

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

水体中Cr(VI)对不同混凝剂混凝过程的影响

高倩^{1,2}, 张大为^{1,2}, 徐慧^{2*}, 徐建坤³, 张崇森¹, 王东升²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 烟台永旭环境保护有限公司, 烟台 264006)

摘要: 研究了工业废水中Cr(VI)在不同颗粒物浓度影响下对不同铝形态混凝剂的影响过程, 通过考察浊度去除率以及出水余铝、余铬浓度甄别了混凝效率, 并利用混凝过程中剩余pH值、Zeta电位以及絮体性质揭示水中Cr(VI)在不同浊度下的混凝机制。结果表明, 在低浊度条件下, Cr(VI)对高聚合态 Al_b 的混凝过程具有较大影响, 而对低聚合态 Al_o 无明显影响; 在高浊度条件下, 水中浊度较高时颗粒物会吸附部分Cr(VI)从而降低其与 Al_b 之间的作用。 Al_b 在混凝中主要发挥电中和作用, 其对颗粒的脱稳和絮体的再生具有重要的作用, Al_o 水解形成的部分 Al_o 在混凝中主要发挥架桥网捕作用, 其对絮体的生产和强度因子具有重要作用。同时Cr(VI)的存在会增强 Al_{13} 絮体的强度因子, 但其消耗了部分正电荷会导致絮体恢复因子降低。

关键词: 混凝; Cr(VI); 铝形态; 电中和作用; 絮体破碎再生

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3704-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710034

Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants

GAO Qian^{1,2}, ZHANG Da-wei^{1,2}, XU Hui^{2*}, XU Jian-kun³, ZHANG Chong-miao¹, WANG Dong-sheng²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Yantai Yongxu Environment Protection Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: In this study, the effect of Cr(VI) in industrial wastewater on the coagulation of different aluminum forms under the influence of different particle concentrations was investigated. The coagulation efficiency was determined by examining the removal rate of turbidity, residual aluminum, and residual chromium and by using the residual pH value, zeta potential, and floc properties of the coagulation to reveal the coagulation mechanism of Cr(VI) in water under different turbidities. The experimental results show that under low turbidity conditions, Cr(VI) greatly influences the coagulation process of highly polymerized Al_b , yet has no obvious effect on oligomeric Al_o . Under high turbidity conditions, particulate matter will adsorb part of the Cr(VI) in high turbidity water, thus reducing its interaction with Al_b . The main role Al_b plays in coagulation is charge neutralization. It plays the same role in the stability of the particles and floc regeneration. The main role of Al_o formed by hydrolysis of Al_o is bridging effects and sweep flocculation, which plays an important role in floc production and strength factor. At the same time, the existence of Cr(VI) enhances the strength factor of Al_{13} flocs, but the consumption of some of the positive charge will lead to a reduction in the floc recovery factor.

Key words: coagulation; Cr(VI); aluminum species; electric neutralization; fragmentation regeneration

随着现代工业的不断发展, 在冶金、电镀、涂料、机械、制革、印染等行业中产生的含铬废水大量增加。含铬废水如不经妥善处理而直接排入自然水体中, 将对人体及生态环境产生巨大的危害^[1]。目前关于含铬废水的处理主要包括化学还原沉淀法、吸附法、离子交换法、电解法和生物法^[2-5]等。其中化学还原沉淀法以其工艺简单、运行稳定可靠等优点已成为处理含铬废水的主要工艺。该方法处理含铬废水主要包括氧化还原及混凝沉淀两个过程, 其中混凝沉淀过程的效率是处理含铬废水的关键因素。

影响混凝沉淀过程的因素主要包括有机物性质、混凝剂种类及投加量、电荷特性、水体阴阳离子和pH值等^[6-8], 其中混凝剂种类作为混凝工艺的核心直接决定了混凝效率^[9]。目前, 水厂中常用

聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂, 并且大量研究曾表明PAC中的铝形态对混凝过程具有重要的影响^[10-13]。Cao等^[14]在使用不同铝形态混凝剂调理废水污泥时发现, 含有较高 Al_b 和 Al_o 的PAC产品对于污泥中蛋白质类有机物的去除具有较好的效果, 并且有利于改善污泥的可过滤性。张大为等^[12]在研究铝形态对藻类混凝-超滤过程的影响中发现, Al_o 对表面具有凹陷的颗粒物混凝过程具有重要的作用, 同时具有较大强度因子的絮体形成的滤饼层能有效改善膜污染。然而, 针对含铬废水中Cr(VI)

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51338010); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51608515); 国家自然科学基金项目(21677156)

作者简介: 高倩(1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为水的再生利用, E-mail: gaoqian7879@163.com

* 通信作者, E-mail: huixu@rcees.ac.cn

对不同铝形态混凝剂混凝过程的研究却较少. 在含铬废水的处理中, 通过选择合适的混凝剂处理含铬水体能够达到良好的絮凝效果, 不仅能够减轻后续处理工艺的压力, 同时也能节约水处理成本. 因此, 水中Cr(VI)对于不同铝形态混凝过程的影响有待进一步研究.

本实验通过使用实验室制备的高效 Al_{13} 絮凝剂和传统 AlCl_3 混凝剂来处理含铬废水, 并且研究了含铬废水在不同颗粒物浓度(10、20 和 40NTU)条件下的混凝过程. 通过考察浊度去除率以及出水余铝、余铬浓度来甄别混凝效率, 同时利用混凝过程中剩余 pH 值、Zeta 电位以及絮体性质揭示了水中 Cr(VI)在不同浊度下的混凝机制, 以期对含铬废水的混凝沉淀过程提供理论指导, 保证出水水质.

1 材料与方法

1.1 实验试剂

1.1.1 高岭土悬浊液的配置

称取适量粒径为 $3.5\ \mu\text{m}$ 高岭土固体颗粒(北京旭东化学试剂厂)于去离子水中, 并用 $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液调节悬浊液 pH 值至 7.5. 将此悬浊液置于磁力搅拌器上搅拌 12 h 后静置 5.0 h. 倾倒上清液并用重量分析法对悬浊液中高岭土的颗粒浓度进行测定.

1.1.2 实验水样配置

根据实验需要使用高岭土悬浊液来调节水样浊度分别为 10、20 和 40NTU, 使用 K_2CrO_4 溶液调节水体 Cr(VI) 浓度为 $8\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 并以不加 Cr(VI) 的水样进行对比来考察 Cr(VI) 对混凝过程的影响. 水样加入 $5.0\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaNO_3 和 $4.0\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 分别提供离子强度和碱度, 利用盐酸($0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和氢氧化钠($0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)溶液调节 pH = 8.5. 本实验所用试剂均为分析纯.

1.1.3 实验所用混凝剂配置

本实验选用 AlCl_3 和 Al_{13} 两种铝系混凝剂, 其制备方法如文献[15]所述. 采用 Ferron 络合比色法对混凝剂中铝形态分布进行测定^[12], 该方法将聚合铝中铝的形态分为: 单体态 Al_a (反应时间 < 1.0 min), 聚合态 Al_b (反应时间在 1 ~ 120 min), 聚合态 Al_c (不反应). 两种铝系混凝剂的 Ferron 表征结果见表 1.

由表 1 可知, 实验所用混凝剂有不同的铝形态分布, 其中 AlCl_3 主要成分为 Al_a (94.85%), Al_{13} 主要成分为 Al_b (95.94%), 因此选用这两种混凝剂可

以有效地表征铝形态对混凝过程的影响.

表 1 实验所用混凝剂的铝形态分布/%

Table 1 Al species for coagulants used in this study/%			
混凝剂	Al_a	Al_b	Al_c
AlCl_3	94.85	2.59	2.56
Al_{13}	2.93	95.94	1.13

1.2 混凝实验

本实验选择混凝剂投加量为 $0.02 \sim 0.24\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 Al 计), 混凝实验在六联混凝搅拌机(武汉梅宇有限公司)上进行, 混凝程序为: 快速搅拌 ($250\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 30 s, 加入混凝剂后搅拌 ($200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 90 s, 慢速搅拌 ($40\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 10 min, 最后沉淀 30 min, 取上清液下 2.0 cm 处测量浊度、余铝及余铬等指标.

1.3 分析方法

混凝过程中 Zeta 电位采用 Zeta 电位仪 (zetasisizer 2000, Malvern, UK) 测定, 该仪器测试范围为 $\pm 150\ \text{mV}$. 混凝出水中余铝及余铬使用电感耦合等离子体质谱仪测定 (ICP-MS, OPTIMA-2000, PerkinElmer, USA), 本法最高检测限为 $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 混凝出水中剩余浊度采用浊度仪测定 (2100N, Turbidimeter, HACH, USA). 为了更好地了解混凝剂的作用机制, 本实验使用马尔文激光粒度仪 (马尔文 2000, 测试范围为 $0.2 \sim 2000\ \mu\text{m}$) 对絮体的形成过程进行了监测, 实验采用 D_{50} (μm) 来表示絮体的平均粒径. 并针对已形成的絮体增大搅拌强度至 $200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ (持续 5.0 min) 使絮体破碎, 再以 $40\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速 (持续 10 min) 使絮体再生, 计算絮体的强度因子和恢复因子^[16-19].

1.4 实验所需其他仪器:

pH 计 (MP220, pH Meter, Mettler-Toledo, Switzerland); 扫描电子显微镜 (HITACHI SU8020 FE-SEM, Japan); 高速冷冻离心机 (Aantij26XP, Beckman Coulter, Inc. USA).

2 结果与讨论

2.1 混凝剂投加量对混凝过程的影响

实验首先考察了浊度为 10NTU 条件下, 混凝剂投加量和 Cr(VI) 对浊度去除率的影响, 实验结果见图 1(a).

由图 1 发现, 4 种实验条件下浊度去除率均随着混凝剂投加量的增加而增加, 并且在投加量大于 $0.08\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 继续增大投加量, 浊度去除率无明显增加. 当投加量低于 $0.08\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 且体系

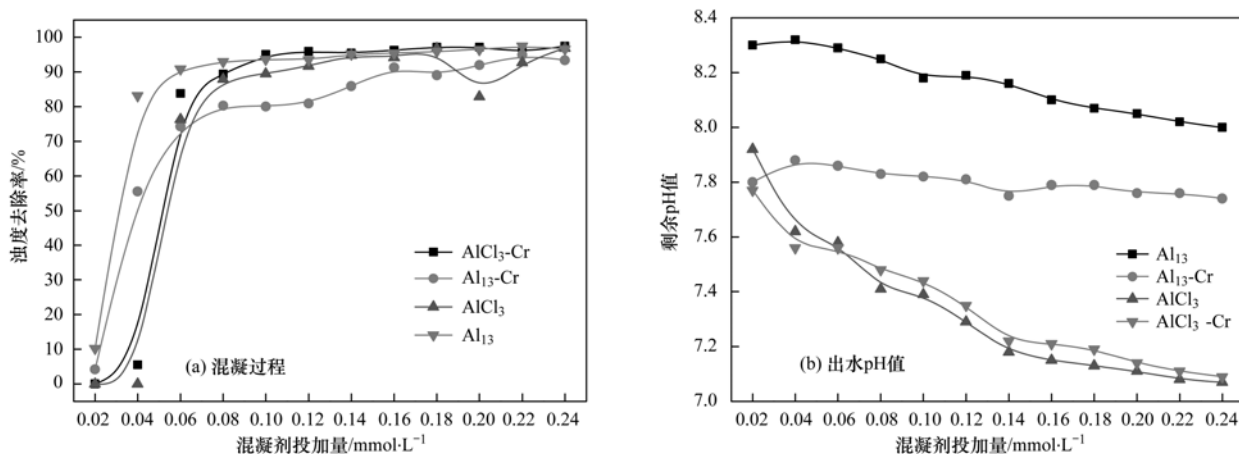


图1 浊度为10NTU条件下, 混凝剂投加量对混凝过程和出水pH值的影响

Fig. 1 Effects of coagulant dosage on the coagulation process and the pH value of the coagulation effluent when the turbidity was adjusted to 10NTU

无 Cr(VI) 存在时, Al_{13} 对浊度的去除率明显大于 AlCl_3 . 相比于 AlCl_3 , Al_{13} 由于较高的 Al_b 含量因而具有较强电中和能力^[20-22], 这说明电中和作用对于悬浮颗粒的去除具有重要的意义, 此时增加 Al_b 的含量可明显降低混凝剂投加量.

另外, 在整个投加范围内, Cr(VI) 的存在对 AlCl_3 混凝过程无明显影响, 但其可明显降低 Al_{13} 的浊度去除率. 由于水样中 Cr(VI) 是以 CrO_4^{2-} 的形式存在, 这说明 CrO_4^{2-} 可能会与高聚合态 Al_b 结合而消耗部分 Al_{13} , 却不与低聚合态 Al_a 结合. 为了解释这一过程, 针对混凝出水pH值做了分析, 见图1(b). 从中可以发现, Cr(VI) 的存在对 AlCl_3 混凝剂出水pH值无明显影响(0.02 mmol·L⁻¹, pH: 8.27 ~ 7.8; 0.04 mmol·L⁻¹, pH: 8.32 ~ 7.88), 而其降低了 Al_{13} 混凝剂的出水pH值(0.02 mmol·L⁻¹, pH: 7.92 ~ 8.79; 0.04 mmol·L⁻¹, pH: 7.62 ~ 7.56). 这也进一步说明 CrO_4^{2-} 会与 Al_b 发生作用, 而不与 Al_a 作用. 另外, AlCl_3 混凝剂在整个投加量下pH值变化范围在8.5 ~ 7.2左右. 在此pH值范围条件下, Al_a 的主要水解产物为无定型氢氧化物絮状微粒 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{am})$ ^[23], 其与 CrO_4^{2-} 之间不发生反应.

在上述混凝条件的基础上, 调节浊度分别为20NTU和40NTU, 考察浊度对混凝过程的影响, 实验结果见图2.

由图2(a1)和2(a2)可以发现, 对于浊度为20NTU和40NTU的两种水样, 浊度去除率均随着混凝剂投加量的增加而增大, 并且在较低投加量时, Al_{13} 相对于 AlCl_3 具有明显优势. 与图1结果不同的是, Cr(VI) 的存在对 Al_{13} 的混凝过程没有明显的影响(浊度去除率在整个投加量范围内相近). 结

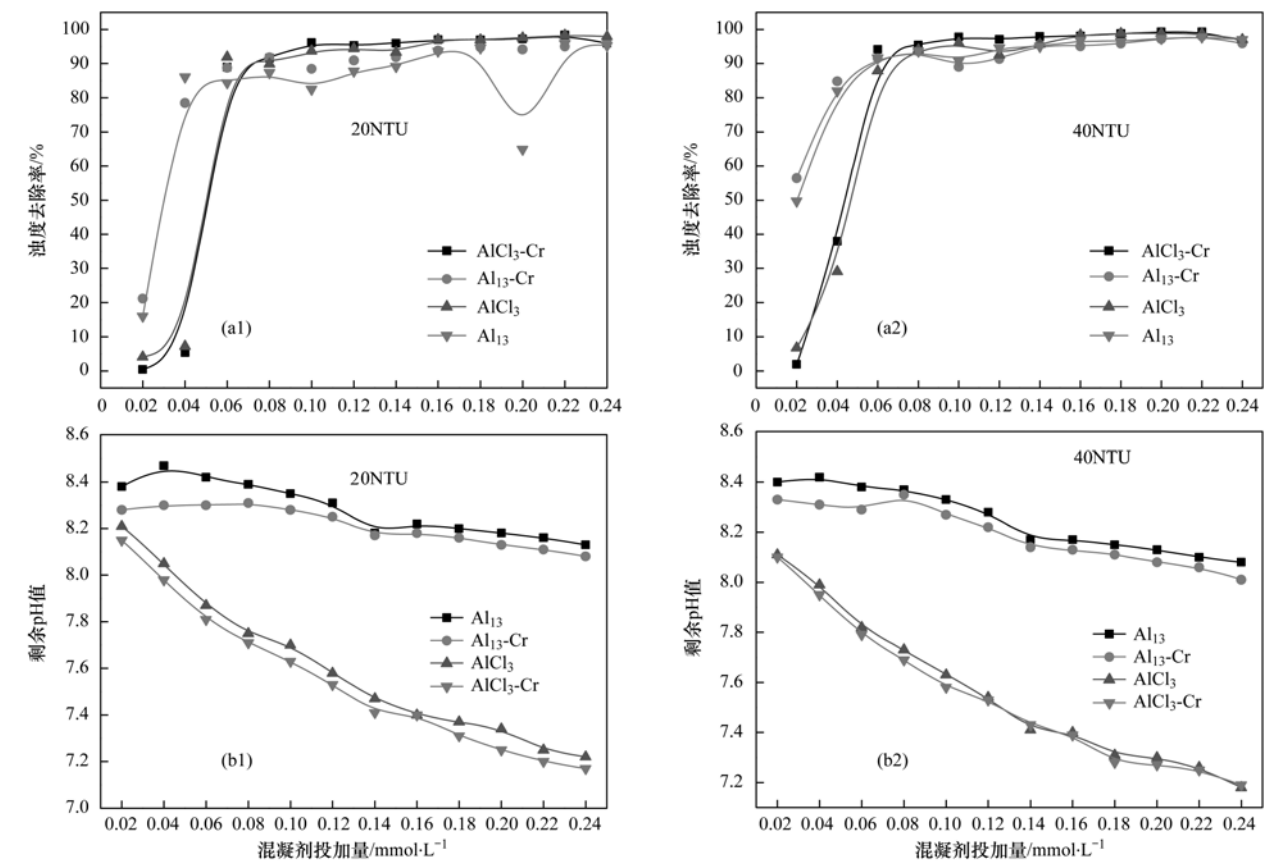
合图1(a)的分析可知, 主要原因在于水体中含有较高浓度的颗粒物浓度. 在水样浊度较低时(10NTU), Cr(VI) 可以与 Al_b 形态发生反应从而消耗部分混凝剂, 降低浊度去除率. 而在水样浊度较高时(20NTU和40NTU), Cr(VI) 会吸附在高岭土表面的活性位点上^[24], 从而在混凝过程中同时被去除, 对混凝过程影响明显降低. 另外, 从图2(b1)和2(b2)中可以发现, 20NTU情况下 Cr(VI) 对 Al_{13} 混凝剂混凝出水pH值影响减小[相对于图1(b)], 而40NTU情况下可认为是无影响, 这说明 Cr(VI) 对 Al_{13} 的混凝过程受到颗粒物浓度的影响. 同时, 在20NTU和40NTU条件下, 与图1(b)类似, Cr(VI) 的存在对 AlCl_3 混凝剂出水pH值无明显影响.

2.2 混凝过程Zeta电位的变化

3种不同浊度水样混凝过程中, 体系Zeta电位随混凝剂投加量的变化结果见图3.

由图3可以发现, 在不同体系中(10、20和40NTU), Zeta电位均随着投加量的增大而增大. 在水样浊度为10NTU时, 图3(a)表明, 加入 Cr(VI) 在整个投加量范围内对 AlCl_3 混凝过程的Zeta电位变化无明显影响, 而可明显降低 Al_{13} 混凝过程的Zeta电位. 另外, 从图3(b)和3(c)可知, 在水样浊度为20和40NTU时, Cr(VI) 的存在对两种混凝剂混凝过程中Zeta电位均无明显影响. 从2.1节分析可知, 这是因为在较高浊度下, 高岭土颗粒物表面吸附 Cr(VI) 作用的结果, 这种吸附作用降低了 Cr(VI) 与混凝剂的相互作用, 因此对两种混凝剂混凝过程Zeta电位无明显影响.

CrO_4^{2-} 对 AlCl_3 和 Al_{13} 两种混凝剂混凝过程的



(a) 混凝剂投加量对混凝过程的影响；(b) 混凝剂投加量对出水 pH 值的影响

图 2 浊度为 20NTU 和 40NTU 条件下，混凝剂投加量对混凝过程及出水 pH 值的影响

Fig. 2 Effects of coagulant dosage on the coagulation process and the pH value of the coagulation effluent when the turbidity was adjusted to 20NTU and 40 NTU

影响可综合为图 4.

2.3 水样中Cr(VI) 去除率及余铝浓度

实验首先分析了水样中无颗粒物存在时，含铬水体在不同混凝剂作用下的铬去除率，实验结果见表 2.

从表 2 中的数据可知，Al₁₃和 AlCl₃ 两种混凝剂

对Cr(VI) 均有一定的去除，其中经 Al₁₃ 混凝后的除铬率在整个投加量范围内均明显高于 AlCl₃. Al₁₃ 和 AlCl₃ 混凝剂对 Cr(VI) 的最大去除率分别为 22.62% (0.01 mmol·L⁻¹) 和 9.16% (0.02 mmol·L⁻¹), 这说明高聚合态 Al_b 更易与Cr(VI) 结合，与 2.1 节的分析结果一致.

表 2 无高岭土存在时含Cr(VI) 溶液混凝后的出水除铬率/%

Table 2 Chromium removal rate of the effluent after coagulation of the Cr(VI) solution without kaolin/%

混凝剂	投加量/mm ol·L ⁻¹											
	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24
Al ₁₃	9.05	6.45	7.69	6.22	22.62	19.34	14.82	17.42	16.29	12.56	11.31	12.89
AlCl ₃	9.16	7.81	4.98	4.19	5.54	5.11	3.96	2.04	1.87	2.04	0.68	0.57

本实验进而分析了不同浊度条件下混凝过程对铬的去除率，结果见图 5.

由图 5 可知，在 3 种不同水样体系中，Al₁₃ 对 Cr(VI) 的去除率明显高于 AlCl₃，分析原因在于 Cr(VI) 更易与 Al₁₃ 结合，在混凝过程中得以去除. 而 Al_a 的水解形式为 Al(OH) ₄⁻ 及其逐渐趋于稳定的无定型氢氧化物絮状微粒 Al(OH) ₃ (am) ^[23]，其

中无定型氢氧化物絮状微粒 Al(OH) ₃ (am) 不与 CrO₄²⁻ 发生反应，而水解产物 Al(OH) ₄⁻ 与 CrO₄²⁻ 之间发生相互排斥的静电斥力，这种排斥作用也会影响 Al_a 与 CrO₄²⁻ 的结合，从而降低了 AlCl₃ 对 Cr(VI) 的去除.

此外，综合表 2 与图 5 可以发现，当水体浊度从 0NTU(无颗粒物存在) 增大到 40NTU 时，Al₁₃ 对

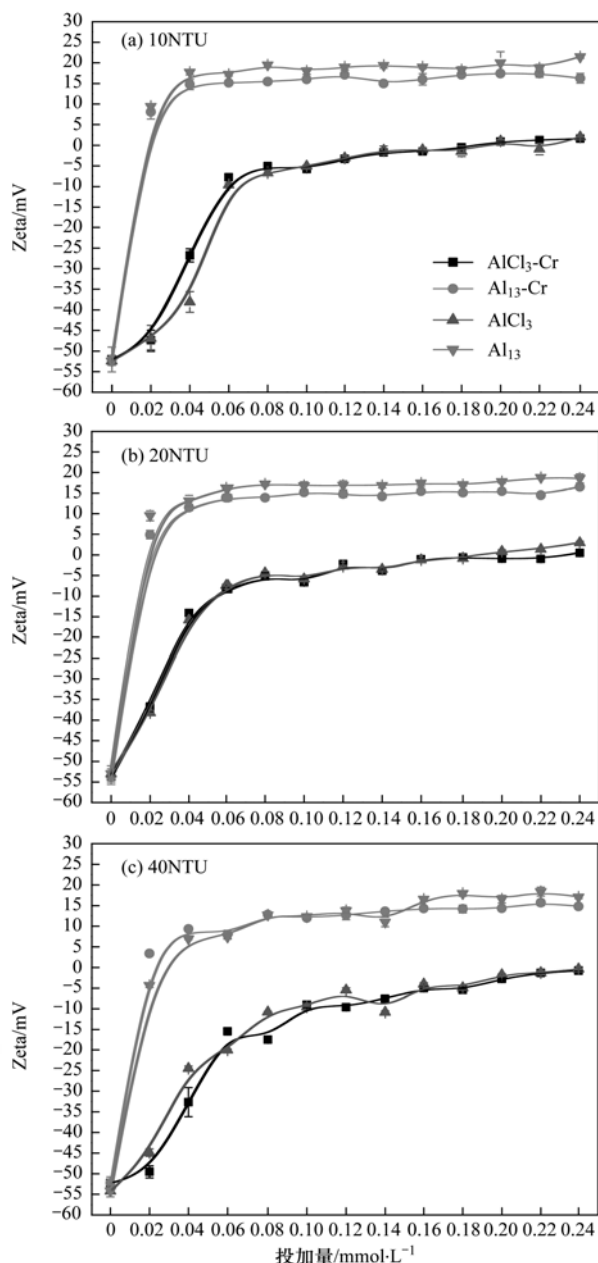


图3 不同水样体系中投加量对 Zeta 电位的影响

Fig. 3 Effects of coagulant dosage on zeta potentials in different water samples

Cr(VI)的最大去除率从22.62%降低至7.02%，而 AlCl_3 对Cr(VI)的最大去除率变化不明显，这也证明了颗粒物对 Al_{13} 的混凝过程具有较大的影响。另外，余铝含量也是混凝的一个重要指标，因此考察了两种混凝剂混凝过程余铝的浓度，实验结果见图6。

图6的结果表明，在3种不同水样体系中，使用 AlCl_3 做混凝剂时，低投加量条件下的余铝浓度先上升后下降，先上升的原因是在投加量较低时由于絮体形成不明显，大部分的铝盐会残留在水中使

得余铝升高。使用 Al_{13} 作混凝剂时，余铝含量相比 AlCl_3 明显降低，这说明提高 Al_b 浓度对控制余铝含量具有重要的作用。Jiao等^[25]的研究也同样表明，混凝过程余铝含量主要与 Al_a 和小分子有机物相关，降低混凝剂中 Al_a 浓度对于降低沉后水中余铝浓度具有重要的作用。

2.4 混凝过程絮体性质

混凝过程中絮体特性对于研究混凝机理具有重要的作用。因此，在 Al_{13} 和 AlCl_3 投加量分别为 $0.06 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下(最优浊度去除率)对混凝过程形成的絮体进行了动态监测(1.3节)，实验结果见图7。

由图7的实验结果可以看出，随着体系浊度的增大，平衡时絮体粒径先上升后下降。分析原因在于，随着颗粒物浓度的增加，碰撞次数增加，絮体粒径明显增大，当浊度达到40.0NTU时，由于过多的颗粒会使得Al系混凝剂在颗粒表面的分布较为松散，降低了颗粒的碰撞效率，絮体粒径下降。在水样浊度为10NTU的情况下，使用 AlCl_3 作混凝剂，无Cr(VI)和有Cr(VI)条件下平衡时絮体粒径分别为 $505 \mu\text{m}$ 和 $420 \mu\text{m}$ 左右，而使用 Al_{13} 作混凝剂平衡时絮体粒径分别为 $212 \mu\text{m}$ 和 $195 \mu\text{m}$ 左右，Cr(VI)的存在降低了混凝过程的絮体粒径。分析原因在于使用 AlCl_3 作混凝剂时， Al_a 在pH为8.5时能水解生成部分的 $\text{Al}_c[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ，在混凝过程中能发挥一定的架桥作用，从而使得絮体粒径增大^[9]。使用 Al_{13} 作混凝剂时($0.06 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)，结合Zeta电位数据分析可知(图3)，体系Zeta电位分别为8.83 mV[有Cr(VI)]和14.0 mV[无Cr(VI)]，此时体系出现电荷反转，使得颗粒之间的电荷斥力增大，从而阻碍了絮体的形成。相比于 AlCl_3 混凝剂($0.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)，Zeta电位分别为-3.37 mV[有Cr(VI)]和-3.11 mV[无Cr(VI)]，颗粒之间电荷斥力较小，因而形成絮体具有较大粒径。对于20NTU和40NTU的水样混凝过程，与水样为10NTU时混凝过程一致。这说明具有较高 Al_b (电中和作用强)含量的 Al_{13} 混凝剂形成絮体粒径较小，絮体粒径的增大主要是由于架桥作用(颗粒充分脱稳的条件下)，并且Cr(VI)的存在能降低絮体的粒径。

不同水样条件下，混凝过程形成的絮体的强度因子(S_f)和恢复因子(R_f)见表3。

由表3的结果可以看出，相比于 AlCl_3 ， Al_{13} 混凝剂形成的絮体具有较小的强度因子和较大的恢复

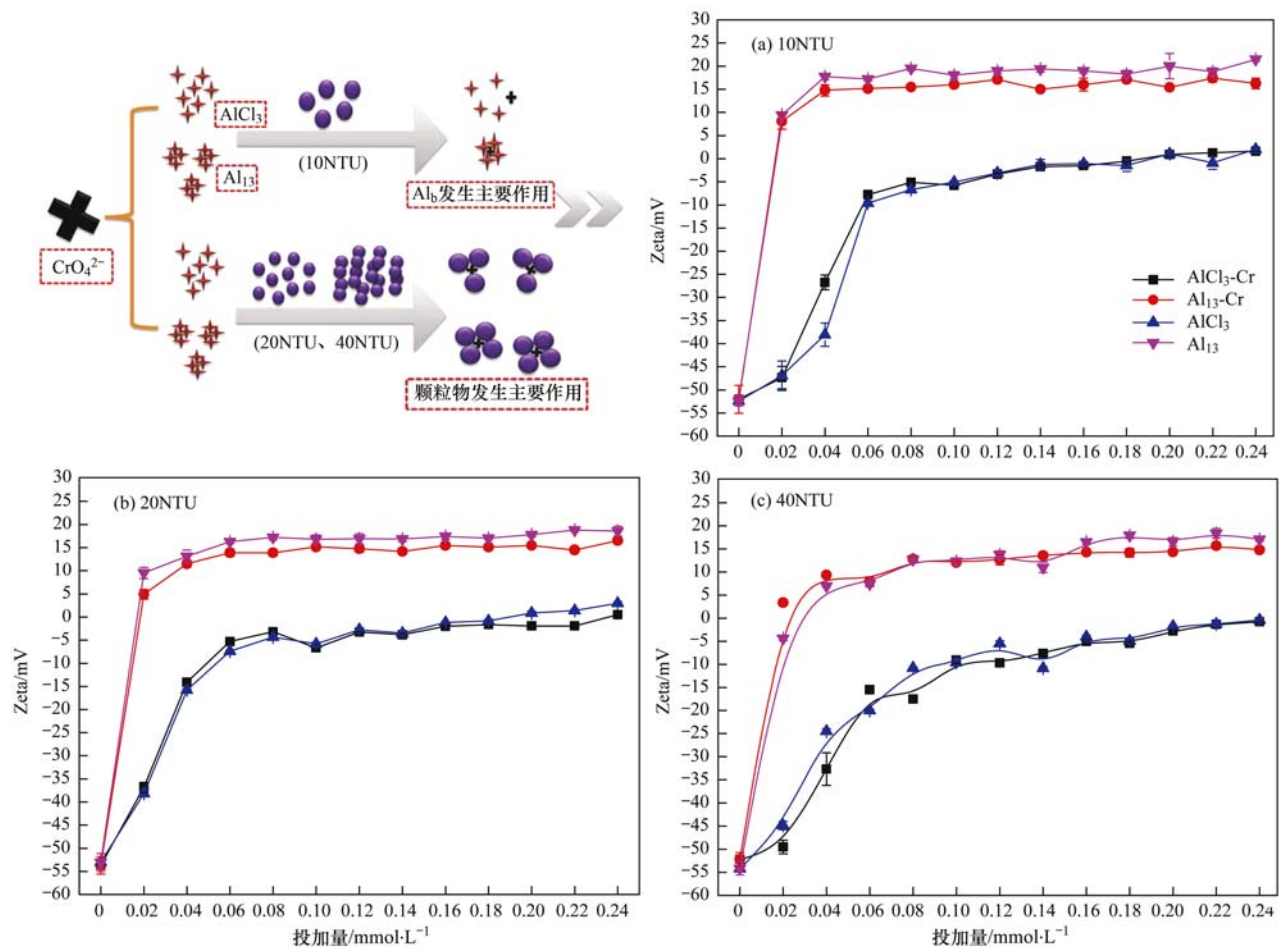


图4 不同水样条件下 CrO_4^{2-} 对混凝过程的影响
Fig. 4 Influence of CrO_4^{2-} on coagulation performance in different water samples

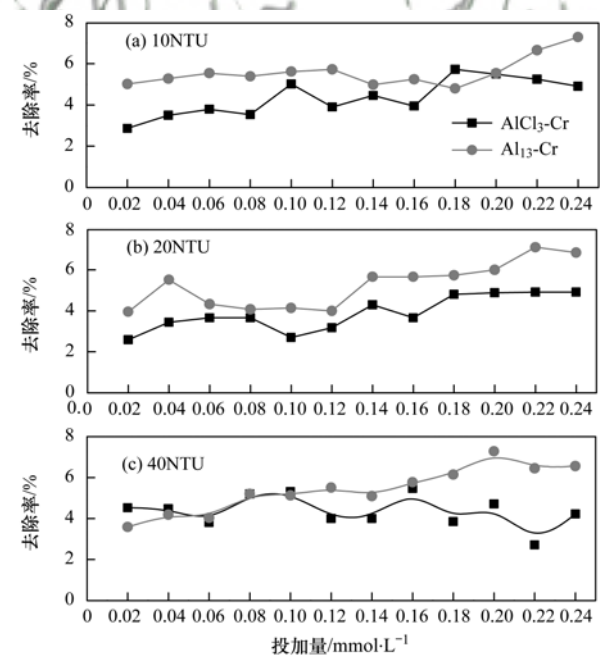


图5 不同混凝条件下铬的去除率
Fig. 5 Removal rate of Cr via the coagulation process with different coagulant dosages

表3 不同水样下混凝过程中絮体的强度因子(S_f)和恢复因子(R_f)

Table 3 Strength factor (S_f) and recovery factor (R_f) of flocs formed in the coagulation processes under different water sample conditions

浊度/ NTU	混凝剂	强度因子/%		恢复因子/%	
		有Cr(VI)	无Cr(VI)	有Cr(VI)	无Cr(VI)
10	Al_3	47.64	44.4	66.67	77.7
	AlCl_3	49.5	58.68	23.9	18.32
20	Al_3	41.75	38.19	46.67	46.34
	AlCl_3	46.39	51.2	20.2	16.56
40	Al_3	46.37	36.41	60.15	89.43
	AlCl_3	51.2	47.92	16.56	23.91

因子。Yu 等^[26]的研究曾表明高 Al_3 含量的混凝剂具有较强的电中和能力,而其架桥网捕作用的缺失使得其絮体易破碎,同时破碎后新暴露的表面由于具有较高电荷能在絮体再生过程中发挥重要作用,此结论与本研究现象一致。另外, Cr(VI) 存在对 AlCl_3 混凝剂形成絮体的强度因子和恢复因子影响无明显规律,但其增大了 Al_3 混凝剂形成絮体的强度因子,这是因为部分 Cr(VI) 与 Al_3 结合从而降低了其电中和能力,从而使得絮体强度因子增大。

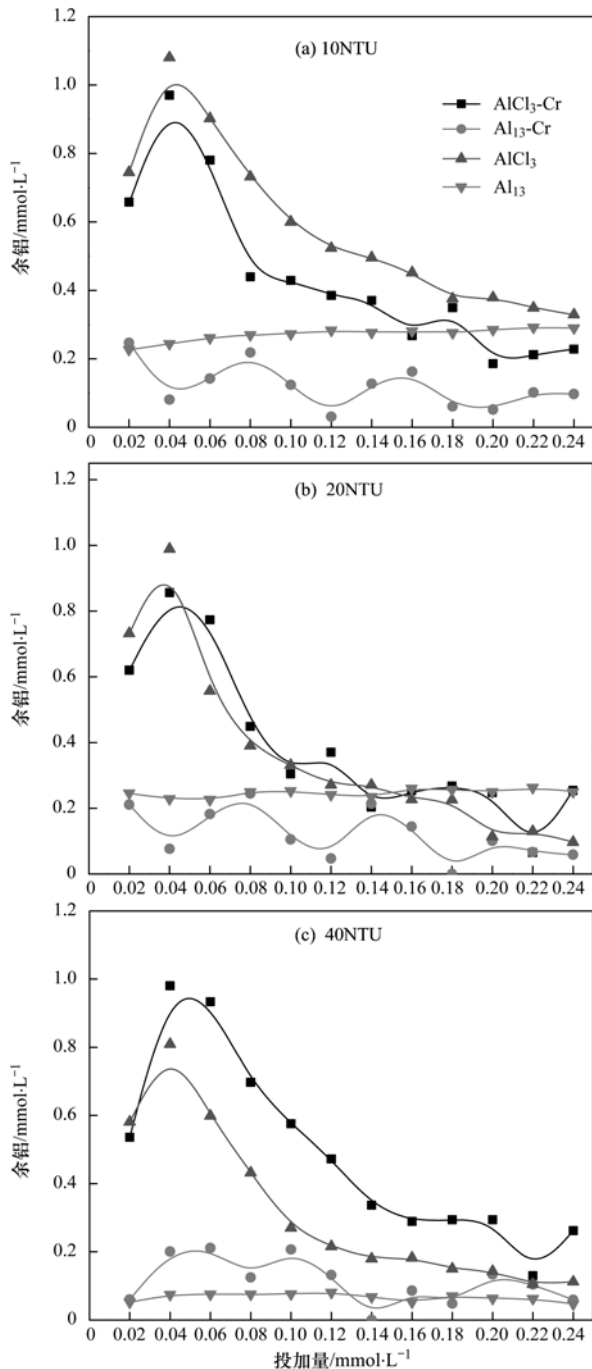


图6 不同水样混凝过程余铝含量

Fig. 6 Concentration of residual Al with different coagulation processes

2.5 絮体扫描电镜分析

为了更好地了解絮体表面的情况,对 10NTU 条件下两种混凝剂形成的絮体进行冷冻干燥处理,并进行了扫描电镜分析和 X 射线能谱分析,实验结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,不同混凝剂形成的絮体结构具有明显的差异。相比之下, Al_{13} 形成的絮体内部较为松散,而 AlCl_3 形成的絮体内部密实。这是因

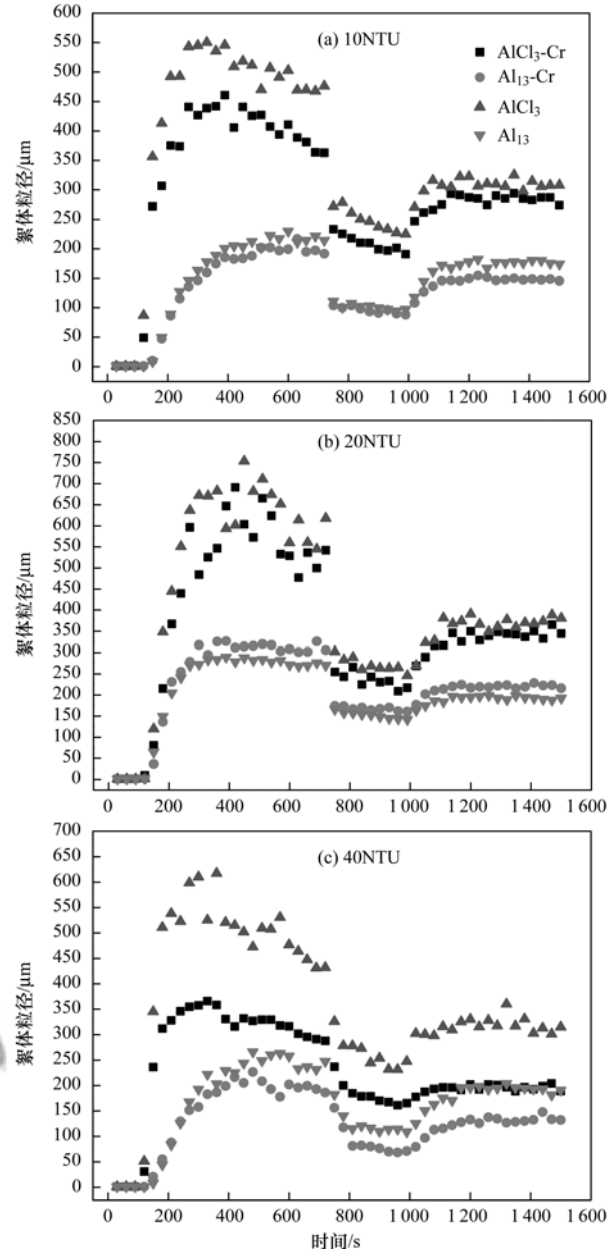


图7 不同水样混凝过程中絮体粒径的性质

Fig. 7 Characteristics of flocs during the coagulation process under different water conditions

为 Al_{13} 混凝剂由于较高的电中和作用形成的絮体具有较小的强度因子(表 3),而 AlCl_3 的水解产物中形成的部分 Al_6 能很好地发挥网捕作用,从而使得絮体具有较大的强度因子。这与图 7 的结论一致。另外, Cr(VI) 的存在对混凝剂形成的絮体同样具有一定的影响,从图 8 可以看出, Al_{13} 混凝剂在 Cr(VI) 存在时形成絮体内部表面更加紧密,这说明 Cr(VI) 的存在使得部分 Al_6 消耗而使得电中和作用下降,从而使得絮体内部结构变紧密,并且 Cr(VI) 与 Al_6 的结合会带来余铝和余铬的降低(图 5 和图 6),而 AlCl_3 在 Cr(VI) 的存在时絮体表面变化并不

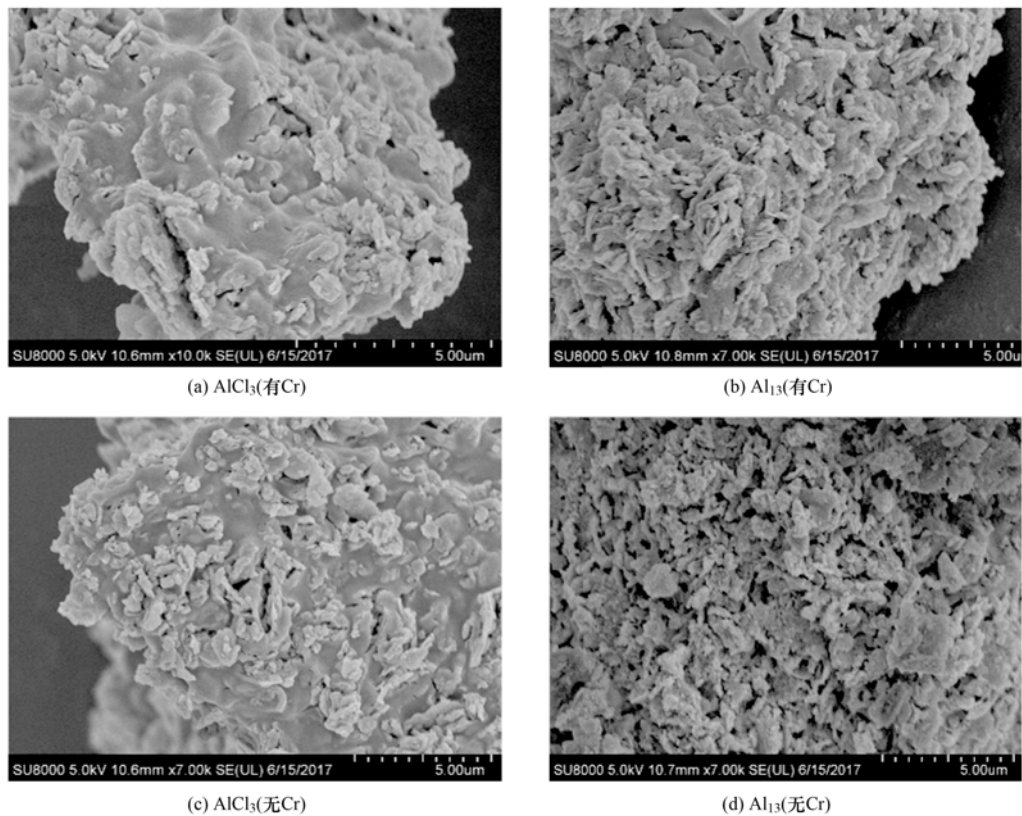


图8 不同混凝剂形成絮体的扫描电镜图
Fig. 8 Scanning electron microscope (SEM) images formed by different coagulants

明显,说明了Cr(VI)的存在会影响 Al_b 的混凝过程,而对 Al_a 的混凝过程无明显影响,与之前的结果分析一致.

针对两种絮体,对其进一步进行了X射线能谱分析,实验结果见表4.可以看出, $AlCl_3$ 形成的絮体中Al与Cr相对质量比分别为99.6%和0.4%,而 Al_{13} 形成的絮体中Al与Cr相对质量比分别为96.2%和3.8%,这说明了Cr(VI)能与高聚合态 Al_b 部分结合,而与 Al_a 基本不结合,与本实验之前的分析结果相一致.

表4 不同混凝剂形成 $AlCl_3$ 絮体与 Al_{13} 絮体的X射线能谱结果
Table 4 Results of X-ray energy spectra of $AlCl_3$ and Al_{13} flocs formed by different coagulants

项目	Al/%	Cr/%
$AlCl_3$ 絮体	99.6	0.4
Al_{13} 絮体	96.2	3.8

3 结论

(1)Cr(VI)在低浊度情况下(10NTU)会与 Al_b 结合,抑制 Al_{13} 的混凝效果,而对 Al_a 的混凝过程无明显影响.在较高浊度情况下(20 NTU 和40NTU),由于Cr(VI)在颗粒物表面的吸附,其对混凝过程无明显影响.

(2)相比于 $AlCl_3$ (Al_a), Al_{13} (Al_b)对Cr(VI)的去除率较高,并且 Al_b 对余铝含量的控制效果优于 Al_a ,降低 Al_a 的含量可明显降低沉后水中余铝浓度.

(3) Al_{13} 由于具有较多的 Al_b ,在混凝过程中以电中和作用为主导.相比于 $AlCl_3$ (Al_a), Al_{13} 形成的絮体具有较小的粒径(架桥作用缺失)和强度因子,但大量的局部正电荷使得破碎后的絮体具有较大的恢复因子.

(4)Cr(VI)的存在可使得 Al_{13} 形成的絮体强度因子增大(降低了颗粒之间的排斥力),恢复因子降低(颗粒表面的正电荷与Cr(VI)反应).

参考文献:

[1] 李莉娜,董广霞,唐桂刚,等. 中国含六价铬工业废水排放的行业贡献与空间分布特征分析[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(12): 97-99, 105.
Li L N, Dong G X, Tang G G, et al. Analysis of the industrial share and region distribution of Cr(VI) containing industrial wastewater discharge in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(12): 97-99, 105.
[2] 裴东波,卢志强,仇沛崧,等. 还原沉淀法处理含铬废水[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(2): 25-26.
Pei D B, Lu Z Q, Kang P S, et al. Treatment of dichromate-containing wastewater with deoxidization & deposition method [J]. Urban Environmental and Urban Ecology, 2006, 19(2):

- 25-26.
- [3] 陈心满, 徐明芳. UV/TiO₂ 光催化还原Cr(VI)过程中吸附作用的影响及其消除[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 913-917.
Chen X M, Xu M F. Effects of absorption on photo-reduction of Cr(VI) by UV/TiO₂ process and its elimination [J]. Environmental Science, 2006, **27**(5): 913-917.
- [4] 贺气志, 陈辉, 王丹, 等. 混合硫酸盐还原菌与 Cu/Fe 颗粒协同处理含铬废水的研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2000-2005.
He Q Z, Chen H, Wang D, *et al.* Treating Cr(VI)-containing wastewater by a consortium of sulfate reducing bacteria and Copper-Iron bimetallic particles [J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 2000-2005.
- [5] Tandukar M, Huber S J, Onodera T, *et al.* Biological chromium (VI) reduction in the cathode of a microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(21): 8159-8165.
- [6] Zhao Y X, Gao B Y, Zhang G Z, *et al.* Comparative study of floc characteristics with titanium tetrachloride against conventional coagulants: Effect of coagulant dose, solution pH, shear force and break-up period[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **233**: 70-79.
- [7] 徐磊, 俞文正, 梁亮, 等. 天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4290-4294.
Xu L, Yu W Z, Liang L, *et al.* Effect of natural organic matter on coagulation efficiency and characterization of the flocs formed [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4290-4294.
- [8] GuiGui C, Rouch J C, Durand-Bourlier L, *et al.* Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production[J]. Desalination, 2002, **147**(1-3): 95-100.
- [9] Duan J M, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2003, **100-102**: 475-502.
- [10] Xu H, Jiao R Y, Xiao F, *et al.* Relative importance of hydrolyzed Al species (Al_a, Al_b, Al_c) on residual Al and effects of nano-particles (Fe-surface modified TiO₂ and Al₂O₃) on coagulation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, **446**: 139-150.
- [11] Xu W Y, Gao B Y. Effect of shear conditions on floc properties and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration hybrid process—The significance of Al_b species [J]. Journal of Membrane Science, 2012, **415-416**: 153-160.
- [12] 张大为, 徐慧, 王希, 等. 藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3281-3289.
Zhang D W, Xu H, Wang X, *et al.* Effects of algal morphology and Al species distribution on the coagulation-ultrafiltration process[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3281-3289.
- [13] 吴珍, 张盼月, 曾光明, 等. 不同铝形态去除水中腐殖酸的混凝特性[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1903-1907.
Wu Z, Zhang P Y, Zeng G M, *et al.* Coagulation characteristics of different Al species on Humic acid removal from water[J]. Environmental Science, 2008, **29**(7): 1903-1907.
- [14] Cao B D, Zhang W J, Wang Q D, *et al.* Wastewater sludge dewaterability enhancement using hydroxyl aluminum conditioning: role of aluminum speciation[J]. Water Research, 2016, **105**: 615-624.
- [15] Duan S X, Xu H, Xiao F, *et al.* Effects of Al species on coagulation efficiency, residual Al and floc properties in surface water treatment[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, **459**: 14-21.
- [16] Jarvis P, Jefferson B, Parsons S A. Breakage, regrowth, and fractal nature of natural organic matter flocs[J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(7): 2307-2314.
- [17] Xu H, Xiao F, Wang D S. Effects of Al₂O₃ and TiO₂ on the coagulation process by Al₂(SO₄)₃ (AS) and poly-aluminum chloride (PACl) in kaolin suspension [J]. Separation and Purification Technology, 2014, **124**: 9-17.
- [18] Zhang D W, Xu H, Wang X, *et al.* Influence of coagulation process on the ultrafiltration performance—the roles of Al species and characteristics of algae-laden water [J]. Separation and Purification Technology, 2017, **183**: 32-42.
- [19] 张忠国, 栾兆坤, 赵颖, 等. 聚合氯化铝(PACl)混凝絮体的破碎与恢复[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 346-351.
Zhang Z G, Luan Z K, Zhao Y, *et al.* Breakage and regrowth of flocs coagulation with Polyaluminum chloride (PACl) [J]. Environmental Science, 2007, **28**(2): 346-351.
- [20] Wang D S, Tang H X, Gregory J. Relative importance of charge neutralization and precipitation on coagulation of Kaolin with PACl: effect of sulfate ion [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(8): 1815-1820.
- [21] Wang D S, Sun W, Xu Y, *et al.* Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, **243**(1-3): 1-10.
- [22] Liang L, Tan J K, Peng Y L, *et al.* The role of polyaluminum chloride in kaolinite aggregation in the sequent coagulation and flocculation process [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, **468**: 57-61.
- [23] 栾兆坤, 汤鸿霄, 于忱非. 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, 1997, **17**(3): 321-327.
Luan Z K, Tang H X, Yu C F. Dynamic transformation and stability of hydrolyzed alum and polyaluminum in the coagulation and flocculation processes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, **17**(3): 321-327.
- [24] 张永利, 朱佳, 史册, 等. 高岭土的改性及其对Cr(VI)的吸附特性[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(5): 561-568.
Zhang Y L, Zhu J, Shi C, *et al.* Modification of Kaolin and its adsorption properties on Cr(VI) [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(5): 561-568.
- [25] Jiao R Y, Xu H, Xu W Y, *et al.* Influence of coagulation mechanisms on the residual aluminum—the roles of coagulant species and MW of organic matter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **290**: 16-25.
- [26] Yu W Z, Gregory J, Campos L C. Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC [J]. Water Research, 2010, **44**(13): 3959-3965.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)