

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响

陈汉龙¹, 严媛媛^{1,2*}, 何群彪¹, 戴晓虎¹, 周琪¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 江苏盐城环保产业工程研发服务中心, 盐城 224000)

摘要: 以高浓度低有机质污泥为研究对象, 通过改变加热时间研究 100℃ 温和热处理对其有机物溶出以及厌氧消化性能影响。结果表明通过 100℃ 的温和热处理, 污泥上清液中的有机物浓度在预处理前 30 min 内显著增加, 30 min 以后则趋于平缓。其中 SCOD、蛋白质和碳水化合物在 100℃ 热处理 30 min 时的溶出率分别达到 10.5%、11.6% 和 8.2%。温和热处理不仅可以提高低有机质污泥的产气总量, 而且还可以缩短产气高峰的到达时间。经 100℃ 热处理 30 min 的污泥, 在厌氧消化 10 d 时的沼气产率(以 VS 计)为 136.0 mL·g⁻¹, 比空白对照组提高了 86.0%; 厌氧消化 30 d 后的 VS 降解率也由空白时的 19.1% 增加到 33.3%。此外, 实验结果还表明, 100℃ 的温和热处理对厌氧消化过程中的 4 种关键酶(蛋白酶、乙酸激酶、磷酸转乙酰酶和辅酶 F₄₂₀) 均有不同程度的促进作用。

关键词: 低有机质污泥; 热处理; 厌氧消化; 有机物; 加热时间

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0629-06

Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content

CHEN Han-long¹, YAN Yuan-yuan^{1,2}, HE Qun-biao¹, DAI Xiao-hu¹, ZHOU Qi¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research and Service Center for Environmental Protection Industry, Yancheng 224000, China)

Abstract: The effects of mild pretreatment at temperature of 100℃ on the solubilization and anaerobic digestibility of high solid sludge with low organic content were studied with the variation of heating times. Experimental results show soluble organic concentrations in supernatant increase with the prolonging of thermal pretreatment time rapidly, and slowly after 30 min. The dissolution rates of COD, protein and carbohydrate with 30 min of thermal pretreatment at 100℃ were 10.5%, 11.6% and 8.2%, respectively. Mild thermal pretreatment not only enhanced total methane yield, but also advanced the peak time of methane production. The methane production ratio with 30 min of thermal hydrolysis was 136 mL·g⁻¹ (VS) at day 10 of anaerobic digestion, with an 86% increase over the control group. VS reduction ratio after 30 days anaerobic digestion also increased to 33.3% with 30 min of thermal pretreatment at 100℃ compared with 19.1% in control group. In addition, studies on enzymatic activity indicated the activities of four key enzymes (protease, acetokinase, phosphotransacetylase and coenzyme F₄₂₀) involved in anaerobic digestion were all enhanced by mild thermal pretreatment.

Key words: sludge with low organic content; thermal pretreatment; anaerobic digestion; organic matters; heating time

厌氧消化是一种的常用的污泥稳定化方法。由于它能在降解有机物的同时回收生物质能(沼气), 因此在国内外有着广泛的应用^[1]。污泥厌氧消化产甲烷主要经历水解、酸化、产乙酸和产甲烷这 4 个阶段^[2]。由于生物细胞体占整个剩余污泥干重比例达 70%, 这样, 污泥胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)和微生物细胞壁便阻碍了细胞内有机物的释放和水解。因此, 污泥水解便成了限制污泥厌氧消化效率的关键步骤^[3,4]。

目前, 促进污泥水解并提高厌氧消化效率的预处理方法主要有酸碱处理^[5,6], 热解处理^[7-9], 超声处理^[10,11]、机械处理^[12]、湿式氧化^[13]或其联合处理^[14,15]等。其中, 热处理由于其处理效果好, 厌氧消化产气提高明显等优点而备受重视。污泥在热处理

过程中, 污泥絮体解体, 微生物细胞开始破裂, 胞内的有机物(如蛋白质、碳水化合物等)被释放出来, 从而促进了污泥水解, 改善了污泥的厌氧消化性能, 使产气量得到提高。目前, 有关污泥热解预处理的研究主要集中于高温热解预处理。如 Haug 等^[16]较早发现剩余污泥热解预处理的最佳温度为 175℃; 在该温度下能够显著增加污泥溶解性, 使 SRT = 15 d 时的甲烷产气量比未预处理污泥可提高 61%。Valo 等^[17]发现剩余污泥高温热解预处理后的有机物溶

收稿日期: 2012-07-10; 修订日期: 2012-08-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-004); 国家青年科学基金项目(51208371); 江苏省青年自然科学基金项目(SBK201240227)

作者简介: 陈汉龙(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥处理处置与资源化利用, E-mail: chenhanlong736@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yanyuanyuan@tongji.edu.cn

解程度取决于预处理温度,当温度为 130、150 和 170℃ 时 SCOD 量分别可增加 25%、44% 和 60%。污泥热预处理温度越高,处理效果也就越明显,但同时所造成的能耗以及对设备的要求也就越高。因此,本研究针对高温热解预处理的这些缺点研究常压下的温和热预处理对污泥厌氧消化的促进作用。

近年来由于生物营养去除 (biological nutrition removal, BNR) 工艺的广泛应用,导致污水厂剩余污泥中的有机质含量普遍偏低,这种现象在我国尤其明显。然而,国内外的热处理研究主要集中在高有机质 (VS/TS > 50%) 的污泥,如 Wett 等^[7] 和王治军等^[18],而对低有机质污泥 (VS/TS < 50%) 的热处理研究则鲜有报道。另外,以往关于污泥的热处理研究多以含水率 > 95% 的浓缩污泥为对象,由于水的比热容较大,加热时大部分能量消耗在加热污泥中大量的水分上,导致工程应用时能耗过大、缺乏经济性。但是较高的固体浓度 (≥ 10%) 通常又导致污泥的屈服应力迅速上升,流动性下降,从而满足不了工程上对运输的需求^[19]。

因此,本研究从能耗及流动性要求两个角度考虑,选择 10% 含固率的低有机质 (VS/TS < 50%) 污泥为对象,探讨不同处理时间的温和热处理 (100℃) 对污泥中有机物溶出及厌氧消化性能的影响,并对其原因作出分析。

1 材料与方法

1.1 实验用泥

实验用泥主要是来自江苏省盐城市某污水处理厂的脱水污泥 (含水率 78% ~ 85%), 该污水厂污水来源主要是生活污水,采用传统的 A²O 处理工艺。污泥取回实验室后通过添加自来水将其含水率调节至 90%, 然后将其置于 4℃ 冰箱中保存直至使用。该实验用泥的主要性质如表 1。

表 1 实验用泥的主要性质

Table 1 Main characteristics of sludge

项目	数值
pH	7.4
TS/%	10.1
VS/%	4.0
TCOD/mg·L ⁻¹	63 865.7
SCOD/mg·L ⁻¹	115.1
总蛋白质/mg·L ⁻¹	25 689.9
可溶性蛋白质/mg·L ⁻¹	29.9
总碳水化合物/mg·L ⁻¹	3 855.1
可溶性碳水化合物/mg·L ⁻¹	7.9
DNA/mg·L ⁻¹	75.8

实验所用接种污泥来自上海白龙港污水处理厂中温厌氧消化池,接种污泥 pH 7.6, 含水率为 8.3%, VS/TS 为 86.6%。在接种前置于 35℃ 恒温箱中培养一周以去除其中剩余的易降解有机物。

1.2 实验方法

预处理方法:取 200 g 上述 90% 含水率的污泥将其分为 7 组,第一组不做处理,第 2 ~ 7 组在 100℃ 下分别加热 10、20、30、40、50 和 60 min。处理好后每组各取 100 g 用于测试分析,100 g 用于 BMP 实验。

厌氧消化潜力 (biochemical methane potential, BMP) 实验方法^[20]:取上述已预处理好的 100 g 污泥与 100 g 接种污泥充分混合 (接种比例 50%), 然后置于 250 mL 的血清瓶中,以 0.5 L·min⁻¹ 的流速通 N₂ 10 min 以排除空气中的氧气。最后通过橡胶塞密封置于 35℃ 的恒温摇床中振荡发酵 30 d。另取 100 g 接种污泥单独进行发酵产气,以作空白。发酵初期每日测定产气量和沼气组分,后期产气较少时每隔 2 d ~ 3 d 测一次。采用排水法测定气体总量,并通过气相色谱测定气体组分。发酵底物产气量等于发酵底物与接种污泥混合产气量减去接种污泥产气量 (空白)。

半连续流实验:为测定厌氧消化过程中的酶活性,在有效体积为 4.0 L 的厌氧反应器中进行半连续流实验。实验中预处理方法、温度和 pH 控制同 BMP 实验。每日进出料 200 mL (对应的停留时间为 20 d),连续运行 2 个月直至产气稳定后取样用于测定。

1.3 分析方法

pH 值采用上海雷磁 PHS-25 型 pH 计测定; TS、VS 采用称重法; SCOD、TCOD 采用重铬酸钾法,其中 SCOD 用离心机 10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 后取上清液进行测定。蛋白质和糖类分别采用 Folin-酚试剂法和蒽酮比色法,其前处理步骤同 SCOD; DNA:二苯胺法; 气体组分:气相色谱 (日本岛津 GC-2014, 配 TCD 检测器)。

酶活性的测定方法如下。

(1) 蛋白酶的测定 将含有 3 mL 厌氧消化污泥和 1 mL 0.5% 偶氮酪蛋白的混合液于 37℃ 培养 90 min,用 2 mL 10% 三氯乙酸使反应终止,将混合液离心 (4 000 r·min⁻¹) 30 min,取出上清液 2 mL,加入 2 mL 2 mol·L⁻¹ NaOH,在 440 nm 波长处比色测定^[21]。

(2) 乙酸激酶的测定 取出待测的厌氧消化污

泥样品(20 mL),用 10 mL 的磷酸钠缓冲溶液($100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 4.0~11.0)洗涤 3 次,将其悬浮于磷酸钠缓冲溶液中.使用超声破碎(20 kHz, 4°C)细胞 30 min,离心($10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4°C)30 min 以去除细胞残片.提取离心后的上清液.酶反应混合液的总体积为 300 μL ,各组成浓度如下:Tris-HCl 缓冲溶液($81 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.4),乙酸钾($81 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),ATP($4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), MgCl_2 ($4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),磷酸烯醇丙酮酸($1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),NADH($0.04 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),乳酸脱氢酶($0.4 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$),细胞提取液(160 μL).反应在 25°C 下进行,加入细胞提取液后催化反应开始,在 340 nm 波长处测定初始吸光值,5 min 反应结束,测定终点吸光值.使用不含乙酸的物质作为空白校正 ATP 样品中可能存在的 ADP^[22].

(3)磷酸转乙酰酶的测定 前处理方法同乙酸激酶.磷酸转乙酰酶(PTA)活性的测定是根据酶反应混合液中添加乙酸辅酶 A 后所释放出的辅酶 A 量.酶反应混合液的总体积为 200 μL ,各组成浓度如下:磷酸钾($0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.4)缓冲溶液,乙酰辅酶 A($0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),5,5-二巯基代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB, $0.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),120 μL 细胞提取液.反应在 32°C 下进行,结束后于 405 nm 波长下测定吸光度^[23].

(4)辅酶 F_{420} 的测定 采用分光光度法^[24].

2 结果与讨论

2.1 温和热处理对低有机质污泥有机物溶出的影响

热处理对污泥当中有机物的影响主要包括两个方面:首先是颗粒状的有机物由固相逐步溶解至液相;其次是部分溶解性的大分子有机物逐步水解为小分子的物质,例如碳水化合物水解成小分子的多糖或单糖,蛋白质水解成多肽、二肽、氨基酸等.在热处理过程中 SCOD 的浓度不断增加,为下一步的厌氧消化过程提供更多的易降解底物,使得厌氧消化的性能得以提高.

随着热水解的进行,固体有机物不断开始溶解,SCOD 的浓度不断增加.图 1 表示为 SCOD 随不同热处理时间的变化规律.其中,SCOD 的浓度在一开始的 10 min 内迅速增加,30 min 之后逐步趋于平缓.如经热处理 10、20 和 30 min 后的污泥 SCOD 分别为 4 607.5、5 705.8 和 6 697.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.由于 TCOD 的浓度为 63 865.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此,其对应的 COD 溶出率(SCOD/TCOD)分别为 7.2%、8.9% 和 10.5%,而相同情况下的未处理污泥的 COD 溶出率

仅为 0.5%.上述预处理之后的 COD 溶出率与其他研究者的结果^[19]相比,显得比较偏低.这主要是由于本研究采用的是低有机质的污泥且是常压条件下比较温和的加热处理(100°C).

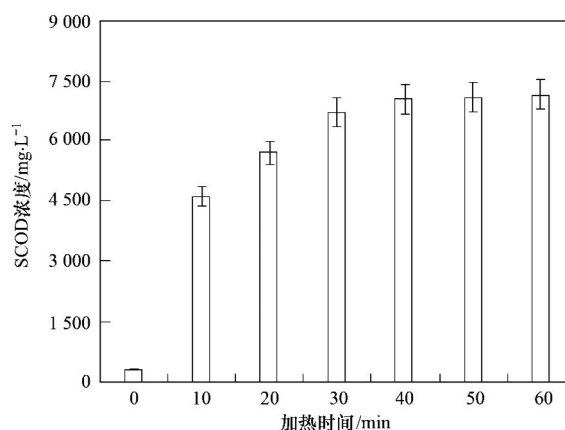


图 1 不同热处理时间条件下的 SCOD 浓度

Fig. 1 SCOD concentration at different times of thermal pretreatment

蛋白质和碳水化合物是污泥当中易降解有机物的主要组成^[25],同时也是构成污泥胞外聚合物的主要成分.它们的溶出浓度代表着污泥当中整个有机物的溶出效果.图 2 表示的是不同热处理时间对蛋白质和碳水化合物溶出的影响.从中可知,热处理对促进蛋白质和碳水化合物的溶出效果较为明显,其溶出规律与 SCOD 的溶出规律相似,即在热水解前 30 min 溶出较快,30 min 后则趋于平缓.例如,蛋白质和碳水化合物在未进行热水解处理时的浓度分别仅为 29.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 7.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经 100°C 热处理 30 min 后则迅速增加到 2 980.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 317.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时其对应的溶出率则分别达到 11.6% 和 8.2%.导致上述结果的原因主要有以下两个方面:首先,热处理使污泥絮体裂解,胞外聚合物开始溶出至液相中,导致蛋白质和碳水化合物的浓度增加;其次,热水解处理破坏了部分微生物的细胞壁,使胞内的有机化合物开始释放出来.然而,随着热处理的时间持续延长(如 $> 30 \text{ min}$),上述的促进作用开始减弱,从而导致有机物的溶出效果也越来越不明显.

污泥当中的 DNA 主要位于细胞内部,因此, DNA 的溶出量可以间接地反映热处理对污泥细胞壁的破解程度.图 3 表示的是 DNA 浓度随加热时间的变化趋势.从中可见,热水解处理对 DNA 的溶出作用明显,且随着热处理时间的延长, DNA 的浓度亦相应增加.尤其是在一开始的 20 min 内, DNA 的浓度迅速上升,由未处理时的 75.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到热处理 20 min 时的 229.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.热处理 30 min 之

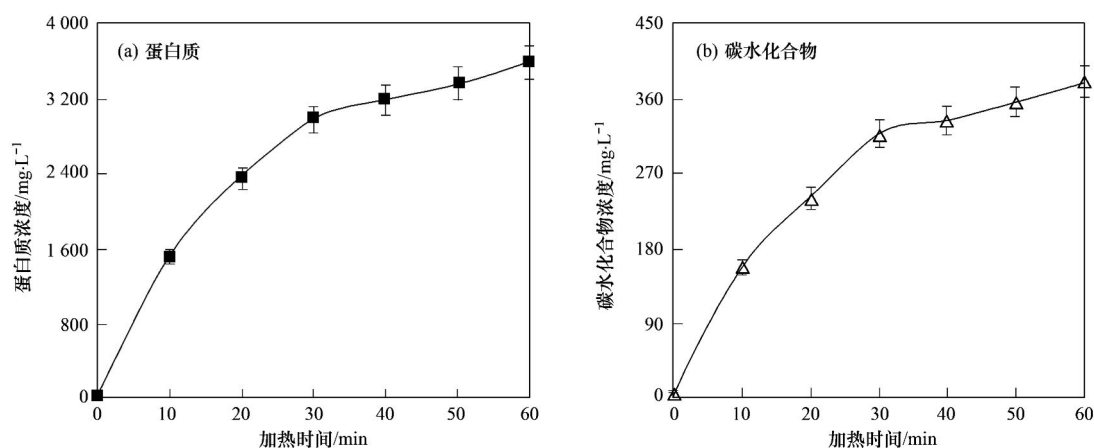


图2 不同热处理时间条件下的蛋白质和碳水化合物浓度

Fig. 2 Soluble protein and carbohydrate concentration at different times of thermal pretreatment

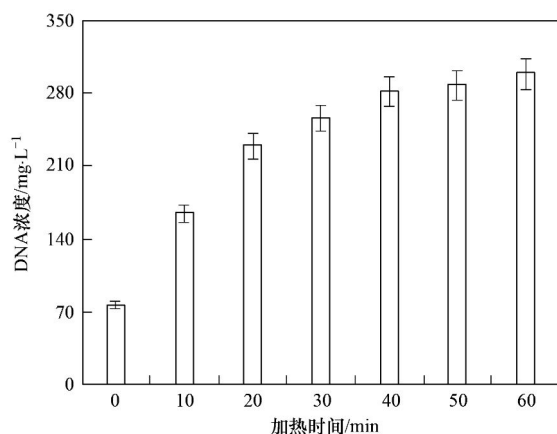


图3 不同热水解处理时间条件下的DNA浓度

Fig. 3 DNA concentration at different times of thermal pretreatment

后DNA的浓度增加趋于平缓,最终稳定在 $290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.说明热处理在一定程度上能起到破解细胞壁的作用,但随着处理时间的延长其破壁效果将减弱.

2.2 温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响

污泥的厌氧消化性能包括产气效果和有机物降解效率两个方面.产气效果主要由产气总量以及沼气比例所决定,因为沼气总量 = 产气总量 $\times$ 沼气比例.沼气产生的越多,回收的生物质能也就越多.在本研究中,主要通过BMP实验来测定最大产沼潜力.实验过程中沼气比例基本上保持在60%~70%之间.图4所示为根据BMP实验所制作的累积沼气产率(即沼气产生量/投加的有机物含量)趋势图.

如图4所示,在厌氧消化过程中经过温和和热处理的低有机质污泥的沼气产率均高于未处理污泥,且随着热处理时间的延长而呈现不断增长的趋势.

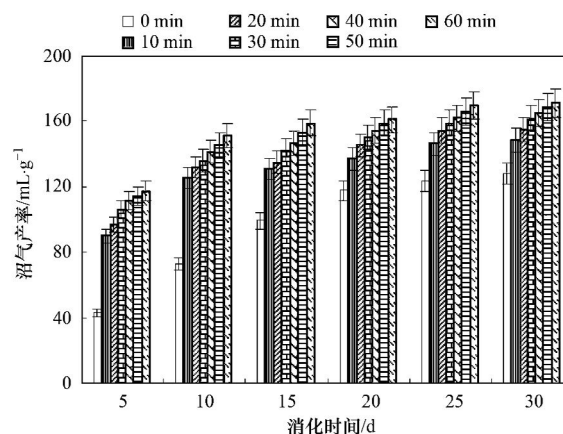


图4 BMP实验中的沼气产率趋势

Fig. 4 Production ratio of methane in BMP experiment

例如,热处理10、30和60 min的污泥在厌氧消化10 d时的沼气产率分别为123、136和146 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,其比对应条件下未处理组的沼气产率($73 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$)分别提高了68%、86%和100%.

此外,无论是热水解组还是未处理组,沼气产率在厌氧消化的前期增长较快,后期则逐步放缓.对于热水解组而言,其在前10 d产气较快.如热水解10、30和50 min在厌氧消化前10 d的沼气产率(以VS计)为125、136和146 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,分别占其总沼气产率的83%、84%和87%.对于未处理组而言,沼气产率在前20天均保持较快速增长,20 d以后才趋于平缓.如其在厌氧消化的前5、10、15和20 d的沼气产率(以VS计)分别为43、73、99和118 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,分别占到总沼气产率的34%、57%、78%和92%.由此可见,温和的热处理不仅可以促进低有机质污泥产气总量的提高,而且还可以促进厌氧消化过程中产气高峰提前,从而缩短污泥的停留时间.

有机物降解率又称挥发性固体(VS)去除率,它表示污泥在厌氧消化过程中有机物的降解程度,是考察污泥厌氧消化性能的一项重要指标^[26].图5表示的是低有机质污泥经不同热处理时间后厌氧消化30 d的VS降解率.从中可知,经过热处理后的污泥VS降解率明显高于相同条件下的未处理污泥,并且随着热处理时间的延长而呈现不断增长的趋势.例如,在经热处理10、30和50 min厌氧消化30 d后的污泥VS降解率分别为28.5%、33.3%和35.4%,而相同条件下未处理污泥的VS降解率则仅为19.1%.

国内的其他研究者,如王治军等^[18]的研究结果表明,剩余污泥经150℃和170℃热处理30 min后进行BMP实验的VS降解率分别达到48.1%和53.4%.马俊伟等^[19]研究了7%、9%和13%的高浓度污泥在170℃热水解30 min后厌氧消化的VS降解率,研究结果表明随着固体浓度的提高,VS降解率也逐渐升高,13%浓度的热水解污泥VS降解率达到45%.上述研究者所得的VS降解率均高于本研究的VS降解率,其主要原因如下:①本研究的污泥VS/TS较低,仅有39.4%,属于低有机质污泥.而王治军等^[18]和马俊伟等^[19]研究的污泥VS/TS则分别达到53.6%和72.1%.②本研究的热处理条件较为温和(100℃),不同于其他研究者所进行的高温预处理(170℃).

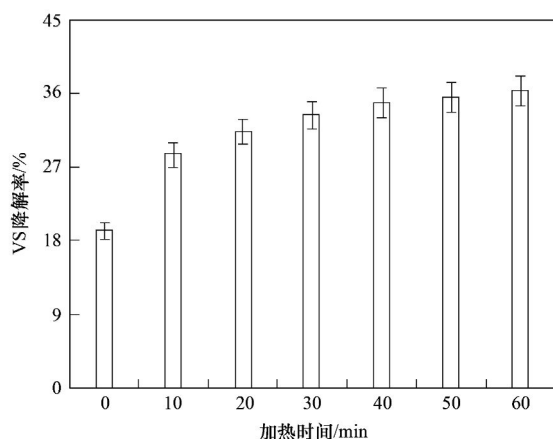


图5 不同热处理时间条件下的VS降解率

Fig. 5 VS reduction ratio at different times of thermal pretreatment

2.3 厌氧消化过程中的关键酶活性研究

在污泥的厌氧消化过程中,有机物主要经历水解、酸化和产甲烷3个阶段,而且这些代谢反应主要是通过酶的催化作用来进行的^[27].本研究通过稳定后的半连续流实验研究了厌氧消化过程中的4种关键酶:蛋白酶(protease)、乙酸激酶(acetokinase,

AK)、磷酸转乙酰酶(phosphotransacetylase, PTA)和辅酶F420.其中,蛋白酶与蛋白质的水解转化有关;乙酸激酶和磷酸转乙酰酶在乙酸的形成过程中起关键作用;F420是产甲烷菌的一种特有的辅酶.表2列出了这4种关键酶在不同热水解处理时间时的活性变化.从中可知,100℃的温和热处理对这4种酶均有不同程度的促进作用.例如对于辅酶F₄₂₀,其由未处理时的0.09 U·mg⁻¹增加到热水解30 min时的0.18 U·mg⁻¹,即为空白的2倍.表明经热水解处理之后的污泥比未处理污泥有更多的乙酸和CO₂被转化成CH₄.

表2 污泥厌氧消化过程中的关键酶活性/U·mg⁻¹

Table 2 Specific activities of key enzymes involved in anaerobic digestion of sludge/U·mg⁻¹

加热时间 /min	Protease	AK	PTA	F ₄₂₀
0	0.05 ± 0.01	3.10 ± 0.11	0.15 ± 0.01	0.09 ± 0.003
10	0.14 ± 0.01	3.42 ± 0.14	0.28 ± 0.02	0.12 ± 0.004
20	0.19 ± 0.01	3.56 ± 0.11	0.33 ± 0.02	0.15 ± 0.004
30	0.25 ± 0.01	3.74 ± 0.10	0.37 ± 0.02	0.18 ± 0.004
40	0.28 ± 0.02	4.11 ± 0.15	0.40 ± 0.03	0.20 ± 0.006
50	0.32 ± 0.02	4.25 ± 0.12	0.43 ± 0.03	0.22 ± 0.006
60	0.35 ± 0.02	4.33 ± 0.13	0.45 ± 0.03	0.23 ± 0.006

3 结论

(1)低有机质污泥经100℃的温和热水解处理后,其上清液中的有机物浓度显著增加,且在前30 min内增加迅速,30 min以后则趋于平缓.其中SCOD、蛋白质和碳水化合物在100℃热处理30 min时的溶出率分别达到10.5%、11.6%和8.2%.

(2)温和热水解处理不仅可以促进低有机质污泥产气总量的提高,而且还可以促进厌氧消化过程中产期高峰提前,从而缩短污泥的停留时间.经热水解30 min的污泥在厌氧消化10 d时的沼气产率(以VS计)为136.0 mL·g⁻¹,其比相同条件下空白对照组提高了86.0%.

(3)经过100℃的温和热水解处理后的污泥VS降解率明显高于相同条件下的未处理污泥,并且随着热处理时间的延长而不断增长.经热处理30 min厌氧消化30 d后的污泥VS降解率为33.3%,而相同条件下未处理污泥的VS降解率则仅为19.1%.

(4)100℃的温和热水解处理对厌氧消化过程中的4种关键酶(蛋白酶、乙酸激酶、磷酸转乙酰酶和辅酶F₄₂₀)均有不同程度的促进作用.

参考文献:

- [1] 何晶晶, 顾国维, 李笃中. 城市污泥处理与利用[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 170-171.

- [2] Climent M, Ferrer I, Del Mar Baeza M, *et al.* Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **133**(1-3): 335-342.
- [3] Lehne G, Muller A, Schwedes J. Mechanical disintegration of sewage sludge [J]. Water Science and Technology, 2001, **43**(1): 19-26.
- [4] Lin Y Q, Wang D H, Wu S Q, *et al.* Alkali pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(1): 366-373.
- [5] Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization [J]. Bioresource Technology, 1997, **62**(3): 85-90.
- [6] 袁光环, 周兴求, 伍健东. 酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1918-1922.
- [7] Wett B, Phothilangka P, Eladawy A. Systematic comparison of mechanical and thermal sludge disintegration technologies [J]. Waste Management, 2010, **30**(6): 1057-1062.
- [8] Li Y Y, Noike T. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment [J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(3-4): 857-866.
- [9] Nielsen H B, Thygesen A, Thomsen A B, *et al.* Anaerobic digestion of waste activated sludge-comparison of thermal pretreatments with thermal inter-stage treatments [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, **86**(2): 238-245.
- [10] Yan Y Y, Feng L Y, Zhang C J, *et al.* Ultrasonic enhancement of waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acids accumulation at pH 10.0 [J]. Water Research, 2010, **44**(11): 3329-3336.
- [11] 杨洁, 季民, 韩育宏, 等. 污泥碱解和超声破解预处理的效果研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1002-1006.
- [12] Nah I W, Kang Y W, Hwang K Y, *et al.* Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process [J]. Water Research, 2000, **34**(8): 2362-2368.
- [13] 杨晓奕, 蒋展鹏. 湿式氧化处理剩余污泥的研究 [J]. 给水排水, 2003, **29**(7): 50-54.
- [14] 乔玮, 王伟, 徐衣显, 等. 碱辅助条件下的污泥微波热水解特性研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2678-2683.
- [15] Kim D H, Jeong E, Oh S E, *et al.* Combined (alkaline + ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration [J]. Water Research, 2010, **44**(10): 3093-3100.
- [16] Haug R T, Stuckey D C, Gossett J M, *et al.* Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1978, **50**(1): 73-85.
- [17] Valo A, Carrère H, Delgenès J P. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2004, **79**(11): 1197-1203.
- [18] 王治军, 王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能 [J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 68-71.
- [19] 马俊伟, 曹芮, 周刚, 等. 浓度对高固体污泥热水解特性及流动性的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1583-1588.
- [20] Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays [J]. Water Science and Technology, 2009, **59**(5): 927-934.
- [21] 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.
- [22] Allen S H G, Kellermeyer R W, Stjernholm R L, *et al.* Purification and properties of enzymes involved in the propionic acid fermentation [J]. Journal of Bacteriology, 1964, **87**(1): 171-187.
- [23] Andersch W, Bahl H, Gottschalk G. Level of enzymes involved in acetate, butyrate, acetone and butanol formation by *Clostridium acetobutylicum* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1983, **18**(6): 327-332.
- [24] Delafontaine M J, Navea H P, Nyns E J. Fluorimetric monitoring of methanogenesis in anaerobic digestors [J]. Biotechnology Letters, 1979, **1**(2): 71-74.
- [25] Zhuo G H, Yan Y Y, Tan X J, *et al.* Ultrasonic-pretreated waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acid accumulation under alkaline conditions: effect of temperature [J]. Journal of Biotechnology, 2012, **159**(1-2): 27-31.
- [26] Appels L, Baeyens J, Degreve 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.
- [27] Feng L Y, Chen Y G, Zheng X. Enhancement of waste activated sludge protein conversion and volatile fatty acids accumulation during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition: the effect of pH [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(12): 4373-4380.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行