

# 混凝-吸附处理黄河水及对氯消毒中氯衰减的影响

战晓,高宝玉\*,刘斌,许春华,岳钦艳

(山东大学环境科学与工程学院,山东省水污染控制与资源化重点实验室,济南 250100)

**摘要:**选用2种无机高分子混凝剂聚合氯化铁(PFC)和聚合氯化铝(PAC)处理黄河水,考察了混凝剂的投加量对浊度、UV<sub>254</sub>、DOC和高锰酸盐指数的去除效果,并结合混凝出水的Zeta电位分析其混凝机制.选择粉末活性炭与混凝联用,研究了混凝剂和吸附剂投加量以及二者的投加顺序对有机物去除效果的影响,并对混凝吸附后出水进行加氯消毒,考察水中残余氯随时间的变化.结果表明,2种混凝剂均有较高的浊度去除率(>90%).PAC对UV<sub>254</sub>、高锰酸盐指数和DOC的去除率分别为29.2%、26.1%和27.9%;PFC对三者的去除率分别为32.3%、23.3%和32.9%.PAC在混凝过程中,电中和作用占主导地位;PFC在混凝过程中,吸附架桥和电中和同时发挥作用.混凝-吸附联用处理黄河水样时,有机物的去除率随混凝剂和吸附剂投加量的增加而升高.先混凝后吸附工艺对UV<sub>254</sub>和DOC的去除效果优于先吸附后混凝工艺.先使用PAC混凝后吸附对UV<sub>254</sub>和DOC的去除率分别为95.2%和99.9%;对于PFC先混凝后吸附对UV<sub>254</sub>和DOC的去除率分别为90.1%和99.9%.但是先投加粉末活性炭能提高矾花的沉降性能,且处理出水在保持持续消毒效果方面优于前者.

**关键词:**混凝;吸附;黄河水;有机物;氯衰减

中图分类号:X522;TU991.2 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1198-08

## Coagulation and Adsorption on Treating the Yellow River and the Impact on Chlorine Decay During Chlorination Process

ZHAN Xiao, GAO Bao-yu, LIU Bin, XU Chun-hua, YUE Qin-yan

(Shandong Key Laboratory of Water Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Two types of inorganic polymer coagulants, polyferric chloride (PFC) and polyaluminum chloride (PAC), were chosen to treat the Yellow River water. Different dosages were investigated in order to investigate the turbidity, UV<sub>254</sub>, DOC and permanganate index removal efficiency and their coagulation mechanisms based on the Zeta potentials. The natural organic matter removal by the combination of coagulation and adsorption with powder activated carbon were analyzed based on different coagulant and adsorbent dosages and dosing orders. The effects of combination of coagulation and adsorption on the residual chlorine decay were analyzed. The results showed that the two coagulants had high turbidity removal efficiency (>90%). The UV<sub>254</sub>, DOC, permanganate index removal efficiency were 29.2%, 26.1% and 27.9% respectively for PAC coagulation and were 32.3%, 23.3% and 32.9% respectively for PFC. Electric neutralization played an important role in the PAC coagulation process while both adsorption bridging and electric neutralization performed when PFC was used. The removal percentage of organic matter increased with the increase coagulant and adsorbent. The adsorption after coagulation process gave the better UV<sub>254</sub> and DOC removal efficiency than the coagulation after adsorption. The UV<sub>254</sub> and DOC removal efficiency were 95.2% and 99.9% for PAC coagulation after adsorption and were 90.1% and 99.9% for PFC coagulation first. But adding powder activated carbon can improve floc settlement performance and maintained persistent disinfection effect.

**Key words:** coagulation; adsorption; Yellow River; organic matter; chlorine decay

地表水中天然有机物(natural organic matters, NOM)会使水产生色度和臭味<sup>[1]</sup>,降低水处理工艺的处理效果,对人体健康存在潜在的毒害作用.而且NOM在消毒过程中易产生三氯甲烷类、卤乙酸等对人类有致癌作用的消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)<sup>[2,3]</sup>.因此对地表水中有机物的去除日益成为大家关注的焦点<sup>[4]</sup>.

常规的“混凝-沉淀-过滤-加氯消毒”给水处理工艺至今仍被世界上大多数国家所采用,是以地表水为水源的水处理工艺,它能有效去除水中的浊度

和细菌,但对有机物的去除能力有限<sup>[5~7]</sup>,且去除过程主要集中在混凝-沉淀阶段<sup>[8]</sup>,因此对有机物的去除需要结合其他工艺流程进行综合优化考虑.

活性炭很早就被用于常规处理中强化控制致味、致嗅化合物,它是DBPs有机前驱物的一种有效

收稿日期:2009-07-18;修订日期:2009-09-02

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ06B05);“十一五”国家水污染控制与治理重大专项(2008ZX07422-003-02)

作者简介:战晓(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术. E-mail:zhixiao2007@126.com

\* 通讯联系人. E-mail:bygao@sdu.edu.cn

吸附剂,对有机物特别是小分子量有机物的吸附能力较强<sup>[9,10]</sup>。将活性炭吸附与混凝联用,可在很大程度上弥补了混凝阶段对 NOM 中相对分子质量小的有机物去除率不高的缺陷<sup>[11]</sup>,也是控制三卤甲烷等 DBPs 最具可行性的方法<sup>[12]</sup>。目前,对于混凝和活性炭吸附联用的处理工艺已经有较多的研究<sup>[13~17]</sup>,但是混凝吸附联用顺序对 NOM 的去除及其对加氯消毒过程中氯衰减的影响研究较少。

本实验选取 2 种无机高分子混凝剂聚合氯化铝 (PAC) 和聚合氯化铁 (PFC),研究其对黄河水的处理效果,并与粉末活性炭吸附联用,讨论了混凝吸附联用工艺顺序对 NOM 的去除效果及对加氯消毒过程中氯衰减的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器及材料

#### 1.3.1 混凝剂的制备

取一定量的  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  固体于烧杯中,加入约 30 mL 去离子水,磁力搅拌至完全溶解,缓慢加入  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  粉末至预定碱化度 ( $[\text{OH}^-]/[\text{Fe}^{3+}]$ )。待泡沫消失后,按照磷、铁摩尔比为 0.08 的比例加入稳定剂  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  粉末,继续搅拌至完全溶解,制得 PFC 溶液,静置熟化 24 h,备用。

将  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和无水  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  固体粉末分别研碎,按预定的碱化度 ( $[\text{OH}^-]/[\text{Al}^{3+}]$ ) 充分混合,将混合粉末在 30 min 内缓慢加入到盛有 100 mL 去离子水、处于 80 °C 水浴中的反应器内。反应过程中快速搅拌,至溶液为无色透明状时反应结束,制得 PAC 溶液,静置熟化 24 h,备用。混凝剂的基本性质见表 2。

表 2 混凝剂基本化学指标

Table 2 Characteristics of coagulants

混凝剂	碱化度	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量/%	pH
PFC	0.5	10.0	0.70 ± 0.10
PAC	2.0	4.5	2.85 ± 0.10

#### 1.3.2 吸附剂的制备

实验用粉末活性炭由天津市广成化学试剂有限公司生产的活性炭(粉)研磨而成。将活性炭(粉)用

ZR4-6 型混凝实验搅拌机,2100P 型便携式液体浊度仪, HY-4 调速多用振荡器, JH-752 型紫外/可见分光光度计, Zetasizer 3000Hsa 型 Zeta 电位分析仪, HI93711 余氯/总氯浓度测定仪, TOC-VCPH 型 TOC 测定仪, FA2004N 电子天平。

$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (AR),  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (AR), 无水  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (AR),  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (AR), 无水乙醇 (AR), HCl (AR), NaOH (AR),  $\text{KMnO}_4$  (AR),  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  (GR), NaClO (AR), 活性炭粉 (AR); 实验用水均为去离子水。

### 1.2 实验水样

实验水样取自黄河济南泺口段。黄河水为济南市的主要饮用水水源,影响其水质的主要污染物为泥沙和微量有机物。将水样静置 24 h 后,取上清液进行烧杯实验。上清液水质如表 1 所示。

### 1.3 实验方法

表 1 实验水样水质

Table 1 Physicochemical characteristics of test water

温度/°C	浊度/NTU	pH 值	DOC/mg · L <sup>-1</sup>	UV <sub>254</sub>	高锰酸盐指数/mg · L <sup>-1</sup>
15.0 ~ 20.0	10.1 ~ 15.6	8.07 ~ 8.42	2.058 ~ 2.979	0.062 ~ 0.071	2.30 ~ 2.44

研钵磨细,过 100 目筛后用去离子水冲洗,烘干,放在干燥器内备用。实验均用同一批粉末炭样。

#### 1.3.3 混凝实验

于快速搅拌下 (200 r/min) 向 1 000 mL 水样中加入一定量的混凝剂 (以  $\text{Fe}^{3+}$  或  $\text{Al}^{3+}$  计),继续搅拌 1 min 后慢速搅拌 (40 r/min) 15 min,静沉结束后,取上清液测定相关水质指标。

#### 1.3.4 吸附实验

取原水水样或者混凝出水于具塞锥形瓶中,加入一定量的粉末活性炭,在 25 °C, 150 r/min 条件下振荡 2 h,然后过滤并取滤液测相关水质指标。

#### 1.3.5 先吸附后混凝效果实验

于快速搅拌下 (200 r/min) 向 1 000 mL 水样中加入一定量的粉末活性炭,快搅 2 h 后加入一定量的混凝剂,进行混凝实验。静沉结束后取上清液测相关水质指标。

#### 1.3.6 氯消毒实验

将 NaClO 溶液稀释成有效氯 (以  $\text{Cl}_2$  计) 含量为 1.5 g/L 的 NaClO 储备液,取 500 mL 处理后出水于棕色瓶中,投加 2 mg/L NaClO 储备液,用玻璃塞封口。测定不同时间水样的游离性余氯浓度。

#### 1.3.7 氯衰减模型

氯衰减一级模型是所研究氯衰减模型中最简单

也是迄今为止应用最广的模型之一<sup>[18]</sup>. 本实验选择一级模型对氯消毒实验中余氯数据进行数据拟合, 数据处理如下:

$$dc/dt = -K_b c \quad (1)$$

积分可得:

$$c_t = c_0 \exp(-K_b t) + b = c_0 \exp(-t/k_b) + b \quad (2)$$

式中  $c_t$  为  $t$  时刻的氯质量浓度;  $c_0$  为初始时刻氯质量浓度;  $K_b$  为水中氯衰减系数  $k_b$  为其倒数, 与氯衰

减速度成反比;  $b$  为实验结束时的游离性余氯量;  $t$  为时间.

## 2 结果与讨论

### 2.1 投加量对混凝效果的影响

在原水 pH 下进行混凝实验, 考察 PFC 和 PAC 对  $UV_{254}$ 、高锰酸盐指数、DOC 和浊度的去除效果, 实验结果见图 1.

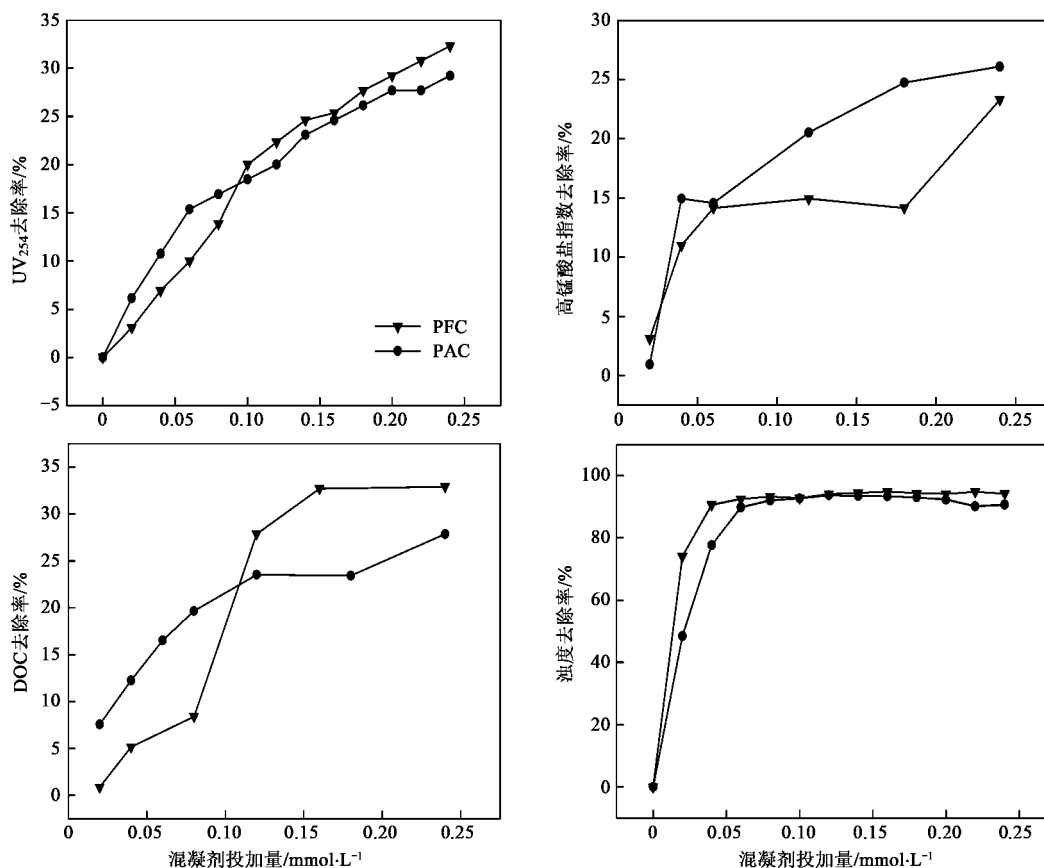


图1 混凝剂投加量对混凝效果的影响

Fig. 1 Effects of coagulant dosages on coagulation

由图 1 可见, 随着混凝剂投加量的增加,  $UV_{254}$ 、高锰酸盐指数和 DOC 的去除率随之升高. 在低投加量下, PAC 对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除效果较好, 在高投加量下, PFC 对二者有较高的去除率. 在实验投加量范围内, PAC 对高锰酸盐指数的去除率高于 PFC 对其去除率. 混凝剂投加量为 0.24 mmol/L 时, PAC 对  $UV_{254}$ 、高锰酸盐指数和 DOC 的去除率分别为 29.2%、26.1% 和 27.9%; PFC 对三者的去除率分别为 32.3%、23.3% 和 32.9%. 随着投加量的增加, 2 种混凝剂的浊度去除率迅速增大且最后趋于稳定. 当投药量  $> 0.08$  mmol/L 时, 2 种混凝剂的浊

度去除率均能达到 90% 以上, 剩余浊度  $< 1$  NTU. PAC 投加量  $> 0.18$  mmol/L 时, 剩余浊度略有上升.

混凝出水的 Zeta 电位随投药量的变化如图 2 所示. 结果表明, 随着投加量的增加, 2 种混凝体系的 Zeta 电位均呈现逐渐升高的趋势. PFC 混凝体系 Zeta 电位上升缓慢, 在投加量范围内没有达到等电点, 而 PFC 对  $UV_{254}$ 、高锰酸盐指数、DOC 和浊度的去除率却随投加量的增加明显升高. 由此可知电中和作用并不是 PFC 混凝的主要作用机制, 吸附架桥在混凝过程中发挥了重要作用. PAC 混凝体系 Zeta 电位随着投药量的增加明显上升, 在等电点附近达

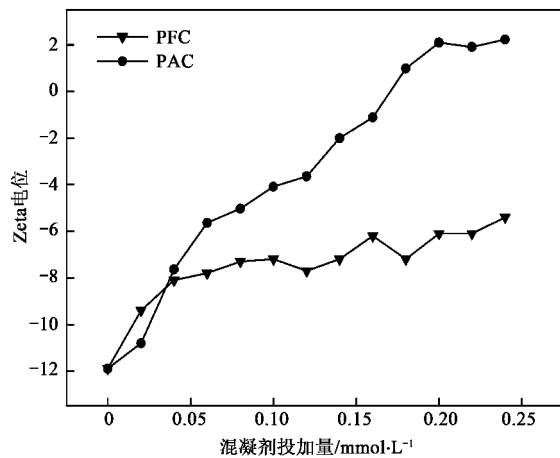


图2 混凝剂投加量对混凝效果的影响

Fig.2 Effects of coagulant dosages on Zeta potentials

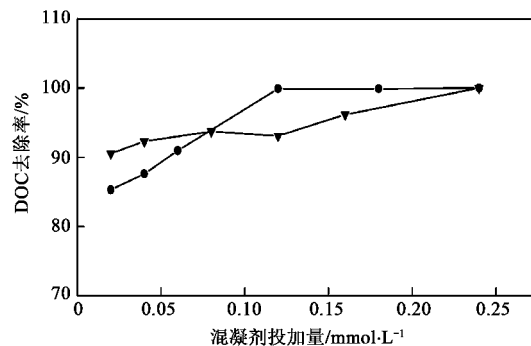
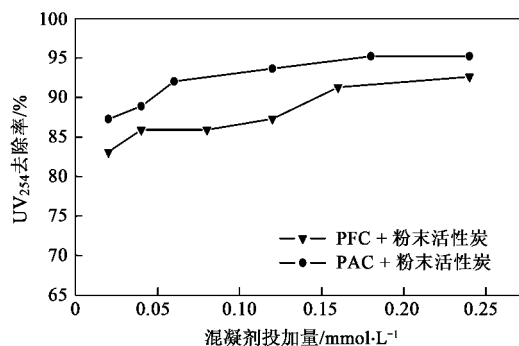


图3 混凝剂投加量对混凝吸附效果的影响

Fig.3 Effects of coagulant dosages on combination of coagulation and adsorption

由图3可以看出,混凝吸附联用对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率较高,随着混凝剂投药量的增加,去除率缓慢增加. PAC 与粉末活性炭联用对  $UV_{254}$  的去除率较高. 在较低的混凝剂投加量范围内, PFC 与粉末活性炭联用对 DOC 的去除率高于 PAC 与吸附联用对 DOC 的去除率;但在高投加量范围内,情况相反. 混凝剂投加量为 0.02 mmol/L 时, PFC 混凝与粉末活性炭吸附后,  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别为 83.1% 和 90.6%, 单独使用 PFC, 二者去除率仅为 3.1% 和 0.8%; 使用 PAC 与粉末活性炭处理水样,  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别为 87.1% 和 85.3%, 单独使用 PAC 对二者的去除率仅为 6.2% 和 7.6%. 由此可见, 混凝与粉末活性炭吸附联用, 可以大大提高对有机物的去除效果, 减少混凝剂的投加量.

### 2.3 吸附剂投加量对混凝吸附联用的影响

在原水 pH 值下, 分别投加 0.06 mmol/L 的 PAC 和 0.08 mmol/L 的 PFC, 混凝后出水进行吸附实验,

到了对浊度的最佳去除效果, 这说明混凝过程中, 电中和作用占主导地位, 使其与水中带负电荷的大分子有机物质结合能力强, 使之易于除去, 这也可能是低投加量下 PAC 混凝体系对  $UV_{254}$ 、DOC 和高锰酸盐指数去除率高于 PFC 的原因. 随着投加量的继续增加, Zeta 电位呈现正值, 水中胶体表面电荷出现反转, 增加了絮体之间的排斥力, 使得絮体在水中重新稳定, 从而引起浊度去除率下降.

### 2.2 混凝剂投加量对混凝吸附联用的影响

在原水 pH 值下, 固定粉末活性炭的投加量为 0.2 g/L, 选用不同投加量的 PAC 和 PFC 进行混凝吸附联用实验, 研究混凝剂投加量对混凝吸附联用效果的影响, 实验结果见图 3.

研究粉末活性炭投加量对黄河水中有机物的去除效果, 实验结果如图 4 所示.

结果表明, 随着粉末活性炭投加量的增加, 混凝吸附体系对水中有机物去除率增加. 粉末活性炭投加量为 0.2 g/L 时, PFC 与其联用对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别为 89.7% 和 97.2%; PAC 与其联用对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别为 89.2% 和 98.3%. 混凝工艺主要去除相对分子质量 > 6 000 的有机物, 而粉末活性炭去除的有机物主要集中在相对分子质量 < 6 000 的部分, 两者重叠性较小<sup>[8]</sup>, 故联用对有机物有较好的去除率.

### 2.4 混凝和吸附联用顺序的影响

固定粉末活性炭的投加量为 0.2 g/L, 分别采用先混凝后吸附 (PAC + 粉末活性炭 / PFC + 粉末活性炭) 和先吸附后混凝 (粉末活性炭 + PAC / 粉末活性炭 + PFC) 的方法处理黄河水, 研究混凝吸附联用顺序对黄河水中有机物的去除效果, 实验结果如图 5

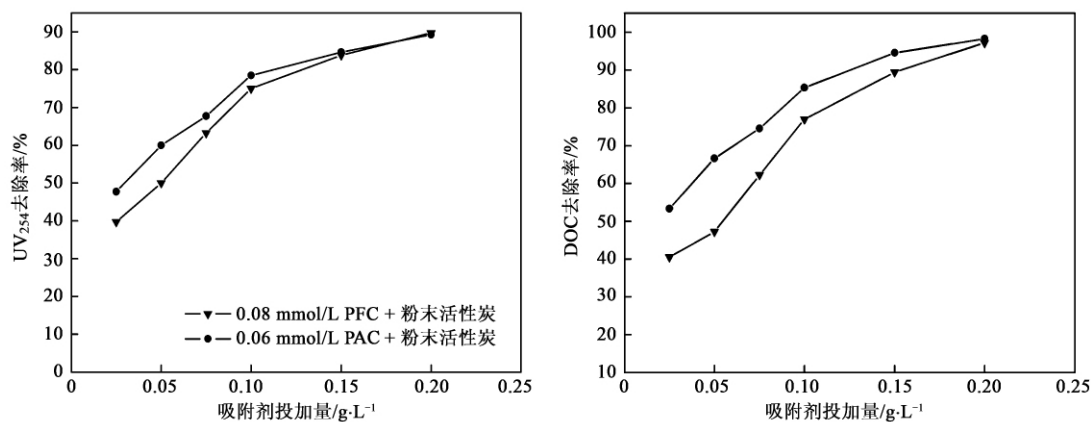


图4 吸附剂投加量对混凝吸附效果的影响

Fig. 4 Effects of adsorbent dosages on combination of coagulation and adsorption

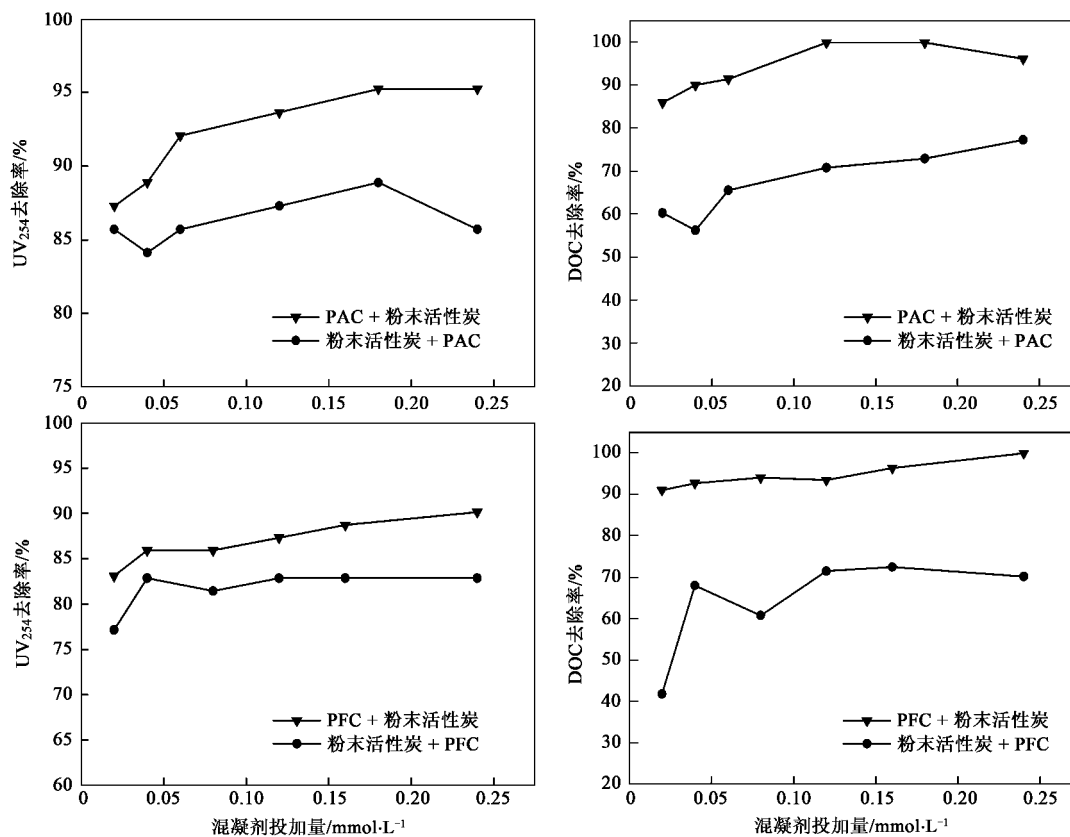


图5 混凝吸附联用顺序对处理效果的影响

Fig. 5 Effects of combination orders on treatment efficiency

示。随着混凝剂投加量的增加 2 种工艺对有机物的去除率逐渐上升。无论使用 PFC 还是 PAC 先混凝后吸附工艺对 UV<sub>254</sub> 和 DOC 的去除效果优于先吸附后混凝工艺的去除效果。这可能是因为混凝去除了水中大分子物质<sup>[19]</sup>, 减少了对后续粉末活性炭吸附孔道的堵塞, 活性炭吸附小分子有机物质的能力得到了充

分发挥。这也弥补了常规处理工艺对低分子质量有机物去除率较低的不足<sup>[20]</sup>。先吸附后混凝过程, 由于水中大分子有机物质的存在对吸附过程具有堵塞孔道的作用, 使得活性炭的吸附效果不能充分发挥。

## 2.5 先吸附后混凝对絮体沉降性能的影响

絮体沉降性能的优劣对于“混凝-沉淀”工艺

的处理效果具有重要影响,良好的沉降性能可以减少沉降时间,降低水力停留时间,提高沉淀池的处理能力. 固定混凝剂投加量为 0.24 mmol/L, 吸附剂投

加量为 0.2 g/L, 选用混凝和先吸附后混凝过程进行烧杯实验, 测定静置沉降阶段上清液的剩余浊度随时间的变化, 实验结果如图 6 所示.

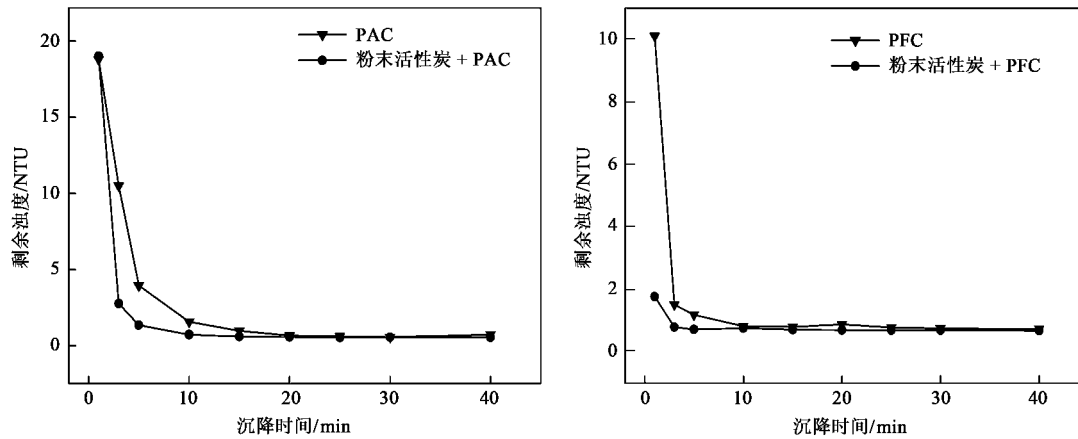


图 6 静置沉降阶段剩余浊度随时间变化情况

Fig. 6 Variety of residual turbidity with time in the settlement

从图 6 可以看出,先吸附后混凝和单独混凝后上清液的剩余浊度均随时间的延长逐渐降低. 粉末活性炭 + PFC 体系、粉末活性炭 + PAC 体系分别沉降 3 min 和 10 min 后, 上清液浊度可降至 1 NTU 以下. 而单独使用 PFC 和 PAC 混凝, 浊度降至 1 NTU 以下时, 分别需要 10 min 和 15 min. 因此, 投加粉末活性炭使絮体沉降性能较单独混凝具有一定的优势, 所生成的絮体可以在相对较短的时间内达到良

好的沉降效果. 这可能是由于粉末活性炭的吸附性, 在混凝过程中起到助凝作用, 为水中有机物提供了一个附着点, 从而提高了矾花的沉淀性能<sup>[21]</sup>.

## 2.6 混凝和吸附顺序对消毒过程中氯衰减的影响

为了研究混凝和吸附联用对于加氯消毒过程中氯衰减的影响, 对单独混凝、先混凝后吸附、先吸附后混凝出水进行氯消毒实验, 测定游离性余氯随时间的变化, 根据式(2)对数据进行拟合, 结果见图 7.

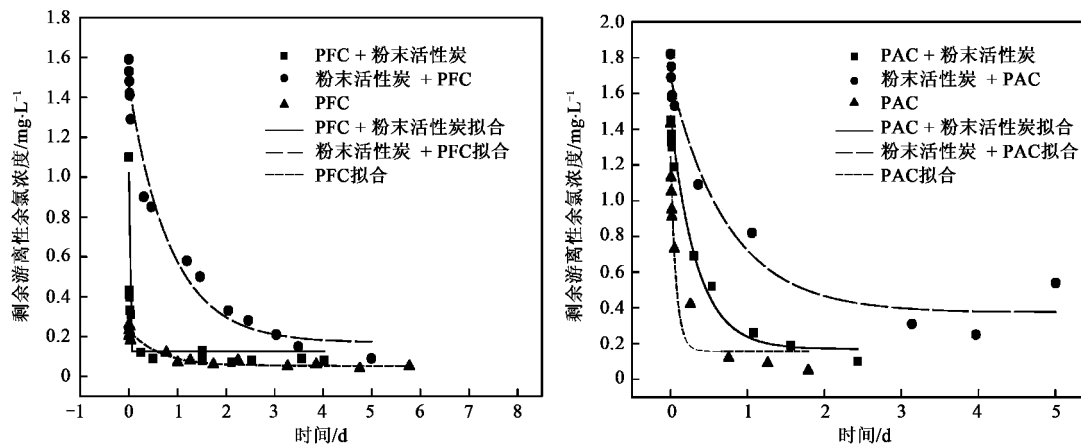


图 7 氯消毒衰减曲线拟合

Fig. 7 Model fitting to experimental chlorine decay data

从图 7 可以看出, 在开始的 12 h 内, 氯的衰减速度极快, 之后衰减速度减缓, 最终余氯量趋于稳定. 水中消耗氯的有机物可分为快速还原剂和慢速还原剂<sup>[22-23]</sup>, 在起初很短的时间内, 快速还原剂与氯完全反应, 慢速还原剂部分反应, 即为图中曲线的

快速下降阶段, 之后, 只有慢速还原剂与氯反应, 随着慢速还原剂和氯的消耗, 反应速度越来越慢, 当慢速反应剂和氯的浓度比超过阈值后, 反应停止, 余氯浓度不再变化, 即图中曲线趋于平衡.

表 3 是消毒数据拟合公式及相应参数. 先吸附

后混凝出水进行消毒处理时,游离性余氯衰减  $k_b$  值大于先混凝后吸附出水的  $k_b$  值,即游离性余氯衰减速度前者低于后者.由于游离性余氯成分较为单一,可作为衡量消毒效果的指标之一<sup>[24]</sup>,而且卤代烃浓度含量和余氯变化正好成反比,余氯含量越少,卤代烃的含量越多<sup>[25,26]</sup>.混凝和吸附联用处理出水进行氯消毒后,最终游离性余氯含量比较为:粉末活性炭 + PFC > PFC + 粉末活性炭 > PFC;粉末活性炭 + PAC > PAC + 粉末活性炭 > PAC.因此采用 PFC

和 PAC 进行混凝处理时,与粉末活性炭吸附联用可以保持持续的消毒效果.这是因为联用处理比单独混凝去除有机物多,因而可与氯反应的有机物量减少,能够生成的消毒副产物量减小,最终游离性余氯含量较多;单独混凝后出水有机物含量较多,耗氯量增加,最终游离性余氯含量较少,消毒副产物的生成量增加,水质的化学稳定性较差.而且先进行粉末活性炭吸附后进行混凝处理,比先混凝后吸附在保持消毒效果方面更具优势.

表3 混凝吸附出水消毒后余氯拟合方程及参数

Table 3 Fitting equations and parameters of residual chlorine after coagulation and adsorption treatment

混凝剂和吸附剂	游离性余氯拟合方程	$R^2$	$k_b$	$b$
PFC	$y = 0.18013 \exp(-x/0.62832) + 0.05303$	0.94213	0.62832	0.05303
PFC + 粉末活性炭	$y = 0.96344 \exp(-x/0.00916) + 0.12598$	0.88890	0.00916	0.12598
粉末活性炭 + PFC	$y = 1.28817 \exp(-x/0.86610) + 0.16988$	0.97790	0.86610	0.16988
PAC	$y = 1.10171 \exp(-x/0.07057) + 0.15695$	0.94039	0.07057	0.15695
PAC + 粉末活性炭	$y = 1.30634 \exp(-x/0.33997) + 0.16950$	0.95124	0.33997	0.16950
粉末活性炭 + PAC	$y = 1.31181 \exp(-x/0.75355) + 0.37443$	0.96779	0.75355	0.37443

### 3 结论

(1) 2种混凝剂在处理黄河水时,具有较高的浊度去除率.在较低投加量下,PAC对UV<sub>254</sub>和DOC的去除效果较好,在高投加量下,PFC的效果较好;在实验投加量范围内,与PFC相比,PAC对高锰酸盐指数去除率较高.PAC混凝过程中,电中和作用占主导地位;而PFC混凝过程中,吸附架桥和电中和同时发挥作用.

(2) 混凝-吸附联用工艺处理水样时,有机物的去除率随着混凝剂和吸附剂投加量的增加而升高.

(3) 先混凝后吸附工艺对UV<sub>254</sub>和DOC的去除效果优于先吸附后混凝工艺,但是投加粉末活性炭能提高絮体的沉降性能.

(4) 先吸附后混凝出水进行消毒处理时,在保持持续消毒效果和减少消毒副产物生成量方面优于先混凝后吸附工艺.

#### 参考文献:

- [1] Edwards G A, Amirtharajah A. Removing colour caused by humic acids[J]. JAWWA, 1985, 77: 50-57.
- [2] Kavanaugh M C. Modified coagulation for improved removal of trihalomethane precursors[J]. JAWWA, 1978, 70: 613-620.
- [3] Gallard H, Gunten U V. Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation[J]. Water Res, 2002, 36(1): 65-74.
- [4] Sharp E L, Parsons S A, Jefferson B. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water

treatment[J]. Sci Total Environ, 2006, 363(1-3): 183-194.

- [5] 王占生,刘文君. 微污染源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 9-18.
- [6] 何斐,李磊,徐炎华. 强化混凝去除微污染源水中有机物的研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(1): 119-123.
- [7] 戴之荷. 受污染水处理技术在我国的应用[J]. 给水排水, 2002, 28(1): 8-12.
- [8] 刘成,黄廷林,赵建伟. 混凝-粉末活性炭吸附对不同分子量有机物的去除[J]. 净水技术, 2006, 25(1): 31-33.
- [9] 李利霞,王红果,吕利光. 饮用水传统净化方法研究进展[J]. 能源环境保护, 2009, 23(1): 30-33.
- [10] 罗金鸣. 简析活性炭在水处理中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2008, 1: 93, 95.
- [11] 施周,张绍辉. 强化混凝去除水中天然有机物(NOM)的研究[J]. 南华大学学报(理工版), 2004, 18(2): 6-9.
- [12] 陈颖敏,左俊利. 饮用水中氯消毒副产物的污染与控制[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(3): 17-18.
- [13] 刘恒,叶劲,肖克艰. 粉末活性炭与碱式氯化铝混凝处理微污染源水质的研究[J]. 离子交换与吸附, 2006, 22(1): 89-94.
- [14] 魏守强,刘瑛,史敬伟,等. 混凝及其与粉末活性炭联用去除水中腐殖酸的研究[J]. 当代化工, 2003, 32(4): 204-207.
- [15] 聂小保,张鹏. 强化混凝与活性炭联用处理赣江微污染源水试验[J]. 环境工程, 2007, 25(3): 90-91.
- [16] Tomaszewska M, Mozia S, Morawski A W. Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC[J]. Desalination, 2004, 161(1): 79-87.
- [17] Duan J, Wilson F, Graham N, et al. Adsorption of humic acid

- by powdered activated carbon in saline water conditions [J]. *Desalination*, 2003, **151**(1): 53-66.
- [18] 周建华, 赵洪宾, 薛罡. 配水管网中与有机物反应的余氯衰减动力学模型[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 45-49.
- [19] Haberkampa J, Ruhl A S, Ernst M, *et al.* Impact of coagulation and adsorption on DOC fractions of secondary effluent and resulting fouling behavior in ultrafiltration [J]. *Water Res*, 2007, **41**(17): 3794-3802.
- [20] 王福连, 高乃云, 徐斌, 等. 颗粒活性炭吸附去除黄浦江原水中有机物的研究[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(11): 1-5.
- [21] 姜瑞雪, 王龙, 张丽. 强化混凝在微污染水源水处理中的应用[J]. *水资源保护*, 2006, **22**(5): 68-70.
- [22] Kastle G J, Fisher I H, Jegatheesan V. Evaluation of chlorine Decay kinetics expressions for drinking water distribution systems modeling [J]. *J Water SRT-Aqua*, 1999, **48**(6): 219-226.
- [23] 李星, 杨艳玲, 彭永臻, 等. 高锰酸钾与氯联用预处理控制三卤甲烷形成的效能与机理[J]. *给水排水*, 2005, **31**(10): 24-27.
- [24] 赵进沛, 李秀芹. 饮水消毒中的有效氯和余氯及其含量测定[J]. *职业与健康*, 2008, **24**(20): 2213-2214.
- [25] 吴卿, 赵新华. 管网饮用水三氯甲烷检测与影响因素分析[J]. *中国公共卫生*, 2006, **22**(5): 587-588.
- [26] 叶必雄, 王五一, 杨林生, 等. 饮用水中卤乙酸的研究进展[J]. *卫生研究* 2006, **35**(3): 373-376.