

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究 郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)

北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)

奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)

华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 苏彬彬 (2519)

北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究 方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)

民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)

醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究 张凡, 王建华, 王小臣, 王建昕 (2539)

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)

生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析 李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)

炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究 周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)

春季东、黄海溶解甲烷的分布和海水交换通量 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)

千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)

新安江流域土地利用结构对水质的影响 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)

长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)

河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性 杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)

水藻暴发的影响因素定量化研究初步 张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)

深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响 卢金锁, 胡亚潘 (2611)

结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度 周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)

Subwet 模型在人工湿地设计中的应用 李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)

白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响 许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周锋 (2642)

铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究 汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)

铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究 杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)

不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响 赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)

邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H₂O₂ 降解机制研究 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)

二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd²⁺ 离子的吸附研究 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)

酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附 蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)

基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni²⁺ 的吸附性能 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)

树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐 王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)

Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究 朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)

化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究 王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)

镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)

HRT 对 A²O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 张超, 陈银广 (2741)

强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究 熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)

污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)

不同粒径铁铝泥对砷(III)的吸附效果 林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)

我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)

浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离 徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)

三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响 张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)

吉林前郭水田土壤有机碳垂向分布规律和储量研究 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)

关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例 张晓伟, 许明祥 (2793)

三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究 黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)

土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴C 连续标记法 史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)

西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)

丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价 李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)

农药企业场地苯系物污染风险及调控对策 虎博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)

水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)

硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响 刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)

零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用 周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)

2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果 全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)

反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)

1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究 张倩, 王弘宇, 桑稳姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)

1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究 陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)

微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解 张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)

扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究 周际海, 孙向婷, 胡锋, 李辉信 (2894)

固定化 *Lysinibacillus cresolovorans* 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解 李婷, 任源, 韦朝海 (2899)

生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析 黄翔峰, 张树聪, 彭开铭, 陆卫君, 刘佳 (2906)

A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞微, 白志辉 (2912)

生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)

专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)

污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响

周俊^{1,2}, 周立祥^{1*}, 黄焕忠^{1,3}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系, 南京 210095; 2. 南京工业大学生物与制药工程学院, 南京 211816; 3. 香港浸会大学理学院, 香港 999077)

摘要: 采用 7 种不同方法提取污泥胞外聚合物 (EPS), 并研究污泥不同层 EPS 剥离前后对污泥脱水性能的影响. 结果表明, 甲醛 + NaOH 和 2% EDTA 提取法对污泥中紧密结合的胞外聚合物 (tightly bound extracellular polymeric substances, TB-EPS) 提取效率最高, 总固体 (SS) 中的 EPS 提取量分别为 $128.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $42.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 但提取后细胞破裂严重, 不能代表污泥 EPS 的真实含量, 不宜采用. 加热法较为温和, 提取效率较高, 总 SS 中 EPS 产量为 $21.97 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 污泥剥离黏液层 (Slime 层)、松散结合的胞外聚合物 (loosely bound extracellular polymeric substances, LB-EPS) 和 TB-EPS 层后污泥的脱水性能大幅度改善, 其中 Slime 层 EPS 含量越高污泥的脱水性能越差, 当污泥 EPS 大量地释放到溶液中即 Slime 层时污泥的 CST 值大幅度升高, 污泥的脱水性能变差. 石湖墟和昂船湾污泥初始的毛细吸水时间 (CST) 为 132.9 s 和 229.9 s, 当剥离 Slime 层时这 2 种污泥的 CST 值分别为 80.8 s 和 79.4 s, 脱水性能得到明显改善.

关键词: 污泥; 胞外聚合物; 脱水性能; 毛细吸水时间; 提取方法

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2752-06

Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge

ZHOU Jun^{1,2}, ZHOU Li-xiang¹, WONG Woo-chung^{1,3}

(1. Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China; 3. Faculty of Science, Hong Kong Baptist University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Seven commonly adopted extraction schemes were selected to extract extracellular polymeric substance (EPS) from the sludge, and the dewaterability of sludge was also investigated before and after extracting EPS. Results showed that Formaldehyde + NaOH and 2% EDTA methods were proved to be effective in extracting EPS from the sludge, and the total EPS production of the total suspended solid was $128.86 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $42.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. However, the cell destructed seriously after extracted by Formaldehyde + NaOH and 2% EDTA methods. Heating method was a gentle and efficient method, and the total EPS production was $21.97 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Sludge dewaterability was largely improved after extracted slime, loosely bound EPS and tightly bound EPS from the sludge flocs. It was also found that the higher content of EPS in slime, the worse dewaterability of sludge, and sludge dewaterability would be deteriorated when EPS was released from other layers to slime. Capillary suction time (CST) values of sludge from the Shek Wu Hui and Stonecutters Island Treatment works were 132.9 s and 229.9 s compared to 80.8 s and 79.4 s, separately after extracted Slime from sludge flocs, and the dewaterability of sludge was greatly improved.

Key words: sludge; extracellular polymeric substance; dewaterability; capillary suction time; extraction method

活性污泥法处理污水过程中产生大量的剩余污泥, 剩余污泥主要是由污水中的悬浮物、胶状物及微生物的絮体组成^[1]. 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是微生物在一定的环境下, 其代谢过程中分泌的包围在细胞壁外的多聚物, EPS 的成分和微生物的胞内物质类似, 主要是一些高分子的聚合物, 如蛋白质、多糖和核酸等聚合物, 一般认为 EPS 占活性污泥总有机质的 50% ~ 90%^[1~3]. EPS 对污泥絮体的束水容量具有重要的贡献, 污泥中大部分的水结合在 EPS 中, 因此 EPS 被认为是影响污泥脱水性能的最主要因素^[3~5]. 国内外关于 EPS 与污泥脱水性能的关系研究较多, 但

结果不一致. Kang 等^[6]研究从一种污泥中提取的 EPS 添加到另外一种污泥中, 发现其对污泥的脱水有负作用; Houghton 等^[7]研究发现添加一定量的 EPS 能够促进污泥的脱水; 王红武等^[8]研究发现 EPS 的组成对污泥脱水有显著的影响, 松散结合的胞外聚合物 (LB)/紧密结合的胞外聚合物 (TB) 越大, 污泥的脱水性能越差, 而 EPS 的总量对污泥的

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (2117706)

作者简介: 周俊 (1983 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境微生物技术和固体废物处理与处置, E-mail: junzhou1983@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njut.edu.cn

脱水性能影响不大; Li 等^[9]研究也发现尽管一定量的 EPS 对污泥的脱水性能有促进作用, 但是过多的 EPS 反而导致污泥的絮凝和脱水性能变差. 因此, 目前关于污泥 EPS 的含量和组成对污泥脱水性能的影响尚存在争议.

为了更好地研究污泥胞外聚合物与污泥脱水性能的关系, 需要探索合理的污泥胞外聚合物的分层及提取方法. EPS 提取的一个关键要素是所选的方法不但能够准确地将其从细胞表面分离出来, 而且要足够温和, 避免引起细胞的裂解和溶解, 从而导致细胞的内聚物泄漏到胞外, 造成 EPS 数量和成分分析的误差, 一般采取 EPS 中 DNA 的相对含量作为检验细胞相对破裂程度的标准^[1,10,11]. 为了更好地研究污泥各层的 EPS 及其组分对污泥的脱水性能的影响, 本实验结合前人的研究结果^[3,12]及实验室摸索, 引入污泥 EPS 的分层概念, 即按照有机物与细胞相的结合程度, 将污泥的 EPS 分为黏液层

(Slime)、松散结合的胞外聚合物 (loosely bound extracellular polymeric substances, LB-EPS) 和紧密结合的胞外聚合物 (tightly bound extracellular polymeric substances, TB-EPS), 然后研究加热法、超声波法、甲醛法、甲醛 + 超声波法、EDTA 法和甲醛 + NaOH 法、对照等 7 种方法对污泥胞外聚合物提取效果进行研究, 通过对 EPS 中组分的定量分析, 评价不同方法的提取效果. 同时, 研究污泥剥离不同层的 EPS 前后污泥脱水性能的状况, 了解污泥各层 EPS 对污泥脱水性能的影响, 以期获得较为合理的 EPS 提取方法及研究 EPS 与污泥脱水性能的关系奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试污泥性质

污泥采自香港石湖墟和昂船湾污水处理厂厌氧发酵池, 污泥的基本理化性质见表 1.

表 1 污泥的基本性质¹⁾

Table 1 Physicochemical characteristics of sludge

污泥	pH	含固率/%	VSS/%	总 N/%	总 P/%	CST/s
石湖墟污泥	7.12	1.70	72.6	6.3	2.53	129.4
昂船湾污泥	6.42	2.40	45.0%	2.07	0.58	229.9

1) 除 pH、含固率和 CST 外, 其它指标均以干物质计

1.2 污泥胞外聚合物的提取方法

按照有机物与细胞相的结合程度, 将污泥胞外聚合物分为黏液层 (Slime)、LB-EPS 和 TB-EPS, 比较不同提取方法的提取效率. 提取方法如下: 首先将污泥在 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, 收取其上清液为黏液层 (Slime). 然后在污泥颗粒中添加 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 洗 2 次, 弃去上清液, 接着用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 将污泥颗粒悬浮到原来的体积, 120 W 超声 2 min, 28°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡培养 10 min, 然后 120 W 超声 2 min, 最后在 $9000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 4°C 下离心 15 min, 收集上清液为 LB-EPS. 污泥颗粒再用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 悬浮到原来的体积, 然后 28°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡培养 10 min 后, 分别用 7 种不同的方法提取污泥的 TB-EPS, 对照处理是将污泥在 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 4°C 下离心 20 min; 加热法是在 70°C 下加热 30 min; 超声波法是将污泥在 120 W 下超声 10 min; 甲醛法是将污泥加入 0.06 mL 36.5% 的甲醛后 4°C 振荡 1 h; 甲醛 + 超声波法是在甲醛法处理后再 120 W 超声 10 min; 甲醛 + NaOH 法是在甲醛法处理后再加 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 振荡 3 h; EDTA 法是添加 2% 的

EDTA 后 4°C 下振荡 3 h, 经过不同的方法处理后在 $20000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 4°C 下离心 20 min, 收集上清液为 TB-EPS. 将 Slime、LB-EPS 和 TB-EPS 溶液过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜, 然后在 3500 Da 的透析袋中、 4°C 下透析 2 d, 收集透析后的 EPS 进行化学分析. 提取方法详细的流程见图 1.

1.3 剥离污泥各层 EPS 前后污泥脱水性能的变化

为了考察不同层的 EPS 对污泥脱水性能的影响, 设置如下处理: ①原始污泥; ②原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 后弃去上清, 用去离子水恢复到原来的体积混匀 (- Slime); ③原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 后再混匀 (+ Slime); ④原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 混匀后 $9000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后混匀 (+ Slime + LB); ⑤原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 后弃去上清, 用去离子水恢复原来体积再 $9000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后弃去上清, 最后用去离子水恢复到原来的体积混匀 (- Slime - LB); ⑥原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 后混匀, 接着 $9000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后混匀, 然后 70°C 下加热 30 min, 最后 $20000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 20 min 后混匀 (+ Slime + LB + TB); ⑦原始污泥 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离

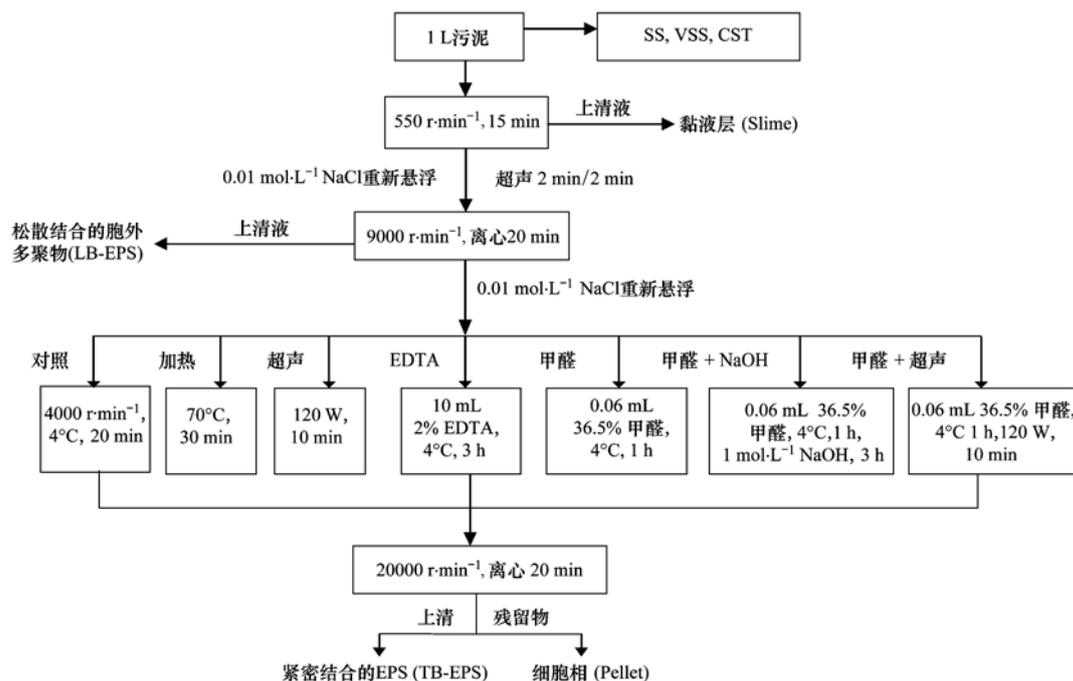


图1 不同的提取方法对污泥中胞外多聚提取

Fig. 1 Procedures for EPS extraction processes

心 15 min 后弃去上清,接着去离子水恢复原来体积后 9 000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后弃去上清,再用去离子水恢复到原来的体积混匀,然后 70°C 下加热 30 min, 20 000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后弃去上清,最后用去离子水恢复到原来的体积后混匀(- Slime - LB - TB).

1.4 分析测定方法

用 pHS-3C 精密 pH 计 (Mettler Toledo) 测定污泥的 pH; 污泥的含固率用 105°C 烘干法测定; 全 N: 硫酸-混合催化剂消化, 蒸馏定氮法测定; 全 P: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_3$ 消化, 钼蓝比色法测定; 挥发性固体 (VSS) 用灼烧法测定^[13]; 污泥毛细吸水时间 CST (指污泥中的水分在特制的滤纸上渗透 1 cm 距离所需要的时间, 用 s 表示) 采用 CST 测定仪 (TYPE 304M, 英国 Triton 公司) 测定^[3,14,15]; 蛋白质的测定采用改进型的 Lowry 法, 以牛血清蛋白作为标准物质^[16,17]; 多糖的测定采用蒽酮比色法, 以蔗糖作为标准物质^[18]; DNA 的测定采用二苯胺比色法, 以 DNA 钠盐为标准物质^[19]; TOC 采用 TOC 测定仪测

定 (TOC-5000A, Shimadzu).

2 结果与讨论

2.1 污泥 Slime 和 LB 层中的各组分的含量

表 2 反映了石湖墟污水处理厂厌氧污泥胞外聚合物 Slime 和 LB-EPS 中各组分的含量 (以污泥中每 g SS 计). 可以看出 Slime 层中总的 EPS 的含量比 LB 层多, 分别为 18.73 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 5.03 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 以总的有机碳 (TOC) 来表示分别为 2.08 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 1.52 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 该污泥 Slime 和 LB-EPS 层中的蛋白质是其主要成分, 含量分别为 13.83 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 3.98 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 这两层中蛋白质和多糖的比例 (PN/PS) 分别为 4.79 和 5.77, 何培培等^[3] 研究表明污泥 Slime 层中的蛋白质和蛋白质/多糖的含量与污泥的脱水性能的关系重大, Slime 层中蛋白质含量越高或者蛋白质/多糖的比例越大污泥的脱水性能越差, 因此该污泥的脱水性能也可能受 Slime 层中 EPS 的含量和组分的影响较大. 另外该污泥 Slime 层中 DNA 的含量比 LB 层中 DNA 含量要高出很多, 分别为 2.01

表 2 石湖墟污泥 Slime 和 LB-EPS 中各组分的含量

Table 2 Composition of extracted Slime and LB-EPS from Shek Wu Hui swage treatment works

污泥 EPS	TOC / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	多糖 / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	蛋白质 / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	DNA / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	总的 EPS / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	蛋白质/多糖
Slime	2.08	2.89	13.83	2.01	18.73	4.79
LB-EPS	1.52	0.69	3.98	0.36	5.03	5.77

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 可能是污泥厌氧发酵过程中原活性污泥中的好氧微生物在厌氧条件下死亡, 细胞内的 DNA 释放出来, 导致 Slime 层中的 DNA 含量较高。

2.2 不同提取方法提取后污泥 TB 层各组分的含量

图 2 反映的是不同提取方法提取后污泥 TB 层中各组分的含量, 可以看出不同提取方法对污泥中 EPS 提取效率差别很大. 从总的 EPS 含量上看, 提取效率为甲醛 + NaOH > 2% EDTA > 加热 > 甲醛 + 超声 > 超声 > 对照 > 甲醛, 蛋白质、多糖和 DNA 的提取效率变化趋势和总的 EPS 的变化都一致. 另外, 所有的提取方法提取后污泥 TB 层中蛋白质的含量都高于多糖的含量, 蛋白质与多糖的比例在 1.65 和 4.77 之间, 和文献中报道蛋白质在 EPS 中占主要部分的结果一致^[20,21].

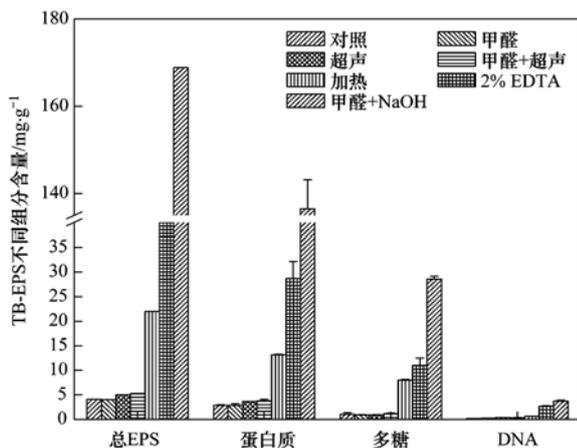


图 2 石湖墟污泥不同提取方法后 TB-EPS 中各组分含量分析

Fig. 2 Composition of extracted TB-EPS from Shek Wu Hui sewage treatment works by different methods

污泥 EPS 提取过程中遵循的一个原则是尽可能保证污泥的 EPS 全部剥离下来, 同时污泥细胞结构不被破坏, 即该提取方法不导致污泥细胞破裂使污泥细胞内的物质溶出. DNA 是细胞内独有的物质, 因此 DNA 的含量通常用来表征细胞破裂的程度^[10,21-23]. 对照、甲醛、超声、甲醛 + 超声、加热、

2% EDTA 和甲醛 + NaOH 这 7 种方法提取后 TB-EPS 中的 DNA 的含量分别为 0.19、0.23、0.38、0.32、0.63、2.66、3.75 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 可见 2% EDTA 和甲醛 + NaOH 对细胞的破坏程度较大, 导致细胞内物质释放, 另外提取剂中化学试剂的大量存在对分析测试也存在着影响, 因此该方法不宜采用. 从数据来看, 加热处理提取效率虽然比 2% EDTA 和甲醛 + NaOH 略低, 但是提取过程中对细胞的破坏程度较低, 较为温和, 建议采用. 再通过比较 TB-EPS 中(蛋白质 + 多糖)/DNA 的值发现甲醛 + NaOH (44.0) > 加热(33.5) > 对照(20.5) > 甲醛(16.5) > 甲醛 + 超声(15.4) > 超声(12.1), (蛋白质 + 多糖)/DNA 的值越大表明单位 DNA 对应的蛋白质 + 多糖的值越大, 可以看出甲醛 + NaOH (44.0) > 加热(33.5), 但甲醛和 NaOH 对分析测试的影响较大, 因此综合考虑加热法的提取效果较好. 对照、甲醛、超声、甲醛 + 超声提取的 EPS 较少, 效率较低, 不能较好地反映污泥 TB-EPS 的含量. 另外, 通过比较超声和甲醛 + 超声可以看出, 加入甲醛后对细胞提取 EPS 过程有一定的保护作用, 细胞溶出的 DNA 比超声法略少, 但这 2 个处理的整体效率较低, 因此效果并不明显.

2.3 剥离污泥各层 EPS 前后污泥的脱水性能

污泥不同层 EPS 的含量及组成与污泥脱水性能的关系较为复杂, 目前研究尚存争论^[3,6-8]. 表 3 是石湖墟和昂船州污泥各层 EPS 中各组分的含量 (其中 TB-EPS 采用热处理方法提取). 由于 2 种污泥的性质不完全相同, 尤其是有机质的含量不同, 所以导致污泥中的 EPS 含量不一致. 昂船州污泥 EPS 比石湖墟的含量略低, 另外这 2 种污泥 EPS 中各组分比例也不相同, 这可能和污泥本身的性质相关. 一些学者研究表明 Slime 层中的 EPS 含量和污泥的脱水性能关系重大, 何培培等^[3] 研究说明当污泥 Slime 层中的蛋白质或蛋白质/多糖的比例升高时污泥的脱水性能变差, 即污泥絮体中的蛋白质和多糖

表 3 石湖墟和昂船州污泥中各层 EPS 中各组分含量

Table 3 Composition of extracted EPS from Shek Wu Hui and Stonecutters Island sludges

污泥 EPS	多糖 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	DNA / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	各层总 EPS / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质/多糖
Slime-石湖墟	2.89	13.83	2.01	18.73	4.79
LB-石湖墟	0.69	3.98	0.36	5.03	5.77
TB-石湖墟	7.98	13.15	0.63	21.77	1.65
Slime-昂船州	2.92	10.79	1.61	15.32	3.70
LB-昂船州	0.76	0.25	0.24	1.25	0.33
TB-昂船州	1.12	8.77	0.88	10.77	7.83

只要不释放到外层即 Slime 层,污泥的脱水性能就不会恶化. 因此,采用污泥分层提取法将污泥的 EPS 剥离到溶液中,通过对 EPS 剥离前后污泥的脱水性能的考察,研究污泥各层 EPS 对污泥脱水性能的影响.

CST 是用来表征污泥脱水性能的一个重要指标,一般 CST 的值越小污泥的脱水性能就越好^[3,14,24]. 图 3 是反应污泥 EPS 经过分层剥离后污泥脱水性能的状况,可以看出 2 种污泥变化趋势一致. 原始石湖墟污泥 CST 为 132.9 s, - Slime、- Slime - LB 和 - Slime - LB - TB 处理后污泥的 CST 分别为 80.8、96.1 和 71.1 s,与原始污泥相比大幅度的降低; + Slime、+ Slime + LB 和 + Slime + LB + TB 处理后污泥的 CST 分别为 135.0、160.7 和 219.7 s,与原始污泥相比都有升高,其中 + Slime + LB + TB 处理升高的幅度最大. 原始昂船州污泥 CST 为 229.9 s, - Slime、- Slime - LB 和 - Slime - LB - TB 处理后污泥的 CST 分别为 79.4、122.8、119.9 s; + Slime、+ Slime + LB 和 + Slime + LB + TB 处理后污泥的 CST 分别为 237.9、276.2 和 296.6 s,其中 + Slime + LB + TB 处理升高的幅度最大,CST 总体变化趋势与石湖墟污泥一致. 石湖墟与昂船州污泥剥离 Slime 层后污泥 CST 大幅度降低,添加 Slime 后脱水略有升高,而这 2 种污泥 + Slime、

+ Slime + LB 和 + Slime + LB + TB 处理后污泥的 CST 逐渐增加,经过这 3 种处理后污泥溶液中 EPS 的含量是逐渐增加的,表明污泥溶液中即 Slime 层的 EPS 含量越高,污泥的脱水性能越差,即溶液中 EPS 含量与污泥的脱水性能呈正相关,这和文献研究当污泥中的 EPS 大量地溶解到溶液中即 Slime 层时污泥的 CST 值升高,脱水性能变差一致^[3,14,24,25]. 污泥剥离 LB-EPS 时,与原始污泥相比石湖墟与昂船州污泥的 CST 都有降低,但是与只剥离 Slime 层时相比污泥 CST 略有升高,可以推测污泥 LB-EPS 中的 EPS 可能对污泥的脱水有一定的促进作用. 另外,当继续剥离 TB 层时,石湖墟与昂船州污泥的 CST 又稍有降低,脱水性能略有改善. 综上可知,污泥的 Slime 层的 EPS 含量和污泥的脱水性能关系最大,该层 EPS 含量越高,脱水性能越差; LB 层对污泥的脱水有一定的促进作用,但是不明显; TB 层 EPS 含量与污泥的 CST 值成正比,表明 TB 层 EPS 含量越高污泥的脱水性能越差.

3 结论

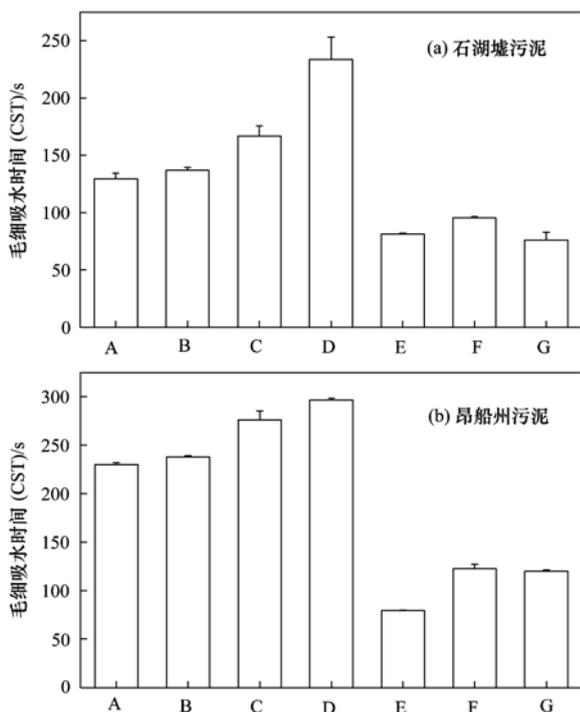
(1) 2% EDTA 和甲醛 + NaOH 提取法对本研究中的污泥 TB-EPS 中 EPS 的提取的效率最高,但是这两种方法提取后可导致污泥细胞严重破裂,不宜采用; 加热法(70℃, 30 min) 提取 EPS 效率也较高,对污泥细胞破坏较小,是温和且有效的 EPS 提取方法.

(2) 通过对石湖墟和昂船州污泥不同层 EPS 的含量及组分分析,发现这 2 种污泥各层中蛋白质的含量高于多糖的含量,且有机质含量高的石湖墟污泥中总的 EPS 的含量高于昂船州污泥.

(3) 通过对石湖墟和昂船州污泥 EPS 分层剥离前后污泥脱水性能的研究表明,剥离污泥 Slime 层、LB-EPS 和 TB-EPS 层后污泥的脱水性能大幅度改善,其中 Slime 层 EPS 含量越高污泥的脱水性能越差,当污泥 EPS 大量地释放到溶液中即 Slime 层时污泥的脱水性能严重变差.

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] Urbainetal V, Block J C, Manem J. Biofloculation in activated sludge: an analytic approach[J]. *Water Research*, 1993, **27**(5): 829-838.
- [3] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布



A: 原始污泥; B: + Slime; C: + Slime + LB; D: + Slime + LB + TB

图 3 石湖墟和昂船州污泥剥离 EPS 前后的 CST 变化情况

Fig. 3 Variation of CST of the sludge before and after extracted EPS

- 对脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3457-3461.
- [4] Higgins M J, Novak J T. Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(5): 479-485.
- [5] Jin B, Britt M W, Paul L. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, **98**(1-2): 115-126.
- [6] Kang S M, Kishimoto M, Shioya S, *et al.* Dewatering characteristics of activated sludges and effect of extracellular polymer [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1989, **68**(2): 117-122.
- [7] Houghton J I, Stephenson T. Effect of in fluent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability [J]. Water Research, 2002, **36**(14): 3620-3628.
- [8] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究 [J]. 中国安全科学学报, 2003, **13**(9): 31-34.
- [9] 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.
- [10] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. Journal of Biotechnology, 2002, **95**(3): 249-256.
- [11] 高景峰, 郭建秋, 陈冉妮, 等. 三维荧光光谱结合化学分析评价胞外多聚物的提取方法 [J]. 环境化学, 2008, **27**(5): 662-668.
- [12] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Enzyme activities in activated sludge flocs [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **77**(3): 605-612.
- [13] Clescerl L S, Greenberg A E, Eaton A D. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.) [M]. Washington, D. C., American Public Health Association, 2005.
- [14] 刘奋武, 周立祥. 不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高城市污泥脱水性能的效果 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 974-979.
- [15] 王美莲, 田家宇, 潘志辉, 等. 活性污泥中的水分测定及其脱水性能 [J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2010, **26**(3): 285-290.
- [16] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated sludge sludge flocs matrix [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1995, **43**(4): 755-761.
- [17] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment [J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 1925-1934.
- [18] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 195-197.
- [19] Sun Y D, Clinkenbeard K D, Clarke C, *et al.* *Pasteurella haemolytica* leukotoxin induced apoptosis of bovine lymphocytes involves DNA fragmentation [J]. Veterinary Microbiology, 1999, **65**(2): 153-166.
- [20] 方亮, 张丽丽, 蔡伟民. 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 [J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(3): 46-47, 53.
- [21] 罗曦, 雷中方, 刘翔. 胞外聚合物的提取、组成及其对污泥性质的影响 [J]. 城市环境与城市生态, 2005, **18**(5): 38-41.
- [22] 刘志杰, 谢华, 俞毓馨, 等. 厌氧污泥胞外多聚物的提取、测定法选择 [J]. 环境科学, 1994, **15**(4): 23-26.
- [23] 邹小玲, 许柯, 丁丽丽, 等. 不同状态下的同一污泥胞外聚合物提取方法研究 [J]. 环境工程学报, 2010, **4**(2): 436-440.
- [24] Yu G H, He P J, Shao L M. Novel insights into sludge dewaterability by fluorescence excitation-emission matrix combined with parallel factor analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(3): 797-806.
- [25] Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, *et al.* Electro-dewatering of wastewater sludge; influence of the operating conditions and their interactions effects [J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2795-2810.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophytic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qiangou, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行