

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.020

强化混凝去除尖针杆藻的优化

蒋绍阶¹, 蒋 晖¹, 向 平¹, 张 南², 赵约胜², 宋 玲³

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆中法供水有限公司, 重庆 400021; 3. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400015;)

摘要:针对水源水藻类(优势藻为硅藻中的针杆藻)爆发问题,通过对比 PAFS、PAC、PFC 3 种混凝剂的除藻除浊效果,选取 PAFS 为最佳混凝剂;通过添加预氧化剂和助凝剂强化混凝除藻效果,结果表明使用助凝剂 PDMDAAC 对 PAFS 的助凝效果最好,其余药剂结合 PAFS 的除藻效果为 $PPC > ClO_2 > PAM > H_2O_2 > HCA-1$ 。用 Box-Behnken Design (BBD) 实验原理设计实验,研究 pH 值、搅拌速度、搅拌时间 3 因素对 PAFS+PDMDAAC 除藻效果的影响及最优除藻条件。结果表明:3 因素对除藻的影响显著,且其显著程度为 pH 值 > 搅拌速度 > 搅拌时间,而 3 因素的交互影响对除藻的影响不太显著;强化混凝的最优条件为 pH 值为 7.5、搅拌速度为 75 r/min、搅拌时间为 15 min,其除藻率为 98.75%。

关键词:针杆藻;氧化;混凝;响应面分析

中图分类号:TU991.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0120-06

Optimization Analysis on the Removal of *Synedra Acus* by Enhanced Coagulation

JIANG Shaojie¹, JIANG Hui¹, XIANG Ping¹, ZHANG Nan², ZHAO Yuesheng², SONG Ling³

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Sino French Water Supply Co., Ltd.,

Chongqing 400021, P. R. China; 3. Chongqing Water Group Co. Ltd., Chongqing 400015, P. R. China)

Abstract: According to the algae outbreak (the dominant species was *synedra acus* belonging to Diatoms) in source water, the effects of PAFS, PAC, and PFC coagulants on algae removal and turbidity removal were compared. PAFS was chosen as the optimal coagulant. In addition, different pro-oxidations and coagulant aids were added to enhance flocculation removal effects of algae. The experimental results show that PDMDAAC combined with PAFS shows the best effect, and the order of other promoting coagulation effect was $PPC > ClO_2 > PAM > H_2O_2 > HCA-1$. Based on the box-Behnken Design (BBD) experiment design principle, the effects of pH, stirring rate and stirring time on algae removal using PAFS + PDMDAAC were investigated. The results show that the three factors play significant effect on the removal of *synedra acus*, and the influence degree is $pH > stirring\ rate > stirring\ time$, while the interactive influence of the three factors is not significant. Moreover, the optimum condition of enhanced coagulation is obtained, in which pH is of 7.5, stirring rate is 75r/min and stirring time is 15 min, and the alga removal effect is 98.75%.

Key words: *synedra acus*, oxidation, coagulation, response surface analysis

收稿日期:2012-03-31

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-004)

作者简介:蒋绍阶(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事给水处理理论研究,(E-mail)szhjzx@126.com。

2005年,嘉陵江流域首次报道出现硅藻,近年来嘉陵江段硅藻爆发形势愈演愈烈。2011年4月,嘉陵江流域硅藻爆发,持续2周时间,且藻类总数高达 $350 \times 10^4 \sim 400 \times 10^4$ cells/L,其中70%~80%的藻类属于尖针杆藻,重庆市以嘉陵江为水源水的10余个自来水厂(供水能力共计99万 m^3/d),均出现硅藻严重堵塞滤池的现象。滤池的运行周期由正常24h缩短至2~3h,甚至1~2h,滤池反冲次数增加10~12倍,水厂水质、水量受到威胁。中国关于在净水厂除藻处理技术的研究以蓝藻为主,由于硅藻与蓝藻在形态、细胞结构上具有较大的差异,因此蓝藻的去除技术及运行经验不能直接应用于硅藻。针杆藻属硅藻,胞体细长,壳体为针形,其宽度为4~6 μm ,长度为100~300 μm ,该藻体的体表比大、表面带负电,悬浮在水中难以下沉;胞体长度约为125 μm 的针杆藻,其沉降速度仅为17 $\mu\text{m}/\text{s}$ ^[1];水中的藻类及其悬浮颗粒物,其组成大多为有机质, ξ 电位一般在-40mV以上,具有较高的稳定性,比重小,难于下沉^[2],影响混凝沉淀效果。藻类代谢产物(如碳水化合物、肽和有机酸等)还易吸附在胶体颗粒表面,增加颗粒的负电性^[3],因而常规“混凝-沉淀-过滤-消毒”工艺对藻类难以有效去除^[4]。由于过去嘉陵江流域鲜有藻类污染,因此其自来水厂未设置除藻的处理工艺和构筑物,为解决嘉陵江流域净水厂面临的尖针杆藻污染问题,只能在现有净水厂处理工艺的基础上,研究预氧化、强化混凝等技术的除藻作用,以应对除藻的紧迫性,保证净水厂供水水量和水质的安全性。

1 试验方法及材料

1.1 检测方法

浊度采用HACH2100N浊度仪直接测量;藻类先按照胡鸿均《中国淡水藻类》鉴定藻种,再用计数框计数细胞密度^[5]。试验中优化了水样的浓缩预处理方法,即水样浓缩由自然沉降,调整为使用真空抽滤机和0.45 μm 微滤膜进行抽滤浓缩,将1L水样抽滤浓缩至20~25mL,移入30mL定量标本瓶中,

用15%鲁哥氏液固定,用蒸馏水冲洗抽滤容器,并将其移入30mL定量标本瓶中定容。将浓缩样摇匀,取0.1mL于计数框中,小心盖上盖玻片,置在光学显微镜($\times 40$)下观察计数。一般每样计数2片(如果2片的数值与其平均值之差大于 $\pm 15\%$,需进行第3片计数),换算出每升水样中所含浮游藻类的个数。原水样浮游藻类浓度按式(1)计算:

$$N_i = \frac{A}{A_c} \times \frac{V_w}{V} \times n_i \quad (1)$$

式中: N_i 为每升水中第*i*种浮游藻类的细胞数量,10⁴cells/L; A 为计数框面积,400 mm^2 ; A_c 为计数面积, mm^2 ; V_w 为1L水样经沉淀浓缩后的样品体积,30mL; V 为原样本水量,1L; n_i 为每片计数所得第*i*种藻类的细胞数,个。

1.2 实验仪器和材料

1) 实验仪器

ZR4-6型混凝搅拌机(深圳中润公司)、HACH2100N浊度仪(美国哈希公司)、TT50抽滤装置、光学显微镜(麦克奥迪公司)。

2) 实验药品

混凝剂采用聚合氯化铝铁(PAFS)、聚合氯化铝(PAC)、聚合氯化铁(PFC);助凝剂采用阳离子净水剂属二甲基二烯丙基季胺盐(HCA-1)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM-DAAC);氧化剂采用双氧水(H_2O_2)、二氧化氯(ClO_2)、高锰酸钾复合药剂(PPC)。

1.3 源水水质

试验用水为嘉陵江某净水厂进水,水质情况如表1所示。

1.2 研究方法

1.2.1 混凝除藻研究 烧杯试验在六联混凝搅拌器上进行,分别取0.8L高藻水6份,置于容积为1L的6个混凝试验用搅拌杯中,分别投加10、15、20、25、30、35 mg/L PAFS、PAC、PFC,先以120 r/min 转速搅拌1min,再以60 r/min 转速搅拌10min,静沉20min后在液面2~3cm以下取上清液测量剩余浊度和尖针杆藻数量。

表1 进厂水常规水质指标

项目	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)	总大肠菌群/ (MPN·100 mL ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	尖针杆藻/ (cells·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	pH值	DO/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
2009年日平均	3 537	13 215	99 805	—	2.61	0.14	8.00	8.59	0.089
2010年日平均	4 445	20 519	96 227	—	2.75	0.15	7.99	8.92	0.054
2011-04-14— 2011-04-24日平均	4 709	16 841	55 442	250×10 ⁴	2.79	0.36	8.00	9.50	0.041

1.2.2 强化混凝除藻研究 从1.2.1的实验结果中选取PAFS为最佳混凝剂,分别取0.8 L高藻水6份,置于容积为1 L的6个混凝试验用搅拌杯中,先投加25 mL PAFS,以120 r/min转速搅拌1 min,然后分别投加0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、1.2 mg/L HCA-1、FL45C、PDMDAAC,再以60 r/min转速搅拌10 min,静沉20 min后在液面2~3 cm以下取上清液测量剩余尖针杆藻数量。

1.2.3 预氧化混凝除藻研究 从1.2.1的实验结果中选取PAFS为最佳混凝剂,分别取0.8 L高藻水6份,置于容积为1 L的6个混凝试验用搅拌杯中,先投加0.3、0.6、0.9、1.5、2.1、2.7 mg/L H_2O_2 、 ClO_2 、PPC于45 r/min转速下搅拌30 min,然后投加25 mL PAFS,以60 r/min转速搅拌10 min,静沉20 min后在液面2~3 cm以下取上清液测量剩余尖针杆藻数量。

1.2.4 混凝条件对除藻效果的影响 从1.2.2及1.2.3节的实验结果中选出合理的除藻工艺,投加25 mg/L PAFS+0.6 mg/L PDMDAAC进行混凝除藻,其实验过程如1.2.2中所述。由于影响强化混凝的条件有pH值、搅拌速度、搅拌时间等,分别记为变量A、B、C,以尖针杆藻去除率作为响应值,记为变量D。根据Box-Behnken中心组合设计原理,设计三因素三水平正交实验,其中A因素水平为6~9,B因素水平为40~110 r/min,C因素水平为10~20 min。

2 试验结果分析

2.1 最佳混凝剂的选择

用肉眼观察3种混凝剂的混凝沉淀过程,其絮体体积大小为PAFS>PAC>PFC,其沉降速度为PFC>PAFS>PAC,矾花密实程度为PFC>PAFS>PAC,其中PAFS和PAC随着投药量的增加,其形成的矾花尺寸逐渐增大。从图1和图2可以看出,这3种混凝剂除浊效果的变化趋势与其除藻效果基本一致,但是在相同的药剂投量下,对浊度的去除率均高于对藻类的去除率。虽然除浊与除藻效果的总体变化趋势基本一致,但两者不能相互替代,除浊的过程更加复杂,而除藻比除浊更困难,与水中普通胶体颗粒物相比,藻类细胞表面带有更高的负电荷,这使其相对更难被去除。这3种混凝剂中,PAFS的除藻和除浊效果最好,当投药量为25 mg/L时,其除藻率和浊度去除率分别为77.29%和89.79%;PAC的混凝效果次之,当投药量为30 mg/L时,其除藻率和浊度去除率分别为73.43%

和87.32%;PFC的混凝效果相对最差,当投药量为30 mg/L时,其除藻率和浊度去除率分别为68.91%和83.87%。

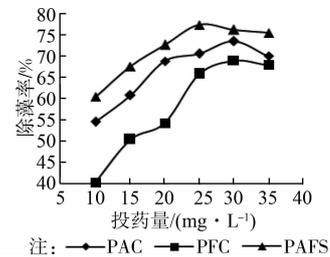


图1 不同混凝剂除藻效果

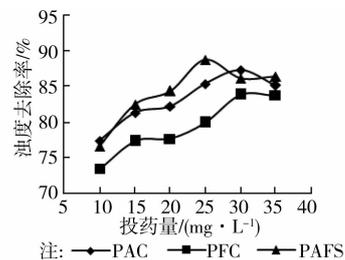


图2 不同混凝剂除浊效果

混凝除藻涉及压缩双电层、吸附电中和、吸附架桥、沉降网捕4种机制。由于选用3种混凝剂使用时均会发生金属离子水解和聚合反应,但其水解及聚合产物不同,则其除藻机理也有差异:PAC对水中胶体颗粒或胶体污染物的混凝是Al(III)盐水解-聚合产物对其进行电性中和、脱稳和吸附架桥作用生成粗颗粒絮凝体而去除的。PFC在水解过程中产生铁离子、羟基铁离子、氢氧化铁胶体沉淀物;铁离子以压缩双电层机理为主;羟基铁离子以吸附电中和机理为主,并在羟基、聚合硅酸的作用下形成高聚物,发挥吸附架桥和沉淀物网捕作用来除藻;氢氧化铁胶体靠网捕机理除藻。PAFS是在PAC的基础上引入铁Fe(III)离子,与Al³⁺水解-共聚反应形成的共聚物,它既有自由金属单体态成份,又有链状的金属聚合态成份,在混凝初期,单体态成份起压缩双电层和吸附-电中和的作用,这是藻细胞能脱稳絮凝沉降的前提条件,聚合态成份的吸附-桥联作用是混凝除藻的主要机理。由于铝离子比铁离子与藻细胞有更强的亲和力,则铝离子对藻细胞具有更强的吸附作用,因此相对于铁盐,铝盐具有除藻的优越性。PAFS在水中发生金属离子水解和聚合反应,具有凝聚和絮凝2个过程,其处理原水时脱稳过程和吸附架桥、沉淀网捕作用同时进行,此外,PAFS兼具有聚铝、铁盐的优点,既保留PAC高效的除浊性能,又具有铁盐所特有的除有机物、色度能力强,沉降性

能优良等特点,在混凝过程中还具有电中和的能力^[6],所以 PAFS 相比其他絮凝剂具有更高效地絮凝性能。

在试验中,随着 3 种絮凝剂添加量的增大,浊度去除率与除藻率均呈现先增大后减小的趋势,这主要是因为分散在水中的胶体颗粒带有一定的电荷,它们之间的电斥是胶体稳定的主要因素。胶粒表面的电荷值常用电动电位 ξ 来表示,又称为 Zeta 电位。Zeta 电位的高低决定了胶体颗粒之间的斥力大小和影响范围。藻分散在天然湖水中呈负电荷,类似于水中的胶体颗粒,一般在天然水中胶体颗粒的 Zeta 电位在 -30 mV 以上,当电位升到 -15 mV 左右时可以得到较好的絮凝效果^[7-8]。当添加量超过最佳添加量时,可能使 Zeta 电位超过了一 15 mV,从而导致了浊度去除率与除藻率下降的现象。

2.2 助凝剂对除藻效果的影响

为了提高混凝效果,在投加 25 mL PAFS 后,分别投加不同种类的助凝剂来提高混凝效果。从图 3 可以看出,PDMDAAC 的助凝效果最好,当助凝剂投药量为 0.6 mg/L 时,除藻率为 93.79% ;PAM 的助凝效果次之,当投药量为 0.4 mg/L 时,除藻率为 89.72% ;HCA-1 的助凝效果相对较差,当投药量为 0.8 mg/L 时,除藻率为 87.68% 。PDMDAAC 分子上正电荷密度高,高效无毒,是阳离子型高分子^[9],每个结构单元带有一个正电荷,PDMDAAC 中含有季铵阳离子,其正电性强,特征黏度大,不易受到介质条件的影响。当其与 PAFS 复配时,正电荷相互叠加,电中和能力增强,所含 PDMDAAC 的量越大,复合混凝剂使用后的 Zeta 电位越高,其电中和能力得到明显增强。同时,由于添加助凝剂改变了混凝剂中聚集体的形态与结构,从而改善了混凝剂与藻细胞间的相互作用,增强了对藻细胞的特性吸附^[10]。另外,高特征黏度的 PDMDAAC 分子链较长,除吸附作用外,还可能形成有利于桥连的环式和尾式结构,增强了对藻细胞的卷扫网捕作用,便于固液分离,提高除藻率。

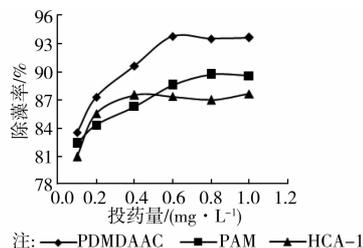


图3 PAFS结合不同助凝剂的除藻效果

2.3 预氧化对除藻效果的影响

为了提高药剂的除藻效果,在投加 PAFS 前,分别投加不同种类的氧化剂。从图 4 可以看出,PPC 的强化混凝效果最好,当 PPC 投药量为 1.5 mg/L 时,除藻率为 93.18% ;ClO₂ 的强化混凝效果次之,当投药量为 2.1 mg/L 时,除藻率为 91.73% ;H₂O₂ 的效果相对最差,当投药量为 2.1 mg/L 时,除藻率为 87.93% 。PPC 对水中的藻类和微生物具有显著的抑制作用,使其运动失去活性,在 PPC 氧化作用下,藻类和微生物细胞可以分泌出生化聚合物,这些藻类胞外有机物起到类似于阴离子或非离子型聚电解质的作用,微生物释放出生化聚合物参与混凝过程,达到强化混凝的目的;此外,PPC 在氧化水中的有机物和还原性物质时,能够产生新生态的水合二氧化锰^[11],可以吸附溶解于水中的有机物和胶体颗粒表面有机涂层上的有机物,进而吸附胶体颗粒、直接作用于胶体颗粒表面吸附胶体。Petruserski 等^[12]用高分辨扫描电镜观察高锰酸钾对藻类的作用发现,水合二氧化锰吸附在藻类表面,明显改变了藻类的特性,增加了藻类的比重,改善了藻类的沉降性能,从而有利于沉降和过滤的去除。新生态水合二氧化锰的吸附作用可以促进和加快絮体的形成和长大,有利于混凝和后续工艺对有机物和浊度的去除。

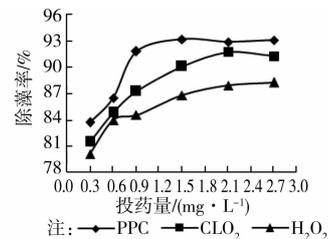


图4 PAFS结合不同预氧化剂的除藻效果

2.4 混凝条件对除藻效果的影响

实验结果表明,25 mL PAFS+ 0.6 mg/L PDMDAAC 的混凝效果最好,除藻率为 93.79% ,用 Box-Behnken Design (BBD) 设计实验,用 Design-Expert 软件对响应面试验结果进行影响因素显著性检验,结果表明影响因素 pH 值、搅拌速度、搅拌时间(分别记为变量 A、B、C)这三者的线性效应明显,其拒绝假设概率都小于 0.05 ,对除藻率的影响显著,其显著程度为 pH 值>搅拌速度>搅拌时间;3 因素的交互影响不太显著,相对而言其交互影响显著程度为 AC>AB>BC,即 pH 值和搅拌时间对除藻率的交互影响是最大的,多因素对除藻率的影响见如图 7~9。通过响应面设计试验得出除

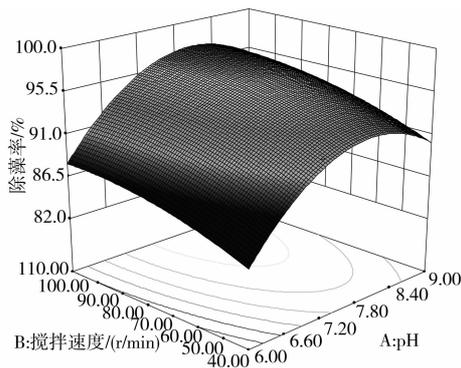


图 5 除藻率与搅拌速度和 pH 的响应面分析图
(絮凝时间 = 10 min)

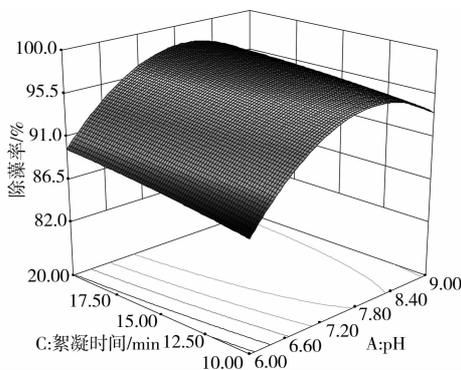


图 6 除藻率与搅拌速度和絮凝时间的响应面分析图
(搅拌速度 = 75 r/min)

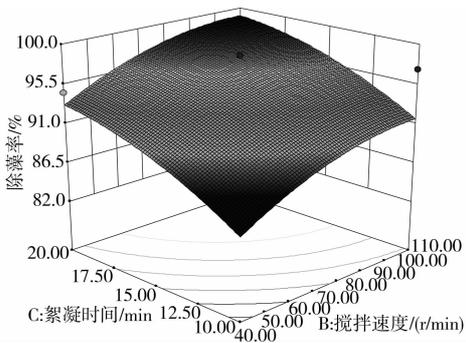


图 7 除藻率与搅拌速度和絮凝时间的
响应面分析图 (pH=7.5)

藻率与操作条件经验模型为: 除藻率 = $95.13 + 3.23A + 3.07B + 3.85C + 0.25AB - 0.60AC - 0.14BC - 5.23A^2 - 1.51B^2 - 1.31C^2$ 。强化混凝的最佳条件为 pH 值为 7.5、搅拌速度为 75 r/min、搅拌时间为 15 min。由于胶体的 ξ 电位随 pH 值的变化而变化, 胶体的 ξ 电位影响颗粒之间的静电排斥力和整个体系的稳定性^[13], 从而影响到混凝作用, 因此 pH 值对混凝作用影响显著; 搅拌速度和时间主要影响混凝处理中的絮凝过程^[14], 絮凝阶段的任

务就是使细小的矾花逐渐形成较大颗粒而便于沉淀, 既要创造足够的碰撞机会和良好的吸附条件, 让絮体有足够的成长机会, 又要防止生成的小絮体被打碎, 因此搅拌强度要逐渐减小, 而反应时间要长^[15], 而对于不同的混凝剂其矾花大小、密实程度不一, 其搅拌强度、絮凝时间、速度梯度应根据混凝剂的特点进行试验得出。

3 结论

1) 采用 PAFS、PAC、PFC 这 3 种混凝剂除浊效果的变化趋势与其除藻效果基本一致, 但在相同的药剂投量下, 对浊度的去除率均高于对藻类的去除率。这 3 种混凝剂中, PAFS 的除藻和除浊效果最好, 当投药量为 25 mg/L 时, 其除藻率和浊度去除率分别为 77.29% 和 89.79%, 3 种混凝剂的除浊度除藻效果为 PAFS > PAC > PFC。

2) 添加预氧化剂和助凝剂强化混凝除藻效果, 结果表明助凝剂 PDMDAAC 对 PAFS 的助凝效果最好, 当助凝剂投药量为 0.6 mg/L 时, 其除藻率为 93.7%, 其余药剂结合 PAFS 的除藻效果为 PDM-DAAC > PPC > ClO₂ > PAM > H₂O₂ > HCA-1。

3) 投加 25 mL PAFS + 0.6 mg/L PDMDAAC 进行混凝除藻, 考察 pH 值、搅拌速度、搅拌时间对除藻率的影响显著, 其显著程度为 pH 值 > 搅拌速度 > 搅拌时间; 3 因素的交互影响不太显著。通过响应面试验设计试验得出除藻率与操作条件经验模型为: 除藻率 = $95.13 + 3.23A + 3.07B + 3.85C + 0.25AB - 0.60AC - 0.14BC - 5.23A^2 - 1.51B^2 - 1.31C^2$ 。强化混凝的最佳条件为 pH 值为 7.5、搅拌速度为 75 r/min、搅拌时间为 15 min。

参考文献:

- [1] Lee J D, Lee M S, Shin W S, et al. Removal of freshwater diatoms (*Synedra acus* and *Stephanodiscus* sp.) by preozonation and addition of polyamine coagulant-aid [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2005, 22(5): 682-686.
- [2] 左金龙. 城市供水中藻类去除技术的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(9): 75-80.
ZUO Jinlong. A review of studies on treatment techniques for algae in water supply [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(9): 75-80.
- [3] Edzwald J K. Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation [J]. Water Science & Technology, 1993, 27(10): 67-81.
- [4] 徐大伟, 施永生, 柳伟, 等. 除藻技术的研究进展[J]. 云

- 南化工, 2007, 34(3):76-78.
- XU Dawei, SHI Yongsheng, LIU Wei, et al. Research progress on algae removal technology [J]. Yunnan Chemical Technology, 2007, 34(3):76-78.
- [5] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 刘启旺, 胡俊虎, 陈江平, 等. 复合型絮凝剂 PAFS 的研制及性能[J]. 水处理技术, 2006, 32(6):45-47.
- LIU Qiwan, HU Junhu, CHEN Jiangping, et al. Preparation and characteristics of compound flocculant of poly aluminum ferric sulphate [J]. Technology of Water Treatment, 2006, 32(6):45-47.
- [7] 张占梅. 聚合氯化铝铁絮凝剂的制备及絮凝性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [8] Sinha S, Yoon Y, Amy G, et al. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes [J]. Chemosphere, 2004, 57:1115-1122.
- [9] Cao X Y, Yue Q Y, Song L Y, et al. The performance and application of fly ash modified by PDMDAAC [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1/2): 133-138.
- [10] 张跃军, 赵晓蕾, 李潇潇, 等. PAC/PDM 复合混凝剂对冬季太湖原水的除藻性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(5):807-815.
- ZHANG Yuejun, ZHAO Xiaolei, LI Xiaoxiao, et al. Algae-removal performance of PAC/PDM composite coagulants to Taihu Lake raw water in winter season [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(5):807-815.
- [11] 陈卫, 李圭白, 邹浩春, 等. PPC 强化混凝除蓝藻除色度效果及致因研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 140-143.
- CHEN Wei, LI Kuibai, ZOU Haochun, et al. Effect of enhanced-coagulation with PPC on blue-green algae and chroma removal and its causation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2): 140-143.
- [12] 由振华, 李梅, 田珍. 高锰酸钾复合药剂在含藻水处理中的应用[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(4): 437-440.
- YOU Zhenhua, LI Mei, TIAN Zhen. Application of potassium permanganate composites in algae-laden water treatment [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(4): 437-440.
- [13] Yan M Q, Wang D S, Yu J F, et al. Enhanced coagulation with polyaluminumchlorides: role of pH/Alkalinity and speciation [J]. Chemosphere, 2008, 71(9):1665-1673.
- [14] Yan M Q, Wang D S, Yu J F, et al. Enhanced coagulation in a typical North-China water plant. [J] Water Research, 2006, 40:3621-3627.
- [15] 孟红旗. 聚合氯化铝铁的性质和除藻应用研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2004.

(编辑 胡英奎)