

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究

陈灿^{1,2}, 孙秀云^{1,2}, 黄诚^{1,2}, 沈锦优^{1,2}, 王连军^{1,2*}

(1. 南京理工大学环境与生物工程学院, 南京 210094; 2. 江苏省化工污染控制与资源化重点实验室(南京理工大学), 南京 210094)

摘要: 采用向污泥中投加生物表面活性剂烷基多苷(APG)的方法, 研究了 APG 投加量和水解时间对剩余污泥水解产酸过程的影响。结果表明, APG 显著降低污泥表面张力, 强化污泥水解, 在最适投加量(以 TSS 计, 下同)0.2 g·g⁻¹ 下, SCOD、蛋白质和可溶性糖的浓度均在 12h 内达到最大, 分别由初始的 4 280.2、1 122.9 和 246.5 mg·L⁻¹ 上升到 6 481.1、1 639.3 和 1 205.8 mg·L⁻¹, 同时短链脂肪酸(SCFAs)浓度由 1 309.9 mg·L⁻¹ 增加为 2 221.6 mg·L⁻¹, 且 SCFA 的组分分布随之改变, APG 投加量越大, SCFAs 达到最大浓度所需时间也随之延长。随着 APG 投加量的增大, α-葡萄糖苷酶相对活力由 1.5 升至 2.5, 而蛋白酶相对活力在低投加量下由 1.4 升至 1.9, 高投加量下降至 1.5。不论 APG 是否存在, α-葡萄糖苷酶和蛋白酶的活力在达最高后都随着水解时间的延长而逐渐降低。整个过程中 pH 均呈现先减小后增大的趋势。

关键词: 生物表面活性剂; 烷基多苷; 剩余污泥; 短链脂肪酸; 水解酶活性; pH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1009-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.027

Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides

CHEN Can^{1,2}, SUN Xiu-yun^{1,2}, HUANG Cheng^{1,2}, SHEN Jin-you^{1,2}, WANG Lian-jun^{1,2}

(1. College of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Jiangsu Province Chemical Pollution Control and Resource (Nanjing University of Science and Technology), Nanjing 210094, China)

Abstract: The effects of biosurfactant alkyl polyglycosides (APG) on the hydrolysis and acidification of waste activated sludge including dosage of APG and hydrolysis time were investigated. It was found that APG reduced the tension of sludge hydrolysate, promoting sludge hydrolysis. The concentrations of SCOD, protein and soluble carbohydrate reached the maximum within 12 h at the optimal dosage of 0.2 g·g⁻¹ TSS, rising from 4 280.2, 1 122.9 and 246.5 mg·L⁻¹ to 6 481.1, 1 639.3 and 1 205.8 mg·L⁻¹, respectively, and the short-chain fatty acids (SCFAs) concentration increased from 1 309.9 mg·L⁻¹ to 2 221.6 mg·L⁻¹ simultaneously, the percentage of individual SCFA changed as well, and the time required to reach the maximal SCFAs concentration will be prolonged with the increase of dosage. With increasing APG dosage, α-glucosidase relative enzyme activities increased from 1.5 to 2.5, while protease relative enzyme activity increased from 1.4 to 1.9 at low dosages and decreased to 1.5 at high dosages. Regardless of the biosurfactant APG, α-glucosidase and protease enzyme activities decreased along with the hydrolysis time. The pH showed a tendency of first decreasing and then increasing.

Key words: biosurfactant; alkyl polyglycosides (APG); waste activated sludge; short-chain fatty acid; hydrolysis enzyme activity; pH

活性污泥法是目前世界上应用最为广泛的污水生物处理技术,但在此过程中会产生大量剩余污泥。有效利用剩余污泥的潜在碳源,实现剩余污泥在污水厂内的原位减量化与资源化,是解决剩余污泥问题的有效途径之一^[1]。

SCFAs 被证明可作为生物脱氮除磷碳源^[2]以来,越来越多研究者开始关注利用剩余污泥厌氧发酵产 SCFAs。SCFAs 主要产生于“限速阶段”水解酸化阶段^[3],有研究表明投加表面活性剂可提高污泥水解速率,为剩余污泥产酸提供大量底物,从而促进 SCFAs 的累积^[4,5]。文献^[6,7]通过添加化学表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和十二烷基硫酸钠,明显

提高污泥中有机物的溶出率,累积产酸量显著增加。但是化学表面活性剂不易降解,会对环境造成二次污染,而生物表面活性剂具有化学表面活性剂的各种表面性能,对环境友好,目前利用生物表面活性剂促进污泥水解提高产酸量的研究鲜有报道^[8~11]。生物表面活性剂 APG 是一种性能较全面的新型非离子表面活性剂,具有高表面活性,无毒、生物降解迅速且使用方便。本研究通过跟踪分析污泥表面张力

收稿日期: 2013-07-02; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278248)

作者简介: 陈灿(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为固体废物资源化,E-mail:0701040103@163.com

* 通讯联系人,E-mail:wanglj@njut.edu.cn

的变化、有机质的释放规律、水解酶酶活的变化,以及水解产酸过程中 pH 的变化,考察生物表面活性剂 APG 对污泥水解产酸的影响,以期对污泥水解产酸的实际应用和 SCFAs 的回用起到很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

实验污泥取自污水处理厂二沉池,经重力浓缩,弃去上清液,调节污泥含固率为 2.5% ~ 3.5%,污泥置于 4℃ 冰箱中保存待用. 其特征如表 1 所示.

实验中生物表面活性剂选用由南京都莱生物技

术有限公司提供的质量分数为 50% 的 APG,本药品为乳白色膏体.

1.2 分析项目及方法

TSS 采用重量法^[12]测定;表面张力采用拉脱法^[13]测定,测定仪器为 QBZY-1 型自动界面张力仪;污泥 5 000 r·min⁻¹离心 15 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后测定 SCOD、蛋白质和可溶性糖浓度,SCOD 测定采用哈希 DRB200 消解仪;蛋白质采用 Folin-酚试剂法^[14]测定,以牛血清白蛋白为标准物;可溶性糖采用苯酚-硫酸法^[15]测定,以葡萄糖为标准物;SCFAs 采用戴安 ICS-2100 离子色谱测定;α-葡萄糖苷酶和蛋白酶的测定方法参见文献^[16].

表 1 污泥基本特性

Table 1 Characteristics of waste activated sludge

pH	TSS/g·L ⁻¹	SCOD/mg·L ⁻¹	SCFAs/mg·L ⁻¹	可溶性糖/mg·L ⁻¹	蛋白质/mg·L ⁻¹
7.6 ± 0.2	28.6 ± 0.3	2748.0 ± 34.0	801.3 ± 11.7	176.3 ± 1.9	680.6 ± 8.2

1.3 实验方法

实验共采用 7 个 250 mL 的血清瓶,其中 1 ~ 5 号血清瓶中分别加入 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 g·g⁻¹ 的 APG (以 TSS 计,下同) 和 200 mL 污泥;6 号不加 APG,仅加入 200 mL 污泥,作为空白对照;7 号加入 10 g·L⁻¹ 的 APG 190 mL 和 10 mL 的剩余污泥. 向 7 个血清瓶中通入氮气 3 min 以驱除空气,然后密闭置于 30℃ 恒温振荡器中进行反应.

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℃ 向污泥中投加不同量 (0、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 g·g⁻¹) APG,污泥表面张力的下降量随时间的变化如图 1 所示. 随着 APG 投加量由 0.05 g·g⁻¹ 增大到 0.4 g·g⁻¹,污泥表面张力下降量分别为 38.7、41.5、42.7、43.1、43.2 mN·m⁻¹,可见 APG 的投加显著降低污泥表面张力,但是当投加量超过 0.2 g·g⁻¹ 后,表面张力降幅不大.

因为具有两亲结构的表面活性剂进入水中后,疏水基团朝向空气端,亲水基指向水溶液,其能在液体表面形成单分子薄膜,使得原本的液-气界面被表面活性剂-气界面所取代,形成新界面所需要的能量小,则溶液的表面张力降低^[17-19]. 而当整个液面都被 APG 分子覆盖后,表面张力最小,此时 APG 在污泥中达到饱和.

2.2 生物表面活性剂对污泥有机质释放的影响

蛋白质和可溶性糖是污泥的主要成分,也是产

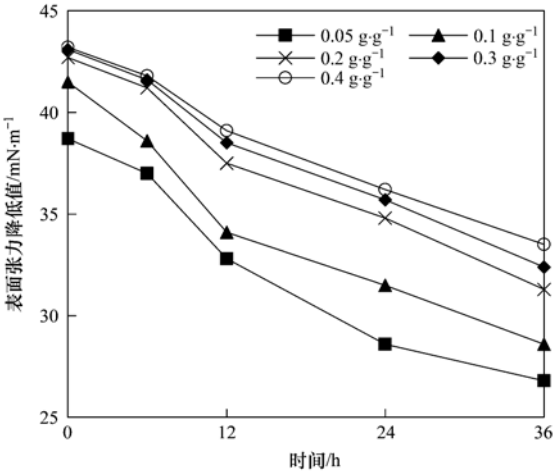


图 1 不同 APG 投加量下污泥表面张力随时间的变化

Fig. 1 Variation of surface tension with time at different APG dosages

生有机酸的主要基质^[20]. 于 30℃ 向污泥中投加不同量 (0、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 g·g⁻¹) APG,污泥发酵上清液中 SCOD 随时间的变化如图 2 所示,SCOD 的溶出量常用来表征污泥的水解效果,即蛋白质和和可溶性糖的释放情况,两者的具体浓度变化如图 3 和 4 所示. 投加量由 0 增加到 0.1 g·g⁻¹ 时,SCOD 变化不大,继续增大为 0.2 g·g⁻¹ 时 SCOD 迅速增大,溶出量比空白组增加 2 倍,而随着投加量继续增加,SCOD 涨幅较小.

由图 3 和图 4 可见,蛋白质和可溶性糖浓度随 APG 投加量的变化趋势与 SCOD 相似,在投加量为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 g·g⁻¹ 时,蛋白质浓度均在 9 h 达到最大值,分别为 1 284.5、1 447.3、

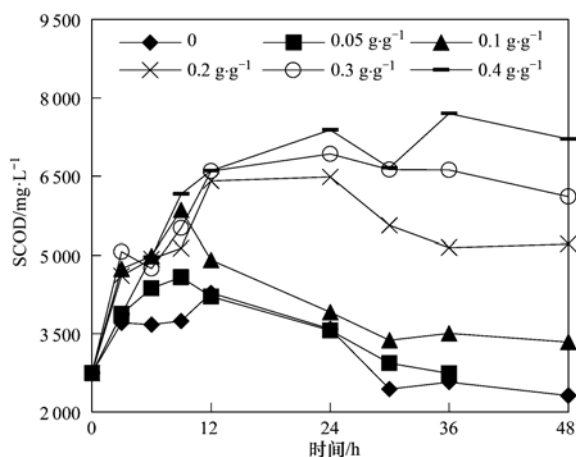


图2 不同 APG 投加量下 SCOD 浓度随时间的变化

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

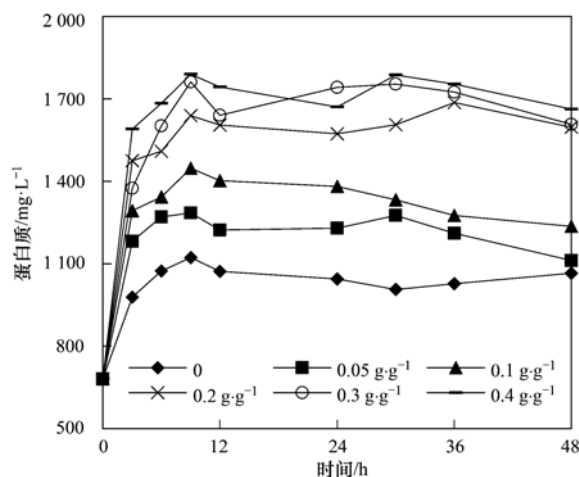


图3 不同 APG 投加量下蛋白质浓度随时间的变化

Fig. 3 Variation of protein concentration with time at different APG dosages

1 639.3、1 761.7、1 789.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 空白组仅为 1 122.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 维持一段时间动态平衡后缓慢降低; 可溶性糖浓度前 9 h 变化不大, 在 9 ~ 12 h 迅速增加, 不同投加量 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 下可溶性糖浓度均在 12 h 达到最大值, 分别为 374.1、440.5、1 205.8、1 328.9、1 411.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而空白对照组仅为 246.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 两者都在短时间达到较高浓度, 相对于空白对照组, 投加 APG 的实验组中有机质的释放量显著提高, 这与 Ji 等^[4]研究结果一致. 初期有机质的释放速率大于降解速率, 故在较短时间内暂时积累, 表观浓度迅速增加, 随着反应时间的延长, 蛋白质和可溶性糖被不断转化为小分子有机物, 或进一步被利用产 SCFAs, 或部分转化为 NH_4^+ 、 CO_2 、 H_2O 挥发^[20], 则有机物的表观浓

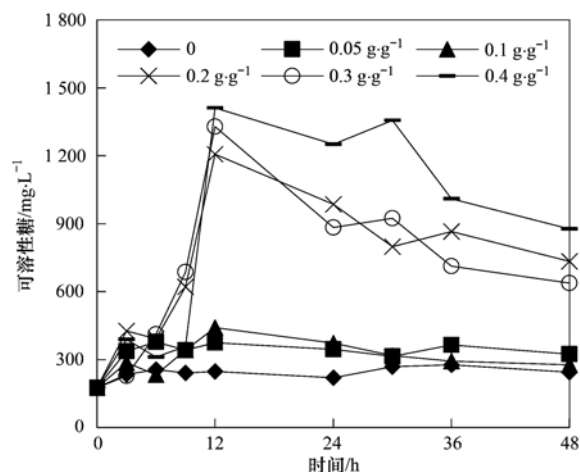


图4 不同 APG 投加量下可溶性糖浓度随时间的变化

Fig. 4 Variation of soluble carbohydrate concentration with time at different APG dosages

度降低.

2.3 生物表面活性剂对 SCFAs 总浓度和组分分布的影响

图 5 给出了 APG 投加量对剩余污泥水解产酸过程中 SCFAs 总浓度的影响, 从中可以看出, APG 的投加明显提高了 SCFAs 的产量. 在不同投加量 0、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 下, 最大 SCFAs 浓度分别为 1 609.9、1 706.6、1 888.7、2 221.6、2 444.9、2 485.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由此可见, 在实验所涉及的 APG 投加量范围内, 污泥累积产酸量随着投加量的增加而增大, 且污泥达到最大 SCFAs 浓度所需的酸化时间随着 APG 投加量的增加而延长, 这一现象与 Jiang 等^[21]利用化学表面活性剂进行实验的研究成果一致.

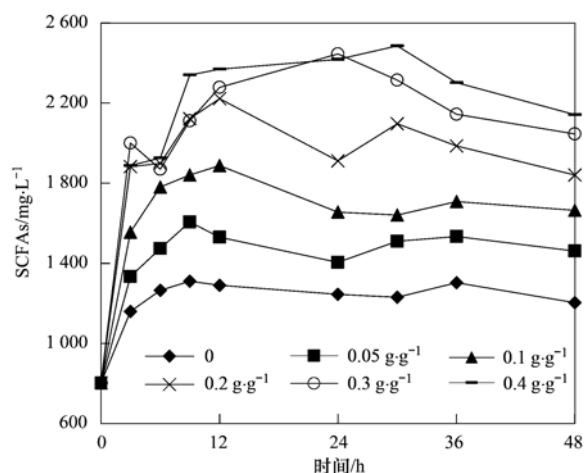


图5 不同 APG 投加量下 SCFAs 浓度随时间的变化

Fig. 5 Variation of SCFAs concentration with time at different APG dosages

图 6 给出了空白实验和剩余污泥在 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 APG 作用下,产生的各组分 SCFA 浓度占 SCFAs 总浓度的比例随时间的变化. 不论 APG 是否存在,剩余污泥在水解产酸过程中都可以检测到乙酸、丙酸、丁酸和戊酸这 4 种短链脂肪酸. 在水解产酸初期,空白实验中各组分浓度顺序为乙酸 > 丙酸 > 丁酸 > 戊酸,这一 SCFAs 浓度的排列顺序与文献[22]中的报道一致,乙酸所占比例随时间

延长而增大,丙酸所占比例则减小;在投加 APG 后,戊酸浓度超过丁酸,且随时间延长其比例增大,此外,实验过程中有少量甲酸出现,这与化学表面活性剂作用下污泥中 SCFA 组分分布不同^[23]. 由此可见,APG 不仅提高剩余污泥的 SCFAs 产量,还可以改变 SCFA 各组分浓度分布,SCFA 组分的具体变化情况可能与 APG 作用下微生物菌群的变化有关.

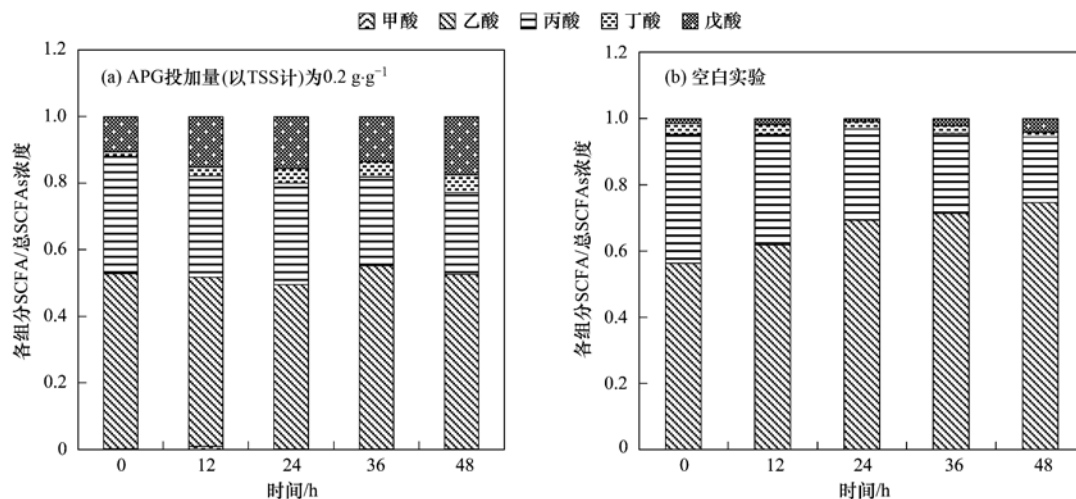


图 6 APG 投加量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和空白实验中各组分 SCFA 与总 SCFAs 浓度的比例随时间的变化

Fig. 6 Percentage of individual SCFA during fermentation at APG dosage of $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ and blank test

2.4 生物表面活性剂对微生物酶活的影响

脱离污泥表面并溶解到液相中的大分子有机物,先在微生物的体外被微生物产生的水解酶水解为小分子有机物,而后再被微生物吸收同化,酶活性直接影响有机物的降解和污泥的减量^[24, 25]. 鉴于本实验污泥所含有有机物主要是蛋白质和糖,故讨论蛋白酶和 α -葡萄糖苷酶酶活的变化,其中,蛋白酶将蛋白质水解为多肽, α -葡萄糖苷酶专一水解葡萄糖分子中的 α -1,4-葡萄糖苷键^[26, 27]. 图 7 为厌氧发酵 12 h 时 APG 的投加量对 α -葡萄糖苷酶和蛋白酶酶活的影响(以相对酶活表示,其中将空白实验中两种水解酶的初始活力计为 1).

从图 7 中可以看出,在 APG 作用下, α -葡萄糖苷酶酶活明显提高,当 APG 的投加量从 0 增加到 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, α -葡萄糖苷酶相对活力由 1.5 增加到 2.2,蛋白酶相对活力由 1.3 增大到 1.9,当投加量继续增大时, α -葡萄糖苷酶相对活性继续增大到 2.5,而蛋白酶相对活性却降为 1.5,但其仍高于空白对照组.

水解酶酶活随时间的变化如图 8(以投加量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 为例,其它投加量下变化趋势

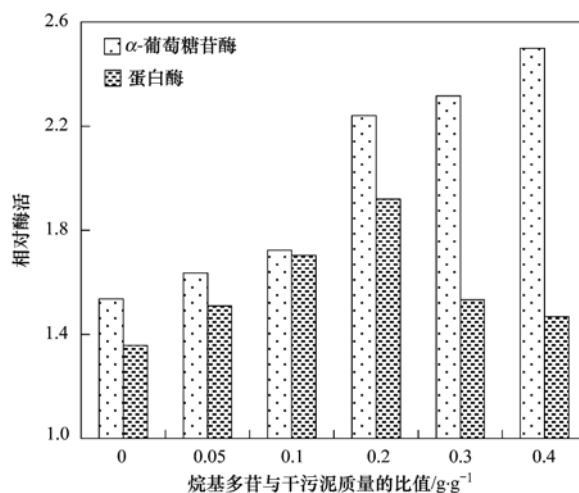


图 7 厌氧发酵第 12 h 不同 APG 投加量下水解酶的相对活力

Fig. 7 Enzyme activities with different APG dosages at the 12th hour of fermentation

与其相同),并与空白对照组进行对比. 从图 8 可以看出,不论 APG 是否存在,蛋白酶和 α -葡萄糖苷酶的相对活力都随着时间的延长而逐渐降低. 对于蛋白酶,当投加量较低(如 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)时,发酵 36 h 蛋白酶活力仍高于空白对照组,但是投加量增高到 $0.4 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,原本增强的蛋白酶活性在 30 h 时已经

低于空白对照组[如图 8 (a)]. 同时发现,取样范围内投加了 APG 的实验组中 α -葡萄糖苷酶活一

直高于空白对照组,且随着 APG 投加量的增加,酶活越强.

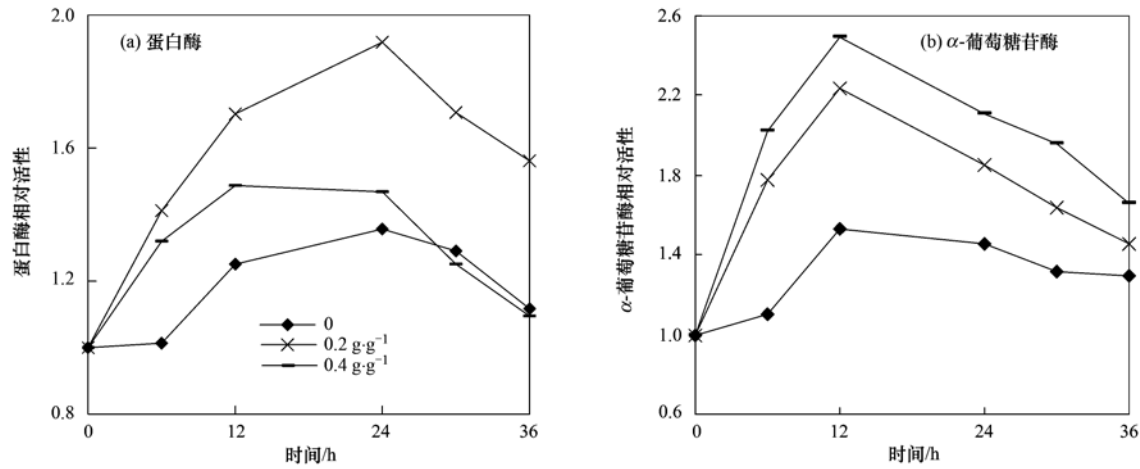


图 8 蛋白酶和 α -葡萄糖苷酶的相对活力随时间的变化
Fig. 8 Time course of relative activities of protease and α -glucosidase under different fermentation conditions

本研究中仅考察了 APG 对两种水解酶活力的影响以及水解酶活力随发酵时间的变化,当然,这并不能代表剩余污泥水解产酸过程中所有参与反应的水解酶的变化规律,但以上实验结果仍可以说明一定剂量 APG 的存在确实增强了剩余污泥中某些水解酶的活力,从而有利于污泥发酵过程中有机物的水解.

2.5 生物表面活性剂对 pH 的影响

APG 对剩余污泥发酵过程中 pH 的影响如图 9 所示,可以看出,不论 APG 是否存在,剩余污泥的 pH 都随着时间的延长先降低后升高. 发酵初始 SCFAs 快速累积,表现为 pH 的下降,且 APG 的投加量越大, pH 下降越快,间接证明 SCFAs 浓度随着 APG 的投加而增大. 随着发酵的进行, SCFAs 浓度逐渐降低且 NH_4^+ 大量累积,导致 pH 升高,且 APG 投加量越大, NH_4^+ 释放速率越快,则 pH 升高越快.

2.6 生物表面活性剂促进污泥水解产酸的原因分析

考虑到 APG 在水解产酸过程中自身可能降解为 SCFAs,因此,设置了 6 号血清瓶进行验证,检测结果如表 2 所示,可见实验过程中 APG 自身对 SCFAs 的贡献很小,不超过 $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,故可忽略.

表 2 APG 自身降解为 SCFAs 的浓度变化

Table 2 Amount of SCFAs produced from APG							
时间/h	0	3	6	12	24	36	48
SCFAs/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	39.2	50.4	63.3	48.7	52.3	36.6	21.5

生物表面活性剂 APG 之所以能促进剩余污泥水解产酸,是因为 APG 的两亲性,使其可以连接污

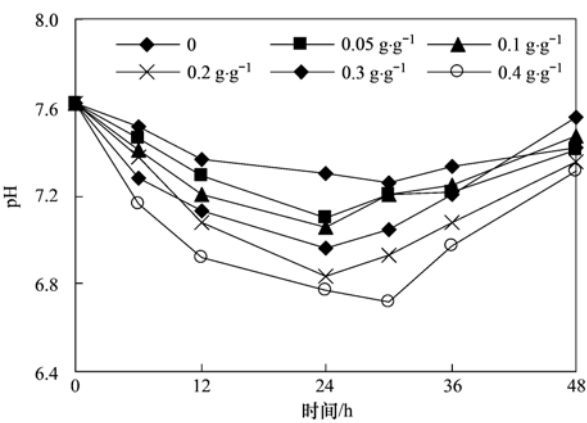


图 9 不同 APG 投加量下 pH 随时间的变化
Fig. 9 Variation of pH with time at different APG dosages

泥表面的大分子有机物与水分子,在搅拌作用下,有机物可脱离污泥进入液相中. APG 在污泥中达到饱和后,可通过碳氢链的疏水作用缔合成胶团,缔合作用是自发进行且具有可逆性的,使得原来不溶或微溶于水的有机物被加溶在胶团中,进入胶束内部的有机物通过乳化或假增溶方式而脱附进入水相,从而增加有机物在水中的溶解度,为污泥产酸提供更多底物^[28].

此外,生物膜由大量磷脂分子组成,磷脂与表面活性剂有类似的结构和性能,所以细胞膜对表面活性剂具有较强的吸附作用,这种吸附作用可改变细胞膜的通透性,使有机质和中间代谢物的跨膜速率加快^[29~31]. 大量蛋白质和可溶性糖脱离污泥表面溶解于液相中,在微生物的体外被水解酶进一步水解为低分子量的有机物,这一过程反复进行直到水

解产物(单糖和氨基酸)足够小,以至于可以被微生物细胞直接吸收同化,被微生物吸收的单糖和氨基酸进入酸化阶段,最终被转化为 SCFAs.

3 结论

(1)低投加量下,生物表面活性剂 APG 能很好地降低污泥的表面张力,当投加量超过 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,表面张力随投加量的增加无明显变化.

(2)APG 能强化污泥水解,促进有机质的溶出,SCOD、蛋白质和可溶性糖浓度均在 12 h 内迅速增加,SCFAs 浓度随之增加,且污泥达到最大产酸量所需时间随着 APG 投加量的增加而延长,同时,APG 也影响了 SCFA 的组分分布. 综合考虑产酸量与成本,确定 APG 的最适投加量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,此时最大产酸量出现在第 12 h.

(3)APG 的投加增强了 α -葡萄糖苷酶和蛋白酶的活力, α -葡萄糖苷酶酶活随着 APG 投加量的增大而增大,而蛋白酶酶活在低投加量下增大,高投加量下反而降低. 不论 APG 是否存在, α -葡萄糖苷酶和蛋白酶的活力都随着时间的延长而逐渐降低. 此外,整个水解产酸过程中 pH 均呈现先减小后增大的趋势.

参考文献:

- [1] Largus T A, Khursheed K, Muthanna H A, *et al.* Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater [J]. Trends in Biotechnology, 2004, **22**(9): 477-485.
- [2] Liu Y, Chen Y G, Zhou Q. Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and Propionic acids[J]. Chemosphere, 2007, **66**(1): 123-129.
- [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] Ji Z Y, Chen G L, Chen Y G. Effects of waste activated sludge and surfactant addition on primary sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(10): 3457-3462.
- [5] Chen Y G, Liu K, Su Y L, *et al.* Continuous bioproduction of short-chain fatty acids from sludge enhanced by the combined use of surfactant and alkaline pH [J]. Bioresource Technology, 2013, **140**: 97-102.
- [6] 姜苏, 陈银广, 周琪. 直链烷基苯磺酸盐促进剩余污泥产生短链脂肪酸的研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1301-1304.
- [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): 311-317.
- [8] Banat I M. Biosurfactants production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: A review[J]. Bioresource Technology, 1995, **51**(1): 1-12.
- [9] 陈延君, 王红旗, 王然, 等. 鼠李糖脂对微生物降解正十六烷以及细胞表面性质的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2117-2112.
- [10] 易欣, 罗琨, 杨麒, 等. 生物表面活性剂强化污泥水解的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3201-3207.
- [11] Huo D Q, Yi Z H, Hou C J. Effect of Rhamnolip on Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon [J]. Biotechnology, 2009, **4**: 78-81.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 246-286.
- [13] 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.
- [14] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, **193**(1): 265-275.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Guha S, Jaffe P R. Biodegradation kinetics of phenanthrene partitioned into the micellar phase of nonionic surfactants [J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(2): 605-611.
- [18] Chen Y, Chen Y S, Gu G. Influence of pretreating activated sludge with acid and surfactant prior to conventional conditioning on filtration dewatering [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, **99**(2): 137-143.
- [19] Mulligan C N. Environmental applications for biosurfactants[J]. Environmental Pollution, 2005, **133**(2): 183-198.
- [20] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 25-31.
- [21] 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**(14): 3112-3120.
- [22] Wang Q, Kuninobu M, Ogawa H I, *et al.* Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion [J]. Biomass and Bioenergy, 1999, **16**(6): 407-416.
- [23] 张礼平, 陈银广, 姜苏, 等. 两种表面活性剂对剩余污泥产酸影响的比较研究[J]. 环境科学学报, 2007, **21**(7): 96-100.
- [24] Yang Q, Luo K, Li X M, *et al.* Enhanced efficiency of biological excess sludge hydrolysis under anaerobic digestion by additional enzymes[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(9): 2924-2930.
- [25] Ubukata Y. Kinetics and fundamental mechanisms of starch removal by activated sludge: hydrolysis of starch to maltose and maltotriose is the rate-determining step [J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(1): 61-68.

- [26] Whiteley C G, Burgess J E, Melamane X. The enzymology of sludge solubilisation utilising sulphate-reducing systems: the properties of lipases[J]. Water Research, 2003, **37**(2): 289-296.
- [27] 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 等. 超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2780-2785.
- [28] 陈银广, 杨海真, 吴桂标, 等. 表面活性剂改进活性污泥的脱水性能及其作用机理[J]. 环境科学, 2000, **21**(5): 97-100.
- [29] 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.
- [30] Aranda F J, Espuny M J, Marques A, *et al.* Thermodynamics of the interaction of a dirhamnolipid biosurfactant secreted by *Pseudomonas aeruginosa* with phospholipid membranes [J]. Langmuir, 2007, **23**(5): 2700-2705.
- [31] Ueno Y, Hirashima N, Inoh Y, *et al.* Characterization of biosurfactant-containing liposomes and their efficiency for gene transfection[J]. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 2007, **30**(1): 169-172.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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