

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放测量 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 ..... 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 ..... 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 ..... 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 ..... 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 ..... 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 ..... 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 ..... 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 ..... 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 ..... 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 ..... 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 ..... 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 ..... 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 ..... 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 ..... 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 ..... 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 ..... 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 ..... 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 ..... 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 ..... 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) ..... 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 ..... 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 ..... 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 ..... 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 ..... 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 ..... 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 ..... 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 ..... 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 ..... 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 ..... 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 ..... 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 ..... 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 ..... 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 ..... 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 ..... 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 ..... 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 ..... 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 ..... 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 ..... 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 ..... 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 ..... 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 ..... 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 ..... 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 ..... 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 ..... 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

# 钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制

王彩霞<sup>1,2</sup>, 张伟军<sup>2\*</sup>, 王东升<sup>3</sup>, 王庆飞<sup>1\*</sup>, 喻德忠<sup>4</sup>

(1. 河北师范大学化学与材料科学学院, 石家庄 050024; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 3. 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; 4. 武汉工程大学化学与环境工程学院, 武汉 430000)

**摘要:** 研究了预制的不同形态钛盐混凝剂对污泥的调理效果, 结果表明不同碱化度 [ $B$  值, 即  $n(\text{OH})/n(\text{Ti})$ ] 聚合氯化钛 (PTC) 单一调理污泥时, 在相同投加量时, PTC<sub>0.5</sub> 调理后污泥比阻、可压缩性以及 EPS 中有机物含量均低于其他形态钛盐, 其最佳投加量以 TSS 计, 为  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 该投加量远低于传统的铁盐和铝盐混凝剂. 不同  $B$  值 PTC 调理污泥脱水能力的强弱顺序为: PTC<sub>0.5</sub> > PTC<sub>1.5</sub> > TiCl<sub>4</sub> > PTC<sub>2.5</sub>. 同时分析了调理过程中污泥絮体粒径 ( $d_{0.5}$ ) 和分形维数 ( $D_f$ ) 的变化特征. 采用三维荧光光谱和高效体积排阻色谱, 解析了钛盐混凝剂对污泥胞外聚合物 (EPS) 分布和组成的影响, EPS 蛋白峰的荧光强度和有机物相对分子质量峰分布变化规律与污泥比阻、可压缩性和脱水能力变化规律有一定相关性.

**关键词:** 污泥; 四氯化钛; 聚合氯化钛; 脱水性; 三维荧光

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2243-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.030

## Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs

WANG Cai-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-jun<sup>2\*</sup>, WANG Dong-sheng<sup>3</sup>, WANG Qing-fei<sup>1\*</sup>, YU De-zhong<sup>4</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The effect of the different forms of titanium salt coagulant conditioning on sludge dewatering performance was studied. The result showed that the sludge dewaterability was the best and the specific resistance to filtration (SRF), the compressibility and the content of organic content in EPS were the lowest when  $B = 0.5$  compared with others. The optimal dosage of polymeric titanium chloride (PTC) was  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , which was far less than those of the traditional iron salts and aluminum coagulants. When the dosage of PTC with different  $B$  values was  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , the order of dewaterability was: PTC<sub>0.5</sub> > PTC<sub>1.5</sub> > TiCl<sub>4</sub> > PTC<sub>2.5</sub>. In addition, the variations of characteristics such as particle size ( $d_{0.5}$ ) and fractal dimension ( $D_f$ ) of sludge during conditioning were analyzed. The effect of titanium salt coagulant conditioning on the distribution and composition of the sludge extracellular polymeric substance (EPS) was characterized by Three-dimensional Excitation Emission Matrix Fluorescence (3DEEM) and High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC). The decrease of fluorescent intensity and molecular weight of peak distribution and intensity of organics in EPS was highly correlated to the improvement of the dewatering performance and change of sludge properties.

**Key words:** sludge; titanium tetrachloride; polymeric titanium chloride; dewaterability; 3D-EEM

近十几年来市政和工业废水处理过程中面临一个很大的问题, 污水生化处理过程中会产生大量的剩余污泥. 这些剩余污泥的含水率大都超过了 99%, 而且剩余污泥的处理处置费用已占到水处理总成本的 50% ~ 80%<sup>[1]</sup>. 因此, 减小污泥体积是在处理和处置过程中急需解决的问题, 开发高效的污泥脱水技术对于实现污泥的减量化具有十分重要的意义, 也成为目前我国环保工作者研究的重要课题之一.

污泥脱水处理是比较难的一个过程, 这主要是由于存在大量的有胶粒物质和能形成类似絮凝体系

的胶体物质<sup>[2]</sup>. 活性污泥胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 存在于活性污泥细胞外, 是除细胞和水分外第三大类活性污泥组成物质. Houghton 等<sup>[3]</sup>的研究表明污泥中 EPS 的含量决定着污泥的脱水性, 每种污泥脱水性最佳时对应着特定的胞外聚合物含量. 大量研究表明, EPS 含量决

收稿日期: 2015-09-08; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07408001); 国家自然科学基金项目 (51178360)

作者简介: 王彩霞 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥化学调理技术开发, E-mail: wangcaixiazjg@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhwj\_1986@126.com; wqfxt@126.com

定着污泥的带电量、过滤后干固体的含量和絮体的稳定性等<sup>[4]</sup>。EPS 占活性污泥总量的 60% ~ 80%，它们在去除废水污染物、污泥生物絮凝和沉降脱水过程中起着重要作用<sup>[5]</sup>，进而影响污泥处理的工艺效率和运行费用。研究表明，污泥脱水性能与胞外聚合物(EPS)各组分含量存在一定的联系，EPS 中多糖含量与污泥沉降性能呈正相关，即多糖含量越多，沉降性能越好，污泥脱水性能越佳<sup>[6]</sup>，蛋白质含量越高污泥脱水性能越差<sup>[7]</sup>。

传统的改善污泥脱水效果的方法有污泥物理调理法和化学调理法，化学调理法因其操作简便、价格低廉、效果显著成为最常用的方法之一。常用化学调理药剂有 PAC、FeCl<sub>3</sub> 和 PAM 等，主要是通过电中和架桥作用促使污泥颗粒絮凝来改善污泥脱水性<sup>[8, 9]</sup>。无机调理剂对过滤速度的提高不如有机调理剂，但是其“骨架”作用也能达到良好的脱水效果<sup>[10]</sup>。四氯化钛 TiCl<sub>4</sub> 是一种新型的混凝剂，且钛没有毒，对生态环境没有影响，因此 TiCl<sub>4</sub> 作为一种新型水处理剂受到人们的广泛关注<sup>[11, 12]</sup>。Shon 等<sup>[13, 14]</sup>使用四氯化钛为混凝剂去除水体中颗粒物及有机物，研究发现 TiCl<sub>4</sub> 与铝盐和铁盐混凝剂一样可有效地去除水体中的颗粒物和有机物，且 TiCl<sub>4</sub> 较铝盐和铁盐混凝剂具有形成的絮体大、絮体沉降

速度快，且投加量较二者要少很多等优点。此外，从经 TiCl<sub>4</sub> 处理后的化学污泥中通过高温煅烧还可以制备出 TiO<sub>2</sub> 材料<sup>[13-15]</sup>，是很好的环境友好型光催化剂。所以，钛盐混凝剂的研发符合当代环境保护工作的要求，是一种具有广阔应用前景的绿色环境治理技术。而且 TiCl<sub>4</sub> 在污泥处理方面以及其混凝机制以及絮体特征还鲜有报道，由于 TiCl<sub>4</sub> 本身的水解作用以及本身的强酸性会释放出大量的 H<sup>+</sup>，而且无机高分子絮凝剂具有净水效果好、投资量少、形成的絮体沉淀性能好、产生的污泥量少和适应性广等优点<sup>[16]</sup>。

本实验研究 TiCl<sub>4</sub> 与 PTC 调理对活性污泥脱水性能、粒径分布、絮体结构以及 EPS 的组成与分布的变化影响，采用常规化学分析、三维荧光光谱和高效体积排阻色谱等方法解析混凝机制，以期为在深入认识调理、混凝机制基础上开发新型混凝剂提高活性污泥脱水性能提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 消化污泥的来源

实验用污泥取自北京市北小河污水处理厂的剩余污泥，其基本性质如表 1。

表 1 污泥的基本性质

Table 1 Basic properties of sludge

参数	含水率/%	pH	VSS/TSS	CST/s	$d_{0.5}/\mu\text{m}$	Zeta 电位/mV	DOC/mg·L <sup>-1</sup>
数值	98.18	7.5	0.75	86.2	56.623	-14.2	24.096

#### 1.1.2 化学试剂

四氯化钛 TiCl<sub>4</sub> (>99%, CP)，氢氧化钠 NaOH (配制浓度为 5 mol·L<sup>-1</sup>)。

聚合氯化钛(PTC)的制备是用慢速滴碱法，把 NaOH 作为碱化剂制备而成，在本实验中配制的 PTC 分别为 PTC<sub>0.5</sub>、PTC<sub>1.5</sub>、PTC<sub>2.5</sub><sup>[17]</sup>。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 污泥调理

室温条件下，向污泥中迅速加入一定量的不同碱化度 PTC，其投加量在 0.1% ~ 0.9% 之间，启动磁力搅拌器，先快速搅拌反应 2 min，再慢搅反应 8 min，提取 EPS 进行测定。

#### 1.2.2 污泥脱水性及可压缩性的测定

污泥比阻(SRF)表示单位重量的污泥在一定压力下过滤时在单位过滤面积上的阻力。污泥比阻的公式可以表达为：

$$r = \frac{2pA^2b}{\mu\omega} \quad (1)$$

式中， $p$  为过滤压力(kg·m<sup>-2</sup>)； $A$  为过滤面积(m<sup>2</sup>)， $\mu$  为滤液的动力黏度(kg·s·m<sup>-2</sup>)； $\omega$  为滤过单位体积的滤液在过滤介质上截留的干固体重量(kg·m<sup>-3</sup>)； $b$  为过滤方程  $t/V = bV + a$  所代表的直线的斜率， $t$  为过滤时间(s)； $V$  为滤液体积(m<sup>3</sup>)。

污泥可压缩性：泥饼的可压缩性是衡量当对其施加压力时污泥结合紧密的能力指标。污泥可压缩性系数( $S$ )参照文献[1]的计算。

#### 1.2.3 絮体的性能测定

絮体破碎与再生实验过程如下：首先以 250 r·min<sup>-1</sup> 的转速搅拌 30 s，将转速调为 200 r·min<sup>-1</sup>，搅拌 90 s，再将转速调为 40 r·min<sup>-1</sup> 搅拌 10 min，然后将转速调为 400 r·min<sup>-1</sup> 快搅 1 min，最后将转速调为 40 r·min<sup>-1</sup> 搅拌 20 min 停止反应。粒径的动态

分布采用马尔文激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000, Malvern, UK) 进行测定. 具体计算分形维数  $D_f$  的方法可以参考文献[18].

### 1.2.4 EPS 的特性

#### (1) EPS 的提取

取 50 mL 污泥于离心管中, 在  $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速下离心 10 min, 收集污泥上清液得到溶解性 EPS (Soluble EPS, SEPS); 然后再加入 15 mL 0.05% NaCl 溶液, 在漩涡振荡仪上迅速搅匀, 然后在摇床中转速为  $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  水平摇 10 min, 之后在  $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速下离心 10 min, 收集污泥上清液得到疏松结合型 EPS (Loosely Bound, LB-EPS); 最后再加入 15 mL 0.05% NaCl 溶液, 在漩涡振荡仪上迅速搅匀, 在  $60^\circ\text{C}$  水浴中加热 30 min, 之后在  $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速下离心 20 min, 收集上清液得到紧密结合型 EPS (Tightly Bound EPS, TB-EPS). 以上所得到的上清液均需过  $0.45\ \mu\text{m}$  的膜.

#### (2) EPS 的分析

三维荧光光谱 (3DEEM) 的测定在三维荧光光度计 (Hitachi F-4500, Japan) 测定. 激发光源为氙弧灯, 激发波长  $\lambda_{\text{ex}}$  为  $200\sim 400\text{ nm}$ , 发射波长  $\lambda_{\text{em}}$  为  $220\sim 550\text{ nm}$ , 激发和发射狭缝宽度为  $10\text{ nm}$ , 扫描速度为  $12\,000\text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Sheng 等<sup>[19]</sup> 的研究显示, 荧光峰的位置、强度和不同荧光峰的强度比例均不会受到离子强度的影响.

高效体积排阻色谱 (HPSEC) 采用 Waters 液相色谱系统, 由 Waters 2487 双波长吸收检测器、Waters 1525 泵组成. 分离所用色谱柱为 TSKgel G3000SW<sub>XL</sub> (Tosoh co., Japan). 流动相为 5

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐缓冲液和  $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 溶液, 之后过  $0.22\ \mu\text{m}$  的滤膜, 再超声 15 min, 流动相流速为  $0.8\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 测定波长为  $254\text{ nm}$ , 进样体积为  $200\ \mu\text{L}$ . 聚苯乙烯磺酸钠 (PSS) 作为相对分子质量的标准物质, 标线中所用的 PSS 相对分子质量分别为  $1.8\times 10^3$ 、 $4.2\times 10^3$ 、 $6.5\times 10^3$  (Sigma, Aldrich)<sup>[20, 21]</sup>.

总有机碳 (TOC) 测定采用 TOC-L CPN 型测定仪 (岛津), 采用  $680^\circ\text{C}$  燃烧催化氧化法, 燃烧催化氧化法使得它不仅可以有效地氧化易分解的低分子量有机化合物, 而且也能氧化难以分解的不溶性及大分子有机化合物.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同 $B$ 值 PTC 投加量对污泥脱水性能的影响

不同  $B$  值 PTC 投加量对污泥脱水性能的影响如图 1. 从图 1(a) 中得知, 经钛盐混凝剂调理后, 污泥比阻 SRF 逐渐下降, 当投加量以 TSS 计, 为  $0.001\sim 0.005\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  时污泥比阻 SRF 值剧减, 大于  $0.005\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  时 SRF 值基本保持不变. 从图 1(b) 中可以看出经 PTC 调理后泥饼含水率变化规律基本与污泥比阻 SRF 变化一致. 由以上分析可知, 随着碱化度  $B$  的增大污泥脱水性能呈下降趋势, PTC<sub>0.5</sub> 混凝效果最佳, 污泥脱水性最好. 这可能是由于, 随着碱化度  $B$  的升高, 钛的水解度越来越高, 当碱化度超过 1.5 时钛的聚合物不稳定会出现一定程度的分解<sup>[17]</sup>. 与  $\text{TiCl}_4$  相比, PTC 在混凝过程中能够较少  $\text{H}^+$  的释放, 混凝效果也会强于  $\text{TiCl}_4$ , 且在一定程度上解决了  $\text{TiCl}_4$  在混凝过程中出水 pH 较低的问题.

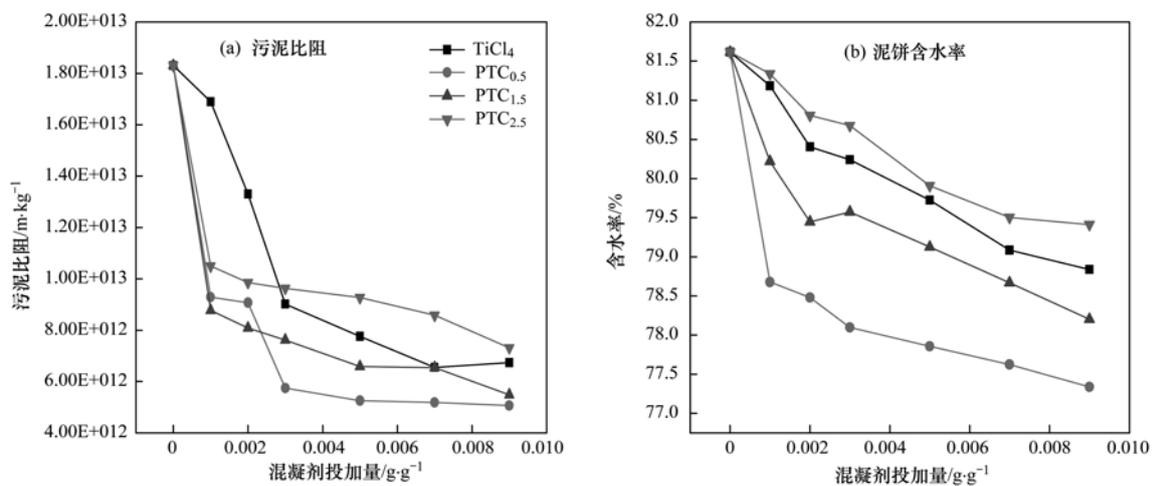


图 1 不同  $B$  值 PTC 投加量对污泥脱水性能的影响

Fig. 1 Effect of different dosage of PTC with different alkalinity on the sludge dewaterability

图 2 为最佳投加量  $0.005 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  时不同  $B$  值 PTC 调理对污泥可压缩性的影响. 图 2(a) 为压力为  $0.05 \text{ MPa}$  和  $0.07 \text{ MPa}$  时对应的污泥比阻值, 由图中可以看出相比原泥, 随着 PTC 中  $B$  值的升高 SRF 先降低后升高,  $\text{PTC}_{0.5}$  SRF 值最低. 图 2(b) 为

不同碱化度 PTC 对应可压缩性系数, 从中可以看出其变化规律与污泥比阻值一致,  $\text{PTC}_{0.5}$  调理后污泥可压缩性系数最低为 1.24, 表明经  $\text{PTC}_{0.5}$  调理后污泥泥饼比其他  $B$  值 PTC 调理后结构更坚实, 更容易压缩, 因此更易脱水.

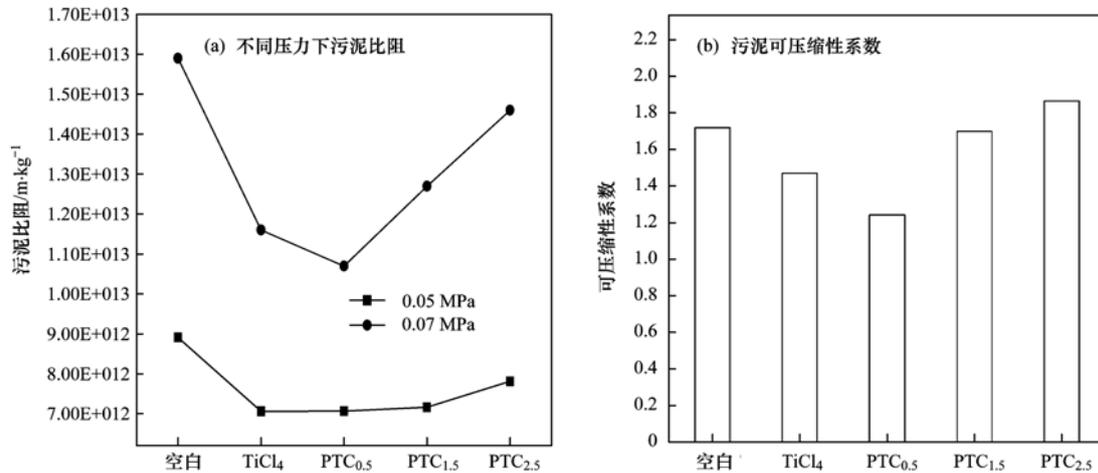


图 2 不同碱化度 PTC 对污泥压缩性的影响

Fig. 2 SRF and compressibility coefficient of sludge conditioned by PTC

从图 3(a) 中可以看出, 不同  $B$  值 PTC 化学调理后污泥絮体粒径差异较大. 搅拌速度发生改变时, 不同  $B$  值条件下的 PTC 混凝剂所产生的絮体呈现出不同程度的破碎和再生, 随着混凝过程的进行, 絮体粒径逐渐增大, 慢搅阶段结束后, 絮体粒径明显增大, 达到稳定阶段, 这表明絮体聚集和破碎之间趋于平衡<sup>[22]</sup>. 当搅拌速度达到  $400 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  絮体粒径迅速减小, 1 min 后恢复转速为  $40 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  絮体粒径又逐渐增大. 其中  $\text{PTC}_{1.5}$  和  $\text{TiCl}_4$  调理后污泥絮体粒径要比  $\text{PTC}_{0.5}$  和  $\text{PTC}_{2.5}$  大, 因此具有很好的沉降性. 从图 3(b) 中可以看出经  $\text{PTC}_{0.5}$  和  $\text{PTC}_{2.5}$  调理

后污泥絮体的  $D_f$  值会增大, 而  $\text{PTC}_{1.5}$  和  $\text{TiCl}_4$  调理后污泥絮体  $D_f$  值反而降低.  $\text{PTC}_{0.5}$  调理污泥后絮体分形维数最大, 一般而言分形维数  $D_f$  值在  $1 \sim 3$  之间, 其值越大絮体结构越规则.  $D_f$  接近 3 的絮体比较密实, 而结构越松散的絮体  $D_f$  值也更接近 1<sup>[23]</sup>. 这说明其絮体结构强度也更高, 结合更紧密, 更适合于高压脱水, 因此相应的污泥脱水性能也较好.

## 2.2 不同 $B$ 值 PTC 投加量处理对 EPS 分布和组成的影响

从图 4 中可以看出, 相比原泥经混凝剂 PTC 调理后污泥中溶解性有机碳 (DOC, 通过 TOC 变化反

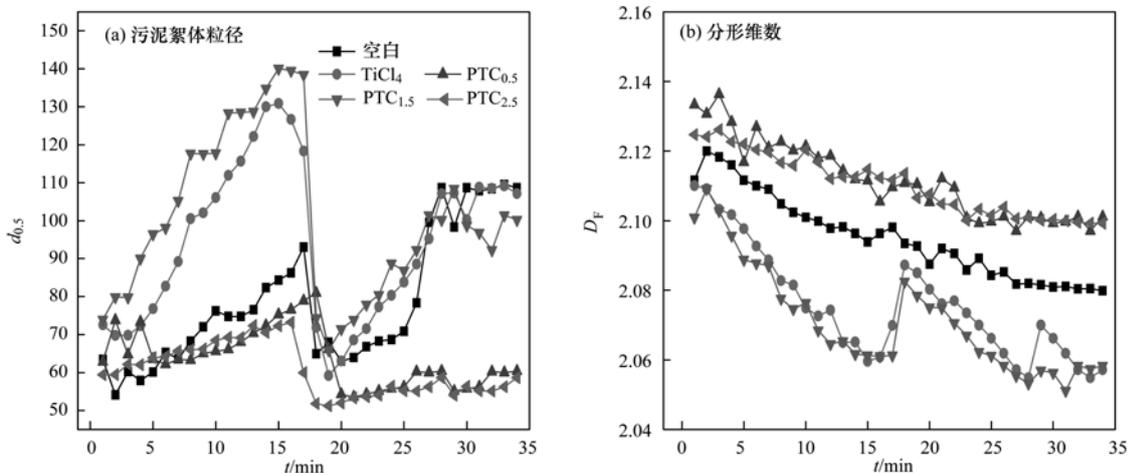


图 3 不同  $B$  值 PTC 投加量调理过程中污泥絮体粒径以及分形维数的变化情况

Fig. 3 Change in particle size of sludge and fractal dimension with time under chemical conditioning using PTC with different  $B$  values

映)含量迅速降低,当投加量达到  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  时趋于稳定,对比 4 种混凝剂调理后 DOC 含量可知,  $\text{PTC}_{0.5}$  调理后 DOC 含量最低,其次为  $\text{PTC}_{1.5}$ 、 $\text{TiCl}_4$ , 而  $\text{PTC}_{2.5}$  调理后 DOC 浓度最高,这与污泥 SRF 值变化规律一致. 可知混凝剂 PTC 对 EPS 有很好的去

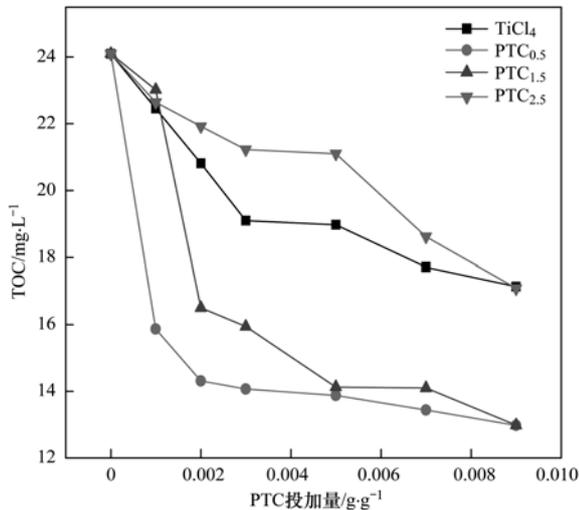


图 4 不同  $B$  值 PTC 投加量对溶解性 EPS 总有机碳含量的影响

Fig. 4 Effect of different dosage of PTC with different alkalinity on TOC concentration of soluble EPS

除作用,这也是污泥脱水性能提高的关键因素.

三维荧光光谱是一种高灵敏度和选择性的分析工具,被广泛用于天然水体中有机物的分析中,尤其在生物源物质的表征方面具有独特的优势<sup>[24]</sup>. 从图 5 中可以看出原始污泥 SEPS 和 LB-EPS 光谱中有 Peak A ( $\lambda_{\text{ex/em}} = 280/335$ )——色氨酸类蛋白、Peak B ( $\lambda_{\text{ex/em}} = 230/330$ )——芳香类蛋白、Peak C ( $\lambda_{\text{ex/em}} = 275/455$ )——富里酸和 Peak D ( $\lambda_{\text{ex/em}} = 350/420$ )——腐殖酸共 4 个荧光峰;而 TB-EPS 中仅有 Peak A 和 Peak B 两个峰<sup>[25]</sup>. Wang 等<sup>[20]</sup>的研究显示,当样品的 DOC 浓度小于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, EEM 光谱中的荧光强度可以用来定量 EPS 的浓度. 不同  $B$  值 PTC 调理对污泥 EPS 荧光光谱特性的影响和荧光光谱强度如图 5 和表 2 所示. 从中可以看出,在不同  $B$  值 PTC 投加量为  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  条件下, EPS 各个组分中蛋白峰以及腐殖酸和富里酸的荧光强度均减弱. 这说明混凝剂  $\text{TiCl}_4$  和 PTC 能有效去除 EPS 中的蛋白质,且对腐殖酸和富里酸也有一定去除作用,而据笔者研究溶解性 EPS 中蛋白质含量是决定污泥脱水性能的关键因素<sup>[26, 27]</sup>,所以经混凝剂调理后的污泥脱水性能提高. 由此可以看出  $\text{PTC}_{0.5}$  去除 EPS 能力最强,其次为  $\text{PTC}_{1.5}$ 、 $\text{TiCl}_4$ 、 $\text{PTC}_{2.5}$ .

表 2 不同  $B$  值 PTC 对 EPS 荧光强度的影响<sup>1)</sup>

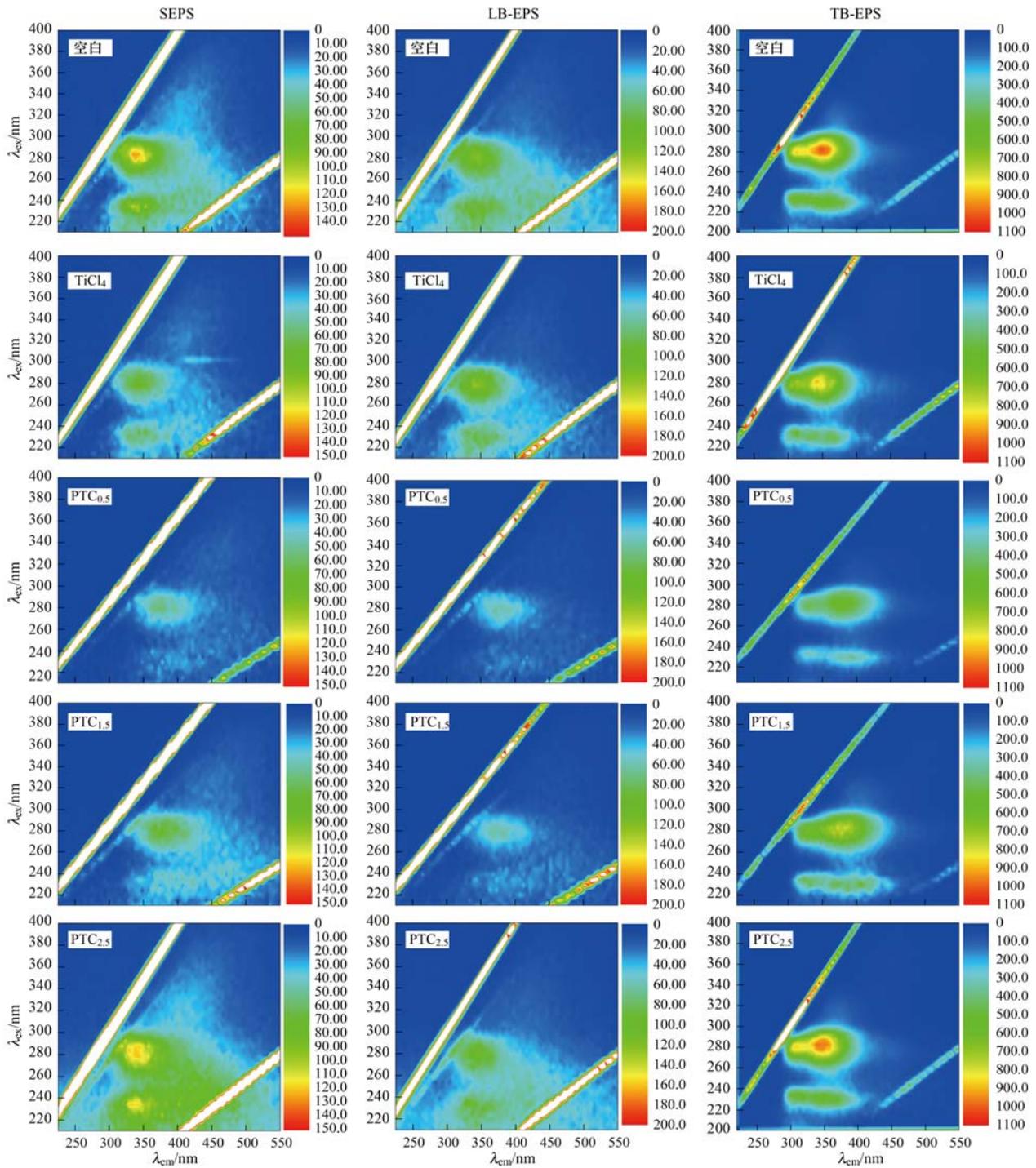
Table 2 Effects of different alkalinity of PTC on EPS fluorescent intensity

不同层 EPS	不同 $B$ 值 PTC	色氨酸类蛋白质	芳香类蛋白质	富里酸	腐殖酸
		$\lambda_{\text{ex/em}}$ (280/335)	$\lambda_{\text{ex/em}}$ (230/330)	$\lambda_{\text{ex/em}}$ (275/455)	$\lambda_{\text{ex/em}}$ (350/420)
SEPS	空白	126.1	105.8	28.94	19.66
	$\text{TiCl}_4$	74.33	58.01	27.36	22.64
	$\text{PTC}_{0.5}$	52.74	27.91	14.11	17.32
	$\text{PTC}_{1.5}$	66.15	47.76	26.39	17.86
	$\text{PTC}_{2.5}$	123.4	119.5	30.12	34.04
LB-EPS	空白	122.8	99.66	46.76	18.5
	$\text{TiCl}_4$	121.6	88.8	35.5	17.88
	$\text{PTC}_{0.5}$	70.3	33.59	16.64	12.54
	$\text{PTC}_{1.5}$	68.01	34.62	21.42	14.13
	$\text{PTC}_{2.5}$	102.9	110.7	23.76	24.67
TB-EPS	空白	1 007	568.3	65.06	29.05
	$\text{TiCl}_4$	908.5	468.6	148.9	31.42
	$\text{PTC}_{0.5}$	573.2	334.8	46.75	34.09
	$\text{PTC}_{1.5}$	724.4	529.1	35.59	9.082
	$\text{PTC}_{2.5}$	975.3	543.7	77.54	30.38

1) SEPS 样品稀释 10 倍, LB-EPS 和 TB-EPS 样品稀释 50 倍

不同  $B$  值 PTC 调理污泥后对不同 EPS 组分相对分子质量的影响如图 6. 基于洗脱时间和聚苯乙烯磺酸钠的表观相对分子质量的关系,对有紫外吸收的有机物的相对分子质量进行了分类. 由于多糖分子中不含有共轭双键,故其只有以糖蛋白或糖

脂的形式存在时才能被紫外测出<sup>[28]</sup>. 如图 6 所示,原始污泥不同 EPS 组分中的分子图谱中的峰如下. SEPS 中有 125、410、700、1 200、2 000、3 000、4 000、25 000、45 000 这 8 个峰; LB-EPS 中相对分子质量峰为 400、700、1 200 和 2 000、



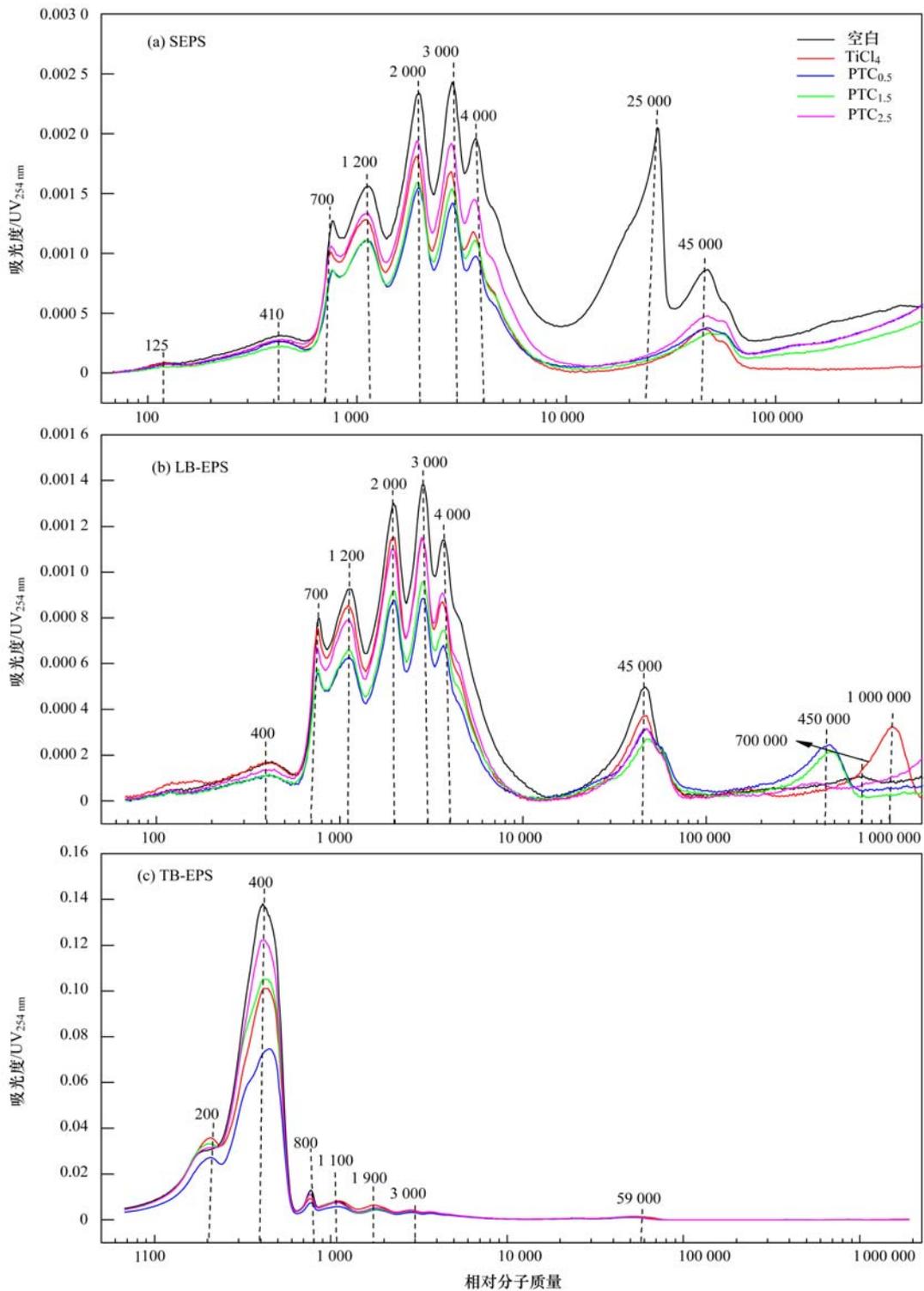
SEPS 样品稀释 10 倍, LB-EPS 和 TB-EPS 样品稀释 50 倍

图 5 不同 B 值 PTC 调理对污泥不同 EPS 组分荧光光谱特性的影响

Fig. 5 Effect of PTC with different alkalinity on EEM profile of different sludge EPS fractions

3 000、4 000、45 000、450 000、700 000、1 000 000 这 9 个峰; TB-EPS 中存在 200、400、800、1 100、1 900、3 000、59 000 这 8 个峰. 根据 Lyko 等<sup>[28]</sup>的分类方法, EPS 的相对分子质量可以大致分为 3 个部分: 大分子有机物大分子组分 (> 5 000)——蛋白质和多糖; 中分子量组分

(1 000 ~ 5 000)——主要为腐殖酸和低分子量组分 (< 1 000)——分子骨架物质. 各 B 值 PTC 在投加量为  $0.005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  条件下, 有机物峰强度都会减弱. 在 SEPS 中, 经调理后相对分子质量为  $25 \times 10^3$  的峰消失, 而为  $45 \times 10^3$  的峰强明显减弱, 相对分子质量为 3 000 和 4 000 的峰几乎消失. 很显



SEPS、LB-EPS、TB-EPS 都稀释 10 倍

图 6 不同 B 值 PTC 对不同 EPS 组分相对分子质量分布的影响

Fig. 6 Influence of PTC with different alkalinity on molecular weight distribution in different EPS fractions

然,混凝剂调理后大分子有机物更容易被去除. LB-EPS 和 TB-EPS 中相对分子质量变化情况呈现与 SEPS 同样的规律. 由此可以看出 PTC<sub>0.5</sub> 去除大分子能力最佳,这可能是由于当碱化度超过 1.5

时在较低的  $m/z$  值附近出现较强的质谱峰,钛的聚合物不稳定会出现一定程度的分解,所以去除有机大分子的能力也有所减弱. 对 EPS 表征可较好地解释前述 PTC 调理对污泥脱水性能的影响.

### 3 结论

不同  $B$  值的混凝剂 PTC 单一调理污泥可显著改善污泥的脱水性能,不同  $B$  值 PTC 调理后污泥脱水效果顺序为:  $PTC_{0.5} > PTC_{1.5} > TiCl_4 > PTC_{2.5}$ . PTC 最佳投加量远低于传统的铁盐和铝盐混凝剂. PTC 调理去除有机物能力提高是改善污泥脱水能力的关键因素. 三维荧光光谱和高效体积排阻色谱分析可为深入认识 PTC 调理对污泥脱水能力及污泥絮体理化性质的影响机制提供参考.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Qi Y, Thapa K B, Hoadley A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties- a review [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2011, **171**(2): 373-384.
- [ 2 ] Dursun D, Dentel S K. Toward the conceptual and quantitative understanding of biosolids conditioning: the gel approach [ J ]. Water Science and Technology, 2009, **59**(9): 1679-1685.
- [ 3 ] Houghton J I, Quarmby J, Stephenson T. Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer [ J ]. Water Science and Technology, 2001, **44**(2-3): 373-379.
- [ 4 ] Mikkelsen L H, Keiding K. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering [ J ]. Water Research, 2002, **36**(10): 2451-2462.
- [ 5 ] Simon S, Pairo B, Villain M, *et al.* Evaluation of size exclusion chromatography (SEC) for the characterization of extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic granular sludges [ J ]. Bioresource Technology, 2009, **100**(24): 6258-6268.
- [ 6 ] Sesay M L, Özcengiz G, Sanin F D. Enzymatic extraction of activated sludge extracellular polymers and implications on bioflocculation [ J ]. Water Research, 2006, **40**(7): 1359-1366.
- [ 7 ] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability [ J ]. Water Research, 2001, **35**(2): 339-350.
- [ 8 ] Niu M Q, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants [ J ]. Bioresource Technology, 2013, **144**: 337-343.
- [ 9 ] Zhang W J, Xiao P, Liu Y Y, *et al.* Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability [ J ]. Separation and Purification Technology, 2014, **132**: 430-437.
- [ 10 ] 王蓉. 化学混凝污泥脱水性能研究 [ D ]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [ 11 ] Shon H K, Vigneswaran S, Kim I S, *et al.* Preparation of titanium dioxide ( $TiO_2$ ) from sludge produced by titanium tetrachloride ( $TiCl_4$ ) flocculation of wastewater [ J ]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(4): 1372-1377.
- [ 12 ] Zhao Y X, Gao B Y, Shon H K, *et al.* Coagulation characteristics of titanium (Ti) salt coagulant compared with aluminum (Al) and iron (Fe) salts [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **185**(2-3): 1536-1542.
- [ 13 ] Shon H K, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Preparation of titanium oxide, iron oxide, and aluminium oxide from sludge generated from Ti-salt, Fe-salt and Al-salt flocculation of wastewater [ J ]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2009, **15**(5): 719-723.
- [ 14 ] Shon H K, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Preparation and characterization of titanium dioxide ( $TiO_2$ ) from sludge produced by  $TiCl_4$  flocculation with  $FeCl_3$ ,  $Al_2(SO_4)_3$  and  $Ca(OH)_2$  coagulant aids in wastewater [ J ]. Separation Science and Technology, 2009, **44**(7): 1525-1543.
- [ 15 ] Kim J H, Cho D L, Kim G J, *et al.* Titania nanomaterials produced from Ti-Salt flocculated sludge in water treatment [ J ]. Catalysis Surveys from Asia, 2011, **15**(2): 117-126.
- [ 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 ] 赵艳侠. 钛盐混凝剂的混凝行为、作用机制、絮体特性和污泥回用研究 [ D ]. 济南: 山东大学, 2014.
- [ 18 ] Wang Y, Gao B Y, Xu X M, *et al.* Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment [ J ]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, **332**(2): 354-359.
- [ 19 ] Sheng G P, Yu H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [ J ]. Water Research, 2006, **40**(6): 1233-1239.
- [ 20 ] Wang D S, Xing L N, Xie J K, *et al.* Application of advanced characterization techniques to assess DOM treatability of micro-polluted and un-polluted drinking source waters in China [ J ]. Chemosphere, 2010, **81**(1): 39-45.
- [ 21 ] Chow C W K, Fabris R, Van Leeuwen J, *et al.* Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography [ J ]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(17): 6683-6689.
- [ 22 ] Biggs C A, Ford A M, PA L. Activated sludge flocculation: direct determination of the effect of calcium ions [ J ]. Water Science and Technology, 2001, **43**(11): 75-82.
- [ 23 ] Hung W T, Chang I L, Lin W W, *et al.* Unidirectional freezing of waste-activated sludges: effects of freezing speed [ J ]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(7): 2391-2396.
- [ 24 ] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: a review [ J ]. Water Research, 2009, **43**(4): 863-881.
- [ 25 ] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [ J ]. Environmental Science &

- Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [26] Zhang W J, Peng S W, Xiao P, *et al.* Understanding the evolution of stratified extracellular polymeric substances in full-scale activated sludges in relation to dewaterability [J]. RSC Advances, 2015, **5**(2): 1282-1294.
- [27] Zhang W J, Yang P, Xiao P, *et al.* Dynamic variation in physicochemical properties of activated sludge floc from different WWTPs and its influence on sludge dewaterability and settleability[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, **467**: 124-134.
- [28] Lyko S, Al-Halbouni D, Wintgens T, *et al.* Polymeric compounds in activated sludge supernatant- characterisation and retention mechanisms at a full-scale municipal membrane bioreactor[J]. Water Research, 2007, **41**(17): 3894-3902.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:  
**期刊**:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.  
**图书**:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.  
**会议文集**:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.  
**学位论文**:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.  
**报告**:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.  
**专利**:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjcx@rcees.ac.cn](mailto:hjcx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters .....	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes .....	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行