

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

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

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

铝、铁、钛 3 种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较

王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要:以铝盐、铁盐和钛盐混凝剂为研究对象, 重点比较了 3 种混凝剂的污泥调理性能。通过测定调理前后污泥比阻、胞外聚合物中蛋白质和多糖的含量变化, 结合三维荧光光谱与分子量变化分析及调理前后污泥尺寸大小与颗粒表面形貌变化, 系统比较了它们对污泥的调理性能, 并揭示了调理机制。3 种无机混凝剂的污泥调理能力依次为: 聚合氯化铝(PAC)、钛凝胶混凝剂(TXC)、聚合硫酸铁(PFS); 调理后, 污泥胞外聚合物中蛋白质和多糖含量明显降低; PFS 和 TXC 对有机物的结合能力要强于 PAC, 疏松结合的胞外聚合物中多糖含量是影响污泥脱水性能的关键因素; 调理过程中 3 种混凝剂所形成污泥颗粒的大小顺序为: TXC > PFS > PAC, 所形成污泥颗粒的大小并非影响污泥脱水性能的关键因素, 无机混凝剂电中和能力与与有机物的络合能力共同影响无机混凝剂的污泥调理性能。本研究为污泥调理混凝剂的选取提供了实验和理论依据。

关键词:污泥调理; 无机混凝剂; 钛凝胶; 胞外聚合物; 调理机制

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2274-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710205

Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants

WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, ZHANG Shu-juan*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The sludge conditioning performance of inorganic Al, Fe, and Ti coagulants were systematically compared in terms of specific resistance to filtration (SRF), the content of protein and polysaccharide in extracellular polymeric substances (EPS), the change in three-dimensional excitation emission matrix fluorescence (3D-EEM), the molecular weight of organic matter in EPS, and the floc size and surface morphology. The sludge conditioning ability and the mechanism were systematically analyzed. The results showed that the sludge conditioning ability of the three inorganic coagulants was in the order of polyaluminum chloride (PAC) > titanium xerogel coagulant (TXC) > polymeric ferric sulfate (PFS). After conditioning, the contents of protein and polysaccharide in the EPS were greatly reduced, especially in the loosely bound EPS (LB-EPS). The combined capacity for coagulation between TXC/PFS and organic matter was stronger than that of PAC. The content of polysaccharide in LB-EPS was the key factor affecting the sludge dewatering performance but not the coagulated floc size. The surface charge and the chelating ability with organic matter co-determined the sludge dewatering ability. The organic cationic polymer, polyacrylamide (PAM), made the sludge aggregate via charge neutralization. However, the use of PAM alone was not a good choice owing to the low dewatering ability and the loose sludge structure. The results here are helpful for the selection of suitable coagulants for sludge conditioning.

Key words: sludge conditioning; inorganic coagulants; titanium xerogel, extracellular polymeric substance; conditioning mechanism

近些年, 随着城市污水处理能力及处理量的不断提高, 污水处理过程中的污泥产量也随之增长, 污泥的含水率高成为污泥处理处置的瓶颈。这是由于: 污泥颗粒带负电荷, 与表面裹着的水合层形成一种稳定的胶体悬浮液, 因此沉降性能和脱水性能差, 导致污泥中固体和水的分离比较困难^[1]。另外, 存在于污泥中的有机成分, 特别是细菌及胞外聚合物(EPS)会影响污泥脱水性能, 增加污泥脱水难度^[2,3]。污泥脱水性能与胞外聚合物各组分含量存在一定相关性, 而胞外聚合物中蛋白质和多糖的含量与污泥沉降性能密切相关^[4]。

传统的改善污泥脱水效果的方法有物理调理法和化学调理法^[5,6]。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。常用的化学调理剂有无机混凝剂、有机高分子混凝剂^[7]和微生物混凝剂。前两种混凝剂是目前化学调理的主流方向。化学混凝剂的加入可以使污泥颗粒聚集成大的颗粒或絮体, 利于后续机械脱水过程中实现固液分离, 从而提高污泥的脱水性能^[8]。无机调理剂加入到污泥中能起到骨架构建体的作用, 在污泥中形成坚硬网络骨架, 即使在高压作用下仍然保持多孔结构, 可以有效地解决污泥中有机质的可压缩

收稿日期: 2017-10-26; 修订日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(21522701, 51378254)

作者简介: 王晓萌(1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: xiaomeng418@126.com

* 通信作者, E-mail: sjzhang@nju.edu.cn

性问题，达到较好的脱水效果^[9]。

铝系与铁系混凝剂是目前给水和废水处理过程中最常用的两类无机混凝材料，钛系混凝剂作为一种新型水处理药剂在近几年受到广泛的研究和关注。聚合无机盐混凝剂相比于传统的无机盐混凝剂具备更优异的性能：更少的污泥产生量；更高的电中和能力；更强的环境适应能力等。聚合氯化铝（PAC）拥有一定量的预水解形态，这些预水解产物具备高的电荷密度并有一定的结构形态，在水解过程中相对稳定，可达到更高的混凝效率^[10]；铁盐能够和污泥基质中胞外聚合物的羧基与羟基形成强的化学键，在保持絮体结构上有更优势的作用^[11]。2016 年笔者报道了利用溶胶-凝胶法控制钛的水解速度制备所得钛凝胶混凝剂（TXC）^[12,13]，克服了无机四氯化钛在混凝过程产生的诸多弊端：①自身呈强酸性，导致混凝出水 pH 值过低；②水解速度过快，不能生成最有效的钛羟基水解产物，影响混凝效能的发挥；③不可控的水解方式导致对污染物的去除效率低。聚合氯化钛能够有效实现污泥调理^[14,15]，但是由于钛水解速率快，这种液态的材料不易长时间保存，容易沉淀失效^[16]。在之前的研究

中证实 TXC 对于多种污染物的混凝性能优于四氯化钛和聚合四氯化钛^[12]。因此，钛凝胶对于实际污泥调理能力也值得进一步探究。

本文重点对比三类无机混凝剂的污泥脱水能力，选用商品化聚合氯化铝（PAC）、聚合硫酸铁（PFS）与实验室制备钛凝胶混凝剂（TXC），并选择阳离子有机絮凝剂聚丙烯酰胺（PAM）作为对照，调查不同化学混凝剂的投加量对污泥比阻的影响，并直接定量测定污泥调理前后胞外聚合物（EPS）的各成分变化规律，利用三维荧光和凝胶色谱法直接观测调理前后有机物变化情况，并通过分析调理前后污泥颗粒尺寸大小与表面形貌，结合不同混凝剂水解行为与表面电荷情况，探讨了不同混凝剂的污泥调理机制。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用污泥取自中国南京市大厂污水处理厂初沉池和二沉池排出的混合污泥，该污水处理厂日平均处理污水量为 2.92 万 m³，主体采用 A²/O 处理工艺。污泥基本性质见表 1。

表 1 污泥的基本特性
Table 1 Basic properties of the sludge

含固率/%	pH	VSS/TSS	CST/s	SRF × 10 ¹³ /m·kg ⁻¹
3.25	6.83 ~ 7.35	0.56	117.7	22.04

实验所用混凝剂包括：PFS（铁含量 19%，碱基度 11%）、PAC（Al₂O₃ 含量 30%，碱基度 40%），购买于巩义市滤料工业有限公司（中国）；TXC（钛含量 20%，碱基度 12.5%）在实验室中合成^[12]。PAM（离子度 30%）购买于义乌市鑫邦环保科技有限公司（中国）。其他化学试剂如无特别说明，均购自于中国国药化学试剂有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 调理方法

烧杯混凝实验在深圳中润集团的六联搅拌机（ZR 4-6）上进行，混凝剂投加量按污泥干重的质量比计算。取 400 mL 污泥于烧杯中，以 250 r·min⁻¹ 转速搅拌 1 min 后，加入一定量混凝剂溶液，以 200 r·min⁻¹ 转速搅拌 1 min，再 100 r·min⁻¹ 搅拌 15 min 后，取样测定污泥各项指标。

1.2.2 污泥性质测定

总悬浮物（TSS）和挥发性悬浮物（VSS）的测

定。TSS 测定方法：将 100 mL 蒸发皿在 103 ~ 105℃ 烘箱中烘至恒重，取 75 mL 污泥置于蒸发皿中，放入 103 ~ 105℃ 烘箱中烘 24 h，冷却称重，做差即得到总悬浮物重量。将烘干后样品置于 450℃ 马弗炉中烘 6 h 至恒重，减少的重量即为 VSS。

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。比阻越大，污泥脱水性能越差。污泥比阻计算公式：

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu\omega} \tag{1}$$

式中， μ 为滤液的动力黏度（kg·s·m⁻²）， ω 为滤过单位体积的滤液截留的干固体重量（kg·m⁻³）， b 为过滤方程 $t/V = bV + a$ 的斜率， t 为过滤时间（s）， V 为过滤体积（m³）， P 为过滤时所用压力（kg·m⁻²）， A 为过滤面积（m²）。

污泥比阻的测定装置根据文献[17]进行自组装。测定时，取污泥样品 100 mL 于过滤器中，在 P 为 0.6 MPa 的恒定压力下进行过滤，每隔 15 s 记录

滤液体积,直到滤饼出现裂缝,停止抽滤.利用差量法在 105℃ 电烘箱中烘干后测定滤饼含固率.

污泥毛细吸水时间(CST)测定:混凝搅拌后,取 5 mL 污泥直接采用 CST-304 污泥毛细吸水时间测定仪(Triton Co., UK)测定.

1.2.3 污泥结构测定

调理后污泥尺寸大小用电子显微镜观察.吸取 200 μL 调理后污泥颗粒滴入装有 1 mL 体积水的玻璃皿中,用显微镜(Axio Imager A1, Carl Zeiss AG, Jena, Germany)放大 100 倍进行观察拍照.

调理后污泥经过冷冻真空干燥,镀金 30 s 后,用扫描电子显微镜(ESEM, Quanta 250, FEI Co., USA)拍照.干燥后污泥比表面积在比表面积分析仪(ASAP 2020, Micromeritics Co., USA)上测定.

1.2.4 胞外聚合物各组分含量测定

调理前后污泥颗粒中不同组分 EPS 提取方法为:25 mL 污泥样品在 4 000 g (Eppendorf 5810 R, Germany), 4℃ 下离心 10 min, 上清液即为溶液中 EPS(SEPS);重悬后用超声波破碎机(Biosafer 650 W, China)在 15% 最大功率下超声 4 min, 然后在 30℃ 摇床中振荡 10 min ($150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 8 000 g (4℃) 离心 10 min, 得到疏松结合的 EPS (LB-EPS);重悬后继续超声 6 min, 70℃ 下水浴 30 min, 放置到常温后, 12 000 g (4℃) 离心 20 min, 得到紧密结合的 EPS (TB-EPS).

泥饼中 EPS 提取步骤为:离心后泥饼加去离子水重悬,用超声波破碎机在 70% 最大功率下超声 2 min, 取出 5 mL 体积加入去离子水 7.5 mL, 在 15% 最大功率下继续超声 2 min, 继续加入 12.5 mL $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液, 90℃ 下水浴 15 min, 水浴后, 立即加入 25 mL $40 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ HEPES 缓冲溶液, 再次超声(15% 最大功率)5 s 分散后, 得到泥饼中 EPS. 蛋白质测定采用 Folin-酚(Lowry)测定法^[18], 试剂盒为 DC Protein Reagents Package 试剂盒(Bio-Rad), 多糖测定用苯酚-硫酸比色法(硫酸法)^[19].

三维荧光光谱图的测定在 Fluoromax-4 (HORIBA Co., Germany) 荧光光谱仪上进行.以氙灯为激发光源, 激发波长 E_x 为 200 ~ 400 nm, 发射波长 E_m 为 250 ~ 500 nm, 狭缝宽度为 5 nm. SEPS、LB-EPS 与 TB-EPS 测定时用去离子水分别稀释 100、200 和 200 倍.

LB-EPS 与 TB-EPS 中有机物分子量测定采用凝胶色谱(GPC, Waters Co., USA)测定, 样品过滤 0.45 μm 滤膜后, 直接稀释 10 倍后测定. 色谱柱为

凝胶渗透色谱柱(Protein Pak 125, 7.8 mm $\times$ 300 mm, 10 μm , Waters), 标准分子量的聚苯乙烯(77 000、32 000、17 000、4 300 和 210)作为标准物质, 流动相为 $25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SO_4 的磷酸缓冲盐溶液($2.4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2HPO_4 + $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaH_2PO_4), 流速为 $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 测定波长为 254 nm.

1.2.5 无机混凝剂水解物理性质测定

无机混凝剂水解物形态采用原子力显微镜观察(MultiMode v8 Scanning Probe Microscope, Bruker Co., Germany). 具体操作步骤为:稀释混凝剂溶液至对应金属浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 取 5 μL 样品滴于新剥离的云母片上, 自然干燥后, 上样观察拍照, 采用智能模式, 分辨率选择为 512×512 .

无机混凝剂电荷密度测定采用胶体滴定法^[20], 以甲苯胺蓝(TBO)为指示剂, 用聚阳离子化合物十六烷基氯化吡啶(HPC)与聚阴离子化合物聚 2-丙烯酸-2-甲基丙磺酸钾(PAMPSK, 上海恒力水处理材料有限公司)进行反滴定. 滴定时混凝剂初始浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 混凝剂投加量对污泥脱水性能的影响

不同种类混凝剂投加量对于污泥调理能力不同. 从图 1 可看出, 混凝剂调理后, 污泥的比阻值大幅降低, 调理后污泥的比阻值、毛细吸水时间、污泥含固率变化一致. 有机絮凝剂 PAM 投加量增加至 $10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 污泥比阻值仅从 $22.0 \times 10^{13} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $9.8 \times 10^{13} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$, 继续增加投加量反而导致调理性能的下降. 阳离子型的 PAM 通过所带的正电荷中和污泥颗粒表面负电荷使其聚集, 并同时起到架桥作用, 而过高的投加量容易导致颗粒净电荷为正, 引起颗粒重稳^[21]. 无机混凝剂相比于 PAM 具有明显优势, 调理后污泥脱水性能显著提高. 3 种无机混凝剂污泥调理效率为 $\text{PAC} > \text{TXC} > \text{PFS}$. 在投加量为 $60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 污泥比阻分别降低至 2.2、8.5 和 $8.5 \times 10^{13} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$, 投加量继续增加至 $250 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥比阻分别降低至 0.7、0.8、 $2.4 \times 10^{13} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$, 泥饼中含固率由原污泥的 4.4% 分别增加至 16.4%、13.3% 和 12.5%, 调理后污泥具有较好的脱水性能, 属于易脱水污泥. 图 1 表明钛凝胶混凝剂对于污泥调理能力在低投加量时要弱于商品化的聚合氯化铝, 在较高投加量下与聚合氯化铝相当, 并且稍强于商品化的聚合硫酸铁. 铝盐混凝剂存在铝的环境安全问题, 应用于水处理时需

谨慎考虑. 应用于污泥调理时, 其上清过滤液可能会存在残留铝离子; 脱水后泥饼含有大量铝, 更需妥善处置, 从而增大后续处理成本. 钛无生物毒性, 应用于水处理时不存在安全问题. TXC 对于多

种污染物的混凝去除效率要优于四氯化钛与聚合氯化钛^[9], 本研究中证实其具备应用于污泥调理的潜力, 在实际使用过程中, 可考虑与有机阳离子型絮凝剂结合使用, 降低投加量^[22].

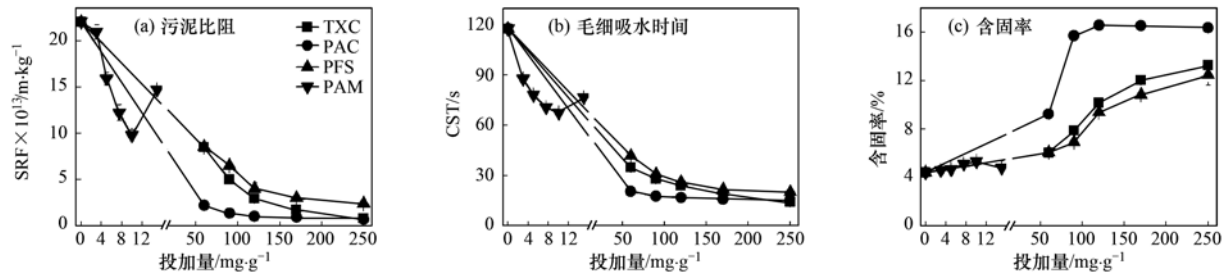


图1 不同投加量的混凝剂调理后污泥比阻、毛细吸水时间和含固率的变化
Fig. 1 Variation of SRF, CST, and solid content of the sludge after conditioning with different coagulants

2.2 调理前后污泥 EPS 变化

胞外聚合物是微生物在代谢过程中分泌的、包裹在细胞壁外的聚合类化合物, 主要包括多糖、蛋白类物质、核酸和脂类等^[23]. EPS 的组成和浓度直接影响污泥结构与沉降性能, 而 LB-EPS 被认为与污泥的脱水性能直接相关^[24]. 本研究测定了调理前后污泥不同组分中蛋白质(图2)与多糖(图3)的含量. 未调理污泥样品 SEPS、LB-EPS、TB-EPS 与泥饼中蛋白类有机物含量(以 TSS 计, 下同)分别为 4.5、43.0、57.5 和 185.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 经过无机混凝剂调理后, LB-EPS 与 TB-EPS 中含量急剧降低,

而有机絮凝剂 PAM 调理后, 各组分中蛋白类有机物含量未发生明显变化. 经 $250\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 TXC、PAC 和 PFS 调理后, LB-EPS 中蛋白类有机物含量低于 $7.0\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而 TB-EPS 中蛋白类有机物含量分别降低至 19.0、34.5 和 18.3 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 可见, 铁盐与钛盐, 相比于铝盐, 与污泥基质中蛋白类物质的结合能力更强, 这是由于与胞外聚合物中的羧基和羟基结构能形成更强的化学键, 对于絮体的结构的保持, 可以发挥更强的作用^[11].

图3显示污泥颗粒调理前后的多糖变化情况与蛋白类物质变化情况相似. 调理后, LB-EPS 与

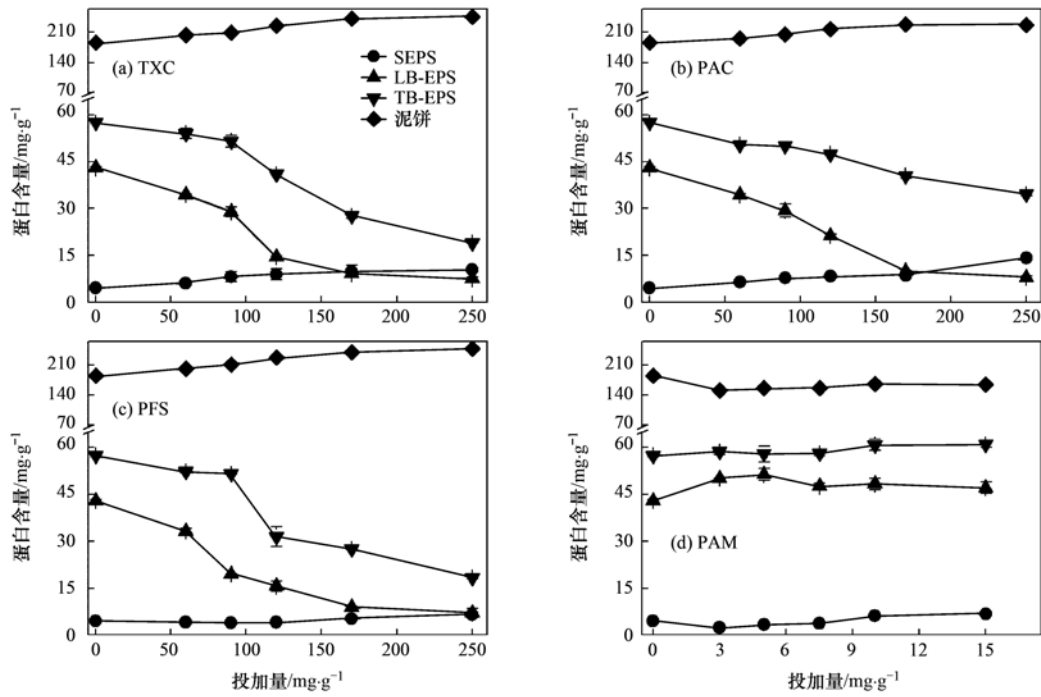


图2 4种混凝剂污泥调理过程中不同组分 EPS 中蛋白质含量变化
Fig. 2 Effect of chemical conditioning on protein content in different sludge layers

TB-EPS 中多糖类有机物含量显著降低, 而 PAC 在低投加量时即可显著降低 LB-EPS 中多糖含量. 有研究报道^[24], LB-EPS 中多糖含量与污泥的脱水性能正相关, 因此 PAC 相比于 PFS 和 TXC, 在低投加量下具备更优异的污泥脱水能力. 调理后泥饼中蛋白类物质和多糖类物质含量明显增加, 说

明无机混凝剂对污泥进行调理时, 水解过程中产生的金属水解物由于静电引力、化学螯合等作用与污泥颗粒发生相互作用, 使污泥颗粒聚集更紧密, 同时由于压缩等作用, 使胞外聚合物中结合的水更容易脱出, 经过机械脱水后, 可显著提高含固率.

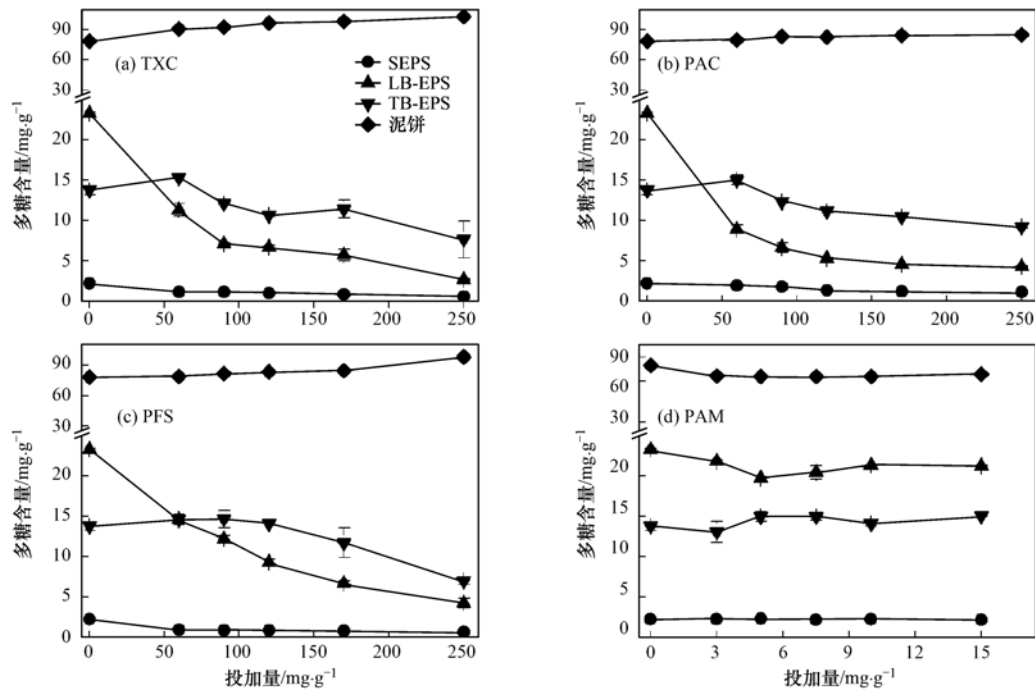


图3 4种混凝剂调理污泥过程中不同组分中多糖含量变化

Fig. 3 Effect of chemical conditioning on polysaccharide content in different sludge layers

在最优混凝剂投加量(根据图1, 选择 TXC、PAC、PFS 和 PAM 的最优投加量分别为 250、250、250 和 10 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)调理前后, LB-EPS 与 TB-EPS 溶液三维荧光光谱图变化如图4所示. SEPS 与 LB-EPS 和 TB-EPS 具有相同的化学组成结构. 未经调理的污泥具有两种类型的荧光峰: E_x/E_m (激发波长/发射波长)为 210~230/300~370 nm 和 E_x/E_m 为 260~290/300~360 nm, 均为类蛋白峰^[25]. 根据峰强度, 有机物质浓度顺序为: TB-EPS > LB-EPS > SEPS, 与图2中蛋白类物质测定结果一致. 经 250 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 无机混凝剂调理后, SEPS 中荧光强度略微降低, LB-EPS 组分中荧光强度显著降低. 而 TB-EPS 组分中, TXC 与 PFS 调理后荧光强度降低程度要远远大于 PAC 调理后样品, 此结果与图2中蛋白类物质变化情况分析结果一致. 表明钛离子对于蛋白类物质中羧基与羟基的结合能力与铁离子相同, 均比铝离子的结合能力强. 对于有机絮凝剂 PAM, 调理后各组分中有机物含量变化不大, 说明有机絮凝剂用于污泥调理, 并非通过降低胞外聚合物中有

机物含量, 一些其他因素, 如电中和机制使污泥颗粒聚集, 是实现其脱水性能的关键因素.

污泥调理过程对于 EPS 中不同分子量的有机物影响如图5所示. 在 LB-EPS 组分中, 3 个主要峰的出峰时间在 5.7、11.1 和 12.4 min. 随着无机混凝剂投加量的增加, 3 个峰强度明显降低, 说明这 3 种混凝剂对于 LB-EPS 中的有机物组分具有一定的去除作用. 仔细观察, PAC 在低投加量时 (60 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 11.1 和 12.4 min 处的峰强度降低程度要大于 TXC 与 PFS 处理样品. 对于 5.7 min 的峰, 随着投加量的增加, PFS 的去除能力要弱于 TXC 与 PAC. 可见, 3 种混凝剂对不同分子量的有机物去除能力不同. 而在 TB-EPS 组分中, 两个主要峰出峰时间在 5.8 min 和 12.0 min. 3 种无机混凝剂对 TB-EPS 组分中有机物去除能力强弱顺序为: TXC > PFS > PAC. 有机絮凝剂 PAM 并不能有效去除污泥中的有机物. 此实验结论与以上分析结果一致, 证实 3 种无机混凝剂对 LB-EPS 中的有机物组分去除强弱决定其对污泥的调理性能.

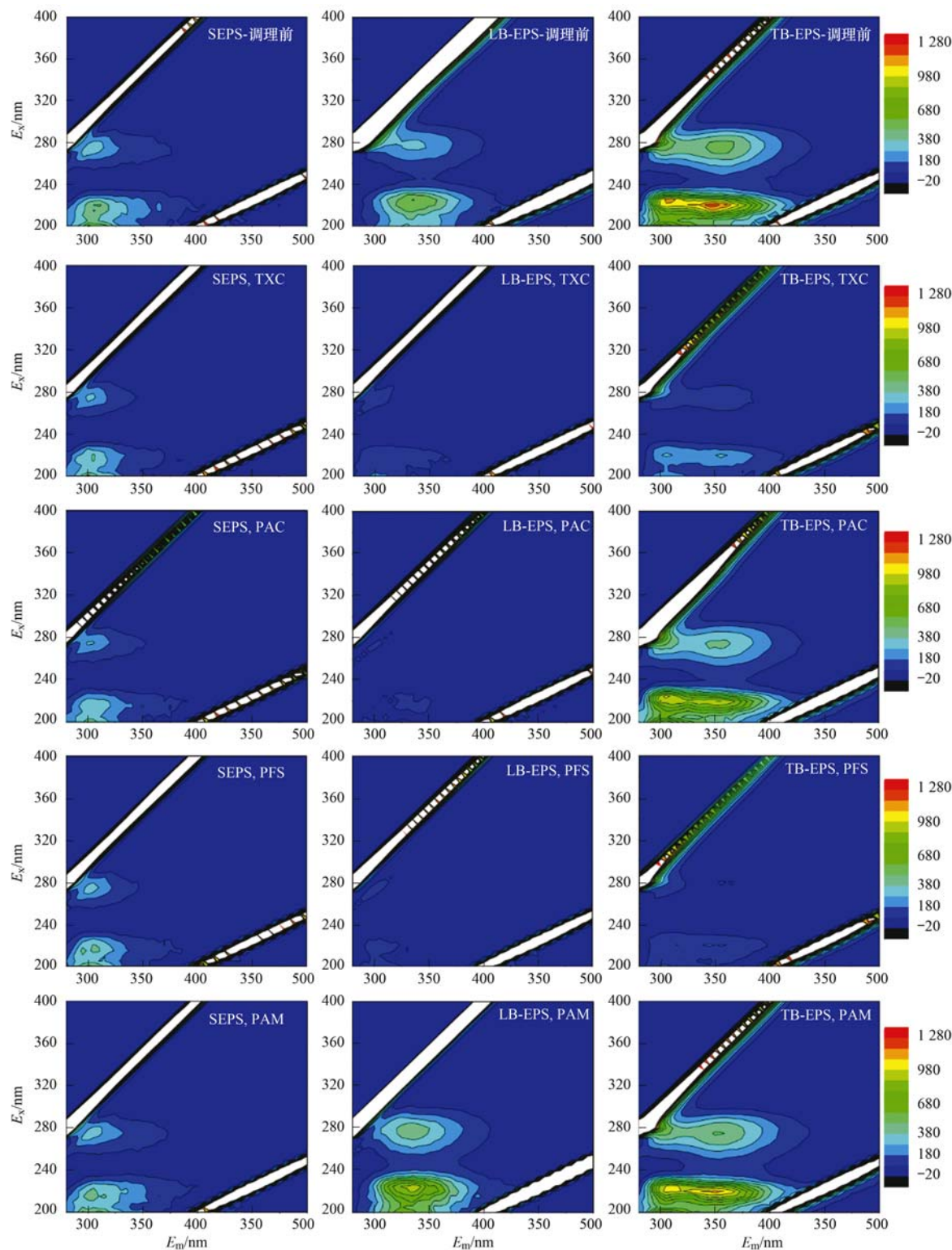


图 4 污泥调理前和经最优投加量调理后 SEPS、LB-EPS、TB-EPS 溶液的三维荧光谱图

Fig. 4 3D-EEM spectra of sludge solution and the variation after conditioning with different coagulants

2.3 调理过程中污泥结构差异

污泥颗粒的尺寸和密度是影响脱水性能的另一因素. 具有更高絮体密度、更大絮体尺寸的污泥更容易沉降和脱水. 通过混凝过程使颗粒聚集是增加絮体尺寸和密度的有利方式. 图 6(a) 对比了 4 种

混凝剂在最优投加量下混凝絮体的尺寸. 可以看到,3 种混凝剂调理后污泥颗粒的尺寸大小关系为: TXC > PFS > PAC > PAM. 钛系混凝剂混凝絮体尺寸要大于铝盐与铁盐混凝剂^[26], 这是由于钛离子的水解速度要高于铝离子与铁离子, 在混凝过程中,

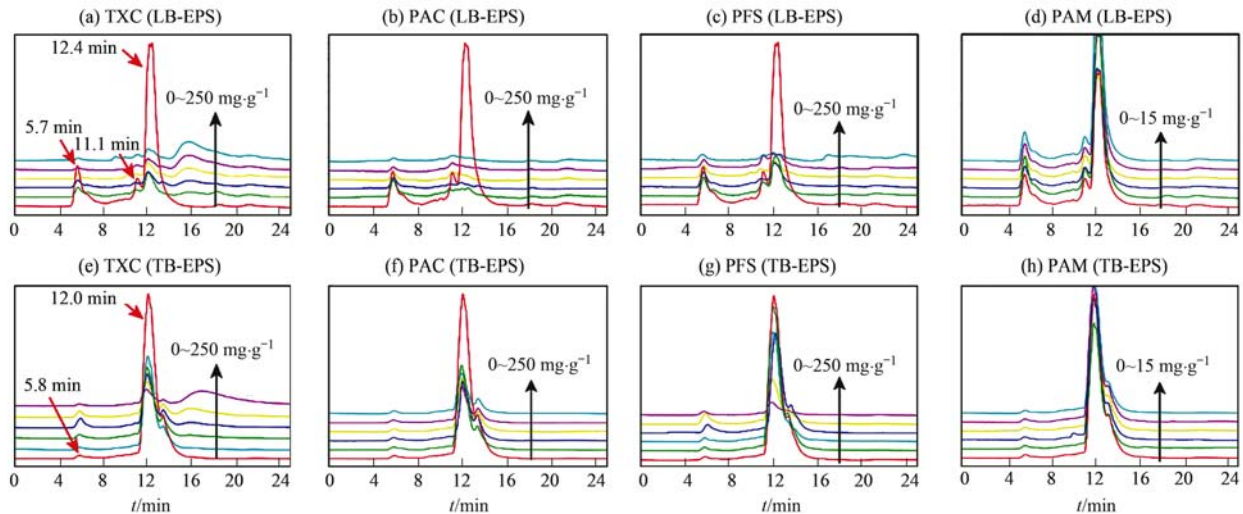


图5 不同混凝剂调理污泥过程中 LB-EPS 与 TB-EPS 组分不同分子量有机物含量变化

Fig. 5 Variation of GPC spectra in LB-EPS and TB-EPS solution after coagulation with different coagulants

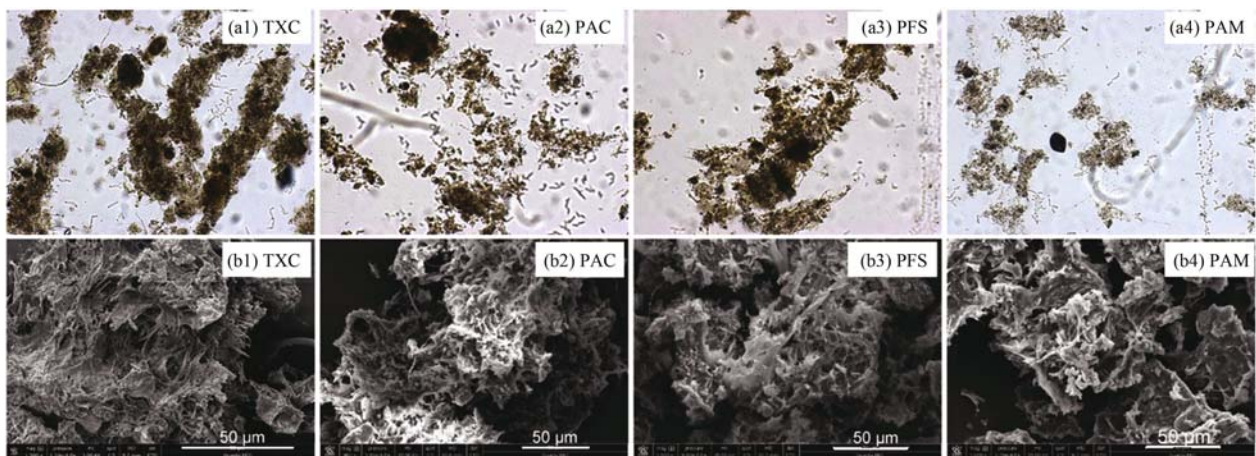
更趋向于水解生成不溶的氢氧化物沉淀。混凝颗粒尺寸顺序与污泥调理性能(图1)并不直接相关,说明污泥调理过程中形成的颗粒大小并不是影响污泥脱水性能的主要原因。

图6(b)直观地对比了4种混凝剂调理后污泥的结构。可看到,3种无机混凝剂调理后的污泥中孔隙较多,并具备明显的“骨架”结构,这种结构保持了水分过滤通道,降低了污泥有机质的可压缩性。而PAM处理后的污泥,结构密实,孔隙结构少。经过调理后,污泥比表面积由 $2.7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 分别变为 $6.0 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (TXC)、 $3.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (PAC)和 $8.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (PFS),而PAM调理后比表面积未发生明显变化。从调理能力、有机物去除情况与污泥结构分析,仅用单独的有机絮凝剂进行污泥调理并非理想手段。

2.4 污泥调理机制

根据以上分析,3种无机混凝剂在污泥调理过程中,水解物通过电中和与化学螯合作用与污泥基质中有机物成分发生相互作用,降低污泥颗粒表面电性,使污泥颗粒聚集成团,增大污泥颗粒尺寸、提高污泥密度,并通过形成“骨架”,嵌入到污泥结构中,在后续机械脱水过程中起到支撑作用;更为重要的是,在调理过程中,明显降低胞外聚合物中有机物含量,降低多糖类与蛋白质类有机物的含量,释放出胞外聚合物结合水,提高污泥脱水性能。而后者与污泥调理能力联系更为紧密。有机絮凝剂仅仅通过电性影响,一定程度上使颗粒聚集尺寸更大,提高脱水能力。

此3种无机混凝剂可看作预水解形成的氢氧化物中间体,这些预水解的形态在混凝过程中,可以



(a)显微镜照片, (b)扫描电镜图

图6 不同混凝剂在最优投加量下混凝絮体的显微镜照片(100×)和冷冻干燥后污泥的扫描电镜图

Fig. 6 Microscope photos (100×) of flocs and SEM images of vacuum freeze-dried flocs by different coagulants at their individual optimum dosage

更快地发挥电中和机制,与污染物接触后,随后进一步水解形成对应的氢氧化物沉淀. 3 种混凝剂的水解速度大小为 $\text{Ti} > \text{Fe} > \text{Al}$ [27,28], 通过预水解过程控制它们的水解速度所形成水解物的尺寸大小顺序为: $\text{PFS} > \text{TXC} > \text{PAC}$ (图 7). 因此推测,铝盐在混凝时,水解中间物可带有更高的正电荷,凭借强的电中和与污染物作用;铁盐与钛盐更容易水解,与

污泥颗粒接触后,进而立即水解生成多孔的氢氧化物沉淀,最终增加了干燥絮体的孔体积与比表面. 为证实这一推测,用胶体滴定的方法测定了 3 种无机混凝剂的电荷密度: $\text{PAC} (76 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}) > \text{TXC} (22 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}) > \text{PFS} (12 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1})$, 无机混凝剂的电荷特性和与胞外聚合物中有机物的结合能力共同决定了污泥调理性能.

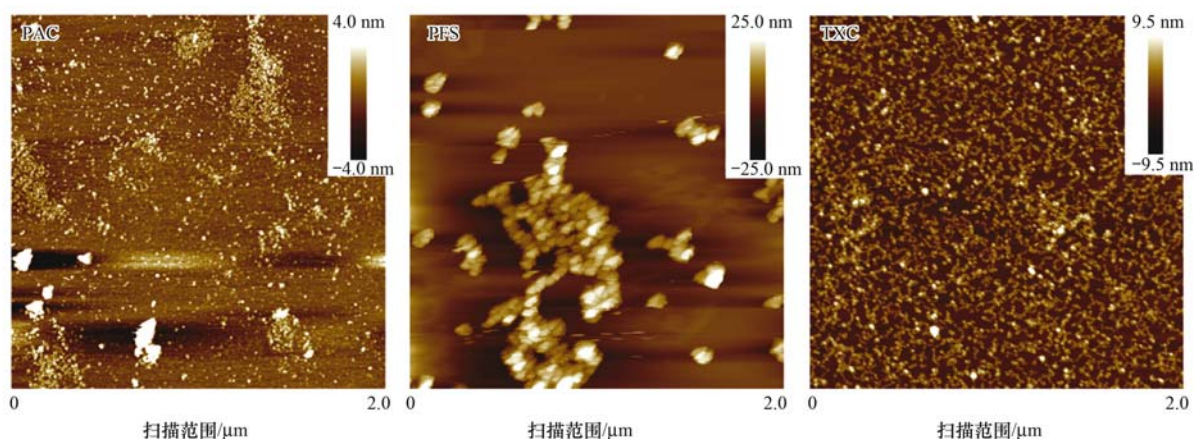


图 7 3 种无机混凝剂水解物形态原子力显微镜图

Fig. 7 AFM images of the hydrolysate products in the three inorganic coagulant stock solutions

3 结论

本研究对比了 TXC、PAC、PFS 和 PAM 的污泥调理性能,通过对调理后污泥比阻、胞外聚合物、污泥颗粒尺寸等研究,可知:无机混凝剂对污泥调理性能要优于有机絮凝剂,但所需投加量高;无机混凝剂与 LB-EPS 中多糖类物质结合能力强弱决定其污泥调理性能;无机混凝剂调理后所得污泥颗粒表面多孔,具备明显的“骨架”结构. 而钛系混凝剂作为一种新型水处理药剂,因其无生物毒性及优异的污泥调理能力,有望应用于实际污泥脱水领域. 虽然在该研究中证实钛凝胶混凝剂存在投加量高的问题,但是由于其制备方法简单可控,可通过制备有机絮凝剂复合型混凝剂、或与有机絮凝剂复配使用等方式进行改进. 更多关于钛凝胶混凝剂性能提高的探索,需要后期更为深入地研究.

参考文献:

- [1] 涂玉. 污泥调理中混凝剂对污泥脱水性能影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
Tu Y. Studies on the influence of coagulant on sludge dehydration performance in operating conditions[D]. Nanchang University, 2008.
- [2] Simon S, Païro 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.

- [3] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2752-2757.
Zhou J, Zhou L X, Wong W C. Optimization of extracellular polymeric substance extraction method and its role in the dewaterability of sludge[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2752-2757.
- [4] 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.
- [5] Zhai L F, Sun M, Song W, *et al.* An integrated approach to optimize the conditioning chemicals for enhanced sludge conditioning in a pilot-scale sludge dewatering process[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **121**: 161-168.
- [6] Liu F W, Zhou J, Wang D Z, *et al.* Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(8): 1403-1410.
- [7] Lu L H, Pan Z D, Hao N, *et al.* A novel acrylamide-free flocculant and its application for sludge dewatering[J]. *Water Research*, 2014, **57**: 304-312.
- [8] Zhao Y Q. Enhancement of alum sludge dewatering capacity by using gypsum as skeleton builder[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, **211**(2-3): 205-212.
- [9] 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.
- [10] Matsui Y, Matsushita T, Sakuma S, *et al.* Virus inactivation in aluminum and polyaluminum coagulation[J]. *Environmental*

- Science & Technology, 2003, **37**(22): 5175-5180.
- [11] Steiner A E, McLaren D A, Forster C F. The nature of activated sludge flocs[J]. Water Research, 1976, **10**(1): 25-30.
- [12] Wang X M, Li M H, Song X J, *et al.* Preparation and evaluation of titanium-based xerogel as a promising coagulant for water/wastewater treatment[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9619-9626.
- [13] Wang X M, Wang X, Wei Z B, *et al.* Potent removal of cyanobacteria with controlled release of toxic secondary metabolites by a titanium xerogel coagulant[J]. Water Research, 2018, **128**: 341-349.
- [14] 王彩霞, 张伟军, 王东升, 等. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2243-2251.
- Wang C X, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Influencing mechanism of titanium salt coagulant chemical conditioning on the physical and chemical properties of activated sludge flocs[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2243-2251.
- [15] Zhang W J, Chen Z, Cao B D, *et al.* Improvement of wastewater sludge dewatering performance using titanium salt coagulants (TSCs) in combination with magnetic nano-particles: Significance of titanium speciation[J]. Water Research, 2017, **110**: 102-111.
- [16] Zhao Y X, Phuntsho S, Gao B Y, *et al.* Preparation and characterization of novel polytitanium tetrachloride coagulant for water purification[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(22): 12966-12975.
- [17] 牛美青, 张伟军, 王东升, 等. 不同混凝剂对污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(9): 2126-2133.
- Niu M Q, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Study on effect of chemical conditioning using different coagulants on sludge dewatering performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(9): 2126-2133.
- [18] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent[J]. The Journal of Biological Chemistry, 1951, **193**(1): 265-275.
- [19] 刘晓涵, 陈永刚, 林励, 等. 萘酚硫酸法与苯酚硫酸法测定枸杞中多糖含量的比较[J]. 食品科技, 2009, **34**(9): 270-272.
- Liu X H, Chen Y G, Lin L, *et al.* Comparison of methods in determination of polysaccharide in *Lycium barbarum* L. [J]. Food Science and Technology, 2009, **34**(9): 270-272.
- [20] 邵青, 冷超群. 胶体滴定测定 PAC 电荷密度的实验研究[J]. 工业水处理, 2014, **34**(9): 70-73.
- Shao Q, Leng C Q. Experimental research on colloid titration determination of PAC charge density [J]. Industrial Water Treatment, 2014, **34**(9): 70-73.
- [21] Wu H, Liu Z Z, Yang H, *et al.* Evaluation of chain architectures and charge properties of various starch-based flocculants for flocculation of humic acid from water [J]. Water Research, 2016, **96**: 126-135.
- [22] Zhao Y X, Gao B Y, Qi Q B, *et al.* Cationic polyacrylamide as coagulant aid with titanium tetrachloride for low molecule organic matter removal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **258-259**: 84-92.
- [23] 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.
- [24] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. Water Research, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [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] 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.
- [27] Duan J M, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2003, **100-102**: 475-502.
- [28] Buettner K M, Valentine A M. Bioinorganic chemistry of titanium[J]. Chemical Reviews, 2012, **112**(3): 1863-1881.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)