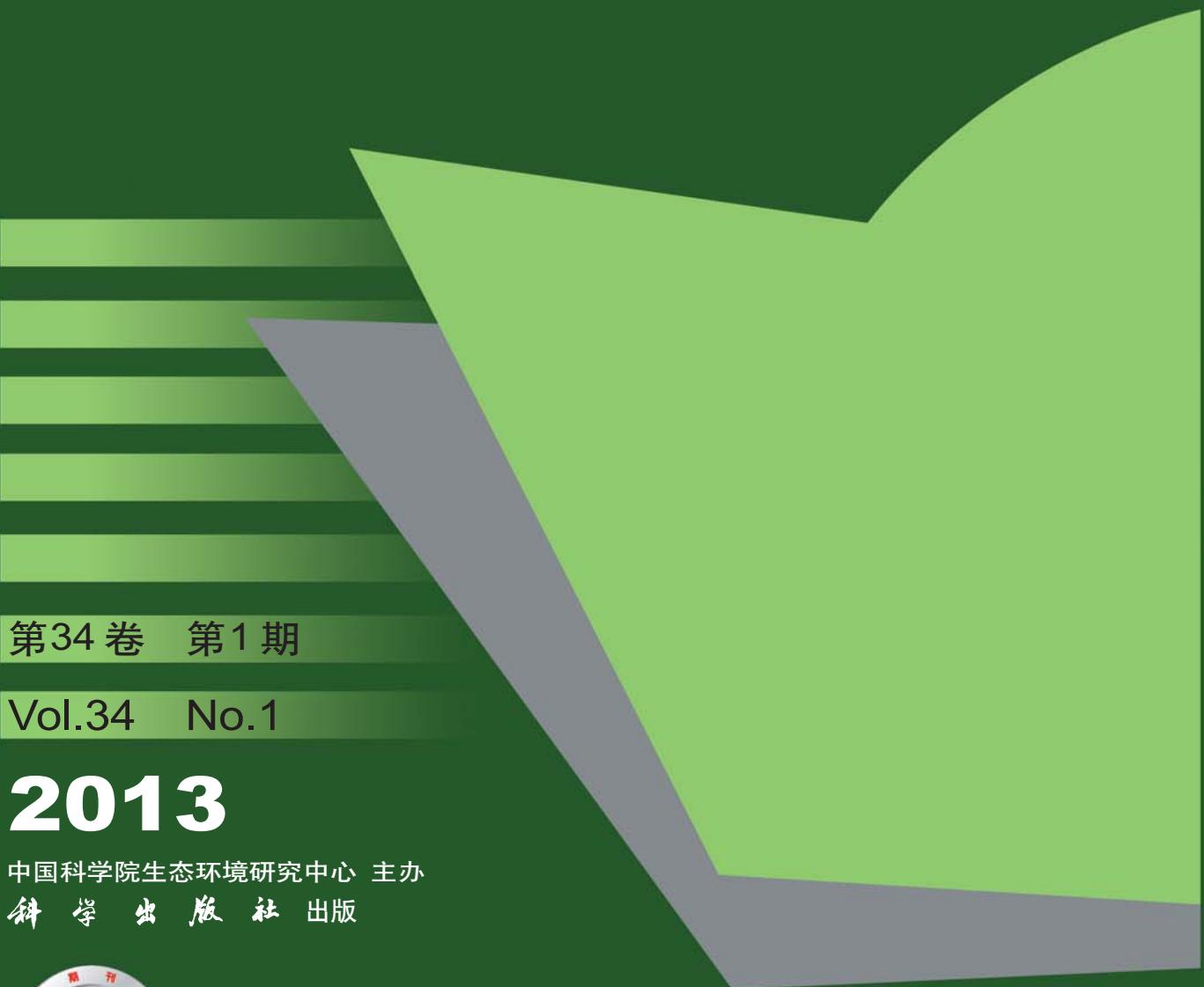


环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE



第34卷 第1期

Vol.34 No.1

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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明(1)		
厦门城区大气颗粒物PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桉,刘碧莲,吴水平(8)		
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思(15)		
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气SO ₂ 和NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳(21)		
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远(27)		
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	.....陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无操,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋(34)	
碱改性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨(39)		
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜(DMSO)的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋(45)		
2010年秋季长江口外海域CDOM的三维荧光光谱-平行因子分析	.....闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇(51)	
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素a浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙(61)		
基于HJ1A-CCD数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁(69)		
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍(77)		
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣旸,贾颖娜,陈佳勃,吕军(84)		
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元(91)		
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山(98)		
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男(108)		
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	.....李晋昌,张红,石伟(116)	
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强(121)		
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	.....刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军(129)	
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新(137)		
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	.....王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦(145)	
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民(150)		
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳(156)		
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐(163)		
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直(169)		
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧结,张旭,李立明,郑光洁,李广贺(177)		
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴(182)		
负载型TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓(188)		
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇(194)		
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根(198)		
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中NO _x 产生量的影响	.....韩雪,高大文(204)	
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢(209)		
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立持,何宝燕,李跃鹏(217)		
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳(226)		
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南(231)		
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,宫兆宁,赵文慧,唐涛(237)		
北京市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福(244)		
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评价	.....于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏(251)	
多效应残差法(MERA)表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾(257)		
利用DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中拟噁唑灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远(263)		
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	.....孟瑶,梁红,高大文(271)	
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林(277)		
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国(283)		
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博(288)		
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	.....方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇(293)	
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟(302)		
无定形Fe(OH) ₃ 和Fe ₃ O ₄ 共沉淀态As的化学提取	.....陈义萍,王少锋,贾永锋(308)	
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲(315)		
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎(321)		
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李烨,郑正,桑大志(328)		
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易(336)		
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强(347)		
2012城市生态学术研讨会会议论文			
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛(357)		
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正(364)		
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强(373)		
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	庞博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维(379)		
低碳交通电动汽车碳减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新(385)		
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌(395)		
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌(401)		
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)	专辑征稿通知(394)

污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究

段妮娜,董滨*,李江华,戴翎翎,戴晓虎

(同济大学环境科学与工程学院,城市污染控制国家工程研究中心,上海 200092)

摘要:采用完全混合式反应器 R1 ~ R5(进料脱水污泥与餐厨垃圾的湿重混合比分别为 1:0、4:1、3:2、2:3 和 0:1),在半连续运行的状态下,考察了停留时间(solid retention time, SRT)为 20 d 时脱水污泥和餐厨垃圾混合干法厌氧消化的产气性能、有机质降解性能和系统稳定性。结果表明,随着进料中餐厨垃圾所占比例的增大,系统的产气率和甲烷产率呈上升趋势,产气中甲烷含量呈下降趋势,污泥中添加餐厨垃圾有助于在利用原有消化罐容积的前提下显著提高有机负荷和体积产气率。餐厨垃圾比例越大,混合物料的水解速率常数越大,有机质降解率越高,R1 ~ R4 中有机质水解速率常数分别为 0.25、0.61、1.09 和 1.56 d⁻¹,有机质降解率分别为 37.4%、50.6%、60.7% 和 68.2%,水解速率差异是导致 VS 降解率不同的主要原因。随着餐厨垃圾比例的增大,系统内 pH、总碱度(total alkalinity, TA)、总氨氮(total ammonia nitrogen, TAN)和游离氨氮(free ammonia nitrogen, FAN)呈下降趋势,当污泥中添加的餐厨垃圾提高 60% 时,系统内 pH、总碱度、总氨氮和游离氨氮分别下降 6%、16%、22% 和 75%。游离氨和 Na⁺分别是影响污泥和餐厨垃圾单独干法消化稳定性的重要因素,污泥和餐厨垃圾混合消化可降低潜在抑制性物质的浓度,显著提高系统稳定性。

关键词:厌氧;高含固;脱水污泥;餐厨垃圾;水解速率

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0321-07

High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions

DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, DAI Ling-ling, DAI Xiao-hu

(National Engineering Research Center for Urban Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At solid retention time (SRT) of 20 days, biogas production, volatile solid (VS) degradation and system stability in co-digestion systems of dewatered sludge (DS) and kitchen garbage (KG) were investigated in semi-continuous completely mixed reactors numbered R1-R5 (the DS/KG of their feeding substrate based on wet mass was 1:0, 4:1, 3:2, 2:3 and 0:1, respectively). The results showed that, with larger proportion of KG in feeding substrate, higher methane yield and biogas yield were obtained with lower methane content. For certain reactor at given SRT, KG addition could significantly improve the organic loading rate (OLR) and volume biogas production. System with more KG addition favored higher hydraulic constant *k* and VS reduction. The hydraulic constant *k* was 0.25 d⁻¹, 0.61 d⁻¹, 1.09 d⁻¹ and 1.56 d⁻¹, and the VS reduction was 37.4%, 50.6%, 60.7% and 68.2% for R1-R4, respectively, indicating higher hydrolysis rates with more KG addition, which led to increased VS reductions. With larger KG proportion in feeding substrate, pH, total alkalinity (TA), total ammonia nitrogen (TAN) and free ammonia nitrogen (FAN) showed decreasing trend. As KG addition increased by 60%, pH, TA, TAN and FAN decreased by 6%, 16%, 22% and 75%, respectively. FAN and Na⁺ respectively were potential inhibitory chemicals that threatened the stability of the mono-system of DS and KG. In comparison with the mono-system of DS or KG, the co-system showed higher stability by diluting toxic chemicals like ammonia or Na⁺ to much lower levels.

Key words: anaerobic; high solids; dewatered sludge (DS); kitchen garbage (KG); hydrolysis rate

污泥处理一直是我国污水处理的难题之一,有关研究表明虽然目前我国城市生活污水处理率仅为 77%,但是每年污泥产生量约 3.0×10^7 t(以含水率为 80% 计),而且每年以 10% 速度增长^[1],如果我国城镇污水全部得到处理,则每年污泥产生量将接近 4.0×10^7 t。此外,生活垃圾也是我国城市化进程面临的一个巨大问题,“十五”期间,我国生活垃圾处理能力上升了 20%,但由于垃圾增长速度快于设施建设速度,无害化处理率反而从 61% 下降至 53%^[2],而餐厨垃圾占城市生活垃圾的一半以上。

目前城市污水处理厂的污泥和生活垃圾的主要处理方式是土地填埋,不仅占用有限的土地资源,而且易造成二次污染。

城市污泥和餐厨垃圾中含有丰富的有机质,适合进行资源化处理。此外,餐厨垃圾占生活垃圾的

收稿日期: 2012-03-13; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010BAC67B04); 国家水体污染防治与治理科技重大专项(2011ZX07316-004)

作者简介: 段妮娜(1984~),女,博士研究生,主要研究方向为固废处理与资源化,E-mail:nina3330@163.com

* 通讯联系人,E-mail:tj_dongbin@163.com

比重大、含水率高,若将其从生活垃圾中分流出来进行集中式资源化处理,既有利于资源化利用,也有利于生活垃圾的减量和后续处理、处置。

在目前较成熟的固废减量技术中,厌氧消化因其能够将有机物稳定化的同时回收能源而在世界各地得到普遍应用^[3~5],在工程上被广泛用于农业废弃物、餐厨垃圾以及城市污泥等废弃物的处理与处置^[6~8]。厌氧消化根据所处理物料含固率(total solid, TS, 质量比)的不同分为湿法消化(<15%)和干法消化(≥15%)^[9],与传统湿法消化工艺相比,干法消化具有负荷高、占地省、能耗低等优点^[10,11]。然而,城市污水处理厂的脱水污泥可生物降解能力较低,氮含量较高,污泥单独进行干法厌氧消化时,系统易受到高浓度游离氨的抑制^[12]。此外,污泥单独消化还存在挥发性固体(volatile solid, VS)去除率和产气率较低等问题^[13~16]。而餐厨垃圾单独厌氧消化则可能面临系统易酸化、氯化钠浓度过高等引起的系统运行失败等问题^[17]。脱水污泥和餐厨垃圾进行集中式联合干法厌氧消化,有望成为其高效资源化利用和稳定化处理的一条新途径。目前,关于脱水污泥和餐厨垃圾联合干法厌氧消化的研究在国内外均鲜见报道。本研究采用完全混合式反应器研究脱水污泥和餐厨垃圾混合消化的产气性能、有机质降解规律和消化系统稳定性,以期为脱水污泥和餐厨垃圾联合干法消化工艺的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 消化物料和接种污泥

实验中采用的脱水污泥取自上海安亭污水处理

厂,该污泥为初沉池污泥和剩余污泥的混合物,TS为20.12%,VS/TS为58.04%。餐厨垃圾取自上海安亭污水处理厂的员工餐厅,其主要组成为米饭、肉类、蔬菜、食用油等,剔除其中的骨头等硬物后用食物垃圾处理器(M65,艾默生,美国)将其充分粉碎,人工搅拌均匀。餐厨垃圾TS为21.26%,VS/TS为92.25%。脱水污泥和餐厨垃圾均置于2°C下保存待用,每天进料前加热至35°C。接种污泥取自上海某污水处理厂的中温厌氧消化罐,TS为2.31%,VS/TS为56.51%,消化物料和接种污泥的主要参数如表1所示。

表1 脱水污泥、餐厨垃圾及接种污泥的主要参数¹⁾

Table 1 Characteristics of dewatered sludge, kitchen garbage and seed sludge

参数	脱水污泥	餐厨垃圾	接种污泥
pH	7.5 ± 0.2	5.0 ± 0.2	7.7 ± 0.1
TS/%	20.12 ± 0.15	21.26 ± 0.20	2.31 ± 0.22
VS/TS/%	58.04 ± 0.26	92.25 ± 0.31	56.51 ± 0.42
TAN/mg·L ⁻¹	742 ± 37	403 ± 42	321 ± 20
C/N	7.2 ± 0.3	12.8 ± 0.3	—
Na ⁺ /g·L ⁻¹	0.10 ± 0.1	3.6 ± 0.2	—

1) “—”表示未检测

1.2 反应器及运行过程

5个反应器表示为R1、R2、R3、R4和R5,每个反应器的液体有效容积为6.0 L,内置螺带式搅拌器,转速为60 r·min⁻¹,以转动/停止为10 min/10 min的方式交替运行。通过水浴夹套内热水程控加热控制反应器内物料温度为35°C ± 1°C。日产气量以湿式气体流量计测得。反应器构造示意图及实物照片如图1所示。

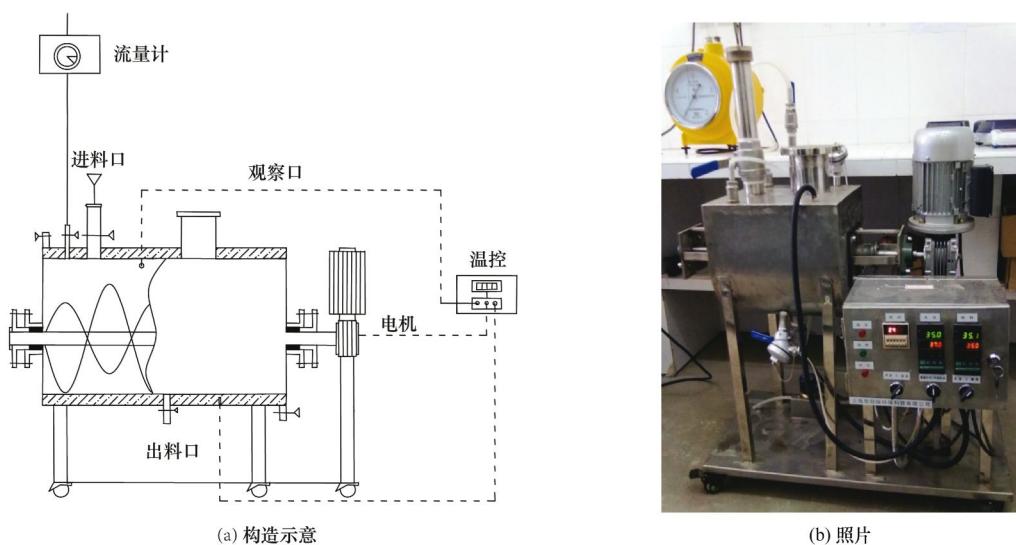


图1 反应器构造示意及照片

Fig. 1 Simplified drawing and photo of the reactor

实验伊始,5个反应器的初始接种量为6.0 L污泥,之后以每天同一时间进行一次出、进料的方式运行,逐步提高有机负荷,使R1~R5在SRT为20 d的条件下运行。其中,R1进料基质为脱水污泥,R5进料基质为餐厨垃圾,R2~R4的进料基质为脱水污泥与餐厨垃圾的混合物,基于VS的混合比(DS/KG,质量比)分别为2.4:1、0.9:1和0.4:1,对应的湿基混合比(DS/KG,质量比)分别为4:1、3:2和2:3,以代表实际应用时可能出现的混合方式(脱水污泥中添加少量餐厨垃圾,脱水污泥与餐厨垃圾以基本相当的比例混合,餐厨垃圾中添加少量脱水污泥),对比混合消化与单独消化的性能。R1~R4共运行70 d,R5共运行40 d。R1~R5进料基质的基本参数如表2所示。

表2 R1~R5进料基质的基本参数

Table 2 Characteristics of the feeding substrate for each reactor

进料基质	R1	R2	R3	R4	R5
DS: KG (基于进料 VS)	1:0	2.4:1	0.9:1	0.4:1	0:1
DS: KG (基于进料湿重)	1:0	4:1	3:2	2:3	0:1
TS/%	20.3	20.3	20.6	20.8	21.3
VS/TS/%	58.0	65.1	72.1	78.9	92.2
C/N	7.2	8.8	10.1	11.2	12.8
OLR ¹⁾ /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	5.8	6.6	7.4	8.2	9.8

1)有机负荷(organic loading rate)

为考察脱水污泥与餐厨垃圾在不同混合比例条件下的水解动力学差异,在反应器运行稳定后,从进料开始的24 h内,每隔1.0 h记录流量,以进行水解反应常数的计算。

1.3 分析测试方法

厌氧消化沼气和消化液样品每周采集2次,测试气体中的甲烷含量、消化液的pH、TS、VS、挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)浓度和总氨氮(total ammonia nitrogen, TAN)浓度。气体中的甲烷含量由气相色谱法(Agilent Technologies 6890N, CA, USA, 热传导式检测器)测得。消化液样品在

10 000 r·min⁻¹下离心10 min后进行过滤,滤液经微孔滤膜(0.45 μm)后,稀释一定倍数并加入甲酸调整pH≤2.0,之后采用气相色谱法(Agilent Technologies 6890N, CA, USA, 火焰离子化检测器)测得VFA浓度。样品经冷冻干燥后,采用有机元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Germany)测定C/N比。Na⁺浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima 2100 DV, PerkinElmer, US)测定。TS、VS和TAN浓度采用标准方法测得^[18]。游离氨(free ammonia, FA)浓度的计算方法与Siles等^[19]所采用的方法相同。

$$\frac{[\text{NH}_3]}{[\text{AN}]} = \left[1 + \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-(0.09018 + \frac{2729.92}{T})}} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中,[NH₃]为游离氨浓度(mg·L⁻¹);[AN]为以离子铵和游离氨2种形态存在的浓度总和(以NH₄⁺计,mg·L⁻¹);T为热力学温度。

VS降解率(VS reduction, VS_r)由下式计算(假设进料中的无机部分即灰分在厌氧消化前后质量是不变的):

$$\text{VS}_r = 1 - \frac{\text{VS}_{\text{消化液}} \cdot (1 - \text{VS}_{\text{进料}})}{\text{VS}_{\text{进料}} \cdot (1 - \text{VS}_{\text{消化液}})} \times 100\% \quad (2)$$

式中,VS_{消化液}指消化液中VS占TS的比例(%);VS_{进料}指进料中VS占TS的比例(%).

2 结果与分析

2.1 污泥和餐厨垃圾混合比例对产气性能的影响

R1~R5在SRT为20 d时的产气性能参数如表3所示。其中,R1~R4均在SRT为20 d的工况下达到了稳定状态(日产气量和出料VS/TS基本恒定),R5未达到稳定运行状态,在SRT为20 d的工况下运行30 d后产气率逐渐下降,VFA逐渐上升,最终导致系统内pH低于6.5而酸化。

由表3可见,随着进料中垃圾比例的提高,产气中的甲烷含量和单位降解有机质的甲烷产率呈下降

表3 脱水污泥与餐厨垃圾混合消化和单独消化的产气性能

Table 3 Performance of mono-and co-digestions on biogas production

编号	$\varphi(\text{CH}_4)$ /%	Y_{methane} $/\text{L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	Y_{biogas} $/\text{L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	SMP ¹⁾ $/\text{L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	SBP ²⁾ $/\text{L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	MP ³⁾ $/\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$	BP ⁴⁾ $/\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$
R 1	66.3 ± 0.8	0.217 ± 0.011	0.329 ± 0.017	0.580 ± 0.029	0.879 ± 0.045	1.26 ± 0.06	1.91 ± 0.09
R 2	62.5 ± 0.4	0.282 ± 0.010	0.455 ± 0.016	0.557 ± 0.020	0.899 ± 0.032	1.86 ± 0.07	3.00 ± 0.11
R 3	58.2 ± 0.5	0.334 ± 0.012	0.576 ± 0.021	0.550 ± 0.020	0.949 ± 0.035	2.47 ± 0.09	4.26 ± 0.15
R 4	56.0 ± 1.1	0.376 ± 0.020	0.671 ± 0.036	0.551 ± 0.028	0.984 ± 0.053	3.08 ± 0.16	5.51 ± 0.30
R 5	—	—	—	—	—	—	—

1)单位降解有机质的甲烷产率(specific methane production rate, SMP);2)单位降解有机质的产气率(specific biogas production rate, SBP);3)单位体积甲烷产率(volumetric methane production rate, MP);4)单位体积产气率(volumetric biogas production rate, BP)

趋势,而单位进料有机质的产气率和甲烷产率,以及单位降解有机质的产气率均呈上升趋势。这主要是由脱水污泥和餐厨垃圾所含有机质成分不同引起的。有机质的组成中,碳水化合物、蛋白质和脂肪类物质占绝大部分,在这3种有机质中,蛋白质分解所产生的沼气中甲烷含量最高,而单位质量蛋白质的产气量在这3种有机质中是最低的。与污泥相比,由于餐厨垃圾中蛋白质占有机质的比例较低,因此随着进料中垃圾比例的增大,所产沼气的甲烷含量呈下降趋势,单位降解有机质的甲烷产率也略呈下降趋势,而单位进料有机质和单位降解有机质的产气率则呈上升趋势。

另外,随着进料中垃圾比例的增大,单位体积的甲烷产率和产气率明显提高。例如,R2与R1相比,脱水污泥中添加了25%体积的餐厨垃圾,在同样的停留时间下,可使反应器单位体积产气率提高57%。相比城市污泥,餐厨垃圾中有机质含量高、易降解,因此污泥中添加餐厨垃圾有助于在利用原有消化罐容积的前提下提高有机负荷和体积产气率。

2.2 污泥和餐厨垃圾混合比例对有机质降解性能的影响

R1~R4在SRT为20 d时的VS降解率如图2所示。可见,随着进料中垃圾比例的增大,系统内有机质的降解程度逐渐增大,这是添加餐厨垃圾能够显著提高体积产气率的主要原因。由于R1~R4在同样的停留时间下运行,有机质降解率的不同反映了不同物料降解速率的差异。厌氧消化的3个步骤为:水解、酸化和甲烷化,水解是公认的限速步骤^[20]。因此,物料降解速率差异的根本原因可能是水解速率的差异。城市污泥中含大量微生物残体,细胞壁结构限制了其快速水解,而餐厨垃圾则主要由易水解的有机质组成,水解速率较快。因此,污泥中添加餐厨垃圾有助于提高有机质的平均水解速率,从而提高降解率。结合传统动力学水解规律方程式和物料平衡,并辅助实验结果可以比较不同混合条件下混合物料的水解速率。

对于(半)连续运行的完全混合式反应器,根据物料平衡有^[21]:

$$\frac{dS}{dt} = -\dot{F} + \frac{S_0 - S}{\theta} \quad (3)$$

式中,S为反应器内或出料中的有机质浓度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); S_0 为入流有机质浓度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); \dot{F} 为基质利用速率 [$\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$]; θ 为平均水力或固体停留

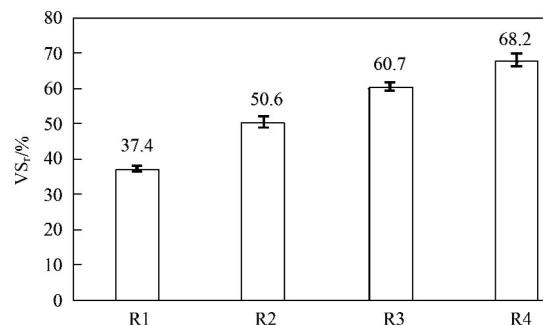


图2 R1~R4在SRT为20 d时的VS降解率

Fig. 2 VS reduction in each reactor at 20-day SRT

时间(d)。

在一定的温度和pH条件下,有机质的降解通常被认为符合一级反应动力学^[22,23],则有:

$$\dot{F} = k \cdot S \quad (4)$$

式中,k为一级反应动力学常数(d^{-1})。在厌氧消化过程中,通常认为有机质的水解是限制性步骤,则k也可表示水解反应常数。由式(3)和(4)可得:

$$S = \frac{S_0}{k \cdot \theta + 1} \quad (5)$$

对于组成基本固定的进料基质,其中可水解的有机质可认为是恒定的,假设消化过程中甲烷的产生均来自已经水解的有机质,水解了的有机质均进一步转化为小分子有机酸并最终转化为沼气,则所产生的甲烷气体的体积与有机质浓度有如下关系:

$$V = f \cdot (S_0 - S) \cdot V_r \quad (6)$$

其中,V表示从进料开始累积的甲烷体积(L),f为经验转化系数($0.5 \sim 0.6 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$); V_r 为反应器内液体有效容积(L)。将式(5)代入式(6)得:

$$V = \frac{S_0 \cdot f \cdot V_r \cdot k \cdot \theta}{k \cdot \theta + 1} \quad (7)$$

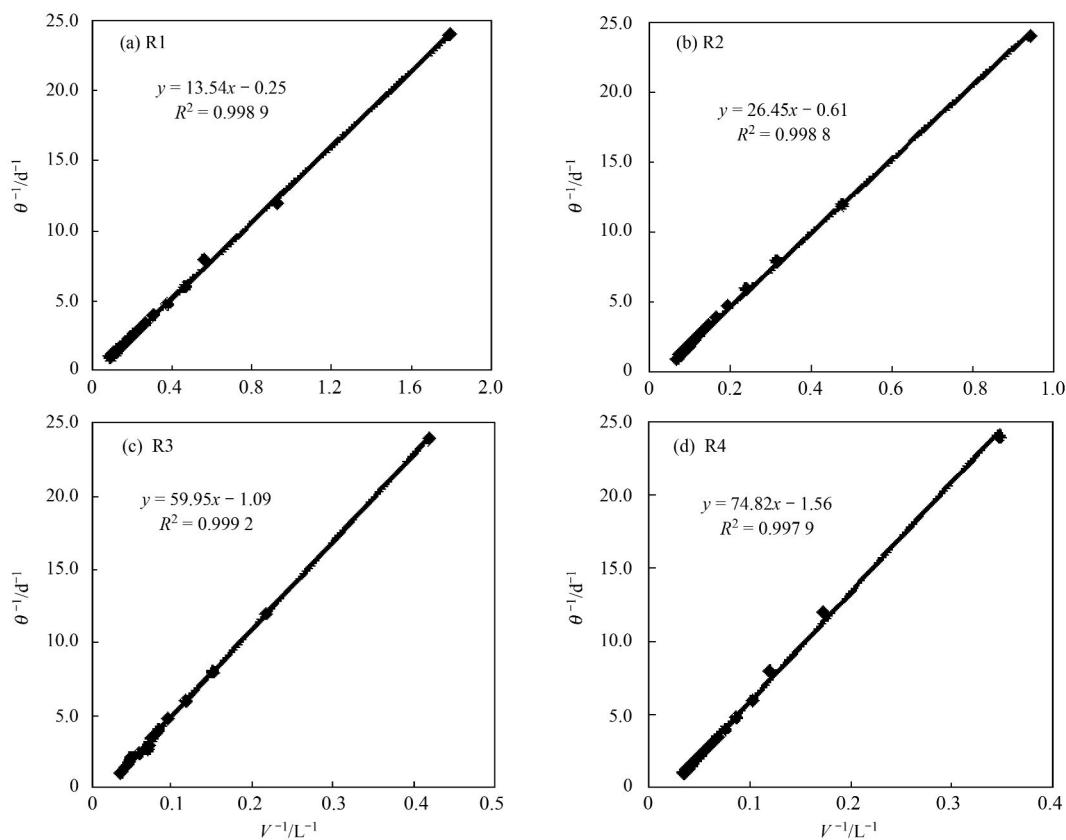
式(7)可变型得:

$$\frac{1}{\theta} = k \cdot S_0 \cdot f \cdot V_r \cdot \frac{1}{V} - k \quad (8)$$

因此,在半连续稳定运行的完全混合式反应器中,若每天进料一次,则从进料时刻开始,随着物料停留时间的延长($0 \sim 24 \text{ h}$),只要记录不同时间 θ 时的累积甲烷产量V,便可由式(8)求得水解速率常数k。图3给出了R1~R4的水解速率常数求解图,从中可看出,R1~R4装置中发酵底物的水解速率常数分别为 0.25 、 0.61 、 1.09 和 1.56 d^{-1} 。随着进料中垃圾所占比例的增大,系统的水解速率常数呈明显增大趋势。

2.3 污泥和餐厨垃圾混合比例对系统稳定性的影响

对于单独的污泥干法消化系统,游离氨浓度是

图3 R1~R4 水解速率常数 k 的求解Fig. 3 Calculation of k of R1-R4

影响系统稳定运行的重要因素^[24~26],对于单独的餐厨垃圾干法消化系统,由于餐厨垃圾中含有较高浓度的 NaCl,而 Na⁺浓度较高时将影响产甲烷菌的活性,从而影响系统的稳定性,故 Na⁺是餐厨垃圾干法消化系统中威胁性较高的潜在抑制因素^[27,28]。因此,TAN、游离氨氮 (free ammonia nitrogen, FAN) 和 Na⁺作为潜在抑制性

物质,其在各反应器中的浓度列于表 4 中。另外,作为常规的衡量系统稳定性的参数,pH、TA、VFA 以及 VFA/TA 也列在表 4 中。其中,R1~R4 均在达到稳定状态下测其各参数的平均值,由于 R5 未达到稳定状态,所对应的各参数值均为 R5 在 SRT 为 20 d 的条件下运行 30 d 后开始呈现明显恶化时的水平。

表4 R1~R5 中系统稳定性及抑制性参数

Table 4 Parameters for system stability and inhibition in each reactor

编号	pH	TA/g·L ⁻¹	VFA/g·L ⁻¹	TAN/g·L ⁻¹	FAN/mg·L ⁻¹	Na ⁺ /g·L ⁻¹	VFA/TA
R 1	8.1 ± 0.1	14.1 ± 0.7	1.60 ± 0.30	4.1 ± 0.1	533 ± 42	0.11 ± 0.02	0.11
R 2	7.8 ± 0.1	13.0 ± 0.5	0.74 ± 0.22	3.8 ± 0.2	266 ± 38	0.92 ± 0.05	0.06
R 3	7.6 ± 0.1	12.3 ± 0.5	0.39 ± 0.13	3.3 ± 0.1	149 ± 26	1.63 ± 0.20	0.03
R 4	7.6 ± 0.1	11.8 ± 0.6	0.31 ± 0.14	3.2 ± 0.1	132 ± 32	2.48 ± 0.17	0.03
R 5	7.1	11.2	16.87	3.1	55	4.14	1.51

由表 4 可见,随着进料中垃圾比例的增大,系统内 TAN 和 FAN 浓度呈下降趋势,而 Na⁺浓度则相反。这是因为,随着餐厨垃圾所占比重加大,物料的 C/N 有所提高,即氮含量有所降低,使系统内 TAN 和 TA 呈降低趋势,进而使 pH 值略呈下降趋势,而 TAN 和 pH 的下降使得 FAN 浓度逐渐降低。R4 与

R1 比较,进料中餐厨垃圾的比例提高了 60%,相应地,系统内 pH、TA、TAN 和 FAN 分别下降了 6%、16%、22% 和 75%。此外,由于 Na⁺基本由餐厨垃圾提供,系统内 Na⁺浓度随着垃圾比例的增大而增大。表 4 中,与单独消化系统 R1 和 R5 相比,混合消化系统 R2~R4 中的 VFA 浓度均较低, < 300

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; R1 中 VFA 略有积累, 超过了 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; R5 中明显出现了 VFA 的积累, 达到了 $10000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 已经表现出系统酸化的前兆。表 4 中各反应器中的 VFA/TA 值也直观地反映了其稳定性水平, 混合消化系统的 VFA/TA 值均低于 0.1, 表明 R2 ~ R4 处于很稳定的状态; 相比之下, R1 由于受游离氨的影响, VFA/TA 值略高于 0.1, 稳定性略有降低, 而 R5 的 VFA/TA 值为 1.51, 表明系统濒临崩溃^[29]。可见, 污泥和餐厨垃圾混合消化可降低潜在抑制性物质的浓度, 显著提高系统稳定性。

3 讨论

3.1 采用干法消化工艺的优势

干法消化的特点是消化物料的含固率较高, 在我国, 脱水污泥和餐厨垃圾的含固率在 15% ~ 24% 范围内波动, 便于运输, 适合进行集中式干法消化, 若按其平均含固率为 20% 计, 与传统湿法厌氧消化工艺中消化物料的含固率约 3% ~ 5% 相比, 干法消化的含固率是湿法消化的 4 ~ 6 倍。这意味着, 在同样的停留时间下, 干法消化工艺可承受的有机负荷是传统消化工艺的 4 ~ 6 倍, 从而使得相同处理量的反应器容积以及加热保温能耗都得以大大降低, 这也是干法消化逐渐成为研究热点的重要原因。如表 2 所示, R1 和 R5 的有机负荷分别为 5.8 和 9.8 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 不论单独的污泥干法消化还是单独的垃圾干法消化, 若能够稳定运行, 其有机负荷均远高于传统的湿法消化系统, 因此具有较高的体积产气率(见表 3)。以污泥消化系统为例, 传统工艺的有机负荷为 $0.64 \sim 1.6 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 产气率为 $0.3 \sim 0.5 \text{ L}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 体积产气率为 $0.3 \sim 1.0 \text{ L}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ ^[28,30], 本研究中, 污泥单独干法消化的产气率为 $0.329 \text{ L}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 与上述报道的数值范围相符, 而有机负荷和对应的体积产气率分别为 $5.8 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $1.91 \text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 远高于传统消化工艺。

3.2 单一物料干法消化易产生的问题和联合消化方式的优势

当采用干法消化工艺时, 与湿法消化相比, 干法消化系统内的潜在抑制性物质浓度也显著升高了, 容易对系统的稳定性产生影响, 单一物料进行干法消化时, 这种作用更显著, 这在本研究中也充分体现出来。

表 4 显示, R1 和 R5 中 VFA 的浓度显著高于其他反应器中 VFA 的浓度。推测 R1 中 VFA 浓度略高

的主要原因为游离氨的抑制, 铵(NH_4^+)和游离态氨(NH_3)是水溶液中无机氨氮最主要的 2 种存在形式。由于游离氨可以自由通过细胞膜, 被认为是抑制产甲烷菌活性的主要物质^[24]。当 TAN 浓度在 $4.2 \sim 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 会对产甲烷菌造成不同程度的抑制, 抑制浓度取决于底物和接种物种类、环境因素(pH 和温度等)以及适应期^[25,26]。R1 中 TAN 浓度为 $4.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, FAN 浓度 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 对系统有轻度抑制作用^[12]。而 R5 中 VFA 积累最终导致系统运行失败的可能原因为 Na^+ 的抑制作用。有研究表明, 中温条件下, Na^+ 浓度达到 $3.5 \sim 5.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对甲烷菌有中等抑制作用^[27,28], 由于实验中 R5 的有机负荷较高, 且餐厨垃圾属于易水解酸化物料, 甲烷化速率一旦受到影响将导致 VFA 的快速积累, 从而严重影响系统的稳定性。

污泥单独消化系统 R1 中的氨氮浓度和游离态氨氮的浓度均较高, 已经对甲烷菌产生了一定影响, 引起 VFA 浓度偏高。垃圾单独消化系统 R5 则存在 Na^+ 抑制问题, Na^+ 浓度过高影响了甲烷菌的活性, 使 VFA 持续积累最终导致系统酸化。这体现了污泥和餐厨垃圾分别单独进行干法消化的缺点, 而混合消化能够很好地解决这一问题。一方面, 与单独消化相比, 混合消化降低了单一物料中抑制性物质的浓度, 能够有效提高系统的稳定性; 另一方面, 污泥的主要组成部分是微生物残体, 餐厨垃圾则含有更多易降解的有机物, 污泥和餐厨垃圾进行混合消化, 为系统内微生物提供了更为均衡的营养条件, 因而更有利提高系统的各方面性能。这种作用在其他物料的混合消化中也有报道^[31~33], 通过不同物料的混合, 有助于改善 C/N 比, 并且降低了因缺乏某种营养物质或微量元素而影响消化性能的风险。

4 结论

(1) 在相同的停留时间下, 随着进料中餐厨垃圾所占比例的增大, 系统的产气率和甲烷产率呈上升趋势, 产气中的甲烷含量呈下降趋势, 污泥中添加餐厨垃圾有助于在利用原有消化罐容积的前提下显著提高有机负荷和体积产气率。

(2) 在相同的停留时间下, 随着进料中餐厨垃圾所占比例的增大, 有机质降解率呈上升趋势, R1 ~ R4 中有机质水解速率常数分别为 0.25、0.61、1.09 和 1.56 d^{-1} , 呈增大趋势, 水解速率差异是导致 VS 降解率不同的主要原因。

(3) 随着餐厨垃圾比例的增大, 系统内 pH 、

TA、TAN 和 FAN 逐渐下降, Na^+ 浓度逐渐上升, 游离氨和 Na^+ 分别是影响污泥和餐厨垃圾单独干法消化稳定性的重要因素, 污泥和餐厨垃圾混合消化可降低潜在抑制性物质的浓度, 显著提高系统稳定性。

参考文献:

- [1] 马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 92-95.
- [2] 中国城市环境卫生协会. 全国城镇环境卫生“十一五”规划[R]. 2006. 1-2.
- [3] 陈广银, 郑正, 常志州, 等. NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2158-2163.
- [4] Lu S G, Imai T, Ukita M, et al. Start-up performances of dry anaerobic mesophilic and thermophilic digestions of organic solid wastes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(4): 416-420.
- [5] Dai X. Abwasserreinigung mit gemeinsamer Biomüllbehandlung—ein integriertes Ressourcen und Energie konzept [A]. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum[C]. Germany, Bochum, 2002. 153-163.
- [6] 邱才娣, 何若, 陈松妹. 一种新型的农村生活垃圾资源化工艺技术研究[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 930-936.
- [7] Pang Y Z, Liu Y P, Li X J, et al. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4): 2761-2766.
- [8] Cho J K, Park S C. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes[J]. Bioresource Technology, 1995, 52(3): 245-253.
- [9] Rapport J, Zhang R, Jenkins B M, et al. Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste [R]. USA: California Environmental Protection Agency, 2008. 7-8.
- [10] Schäfer W, Lehto M, Teye F. Dry anaerobic digestion of organic residues on Farm—a feasibility study [R]. Finland: MTT Agrifood Research Finland, Agricultural Engineering, 2006. 71-77.
- [11] 叶小梅, 常志州. 有机固体废物干法厌氧发酵技术研究综述[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 76-79, 96.
- [12] Duan N, Dong B, Wu B, et al. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study[J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 150-156.
- [13] Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70 (2): 101-107.
- [14] Climent M, Ferrer I, Mar M B, et al. Effects of thermal and mechanical pre-treatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 133(1-3): 335-342.
- [15] Ghosh S. Pilot-scale demonstration of two-phase anaerobic digestion of activated sludge[J]. Water Science and Technology, 1991, 23(7-9): 1179-1188.
- [16] 付胜涛, 于水利, 严晓菊, 等. 剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化[J]. 环境科学, 2006, 27 (7): 1459-1463.
- [17] Liu Y, Boone D R. Effects of salinity on methanogenic decomposition[J]. Bioresource Technology, 1991, 35(3): 271-273.
- [18] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. (19th ed.). Washington DC, USA: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1995.
- [19] Siles J A, Brekelmans J, Martín M A, et al. Impact of ammonia and sulphate concentration on thermophilic anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(23), 9040-9048.
- [20] 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.
- [21] Chen Y R, Hashimoto A G. Kinetics of methane fermentation [J]. Biotechnology and Bioengineering Symposium, 1978, 8 (1): 269-283.
- [22] Eastman J A, Ferguson J F. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion[J]. Journal of Water Pollution Control, 1981, 53 (3): 352-366.
- [23] Pavlovstatis S G, Giraldo E G. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1991, 21(5-6): 411-490.
- [24] Kayhanian M. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions [J]. Environmental Technology, 1999, 20(4): 355-365.
- [25] Kroeker E J, Schulte D D, Sparling A B, et al. Anaerobic treatment process stability [J]. Journal of the Water Pollution Control Federation, 1979, 51(4): 718-727.
- [26] Jarrell K F, Saulnier M, Ley A. Inhibition of methanogenesis in pure cultures by ammonia, fatty acids, and heavy metals, and protection against heavy metal toxicity by sewage sludge [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1987, 33(6): 551-555.
- [27] McCarty P L, McKinney R E. Salt toxicity in anaerobic digestion [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1961, 33 (4): 399-415.
- [28] Metcalf C. Wastewater engineering: treatment and reuse [M]. New York: McGraw-Hill, 2003. 20-75.
- [29] Switzenbaum M S, Gomez E G, Hickey R F. Monitoring of the anaerobic methane fermentation process [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1990, 12(10): 722-730.
- [30] Qasim S R. Wastewater treatment plants: planning, design and operation[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999. 79-120.
- [31] 陈广银, 郑正, 邹星星, 等. 蝇粪与玉米秸混合厌氧消化实验[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 520-525.
- [32] 陈广银, 常志州, 叶小梅, 等. 鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 203-207.
- [33] Nges I A, Escobar F, Fu X, et al. Benefits of supplementing an industrial waste anaerobic digester with energy crops for increased biogas production[J]. Waste Management, 2012, 32(1), 53-59.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, et al. (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, et al. (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, et al. (15)
Effects of Gaseous Compositions on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, et al. (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, et al. (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, et al. (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al. (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJIA-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, et al. (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyue Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, et al. (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, et al. (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, et al. (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, et al. (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, et al. (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, et al. (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, et al. (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qj, ZHANG Yong, CAI De-suo, et al. (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, et al. (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, et al. (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, et al. (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, et al. (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, et al. (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, et al. (177)
Dechlorination of HCB by Bimetallic Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, et al. (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, et al. (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, et al. (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, et al. (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, et al. (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yei, et al. (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, et al. (237)
Pollution Levels of Perfluoroochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, et al. (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, et al. (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, et al. (257)
Isolation of Quinalofop-p-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, et al. (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, et al. (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, et al. (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xin, YIN Guang-cai, et al. (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, et al. (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, et al. (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, et al. (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, et al. (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, et al. (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, et al. (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, et al. (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-ye, LÜ Yong-long, et al. (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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 球 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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	北京北林印刷厂	Printed	by Beijing Bei Lin Printing House
装	订	科学出版社	Distributed	by Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
发	行	电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com	Domestic	All Local Post Offices in China
订	购	全国各地邮电局	Foreign	China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China
国	外	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)		

国家标准刊号: 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