

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                     |                                      |                         |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 我国4个WMO/GAW本底站大气CH <sub>4</sub> 浓度及变化特征             | 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳            | (2917)                  |
| 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源                             | 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙               | (2924)                  |
| 2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析                            | 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海         | (2932)                  |
| 厦门市冬春季灰霾期间大气PM <sub>10</sub> 中多环芳烃的污染特征及来源分析        | 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红                      | (2939)                  |
| 气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用                                 | 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J | (2946)                  |
| 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征                                | 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超                      | (2953)                  |
| 河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究                               | 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基                          | (2960)                  |
| 印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选                      | 马英歌                                  | (2967)                  |
| 烹调油烟中挥发性有机物的排放初探                                    | 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕                  | (2973)                  |
| 生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究                             | 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟                   | (2979)                  |
| 分期布液生物滴滤床净化H <sub>2</sub> S废气性能研究                   | 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪               | (2987)                  |
| 粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究                                | 孟阳,王书肖                               | (2993)                  |
| 太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价                       | 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁                 | (3000)                  |
| 巢湖水质与流域农业投入的关联性研究                                   | 张燕,高翔,张洪                             | (3009)                  |
| 巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性                        | 李如忠,李峰,周爱佳                           | (3014)                  |
| 巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价                              | 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉                       | (3024)                  |
| 巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性                           | 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼                | (3031)                  |
| 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究                                 | 雷沛,张洪,单保庆                            | (3038)                  |
| 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响                               | 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤                | (3046)                  |
| 平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究                             | 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波                       | (3051)                  |
| 江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析                          | 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功                | (3057)                  |
| 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价                                | 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩                 | (3064)                  |
| 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究                                 | 刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮                     | (3070)                  |
| 珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系                           | 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红                      | (3076)                  |
| 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价                            | 王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙                   | (3083)                  |
| 深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究                                | 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉                        | (3089)                  |
| 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响                        | 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒                       | (3097)                  |
| 渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨                                | 蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟                    | (3104)                  |
| 地下水污染防治区划体系构建研究                                     | 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮                   | (3110)                  |
| 北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析                               | 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮                   | (3117)                  |
| 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 的存储和运移 | 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风              | (3124)                  |
| 改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究                                 | 董锡臻,石宝友,解岳,王东升                       | (3132)                  |
| 水溶液中臭氧和溴离子的反应研究                                     | 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇                  | (3139)                  |
| HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布                       | 张晗,董秉直                               | (3144)                  |
| 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究                     | 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才                   | (3152)                  |
| 不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响                               | 况烨,周琰,王清萍,陈祖亮                        | (3160)                  |
| 多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水                                | 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶        | (3167)                  |
| 三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究                              | 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮                  | (3172)                  |
| 改性花生壳对水中镉的动态吸附研究                                    | 龙腾,易筱筠,党志                            | (3177)                  |
| 硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能                                | 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军                      | (3182)                  |
| 海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型                                    | 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰                    | (3189)                  |
| 营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复                               | 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩                       | (3197)                  |
| 生物表面活性剂强化污泥水解的研究                                    | 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平                 | (3202)                  |
| 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定                                    | 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波                  | (3208)                  |
| 阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究                               | 李绍峰,朱静,李铁晶                           | (3214)                  |
| 农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究                          | 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明                   | (3220)                  |
| 糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定                                   | 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云               | (3228)                  |
| 餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析                                | 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕                | (3236)                  |
| 共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究                        | 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳                   | (3241)                  |
| <i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究      | 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳                         | (3247)                  |
| 单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应                                 | 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷                   | (3253)                  |
| 金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价                            | 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新                    | (3261)                  |
| 环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响                                 | 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵                  | (3266)                  |
| 地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究                       | 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳                       | (3272)                  |
| 焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征                              | 刘敬勇,孙水裕                              | (3279)                  |
| 城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例                              | 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞                        | (3288)                  |
| NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析                           | 连静,刘俊新                               | (3295)                  |
| 《环境科学》征订启事(3037)                                    | 《环境科学》征稿简则(3151)                     | 信息(2999,3030,3096,3227) |

# 生物表面活性剂强化污泥水解的研究

易欣<sup>1,3</sup>, 罗琨<sup>1,3</sup>, 杨麒<sup>1,3</sup>, 李小明<sup>1,2,3\*</sup>, 邓伟光<sup>1,3</sup>, 张植平<sup>1,3</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

**摘要:** 为了解生物表面活性剂对剩余污泥水解效果的影响, 采用向污泥中投加鼠李糖脂的方式, 研究了水解时间、生物表面活性剂投加量以及 pH 值对污泥水解过程的影响。结果表明, 鼠李糖脂显著降低了污泥水解液的表面张力, 促进了悬浮固体的溶解和胞外酶的溶出, 从而强化了污泥水解。污泥水解过程中, SCOD、蛋白质和还原糖的浓度均呈现先增加后降低的趋势, 前 6 h 内符合一级反应动力学。在鼠李糖脂最佳投加剂量  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  下反应 6 h, SCOD、蛋白质和还原糖的浓度分别由  $371.9$ 、 $93.3$  和  $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升到  $3994.5$ 、 $800.0$  和  $401.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生物表面活性剂对污泥水解的强化作用受 pH 值的影响, 随着 pH 值的增大, 水解效率不断增大。当  $\text{pH} = 11$  时, 水解效率达到最大值, SCOD、蛋白质和还原糖的浓度分别为  $5249.9$ 、 $1658.3$  和  $597.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

**关键词:** 剩余污泥; 鼠李糖脂; 表面张力; 水解; pH 值

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-3202-06

## Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant

YI Xin<sup>1,3</sup>, LUO Kun<sup>1,3</sup>, YANG Qi<sup>1,3</sup>, LI Xiao-ming<sup>1,2,3</sup>, DENG Wei-guang<sup>1,3</sup>, ZHANG Zhi-ping<sup>1,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The effects of biosurfactant on the hydrolysis of waste activated sludge including reaction time, dosage of rhamnolipid and pH were investigated. It was found that the rhamnolipid could greatly reduce the surface tension of sludge hydrolysis liquid, resulting in the solubilization of organic solid and the release of extracellular enzyme. During the hydrolysis process, the concentrations of SCOD, soluble reducing sugar and soluble protein showed an obvious increase in the initial and then decrease later. Sludge hydrolysis process fitted to the first-order reaction dynamics within 6 h. At rhamnolipid dosage of  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , the concentrations of SCOD, reducing sugar and protein after 6 h of hydrolysis increased from  $371.9$ ,  $93.3$  and  $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $3994.5$ ,  $800.0$  and  $401.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. The efficiency of sludge hydrolysis was improved with the increase of pH value, and the maximal concentrations of SCOD, reducing sugar and protein were, respectively,  $5249.9$ ,  $1658.3$  and  $597.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  at pH 11.

**Key words:** waste activated sludge; rhamnolipid; surface tension; hydrolysis; pH value

目前, 活性污泥法 is 全世界应用最广泛的污水处理方法, 但在此过程中产生了大量的剩余污泥, 如处置不当可能造成二次污染。据估算污泥处理方面的投资可占整个污水处理厂总运行费用的 25% ~ 40%, 甚至高达 60%<sup>[1]</sup>。因此, 采用先进的技术减少污水处理厂的污泥排放量, 是解决城市污水处理厂污泥问题的有效途径之一<sup>[2]</sup>。

水解是污泥厌氧消化的限速步骤<sup>[3]</sup>, 提高污泥水解速率, 意味着能缩短污泥厌氧发酵的时间, 因此研发提高污泥水解速率的技术至关重要。根据国内外研究可知, 提高污泥水解速率的方法有热处理法、化学法、机械法、氧化法及生物法等<sup>[4]</sup>。其中, 投加表面活性剂不但可以缩短污泥消化时间, 而且可以促进挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 的积累而用于生物除磷<sup>[5]</sup>, 因此越来越受到人们的关

注。Ewa 等<sup>[6]</sup>通过添加化学表面活性剂, 显著提高了剩余污泥的水解速率。Jiang 等<sup>[7]</sup>在厌氧条件下, 投加化学表面活性剂提高了污泥厌氧消化性能, 同时增加了污泥水解中间产物 VFAs 的产量。与化学表面活性剂相比, 生物表面活性剂有以下优点: 较低的毒性, 较高的生物降解性, 较高的起泡性, 在极端温度、pH 和盐浓度下具有较好的选择性和专一性<sup>[8]</sup>, 而有关利用生物表面活性剂来强化污泥水解的基础研究尚鲜有报道。本研究以鼠李糖脂为例, 考察生物表面活性剂的投加对污泥水解的影响, 并对生物表面活性剂促进污泥水解的影响因素进行了

收稿日期: 2011-11-23; 修订日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078128); 科技部国际科技合作计划 (2011DFA90740); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 易欣 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yixin\_269@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.edu.cn

分析,以期对污泥酶水解技术的研究和实际运用起到较好的借鉴和参考价值.

1 材料与方法

1.1 污泥和生物表面活性剂的来源

实验所用污泥取自长沙市第二污水处理厂二沉

池,污泥先经过 30 min 沉淀,弃去上清液,再经 0.66 mm 的筛网过滤去除杂质后,于 4℃ 冰箱中保存备用. 其特征如表 1 所示.

实验中生物表面活性剂选用由巩义市宇洲净水材料厂提供的质量分数为 50% 的鼠李糖脂,本药品为褐色膏状物.

表 1 污泥基本特性

| Table 1 Characteristics of waste activated sludge |      |                        |                         |                       |                       |                        |                        |
|---------------------------------------------------|------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 指标                                                | pH 值 | TCOD/g·L <sup>-1</sup> | SCOD/mg·L <sup>-1</sup> | TSS/g·L <sup>-1</sup> | VSS/g·L <sup>-1</sup> | 蛋白质/mg·L <sup>-1</sup> | 还原糖/mg·L <sup>-1</sup> |
| 数值                                                | 6.93 | 9.76                   | 371                     | 10.92                 | 6.26                  | 93                     | 9                      |

1.2 分析项目及方法

TSS 和 VSS 采用重量法测定; COD 采用微波密封消解,重铬酸钾法测定,其中 SCOD 为离心机(转速为10 000 r·min<sup>-1</sup>)离心 10 min 后上清液的化学需氧量,TCOD 为污泥悬浮液的总化学需氧量;上清液中的还原糖采用苯酚-硫酸法进行测定,以葡萄糖为标准物<sup>[9]</sup>;上清液中的蛋白质采用 Folin-酚法测定,以结晶牛血清蛋白为标准物; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定<sup>[10,11]</sup>; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 采用钼酸盐比色法测定; 表面张力采用拉脱法测定<sup>[12]</sup>,测定仪器为 JYW-200A 自动界面张力仪. 测定过程如下:调整升降台的高度,使铂金环侵入到泥水混合物中 3~5 mm,然后使升降台缓缓下降,使铂金环受到一个向下的拉力,随着铂金环与被测液体之间的薄膜被逐渐拉长,拉力逐渐增大,直至薄膜破裂,此时仪器记录下的拉力最大值就是该泥水混合物的实测张力值.

1.3 实验方法

水解时间实验:取 400 mL 污泥加入到 500 mL 具塞锥形瓶中,向污泥中分别投加不同量的鼠李糖脂,同时设空白组(即不加鼠李糖脂),然后向锥形瓶中通入氮气约 4 min 以驱除残留空气,加塞于 30℃ 恒温水浴振荡器上反应,3、6、12、24、30 和 36 h 后取样分析.

投加量实验:取 100 mL 污泥加入到 250 mL 具塞锥形瓶中,向污泥中分别投加不同量的鼠李糖脂,同时设空白组(即不加鼠李糖脂),其它条件同前,6 h 后取样分析.

pH 值实验:取 100 mL 污泥加入到 250 mL 具塞锥形瓶中,控制鼠李糖脂投加量为 0.3 g·g<sup>-1</sup>,用 1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 或 1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 调节 pH 值到设定的值,同时设对照组(即调 pH 值但不加鼠李糖脂),其它条件同前,6 h 后取样分析.

2 结果与分析

2.1 生物表面活性剂对污泥表面张力的影响分析

在 30℃ 下向污泥中投加不同量(0、0.2、0.3、0.4 和 0.5 g·g<sup>-1</sup>) 的鼠李糖脂,污泥表面张力的下降量(实验组与空白组数值之差)随时间的变化如图 1 所示. 从中可知,加入鼠李糖脂后,污泥的表面张力快速下降,在投加剂量为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 g·g<sup>-1</sup>时,表面张力的下降量分别为 43.7、44.7、45.3 和 45.3 mN·m<sup>-1</sup>,表明在低剂量条件下,鼠李糖脂就能很好地降低表面张力,表面活性剂的含量超过 0.3 g·g<sup>-1</sup>时,表面张力的变化不大,这是因为鼠李糖脂具有两亲分子结构,亲水基团指向水溶液,亲油基团指向液面外空气,其能在液体表面形成单分子薄膜<sup>[13]</sup>,使得大部分液体-空气界面被表面活性剂分子-空气界面所取代,形成新界面所需要的能量小,从而降低了溶液的表面张力. 表面活性剂浓度越高,表面张力降低得愈多,直到整个液面完全被表面活性剂分子所覆盖,这时表面张力降到最小值.

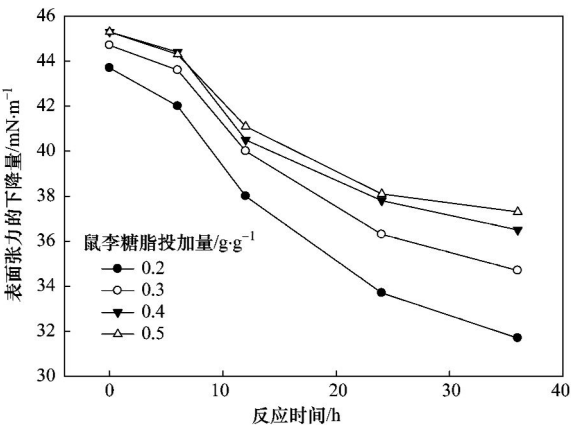


图 1 在不同鼠李糖脂投加剂量下污泥表面张力的下降量随时间的变化

Fig. 1 Variation of decrease of surface tension with hydrolysis time at different rhamnolipid dosages

随着反应的进行,表面张力的下降量逐渐减少,这可能是因为在不断振荡的作用下,鼠李糖脂单体逐渐形成胶团,液体表面的单体逐渐减少,表面张力慢慢增大。

## 2.2 污泥水解过程分析

生物表面活性剂强化水解过程中,污泥的固体有机物历经溶解和水解 2 个过程。首先,在生物表面活性剂的“两亲”和“增溶”作用下,污泥絮体表面的大分子物质不断溶于液相中<sup>[14]</sup>,其次,溶解性的有机物不断被胞外酶水解。本研究对生物表面活性剂促进污泥水解过程中主要溶出性物质浓度随反应时间的变化进行了分析。图 2 反映了不同鼠李糖脂投加量时,SCOD 浓度随时间的变化。污泥水解反应前 6 h,实验组和空白组水解液中 SCOD 均随水解时间的增加而快速上升。当鼠李糖脂的投加剂量为 0.2、0.3、0.4 和 0.5  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  时,SCOD 的溶出量较空白组分别增加了 300%、444%、487% 和 525%,说明在短时间内,污泥就有较好的水解效果。随着水解时间的延长,SCOD 浓度曲线增长幅度减慢,最大涨幅也只有 16.4% (投加剂量为 0.5  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )。反应 24 h 以后,浓度曲线略有下降趋势。

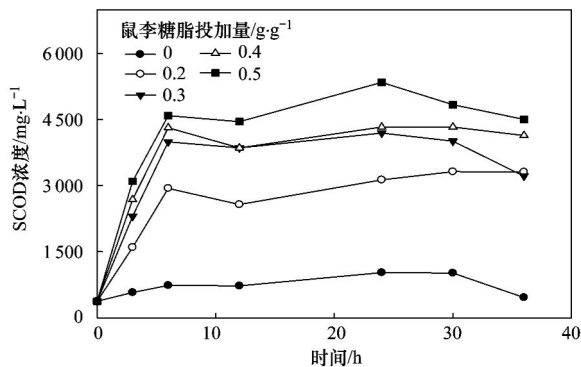


图 2 不同鼠李糖脂投加剂量下 SCOD 浓度随时间的变化

Fig. 2 Variation of SCOD concentration with hydrolysis time at different rhamnolipid dosages

污泥是由许多不同的微生物包埋在聚合物组成的网络中形成的,这些聚合物就是胞外多聚物 (EPS)<sup>[15]</sup>,其主要组成物是蛋白质和碳水化合物<sup>[16]</sup>。微生物产生的胞外酶主要存在于 EPS 中,能够对松散的束缚于污泥表面的小分子聚合物进行水解,结构越紧凑的污泥基质其水解速率越低<sup>[17]</sup>,因为这一结构限制了酶与污泥絮体中其它底物的接触。生物表面活性剂通过两亲和增溶作用,一方面,可促使 EPS 溶出或分散,增大其与水解菌的接触面积及可利用性,从而提高其生物可降解性;另一方

面,能够改变污泥的絮体形态,引发污泥絮体皂化,从而减小污泥的絮体尺寸<sup>[6]</sup>。网状絮体结构的破坏有利于包埋或隐藏于 EPS 的胞外酶脱离污泥表面<sup>[18]</sup>,均匀分布在污泥中,从而增加酶与底物接触机会,酶活也不会因为酶被束缚在污泥基质上而受到抑制,从而使水解效果得到显著提高。污泥中 SCOD 的降低主要有以下几个方面原因:污泥溶解过程中少量挥发性有机物及氨等还原性气体挥发进入气相;小部分有机碳化合物水解成  $\text{CO}_2$  而进入气相<sup>[19]</sup>;厌氧菌利用大量溶解的有机质为碳源进行生长繁殖,导致部分含碳物质又返回固相。

图 3 描述了污泥水解过程中蛋白质浓度随水解时间的变化。由图 3 可知,在不同投加剂量下蛋白质浓度均先迅速增加后逐渐降低。在鼠李糖脂的投加剂量为 0.2、0.3、0.4 和 0.5  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  下反应 6 h 后,样品中蛋白质浓度分别为 648.7、800.0、818.6 和 855.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而空白组仅为 161.6  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。6 h 到 12 h 过程中,蛋白质进一步增加,但是增长速率减慢,此后蛋白质浓度逐渐降低。这说明鼠李糖脂的增溶作用使大量的蛋白质脱离污泥表面,并溶解于液相中,同时鼠李糖脂对污泥聚合物溶解性的增强有利于打破污泥基质的紧密连接,从而释放出更多的蛋白质和糖类<sup>[7]</sup>。反应初期蛋白质的释放速率大于降解速率,蛋白质得到积累<sup>[20]</sup>。随着反应时间的延长,蛋白质不断转化为多肽、二肽、氨基酸、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  等物质<sup>[21]</sup>,其浓度出现了一定的波动下降趋势,呈现溶出-水解动态平衡现象。

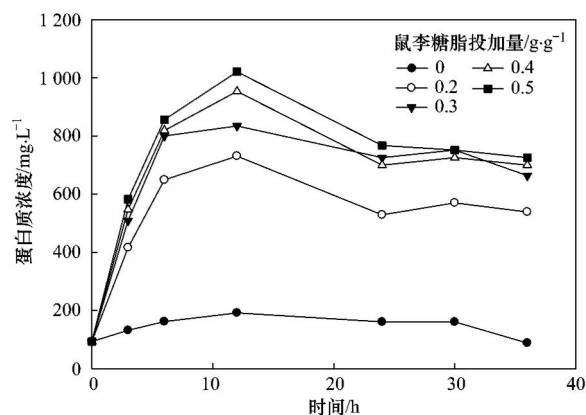


图 3 不同鼠李糖脂投加剂量下蛋白质浓度随时间的变化

Fig. 3 Variation of protein concentration with hydrolysis time under different rhamnolipid dosages

污泥水解过程中还原糖浓度随水解时间的变化如图 4 所示,可以看出,实验组和空白组中,糖浓度均先增加后降低。当鼠李糖脂的投加量为 0.5

$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  时, 糖浓度在 6 h 内迅速由原污泥的  $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加至  $470.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 达到最大值; 空白组在 12 h 达到最大值  $91.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 此后, 还原糖的浓度逐渐降低。鼠李糖脂作用于降解菌细胞表面后, 会导致细胞外膜中脂多糖组分的流失<sup>[22]</sup>, 其增溶作用也使得污泥水解过程中可溶性糖类含量显著增加, 在胞外淀粉酶的作用下, 溶解性碳水化合物不断水解成小分子可溶性糖, 部分低分子质量的中间产物成为能源或碳源又被污泥中的微生物进一步利用, 或者进一步分解成 VFAs、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  挥发至气相<sup>[23]</sup>, 从而使糖浓度逐渐降低。

因此, 结合上述实验结果和实际工程的需要, 最合适的水解时间为 6 h。

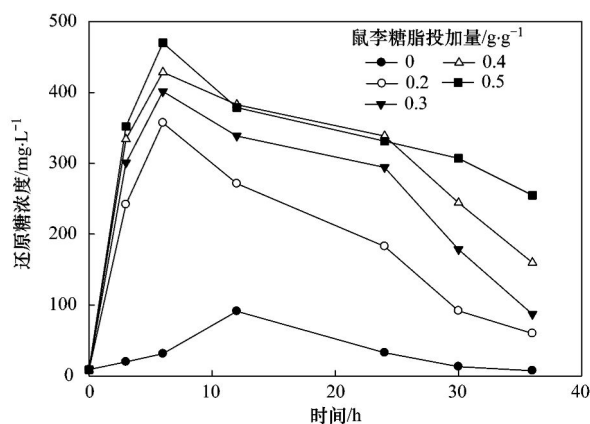


图4 不同鼠李糖脂投加剂量下还原糖浓度随时间的变化

Fig. 4 Variation of reducing sugar concentration with hydrolysis time under different rhamnolipid dosages

### 2.3 表面活性剂投加量对污泥水解的影响

于  $30^\circ\text{C}$  下向污泥中投加不同量 ( $0$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4$  和  $0.5 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的鼠李糖脂, 反应 6 h 后, 污泥水解液中的 SCOD、还原糖和蛋白质浓度随鼠李糖脂投加量的变化如图 5 所示。当投加量  $< 0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  时, 污泥水解液中 SCOD、还原糖和蛋白质均随鼠李糖脂投加量的增加而升高, 然而当鼠李糖脂的投加量超过  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  时, 增涨幅度逐渐变小。这可以用酶促反应动力学来解释, 由于鼠李糖脂的投加, 有利于细胞分泌的胞外酶脱离污泥表面<sup>[18]</sup>, 均匀分布在污泥中, 所以当鼠李糖脂投加量较小时, 污泥中胞外酶的浓度也较小, 底物浓度远高于酶浓度, 酶促反应表现为一级反应, 当鼠李糖脂投加量超过  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  时, 污泥中胞外酶的浓度进一步增加, 但此时底物浓度对反应速度影响逐渐变小, 反应表现为混合级反应。结合前面鼠李糖脂对表面张力的影响可知, 鼠李糖脂投加剂量较小时就能较大程度地降低表面张

力, 而投加剂量  $> 0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  时, 表面张力变化不大。因此, 考虑污泥处理过程的经济高效性, 本研究中鼠李糖脂的最佳投加量控制在  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

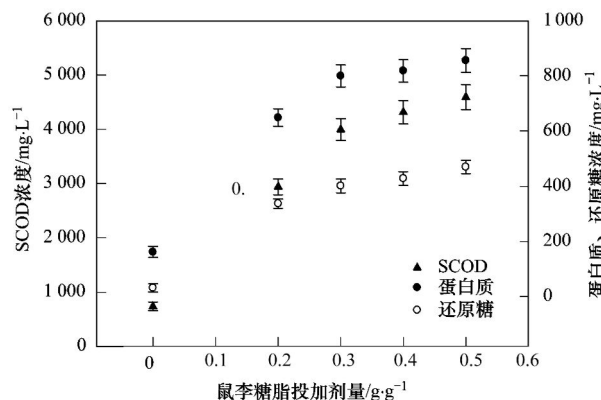


图5 污泥水解液中溶解性物质随鼠李糖脂投加量的变化

Fig. 5 Variation of soluble substrate of sludge with rhamnolipid dosage

### 2.4 pH 对生物表面活性剂强化污泥水解的影响

SCOD 溶出量的多少可以表征污泥水解效果的优劣<sup>[24]</sup>。向 9 个实验组装置中均投加  $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  鼠李糖脂, 并将 pH 值分别控制为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0 和 11.0, 第 9 个装置不调 pH 值。同时, 在不同的 pH 条件下分别设对照组 (即不加鼠李糖脂)。由图 6 可知, 对照组中, SCOD 溶出量在碱性条件下较酸性条件下的大, 而在酸性条件下又较中性条件下的大, 这一现象与 Chen 等<sup>[25]</sup> 的研究成果相符。同时, 鼠李糖脂对剩余污泥水解的强化效果在一定程度上比碱性环境的强化效果好, 反应 6 h 后, 加鼠李糖脂不调 pH 值组较空白组 (不加鼠李糖脂也不调 pH) 增加了 558%, 而在对照组中, pH = 11 时 SCOD 的溶出量只比空白组增加 460%。在实验组中 pH = 11 时 SCOD 的溶出量最大, 较空

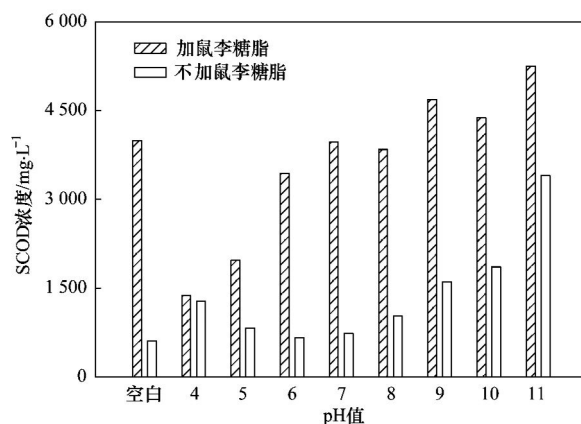


图6 不同 pH 条件下, 污泥水解液中 SCOD 的浓度

Fig. 6 Concentration of SCOD in sludge hydrolysate at different pH

白组增加了 765%, 且 SCOD 溶出量的大小顺序为 pH 11.0 (5 249.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 9.0 (4 687.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 10.0 (4 374.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 7.0 (3 968.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 8.0 (3 843.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 6.0 (3 437.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 5.0 (1 968.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > pH 4.0 (1 374.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) > 空白 (606.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 可见, 剩余污泥为碱性有利于 SCOD 的生成, 主要原因可能是污泥颗粒表面带有负电荷, 当污泥的 pH 值升高时, 污泥颗粒细胞表面带有的负电荷也渐渐升高<sup>[26]</sup>, 从而产生高的静电排斥作用, 使部分 EPS 解析出<sup>[27]</sup>, pH 值越高此现象越明显. 此外, pH 值对鼠李糖脂的形态也有很大影响, 随着 pH 增大, 鼠李糖脂逐渐由层状胶团转变为胶囊状胶团再转变为微囊状胶团<sup>[28]</sup>, 结构逐渐变小, 分散程度随之提高, 鼠李糖脂的利用率也越高, 从而促使污泥中更多 EPS 溶出.

图 7、8 反映了水解 6 h 后, 不同 pH 条件下, 污泥水解液中蛋白质和还原糖的浓度变化. 由图可知, 在实验组中, 随着剩余污泥 pH 的上升, 蛋白质和还原糖的浓度也随之增加, 在 pH = 11 时达到最大值. 当 pH 值由 4 增加到 11, 蛋白质和还原糖的浓度分别由 211.4 和 124.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增长到 1 658.3 和 597.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 而空白组中 (不加鼠李糖脂也不调 pH), 蛋白质和还原糖的浓度仅仅为 114.7 和 30.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在实验组中, pH = 11 时, 蛋白质和还原糖的浓度远高于其他条件下的浓度. 当 pH 控制在 4~10 时, 蛋白质和还原糖的浓度均随 pH 上升呈直线增加 ( $Y_{\text{蛋白质}} = 162.5\text{pH} - 383.5$ ,  $R^2 = 0.9964$ ;  $Y_{\text{还原糖}} = 64.9\text{pH} - 106.9$ ,  $R^2 = 0.9884$ ). 这是因为 EPS 主要成分为蛋白质和糖类<sup>[16]</sup>, 所以 pH 值越高, 溶出的 EPS 浓度就越高, 相应的蛋白质

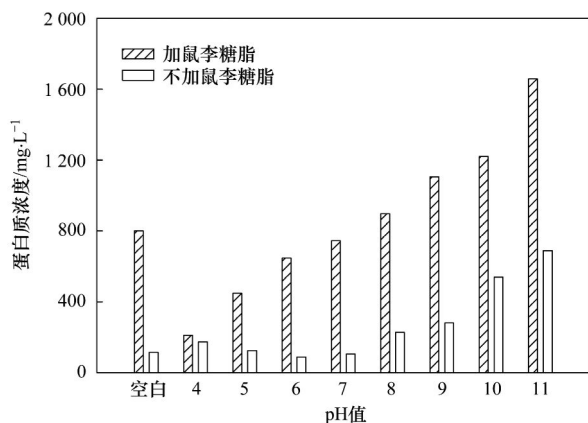


图 7 不同 pH 条件下, 污泥水解中蛋白质的浓度

Fig. 7 Concentration of protein in sludge hydrolysate at different pH

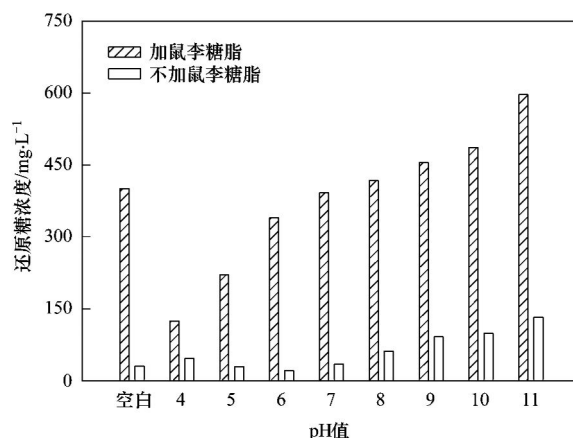


图 8 不同 pH 条件下, 污泥水解液中还原糖的浓度

Fig. 8 Concentration of reducing sugar in sludge hydrolysate at different pH

和还原糖的含量也越高.

### 3 结论

(1) 低剂量条件下, 鼠李糖脂就能很好地降低污泥的表面张力, 当投加剂量  $> 0.3 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  时, 随投加量的增加, 表面张力不再继续下降.

(2) 鼠李糖脂能促进剩余污泥的水解, 污泥的水解速率在 6 h 内迅速增加, 之后逐渐趋于稳定, 因此污泥的最佳水解时间为 6 h.

(3) 在最佳投加量  $0.3 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  下水解 6 h, 污泥水解液中 SCOD、蛋白质和还原糖浓度分别达到 3 994.5、800.0 和 401.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  较未加鼠李糖脂时分别高出 3 259.9、638.4 和 370.3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

(4) 当鼠李糖脂的投加量为  $0.3 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 水解时间为 6 h 时, 碱性条件下污泥的水解效果要优于中性和酸性, 且在 pH = 11 时的水解效果最好.

### 参考文献:

- [1] 梁鹏, 黄霞, 钱易, 等. 污泥减量化技术的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(1): 44-52.
- [2] 张悦. 我国城市污水处理与再生利用的技术决策要素探讨 [EB/OL]. <http://blog.h2o-china.com/html/10/262010-2389.html>, 2008-03-31.
- [3] Eastman J A, Ferguson J F. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion[J]. Water Pollution Control Federation, 1981, 53(3): 352-366.
- [4] Müller J A. Prospects and problems of sludge pre-treatment processes[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 121-128.
- [5] Jiang S, Chen Y G, Zhou Q, et al. Biological short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste-activated sludge affected by surfactant[J]. Water Research, 2007, 41(6-7): 3112-3120.

- [ 6 ] Liwarska-Bizukojc E, Bizukojc M. Effect of selected anionic surfactants on activated sludge flocs[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **39**(4): 660-668.
- [ 7 ] Jiang S, Chen Y G, Zhou Q. Effect of sodium dodecyl sulfate on waste activated sludge hydrolysis and acidification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, **132**(1-3): 311-317.
- [ 8 ] 李敬龙, 刘晔, 潘爱珍. 生物表面活性剂及其应用[J]. *山东轻工业学院学报 (自然科学版)*, 2004, **18**(2): 41-46.
- [ 9 ] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [ 10 ] Pin C, Marín M L, Selgas D, *et al.* Differences in production of several extracellular virulence factors in clinical and food *Aeromonas* spp. strains[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1995, **78**(2): 175-179.
- [ 11 ] Goel R, Mino T, Satoh H, *et al.* Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1998, **32**(7): 2081-2088.
- [ 12 ] 张连芳, 傅敏学, 柯伟平. 液体表面张力的动态测量过程研究[J]. *物理与工程*, 2010, **20**(1): 35-36, 45.
- [ 13 ] 方长云, 薛嘉韵, 源亮君. 生物表面活性剂及其在环境工程中的应用[J]. *广东化工*, 2005, **32**(12): 48-50.
- [ 14 ] Mayer A S, Zhong L R, Pope G A. Measurement of mass-transfer rates for surfactant-enhanced solubilization of nonaqueous phase liquids [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(17): 2965-2972.
- [ 15 ] Snaird J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(7): 2884-2896.
- [ 16 ] Blackall L L, Burrell P C, Gwilliam H, *et al.* The use of 16S rDNA clone libraries to describe the microbial diversity of activated sludge communities [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 451-454.
- [ 17 ] Venugopal V, Alur M D, Nerkar D P. Solubilization of fish proteins using immobilized microbial cells[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1989, **33**(9): 1098-1103.
- [ 18 ] Luo K, Yang Q, Yu J, *et al.* Combined effect of sodium dodecyl sulfate and enzyme on waste activated sludge hydrolysis and acidification[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7103-7110.
- [ 19 ] 陈小粉, 李小明, 杨麒, 等. 淀粉酶促进剩余污泥热水解的研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(3): 396-401.
- [ 20 ] Jiang S, Chen Y G, Zhou Q. Influence of alkyl sulfates on waste activated sludge fermentation at ambient temperature[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **148**(1-2): 110-115.
- [ 21 ] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(10): 129-135.
- [ 22 ] Sotirova A, Spasova D, Vasileva-Tonkova E, *et al.* Effects of rhamnolipid-biosurfactant on cell surface of *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Microbiological Research*, 2009, **164**(3): 297-303.
- [ 23 ] 于静, 罗琨, 杨麒, 等. 表面活性剂促进剩余污泥酶水解的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2328-2333.
- [ 24 ] Andreassen K, Petersen G, Thomsen H, *et al.* Reduction of nutrient emission by sludge hydrolysis[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(10): 79-85.
- [ 25 ] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 683-689.
- [ 26 ] Wu H Y, Yang D H, Zhou Q, *et al.* The effect of pH on anaerobic fermentation of primary sludge at room temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(1): 196-201.
- [ 27 ] Katsiris N, Kouzeli-Katsiri A. Bound water content of biological sludges in relation to filtration and dewatering [J]. *Water Research*, 1987, **21**(11): 1319-1327.
- [ 28 ] Champion J T, Gilkey J C, Lamparski H, *et al.* Electron microscopy of rhamnolipid (biosurfactant) morphology: Effects of pH, cadmium, and octadecane [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, **170**(2): 569-574.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                      |                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| CH <sub>4</sub> Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China .....                                              | FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> ( 2917 )         |
| Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources .....                                                           | LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> ( 2924 )         |
| Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games .....                                                             | LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> ( 2932 )    |
| Characteristics and Sources of PM <sub>10</sub> -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen .....                                                      | QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> ( 2939 )    |
| Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split .....                                                                                      | WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 2946 )      |
| Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area .....                                              | ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> ( 2953 )             |
| Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households .....                                                               | ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji ( 2960 )                   |
| Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories .....                                                    | MA Ying-ge ( 2967 )                                                  |
| Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils .....                                                                     | HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> ( 2973 )              |
| Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF .....                                               | HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> ( 2979 )         |
| Performance of Cross Flow Trickling Filter for H <sub>2</sub> S Gas Treatment .....                                                                                  | LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> ( 2987 )              |
| Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization .....                                                                                                       | MENG Yang, WANG Shu-xiao ( 2993 )                                    |
| Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability .....                                   | LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> ( 3000 )          |
| Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin .....                                                             | ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong ( 3009 )                            |
| Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake .....                      | LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia ( 3014 )                           |
| Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification .....                                          | LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> ( 3024 )  |
| Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake .....             | CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> ( 3031 )    |
| Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir .....                                            | LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing ( 3038 )                          |
| Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                                | LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> ( 3046 )           |
| Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China .....                                            | YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> ( 3051 )  |
| Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province .....                                                  | LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> ( 3057 )            |
| Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu .....                   | GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> ( 3064 )           |
| Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin .....                                                   | LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> ( 3070 )             |
| Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water .....                                                                                 | HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> ( 3076 )   |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin .....                                                              | WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> ( 3083 )         |
| Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen .....                                                                   | SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> ( 3089 )        |
| Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast ..... | GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> ( 3097 )       |
| Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay .....                                                                                 | CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> ( 3104 )           |
| Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System .....                                                                                            | WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> ( 3110 )           |
| Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain .....                                                                             | LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> ( 3117 )           |
| Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan .....                                             | YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> ( 3124 )  |
| Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons .....                                                                                  | TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> ( 3132 )           |
| Investigation of the Oxidation Reaction of O <sub>3</sub> with Bromide Ion in Aqueous Solution .....                                                                 | YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> ( 3139 )      |
| Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors .....        | ZHANG Han, DONG Bing-zhi ( 3144 )                                    |
| Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds .....                                              | LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> ( 3152 )           |
| Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values .....                                                             | KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> ( 3160 )           |
| Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor .....                                    | LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> ( 3167 )        |
| Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor .....                                                        | XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 3172 )    |
| Dynamic Adsorption of Cadmium ( II ) in Water on Modified Peanut Shells .....                                                                                        | LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi ( 3177 )                            |
| Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides .....                                                                                      | WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> ( 3182 )    |
| Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter .....                                                                           | LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> ( 3189 )  |
| Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery .....                                                                                   | ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> ( 3197 )       |
| Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant .....                                                                                                 | YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> ( 3202 )                     |
| Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....                                                                                         | LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> ( 3208 ) |
| Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium .....                                                                              | LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing ( 3214 )                         |
| Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting .....                   | REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> ( 3220 )    |
| Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash .....                                                                       | LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> ( 3228 )               |
| Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste .....                                                                       | LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> ( 3236 )      |
| Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes .....                                              | WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> ( 3241 )            |
| Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors .....                                                                 | ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> ( 3247 )                 |
| Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress .....                                                                                | WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 3253 )     |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities .....         | HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> ( 3261 )     |
| Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i> .....                                                        | DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> ( 3266 )      |
| Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash .....                                                               | JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> ( 3272 )           |
| Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature .....            | LIU Jing-yong, SUN Shui-yu ( 3279 )                                  |
| Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen .....                                                                     | YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> ( 3288 )          |
| Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants .....                                                                                    | LIAN Jing, LIU Jun-xin ( 3295 )                                      |

# 《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 15, 2012

|       |                                                                                                                                                               |                 |    |                                                                                                                                                                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                         | Co-Sponsored    | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn | Edited          | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn |
| 出 版   | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                           | Published       | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                                 | Distributed     | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>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<br>(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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行