其中原因可能是藻表面 Zeta 电位被改性壳聚糖改变后, 不利藻对营养物质的吸收, 降低其光合作用的活性, 抑制藻分裂生殖, 防止水华的二次爆发。

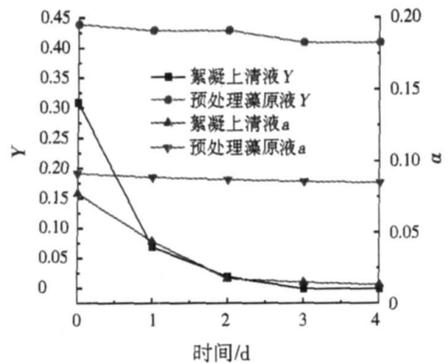


图 6 絮凝后藻光合活性变化

Fig. 6 Variation of photosynthesis activity of algae after flocculation

2.6 经济可行性分析及成本核算

表 3 为改性壳聚糖与 PAC 的成本比较。由于改性壳聚糖结合了无机物、金属离子与天然高分子物质等多种絮凝剂的优势, 所以投加量小, 处理费用仅为 0.027 元/ m^3 , 而 PAC 处理相同预处理后的藻原液需投加 40 g/ m^3 , 处理费用为 0.040 元/ m^3 。可见, 一方面改性壳聚糖处理费用不到 PAC 的 70%, 另一方面由于改性壳聚糖投加总量比 PAC 少得多, 而且改性壳聚糖为天然高分子, 降低了 Al^{3+} 等金属离子残留的可能性, 避免二次污染。

表 3 改性壳聚糖与 PAC 的成本比较

Table 3 Cost comparison of modified chitosan and PAC

絮凝剂	用量	价格		
		$/(元 \cdot \text{t}^{-1})$	处理费用 $/(元 \cdot \text{m}^{-3})$	
改性壳聚糖	浓盐酸	40 mL/ m^3	300	0.012
	壳聚糖	0.25 g/ m^3	60 000	0.015
PAC ¹⁾		40 g/ m^3	1 000	0.040

注: ¹⁾质量分数为 30%。

3 结论

(1) 改性壳聚糖投加量大于 0.5 mL 时, 藻去除率接近 90%, 投加量为 0.9 mL 时, 除藻效率最高, 继续增大投加量藻去除率反而下降, 表明适当增加投加量即可以减少静置时间又可以提高藻絮体的抗水流冲击能力。

(下转第 54 页)

5 结 论

(1) 平煤矿区地下水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 严重超标,其他常规离子含量较低。但离子浓度空间分布明显不均,变异系数在 30%~130%。矿化度明显升高,地下水水质由淡水向微咸水演化。

(2) 矿井排水和大气降水的溶滤作用及氧化作用使地下水水化学类型趋于多元化和复杂化,由 HCO_3^- 型向 SO_4^{2-} 型转化。

(3) 对煤矸石的淋溶模拟试验表明,煤矸石的持续淋溶对平煤矿区地下水中高浓度的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 污染具有很大贡献,造成地下水水质的空间分布差异性加大。

参考文献:

[1] 党志. 煤矸石-水相互作用的溶解动力学及其环境地球化学效应研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(4): 259-261.

[2] 梁冰, 薛强, 刘晓丽. 煤矸石中硫酸盐对地下水污染的环境预测[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 527-530.

[3] 李丰军, 郑继东, 邓寅生, 等. 不同粒径煤矸石矿井填充环境影响的淋溶实验[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(2): 101-104.

[4] 肖丽萍, 梁冰, 陆海军, 等. 煤矸石中某些物淋溶释放特点的实验分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 19-22.

[5] 肖丽萍, 梁冰, 金显廷. 煤矸石淋溶液在地下水系统中的多组分运移规律——试验研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 90-95.

[6] 张翠云, 郭秀红. 氮同位素技术的应用: 土壤有机氮作为地下水硝酸盐污染源的条件分析[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 533-540.

[7] MOORE K B, EKWURZEL B, ESSER B K, et al. Sources of groundwater nitrate revealed using residence time and isotope methods[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(6): 1016-1029.

[8] 邢永强, 冯进城, 荣晓伟. 河南平煤四矿煤矸石山自燃爆炸成因及防治分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 145-150.

[9] 黄俊雄, 邓寅生, 张新. 煤矸石填充煤矿采空区的环境影响试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(2): 68-70.

[10] 河南省地质局地质勘查队. 平顶山矿区幅水文地质普查报告[R]. 郑州: 河南省地质局地质勘查队, 1980.

[11] WAKIDA F T, LERNER D N. Nonagricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study[J]. Water Research, 2005, 39(1): 3-16.

[12] 张思聪, 沈子寅. 唐山平原区地下水硝酸盐污染变化趋势的研究[J]. 水力发电学报, 2002(1): 68-75.

[13] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

[14] 杨建, 李少剑, 王改平. 盐池地区地下水赋存规律与水化学特征研究[J]. 宁夏工程技术, 2006, 5(4): 328-331.

[15] 杨策, 钟宁宁, 陈党义, 等. 煤矿开采过程中地下水地球化学环境变迁机制探讨[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(2): 30-34.

[16] JERZ J K, RIMSTIDT J D. Efflorescent iron sulfate minerals: paragenesis, relative stability and environmental impact[J]. American Mineralogist, 2003, 88(11/12): 1919-1932.

[17] TURNER A B R, RICHARDSON D. Geological controls on the sulphur content of coal seams in the Northumberland Coalfield Northeast England[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 60(2/3/4): 169-196.

[18] 邓寅生, 张新, 何莎莎, 等. 煤矸石填充矿井对地下水环境影响的因子分析评价[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(4): 97-101.

[19] 郭慧霞, 杨建, 王心义, 等. 焦作矿区土壤对煤矸石中污染组分的吸附解吸试验[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 194-199.

[20] 邓仁健, 任伯帜, 周赛军. 煤矸石淋溶污染物对高速公路沿线土壤水环境污染的仿真研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(3): 32-35.

[21] 朱爽. 矸石山淋溶水对地下水污染研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2009-04-01)

(上接第 48 页)

(2) EOM 对絮凝除藻影响很大, 它会优先结合改性壳聚糖, 当 DOC 下降到一定浓度后, 改性壳聚糖才吸附到藻表面发挥絮凝除藻的作用。

(3) 指数级反应方程比二级反应模型相关性更好, 也更符合实际所测, 同时能得到除藻极限, 便于控制静置时间。

(4) 改性壳聚糖絮凝后上清液藻光合活性接近 0, 能在一定时间内有效防止水华二次爆发。

(5) 改性壳聚糖来源天然, 絮凝除藻时用量较少且处理效果良好, 与 PAC 相比节省了处理费用, 且减少二次污染的可能性, 不失为应急处理水华时的有效手段。

参考文献:

[1] ZOU Hua, PAN Gang, CHEN Hao, 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(2): 201-205.

[2] 柳丹, 蔡冬清, 王相勤, 等. 磁聚去除淡水藻华的研究[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 677-679.

[3] 岳钦艳, 曹先艳, 高宝玉, 等. PDM DAAC 改性粉煤灰的制备及其脱色效果研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13): 106-108.

[4] 相会强, 杨宏, 巩有奎, 等. 改性粉煤灰去除磷酸盐的试验研究及机理分析[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 18-20.

[5] 蔡冬清, 柳丹, 季程晨, 等. 磁控改性复配物治理水华的研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 661-664.

[6] 罗晓鸿, 周荣, 王占生, 等. 藻类及其分泌物对混凝过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(3): 318-324.

[7] 方晶云, 马军, 王立宁, 等. 臭氧预氧化对藻细胞及胞外分泌物消毒副产物生成势的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1127-1132.

[8] 陈灏, 潘纲, 张明明. 藻细胞不同生长阶段的海泡石凝聚除藻性能[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 85-88.

[9] HENDERSON R K, PARSONS S A, JEFFERSON B. Successful removal of algae through the control of Zeta potential[J]. Separation Science and Technology, 2008, 43(7): 1653-1666.

[10] 石建稳, 陈少华, 王淑梅, 等. 粉煤灰改性及其在水处理中的应用进展[J]. 化工进展, 2008, 27(3): 326-334.

[11] DIVAKARAN R, SIVASANKARA PILLAI V N. Flocculation of algae using chitosan[J]. Journal of Applied Phycology, 2002, 14(5): 419-422.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2009-05-21)