

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评估中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究

陈闯^{1,2}, 邓良伟^{2*}, 信欣¹, 郑丹², 刘刈², 孔垂雪²

(1. 成都信息工程学院资源环境学院, 成都 610225; 2. 农业部沼气科学研究所, 成都 610041)

摘要:为解决猪粪连续干发酵存在的氨抑制和出料难等难题,在温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、有机负荷为干物质(TS) $4.44 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下,采用上推流式厌氧反应器(UPAR)对猪粪进行连续干式发酵试验,研究了猪粪干发酵过程的产气情况、氨抑制现象和出料流动性,并考察了上推流厌氧反应器进行猪粪干发酵的可行性. 试验采用4种不同TS质量分数(20%、25%、30%、35%)的猪粪作为原料,经160 d的运行. 结果表明,进料TS质量分数对发酵过程有很大的影响,4种不同进料TS质量分数稳定的池容产气率分别为 2.40 、 1.73 、 0.89 、 $0.62 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,进料TS质量分数为20%、25%和30%的产气效率明显优于进料TS=35%的产气效率. 随着进料TS质量分数从20%增加到35%,氨氮质量浓度 $>2300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 会出现明显的产气抑制. 在进料TS=35%时,氨氮质量浓度能达到 $3800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,产气速率相对于进料TS=20%递减74.1%. 当进料TS达到35%、出料TS质量分数达到17.1%、流速 $<0.002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,UPAR不能顺利出料.

关键词:猪粪; 上推流式厌氧反应器(UPAR); 连续干发酵; 氨抑制; 流动性

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-1033-08

Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor

CHEN Chuang^{1,2}, DENG Liang-wei², XIN Xin¹, ZHENG Dan², LIU Yi², KONG Chui-xue²

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

Abstract: To solve the problems of ammonia inhibition and discharging difficulty in continuous dry fermentation of pig manure, under the experimental conditions of temperature of $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ and organic loading rate (TS) of $4.44 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, a lab-scale up plug-flow type anaerobic reactor (UPAR) was setup to investigate biogas production, ammonia inhibition, effluent liquidity, and the feasibility of continuous dry fermentation of pig manure using up plug-flow type anaerobic reactor. The experiment was operated for 160 days using the pig manure with four different TS mass fractions (20%, 25%, 30%, 35%) as feeding. Results showed that the feeding TS mass fraction exerted a significant influence on the dry fermentation of pig manure; the stable volumetric biogas production rates of four different feeding TS mass fractions were 2.40 , 1.73 , 0.89 , and $0.62 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively; the biogas producing efficiencies of the reactors with feeding TS mass fractions of 20%, 25% and 30% were obviously superior to that with feeding TS of 35%. With feeding TS mass fraction increased from 20% to 35%, obvious inhibition to biogas producing occurred when concentration of ammonia nitrogen reached more than $2300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. When the feeding TS mass fraction was 35%, the concentration of ammonia nitrogen could accumulate to $3800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ but biogas production rate decreased 74.1% of that with feeding TS of 20%. Additionally, while the feeding TS mass fraction was 35%, the effluent TS mass fraction achieved 17.1%, and the velocity of effluent was less than $0.002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the effluent of UPAR could not be smoothly discharged.

Key words: pig manure; up plug-flow type anaerobic reactor (UPAR); continuous dry fermentation; ammonia inhibition; effluent liquidity

近年来,生猪集约化、规模化养殖快速发展,由此引起了局部地区粪便大量集中,规模化猪场粪污的处理利用已经成为亟待解决的问题. 目前,采用厌氧消化技术处理猪粪并生产沼气,是一种广泛接受的优先考虑方法^[1,2]. 根据进料总固体(TS)质量分数的不同,沼气发酵技术(厌氧消化)可分为湿发酵(TS $<10\%$)、半干发酵(TS为 $10\% \sim 20\%$)和干发酵技术(TS $>20\%$)^[3,4]. 干发酵技术因为节约用水、管理方便、产气率较高,发酵后的沼液养分浓度高,容易资源化利用,已经成为沼气发酵技术领域的研

究热点. 但是,猪粪干发酵存在着两大难题. 一是氨抑制,猪粪是一种含氮量较高的固态废弃物,在发酵过程中容易引起高浓度氨氮的积累. 一般认为,在沼气发酵过程中,氨氮质量浓度 $>1700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 就会形成抑制;达到 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,便会对厌氧微生物产生有毒抑制^[5,6]. 以往有关氨抑制的研究大多数

收稿日期: 2011-05-05; 修订日期: 2011-07-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAD4B15)

作者简介: 陈闯(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为废弃物资源化利用, E-mail: chen198039@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dlwbrtc@yahoo.com.cn

集中在粪污湿发酵过程,对猪粪干发酵过程中的氨抑制问题却很少有报道.二是出料难,由于粪便物料呈固态,流动性差,在进行粪便干发酵试验中,研究者都是采用批式发酵工艺^[4,7]和两相发酵工艺^[8].批式发酵工艺操作复杂,很难进行大规模的工业化生产.两相沼气发酵工艺可以调控产甲烷过程中有机酸的含量,从而提高产甲烷率和挥发性脂肪酸(VFA)的去除率,但是产酸和产甲烷相很难严格分开,且造价高,至今没有得到大规模应用.因此,对于猪粪干发酵,有必要开发连续式发酵工艺.

综上所述,考虑到猪粪原料的特点和开发实用工艺的需要,结合现今沼气发酵技术的研究基础,本试验以进料 TS 质量分数为 20%~35% 的鲜猪粪为原料,在常温(25±2)℃下,采用上推流连续干式厌氧反应器(UPAR)对猪粪进行沼气发酵试验,考察猪粪连续干式发酵的可行性,以期在实际工程应用提供可靠的工艺参数.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用自行设计的下进料上出料厌氧反应器,如图 1(本研究定义为 up plug-flow type anaerobic reactor,UPAR),该 UPAR 为高 330 mm,内径 140 mm 的有机玻璃双层圆柱体.总容积为 5.0 L,有效容积为 4.5 L,在侧壁距底部 35 mm 设置一进料口,出料口与反应器顶部相距 50 mm,进料口与出料口内径均为 20 mm,原料经底

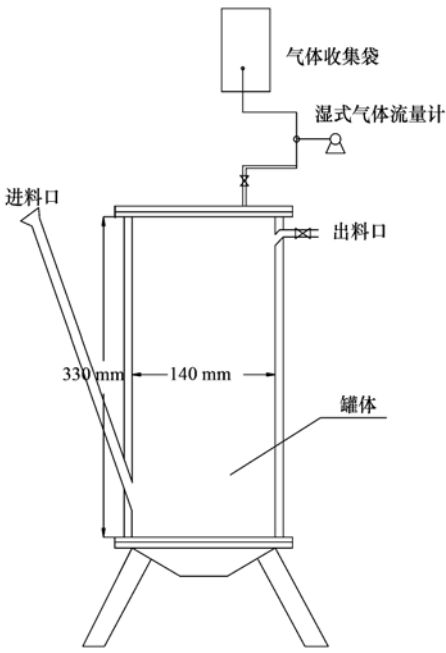


图 1 UPAR 反应器示意

Fig. 1 Schematic description of up plug-flow type anaerobic reactor (UPAR)

部进入 UPAR,经由顶部侧面出料.整个反应器采用夹套水浴保温,用温控继电器和加热棒控制水浴恒温(25±2)℃.

1.2 试验材料

试验材料为取自四川某猪场的新鲜猪粪,UPAR 所用的接种污泥为本试验室处理猪场粪污的厌氧污泥.猪粪与接种污泥的物理化学性质见表 1.

表 1 试验原料的主要物理化学性质

Table 1 Main physicochemical properties of swine manure and seed sludge

原料	pH	TS /%	VS/TS /%	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TKN/TS /%	有机质/TS /%	TC/TS /%	TP/TS /%	Ca/TS /%	Fe/TS /%	C/N
猪粪	7.32	23.6	81.3	400	2.28	56.8	32.9	2.12	1.96	0.21	14.5
接种污泥	7.55	10.5	57.1	1 195	—	—	—	—	—	—	—

1.3 试验方法

根据试验需要,通过加水、风干、烘干等措施将猪粪干物质(TS)所占的质量分数调整到 20%、25%、30%、35%,作为进料备用.试验采用污泥全接种的方式,即在试验启动时,先在 UPAR 反应器内装 4.5 L TS 为 10.5% 的接种污泥,并将反应器置于(25±2)℃水浴条件下培养 5 d,使污泥得到活化.

在试验开始阶段,在温度(25±2)℃、有机负荷(以 TS 计,下同)为 4.44 g·(L·d)⁻¹的条件下,开始向反应器进 TS 为 20% 的鲜猪粪,在各项指标达到稳定后,保持温度与有机负荷不变,不断增加进料

TS 质量分数,并测其相应的指标.试验共采用了 4 种 TS 质量分数分别为 20%、25%、30%、35% 猪粪作为进料,进入鲜猪粪的质量分别为 100、80、66.7、57.2 g,每天出料质量与进料相同.试验时间根据实际的加料情况和产气稳定性而定,进料 TS 20%,试验 45 d; TS 25%,试验 40 d; TS 30%,试验 36 d; TS 35%,试验 39 d.整个试验共进行 160 d.在试验运行阶段,每天进料、出料各 1 次.每天记录产气量 1 次,每天测量出料 pH 值 1 次,每 2 d 测定出料 TS 和出料 NH₄⁺-N 1 次,待集气袋(容积 13 L)集满沼气后,测其气体成分.

1.4 分析方法

产气量采用湿式气体流量计计量(额定流量 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 型号 LML-1, 长春汽车滤清器有限公司). 采用沼气成分分析仪(ADOS. BIOGAS. GA)测定沼气成分; pH 值用 pH-3C⁺ 酸度计测定. TS、VS 测定参照文献[9], 将待测样品放入已称重的坩埚内, 再移入 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温干燥箱(CS101.2 型)内干燥至恒重, 经计算可得样品 TS, 将已称取 TS 的试样连同坩埚在 $(550 \pm 20)^\circ\text{C}$ 烧至恒重, 经换算可得样品的 VS. NH_4^+-N 测定采用纳氏试剂紫外分光光度法测定^[10](分光光度计为 THERMO heliso alpha 100-240, SHIMADZU UV-2450). 出料流速的测定: 收集不同进料 TS 条件下出料, 混合后备用, 采用本试验的 UPAR 反应器, 保持温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、出料液面和出料体积(500 mL)不变的条件下, 测定出料时间, 计算相应的流量和流速.

2 结果与讨论

2.1 产气速率与产气成分

干式发酵与湿发酵相比, 由于浓度高, 介质不均匀、在启动或运行过程中, 容易引起中间产物的积累, 造成酸中毒现象^[11]. 文献[12]认为接种率越高, 干式发酵的启动性能越好. Martin 等^[13]也认为高密度的接种物可以加速沼气发酵过程. 因此试验采用全接种, 半连续进料的方式, 接种污泥 TS 质量分数为 10.5%, 以防止反应器因酸化而启动失败. 在整个试验过程中, 进料 TS 负荷均为 $4.44 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$.

从图 2、3 可以看出: 在进料 TS 质量分数为

20% 时, 随着试验的进行, 产气速率也随之升高, 未出现因酸化而产气量降低的现象, pH 值一直维持在 7.3 ~ 7.5 之间, 产气速率在 15 d 之后产便达到 $8.0 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 40 d 后稳定在 $10.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右, CH_4 所占的体积分数维持在 55% ~ 65%, 此时池容产气率和原料 TS 和 VS 产气率分别为 $2.40 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.54 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.66 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 2). 池容产气率与汪国刚等^[14]在中温 38°C 采用改进型的升流式固体反应器处理 TS 为 12.1% 的猪粪得到最大池容产气率 $2.55 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 接近. 当进料 TS 质量分数增加到 25% 和 30% 时, pH 值没有出现大的变化(7.3 左右), CH_4 含量也保持稳定(63%), 但是产气速率却一直呈现下降的趋势. 可能的原因一是随着进料 TS 质量分数的增加以及试验的进行, 发酵液氨氮不断积累, 上升到 $2300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 发生了氨抑制^[15](数据与分析见 2.3 节). 二是由于反应体系内 TS 质量分数增加, 发酵过程传质不均一, 厌氧微生物菌群与消化底物未达到充分接触, 影响了厌氧消化效率. 在进料 TS 质量分数为 25%、30% 条件下, 达到稳定状态后, 平均产气速率分别为 7.8 、 $4.0 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. 采用 TS 35% 的猪粪进料, 10 d 后平衡状态被破坏, 此时 pH 值从 7.3 上升到 8.0 左右, CH_4 所占的体积分数也从 65% 上升到 75% 左右, CO_2 所占的体积分数呈现下降的趋势(22%), 平均产气速率为 $2.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. 这可能是反应体系内 TS 质量分数增大导致了原料与微生物的传质减弱, 以及氨氮积累导致氨抑制. 通过计算, 4 种进料 TS 质量分数为 20%、25%、30% 和 35% 条件下的稳定的池容产气率分别为 2.40 、 1.73 、 0.89 和 $0.62 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 进料 TS 质量分数

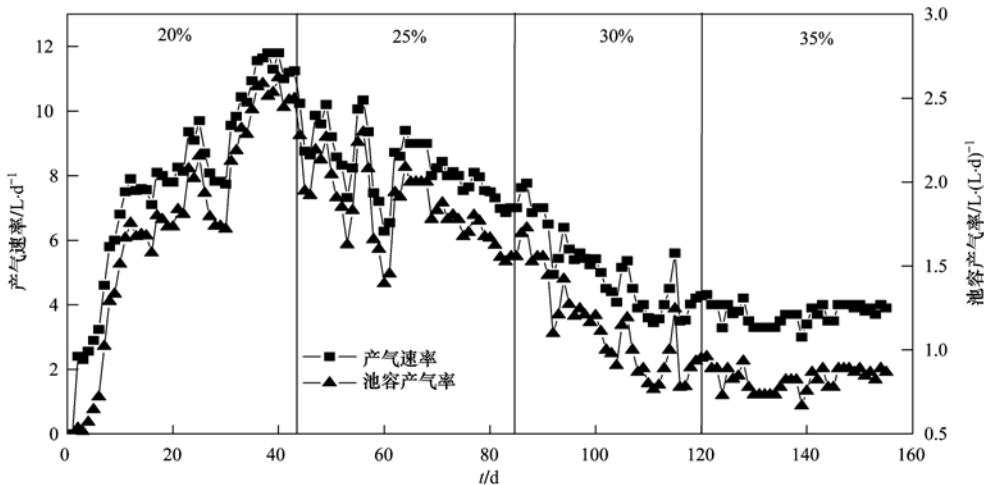


图 2 不同进料 TS 的产气速率与池容产气率

Fig. 2 Biogas production rate and volumetric biogas production rate under different feeding TS

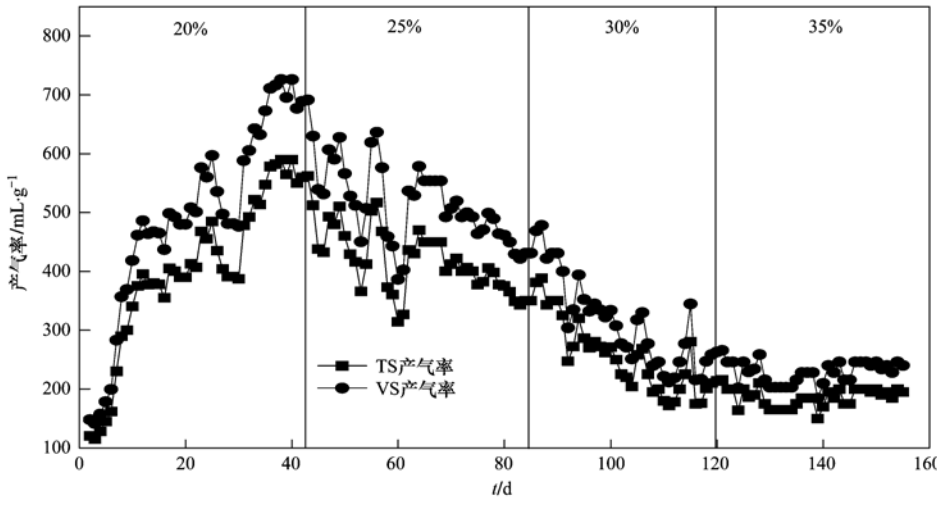


图3 不同进料 TS 的原料产气率
Fig. 3 Material biogas production rate under different feeding TS

表 2 各进料段稳定后产气情况及比较¹⁾

Table 2 Comparison of biogas production under different feeding TS

进料 TS /%	产气速率 /L·d ⁻¹	CH ₄ 含量 /%	池容产气率 /L·(L·d) ⁻¹	TS 产气率 /L·g ⁻¹	VS 产气率 /L·g ⁻¹
20	10.8	62.5	2.40	0.54	0.66
25	7.8	64.0	1.73	0.39	0.48
30	4.0	61.0	0.89	0.20	0.25
35	2.8	74.3	0.62	0.14	0.17

1) 表中数据均为不同 TS 进料阶段稳定后试验数据的平均值

为 20%、25% 和 30% 的产气情况明显优于进料 TS = 35%。表 2 为各进料阶段稳定后的产气情况及比较。

厌氧消化产生的气体主要成分为 CH₄ 和 CO₂，其 CH₄ 的含量 (>60%) 是产气良好的标志^[16]。如图 4，在有机负荷 (以 TS 计) 为 4.44 g·(L·d)⁻¹ 的条件下，进料 TS < 30% 时，CH₄ 含量在运行的第 18 d 便达到 60%，并稳定在 65% 左右 (CO₂ > 30.0%)，同时 pH 值也稳定在 7.2 ~ 7.5 之间，没有出现酸化的现象，这主要是试验采用全接种的结果。当进料为 35% 时，pH 值上升到 8.0，CH₄ 含量也升高到 75% (CO₂ < 22.0%)。CO₂ 的产生主要来源于有机物的水解和挥发酸的甲烷化作用，所以很多研究者将气体中 CO₂ 浓度的降低认为是体系中基质水解，酸化过程受到限制的结果^[17,18]。同时有研究者也提出氨氮的积累对乙酸产甲烷菌的抑制作用会强于 H₂/CO₂ 产甲烷菌^[18]，高氨氮积累下产气中 CO₂ 的含量会降低。此外，Kotsyurbenko 等^[19] 认为低温 (< 25℃) 下同型产乙酸菌 (homoacetogens) 的生长，会使大部分 CO₂ 转化为乙酸，也会造成产气中 CO₂ 含

量的降低。厌氧消化产生的气体主要成分为 CH₄ 和 CO₂，CO₂ 含量的降低，势必会导致 CH₄ 的升高。

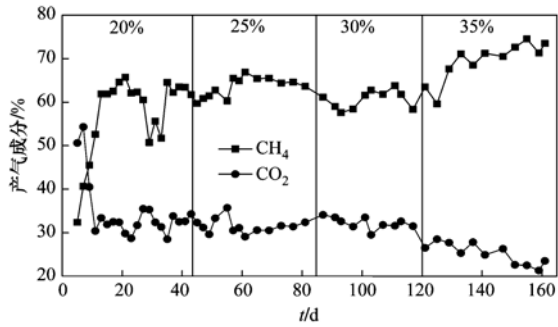


图4 不同进料阶段 CH₄ 和 CO₂ 含量
Fig. 4 Content of CH₄ and CO₂ under different feeding TS

2.2 出料 pH 变化

厌氧消化体系的 pH 值是气-液相间的 CO₂ 平衡、液相内的酸碱平衡以及固-液相间的溶解平衡共同作用的结果，有机酸的增加会使 pH 值下降，含氮有机物分解产物氨的增加会引起 pH 值升高^[20]。如图 5，在进料 TS 20% ~ 30% 阶段，出料 pH 值一直保持在 7.2 ~ 7.5 左右，没有出现明显的 pH 值变化。

这是因为本试验采用全接种,半连续进料的方式,反应体系在刚开始阶段就拥有大量的产甲烷微生物,可以快速消耗挥发酸,使反应体系在较长一段时间(<120 d)内拥有一个稳定的酸碱平衡.当进料为35%时,出料 pH 值因为酸碱平衡被破坏出现了明显的升高,在150 d后上升到8.0左右.可能原因是随着反应器进料 TS 质量分数的增加,UPAR 反应器内发酵液浓度也随着升高(进料35%,出料 $>15.0\%$),进入反应器底部的物料不能和上部含有微生物的反应液充分接触,底物和微生物的交流受到严重的抑制,影响了水解和酸化产物的传质,而反应器上部因为含有大量的微生物成为主要产甲烷区,快速消耗了挥发酸,稳定的酸碱平衡被破坏.

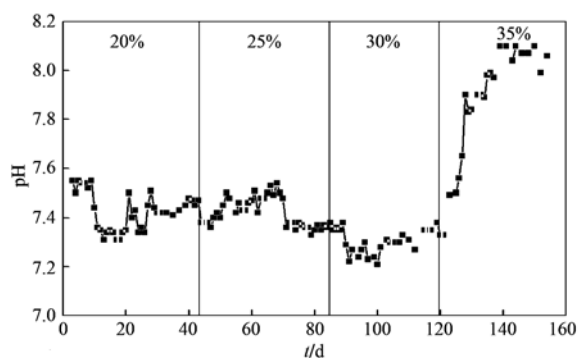


图5 不同进料 TS 条件下出料 pH 的变化

Fig. 5 Dynamic changes of pH with different feeding TS

2.3 出料氨氮和游离氨浓度变化

沼气发酵最适 C/N 为 20~30^[11],本试验中猪粪 C/N 比为 14.5,因此在厌氧消化过程中氮过剩,容易引起氨氮的积累.

如图6,整个试验过程,氨氮质量浓度从最初的

1 195 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到试验结束时的3 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.在相同有机负荷 4.44 $\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下,随着试验进行和进料 TS 质量分数增加,出料氨氮质量浓度不断增加,主要是因为反应体系内含水率不断降低以及氨氮积累的结果.在进料 TS 分别为 20%、25%、30%、35% 条件下,出料氨氮的稳定浓度分别为 2 250、2 850、3 500、3 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.本试验高浓度氨氮的积累($>2\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)是引起产气量降低的主要原因,当氨氮质量浓度上升到2 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,产气速率开始降低,此后产气速率随着氨氮质量浓度的升高呈现一直下降的趋势,随着进料 TS 质量分数从 20% 增加到 35%,氨氮质量浓度从 2 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (进料 TS 20%) 上升到最后的3 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (进料 TS 35%) 时,产气速率从 10.8 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ 下降到 2.8 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$,递减率为 74.1%.然而随着产气速率的降低,气体中 CH_4 的体积分数却始终处于产气良好的水平($>60\%$)^[16].这可能是因为氨氮的积累虽然超过了厌氧消化的半抑制浓度($>1\,700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但是却没有达到对微生物有毒的水平($>4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),导致了整个反应体系处于一种“抑制产气”的状态^[15].

氨抑制主要因为游离氨对厌氧微生物产生抑制作用,因为游离氨能以被动扩散的方式自由透过细胞膜进入细胞^[16].游离氨的积累主要受3个因素的影响:总氨氮、温度和 pH.总氨氮浓度的升高,温度的上升, pH 值的增加,游离氨更容易积累. Weiland^[21] 和 Koster^[22] 发现游离氨质量浓度分别达到 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时就会对沼气发酵过程产生影响.而 McCarty 等^[23] 认为游离氨质量浓度达到 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,抑制才会发生.但是 Ripley 等^[24] 发

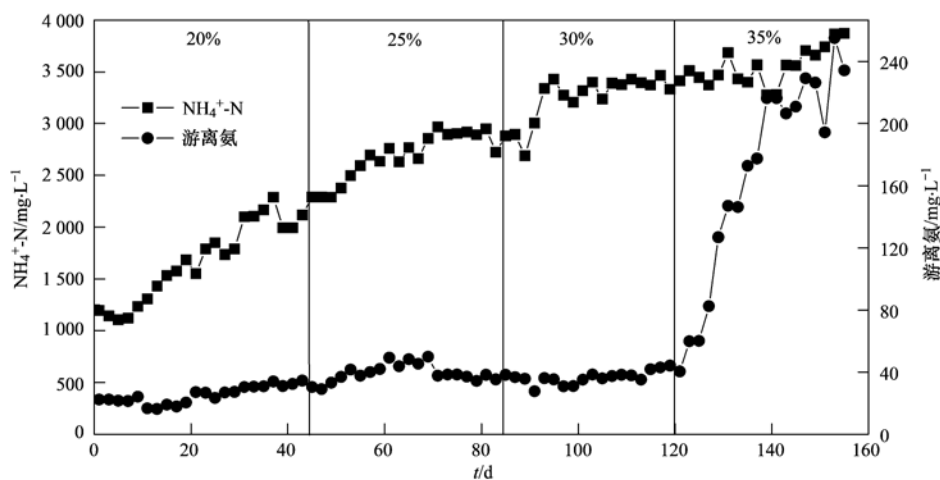


图6 出料氨氮和游离氨浓度变化

Fig. 6 Concentration changes of free ammonia and ammonium nitrogen under different feeding TS

现在游离氨质量浓度积累超过 345 mg·L⁻¹后,反应也能顺利进行. 在经历了长时间的驯化后, Hansen 等^[25]更是将这一浓度扩大到 1100 mg·L⁻¹. 游离氨抑制浓度存在明显的差异可归因于接种物、基质、试验条件和环境的不同.

在整个试验阶段,总氨氮中游离氨(NH₃, FA)浓度通过以下公式计算得到^[25]:

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

式中, [NH₃] 为反应体系中游离氨质量浓度, [TNH₃] 为反应体系中总氨氮质量浓度, pH 为反应体系中测得的 pH, T(K) 为反应体系温度, 本试验 T(K) = (273.15 + 25) °C.

根据式(1)计算得到游离氨质量浓度见图 6. 随着总氨氮质量浓度的上升, 游离氨质量浓度从最初的 22.3 mg·L⁻¹ 达到最后的 234 mg·L⁻¹. 在试验前三阶段(进料 TS 为 20%、25%、30%), pH 值维持在 7.3~7.5 之间, 总氨氮质量浓度从 1 195 mg·L⁻¹ 上升到 3 500 mg·L⁻¹, 游离氨质量浓度也从 22.3 mg·L⁻¹ 上升到 44.2 mg·L⁻¹, 但上升的趋势平缓. 进料 TS 35% 时, pH 值从 7.32 上升到 8.0, 总氨氮质量浓度从 3 500 mg·L⁻¹ 上升到 3 800 mg·L⁻¹, 游离氨的质量浓度也从 44.2 mg·L⁻¹ 快速积累到 234 mg·L⁻¹, 虽然没有达到 1 100 mg·L⁻¹^[25], 却超过了 150 mg·L⁻¹^[24], 由于试验驯化时间不长, 因此发生游离氨抑制, 导致产气量降低.

从图 6 中可以看出, 游离氨质量浓度的变化趋势总体上经历了平缓上升(进料 TS 20%、25%、30%)和快速上升(进料 35%) 2 个阶段. Kaparaju

等^[26]在中温(35 °C)条件下, 采用 CSTR 对猪粪与土豆进行联合发酵[2 g·(L·d)⁻¹], 在 60 d 后 pH 值保持在 7.6 左右, 随着总氨氮质量浓度从 1 500 mg·L⁻¹ 上升到 3 500 mg·L⁻¹, 游离氨氮质量浓度也随着总氨氮质量浓度升高呈现线性变化的趋势上升到最后的 289 mg·L⁻¹. 本试验中, 在进料 TS 为 20%、25%、30% 时, 随着总氨氮质量浓度的上升, 游离氨随着总氨氮的积累没有出现明显的升高(图 6, 表 3), 可能原因是 pH 值从 7.5(进料 TS 20%)下降到 7.2(进料 TS 30%). 通过计算, 在温度和总氨氮质量浓度相同的条件下, pH 值变化 0.1 将导致游离氨质量浓度变化 25%. 表 3 为不同进料 TS 情况下出料氨氮、游离氨氮的比较.

表 3 不同 TS 浓度进料情况下出料氨氮、游离氨氮的比较¹⁾

Table 3 Comparison of free ammonia and ammonium nitrogen concentration of effluent under different feeding TS

进料 TS/%	温度/°C	pH	氨氮浓度 /mg·L ⁻¹	游离氨氮 /mg·L ⁻¹
20	25 ± 2	7.38	2 250	22.30
25	25 ± 2	7.35	2 850	36.78
30	25 ± 2	7.20	3 500	44.20
35	25 ± 2	8.08	3 800	234.20

1) 表中 pH、氨氮浓度均为不同 TS 进料阶段稳定后试验数据的平均值

2.4 出料 TS 变化及流动性

2.4.1 TS 变化

在猪粪干发酵过程中, TS 质量分数不能太高, 是因为干发酵底物流动性差, 传质过程缓慢会成为厌氧干发酵的限速步骤^[11]. 如图 7, 随着进料 TS 质量分数的升高, 出料 TS 质量分数从最初的 10.5% 上升到试验结束时的 17.1%. 试验的最后阶段,

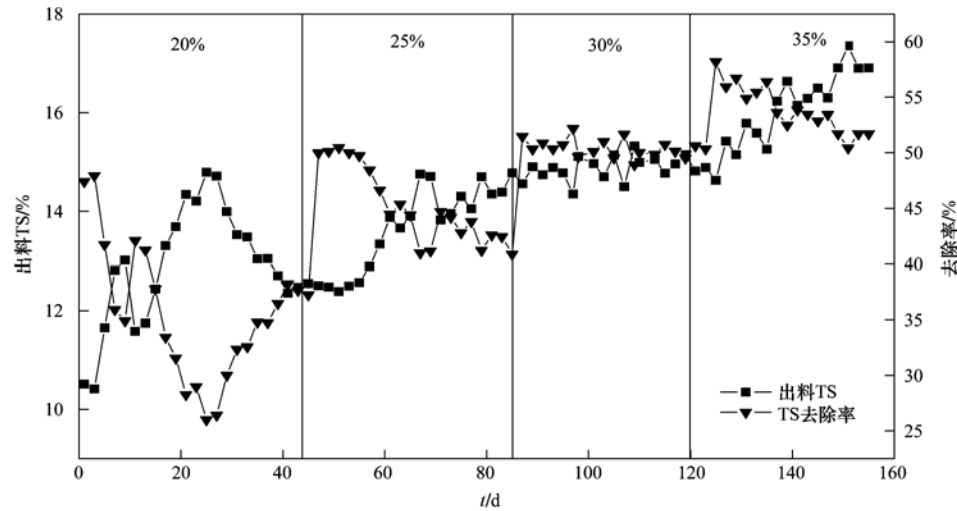


图 7 出料 TS 浓度变化与 TS 去除率

Fig. 7 Concentration changes of discharging TS and removal rates of TS under different feeding TS

UPAR 反应器已经不能顺利进行出料 ($TS > 17.1\%$), 进料 $TS = 35\%$ 的出料 TS 还有升高的趋势, 试验停止 75 d 后, 整个反应体系 TS 达到 18.7% . 在不同进料阶段, 测得的出料 TS 质量分数分别为 12.3% 、 14.0% 、 15.2% 、 17.1% , TS 降解率分别为 37.5% 、 44.0% 、 50.0% 、 51.4% , TS 降解率随着进料 TS 质量分数增加而升高, 但是产气速率却随进料 TS 增加而降低. 主要原因: 一是在进料 TS 为 20% , 原有污泥中的 TS 不能被降解, 所以总体出料 TS 升高. 二是试验的开始阶段存在较大的反混现象, 反混的结果改变反应器内的浓度分布, 使得反应器内物料的表现降解率降低.

2.4.2 出料流动性

猪粪干发酵的另一个关键问题是能否顺利出料, 本研究以出料流量、流速来反映反应器出料难易程度(物料的流动性). 如图 8, 出料流量随出料 TS 的升高线性降低(线性相关系数 $R^2 = 0.96$). 在温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、固定出料体积(500 mL)的条件下, 出料 TS 质量分数为 10.5% 、 12.3% 、 14.0% 、 15.2% 、 17.1% 的流量分别为 159 、 94.5 、 38.8 、 11.1 、 $0.700\text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, 流速分别为 0.507 、 0.300 、 0.123 、 0.035 、 $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 观察发现, 当出料 TS 质量分数为 17.1% , 出料流速为 $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应器不能顺利出料.

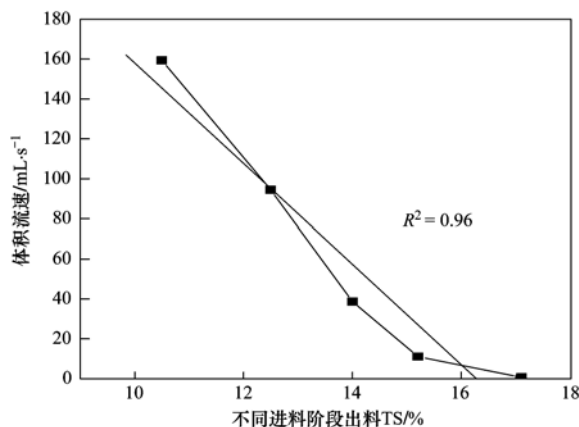


图8 不同进料阶段出料 TS 与流量的关系

Fig. 8 Relationship between discharging TS and flow under different feeding TS

3 结论

采用自行设计的上推流式厌氧反应器(up plug-flow type anaerobic reactor, UPAR)以鲜猪粪为原料进行连续干式发酵试验. 结果表明, 在温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 有机负荷(以 TS 计) $4.44\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件

下, 不同进料 TS 条件下稳定的池容产气率分别为 2.40 、 1.73 、 0.89 、 $0.62\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 进料 TS 质量分数为 20% 、 25% 、 30% 的产气速率要优于 35% , 最适宜的进料 TS 质量分数不宜超过 30% . 当氨氮质量浓度达到 $2300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反应器出现氨抑制现象. 当进料 TS 质量分数从 20% 增加到 35% 时, 氨氮质量浓度从 $2250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 积累到 $3800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 产气速率从 $10.8\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 下降到 $2.8\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$, 递减了 74.1% . 在进料 TS 质量分数为 $20\% \sim 35\%$ 的条件下, TS 降解率在 50% 左右. 当出料 TS 质量分数达到 17.1% , 出料流速 $< 0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应器不能顺利出料.

参考文献:

- [1] De Baere L. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art [J]. Water Science & Technology, 2000, **41**(3): 283-290.
- [2] Lu S G, Imai T I, 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.
- [3] Bolzonella D, Innocenti L, Pavan P, et al. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase [J]. Bioresource Technology, 2003, **86**(2): 123-129.
- [4] Kusch S, Oechsner H, Jungbluth T. Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(5): 1280-1292.
- [5] De Baere L A, Devocht M, van Assche P, et al. Influence of high NaCl and NH_4Cl salt levels on methanogenic associations [J]. Water Research, 1984, **18**(5): 543-548.
- [6] Koster I W, Lettinga G. Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations [J]. Biological Wastes, 1988, **25**(1): 51-59.
- [7] Abouelenien F, Nakashimada Y, Nishio N. Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2009, **107**(3): 293-295.
- [8] Ghosh S, Buoy K, Dressell L, et al. Pilot and full-scale two-phase anaerobic digestion of municipal sludge [J]. Water Environment Research, 1995, **67**(2): 206-214.
- [9] 中国科学院成都生物研究所. 沼气常规分析[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1981.
- [10] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [11] 朱圣权, 张衍林, 张文倩, 等. 厌氧干发酵技术研究进展 [J]. 可再生能源, 2009, **27**(2): 46-50.
- [12] Forster-Carneiro T, Pérez M, Romero L I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(15): 6994-7002.
- [13] Martin D J, Potts L G A, Heslop V A. Reaction mechanisms in solid-state anaerobic digestion II: the significance of seeding [J].

- Process Safety and Environmental Protection, 2003, **81**(3): 180-188.
- [14] 汪国刚, 赵明梅, 郎咸明, 等. 改进型升流式固体反应器处理猪粪污新工艺研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(5): 919-922.
- [15] Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring B K. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates focusing on ammonia inhibition[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1993, **42**(2): 159-166.
- [16] Bujoczek G, Oleszkiewicz J, Sparling R, *et al.* High solid anaerobic digestion of chicken manure [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, **76**(1): 51-60.
- [17] Massé D I, Masse L, Croteau F. The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure[J]. Bioresource Technology, 2003, **89**(1): 57-62.
- [18] Calli B, Mertoglu B, Inanc B, *et al.* Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(3-4): 1285-1292.
- [19] Kotsyurbenko O R, Nozhevnikova A N, Zavarzin G A. Methanogenic degradation of organic matter by anaerobic bacteria at low temperature[J]. Chemosphere, 1993, **27**(9): 1745-1761.
- [20] 斯皮思 R E, 著. 李亚新, 译. 工业废水厌氧生物技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 4.
- [21] Weiland P. One-and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues[J]. Water Science & Technology, 1993, **27**(2): 45-51.
- [22] Koster I W. Characteristics of the pH-influenced adaptation of methanogenic sludge to ammonium toxicity [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1986, **36**(4): 45-55.
- [23] McCarty P L, McKinney R E. Salt toxicity in anaerobic digestion [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1961, **33**(4): 399-415.
- [24] Ripley L E, Kmet N M, Boyle W C, *et al.* The effects of ammonia nitrogen on the anaerobic digestion of poultry manure [A]. In: Proceedings, 39th Purdue industrial waste conference [C]. Boston: Purdue University, Butterworth Publishers, 1985. 73-80.
- [25] Hansen K H, Angelidaki I, Ahring B K. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia [J]. Water Research, 1998, **32**(1): 5-12.
- [26] Kaparaju P, Rintala J. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, **43**(2): 175-188.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人