

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.206.0198

郑育毅, 江娟, 孙启元, 等. 2016. 不同分子量及离子度的 CPAM 对污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 36(8): 2947-2954

Zheng Y Y, Jiang J, Sun Q Y, et al. 2016. Effect of different molecular weight and ionic strength of CPAM on sludge dewaterability[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(8): 2947-2954

# 不同分子量及离子度的 CPAM 对污泥脱水性能的影响研究

郑育毅<sup>1,2</sup>, 江娟<sup>1,2</sup>, 孙启元<sup>1,2</sup>, 刘常青<sup>3,\*</sup>

1. 福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007

2. 福建师范大学环境科学研究所, 福州 350007

3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

收稿日期: 2016-03-04

修回日期: 2016-04-27

录用日期: 2016-05-14

**摘要:** 阳离子聚丙烯酰胺 (CPAM) 以其良好的絮凝效果被广泛用于改善市政污泥的脱水性能。然而, 由于 CPAM 的分子量和离子度存在多样性, 其促进市政污泥脱水的机理尚不明确。本研究通过测定 CPAM 调理后的污泥比阻、污泥上清液浊度、Zeta 电位、胞外聚合物, 对 12 组不同分子量和离子度的 CPAM 促进污泥脱水的机理进行研究。结果表明: CPAM 能显著提高胶体絮凝能力, 进而改善污泥的脱水性能; 在 CPAM 的离子度或者分子量较低 (离子度 40% 或分子量  $6 \times 10^6$ ) 时, 其絮凝机理主要表现为吸附架桥; 随着离子度和分子量增加到 50% 和  $8 \times 10^6$  时, CPAM 的电中和作用显著增强, 并与吸附架桥作用协同促进污泥的絮凝脱水; CPAM 离子度的增加更能减少胞外聚合物中核酸含量, 这有利于降低污泥亲水性能, 从而促进其脱水。

**关键词:** 阳离子聚丙烯酰胺; 脱水性能; 絮凝机理; 分子量; 离子度

文章编号: 0253-2468(2016)08-2947-08

中图分类号: X703

文献标识码: A

## Effect of different molecular weight and ionic strength of CPAM on sludge dewaterability

ZHENG Yuyi<sup>1,2</sup>, JIANG Juan<sup>1,2</sup>, SUN Qiyuan<sup>1,2</sup>, LIU Changqing<sup>3,\*</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007

2. Institute of Environment Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007

3. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007

Received 4 March 2016;

received in revised form 27 April 2016;

accepted 14 May 2016

**Abstract:** Cationic polyacrylamide (CPAM) has been widely used to improve the dewatering of municipal sludge with its superior flocculation effect. However, because of the diversity of the molecular weight and ionic degree for CPAM, its dewatering mechanism remains unclear. In this study, the dewatering mechanism was discussed through a series of experimental design on CPAMs with 12 combinations with 4 molecular weights and 3 ionic degrees. The studied indicators included the supernatant turbidity, the specific resistance of sludge, the Zeta potential, and extracellular polymer. The results showed that absorption and bridge may be the dominant dewatering mechanism for CPAM with low molecular weight ( $< 6 \times 10^6$ ) or ionic degree ( $< 40\%$ ). For CPAM high molecular weight and ionic degree, on the other hand, the synergistic effect between adsorption-bridging and electrical neutralization may be the dominant process. The decrease in nucleic acid content in extracellular polymer with the increasing ionic degree may weaken the hydrophilicity of sludge.

**Keywords:** cationic polyacrylamide; municipal sludge dewatering; flocculating mechanism; molecular weight; ionic degree

**基金项目:** 福建省科技重大专项专题 (No.2014YZ0002-1, 2015YZ0001-1); 福建省自然科学基金 (No.2015J01187); 国家自然科学基金青年基金 (No.51509037)

**Supported by** the Science & Technology Major Projects of Fujian Province (No.2014YZ0002-1, 2015YZ0001-1), the Natural Science Foundation of Fujian Province (No.2015J01187) and the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China (No.51509037)

**作者简介:** 郑育毅 (1974—), 男, 高级工程师, E-mail: 332892742@qq.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: mylcq@163.com

**Biography:** ZHENG Yuyi (1974—), male, senior engineer, E-mail: 332892742@qq.com; \* **Corresponding author**, E-mail: mylcq@163.com

## 1 引言 (Introduction)

污水生化处理过程会产生大量污泥,这些剩余污泥含水率很高,且脱水性能差,极大地增加了后续处理环节的负担.因此,在对污泥实现无害化和资源化之前必须进行减量化处理,即降低污泥的含水率(Colin *et al.*, 1995; 郑怀礼等, 2009).由于剩余污泥颗粒表面携带负电荷,亲水性强,与水分子结合非常紧密,因此,在进行脱水之前,一般需先加入絮凝剂调理,在改善脱水性能后,方能进行机械脱水(马俊伟等, 2013).阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)水溶性好、携带正电荷,能通过电中和、架桥吸附等作用与污泥颗粒相结合(舒型武等, 2013; 卢红霞等, 2007; Lin *et al.*, 2001; 郑怀礼等, 2008),对污泥的资源化利用影响小(马俊伟等, 2013),比其他絮凝剂更具优势,故而在实际生产中被广泛使用.

然而高效的 CPAM 价格昂贵,使得污泥脱水过程成为污水处理厂运行成本最高的环节(Bruus *et al.*, 1992; Friedler *et al.*, 2006),该环节的药剂费用约占污水厂运行成本的 30%~60%(李玉瑛等, 2012).因此,选用合适的 CPAM 是污泥高效脱水和降低处理成本的关键要素.为此,近些年有较多围绕降低污泥脱水成本的脱水工艺与技术研究,主要集中在物理与化学方法、有机与无机混凝剂联合调理等方面.例如,牛美青等(2012)研究发现,氯化铁与 CPAM 联合调理可提高污泥脱水效果;李恺等(2010)运用冷融技术配合化学混凝剂对污泥进行调理脱水.也有一些研究关注 CPAM 对污泥理化性质的影响,主要针对药剂量,如李婷等(2012)探究了 CPAM 投药量对污泥理化性质的影响.而针对 CPAM 促进污泥脱水的机理研究很少,特别是 CPAM 的吸附架桥与电中和对污泥脱水的协同作用,CPAM 多样性的分子量和离子度对于上述两种机理发挥效用的影响,以及 CPAM 对污泥脱水的关键因子——胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substance, EPS)的影响,尚未见相应的探讨.

因此,本研究选取 12 种不同分子量和离子度的 CPAM 对剩余污泥进行调理,测定污泥比阻、污泥上清液浊度、Zeta 电位、胞外聚合物,并结合三维荧光分析等手段,探究 CPAM 分子量与离子度对污泥脱水性能的影响机理,以期为污水处理厂选择适宜的 CPAM 型号和企业开发用于污泥脱水的高效 CPAM 提供参考.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 试验材料

2.1.1 污泥来源 实验污泥取自福州祥坂污水处理厂的二沉池剩余污泥.该厂服务范围约 560 hm<sup>2</sup>,已建成污水处理能力 9×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,是国内较早采用具有脱氮除磷 A/O 工艺和利用国外贷款的市政污水处理项目.

考虑到原始剩余污泥含水率很高(约 99.8%),故将取回的原始污泥先自由沉降,稳定后取下层浓缩污泥作为实验污泥样品(高建磊等, 2008).实验中的污泥样品基本参数如表 1 所示.

表 1 污泥的基本性质

Table 1 The characteristics of the sludge for experiment

含固率	温度/℃	上清液浊度/NTU	上清液 Zeta 电位/mV	污泥比阻/(m·kg <sup>-1</sup> )
1.49%	17.4	8.1	-2.913	2.01×10 <sup>12</sup>

2.1.2 絮凝剂 絮凝剂为 12 种不同分子量和离子度的 CPAM,相应样品编号见表 2.用纯水将 CPAM 溶解并配成浓度为 300 mg·L<sup>-1</sup>的溶液后用于污泥调理试验,实验过程 CPAM 投加量按实验污泥干污泥量的 0.3%投加.

表 2 阳离子型聚丙烯酰胺规格

Table 2 The indices of CPAM

编号	分子量	离子度	编号	分子量	离子度
CPAM-1	6×10 <sup>6</sup>	40%	CPAM-7	10×10 <sup>6</sup>	40%
CPAM-2	6×10 <sup>6</sup>	50%	CPAM-8	10×10 <sup>6</sup>	50%
CPAM-3	6×10 <sup>6</sup>	60%	CPAM-9	10×10 <sup>6</sup>	60%
CPAM-4	8×10 <sup>6</sup>	40%	CPAM-10	12×10 <sup>6</sup>	40%
CPAM-5	8×10 <sup>6</sup>	50%	CPAM-11	12×10 <sup>6</sup>	50%
CPAM-6	8×10 <sup>6</sup>	60%	CPAM-12	12×10 <sup>6</sup>	60%

### 2.2 试验方法

污泥比阻测定参照《水污染控制工程实验》(陈泽堂, 2003)中的测定方法;浊度采用 WGZ-2B 数显浊度仪(上海昕瑞仪器仪表有限公司)测定;Zeta 电位采用 Zetasizer Nano-ZS(Malvern Instruments Ltd.)测定;污泥的胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substance, EPS)采用热提取法(Li *et al.*, 2007)来提取,具体方法为:在离心管中加入 50 mL 实验污泥,4000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min 后舍弃上清液,加入 15 mL 的 0.05% NaCl 溶液进行溶解,再用预加热到 70 ℃ 的 0.05% NaCl 溶液稀释至 50 mL(可使污泥悬浮液

立即达到 50 ℃ 左右),经往复式振荡机振荡 5 min 及 4000 r·min<sup>-1</sup>下离心 10 min 后,此时上清液中的有机物视为微生物的溶解态胞外聚合物(LB);在提取 LB 之后残留着污泥的离心管中加入 0.05% NaCl 溶液直至体积恢复至 50 mL,移入 60 ℃ 水浴锅中热浴 30 min,再经 4000 r·min<sup>-1</sup>下离心 15 min 后的上清液便为结合态胞外聚合物(TB).EPS 主要由上清液中的蛋白质、多糖和核酸等含量来表征,其中,蛋白质采用考马斯亮蓝法测定(刘宪华等,2006),多糖用蒽酮比色法测定(陈钧辉等,2008),核酸由紫外分光光度法测定(黄建华等,2009).

三维荧光光谱:采用 HITACHI F4600 (HITACHI,日本)荧光分光光度计测定,激发光源为氙灯,激发波长  $\lambda_{Ex} = 200 \sim 420$  nm,发射波长  $\lambda_{Em} = 250 \sim 500$  nm,激发狭缝宽度为 10.0 nm,发射狭缝宽度为 5.0 nm,扫描速度为 12000 nm·min<sup>-1</sup>,光谱图分析在 FL Solutions 上进行.三维荧光的结果以  $J \times K$  的矩阵呈现,其中,  $J$  代表发射波长,  $K$  代表激发波长.  $I$  个样品就构成  $I \times J \times K$  的三维矩阵,采用平行因子分析方法(祝鹏等,2012)对形成的三维矩阵进行处理,可更快捷、准确地从三维荧光激发-发射光谱矩阵中获得上清液的有效成分.

### 3 结果与讨论 (Results and discussion)

#### 3.1 不同 CPAM 对污泥脱水性能的影响

污泥比阻常称比阻,是表征污泥脱水性能的一项最重要指标.通常污泥比阻减小,表示其脱水性能相对较好,即越容易脱水,反之则越难脱水.因此,研究中通过测试不同 CPAM 调理后污泥的比阻,来分析 CPAM 的分子量与离子度对絮凝效果的影响.

图 1 为加入等剂量(实验污泥干泥量的 0.3%)的表 2 中 12 种不同 CPAM 调理后的污泥比阻数值变化情况.可以看出,投加 CPAM 能降低污泥比阻,从而提高脱水性能.实验发现,40%、50% 和 60% 3 种离子度的 CPAM 随着分子量增大,其调理后的污泥比阻值均呈现较为显著的降低,当分子量达到  $10 \times 10^6$  时,污泥比阻趋于稳定,表明这种增强作用有限.此外还发现,离子度为 50% 的 CPAM 的调理效果明显优于离子度为 40% 和 60% 的 CPAM,说明过低离子度的 CPAM 可提供的正电荷相对有限,致使电中和能力不足而影响絮凝作用;过高离子度则会使污泥絮体周围正电荷量过多,造成胶体颗粒间因电

荷排斥作用而无法更好地絮凝(李婷等,2012).

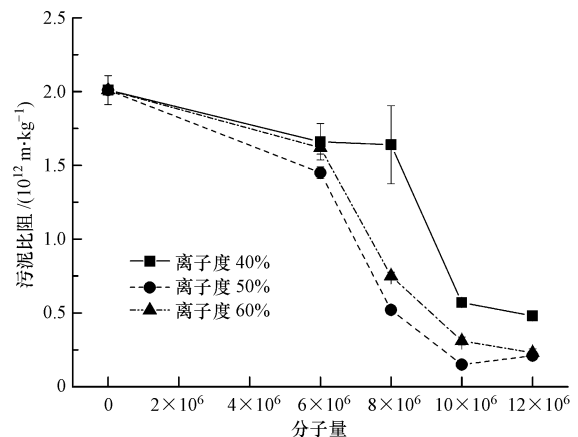


图 1 不同 CPAM 对污泥比阻的影响

Fig.1 Influence of different CPAM on the specific resistance of sludge

#### 3.2 不同 CPAM 对絮凝后污泥上清液性质的影响

CPAM 用于污泥调质脱水是电中和与吸附架桥综合作用的结果,特别是其表面吸附作用,即 CPAM 携带的—COO—、—CONH<sub>2</sub>—、—NH—等活性基团能将小胶体絮集形成大颗粒,因此,上清液浊度能用于反映 CPAM 对污泥的吸附混凝程度.

相关研究表明,污泥调理过程所使用的絮凝剂种类、含量和离子度都会对污泥的 Zeta 电位产生影响(Lin *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2003; Leland *et al.*, 1997; 刘振儒等, 2000; Bob *et al.*, 2001; 栾兆坤等, 1997),上清液的 Zeta 电位变化可反映污泥絮凝过程电中和程度.

通过测定 CPAM 调理后污泥上清液的浊度及 Zeta 电位,用来表征 CPAM 电中和与吸附架桥作用对污泥理化性质的影响,有助于分析不同分子量与离子度在絮凝过程的作用.

3.2.1 不同 CPAM 对污泥絮凝效果的影响 图 2 是 12 种 CPAM 调理后污泥上清液浊度的变化结果.从图中可以看出,投加了 CPAM 的污泥上清液浊度大幅降低,这是由于污泥中悬浮态微细颗粒在 CPAM 的电中和与架桥吸附作用下被大量捕获,污泥的絮凝沉淀效果因此提升(李玉瑛等,2012).实验发现,对于离子度为 60% 的 CPAM,上清液浊度随分子量增加而降低,但当分子量  $> 8 \times 10^6$  时,浊度不降反升,这表明高离子度并不利于 CPAM 聚合结构的展开(Zhang *et al.*, 2010).而絮凝剂能否完全伸展,最大化地提供吸附结合点位与絮凝效果息息相关,故在高电解质浓度下,CPAM 分子量超过一定范围

时,颗粒物因吸附架桥受阻而继续悬浮在上清液中,导致浊度出现反弹(马俊伟等,2013; Xia *et al.*, 2008; Salehizadeh *et al.*, 2001),从而负面地影响了絮凝效果.对于离子度为 40% 的 CPAM,上清液浊度在分子量为  $6 \times 10^6$  时最低,之后随分子量增加,未能捕捉的悬浮颗粒物越多,上清液浊度上升.这可能是低离子度 CPAM 因其电荷密度较小,正电荷浓度相对不足,电中和能力较弱,污泥调理过程许多携带负电荷胶体颗粒在因架桥吸附形成絮体的下沉中来不及发生电中和或未发生电中和作用而逸散,导致很多细微颗粒仍悬浮在上清液中(Prasertsan *et al.*, 2006; 牛美青等,2012).对于离子度为 50% 的 CPAM,上清液浊度随分子量增加而降低,呈显著的线性关系.可见,适宜的电解质浓度对 CPAM 的吸附架桥作用十分重要,在适当的 CPAM 离子度和分子量搭配下,两者对絮凝效果将存在协同作用.

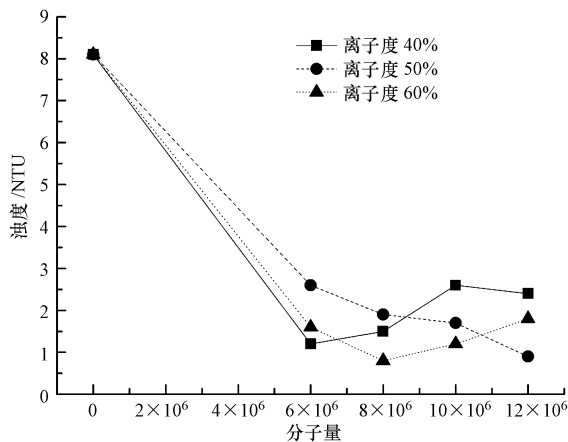


图2 不同 CPAM 对上清液浊度的影响

Fig.2 Influence of different CPAM on turbidity of supernatant

3.2.2 不同 CPAM 对上清液 Zeta 电位的影响 12 种 CPAM 絮凝后污泥上清液的 Zeta 电位变化如图 3 所示.从表 1 中可知,未经 CPAM 调理的污泥上清液浊度为 8.1 NTU, Zeta 电位为  $-2.913$  mV,表明上清液处于比较稳定的状态,大量的颗粒物因携带负电荷相互排斥,悬浮在上清液中无法沉淀下来.投加 CPAM 调理后,上清液 Zeta 电位由负转正,说明 CPAM 改变了颗粒物表面的电性,也使胶体颗粒脱稳.通过对污泥比阻与 Zeta 电位绝对值的相关性分析发现,两者呈显著负相关( $p < 0.01$ ,  $r = -0.829$ ),说明污泥的失稳有利于原本悬浮的污泥颗粒絮凝沉降,污泥脱水性能得到提高.

由图 3 可知,从所加 CPAM 的离子度角度分

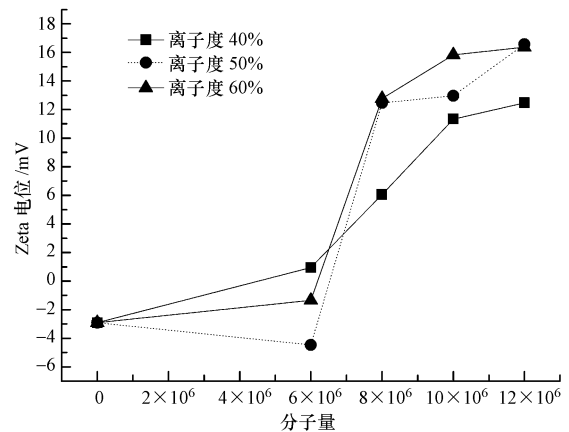


图3 不同 CPAM 对上清液 Zeta 电位的影响

Fig.3 Influence of different CPAM on Zeta potential of supernatant

析,对于同一离子度的 CPAM 调理后污泥上清液 Zeta 电位总体趋势为由负值变为正值,且随着分子量增大而上升, Zeta 电位升高与分子量增大的相关性显著,相关系数达 0.854 ( $p < 0.01$ ).这可能是由于相同离子度的 CPAM 随着分子量增加,单链结构越复杂,架桥吸附能力越强,链结构上的阳性基团捕获负电荷颗粒物也就越快,从而使得上清液的 Zeta 电位正值变大.从所加 CPAM 的分子量角度分析,加入分子量为  $6 \times 10^6$  的 3 种 CPAM (CPAM-1 ~ CPAM-3),上清液 Zeta 电位变化不甚明显,这是由于 3 种分子量较小的 CPAM 的聚合结构较容易打开,离子度对絮凝反应的影响较小,絮凝机理以吸附架桥为主.随着 CPAM 分子量变大(加入 CPAM-4 ~ CPAM-12), Zeta 电位由负值变为正值,变化显著,说明 CPAM 的阳离子电解质开始较明显地发挥电中和作用,从而改变胶体系统的电性.对于离子度为 50% 和 60% 的 CPAM,分子量为  $10 \times 10^6$  (CPAM-8 与 CPAM-9) 和  $12 \times 10^6$  (CPAM-11 与 CPAM-12) 的 Zeta 电位变化很小,表明虽然 CPAM 的分子量越大,架桥吸附作用越强,但因释放到上清液中的正电荷增至一定程度后开始阻碍 CPAM 分子完全延伸(马俊伟等,2013),而 CPAM 的聚合结构越难以完全打开(Zhang *et al.*, 2010),也会使架桥吸附作用得到抑制,从而阻止链结构上正电荷的进一步被释放,使得上清液 Zeta 电位不再增大.

### 3.3 不同 CPAM 对胞外聚合物的影响

剩余污泥中的胞外聚合物(EPS)是活性污泥代谢过程中分泌的聚合态化合物,主要由蛋白质、核酸、多糖组成.它具有双层结构:外层松散附着 EPS (Loosely Bound EPS, LB) 结构松散,无明显边界,具

有粘性;内层紧密粘附 EPS(Tightly Bound EPS, TB)与细胞表面的细胞壁结合紧实,相对稳定(Li *et al.*, 2007;王红武等,2003).因此,本文通过对相应指标的测定,探寻絮凝剂 CPAM 的加入对胞外聚合物产生的可能影响,以揭示 CPAM 污泥调理的机理.

对提取得到的 LB、TB 稀释 10 倍后进行荧光扫描,利用 3DEEM-PARAFAC 法处理荧光数据,上清液中出现了两种类型的荧光峰(图 4).其中,图 4a 中的荧光峰( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 280 \text{ nm}/270 \text{ nm}$ )为络氨酸,

图 4b 中的荧光峰( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 280 \text{ nm}/360 \text{ nm}$ )为色氨酸,两者均属于类蛋白质物质,未发现属于腐败类物质的荧光峰.同时,根据对 LB、TB 定量分析的结果(表 3),在该实验污泥的 EPS 中多糖含量远低于蛋白质和核酸,可认为剩余污泥的 EPS 中蛋白质、核酸将对其絮凝、脱水影响最大,故研究中选取蛋白质、核酸这两个指标来进一步揭示 CPAM 的离子度、分子量对污泥脱水性能的作用.

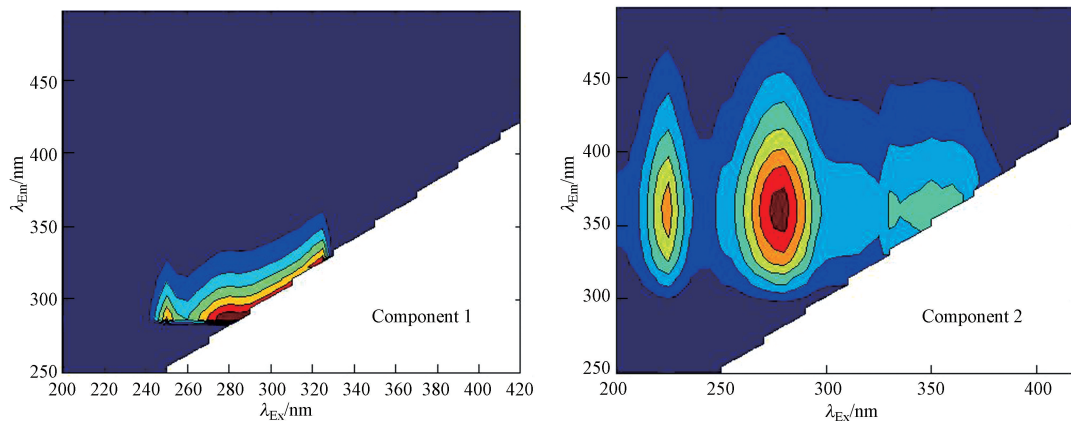


图 4 胞外聚合物的三维荧光光谱

Fig.4 3-dimensional fluorescence spectrum of extracellular polymeric substance

表 3 实验污泥中 EPS 主要组分含量

Table 3 The main components of the EPS of the experiment of sludge

EPS	蛋白质	核酸	多糖
LB	18.19	19.43	0.2
TB	15.09	23.49	0.12

3.3.1 不同 CPAM 对 EPS 中蛋白质的影响 图 5 为 12 种 CPAM 调理后污泥胞外聚合物中蛋白质含量情况.剩余污泥蛋白质是有机生物大分子,具有强亲水性.实验结果显示,不同 CPAM 的分子量、离子度组合对 EPS 中蛋白质影响不同:较小分子量( $6 \times 10^6$ 、 $8 \times 10^6$ )的 CPAM 在 40%、50% 离子度下,蛋白质总量基本不变,但离子度达到 60% 时,蛋白质总量减少;分子量为  $12 \times 10^6$  的 CPAM 在 40% 离子度下蛋白质总量也会明显低于原污泥,但在 50%、60% 等较高离子度时其含量回升.由此可见,不同的 CPAM(不同的分子量、离子度组合)对污泥胞外聚合物中的蛋白质会产生不同的影响,这进一步说明了分子量、离子度对污泥絮凝脱水的作用机理并非是完全独立的,两者会相互影响.从图 5 可以看出,

CPAM 的存在会使 LB 中蛋白质含量明显降低,在分子量相同的 CPAM 调理下,LB 中蛋白质含量随离子度的变化规律与图 1 中污泥比阻的变化规律基本一致,说明 LB 对污泥絮凝沉降的影响比 TB 显著(Li *et al.*, 2007;王红武等,2003).同时,LB 中蛋白质含量也与 CPAM 的分子量存在显著的负相关关系( $p < 0.01$ ,  $r = -0.877$ ),说明在相同离子度下,加入的 CPAM 分子量越大,则污泥 LB 中的蛋白质越少.加入 CPAM 后污泥中 LB 损失的蛋白质有可能被转化为 TB,也可能因 CPAM 的增溶作用而被破坏,可以认为,只有较合适的分子量、离子度组合,才能较好地破坏蛋白质,从而降低污泥的亲水性.

3.3.2 不同 CPAM 对 EPS 中核酸的影响 图 6 为 12 种 CPAM 调理后对污泥胞外聚合物中核酸的影响.实验结果显示,CPAM 会使 EPS 中核酸减少,离子度 50%、分子量  $10 \times 10^6$  的 CPAM 对 EPS 中核酸的影响最为明显,这与该 CPAM 作用下污泥的比阻最小相一致.经相关性分析可知,污泥胞外聚合物中核酸含量与污泥比阻、上清液浊度均呈显著的正相关关系(与污泥比阻: $p < 0.01$ ,  $r = 0.723$ ;与上清液浊度:

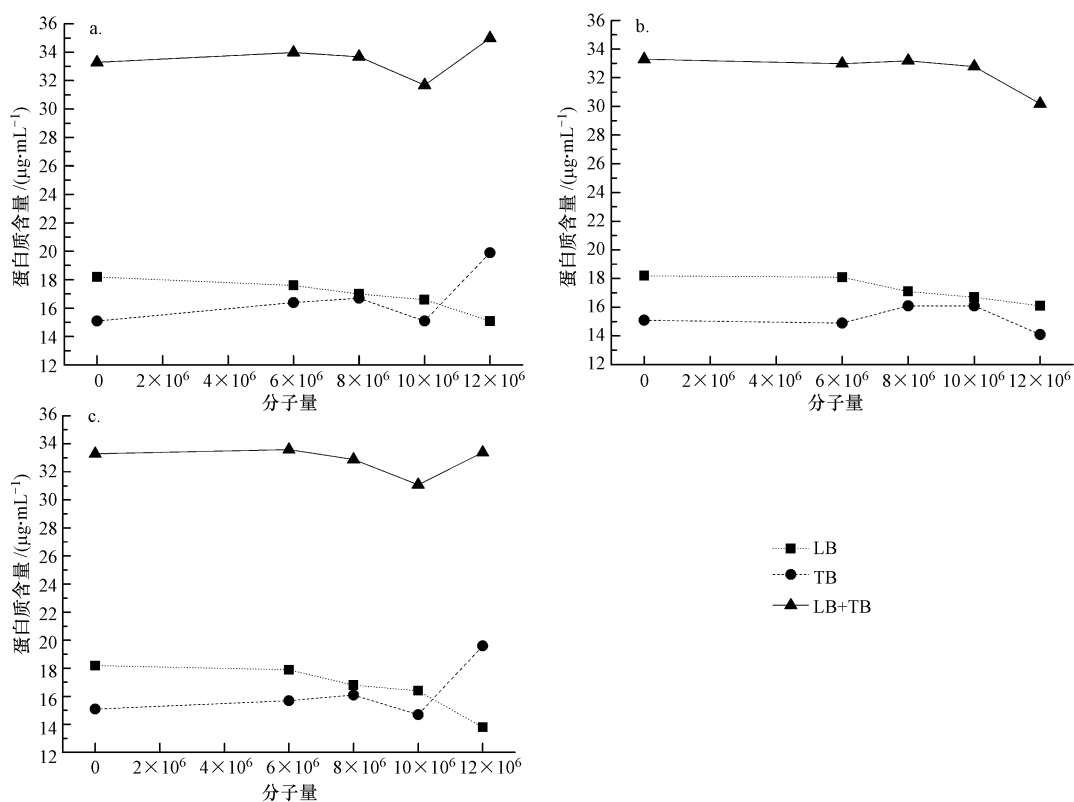


图5 不同 CPAM 对 EPS 中蛋白质含量的影响(a.离子度 40%,b.离子度 50%,c.离子度 60%)  
Fig.5 Influence of different CPAM on Content of protein in the Extracellular Polymeric Substance

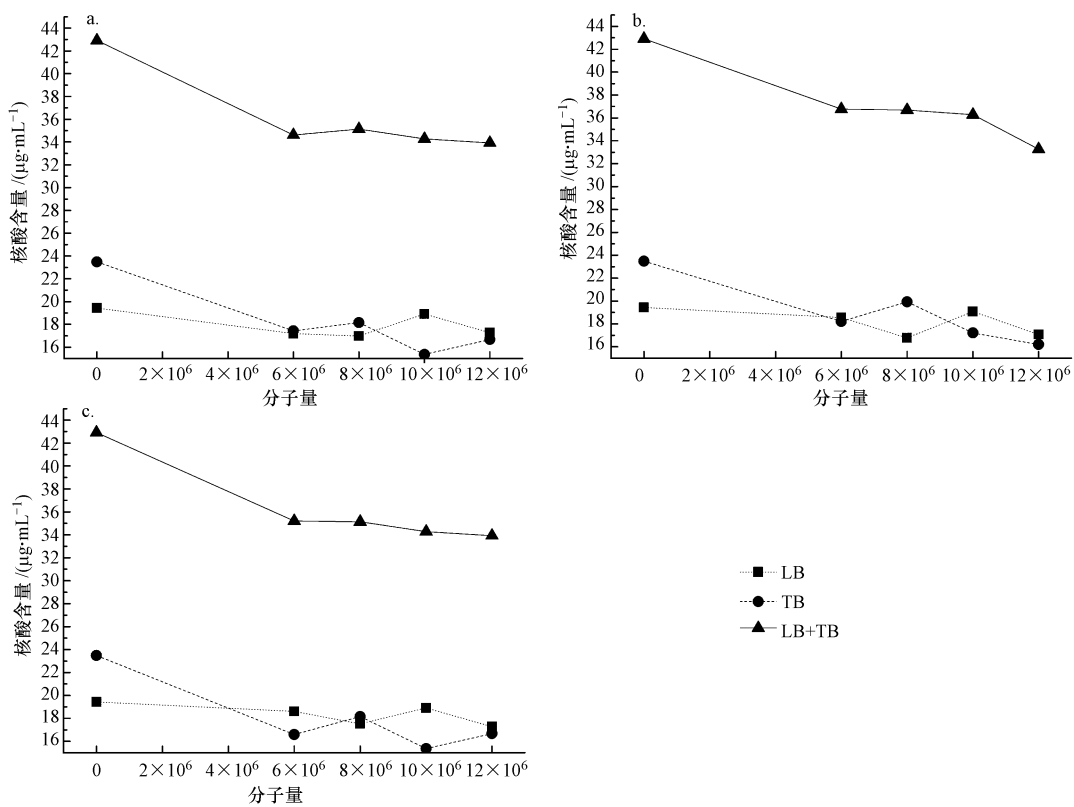


图6 不同 CPAM 对 EPS 中核酸含量的影响(a.离子度 40%,b.离子度 50%,c.离子度 60%)  
Fig.6 Influence of different CPAM on Content of nucleic acid in the EPS

$p < 0.01, r = 0.828$ ), 说明核酸含量的减少有助于提高污泥的絮凝沉淀效果, 改善污泥脱水性能。同时, 核酸总量与 CPAM 的离子度之间还存在负相关关系 ( $p < 0.05, r = -0.77$ ): 当 CPAM 分子量相同时, 污泥胞外聚合物中的核酸含量会随离子度的升高而降低。说明阳离子电解质在改变污泥颗粒表面电性的同时, 也使核酸分子变性、失活或被污泥絮体所固定, 导致核酸总量减少。此外, 综合 3.3.1 节可以看出, 在所研究的实验范围内, 核酸对于污泥比阻的影响似乎高于蛋白质。

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 经 CPAM 调理后污泥的上清液浊度与污泥比阻呈显著正相关, 污泥比阻与上清液 Zeta 电位呈显著负相关。

2) 上清液 Zeta 电位变化与 CPAM 分子量的显著正相关表明, 分子量越大, 越有利于 CPAM 的电中和作用。

3) EPS 中核酸含量的降低说明了 CPAM 调理使得整个污泥混合液体系发生改变, EPS 的显著下降也降低了污泥的亲水性。

4) 污泥比阻、上清液浊度、Zeta 电位及 EPS 的变化结果表明, CPAM 对污泥脱水性能的影响不是单纯的离子度或分子量作用, 是两者协同作用的结果。但即使协同作用的关联变量多, 变量间的相互作用复杂, 也会有相适宜分子量的 CPAM 可在其聚合结构展开期间, 离子度对污泥颗粒可发挥最为理想电中和作用。对于具体的处理对象, 只能通过筛选获得适宜分子量与离子度的 CPAM, 对于本文的研究对象而言, 离子度 50%、分子量  $10 \times 10^6$  是较合适的选型。

#### 参考文献 (References):

Bob M M, Walker H W. 2001. Effect of natural organic coatings on the polymer-induced coagulation of colloidal particles [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 177 (2): 215-222

Bruus J H, Nielsen P H, Keiding K. 1992. On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 26 (12): 1597-1604

陈银广, 杨海真, 吴桂标, 等. 2000. 表面活性剂改进活性污泥的脱水性能及其作用机理 [J]. *环境科学*, 21 (5): 97-100

陈钧辉, 李俊, 张太平, 等. 2008. 生物化学实验 (第五版) [M]. 北京: 科学出版社. 14-16

Chen Y, Chen Y S, Gu G. 2004. Influence of pretreating activated sludge

with acid and surfactant prior to conventional conditioning on filtration dewatering [J]. *Chemical Engineering Journal*, 99 (2): 137-143

Colin F, Gazbar S. 1995. Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering [J]. *Water Research*, 29 (8): 2000-2005

Friedler E, Pisanty E. 2006. Effects of design flow and treatment level on construction and operation costs of municipal wastewater treatment plants and their implications on policy making [J]. *Water Research*, 40 (20): 3751-3758

高健磊, 闫怡新, 吴建平, 等. 2008. 城市污水处理厂污泥脱水性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 31 (2): 108-111; 131

Li C H K. 2003. Assessment of sludge dewaterability using rheological properties [J]. *Journal- Chinese Institute of Engineers*, 26 (2): 221-226

黄建华, 袁道强. 2009. 生物化学实验 [M]. 北京: 化学工业出版社. 160-162

Vane L M, Zang G M. 1997. Effect of aqueous phase properties on clay particle zeta potential and electro-osmotic permeability: Implications for electro-kinetic soil remediation processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 55 (s1/3): 1-22

李恺, 叶志平, 王凤英, 等. 2010. 冷融技术联合化学调理对污泥脱水性能的影响及其机理 [J]. *环境科学学报*, 30 (3): 536-543

李婷, 王毅力, 冯晶, 徐萌. 2012. 活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系 [J]. *环境科学*, 33 (3): 889-895

Li X Y, Yang S F. 2007. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 41 (5): 1022-1030

Li X Y, Zhang Y, Zhao X, et al. 2015. The characteristics of sludge from enhanced coagulation processes using PAC/PDMDAAC composite coagulants in treatment of micro-polluted raw water [J]. *Separation & Purification Technology*, 147: 125-131

李玉瑛, 曹晨昶, 李冰. 2012. 超声波对剩余污泥化学调理的影响 [J]. *生态环境学报*, (7): 1357-1360

刘宪华, 鲁逸人. 2006. 环境生物化学实验教程 [M]. 北京: 科学出版社. 209-212

刘振儒, 赵春禄, 栾兆坤. 2000. 粘土矿胶粒及其含富里酸悬浊体系的电动特性 [J]. *环境化学*, 19 (2): 120-124

栾兆坤, 汤鸿霄, 于忱非. 1997. 混凝过程中铝与聚合铝水解形态的动力学转化及其稳定性 [J]. *环境科学学报*, 17 (3): 321-327

卢红霞, 刘福胜, 于世涛, 等. 2007. 阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的制备及其絮凝性能 [J]. *化工环保*, 27 (4): 374-378

Lin C F, Shien Y. 2001. Sludge dewatering using centrifuge with thermal/polymer conditioning [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 44 (10): 321-3255

马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 等. 2013. Fenton 试剂与 CPAM 联合调理对污泥脱水效果的影响研究 [J]. *环境科学*, 34 (9): 3538-3543

牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 2012. 不同混凝剂对污泥脱水性能的影响研究 [J]. *环境科学学报*, 32 (9): 2126-2133

Prasertsan P, Dermlim W, Doelle H, et al. 2006. Screening, characterization and flocculating property of carbohydrate polymer

- from newly isolated *Enterobacter cloacae* WD7 [J]. *Carbohydrate Polymers*, 66(3):289-297
- Sponza D T. 2002. Extracellular polymer substances and physicochemical properties of flocs in steady and unsteady-state activated sludge systems [J]. *Process Biochemistry*, 37(9):983-998
- Sponza D T. 2003. Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions [J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 32(3/4):375-385
- Salehizadeh H, Shojaosadati S A. 2001. Extracellular biopolymeric flocculants: Recent trends and biotechnological importance [J]. *Biotechnology Advances*, 19(5):371-385
- 舒型武, 郑怀礼. 2001. 阳离子型有机絮凝剂研究进展 [J]. *现代化工*, 21(10):13-16
- 田禹, 方琳, 黄君礼. 2006. 微波辐射预处理对污泥结构及脱水性能的影响 [J]. *中国环境科学*, 26(4):459-463
- 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 2003. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 13(9):31-34
- Xia S, Zhang Z, Wang X, *et al.* 2008. Production and characterization of a bioflocculant by *Proteus mirabilis* TJ-1 [J]. *Bioresource Technology*, 99(14):6520-6527
- 郑怀礼, 李凌春, 蔚阳, 等. 2008. 阳离子聚丙烯酰胺污泥脱水絮凝剂的制备 [J]. *化工进展*, 27(4):564-568
- 郑怀礼, 李林涛, 蒋绍阶, 等. 2009. CPAM 调质浓缩污泥脱水的影响因素及其机理研究 [J]. *环境工程学报*, 3(6):1099-1102
- Zhu P, Liao H Q, Hua Z L, *et al.* 2012. 平行因子分析法在太湖水体三维荧光峰比值分析中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 32(1):152-156
- Zhang Z Q, Lin B, Xia S Q, *et al.* 2007. Production and application of a bioflocculant by multiple-microorganism consortia using brewery wastewater as carbon source [J]. *J Environ Sci-China*, 19:660-666
- Zhang Z Q, Zhang J. 2010. Enhanced dewatering of waste sludge with microbial flocculant TJ-F 1 as a novel conditioner [J]. *Water Research*, 44(10):3087-3092