

AS/PDM 复合混凝剂对冬季太湖原水除藻效果研究

赵晓蕾, 张跃军*, 李潇潇, 刘程, 朱玲玲

(南京理工大学化工学院, 南京 210094)

摘要: 由聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM)与硫酸铝(AS)制成的系列稳定 AS/PDM 复合混凝剂, 用于冬季太湖原水的除藻效果研究. 通过混凝除藻实验, 考察了复合混凝剂加药量、AS 与 PDM 复配质量比(20:1~5:1)、PDM 特征黏度(0.55~3.99 dL/g)对除藻效果的影响, 分析了使用复合混凝剂替代预加氯工艺的可行性. 结果表明, 对原水使用 AS、AS/PDM(0.55/20:1~3.99/5:1)复合混凝剂后的余浊达到 2 NTU 的水厂沉淀出水浊度标准时, 其加药量(以 Al_2O_3 计)分别为 4.24 mg/L、3.96~1.87 mg/L, 除藻率分别为 83.00%、87.52%~90.93%; 加药量为 4.24 mg/L 时, 其除藻率分别为 83.00%、88.29%~97.66%, 余浊分别为 2.00 NTU、1.76~0.43 NTU. 对加氯水的加药量为 4.50 mg/L 时, AS/PDM(1.53/10:1)复合混凝剂对原水的处理效果优于 AS 对加氯水的处理效果; AS/PDM(3.99/5:1)复合混凝剂对原水的处理效果优于 AS、AS/PDM(0.55/20:1)、AS/PDM(1.53/10:1)复合混凝剂对加氯水的处理效果. 因此, AS/PDM 复合混凝剂可明显提高 AS 对冬季太湖原水的处理效果, 与单独使用 AS 相比, 余浊达标时节省加药量, 加药量相等时提高处理效果. 此外, 使用复合混凝剂还可替代预氯化工艺中加氯对混凝除藻作用的部分功能, 有利于提高水质安全性.

关键词: 聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM); 硫酸铝(AS); 复合混凝剂; 除藻; 冬季太湖原水

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1023-06

Algae-Removal Effect of AS/PDM Composite Coagulants to Winter Taihu Lake Raw Water

ZHAO Xiao-lei, ZHANG Yue-jun, LI Xiao-xiao, LIU Cheng, ZHU Ling-ling

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The series of stable AS/PDM composite coagulants prepared by polydimethyldiallylammonium chloride (PDM) and aluminium sulphate (AS) were used to research the algae-removal effect to winter Taihu Lake raw water. The effects of dosage of composite coagulants, composite mass ratios (20:1-5:1) of AS and PDM, intrinsic viscosity values (0.55-3.99 dL/g) of PDM on algae-removal rates were studied through coagulation and algae-removal experiments. The feasibility of using composite coagulants to substitute prechlorination process was analysed. The results show that when residual turbidity of 2 NTU to water after coagulation and sediment is required by water plant, the dosage (based on Al_2O_3) of AS, AS/PDM (0.55/20:1-3.99/5:1) composite coagulants are 4.24 mg/L, 3.96-1.87 mg/L, and the algae-removal rates are 83.00%, 87.52%-90.93% respectively. When dosage to raw water are 4.24 mg/L, the algae-removal rates of AS, AS/PDM (0.55/20:1-3.99/5:1) composite coagulants are 83.00%, 88.29%-97.66%, and the residual turbidities are 2.00 NTU, 1.76-0.43 NTU respectively. When dosage to chlorine-added water are 4.50 mg/L, the treatment effect of AS/PDM(1.53/10:1) composite coagulant to raw water is better than that of AS to chlorine-added water, and the treatment effect of AS/PDM(3.99/5:1) composite coagulant to raw water is better than that of AS, AS/PDM(0.55/20:1) and AS/PDM(1.53/10:1) composite coagulants to chlorine-added water. So using AS/PDM composite coagulants can enhance evidently the treatment effect of AS to winter Taihu Lake raw water. Compared with using AS solely, the dosage of AS in composite coagulants are saved when the residual turbidities are required in same level, and the treatment effect of AS is enhanced when the dosage of AS in composite coagulants are same as that of using AS solely. Moreover, using composite coagulants can replace the part chlorine-added function on increasing coagulation and algae-removal in prechlorination process and profitably increases safety of drinking water quality.

Key words: polydimethyldiallylammonium chloride (PDM); aluminium sulphate (AS); composite coagulant; algae-removal; winter Taihu Lake raw water

由于受水源富营养化影响,我国许多以湖泊为水源的给水厂均存在原水中藻类过量繁殖、常规净水工艺难以处理的问题.化学预氧化是水处理中一种常用的强化常规处理含藻水的工艺^[1],其中目前在国内水厂广泛应用的是预氯化工艺,其作用除了防止输水管道中的菌藻繁殖外,更主要的是配合无机混凝剂强化处理含藻水,太湖流域大部分水厂

也普遍采用预氯化加硫酸铝(AS)的强化混凝工艺.但在冬季低温季节,太湖水的黏度高、混凝时剪

收稿日期: 2008-04-18; 修订日期: 2008-06-20

基金项目: 江苏省社会发展计划项目太湖专项(BS2007121);“十五”国家科技攻关项目(2003BA327C)

作者简介: 赵晓蕾(1968~),女,博士研究生,主要研究方向为水溶性高分子应用, E-mail: lilyzhao618@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhyuejun@mail.njust.edu.cn

切力大、矾花易碎,且 AS 用于低温水处理有一定缺陷^[2],导致使用该工艺后沉淀出水的除藻率仍不高。

采用有机高分子助凝可强化混凝效果,增大絮体粒径及密实度,提高沉降速率^[3]。二甲基二烯丙基氯化铵(dimethyldiallylammonium chloride, DM)的均聚物(PDM)是一种水溶性阳离子高分子,作为助凝剂用于原水处理是其重要的用途之一,并可获得较好效果^[4-5]。目前,国内鲜见 AS 与 PDM 系列稳定复合混凝剂制备和使用的研究报道。国外相关研究仅限于 AS 与 PDM 配合使用,去除原水中的腐殖酸、天然有机物或悬浮颗粒等的报道^[6-9],而鲜见对含藻水的除藻脱浊的实例报道,且上述研究工作大多存在 PDM 的相对分子质量较低或未知,混合物制备方法不明或不能制成系列稳定复合混凝剂等不足^[10]。

虽然以氯作助剂在水处理实践中已有很多应用^[11],但预加氯存在的诸如生成有害卤代烃、破裂藻细胞、释放藻毒素和胞内有机物等安全隐患问题时有报道,所以此工艺逐渐受到各国限制,亟待取代更新。本研究拟采用相对分子质量高并系列化的 PDM 与 AS 制成稳定的 AS/PDM 复合混凝剂,用于考察其对冬季太湖原水的除藻效果,即复合混凝剂加药量、AS 与 PDM 复配比例、PDM 特征黏度等因素对除藻效果的影响,以期改进 AS 的药剂性能,提高除藻脱浊效果,分析相关混凝机制打下基础。同时,研究能否通过复合混凝剂的强化混凝,提高除藻率,降低出水浊度,为部分或全部取消预氯化工艺,减少加氯隐患,提高供水安全进行有益探索。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

藻类计数框:中国科学院水生生物研究所;XSP-8C 生物显微镜:上海光学仪器五厂;TA6-2 程控混凝搅拌机:武汉恒岭科技有限公司;QZ201 散射式浊度仪:苏州市青安仪器有限公司。

AS:工业品, $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3) = 15.8\%$;PDM:具有 4 种不同相对分子质量(以特征黏度 η 值大小表示)的实验室自制和工业化的系列产品, η 值分别为 0.55、1.53、2.47、3.99 dL/g。将 AS 配成一定质量分数的

$$\text{除藻率} = \frac{\text{原水或加氯水中藻含量} - \text{原水或加氯水混凝后藻含量}}{\text{原水或加氯水中藻含量}} \times 100\%。$$

2 结果与讨论

按实验步骤对冬季太湖原水进行混凝除藻处理,得到 AS、AS/PDM(0.55/20:1) ~ AS/PDM(3.99/5:1)复

水溶液,AS/PDM 复合混凝剂的配制以 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 计,按 $m(\text{Al}_2\text{O}_3):m(\text{PDM})$ 为 20:1、10:1、5:1,配成 3 种复配比例的复合混凝剂,使用时一次性投加。文中将无机铝盐加入量称为加药量,并以 AS/PDM(PDM 的 η 值/质量比)表示复合混凝剂的组成,配制 AS/PDM(0.55/20:1) ~ AS/PDM(3.99/5:1)系列稳定复合混凝剂共计 12 种。

1.2 原水与加氯水的水质条件

现场实验在太湖沿岸某市自来水公司水源厂进行,实验用原水取自该厂的取水口。实验期水温 5 ~ 7℃,浊度 24 ~ 26 NTU, pH = 7.0,藻含量 2.05×10^4 个/mL,以卵囊藻(*Oocystis*)、小球藻(*Chlorella*)、栅裂藻(*Scenedesmus*)等绿藻(*Chlorophyta*)及小环藻(*Cyclotella*)、直链藻(*Melosira*)等硅藻(*Bacillariophyta*)为主,约占总数的 80%,隐藻(*Cryptomonas*)、平裂藻(*Merismopedia*)、微囊藻(*Microcystis*)等其他藻类约占总数的 20%。

用于实验的预氯化后水样(加氯水)取自该水源厂的加氯池,实验期水温 5 ~ 7℃,浊度 25 ~ 27 NTU, pH = 6.8,藻含量 1.82×10^4 个/mL,取样时的加氯量为 1.37 mg/L,氯作用时间约为 2 h。

1.3 实验步骤

(1)根据该公司目前对沉淀出水浊度(余浊) ≤ 2 NTU 的控制指标及现场 AS 的投加量,调程程控混凝搅拌仪的搅拌强度及搅拌时间,模拟现场的实际运行情况,确定适合冬季太湖原水和加氯水的混凝动力学条件为:300 r/min 快速搅拌 2.5 min, 100 r/min 中速搅拌 3 min, 30 r/min 慢速搅拌 3 min,最后沉降 30 min。

(2)在一组大烧杯中分别加入 1 000 mL 原水或加氯水置于搅拌仪中,在开始快速搅拌(300 r/min) 15 s 后加入不同剂量的混凝剂,然后采用已确定的混凝动力学条件进行原水或加氯水的混凝除藻处理。

(3)分别取 0.1 mL 上清液和 0.1 mL 原水或加氯水置于藻类计数框中,在显微镜下测藻含量,并按下式计算除藻率;另取上清液约 50 mL,用浊度仪测余浊。

合混凝剂对原水的除藻率、余浊随加药量的变化规律,如图 1 ~ 4 所示。同时,为了解水厂现行的预氯化工艺对除藻脱浊效果的影响,用 AS、AS/PDM(0.55/20:1)、AS/PDM(1.53/10:1)、AS/PDM(3.99/

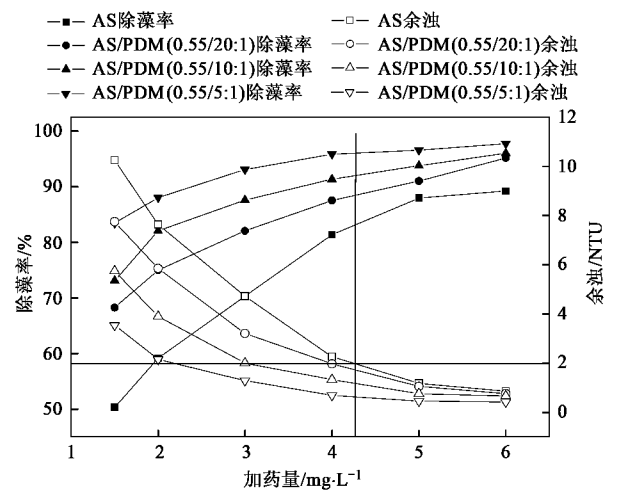


图1 AS/PDM(0.55 dL/g)加药量对原水除藻率、余浊的影响

Fig.1 Effects of dosage of AS/PDM(0.55 dL/g) on the algae-removal rates and residual turbidities to raw water

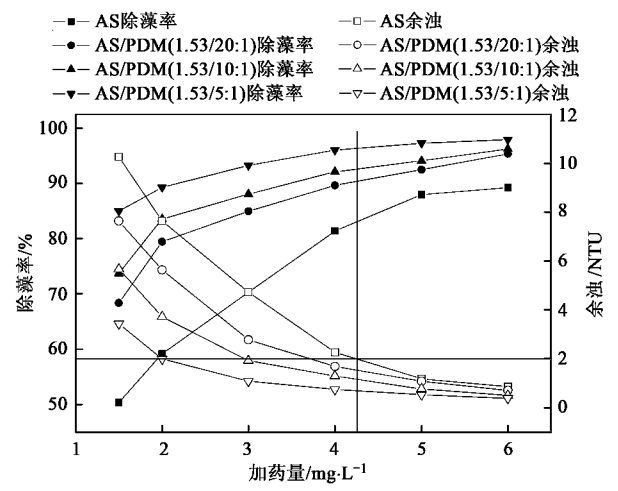


图2 AS/PDM(1.53 dL/g)加药量对原水除藻率、余浊的影响

Fig.2 Effects of dosage of AS/PDM(1.53 dL/g) on the algae-removal rates and residual turbidities to raw water

5:1)复合混凝剂对冬季太湖加氯水进行混凝除藻对比实验,实验结果如图5、6所示。

2.1 AS、AS/PDM 复合混凝剂对冬季太湖原水的处理结果

由图1~4可见,所有复合混凝剂对冬季太湖原水的除藻脱浊效果均比单独使用AS时大幅度提高,特别是加药量>5.0 mg/L后,AS对原水的除藻率已无明显变化,而复合混凝剂对原水的除藻率仍有上升趋势。同时,除藻率越高,相应的余浊越低,说明在冬季太湖原水中由藻类产生的浊度在原水浊度中占有较大比例,当通过混凝处理去除藻类时,相应的余浊也随之下降。

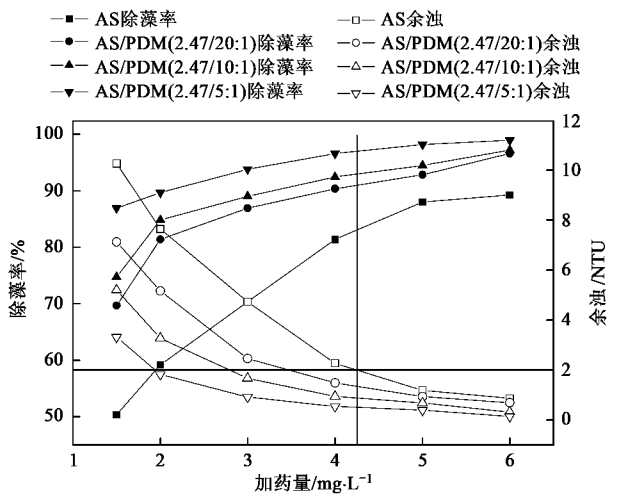


图3 AS/PDM(2.47 dL/g)加药量对原水除藻率、余浊的影响

Fig.3 Effects of dosage of AS/PDM(2.47 dL/g) on the algae-removal rates and residual turbidities to raw water

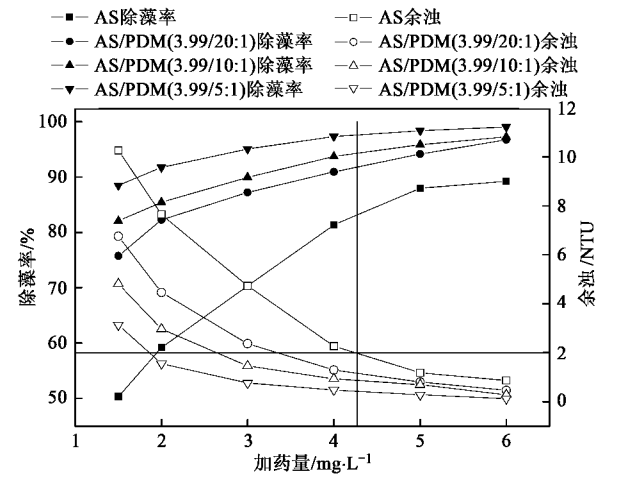


图4 AS/PDM(3.99 dL/g)加药量对原水除藻率、余浊的影响

Fig.4 Effects of dosage of AS/PDM(3.99 dL/g) on the algae-removal rates and residual turbidities to raw water

为保证出厂水质,达到不断提高的供水标准,该自来水公司目前将余浊的控制指标由2~3 NTU提高到 ≤ 2 NTU。按此标准,在图1~4中余浊为2 NTU处作一水平线,得到各药剂的余浊达标时所需的加药量;另在水平线与AS余浊曲线交叉点上作一垂直线,得到各药剂的加药量为AS余浊达标的加药量(4.24 mg/L)时,除藻率及相应的余浊,所得数据如表1所示。

由表1可见,当余浊控制为2 NTU时,AS、AS/PDM(0.55/20:1)~AS/PDM(3.99/5:1)复合混凝剂的除藻率分别为83.00%、87.52%~90.93%,加药量分别为4.24 mg/L、3.96~1.87 mg/L,复合混凝剂比AS减少出水藻含量26.6%~46.7%,节省加药

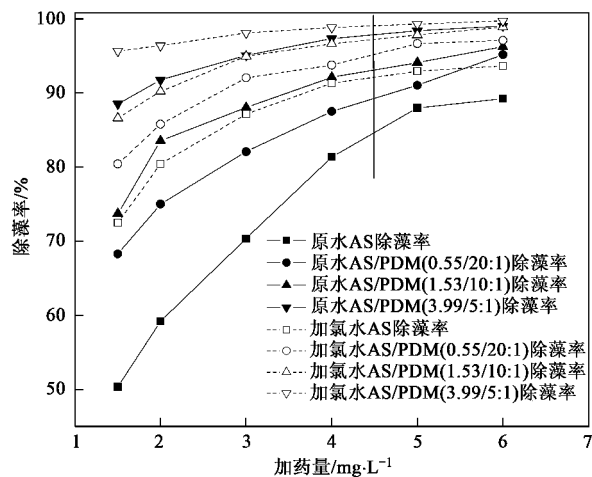


图 5 各药剂加药量对原水、加氯水除藻率的影响

Fig.5 Effects of dosage of agents on the algae-removal rates to raw water and chlorine-added water

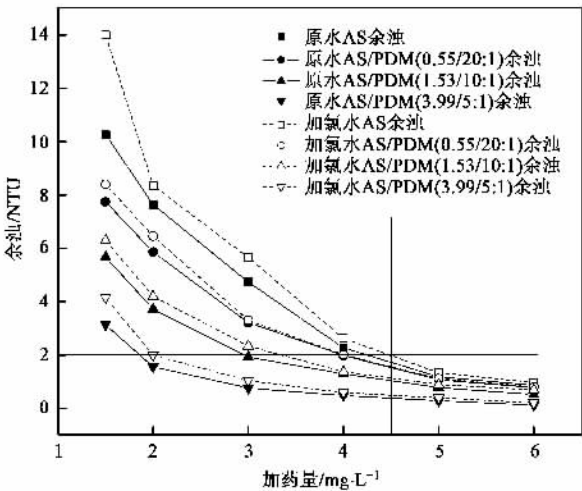


图 6 各药剂加药量对原水、加氯水余浊的影响

Fig.6 Effects of dosage of agents on the residual turbidities to raw water and chlorine-added water

表 1 AS、AS/PDM 复合混凝剂的处理效果对比

Table 1 Contrast of treatment effect of AS、AS/PDM composite coagulants

指标	项目	AS	AS/PDM 复合混凝剂(η 值/质量比)											
			0.55 /20:1	0.55 /10:1	0.55 /5:1	1.53 /20:1	1.53 /10:1	1.53 /5:1	2.47 /20:1	2.47 /10:1	2.47 /5:1	3.99 /20:1	3.99 /10:1	3.99 /5:1
余浊为	加药量/mg·L ⁻¹	4.24	3.96	3.00	2.20	3.73	2.94	2.00	3.44	2.78	1.94	3.36	2.63	1.87
	除藻率/%	83.00	87.52	87.59	89.10	88.29	87.86	89.26	88.50	88.07	89.30	88.71	88.29	90.93
加药量为	除藻率/%	83.00	88.29	91.84	96.03	90.54	92.76	96.43	91.03	92.97	97.06	91.85	94.38	97.66
	4.24 mg·L ⁻¹ 余浊/NTU	2.00	1.76	1.20	0.66	1.53	1.14	0.64	1.34	0.85	0.52	1.19	0.81	0.43

量 6.6% ~ 55.9%; 当加药量控制为 4.24 mg/L 时, 除藻率分别为 83.00%、88.29% ~ 97.66%, 余浊分别为 2.00 NTU、1.76 ~ 0.43 NTU, 复合混凝剂比 AS 减少出水藻含量 31.1% ~ 86.2%, 降低余浊 12.0% ~ 78.5%。

2.2 影响复合混凝剂除藻脱浊效果的因素

由图 1 ~ 4 和表 1 可见, 随着复合混凝剂加药量增加、AS 与 PDM 复配比例降低(即 PDM 用量增加)、PDM 特征黏度增大, 复合混凝剂对原水的除藻率逐渐增大, 余浊逐渐降低。

首先, 增加混凝剂的加药量虽可提高药剂的处理效果, 但由于 AS 低温时生成的矾花松而细, 且凝聚缓慢, 所以单纯增加 AS 的加药量对提高处理效果有一定限制, 并会增加出水残铝量^[12, 13]。PDM 为强阳离子聚电解质, 可以通过改变 AS 水解产物或絮体的正电性而增加除藻率、降低余浊, 特别是加药量不足时, 更能发挥其优势^[14, 15]。

其次, 藻细胞表面带负电, 在混凝过程中带电粒子的混凝沉降在很大程度上首先取决于粒子的电中和脱稳程度^[16]。AS 投入水中后的主要作用形态是

自发水解产物, 即初聚物、低聚物和凝胶沉淀物, 在常见水质条件下生成 Al₁₃ 的机会很少。因此要达到处理要求需增加 AS 的投加量, 导致产泥量大, 不易脱水^[17, 18]。而 PDM 的每个结构单元带有一个正电荷, 与 AS 复配后正电荷相互叠加, 药剂电中和能力明显增强, 使藻细胞与胶体颗粒达到凝聚状态时所需的 AS 剂量大大减少^[19]。另一方面, PDM 具有线型结构, 高分子链易在脱稳的藻细胞间架桥, 促进细小颗粒长大。PDM 特征黏度越大, 分子链越长, 吸附架桥能力也越强, 增加了对藻细胞及细小颗粒的卷扫网捕作用^[20], 促进矾花进一步长大, 提高除藻率。所以, 复合混凝剂的除藻脱浊效果随 AS 与 PDM 复配比例降低, PDM 特征黏度增大而提高。

但是, 降低复配比例即提高 PDM 用量, 药剂成本增大, 而改变 PDM 合成工艺即可提高特征黏度^[21], 合成时原料用量并不增加, 因此不会明显增加药剂成本, 且高特征黏度、高复配比例药剂同样能达到或超过低特征黏度、低复配比例药剂的处理效果。例如, 加药量为 4.24 mg/L 时, AS/PDM(0.55/10:1)、AS/PDM(3.99/20:1)复合混凝剂的除藻率分

别为 91.84%、91.85%，余浊分别为 1.20 NTU、1.19 NTU.此时，后者比前者的 PDM 用量减少了 50%，既降低了药剂成本，又达到了相同的除藻脱浊效果.

3 使用复合混凝剂替代预氯化工艺的可行性分析

尽管对藻含量较高的水源水采用预氯化可减轻藻类对混凝过程的干扰^[11]，但诸多加氯危害也随之而来.实验已证实 AS/PDM 复合混凝剂对冬季太湖原水的处理效果比单独使用 AS 时明显提高，如能利用复合混凝剂的高效除藻脱浊能力，通过其强化混凝替代预氯化工艺，则在提高供水安全方面具有积极意义.

3.1 预氯化对药剂处理效果的促进与阻碍作用

由图 5、6 可见，复合混凝剂对冬季太湖加氯水的除藻脱浊效果也比单独使用 AS 时显著提高，且在低加药量情况下表现的较为明显.

由表 1 可知 AS 对冬季太湖原水的余浊达标时所需加药量为 4.24 mg/L.由图 5、6 可得加药量为 4.24 mg/L 时，AS、AS/PDM (0.55/20:1) ~ AS/PDM (3.99/5:1)复合混凝剂对原水和加氯水的除藻率分别为 83.00%、88.29% ~ 97.66% 和 91.65%、

94.53% ~ 98.95%；对原水和加氯水的余浊分别为 2.00 NTU、1.76 ~ 0.43 NTU 和 2.31 NTU、1.80 ~ 0.54 NTU.可见，各药剂对加氯水的除藻率大于对原水的除藻率，而对加氯水的余浊却高于对原水的余浊，由此说明在冬季太湖水处理中，预氯化对药剂处理效果的影响表现为促进除藻、阻碍脱浊.

引起这一现象的原因可能是氯溶入水中生成不带电荷、分子体积较小的次氯酸，易穿透藻类的细胞壁，并依靠其释放氯的氧化作用等影响藻细胞内的酶系统，使藻体死亡，同时破坏藻细胞的完整性^[22]，提高了除藻效果.但藻细胞破裂后释放出来的胞内有机物不仅可使水体中溶解性有机物含量增加，而且还将吸附在胶体颗粒表面，形成有机保护膜，增加胶体的稳定性及表面电荷密度，阻碍胶体颗粒间的结合^[23]，不利于后续的混凝处理，导致脱浊效果降低.

3.2 替代预氯化工艺的可行性分析

在图 6 中可得到 AS 对冬季太湖加氯水的余浊达标时所需加药量为 4.50 mg/L，以及该加药量下各药剂相应的余浊；在图 5 中可得到该加药量下各药剂相应的除藻率，所得数据如表 2 所示.

表 2 AS、AS/PDM 复合混凝剂对原水与加氯水的处理效果对比
Table 2 Contrast of treatment effect of AS, AS/PDM composite coagulants to raw water and chlorine-added water

项目	加药量 /mg·L ⁻¹	原水				加氯水			
		AS	AS/PDM (0.55/20:1)	AS/PDM (1.53/10:1)	AS/PDM (3.99/5:1)	AS	AS/PDM (0.55/20:1)	AS/PDM (1.53/10:1)	AS/PDM (3.99/5:1)
除藻率/%	4.50	84.67	89.32	93.11	97.91	92.09	95.22	97.27	99.07
余浊/NTU	4.50	1.72	1.51	1.03	0.38	2.00	1.57	1.17	0.48

由表 2 可见，加药量为 4.50 mg/L 时，仅 AS/PDM (1.53/10:1)复合混凝剂对原水的除藻脱浊效果就已明显优于 AS 对加氯水的除藻脱浊效果.因此，采用对原水的处理效果优于 AS/PDM(1.53/10:1)的复合混凝剂对原水进行强化混凝，均可达到或超过纯无机药剂对加氯水的处理效果，即利用复合混凝剂的强化混凝替代预氯化工艺是可行的.

图 5、6 中当加药量达到 6 mg/L 时，AS 对加氯水、AS/PDM(0.55/20:1) ~ AS/PDM(3.99/5:1)复合混凝剂对原水的余浊分别为 0.96 NTU、0.77 ~ 0.12 NTU，除藻率分别为 93.65%、95.17% ~ 99.03%，相应的出水藻含量分别为 1.16 × 10³ 个/mL、9.90 × 10² ~ 1.99 × 10² 个/mL.此时，AS 处理加氯水后的出水藻含量是复合混凝剂处理原水后出水藻含量的 1.17 ~ 5.83 倍，这种差距明显随加药量增加而变化.

可见即使增大 AS 对加氯水的加药量，也难以达到理想的除藻效果，而使用复合混凝剂替代预氯化工艺的潜力显而易见.进一步说明在实际生产中，除了为防止输水管道中菌藻繁殖而需维持适当余氯外，使用复合混凝剂可以替代预氯化工艺中混凝除藻作用的部分功能.

4 结论

(1)系列稳定 AS/PDM 复合混凝剂对冬季太湖原水的除藻脱浊效果比单独使用 AS 时明显提高. AS/PDM(0.55/20:1) ~ AS/PDM(3.99/5:1)复合混凝剂与 AS 相比，余浊为 2 NTU 时，减少出水藻含量 26.6% ~ 46.7%，节省加药量 6.6% ~ 55.9%；加药量为 4.24 mg/L 时，减少出水藻含量 31.1% ~ 86.2%，降低余浊 12.0% ~ 78.5%，具有余浊达标时

节省加药量,加药量相等时提高处理效果的特点.

(2)AS 与 PDM 复配比例越低或 PDM 特征黏度越大,AS/PDM 复合混凝剂的除藻率越大,余浊越低.采用高特征黏度、高复配比例的复合混凝剂是提高除藻脱浊效果的既经济又高效的手段.

(3)采用适当特征黏度与复配比例的复合混凝剂对原水进行强化混凝,可达到纯无机药剂 AS 对加氯水的处理效果,实验证明使用 AS/PDM 复合混凝剂可以替代预氯氧化工艺中混凝除藻作用的部分功能.

参考文献:

[1] Sukenik A, Teltch B, Wachs A W, *et al.* Effect of oxidants on microalgal flocculation[J]. *Water Research*, 1987, **21**(5): 533-539.

[2] 臧景红,姜安玺,刘俊良,等. 处理微污染黄河水的混凝剂选择试验[J]. *中国给水排水*, 2002, **18**(5):51-52.

[3] 李善仁,李风亭. 无机和有机复合高分子絮凝剂的现状和发展方向[J]. *煤矿环境保护*, 2002, **16**(2): 16-19.

[4] Hasse R A. Clarification of water and wastewater[P]. USA Patent, US 6120690, 2000-12-19.

[5] 尹伟红,宋向阳,张湛军,等. 郑州市白庙水厂混凝沉淀除藻的研究[J]. *工业用水与废水*, 2000, **31**(4): 7-9.

[6] Lindqvist N, Jokela J, Tuhkanen T. Enhancement of coagulation by using polyelectrolytes as coagulant or flocculant aids [A]. In: *Chemical Water and Wastewater Treatment VIII* [C]. London: IWA Publishing, 2004. 161-169.

[7] Bolto B, Dixon D, Eldridge R, *et al.* Removal of THM precursors by coagulation or ion exchange[J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5066-5073.

[8] Johnson B S, Staples C A, Branden M L. Polyamphoteric polymers for raw water treatment[P]. WO 02/076892 A1, 2002-10-03.

[9] Yu J, Sun D D, Tay J. Characteristics of coagulation-flocculation of humic acid with effective performance of polymeric flocculant and

inorganic coagulant[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **47**(1): 89-95.

[10] 张跃军,赵晓蕾,李潇潇. 硫酸铝-聚二甲基二烯丙基氯化铵复合混凝剂及其制备与应用方法[P]. 中国发明专利: 申请号 200710025017.2.

[11] 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.

[12] 石明岩,崔福义,张海龙,等. 低温低浊受污染水处理中混凝剂的优化选择[J]. *工业水处理*, 2002, **22**(10): 29-31.

[13] Turnquest E M, Hallenbeck W H. Blood aluminum levels as a function of aluminum intake from drinking water[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, **46**(4): 554-560.

[14] Kam S K, Gregory J. The interaction of humic substances with cationic polyelectrolytes[J]. *Water Research*, 2001, **35**(15): 3557-3566.

[15] 田秉晖,葛小鹏,潘纲,等. PDADMAC 强化絮凝去除腐殖质类天然有机污染物的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 92-97.

[16] 刘立华,龚竹青. 聚二甲基二烯丙基氯化铵与聚合硫酸铁复合絮凝剂的制备及絮凝性能研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2005, **20**(4): 90-94.

[17] 王敏,童芳华. 铝盐混凝剂的研究进展[J]. *江西化工*, 2005, **2**: 9-11.

[18] 汤鸿霄,栾兆坤. 聚合氯化铝与传统混凝剂的凝聚-絮凝行为差异[J]. *环境化学*, 1997, **16**(6): 497-505.

[19] 高宝玉,王燕,岳钦艳,等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 103-106.

[20] 岳钦艳,赵华章,高宝玉. 二甲基二烯丙基氯化铵聚合物的除浊性能研究[J]. *工业水处理*, 2002, **22**(3): 26-28, 31.

[21] 张跃军,贾旭. 高相对分子质量聚二甲基二烯丙基氯化铵的制备方法[P]. 中国专利: CN 200610040746.0, 2006-05-31.

[22] 戎文磊,周圣东,奚稼轩. 水厂常规处理工艺去除藻毒素的研究[J]. *净水技术*, 2004, **23**(1): 1-3, 9.

[23] 李晓东,蔡国庆,马军. 水中有机成分及其对饮用水水质的影响[J]. *给水排水*, 1999, **25**(5): 12-14.