

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

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

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较

孙秀玥, 唐珠, 杨新萍*

(南京农业大学资源与环境学院环境科学与工程系, 南京 210095)

摘要: 活性污泥污水处理系统中胞外多聚物(extracellular polymeric substances, EPS)对污染物的去除及污泥的絮凝、沉降和脱水性能都有着重要作用,影响活性污泥工艺的运行稳定性,然而不同的提取方法可能导致 EPS 组分、数量有显著差异,直接影响相关实验结果. 本文采用离心法提取溶解型和疏松型 EPS 后,采用文献经常报道的 8 种物理、化学方法提取紧密型 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS),研究 TB-EPS 数量及多糖、蛋白质、核酸等成分含量并进一步分析 TB-EPS 的基团组成,也分析了 TB-EPS 中 15 种元素含量. 结果表明,8 种方法中,加热法提取 TB-EPS 组分数量较多,对污泥微生物细胞破坏程度低,且在 EPS 提取过程不引入外源物质,是一种较为合适的 EPS 提取方法. 阳离子树脂法对 TB-EPS 中芳香族蛋白质和腐殖酸类物质有较好的提取效果,NaOH 法对富里酸类物质提取效果较好. 物理法对 TB-EPS 红外光谱的官能团种类无明显影响,但化学法对 TB-EPS 官能团种类影响较显著, TB-EPS 具有不同的特征吸附峰. 总体上,化学法提取的 TB-EPS 中元素含量高于物理法. 研究者应根据实验目的,选取适宜的 EPS 提取方法;或者建立 EPS 提取的标准方法,有助于实验结果间的比较.

关键词: 活性污泥; 胞外多聚物; 提取; 组分; 元素

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3306-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711034

Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge

SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping*

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Extracellular polymeric substances (EPSs) are biosynthetic polymers of microbial origin in the sludge activation process and crucially affect the properties of sludge in biological wastewater treatment reactors, such as the formation of sludge flocs, stabilization of sludge structure, and protection of microbes against noxious environmental conditions. However, the EPS extraction efficiency differs significantly according to the extraction method used. In this study, soluble EPSs and loosely bound EPSs can be extracted by centrifugation first and tightly bound EPSs in activated sludge require additional eight treatments for extraction, respectively. Three physical methods (centrifugation, sonication, and heating) and five chemical methods (cation exchange resin, NaOH, formaldehyde + NaOH, EDTA, and formaldehyde + EDTA) were tested, and the content and composition of TB-EPS were analyzed. Meanwhile, the functional groups and elements in TB-EPS were investigated. Results showed that the heating method did not introduce exogenous substances during the EPS extraction process and that the destruction of cells from this method was relatively slight. Heating was shown to be a gentle and efficient method in this study. The three-dimensional excitation and emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy showed that the cation exchange resin method had good extraction effect on humic-like and protein-like substances. As to fulvic-acid-like substances, NaOH was better than the other seven methods. Infrared spectroscopy showed that no notable difference appeared in the functional groups of the TB-EPS extracted by physical methods, whereas chemical methods induced big differences and showed particular bands that did not appear in the TB-EPS extracted by physical methods. Overall, the amounts of TB-EPS elements extracted using chemical methods were greater than those extracted using physical methods. In conclusion, a method must be selected and established for each case, taking into consideration the experimental purpose, and the most appropriate method should be chosen carefully.

Key words: activated sludge; extracellular polymeric substances (EPSs); extraction; component; elements

活性污泥胞外多聚物 EPS 作为活性污泥的重要组成部分,主要来源于微生物分泌物、细菌表面脱落物质、细胞裂解产物、水解产物以及对周围环境中有机或无机物质的吸附,其在污水生物处理系统中具有重要作用^[1,2]. EPS 组成成分包括蛋白质、多糖、腐殖酸、核酸和脂类等,其中蛋白质和多糖占 EPS 总量的 70% ~ 80%^[3]. EPS 具有独特的分层结构,由外而内分别为溶解型 EPS (soluble EPS,

SEPS),松散结合型 EPS (loosely bound EPS, LB-EPS) 和紧密结合型 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS)^[4,5]. EPS 可在微生物细胞外部形成缓冲层来保护细胞,为微生物生命活动提供相对稳定的生存

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370539)

作者简介: 孙秀玥(1994 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: 2016103056@njau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xpyang@njau.edu.cn

环境^[6,7]。聚合物架桥理论表明, EPS 带有负电荷, 可与二价或三价阳离子相互吸引将废水中的游离细菌及悬浮物质通过网捕作用加以去除^[8]。任丽飞等^[9]在污水处理系统外源加入 Ca^{2+} , 结果表明 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ca^{2+} 可促进 EPS 产生, 改善活性污泥沉降性能; 含有铅、镉、锌等金属离子的工业废水进入活性污泥系统, EPS 中带负电荷的基团如羧基、羟基等, 可与污水中的重金属离子相互作用提高污水处理厂出水水质^[7]。因此, 了解和研究 EPS 组分、基团及元素含量对改进活性污泥工艺性能非常关键。

活性污泥 SEPS 和 LB-EPS 通常采用离心法提取, EPS 的不同提取方法一般针对 TB-EPS 而言^[1, 10]。TB-EPS 的提取方法分为物理法和化学法两大类。物理法主要包括离心、超声、加热等方法; 化学法根据加入的提取剂主要分为 EDTA、NaOH、甲醛 + NaOH、甲醛 + EDTA、阳离子交换树脂 (cation exchange resin, CER) 等^[1]。EPS 的提取效率和组成与其所采用的提取方法密切相关^[11]。周俊等^[10]采用加热法提取出活性污泥的 TB-EPS 主要组分为蛋白质, 谢丹瑜等^[12]采用 CER 法提取出活性污泥的 TB-EPS 主要组分为多糖, EPS 提法方法不同, 使得不同研究者的实验结果难以进行比较。尽管国内外有许多关于活性污泥 EPS 提取方法的研究, 为人们深入理解 EPS 的组成、提取技术奠定了重要的基础, 但这些研究往往着眼于某种提取方法的条件优化^[13], 或仅仅比较 EPS 提取总量及多糖、蛋白质等成分含量的差异^[14], 对于提取方法如何影响 EPS 的有机物组分、官能团种类及元素含量等鲜见报道, 也未见将 8 种 EPS 提取方法一起进行比较。本研究运用离心法提取活性污泥 SEPS 和 LB-EPS 后, 采用国内外文献中提到的物理法 (离心、超声、加热) 和化学法 (CER、EDTA、NaOH、甲醛 + EDTA、甲醛 + NaOH) 提取活性污泥 TB-EPS, 测定 TB-EPS 中多糖、蛋白质、DNA 和元素含量, 同时借助红外光谱、三维荧光光谱及电感耦合等离子体质谱等分析手段全面比较提取方法对 EPS 组分、基团组成及元素含量的影响, 以期研究者根据不同实验目的选择适宜的 EPS 提取方法提供方法指导。

1 材料与方法

1.1 实验用污泥

本实验所用活性污泥为南京某城市污水处理厂二沉池回流污泥, 该污水处理厂采用 A^2/O 脱氮除

磷工艺。污泥取回后, 用超纯水 ($18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$) 洗涤 2 次, 然后用超纯水稀释至混合液污泥浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 4°C 保存, 用于后续 EPS 提取方法的比较。

1.2 EPS 的提取方法

分别取 3 份 800 mL 污泥样品, 在台式冷冻离心机 (Centrifuge 5810R, Eppendorf) 中 4°C 、 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 收集上清液, 上清液中含有 SEPS。剩余污泥用去离子水再悬浮至原体积, 4°C 、 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 收集上清液, 上清液中含有 LB-EPS。剩余污泥用去离子水再悬浮至原体积, 4°C 保存, 每份污泥均采用 8 种不同方法提取 TB-EPS^[4]。

(1) 离心法 污泥在 4°C 、 $20000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下, 离心 20 min^[5, 15]。

(2) 超声法 污泥在超声仪 (KQ-700DE, 昆山市超声仪器公司) 中 40 W 超声 2 min^[11, 16]。

(3) 加热法 污泥置于恒温水槽 (HS-800D, 太仓科教器材厂), 80°C 水浴加热 10 min^[15]。

(4) CER 法 树脂 (Dowex 50WX8 hydrogen form, 100 ~ 200 mesh, Sigma-Alorich, 美国) 投加量 (以 CER/VSS 计) 为 $75 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 然后在 4°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下, 摇瓶柜 (HYL-A, 太仓强乐) 振荡 3 h^[15]。

(5) NaOH 法 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 逐滴加入至污泥样品中, 调节污泥样品 pH 至 11, 在 4°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡 3 h^[17, 18]。

(6) 甲醛 + NaOH 法 将 0.6 mL 的 37% 甲醛 (体积分数) 加入污泥中, 然后向污泥中逐滴加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节 pH 至 11, 在 4°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡 3 h^[10, 18]。

(7) EDTA 法 2% EDTA 溶液 (质量分数) 与污泥样品 1:1 (体积比) 混合, 在 4°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡 3 h^[16]。

(8) 甲醛 + EDTA 法 将 0.6 mL 的 37% 甲醛加入污泥中, 处理后的污泥与 2% EDTA 溶液 1:1 (体积比) 混合, 在 4°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡 3 h^[10]。

经上述方法处理后的样品在 4°C 、 $20000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min, 上清液即为 TB-EPS, $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 4°C 保存待用^[3]。

1.3 TB-EPS 化学成分分析

TB-EPS 数量以总有机碳 (total organic carbon, TOC) 表示, 采用 TOC 分析仪 (TOC-VCPN analyzer, Shimadzu, 日本) 测定; EPS 中多糖 (polysaccharides,

PS)采用苯酚-硫酸法测量,以葡萄糖作为标准物质;蛋白质(proteins, PN)采用考马斯亮蓝法测量,以牛血清白蛋白作为标准物质;DNA采用二苯胺比色法测量,以 *E. coli* DNA 作为标准物质^[19].

1.4 三维荧光光谱分析

TB-EPS 三维荧光光谱(three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy, 3D-EEM)采用荧光分光光度计(LS-55, Perkin-Elmer, 美国)测定. 三维荧光光谱激发光源为氙弧灯,激发波长 E_x 以 10 nm 为增量从 200 nm 扫描到 400 nm,发射波长 E_m 以 0.5 nm 为增量从 300 nm 扫描到 550 nm,激发和发射狭缝均为 5 nm,扫描速度为 $1\,200\text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$ ^[20].

1.5 红外光谱分析

TB-EPS 红外光谱(fouriertransform infrared spectrum, FT-IR)采用红外光谱仪(NEXUS 870FT, 日本)分析. EPS 在 -80°C 冰箱(SANYO, 日本)冷冻 24 h 后置于冷冻干燥仪(Christ ALPHA 2-4 LD, 德国)干燥处理,干燥后样品与 KBr 以质量比 1:100 混合,于玛瑙研钵研匀,取约 150 mg 混合物压缩成薄片进行红外光谱分析. 红外光谱分析仪扫描波长为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm^{-1} ^[21].

1.6 元素含量分析

TB-EPS 中元素含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION-300x, Perkin Elmer, 美国)分析,测定 Na、Mg、Ca、Mn、Cr、Co 等 15 种元素^[17].

1.7 数据统计和分析方法

所有数据均采用 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准偏差来表示. 数据统计和分析使用 Excel 2016 软件,采

用 Origin 9.2 软件绘图.

2 结果与讨论

2.1 TB-EPS 化学组分提取量的比较

8 种不同的物理化学法所提取的污泥 TB-EPS 的总量(以 TOC 表征)见图 1(a),蛋白质、多糖、DNA 含量见图 1(b). 不同提取方法提取 TB-EPS 的化学组分含量差别较大. 从 TB-EPS 提取数量来看,离心法提取的 TB-EPS 数量最低,不适合 EPS 的后续组分分析,一般将其作为其它提取方法的对照^[16]. 超声法提取 TB-EPS 数量仅为 $2.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\pm 0.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,王淑莹等^[22]认为实验采用槽式超声波发生器超声污泥,与污泥的接触面积少,污泥受到的剪切力较弱,从而导致 EPS 剥离不彻底. EDTA 和甲醛 + EDTA 提取 TB-EPS 数量高,Nguyen 等^[11]认为 EDTA 可与 EPS 中二价阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等螯合,破坏了细胞间的主要结合机制,对细胞产生极大损伤,从而提取数量较高. 蛋白质和多糖为 EPS 主要组成成分,对污泥的颗粒化、絮凝及脱水等性能影响较大^[8]. 张丽丽等^[23]认为污泥絮凝能力与蛋白质含量呈正相关. Adav 等^[24]则认为由于多糖中存在负电官能团促进了污泥絮凝. 从多糖提取数量看,甲醛 + EDTA 法提取量最高,为 $270.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\pm 26.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,约是离心、超声法的 75 倍;从蛋白质提取数量看,EDTA 法提取数量最高,为 $26.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\pm 1.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超声法提取蛋白质,其含量低于检测限. 除离心法外,其它提取方法所提取的污泥 TB-EPS 中多糖含量都高于蛋白质含量,这与谢丹瑜等^[12]的研究结果一致.

在微生物细胞溶解数量最少、不导致 EPS 结构变化的前提下获得最大的 EPS 提取量,是 EPS 提取

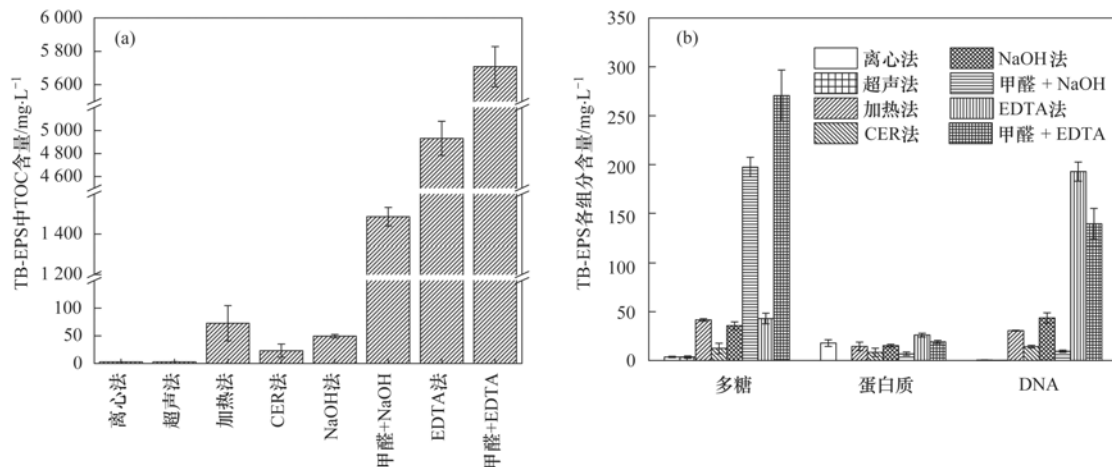


图1 不同提取方法提取后污泥 TB-EPS 各组分含量

Fig. 1 Composition of the extracted TB-EPS by different methods

所应遵循的原则,一般采用 DNA 含量来衡量 EPS 提取过程中细胞溶解破碎程度^[1]. 由图 1(b)可看出,EDTA 法及甲醛 + EDTA 法提取的 TB-EPS 中 DNA 含量较高,分别为 $192.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 9.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $139.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 15.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明这两种方法对污泥微生物细胞破坏严重,使得细胞内物质外释,对提取成分造成污染^[25]. 与 EDTA 法、NaOH 法相比,加入甲醛使得 TB-EPS 中 DNA 含量变小,这表明甲醛可以固定细胞,并能与细胞膜中的蛋白质和核酸结合,抵制细胞溶解^[11]. 离心法和超声法提取的 TB-EPS 中 DNA 含量较低,分别为 $0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明该方法对细胞破坏程度较轻. 综合看来,加热法提取组分数量多且对污泥微生物细胞破坏程度较低,在 EPS 提取过程不引入外源物质,是一种较为合适的 EPS 提取方法.

2.2 TB-EPS 的三维荧光光谱分析

三维荧光光谱可表征 EPS 中的荧光物质,包括芳香族蛋白质类、腐殖酸类和富里酸类物质,但无法表征多糖组分^[20]. 8 种方法提取活性污泥 TB-EPS 的三维荧光光谱见图 2. 表 1 列出了 TB-EPS 三维荧光光谱的荧光参数包括峰位、荧光强度等. 不同的提取方法其对应的 TB-EPS 荧光峰强度有较大差别. 离心法、超声法、EDTA 法和甲醛 + EDTA 提取出的 TB-EPS 中未检测出荧光物质,原因可能是这些方法对 TB-EPS 中荧光物质提取效果不高^[26]. Comte 等认为^[16],EDTA 会污染提取出的 EPS,从而导致 EPS 中蛋白质、腐殖质类物质分析困难. 如图 2 所示,加热法、CER 法、NaOH 法和甲醛 + NaOH 法提取的污泥 TB-EPS 三维荧光图谱中 Peak A、B 和 C 强度很高,表明这 4 种方法对芳香族蛋白质类物质有较好的提取效果,但对富里酸类和腐殖酸类

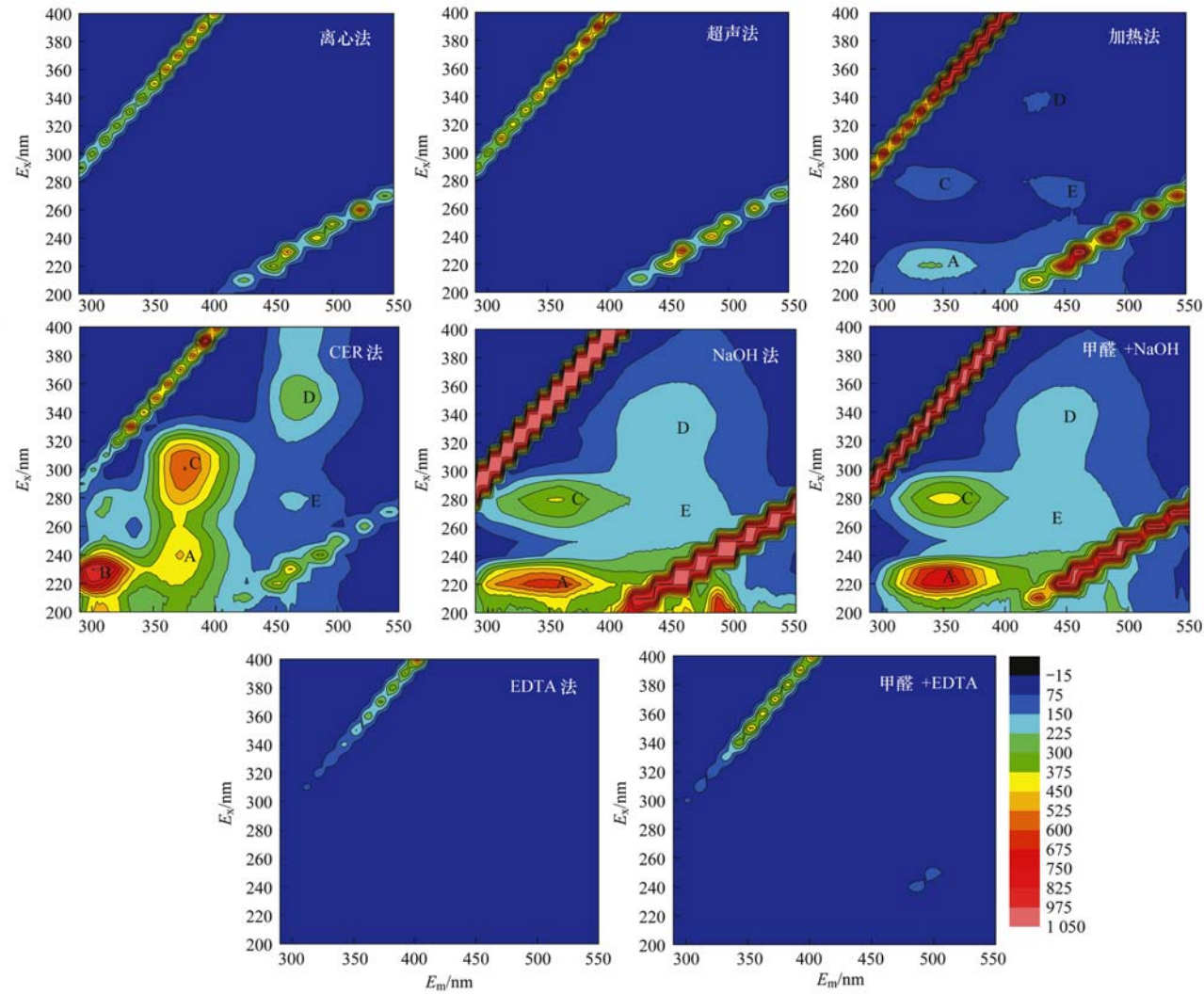


图 2 不同提取方法提取活性污泥 TB-EPS 的三维荧光光谱图

Fig. 2 EEM fluorescence spectra of the activated sludge TB-EPS for different extraction methods

物质提取效果不佳,仅表现出微弱峰或向外延伸的肩峰. Peak A 属于高激发波长类色氨酸, Peak B 仅在 CER 法提取的 TB-EPS 中检测出,属于类酪氨酸^[27], Peak C 属于高激发波长类色氨酸和蛋白质,主要是可溶性的微生物代谢产物^[28]. Peak D 的中心位置约为 $E_x/E_m = 330 \sim 350/422 \sim 466$,为分子量较大,结构复杂,芳构化程度较高的有机物^[27]. Peak E 的中心位置约为 $E_x/E_m = 260 \sim 280/450 \sim 464$,为富里酸类荧光峰^[21]. 相对于其它提取方法, CER 法提取的 TB-EPS 荧光峰都出现了不同程度的红移,结合图 1 看出 CER 对活性污泥细胞有较明显的破坏,胞内物质溶出导致与其它方法提取的 TB-EPS 成分存在差别^[29]. 对于芳香族蛋白质类物质提取效率, CER 法 > 甲醛 + NaOH 法 > NaOH 法 > 加热法; 对于腐殖酸类物质, CER 法 > NaOH 法 > 甲醛 + NaOH 法 > 加热法; 对于富里酸类物质提取效率, NaOH 法 > 甲醛 + NaOH 法 > CER 法 > 加热法,综合分析, CER 法对活性污泥 TB-EPS 的芳香族蛋白质和腐殖酸类物质有较好的提取效果, NaOH 法对富里酸类物质提取效果较好.

2.3 TB-EPS 红外光谱分析

红外光谱吸收峰的位置可以用来表征物质具有的化学键及官能团,强度可用于进行相对定量分析^[21]. 图 3 显示了 8 种方法提取 TB-EPS 的红外光谱图,主要特征吸收峰的位置包括^[15, 16]: $3\ 359 \sim 3\ 479\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰可归属于蛋白质的 N—H 伸缩振动和碳水化合物结合水及样品中残留水分导致的 —OH 伸缩振动; $2\ 890 \sim 2\ 934\ \text{cm}^{-1}$ 的可见弱峰为蛋白质、碳水化合物和腐殖酸的脂肪链的 CH_2 对称和不对称伸缩振动; $1\ 628 \sim 1\ 662\ \text{cm}^{-1}$ 处峰为典型蛋白质(酰胺 I)物质的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动; $1\ 315 \sim 1\ 475\ \text{cm}^{-1}$ 处峰为醇、酚物质的 C—H 面内弯曲振动和 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动; $914 \sim 1\ 107\ \text{cm}^{-1}$ 处峰表示多糖类物质的 —OH 伸缩振动; 低于 $900\ \text{cm}^{-1}$ 处峰为指纹区,多为硫、磷基团. 这些物质及基团的存在对去除污水中金属离子有很大的作用^[30].

由图 3(a) 看出,采用离心、超声和加热法提取 TB-EPS 得到的红外图谱峰型相似,表明物理法提取 TB-EPS 对其主要官能团种类影响不明显,但主要官能团的红外吸收峰强度按照离心、超声、加热法依次增加,表明这些官能团的含量随着提取方法不同而增加,这与 D'Abzac 等^[15]的研究结果一致. 由图 3(b) 和 3(c) 可以看出,采用化学法提取 TB-EPS 的峰型和峰强间区别较大. 甲醛 + EDTA 和

EDTA 法提取的 TB-EPS 红外光谱在 $3024 \sim 3028\ \text{cm}^{-1}$ 处出现氨基物质的 N—H 伸缩振动峰,低于 $1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰型比其它提取方法的红外谱图复杂, Liu 等^[31]认为 EDTA 与 EPS 之间可能会形成络合物, EDTA-EPS 络合物不能通过膜过滤去除,从而保留在 TB-EPS 中,对 TB-EPS 官能团种类影响较大.

2.4 TB-EPS 中元素含量分析

在活性污泥法处理金属废水的过程中, EPS 起

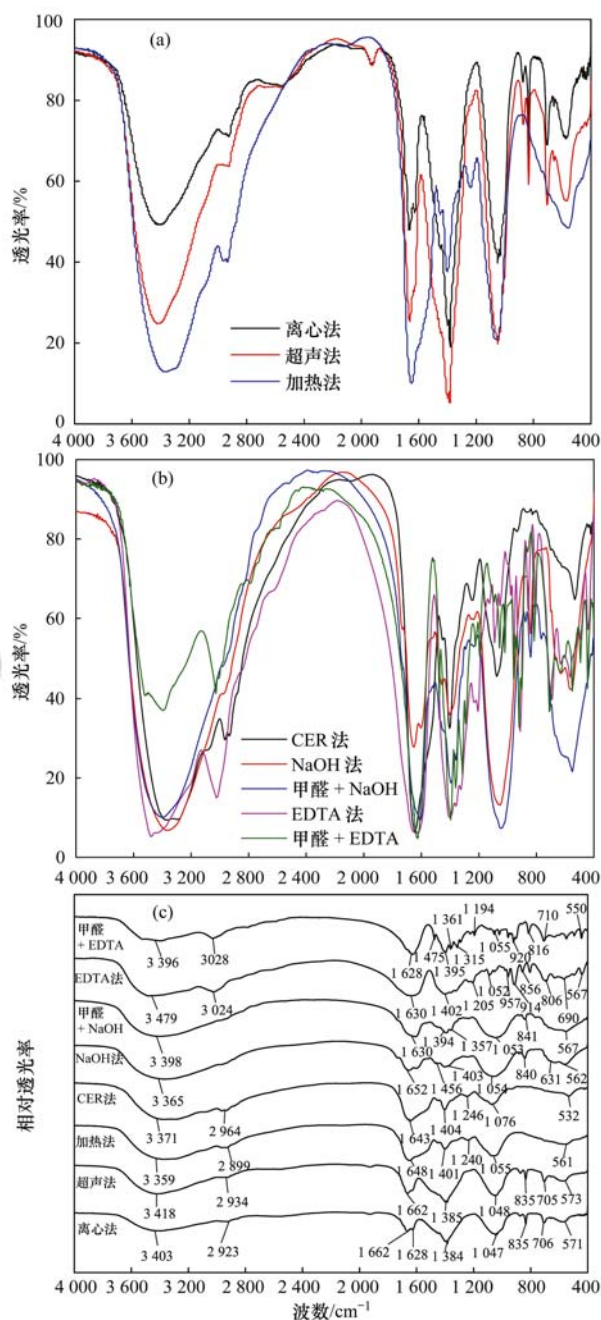


图 3 不同提取方法提取活性污泥 TB-EPS 的红外光谱图

Fig. 3 FT-IR spectra of the activated sludge TB-EPS for different extraction methods

表 1 TB-EPS 三维荧光光谱分析结果^[21]

Table 1 Fluorescence spectra parameters of the TB-EPS samples				
提取方法	Peaks	峰位 (E_x/E_m)	荧光强度	成分
离心	— ¹⁾	—	—	—
超声	—	—	—	—
加热	A	220/340	237.952	芳香族蛋白质类
	C	280/344	105.559	芳香族蛋白质类
	D	330/422	75.599	腐殖酸类
	E	270/452	83.207	富里酸类
	A	230/368	446.679	芳香族蛋白质类
CER	B	230/305	989.238	芳香族蛋白质类
	C	305/376	602.988	芳香族蛋白质类
	D	350/466	282.824	腐殖酸类
	E	280/464	166.399	富里酸类
	A	220/350	666.861	芳香族蛋白质类
NaOH	C	280/356	385.790	芳香族蛋白质类
	D	330/440	206.704	腐殖酸类
	E	260/458	211.782	富里酸类
	A	220/346	750.290	芳香族蛋白质类
甲醛 + NaOH	C	280/352	408.398	芳香族蛋白质类
	D	340/436	190.393	腐殖酸类
	E	260/450	205.434	富里酸类
	A	220/346	750.290	芳香族蛋白质类
EDTA	—	—	—	—
甲醛 + EDTA	—	—	—	—

1) “—”表示未检测出物质

重要作用,其表面存在的羟基、羧基、羰基等带有负电荷的基团可以与金属离子络合,达到吸附去除的效果^[30]. 8 种提取方法得到的活性污泥 TB-EPS 中元素含量见图 4. TB-EPS 中元素含量与所采用的提取方法相关. 总体上,化学法提取出的 TB-EPS 中含有更高的元素含量,EDTA 法及甲醛 + EDTA 法对 TB-EPS 中大部分元素提取效率均较高,如 Mn、Fe、Pb、Cd、Zn 等,但对于 As, CER 法提取效率最高,

对于 Mo,加热法提取效率最高.

从图 4(a)可看出,加热及超声法对 TB-EPS 中大量元素提取量较低,原因是加热或超声处理会破坏细胞外基质,导致捕获的无机离子被释放,在提取过程中形成沉淀而无法在 TB-EPS 中检测^[15]. NaOH 法、甲醛 + NaOH、EDTA 法和甲醛 + EDTA 方法提取的 TB-EPS 中 Na 含量最高,原因是这 4 种提取方法所加试剂中均含有 Na⁺,对测试结果

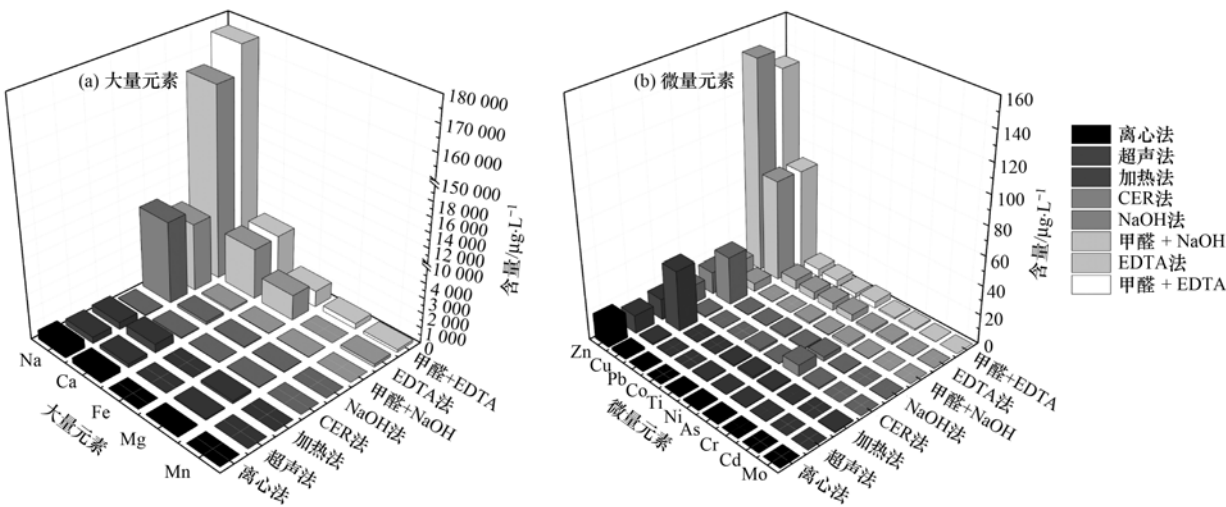


图 4 不同方法提取的活性污泥 TB-EPS 中大量元素和微量元素含量

Fig. 4 Major elements and trace elements contents in the TB-EPS extracted by different methods

造成了一定干扰. NaOH 法和甲醛 + NaOH 法对大量元素 Ca、Fe、Mg、Mn 提取含量较低,这可能是在提取过程中, Ca、Fe、Mg、Mn 等金属阳离子易与 OH^- 反应生成氢氧化物形式的沉淀而无法持留在 EPS 中^[17]. 图 4(b) 表明,在 TB-EPS 中微量元素含量最高的是 Zn,其次为 Cu,这与 Bourven 等^[17]的实验结果一致. Sun 等^[32]的研究表明羟基、羧基和氨基等是参与好氧活性污泥 EPS 对 Zn 和 Co 的吸附的主要官能团. 由于 TB-EPS 中羟基和磷酸基的作用,其对 Cu 的吸附效果较好^[30]. Guibaud 等^[33]的研究表明活性污泥微生物 EPS 对 Cd、Pb 和 Ni 吸附能力顺序为: Pb > Ni > Cd,与本研究结果一致,参与吸附反应的主要官能团是羧基和含磷基团.

3 结论

(1) 甲醛 + EDTA 法、EDTA 法提取的 TB-EPS 数量较多,离心法、超声法较低,但甲醛 + EDTA 法、EDTA 法和 CER 法对活性污泥微生物细胞 DNA 有较明显的破坏.

(2) 离心法、超声法、EDTA 法和甲醛 + EDTA 法提取的 TB-EPS 中未检测出荧光物质,物理提取方法对 TB-EPS 官能团种类没有明显影响,但化学方法对 TB-EPS 峰型和峰强影响明显,加入的化学试剂可能与 TB-EPS 络合,显示出特异性吸收峰.

(3) 与物理法相比,化学法提取的 TB-EPS 中 Na、Mg、Ca、Mn 等 15 种元素含量更高,但化学试剂 NaOH、EDTA 的加入导致 TB-EPS 中 Na 含量显著增加.

参考文献:

- [1] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [2] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 919-934.
- [3] Sun J, Guo L, Li Q Q, *et al.* Structural and functional properties of organic matters in extracellular polymeric substances (EPS) and dissolved organic matters (DOM) after heat pretreatment with waste sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 614-623.
- [4] Pan X L, Liu J, Zhang D Y, *et al.* Binding of dicamba to soluble and bound extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic activated sludge: a fluorescence quenching study[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, **345**(2): 442-447.
- [5] Yuan D Q, Wang Y L, Qian X. Variations of internal structure and moisture distribution in activated sludge with stratified extracellular polymeric substances extraction[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **116**: 1-9.
- [6] Hong P N, Honda R, Noguchi M, *et al.* Optimum selection of extraction methods of extracellular polymeric substances in activated sludge for effective extraction of the target components[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, **127**: 136-146.
- [7] Pellicer-Núñez C, Domingo-Félez C, Mutlu A G, *et al.* Critical assessment of extracellular polymeric substances extraction methods from mixed culture biomass[J]. *Water Research*, 2013, **47**(15): 5564-5574.
- [8] 何志江, 赵媛, 张源凯, 等. 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3135-3143.
He Z J, Zhao Y, Zhang Y K, *et al.* Influence of activated sludge surface properties on flocculating settling and effluent suspended solid[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3135-3143.
- [9] 任丽飞, 杨新萍, 张雯雯. 外源 Ca^{2+} 对 SBR 启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2470-2476.
Ren L F, Yang X P, Zhang W W. Evolution of extracellular polymeric substances of the activated sludge with calcium ion addition during set-up period of sequencing batch reactors[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2470-2476.
- [10] 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.
- [11] Nguyen V H, Klai N, Nguyen T D, *et al.* Impact of extraction methods on bio-flocculants recovered from backwashed sludge of bio-filtration unit[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **180**: 344-350.
- [12] 谢丹瑜, 康得军, 唐虹, 等. 活性污泥胞外聚合物提取方法比较与热碱法优化[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(9): 5295-5300.
Xie D Y, Kang D J, Tang H, *et al.* Extraction of extracellular polymeric substances from activated sludge and optimization of thermal-alkaline method[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(9): 5295-5300.
- [13] Jia F X, Yang Q, Han J H, *et al.* Modeling optimization and evaluation of tightly bound extracellular polymeric substances extraction by sonication[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(19): 8485-8494.
- [14] 袁冬琴, 王毅力. 活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
Yuan D Q, Wang Y L. Study on the stratification components of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge and their variation characteristics in physicochemical properties[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
- [15] D'Abzac P, Bordas F, Van Hullebusch E, *et al.* Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from anaerobic granular sludges: comparison of chemical and physical extraction protocols

- [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **85**(5): 1589-1599.
- [16] Comte S, Guibaud G, Baudu M. Relations between extraction protocols for activated sludge extracellular polymeric substances (EPS) and EPS complexation properties: Part I. Comparison of the efficiency of eight EPS extraction methods[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **38**(1-2): 237-245.
- [17] Bourven I, Joussein E, Guibaud G. Characterisation of the mineral fraction in extracellular polymeric substances (EPS) from activated sludges extracted by eight different methods [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7124-7130.
- [18] 郑蕾, 田禹, 孙德智. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1507-1511.
- Zheng L, Tian Y, Sun D Z. Effects of pH on the surface characteristics and molecular structure of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(7): 1507-1511.
- [19] Wang R D, Peng Y Z, Cheng Z L, *et al.* Understanding the role of extracellular polymeric substances in an enhanced biological phosphorus removal granular sludge system [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **169**: 307-312.
- [20] 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.
- [21] Zhu L, Qi H Y, Lv M L, *et al.* Component analysis of extracellular polymeric substances (EPS) during aerobic sludge granulation using FTIR and 3D-EEM technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 455-459.
- [22] 王淑莹, 何岳兰, 李夕耀, 等. 不同活性污泥胞外聚合物提取方法优化[J]. *北京工业大学学报*, 2016, **42**(4): 569-576.
- Wang S Y, He Y L, Li X Y, *et al.* Optimization of extracellular polymeric substance extraction method of different sludge [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, **42**(4): 569-576.
- [23] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 795-799.
- Zhang L L, Chen X, Chen J M, *et al.* Role mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of aerobic granular sludge [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 795-799.
- [24] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [25] 杨敏, 胡学伟, 宁平, 等. 废水生物处理中胞外聚合物 (EPS) 的研究进展[J]. *工业水处理*, 2011, **31**(7): 7-12.
- Yang M, Hu X W, Ning P, *et al.* Research progress in extracellular polymeric substances applied to biological wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, **31**(7): 7-12.
- [26] 陈华, 胡以松, 王晓昌, 等. 复合式膜生物反应器中胞外聚合物提取方法综合评价[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(8): 2904-2908.
- Chen H, Hu Y S, Wang X C, *et al.* Assessment on extraction methods of EPS from hybrid membrane bioreactor [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(8): 2904-2908.
- [27] 姚璐璐, 涂响, 于会彬, 等. 三维荧光区域积分评估城市污水中溶解性有机物去除[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(2): 411-416.
- Yao L L, Tu X, Yu H B, *et al.* Evaluation of dissolved organic matter removal in municipal wastewater based on fluorescence regional integration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(2): 411-416.
- [28] Yu H B, Song Y H, Xiang T, *et al.* Assessing removal efficiency of dissolved organic matter in wastewater treatment using fluorescence excitation emission matrices with parallel factor analysis and second derivative synchronous fluorescence [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **144**: 595-601.
- [29] 郭卓颖, 郭峰, 叶成松, 等. 管网生物膜菌株胞外聚合物的提取方法比较[J]. *环境化学*, 2012, **31**(4): 539-544.
- Wu Z Y, Guo F, Ye C S, *et al.* Comparison of extraction methods for extracellular polymeric substances from a drinking water biofilm-forming bacteria [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(4): 539-544.
- [30] Fang L C, Huang Q Y, Wei X, *et al.* Microcalorimetric and potentiometric titration studies on the adsorption of copper by extracellular polymeric substances (EPS), minerals and their composites [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(15): 5774-5779.
- [31] Liu H, Fang H H. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [32] Sun X F, Wang S G, Zhang X M, *et al.* Spectroscopic study of Zn^{2+} and Co^{2+} binding to extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic granules [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2009, **335**(1): 11-17.
- [33] Guibaud G, Tixier N, Bouju A, *et al.* Relation between extracellular polymers composition and its ability to complex Cd, Cu and Pb [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(10): 1701-1710.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)