

聚合铝基复合絮凝剂用于城市纳污河道废水处理

卢磊, 高宝玉*, 许春华, 岳钦艳, 曹百川, 徐世平, 李伟伟

(山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100)

摘要:以城市纳污河道废水为处理对象, 聚合氯化铝-二甲基二烯丙基氯化铵(PAC-PDMAAC, 代号 JYF-1)复合絮凝剂为处理药剂, 在室内模拟化学强化一级处理(CEPT)现场工艺, 进行了烧杯絮凝实验, 主要考察废水中颗粒物、有机物和氮磷的去除效果, 以及 pH 和表面负荷率(SOR)对絮凝效果的影响, 分析了投药前后废水中颗粒物粒径分布和电荷特性的变化, 讨论了 JYF-1 药剂的作用机理及其在 CEPT 工艺中的应用。结果表明, 聚合铝基复合絮凝剂 JYF-1 比传统的 PAC 拥有更好的絮凝效果, 对 pH 和 SOR 的适应能力更强。JYF-1 对非溶解性污染物的去除要好于溶解性污染物的去除, $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 JYF-1 对 COD 和溶解性 COD(SCOD)的去除率分别为 76.72% 和 64.31%, 处理后出水的可生化性大幅提高, BOD/COD 从处理前的 0.23 增加到处理后的 0.53。JYF-1 具有良好的除磷效果和一定的脱氮效果, 当 JYF-1 投量为 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 溶解性总磷(STP)的去除率可达到 90% 以上, 总磷(TP)的去除率可达到 80% 左右, 总氮(TN)去除率为 20% 左右。将 JYF-1 应用于 CEPT 工艺, 可以无需改变现有的设备和工艺, 以更少的投药量获得更好的出水水质, 产生更少的污泥, 是值得推广应用的高效低价絮凝剂。

关键词: 纳污河道废水; PAC-PDMAAC; 复合絮凝剂; CEPT; 絮凝机理

中图分类号: X703.5; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-2035-06

Municipal Wastewater Treatment Using a Composite Flocculant Made of Polyaluminum Chloride and Polydimethyldiallyammonium Chloride

LU Lei, GAO Bao-yu, XU Chun-hua, YUE Qin-yan, CAO Bai-chuan, XU Shi-ping, LI Wei-wei

(School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: A composite flocculant (denoted JYF-1), made of polyaluminum chloride (PAC) and polydimethyldiallyammonium chloride (PDMAAC), was used in jar-tests to simulate the chemically enhanced primary treatment (CEPT) for municipal wastewater. Removal of particles, organic compounds, nitrogen and phosphorus in wastewater was investigated, and the effects of pH and surface overflow rate (SOR) on flocculation were also examined. Electrical charge and distribution of particles in wastewater were analyzed before and after flocculation. Furthermore, the flocculation mechanism and application of JYF-1 in CEPT were discussed. The results demonstrate that JYF-1 performs better than PAC under a wide pH and SOR range. When $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ JYF-1 is added, 76.72% COD and 64.31% soluble COD (SCOD) can be removed. About 90% soluble TP (STP), 80% TP and 20% TN can be removed by addition of $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ JYF-1. After flocculation, the BOD/COD ratio increases from 0.23 to 0.53, which indicates the biodegradation ability of wastewater is improved. It can be concluded that JYF-1 is a high-efficiency low-cost flocculant, which can improve outlet water quality and produce less sludge without changing the existing equipments and treating process in sewage plants.

Key words: municipal wastewater; PAC-PDMAAC; composite flocculant; CEPT; flocculation mechanism

资金和能耗是制约我国污水处理的主要因素, 也是导致我国水环境质量不断恶化的重要原因。化学强化一级处理(CEPT)技术, 凭借其占地省、流程短、基建与运行费用低、操作简单等优点, 近年来在世界各国得到广泛应用, 尤其适合快速发展的大中城市^[1~3]。

絮凝剂的选择在很大程度上决定着 CEPT 的处理效果与运行成本。聚合氯化铝(PAC)作为一种廉价而成熟的絮凝剂, 不仅制造工艺简单, 原料来源广, 而且对水体中的磷具有很强的去除作用^[4]。但是投量大、产泥多以及在高 pH 下絮凝效果差等缺点也制约了 PAC 的应用。二甲基二烯丙基氯化铵(PDMAAC), 是一种阳离子有机高分子絮凝剂, 近

年来应用于多种水体的絮凝处理, 被认为是最具商业价值的丙烯基聚合物之一, 它的合成及絮凝效果研究成为热点^[5~7]。传统的 PAC 与高阳离子电荷密度的 PDMAAC 复合后, 其 Zeta 电位值明显升高, 枝化度较 PAC 变大, 在对高浊度黄河水及油田废水的絮凝处理中效果明显好于单独使用 PAC 或 PDMAAC, 是一种高效低价的絮凝剂^[8,9]。

将 PAC-PDMAAC 复合絮凝剂应用于 CEPT 处理, 理论上应取得更好的效果, 目前鲜见相关的实验

收稿日期: 2006-09-26; 修订日期: 2006-11-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA01080)

作者简介: 卢磊(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水处理药剂及机理, E-mail: lulei@mail.sdu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: bygao@sdu.edu.cn

室或现场实验报道. 本研究以城市纳污河道废水为处理对象, 以 PAC-PDMDAAC 复合絮凝剂为处理药剂(以 PAC 作参照), 在实验室内模拟 CEPT 现场工艺, 进行了烧杯实验. 主要考察废水中颗粒物、有机物和氮磷的去除效果, 以及 pH 和表面负荷率(SOR)对絮凝效果的影响. 分析了投药前后废水中颗粒物粒径分布和电荷特性的变化. 最后讨论了药剂作用的机理及其在 CEPT 工艺中应用的问题, 为 PAC-PDMDAAC 复合絮凝剂在现场的开发应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

絮凝剂: PAC, 黄色粉末固体, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 30\%$ (质量

分数, 下同), 南京化学总公司精细化工厂; PDMDAAC, 无色液体, 固含量为 40%, 实验室自制; JYF-1 复合型絮凝剂, PAC 与 PDMDAAC 复合而成(质量比为 90:10), 深黄色液体, 固含量为 15%.

实验用原水: 取自淄博市南郊污水处理厂进水口, 基本水质参数见表 1. 该厂采用 CEPT 技术(工艺流程见图 1)处理淄博市南定地区的纳污河道, 河道主要接纳了上游工业园区的工业废水和部分生活污水. 南郊污水处理厂设计处理规模 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 处理出水进入下游的玉龙河用作观赏性景观环境用水. 由于上游工业的发展和居住人口的增加, 污水厂原用的絮凝剂不能满足生产要求, 需重新优选絮凝剂.

表 1 污水水质参数

Table 1 Characteristics of wastewater

水质参数	水温 / $^{\circ}\text{C}$	pH	COD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SCOD ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	BOD ₅ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	STN ²⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	STP ³⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TDS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	浊度 /NTU
数值	18.81	8.47	148.01	84.69	34.12	19.37	16.57	1.08	0.30	2473	289	355.6

1) SCOD 代表溶解性 COD; 2) STN 代表溶解性 TN; 3) STP 代表溶解性 TP

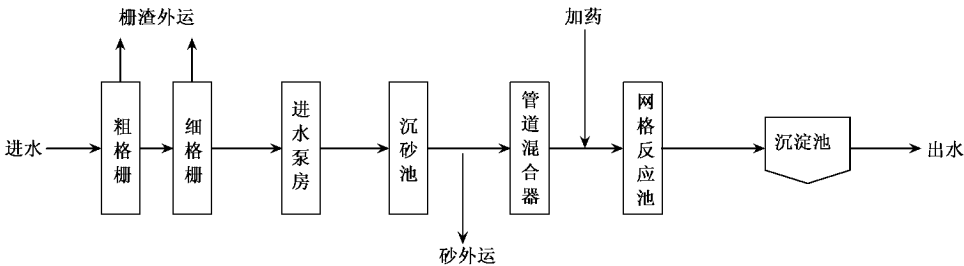


图 1 淄博市南郊污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment in Nanjiao sewage plant, Zibo

1.2 实验方法

1.2.1 絮凝实验

为使烧杯试验尽可能地接近现场实际运行情况, 絮凝试验的操作过程及参数如下:

① 用 1 L 量筒取 1 L 搅匀的废水, 倒入 1 L 方形搅拌杯中(中润 ZR4-6 混凝试验搅拌机); ② 在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下快速搅拌 0.5 min; ③ 加入一定量的絮凝剂(以产品质量计), 继续在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下快速搅拌 1 min, 使药剂与废水充分混合(药剂投加后立即用约 5 mL 去离子水将加药管冲洗 2 次, 冲洗液并入搅拌杯); ④ 在 $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下慢速搅拌 6 min(6 min 为南郊污水处理厂网格反应池反应时间); ⑤ 静置沉淀时间为 2 min 和 3 min, 对应的 SOR 为 1.2 和 $0.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 相关计算参见文献[10]; ⑥ 于水面下

4 cm 处取水样进行相关水质分析.

1.2.2 粒度分布测定

粒度分布测定使用 Mastersizer 2000 (Malvern, UK), 进样系统为 Hydro 2000MU(A). 测量时间设定 20 s, 背景值测量时间设定 5 s, 循环测量间隔 5 s, 平行测定 6 次取平均值. 进样泵泵速为 $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 为防止将絮体打散, 测试过程中未开超声.

1.2.3 Zeta 电位的测定

采用 Zetasizer 3000 Hsa (Malvern, UK) 测定 Zeta 电位, 进样系统为 MPT-1. 水样经中速定量滤纸过滤后, 用蒸馏水稀释至 KCPS 值(kilo counts per second)于适合范围. 测定温度设定为 20°C . 平行测定 6 次取平均值.

1.2.4 水质指标测试

水质指标测试方法参考《水和废水监测分析方法》:COD,重铬酸钾法,LY4050 COD 恒温加热器;TP,过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法;TN,过硫酸钾氧化紫外分光光度法,UV-754 分光光度计;絮凝实验后,水样先经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,然后测定 SCOD、STP 和 STN;浊度,Hach 2100P 浊度测定仪;TDS, Mettler Delta 326 电导率仪;BOD₅, Hach BODTrak; pH, Mettler Delta 320 pH 计。

2 结果与分析

2.1 絮凝剂对颗粒物的去除效果

水体中的颗粒物与多种污染物存在着吸附络合关系,与水质的好坏直接相关^[11,12],而且颗粒物会导致水体混浊,形成表观污染,降低水体的观赏价值。因此,颗粒物的去除是絮凝过程的重要目标。实验中选择浊度来反映颗粒物的去除情况。

如图 2(a)所示,当 SOR 为 0.8 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,伴随絮凝剂投量增加,浊度迅速下降。其中投加 JYF-1 尤为明显,投量为 6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,浊度即降至 10.93 NTU,随后进入缓慢下降的平台。投加 PAC 的效果相对较差,投量为 16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,浊度仍为 17.43 NTU。将 SOR 提高至 1.2 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,以考察絮凝剂的作用潜力。从图 2(b)可以看到,投加 JYF-1 的效果受 SOR 提高的影响并不大,低投量 ($\leq 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时浊度有所提高,但投量为 8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,浊度仍可降至 18.18 NTU。而投加 PAC 的效果受 SOR 提高的影响则非常明显,投量为 16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,浊度为 53.29 NTU,比低 SOR 时上升了 35.86 NTU。

实验中还发现,投加 PAC 时形成的矾花细小、

下沉慢、底部沉积的絮体蓬松,而投加 JYF-1 时,矾花较粗大,下沉快,絮体明显密实。

2.2 絮凝剂对有机物的去除效果

为便于了解絮凝剂对有机物的作用机理,实验中分别测定了 COD、SCOD 和 BOD₅ 的去除率。如图 3 所示,絮凝剂对于 COD 的去除效果最好,SCOD 次之,而 BOD₅ 的去除效果最差。投加 JYF-1 对于 COD 和 SCOD 的去除效果远好于 PAC,投量为 8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可分别达到 76.72% 和 64.31% 的去除率。相同投量下, PAC 对 COD 和 SCOD 的去除率仅达到 43.99% 和 30.10%。2 种絮凝剂对于 BOD₅ 的去除效果均较差,最大去除率均低于 50%, JYF-1 仍然要好于 PAC。

另外,当 JYF-1 投量超过 12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对 COD 和 SCOD 的去除效果反而变差。PAC 在 16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 投量内去除率始终保持递增趋势,并没有出现转折点。

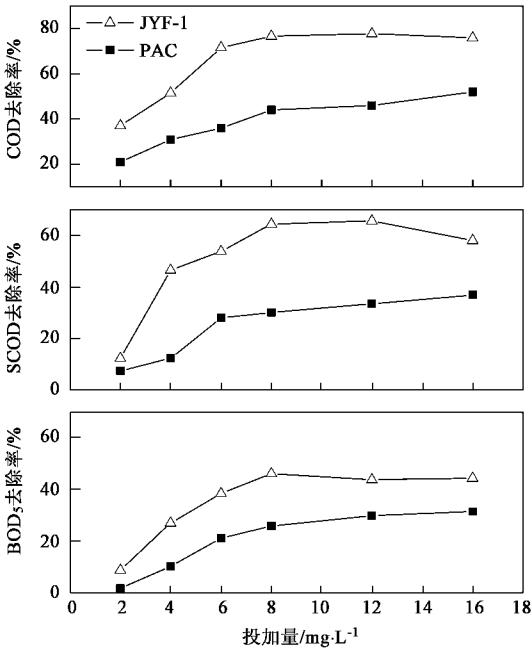


图3 JYF-1 和 PAC 投量对 COD、SCOD 和 BOD₅ 去除效果的影响
Fig.3 Effect of JYF-1 or PAC dosage on the removal rate for COD, SCOD and BOD₅

2.3 絮凝剂对 N、P 的去除效果

将处理出水作为观赏性景观环境用水,对于水体富营养化的发生比较敏感,所以废水中 N、P 的去除尤为关键。从图 4 可以发现,2 种絮凝剂在 N、P 的去除上表现非常相近。其中 P 的去除效果良好,STP 去除率可以达到 90% 以上,TP 去除率也可达到 80%。但是絮凝过程对于 N 的去除较差, TN 去除率

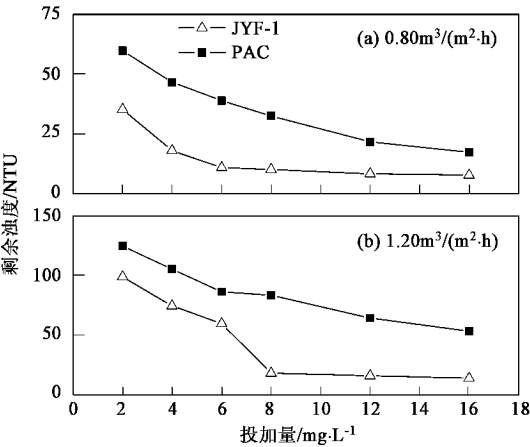


图2 不同表面负荷下 JYF-1 和 PAC 对浊度的去除效果
Fig.2 Variations of residual turbidity according to addition of JYF-1 and PAC in different SORs

仅为 20% 左右,STN 去除率更低,只有 10% 左右.

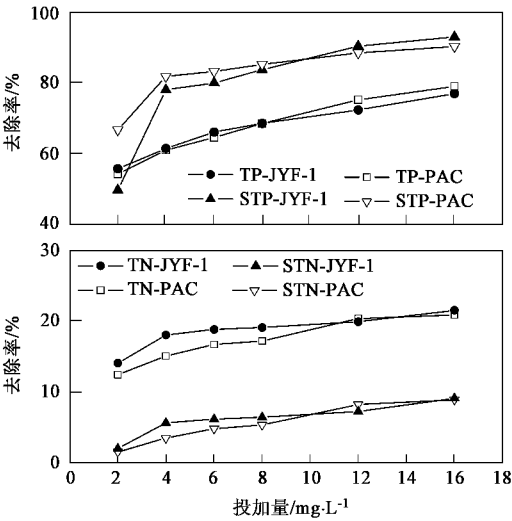


图 4 JYF-1 和 PAC 投加对 TP、STP、TN 和 STN 去除效果的影响
Fig.4 Effect of JYF-1 or PAC dosage on the removal rate for TP, STP, TN and STN

2.4 pH 对絮凝效果的影响

絮凝实验中对水体 pH 的调控采用前控法,即在投放絮凝剂前将水样的 pH 调整到指定值,实验过程中对 pH 不加控制. 由图 5 可知,当 JYF-1 和 PAC 都投加 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水样 pH 对 COD 去除效果的影响,呈现出先促进后抑制的趋势,其中 PAC 受到的影响更大. JYF-1 在 pH 为 7.5~8.0 时对 COD 的去除效果最佳,而 PAC 在 pH 为 8.0~8.5 时取得最佳效果.

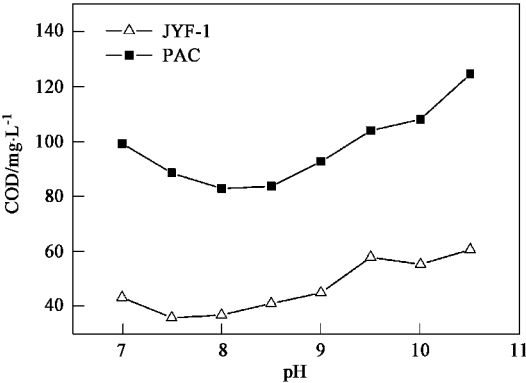


图 5 pH 对 COD 去除效果的影响
Fig.5 Effect of system pH on residual COD when $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ JYF-1 or PAC was added

2.5 絮凝前后粒度分布和 Zeta 电位的变化

由图 6 可知,原水中颗粒物粒径主要分布于 $1\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 之间,属于难以静置沉降的超胶体^[13]. 投

加絮凝剂后,大部分的超胶体在凝聚、絮凝的作用下,体积迅速增大,主要分布于 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 左右,成为可沉物质. 投加 JYF-1 后,水中颗粒物的粒径分布较投加 PAC 后变化更剧烈,其中大粒径颗粒物所占比例明显更高.

为了考察絮凝剂电中和作用的强弱,絮凝实验中逐步提高絮凝剂的投量,同时测定水中颗粒物的 Zeta 电位,结果如图 7 所示. 显然投加 JYF-1 时水中颗粒物的 Zeta 电位上升更快,当 JYF-1 投量约 $11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,达到等电点. 而 PAC 的投量在 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之内时,始终未能达到等电点.

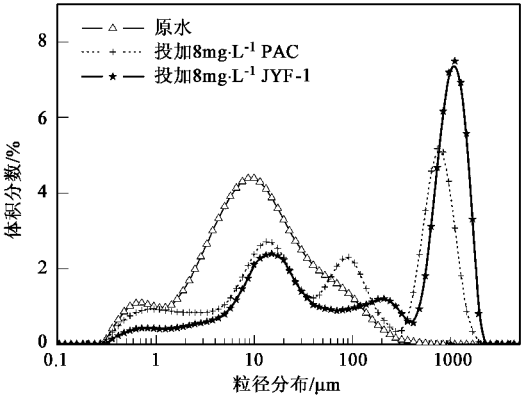


图 6 加药前后粒径分布的变化
Fig.6 Particle distributions of wastewater before and after flocculation

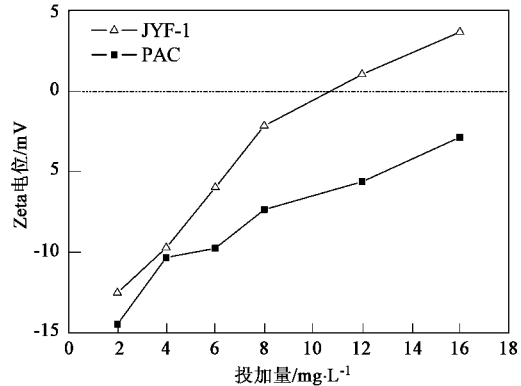


图 7 JYF-1 和 PAC 投加对 Zeta 电位的影响
Fig.7 Variations of Zeta potential according to addition of JYF-1 or PAC

3 讨论

传统的 PAC 与高阳离子电荷密度的 PDMDAAC 复合后,其属性发生了较大变化. 一方面,复合絮凝剂的 Zeta 电位值较 PAC 明显升高,电中和能力增强. 尤其在高 pH 下,PAC 水解产物所带正电荷逐渐

降低,甚至转为负电荷,而此时复合絮凝剂仍能保持较强的正电性^[8].本次絮凝实验中,对浊度和有机物的去除,在相同投量甚至减少投量的情况下,JYF-1的效果都要好于PAC(图2,3).这一结果与JYF-1拥有更强的正电性和电中和能力有直接关系.但同时应注意投药不能过量,否则JYF-1在颗粒表面发生超量吸附,使颗粒所带电荷反号,此时凝聚的胶体颗粒会发生再稳定作用.当JYF-1投量超过12 mg•L⁻¹时,对COD和SCOD的去除效果反而变差,正是胶体颗粒再稳的结果.

另一方面,高宝玉等^[9]通过透射电镜照片发现,复合絮凝剂的枝化度较PAC变大,并推断复合絮凝剂具有更强的吸附架桥能力.本次絮凝实验中也发现,投加JYF-1时,矾花较粗大,下沉快,絮体也明显密实,而且当SOR由0.8 m³•(m²•h)⁻¹上升至1.2 m³•(m²•h)⁻¹后,JYF-1所受的影响远远小于PAC,再次证明了复合絮凝剂的吸附架桥能力要强于PAC.

JYF-1和PAC对非溶解性污染物的去除要好于溶解性污染物的去除(P例外).这主要是由于水体中的非溶解性污染物大多是粒径分布于1~100 μm的超胶体,投加絮凝剂后,大部分的超胶体在电中和作用和吸附架桥作用下,凝聚成为粒径1 000 μm左右的可沉物质(图6).而溶解性污染物(主要是分子和小粒径的胶体物质)则较难在短时间内聚集成可沉物质,无法及时通过下沉得以去除.这也导致了水中污染物的组成在絮凝前后发生了较大变化(表2).出水中各溶解性污染物的比例进一步提高,尤其是BOD/COD由原来的0.23提高到0.53,使得出水的可生化性大幅提高,这将有助于下游河道生态系统对有机物的进一步降解.

表2 絮凝前后各污染物比例变化¹⁾

Table 2 Variations of proportion of contaminations				
分类	SCOD/COD	BOD/COD	STP/TP	STN/TN
原水	0.57	0.23	0.28	0.86
PAC	0.71	0.30	0.13	0.99
JYF-1	0.88	0.53	0.14	0.99

1)JYF-1和PAC投量均为8 mg•L⁻¹

一般认为磷酸盐沉淀是配位基参与竞争的电性中和沉淀,即通过PO₄³⁻与Al³⁺的化学沉淀作用加以去除.但有研究表明在一定条件下,磷酸盐沉淀可能是化学络合起主要作用,而不是以电性中和为主^[14,15].絮凝实验中选用的PAC和JYF-1(主体仍为PAC)都是经过预水解的羟基络合物,而且实验水体

的pH较高,OH⁻浓度较大,因此PO₄³⁻与Al³⁺发生化学沉淀的几率很小.而实验结果表明,絮凝剂投量为4 mg•L⁻¹时,STP的去除率即可达到80%,这说明化学络合作用在磷酸盐的去除中起了主导作用.

絮凝过程对TN的去除效果较差,主要因为TN的大部分是STN,而絮凝剂又无法有效同STN进行化学沉淀或化合络合.这与Poon等的实验结果是一致的^[1],也是CEPT技术目前难以克服的缺点之一.但由于原水中TN含量并不高,所以尽管去除率较低,在经过絮凝处理后,TN仍可接近《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》(GB/T 18921-2002)中TN≤15 mg•L⁻¹的规定.同时TP处理后可以达到0.30 mg•L⁻¹的低浓度,所以水体的富营养化将难以发生.如果继续提高脱氮效果,依照常规的硝化-反硝化工艺将会面临碳源不足的问题(BOD₅/TN<3),这时可以考虑以氨为电子受体的Anammox工艺或Canon工艺^[16,17].

总之,使用JYF-1可以在无需改变现有的设备和工艺的前提下比使用PAC获得更好的出水水质;需要更少的投药量,减少药剂成本;产生更少的污泥,减少污泥处置的成本;缩短沉淀时间,提高进水水量.

4 结论

(1)对于实验选择的纳污河道废水,聚合铝基复合絮凝剂JYF-1比传统的PAC拥有更好的絮凝效果,对pH和SOR的适应能力更强.

(2)JYF-1对非溶解性污染物的去除要好于溶解性污染物的去除,对P的去除效果很好,出水的可生化性大幅提高,但对于N的去除效果较差.

(3)将JYF-1应用于CEPT工艺,可以无需改变现有的设备和工艺,以更少的投药量获得更好的出水水质,产生更少的污泥,提高进水水量,是值得推广应用的高效低价絮凝剂.

参考文献:

[1] Poon C S, Chu C W. The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process[J]. Chemosphere, 1999, 39(10): 1573~1582.

[2] Harleman D R F, Murcott S. The role of physical-chemical wastewater treatment in the Mega-Cities of the developing world[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(4): 75~80.

[3] Aiyuk S, Joyce A, Lutgarde R. Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept[J]. Water Research, 2004, 38: 3031~3042.

[4] Xie W M, Wang Q H, Ma H Z, *et al.* Study on phosphorus removal using a coagulation system[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**: 2623 ~ 2627.

[5] Möller M, Nordmeier E. Polyelectrolyte complexes formed by poly (diallyldimethylammoniumchloride) and oligo (dextranulphate) [J]. *European Polymer Journal*, 2002, **38**: 445 ~ 450.

[6] Marcelo G, Tarazona M P, Saiz E. Conformational properties of poly (diallyldimethyl ammonium chloride) (PDDA) determined by combination of molecular dynamics, rotational isomeric states and Monte Carlo procedures[J]. *Polymer*, 2004, **45**: 1321 ~ 1330.

[7] 田秉晖, 葛晓鹏, 栾兆坤, 等. 不同含量硫酸根和硝酸根作为反离子对聚二甲基二烯丙基铵盐絮凝性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(10): 1330 ~ 1336.

[8] 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.

[9] 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 等. 聚合铝基复合絮凝剂的特性[J]. *环境科学*, 2004, **25**(sup): 70 ~ 73.

[10] 许春华, 高宝玉, 卢磊, 等. 城市纳污河道废水化学强化一级处理的研究[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2006, **41**(2): 116 ~ 120.

[11] Ødegaard H. Optimized particle separation in the primary step of wastewater treatment[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37** (10): 43 ~ 53.

[12] 王东升, 刘海龙, 晏明全, 等. 强化混凝与优化混凝: 必要性、研究进展和发展方向[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(4): 544 ~ 551.

[13] 常青. 水处理絮凝学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 215 ~ 216.

[14] Boisvert J P, To T C, Berrak A, *et al.* Phosphate adsorption in flocculation processes of aluminium sulphate and poly-aluminium-silicate-sulphate[J]. *Water Research*, 1997, **31**(8): 1939 ~ 1946.

[15] Galarnau E, Gehr R. Phosphorus removal from wastewaters: experimental and theoretical support for alternative mechanisms[J]. *Water Research*, 1997, **31**(2): 328 ~ 338.

[16] Fux C, Boehler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**: 295 ~ 306.

[17] Sliekers A O, Derworta N, Campos Gomez J L, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**: 2475 ~ 2482.