

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)	

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*

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 剩余污泥中含有大量病原微生物, 土地利用之前必须进行适当的处理, 降低病原微生物的数量, 以降低环境风险。通过研究在不同的底物浓度条件下, 剩余污泥高温厌氧消化(55℃)过程对病原指示微生物的杀灭效果, 分析厌氧消化前后污泥中病原指示微生物数量变化的原因。结果表明, 随着底物浓度的增加, VFAs 浓度和累积产甲烷量增加。在底物浓度为 28~84 g·L⁻¹、温度为 55℃、持续 28 d 的高温厌氧消化过程中, 上清液中总大肠杆菌下降 2.0~3.0 个数量级、粪大肠杆菌下降 1.8~3.3 个数量级; 消化后污泥中总大肠杆菌和粪大肠杆菌杀灭率均达到 99% 以上; 且上清液中和消化污泥中均未检测到沙门氏菌的存在。在研究底物浓度范围内, 当底物浓度大于 45 g·L⁻¹ 时, 消化液和污泥中总大肠杆菌和粪大肠杆菌的杀灭效果下降。

关键词: 厌氧消化; 剩余污泥; 总大肠杆菌; 粪大肠杆菌; 沙门氏菌

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1016-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.028

Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion

CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, TONG Zi-lin, HU Zhen-hu

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Because excess sludge contains high density of pathogens, it has to be treated to reduce pathogens before being disposed for land application. In this study, the effect of substrate concentration on pathogen inactivation during thermophilic anaerobic digestion was investigated. The results show that, with the increase of substrate concentration, VFAs and cumulative methane production increased. The density of total coliforms in the suspension liquid has a 2.0-3.0 orders of magnitude decline and fecal coliforms has 1.8-3.3 orders of magnitude decline after 28 days thermophilic anaerobic digestion at substrate concentration of 28-84 g·L⁻¹ and temperature of 55℃. More than 99% of total coliforms and fecal coliforms have been killed after 28 days digestion. *Salmonella* spp. was not detected in the suspension and solid after anaerobic digestion. When substrate concentration was higher than 45 g·L⁻¹, the inactivation of total coliforms and fecal coliforms declined.

Key words: anaerobic digestion; surplus sludge; total coliforms; fecal coliforms; *Salmonella* spp.

随着污水管网和污水处理厂建设的不断完善, 我国污水处理厂日处理污水量不断增加, 产生大量的剩余污泥。目前, 我国每年排放的废水总量约 400 亿 t, 排放的湿污泥约为 3 000 万 t, 并且还在不断地上升, 污泥处理已成为一个重要的环境问题^[1,2]。排放的污水中含有大量的病原微生物, 包括病原性细菌、蠕虫和病毒, 种类可能多至数百种^[3,4], 它们通过污水管网进入污水处理厂, 最终有相当部分被浓缩到剩余污泥中^[5,6], 使得剩余污泥中含有大量的病原微生物, 有些由于滥用抗生素而产生抗性病原微生物或者超级细菌; 污泥农用是未来的发展趋势, 直接使用很容易造成严重的二次污染, 导致疾病的发生或流传^[7], 造成巨大的环境和健康风险, 降低巨额污水处理投资的成效。因此, 剩余污泥在农业使用之前需要进行适当的处理。

对污泥进行高温厌氧消化处理, 不仅能够将有机物分解并产生沼气, 而且能够杀死致病微生物和

虫卵, 实现污泥的减量化、无害化、资源化和能源化^[8,9]。不同国家和地区对剩余污泥处理后病原微生物指标制定了不同的标准, 如美国 EPA 规定污泥经过处理后达到 A 级标准^[10] 才可以施用于农田。国外很多学者研究证明, 高温厌氧消化能够杀灭污泥中的致病微生物和原生虫卵, 如 Wagner 等^[11] 研究证明高温消化能够高效地杀死剩余污泥中的大肠杆菌和部分虫卵, 此外, Méndez-Contreras 等^[12] 研究证明污泥经过高温厌氧消化能够达到美国 EPA 制定的污泥 A 级标准。而我国污泥处理还缺乏相关病原微生物标准, 在 2002 年颁布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中, 厌氧处理只

收稿日期: 2013-07-11; 修订日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078122); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0624); 国家水体污染控制治理科技重大专项(2012ZX07103-001)

作者简介: 操宏庆(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体污染控制。

* 通讯联系人, E-mail: zhhu@hfut.edu.cn

要求有机物降解率大于 40%，没有对微生物数量提出指标，而且国内关于高温厌氧消化对病原微生物影响的研究也非常有限^[13]。因此，本试验通过研究不同底物浓度污泥在高温（55℃）条件下厌氧消化，考察其所含病原指示微生物数量的变化，分析底物浓度在高温厌氧消化过程中对病原指示微生物的影响，以期剩余污泥高温厌氧消化处理及其安全评价提供数据支持和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验剩余污泥取自合肥市朱砖井污水处理厂的脱水剩余污泥；种子污泥取自本实验室在 55℃ 驯养 1 个月的成熟厌氧污泥。试验材料主要特征如表 1 所示。

表 1 剩余污泥和种子污泥的主要特征

Table 1 Characteristics of surplus sludge and inoculums sludge		
项目	剩余污泥	种子污泥
pH	6.9	8.0
TS/%	19.8	12.8
VS/%	48.7	40.2
总氮/g·kg ⁻¹	18.3	12.9
总磷/g·kg ⁻¹	24.5	38.0
Cu/g·kg ⁻¹	0.1	—
Zn/g·kg ⁻¹	2.2	—
总大肠杆菌数/CPU·g ⁻¹	1.3 × 10 ⁷	1.6 × 10 ⁵
粪大肠杆菌数/MPN·g ⁻¹	1.4 × 10 ⁶	1.8 × 10 ³

1) “—”表示文献中没有相关数据

1.2 试验设计

试验采用 250 mL 的盐水瓶，在厌氧环境下，将剩余污泥和种子污泥作为底物放入瓶中，加入蒸馏水至 150 mL，并用碳酸氢钠调节 pH 到 7.5 左右。然后向各瓶内持续通入氮气约 3 min 驱赶瓶中的氧气以保持厌氧状态，并用橡皮塞塞紧，置于恒温气浴振荡器中进行培养，培养温度为 55℃，转速为 120 r·min⁻¹，每组设置 3 个平行样，取平均值进行分析。开始培养之前，测定各盐水瓶实际进泥中病原指示微生物数量和总固体（TS）；每 1 d 收集气体并测定甲烷含量；每 4 d 取盐水瓶中的上清液，静置后，取上层液体测定挥发性脂肪酸（VFAs）、总大肠杆菌、粪大肠杆菌和沙门氏菌。污泥中总大肠杆菌、粪大肠杆菌和沙门氏菌分别在厌氧消化之前和消化结束后测定。

试验设 5 组，一个对照组（CK），4 个不同的底物添加试验组（R1 ~ R4）。为保证反应较快启动，接种的种子污泥中的挥发性有机物（VS）占接种剩余

污泥 VS 15%，底物浓度和接种量如表 2 所示。

表 2 不同的底物添加水平

Table 2 Addition levels of different quantity substrates			
试验组	底物浓度 /g·L ⁻¹	剩余污泥湿重/ 干重/g	种子污泥湿重/ 干重/g
R1	28	18.0/3.6	5.0/0.6
R2	45	29.0/5.7	8.0/1.0
R3	67	43.0/8.5	12.0/1.5
R4	84	54.0/10.7	15.0/1.9
CK	17	0/0	15.0/1.9

1.3 分析方法

产气量以 50 mL 或 100 mL 带有刻度的玻璃注射器测定；气体中的甲烷浓度以带热导检测器 SP-6890 型气相色谱仪测定；VFAs 采用带氢火焰检测器的 SP-6890 型气相色谱仪测定，样品为取 1 mL 离心上清液，并用 1 mL 3% 甲酸溶液酸化，经过 0.45 μm 醋酸酯微孔滤膜过滤后待测；上清液中总大肠杆菌的测定方法与文献[14]类似，采用 10 倍稀释法，稀释为 3 个细菌浓度适宜的梯度，各取 0.5 mL 分别涂布在品红亚硫酸钠培养基（APC）上，在 37℃ 下培养 24 h，通过平板计数确定 100 mL 上清液中总大肠杆菌数（CFU）；上清液中粪大肠杆菌的测定方法和沙门氏菌的定性检测方法均采用美国 APHA 标准方法^[15]，其中粪大肠杆菌采用了最大计数法（MPN），最终结果以 100 mL 上清液中粪大肠杆菌数（MPN）表示；污泥中的总大肠杆菌、粪大肠杆菌和沙门氏菌采用修正法测定，即称取 1 g 的湿污泥加无菌水稀释到 50 mL，混匀，取均匀混合液测定方法如上清液；TS 用烘干法（105℃ 至恒重）测定。

2 结果与分析

2.1 对 VFAs 生成和产甲烷的影响

VFAs 是厌氧消化中间产物之一，也是甲烷菌的底物^[16]，在产甲烷菌的作用下，VFAs 被分解生成甲烷^[17,18]。如图 1 所示，前 4 d，VFAs 产生积累现象，原因可能是底物给微生物提供足够多的易降解基质，但是反应初期产甲烷菌活性低^[19]，不利于甲烷的生成，所以 VFAs 积累，甲烷量缓慢增加。4 ~ 12 d，甲烷菌活性增加，导致消化体系中 VFAs 浓度降低，产甲烷量升高。在 12 d 之后，污泥中难降解的有机物在体系中微生物作用下，逐渐被降解产生 VFAs，VFAs 的生成速率和产甲烷菌消耗底物速率达到平衡，使 VFAs 几乎不变，产甲烷量缓慢增加。和中温间歇厌氧消化需要持续 40 ~ 50 d 相比，高温厌氧消化产甲烷持续时间明显缩短。

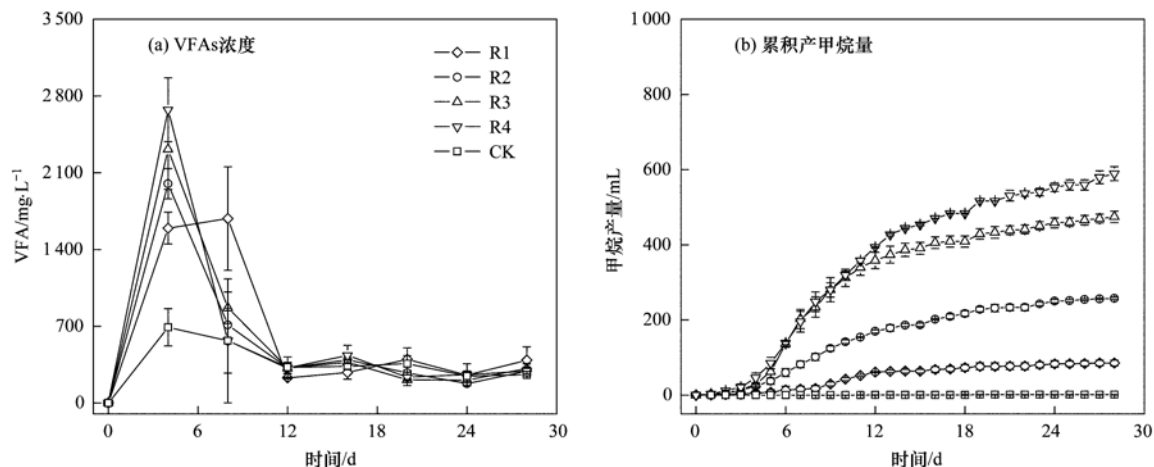


图1 厌氧消化过程中 VFAs 的生成和累积产甲烷量

Fig. 1 VFAs and cumulative methane production during anaerobic digestion

从累积产甲烷量的变化可以看出, R3 和 R4 在试验前期累积产甲烷量增长迅速, R1、R2 和 CK 前期由于底物浓度低的影响, 累积产甲烷量增加缓慢. 在高温厌氧消化结束时, R1、R2、R3、R4 和 CK 组累积产甲烷量分别为 85.4、257.6、474.5、589.5、1.1 mL. 在研究的底物浓度范围内, 较高的底物浓度下的甲烷产率较高, 这是因为低底物浓度时微生物维持生长需要消耗底物的比例较高.

2.2 对上清液中总大肠杆菌的影响

上清液中总大肠杆菌数量的变化如图 2 所示. 经过高温厌氧消化上清液中总大肠杆菌的量都有一定的降低, R1、R2、R3、R4 和 CK 组的总大肠杆菌量分别从开始每 100 mL 含有 $10^{7.07}$ 、 $10^{6.81}$ 、 $10^{7.08}$ 、 $10^{7.01}$ 和 $10^{5.20}$ CFU 降低到 $10^{4.24}$ 、 $10^{3.85}$ 、 $10^{4.50}$ 、 $10^{5.03}$ 和 $10^{3.36}$ CFU, 普遍降低 1.8~3.0 个数量级, 它们的杀灭率分别为 99.85%、99.89%、99.74%、

98.95% 和 98.55%. 可以看出, 不同底物浓度中总大肠杆菌的杀灭效果差异很大, 当底物浓度为 $45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 总大肠杆菌的杀灭效果最佳, 说明在高温厌氧消化中, 底物浓度是一个影响微生物杀灭效果的重要因素. 此外, 从图 2 可以看出, 在前 4 d, 总大肠杆菌的数量有明显的下降趋势, 而 VFAs 在前 4 d 产量很高, 表明 VFAs 的增加促使总大肠杆菌的灭活. 4~8 d, VFAs 的产量下降, 导致总大肠杆菌的数量没有明显变化. 第 8 d 以后总大肠杆菌的数量下降明显, 可能是因为初始 VS 浓度低, 到后期厌氧消化系统中的营养物质不足以及产甲烷菌等其它微生物的竞争, 导致总大肠杆菌的灭活^[20].

2.3 对上清液中粪大肠杆菌的影响

粪大肠杆菌是在 44.5°C 下培养能生长并发酵乳糖产酸产气的大肠杆菌, 高温厌氧消化试验是在 55°C 下进行的, 这与粪大肠杆菌的适宜培养温度差别很大, 故高温厌氧消化对粪大肠杆菌的影响较大. 如图 3 所示, R1、R2、R3、R4 和 CK 组每 100 mL 上清液中粪大肠杆菌下降 1.7~3.3 个数量级, 杀灭率分别为 99.95%、99.80%、99.83%、98.26% 和 98.05%, 呈现和总大肠杆菌相似的趋势. Barrios 等^[21]研究证明了 VFAs 的存在和病原微生物的杀灭有密切关系, 符波等^[13]研究证明当 VFAs 浓度大于 $6000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 能够迅速杀灭污泥中的病原微生物, 达到污泥 A 级标准, 本研究中病原微生物去除效果缓慢, 可能是因为厌氧消化中产生的 VFAs 浓度较低. 此外可以得到, 在研究的底物浓度范围内, 当底物浓度小于 $45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 粪大肠杆菌的杀灭效果较好, 达到 99% 以上.

2.4 厌氧消化前后污泥中指示微生物的变化

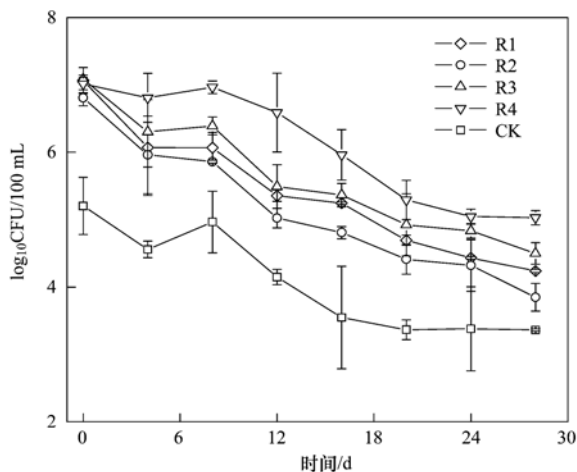


图2 总大肠杆菌数量的变化

Fig. 2 Variation of total coliforms

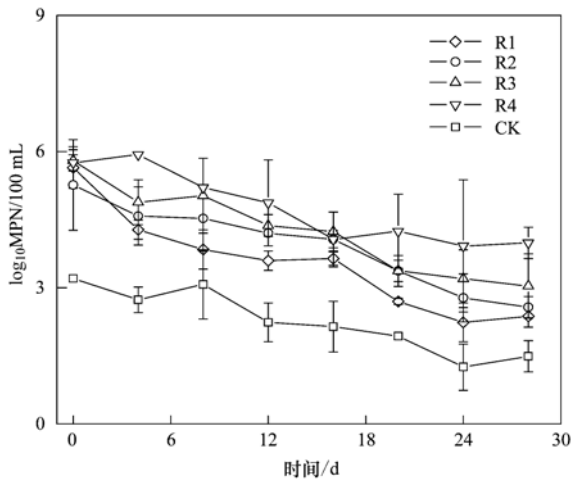


图3 厌氧消化过程中粪大肠杆菌数量的变化

Fig. 3 Variation of fecal coliforms during anaerobic digestion

厌氧消化前后污泥中总大肠杆菌和粪大肠杆菌数量变化如图4所示。从图4(a)可见,初始生污泥中总大肠杆菌数量(以污泥的干重计,下同)大约为 $10^{5.19} \sim 10^{7.16} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,经过28 d的高温厌氧消化, R1、R2、R3、R4和CK污泥中总大肠杆菌数量明显降低,其含量分别为 $10^{3.72}$ 、 $10^{3.70}$ 、 $10^{4.66}$ 、 $10^{4.58}$ 、 $10^{2.87} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,它们的杀灭率分别为99.95%、99.96%、99.68%、99.68%、99.52%。如图4(b)

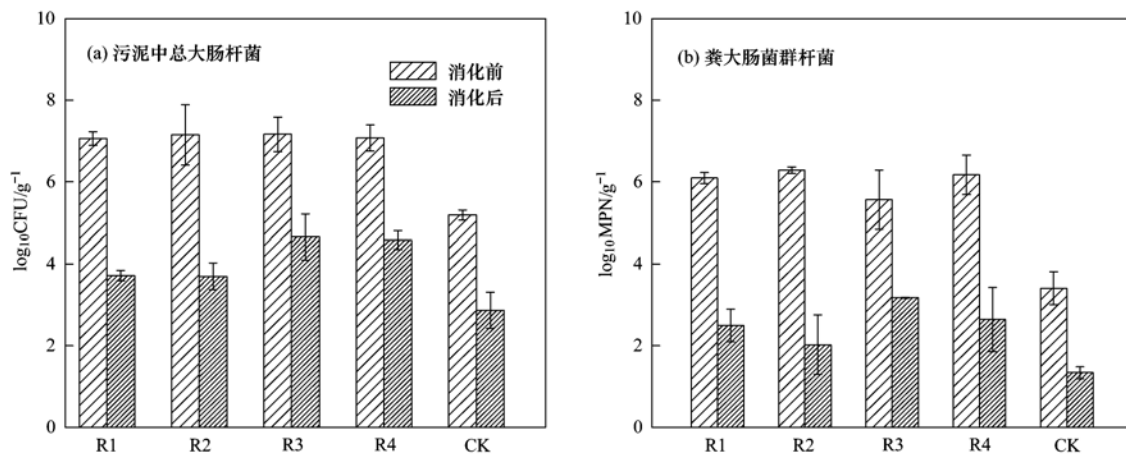


图4 厌氧消化前后污泥中总大肠杆菌和粪大肠杆菌的变化

Fig. 4 Variation of total and fecal coliforms in sludge before and after anaerobic digestion

2.5 对沙门氏菌的影响

沙门氏菌属是引起食物中毒的病原菌之一,它主要通过口径感染,具有易传染、种群复杂、致病力强等特点^[24]。通常,感染沙门氏菌的人或动物排放的粪便,又将成为污染源。同时,沙门氏菌还有季节性特点,夏秋季节人体携带沙门氏菌几率高^[25],因此夏秋季节污水中沙门氏菌含量也较高。

在整个厌氧消化过程中,通过沙门氏菌定性试验

所示,消化初始污泥中粪大肠杆菌的数量大约为 $10^{3.41} \sim 10^{6.29} \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$,消化后各组含量分别为 $10^{2.49}$ 、 $10^{2.02}$ 、 $10^{3.17}$ 、 $10^{2.64}$ 、 $10^{1.34} \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$,它们的杀灭率分别为99.97%、99.99%、99.59%、99.97%、99.12%。消化后污泥中总大肠杆菌降低2.3~3.5个数量级,粪大肠杆菌降低2.1~4.3个数量级,经过28 d厌氧消化后,每g污泥中(干重)粪大肠杆菌数量下降到1 000个菌落左右。

以上结果表明,高温厌氧消化对污泥中的总大肠杆菌和粪大肠杆菌的杀灭效果比较明显,杀灭率均能达到99%以上,这与Song等^[22]和Ziemba等^[23]研究结论一致。按照美国EPA达到A级标准的要求,污泥在55℃条件下处理2.6 d即可以达到每g干污泥中粪大肠杆菌低于1 000个菌落的要求^[10],本试验处理时间达到28 d,其中的原因则需要进一步深入研究。而当底物浓度高于 $45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,底物对于病原微生物的杀灭效率降低,表明底物浓度对病原微生物杀灭具有非常重要的影响,小于 $45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 较有利于病原指示微生物的杀灭。这和美国EPA规定的7%的底物浓度分界线有明显的不同^[10],这可能和污泥成分的组成有关,中国污水处理厂污泥的有机物含量明显低于发达国家。

发现,厌氧消化开始时上清液和污泥中均有沙门氏菌属存在,随着厌氧发酵的进行,上清液中检测到沙门氏菌属细菌的样品越来越少。消化28 d结束时,上清液中已检测不到沙门氏菌的存在,在污泥中也未检测到沙门氏菌。这与Iranpour等^[26]的研究结论一致。但根据符波等^[27]的研究,检测不到沙门氏菌并不能表示沙门氏菌已被全部灭活,部分沙门氏菌可能处于有活性但不可培养(VBNC)的状态,有关灭活和

VBNC 状态细菌的比例还需要进一步研究。

3 结论

(1)在底物浓度为 $28 \sim 84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、经过 55°C 、持续 28 d 的高温厌氧消化过程后,消化液中总大肠杆菌下降 $2.0 \sim 3.0$ 个数量级、粪大肠杆菌下降 $1.8 \sim 3.3$ 个数量级;消化后污泥中总大肠杆菌和粪大肠杆菌杀灭率均达到 99% 以上;消化液和污泥中都检测不到沙门氏菌的存在。

(2)底物浓度是一个影响病原微生物杀灭效果的重要因素,在研究的底物浓度范围内,当底物浓度大于 $45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥以及消化液中总大肠杆菌和粪大肠杆菌的杀灭效果下降。

参考文献:

- [1] Rodríguez L, Cerrillo M I, García-Albiach V, *et al.* Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 284-291.
- [2] 杨悦,王云龙,杨尚源,等.嗜热微生物及其降解剩余污泥的机理[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(7): 2026-2030.
- [3] Sidhu J P S, Toze S G. Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review [J]. *Environment International*, 2009, **35**(1): 187-201.
- [4] Wen Q X, Tutuka C, Keegan A, *et al.* Fate of pathogenic microorganisms and indicators in secondary activated sludge wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(3): 1442-1447.
- [5] Fu C Y, Xie X, Huang J J, *et al.* Monitoring and evaluation of removal of pathogens at municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Science and Technology*, 2010, **61**(6): 1589-1599.
- [6] Ellouze M, Aloui F, Sayadi S. Performance of biological treatment of high-level ammonia landfill leachate [J]. *Environmental Technology*, 2008, **29**(11): 1169-1178.
- [7] Viau E, Bibby K, Paez-Rubio T, *et al.* Toward a consensus view on the infectious risks associated with land application of sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5459-5469.
- [8] Appels L, Baeyens J, Degève J, *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(6): 755-781.
- [9] 吴静,张鹏娟,田磊,等.高温污泥厌氧消化器的启动[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 520-523.
- [10] US Environmental Protection Agency (US EPA). Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including domestic septage) under 40 CFR Part 503, EPA/625/R-92/013 [S]. Washington, DC, 1992.
- [11] Wagner A O, Gstraunthaler G, Illmer P. Survival of bacterial pathogens during the thermophilic anaerobic digestion of biowaste: laboratory experiments and in situ validation [J]. *Anaerobe*, 2008, **14**(3): 181-183.
- [12] Méndez-Contreras J M, Rendón-Sagardi J A, Ruiz-Espinoza J E, *et al.* Behavior of the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion in the stabilization of municipal wastewater sludge (part 1) [J]. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 2009, **8**(3): 283-290.
- [13] 符波,陈燕,姜谦,等.城市污泥中温厌氧消化中挥发性脂肪酸(VFA)对肠道病原菌的杀灭机理[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 2921-2928.
- [14] Kurissery S, Kanavillil N, Verenitch S, *et al.* Caffeine as an anthropogenic marker of domestic waste: A study from Lake Simcoe watershed [J]. *Ecological Indicators*, 2012, **23**: 501-508.
- [15] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington: American Public Health Association, 2005.
- [16] 张庆芳,杨林海,邵田羽,等.有机固体废弃物渗滤床高温干式厌氧发酵的中试研究[J]. *中国沼气*, 2012, **30**(4): 11-13, 20.
- [17] 刘然,彭剑锋,宋永会,等.厌氧折流板反应器酸化及其对微生物种群分布的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1554-1560.
- [18] 吴满昌,孙可伟.温度波动对城市有机生活垃圾高温厌氧消化工艺影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 805-809.
- [19] 公维佳,李文哲,刘建禹.厌氧消化中的产甲烷菌研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2006, **37**(6): 838-841.
- [20] Smith S R, Lang N L, Cheung K H M, *et al.* Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes [J]. *Waste Management*, 2005, **25**(4): 417-425.
- [21] Barrios J A, Jiménez B, Salgado G, *et al.* Growth of faecal coliforms and Salmonella spp. in physicochemical sludge treated with acetic acid [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(10): 85-90.
- [22] Song Y C, Kwon S J, Woo J H. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2004, **38**(7): 1653-1662.
- [23] Ziemba C, Peccia J. Fecal coliform population dynamics associated with the thermophilic stabilization of treated sewage sludge [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(10): 2755-2761.
- [24] 张成河.济宁市食品从业人员肠道沙门菌带菌调查[J]. *海峡预防医学杂志*, 2007, **13**(6): 46.
- [25] 杨道玉,叶林,杨梅,等.成都市食品从业人员肠道沙门氏菌属与志贺氏菌属的带菌调查分析[J]. *现代预防医学*, 1999, **26**(3): 317-319.
- [26] Iranpour R, Cox H H J. Recurrence of fecal coliforms and Salmonella species in biosolids following thermophilic anaerobic digestion [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(9): 1005-1012.
- [27] 符波,王燕,姜谦,等.污泥厌氧消化和后续处理中沙门氏菌杀灭及 VBNC 发生[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 103-110.

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