

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)
地下水污染风险评价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相中含 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生态研究	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)	

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

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 应用间歇试验研究了外源添加四环素(TC)和金霉素(CTC)的猪粪中温(35℃)厌氧消化特征及抗生素的降解过程. 结果表明, 猪粪厌氧水解酸化过程中产生的挥发性脂肪酸以丙酸为主, 乙酸次之; 相比于 CTC 添加组, TC + CTC 混合添加组对易降解有机物的水解酸化有明显的抑制作用; 添加 TC、CTC 和 TC + CTC 组在 45 d 的消化期内累积产甲烷量分别为 386.4、406.0 和 412.1 mL, 与不添加 TC 和 CTC 的对照组(464.6 mL)相比, 分别减少了 16.8%、12.6%、11.3%. 四环素和金霉素的降解过程符合一级反应动力学方程; 四环素降解的半衰期为 14~18 d, 金霉素为 10 d. 经过 45 d 厌氧消化处理后, 四环素的降解率达 88.6%~91.6%, 金霉素达 97.7%~98.2%. 因此, 畜禽粪便厌氧消化处理不仅能回收生物质能源, 还能降解残留的四环素类抗生素, 有效地降低抗生素污染产生的生态风险.

关键词: 四环素; 金霉素; 厌氧消化; 畜禽粪便; 生物降解

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-1028-05

Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines

TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, YUAN Shou-jun

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

Abstract: Anaerobic digestion of pig manure spiked with tetracycline(TC) and chlortetracycline(CTC) and the degradation of the two antibiotics during the anaerobic digestion at 35℃ were investigated. The results indicate that propionate was the main volatile fatty acid produced during the anaerobic digestion followed by acetate. Compared with the CTC addition, TC + CTC addition showed obvious inhibitory effect on the hydrolysis and acidification of easily digestible organic components of pig manure. The cumulative methane production of TC, CTC, TC + CTC and CK₂ during anaerobic digestion was 386.4 mL, 406.0 mL, 412.1 mL and 464.6 mL, respectively. Degradation of TC and CTC followed the first-order kinetic equation. The half-life of TC and CTC was 14-18 days and 10 days, respectively. After the treatment of 45-day anaerobic digestion, the degradation efficiency of TC was 88.6%-91.6% with 97.7%-98.2% of CTC. Therefore, anaerobic digestion shows the benefit on the management of animal manures contaminated by tetracyclines.

Key words: tetracycline (TC); chlortetracycline (CTC); anaerobic digestion; animal manure; biodegradation

自从 20 世纪 50 年代以来, 抗生素被广泛用于动物感染性疾病的防治, 并以亚治疗剂量添加于动物饲料中, 作为抗菌生长促进剂 (antimicrobial growth promoter, AGP) 促进动物生长, 以达到增产的目的. 在全球范围内, 抗生素总产量的 70% 左右被用于畜牧业生产^[1]. 美国动物健康研究所 (Animal Health Institute) 于 2002 年进行的调查显示, 1950 年美国用于畜禽饲养的抗生素用量仅为 91 t, 1999 年则上升到 9 300 t. 在我国, 抗生素污染也同样不容忽视^[2]. 目前, 我国批准作为饲料添加剂用于畜禽养殖业中有 17 种抗生素、抗氧化剂和激素类药物以及 11 种抗菌剂^[3]. 研究表明, 抗生素类药物进入动物体内后, 约 30%~90% 以药物原形或代谢产物的形式随动物粪便排出体外^[4,5]. 在对安徽省合肥市周边养殖场的调查显示, 鸡粪和猪粪中普遍存在四环素、金霉素等四环素类抗生素污染, 浓度最高达 11.3 mg·kg⁻¹^[6]. 畜

禽粪便中残留的抗生素通过农田施用、淋溶、渗滤等方式进入环境中, 进而对生态环境及人类健康构成潜在危害.

厌氧生物处理是畜禽粪便的主要处理方式之一, 通过厌氧消化可以有效的减轻污染物环境负荷, 并回收可利用的生物质能源^[7,8]. 如果抗生素在厌氧消化过程中能有效降解, 将能在回收沼气能源的同时, 减轻残留抗生素的环境危害. Arian 等^[9]在牛粪的中温(35℃)厌氧消化中发现, 64 d 的发酵期后, 59% 的土霉素完全降解; 除沼气的累积产量相对于对照组降低 27% 之外, 土霉素的残留并没有对厌氧消化体系产生其他不利影响. 但目前, 关于厌氧

收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078122); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(第 40 批); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项基金项目(10K06ESPCT)

作者简介: 童子林(1965~), 男, 讲师, 主要研究方向为泵站及水污染控制, E-mail: tongzili025@126.com

* 通讯联系人, E-mail: huzhenhu@ustc.edu.cn

消化过程中畜禽粪便抗生素残留降解的此类研究仍然较少^[10]. 本研究以养殖业中广泛使用的四环素类抗生素为例,通过间歇试验分析其在畜禽粪便中温厌氧消化过程中的降解,以及对厌氧消化过程的影响,以期含四环素类抗生素畜禽粪便的管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料

试验采用新鲜猪粪(不含抗生素)作为厌氧消化的原料. 猪粪取自安徽省畜禽改良站,其基本特征见表 1.

表 1 猪粪的基本特征						
Table 1 Characteristics of pig manure						
指标	含水率	挥发性固体	TN	硝态氮	TP	速效磷
实测值/%	77.7	75.6	0.94	0.09	2.16	1.32

厌氧种子污泥取自合肥市王小郢污水厂,接种之前进行厌氧驯化培养,其挥发性固体含量为 61.7%.

1.1.2 药品及试剂

四环素(TC)、金霉素(CTC)(纯度>99%,南京奥多福尼生物科技有限公司);甲醇、乙腈(色谱纯,美国天地试剂公司);草酸(分析纯,开封试剂厂). 四环素和金霉素配制成 2.0 g·L⁻¹ 的溶液备用.

1.2 试验设计

试验设计如表 2 所示,共设 5 个处理组,分别为添加 TC 组、添加 CTC 组,混合添加 TC 和 CTC 组,仅添加接种污泥的对照组 1(CK₁),和添加猪粪和接种污泥的对照组 2(CK₂). 间歇试验在容积为 250 mL 的盐水瓶中进行,每组试验重复 3 次. 各处理组均加入 20 mL 接种污泥,加入新鲜猪粪和抗生素后调节体积至 150 mL. 除 CK₁ 组外,分别向其余四组瓶内添加干重 1.5 g 的新鲜猪粪作为原料. 各组抗生素的添加种类和水平如表 2 所示. 添加种子污泥和猪粪后,向各瓶内持续通入氮气约 3 min 以驱除氧气,用橡皮塞塞紧,然后置于恒温气浴振荡器中培养,培养温度为 35℃,转速 130 r·min⁻¹,厌氧消化持续时间为 45 d. 试验过程中,分别于第 0、3、6、9、12、15、18、22、26、30、35、40、45 d 取样,测定气体成分及其含量,并分析挥发性脂肪酸和抗生素含量的变化.

表 2 抗生素的添加水平¹⁾

Table 2 Levels of added antibiotics			
试验组别	TC/mg·L ⁻¹	CTC/mg·L ⁻¹	猪粪/g
TC	100	0	1.5
CTC	0	100	1.5
TC + CTC	50	50	1.5
CK ₁	0	0	0
CK ₂	0	0	1.5

1) TC 为四环素,CTC 为金霉素,CK₁、CK₂ 为对照组,下同

1.3 仪器与分析

高效液相色谱仪(LC-20AD,日本岛津公司);气相色谱仪(SP-6890 型,山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司);空气浴振荡器(HZQ-C 型,哈尔滨市东明医疗仪器厂);台式离心机(TGL-16C 型,上海安亭科学仪器厂);旋涡混合器(QL-861 型,海门市其林贝尔仪器制造有限公司);电子天平(AL204 型,梅特勒-托利多仪器有限公司).

抗生素的测定:试验过程中的液体样品,在 10 000 r·min⁻¹下离心 10 min,上清液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后供液相色谱仪测定. 固体中吸附的抗生素含量的测定如文献^[6]所述. 液相色谱仪的工作条件如下:SHIM-PACK·VP-ODS 色谱柱(5 μm,150 ×4.6 mm,日本岛津);紫外检测器,检测波长为 355 nm;流速 1.0 mL·min⁻¹;流动相为草酸溶液(0.01 mol·L⁻¹)、乙腈及甲醇的混合液(76:16:8,体积比,pH=2.5). 测得 2 种抗生素色谱峰保留时间分别为 4.7 min 和 11.3 min,如图 1 所示.

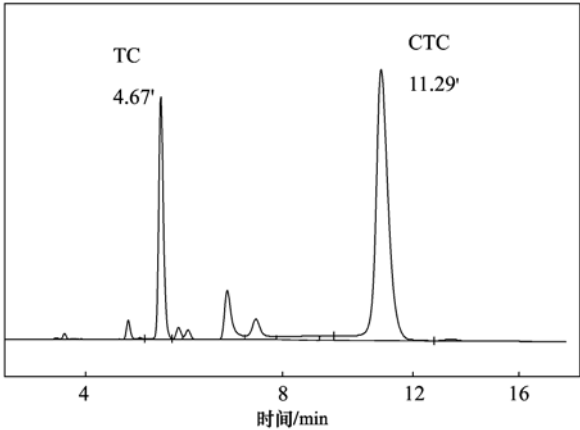


图 1 TC 和 CTC 混合标准液的 HPLC 色谱图
Fig. 1 HPLC spectrum of TC and CTC solution

产气量采用标有刻度的玻璃针筒定期测定,并利用气相色谱仪分析产气中的甲烷含量(TCD 检测器);厌氧消化液在 10 000 r·min⁻¹下离心 10 min 后,取上清液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用于测定

挥发性脂肪酸(FID 检测器). 总氮、总磷和挥发性固体均采用常规方法进行测定^[11].

2 结果与讨论

2.1 挥发性脂肪酸(VFA)的生成

猪粪厌氧消化产生的挥发性脂肪酸以乙酸、丙酸为主,另外还包括少量的异丁酸、丁酸及戊酸. 图 2 为猪粪厌氧消化过程中乙酸、丙酸的浓度变化曲线. 由图 2(a)可知,乙酸的产生分为 0~9 d 和 14~35 d 2 个阶段,第一阶段主要为

易降解有机物的水解酸化,第二阶段则为不易降解有机物的水解. 通过与对照组(CK₂)比较可以看出,CTC 组对第一阶段降解的抑制作用最弱,所以乙酸含量最高,该组丙酸浓度也在试验前期即持续升高. TC + CTC 组的抑制作用最强,与 CTC 组相比,试验前期该处理组乙酸、丙酸的增长速度均较慢. 整个厌氧消化周期内,丙酸的含量相对较高,最高浓度均超过 1.0 g·L⁻¹,而乙酸浓度相对较低,这可能由于产生的乙酸被产甲烷微生物直接利用.

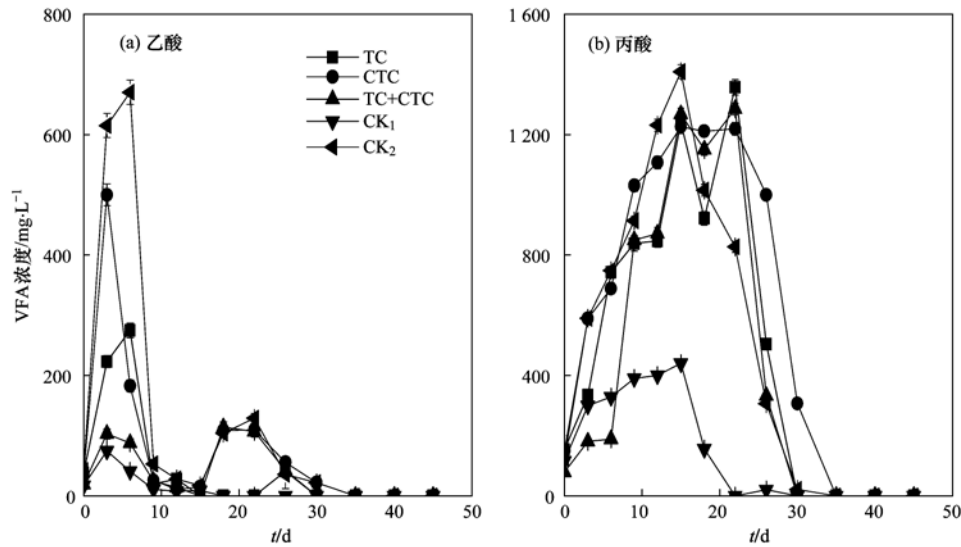


图 2 厌氧消化过程中挥发性脂肪酸的生成
Fig. 2 VFA production during anaerobic digestion

2.2 甲烷(CH₄)的生成

猪粪厌氧消化的累积产甲烷量和日产甲烷量变化曲线如图 3 所示. 添加抗生素的 3 组处理具有相似的产气量变化曲线. 由日产量变化曲线可知, 3 处理组均经历了两个高峰期,和乙酸的变化趋势相一致. 试验初期,碳水化合物、蛋白质等易降解有机物在厌氧微生物的作用下迅速分解成乙酸,并被微生物利用,产气量随之增加,进入第 1 个高峰期^[12]. 该阶段内,对照组 CK₂ 组产气速率最大,CTC 组次之. 随着易降解有机物的降解完成,各组产气量也急剧下降. 此时,纤维素等较难降解的有机物开始水解,产气量进入第 2 个高峰期. 到达第 45 d,所有处理组均已停止产气,TC 组、CTC 组和 TC + CTC 组累积产甲烷量分别为 386.4、406.0 和 412.1 mL,和对照组 CK₂ (464.6 mL) 相比,分别减少 16.8%、12.6% 和 11.3%.

2.3 挥发性固体(VS)的降解

猪粪厌氧消化前后,各处理组挥发性固体含量见表 3. 不添加抗生素的 CK₂ 组降解率最高,达 62.8%,各添加抗生素的处理组降解率相差不大,其值均在 50% 以上. 由此可见,采用厌氧消化处理畜禽粪便,可以有效减小固体废物的体积,并能获得清洁的生物质能源^[13].

表 3 厌氧消化前后 VS 含量的变化

试验组别	VS 含量/g		VS 降解率/%
	试验前	试验后	
TC	1.134 6	0.554 9	51.1
CTC	1.134 6	0.550 7	51.5
TC + CTC	1.134 6	0.499 7	55.9
CK ₁	0.719 0	0.373 4	48.1
CK ₂	1.134 6	0.421 7	62.8

2.4 抗生素的降解

图 4 为试验周期内,四环素和金霉素的降解变化曲线. 由于抗生素添加后立即与其中的粪便和污

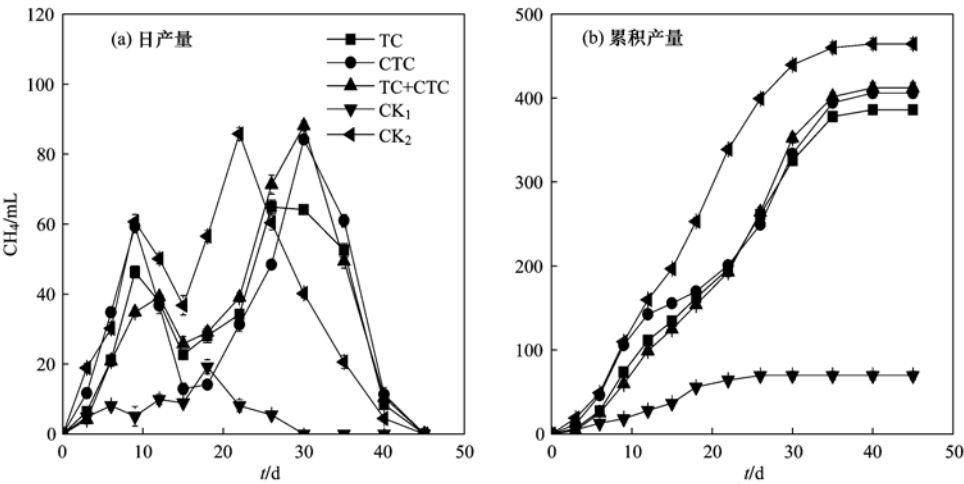


图3 厌氧消化过程中甲烷的生成
Fig. 3 Methane production during anaerobic digestion

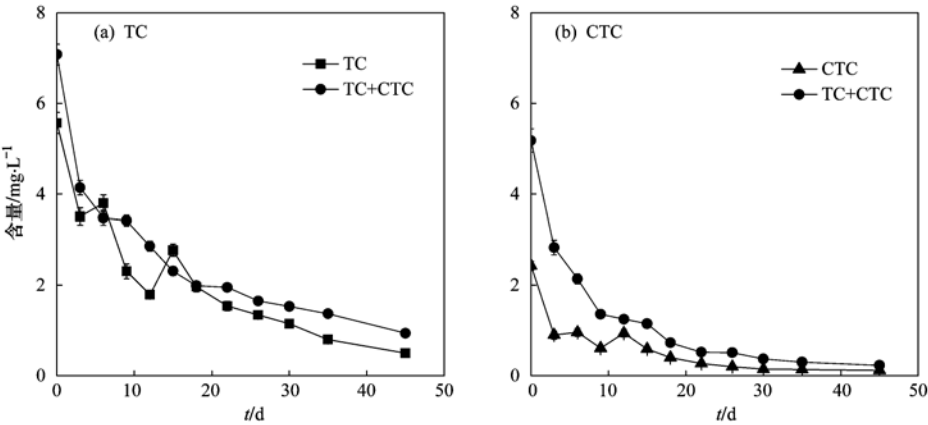


图4 厌氧消化过程中 TC 和 CTC 的降解
Fig. 4 Degradation of TC and CTC during anaerobic digestion

泥产生吸附效应,因此,各处理组中抗生素的初始浓度远小于添加浓度,测定上清液中的抗生素浓度变化得出的降解率只是表观降解率.由图4可知,各处理组的降解曲线在试验初期即呈迅速下降的趋势,而后逐渐变缓.这和文献中报道的部分兽用抗生素在浓度较高的情况下,其在土壤及粪便中的降解曲线呈L型下降趋势相似,该种现象可能与吸附效应有关^[14].厌氧消化结束后,对各处理组固体吸附的残留抗生素进行了分析,结合液体中残留抗生素浓度,得到TC、TC+CTC组中四环素实际降解率分别为91.6%和88.6%,CTC、TC+CTC组中金霉素实际降解率分别达到97.7%和98.2%.

各处理组抗生素的降解规律可用一级反应动力学方程 $c_t = c_0 e^{-kt}$ 进行描述^[15],式中, c 为时间 t 时抗生素浓度, c_0 为初始浓度, k 是抗生素降解速率常

数.经拟合后,除TC+CTC组中金霉素降解曲线的相关性系数 R^2 为0.9外,其余的相关系数均大于0.9,各处理组抗生素的降解速率常数和半衰期如表4所示.相对于四环素,厌氧消化过程中,金霉素的降解速率较大,且在各处理组中其半衰期差异不大,和鸡粪好氧堆肥中金霉素的半衰期相近^[16];TC及TC+CTC组中四环素半衰期则有较大差异,浓度低的一组降解较快,半衰期较短.

表4 TC和CTC的降解速率常数(k)及半衰期($t_{1/2}$)

试验组别	Table 4 Degradation rate constant (k) and half-life ($t_{1/2}$) of TC and CTC			
	TC		CTC	
	k/d^{-1}	$t_{1/2}/d$	k/d^{-1}	$t_{1/2}/d$
TC	0.039	18	—	—
CTC	—	—	0.067 2	10
TC + CTC	0.048 4	14	0.066 5	10

3 结论

(1)猪粪水解酸化过程中产生的挥发性脂肪酸以丙酸为主,乙酸次之;相比于 CTC 添加组,TC + CTC 组对易降解有机物的水解酸化有明显的抑制作用.相对于不添加抗生素的对照组,添加抗生素的 3 个处理组的甲烷产量均有轻微的下降,TC、CTC 和 TC + CTC 组在 45 d 的厌氧消化期内累积产甲烷量分别为 386.4、406.0 和 412.1 mL,不添加抗生素的对照组为 464.6 mL.

(2)在间歇试验条件下,四环素和金霉素的降解均能很好的符合一级反应动力学方程,四环素的降解速率常数为 0.039 ~ 0.048,半衰期为 14 ~ 18 d,金霉素的降解速率常数为 0.066 ~ 0.067,半衰期为 10 d.经过 45 d 厌氧处理后,四环素的降解率达 88.6% ~ 91.6%,金霉素的降解率更高达 97.7% ~ 98.2%.

(3)厌氧消化处理不仅能回收生物质能源,还能降解畜禽粪便中的四环素类抗生素,有效地降低了抗生素污染的生态风险.

参考文献:

- [1] Heiling S, Lee P, Breslow L. Curtailing antibiotic use in agriculture[J]. *Western Journal of Medicine*, 2002, **176**(1): 9-11.
- [2] 张浩, 罗义, 周启星. 四环素类抗生素生态毒性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 407-413.
- [3] 刑廷铤. 畜牧业生产对生态环境的污染及其防治[J]. *云南环境科学*, 2001, **20**(1): 39-43.
- [4] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 725-759.
- [5] Alcock R E, Sweetman A, Jones K C. Assessment of organic contaminant fate in waste water treatment plants I: Selected compounds and physicochemical properties [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(10): 2247-2262.
- [6] 孙刚, 袁守军, 陈凤琴, 等. 固相萃取-高效液相色谱法测定畜禽粪便中的土霉素、金霉素和四环素[J]. *环境化学*, 2010, **29**(4): 739-743.
- [7] Hu Z H, Liu S Y, Yue Z B, *et al.* Microscale analysis of in vitro anaerobic degradation of lignocellulosic wastes by rumen microorganisms [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(1): 276-281.
- [8] 蒋建国, 吴时要, 隋继超, 等. 易腐有机垃圾单级高固体厌氧消化实验研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1104-1108.
- [9] Arikian O A, Sikora L J, Mulbry W, *et al.* The fate and effect of oxytetracycline during the anaerobic digestion of manure from therapeutically treated calves[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(7): 1637-1643.
- [10] Mohring S A I, Strzysch I, Fernandes M R, *et al.* Degradation and elimination of various sulfonamides during anaerobic fermentation: A promising step on the way to sustainable pharmacy? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(7): 2569-2574.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [12] Hu Z H, Yu H Q. Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures [J]. *Waste Management*, 2006, **26**(11): 1222-1228.
- [13] 陈广银, 郑正, 邹星星, 等. 牛粪对互花米草混合厌氧消化过程的影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2130-2135.
- [14] Dolliver H, Gupta S, Noll S. Antibiotic degradation during manure composting [J]. *Journal of Environment Quality*, 2008, **37**(3): 1245-1253.
- [15] Boxall A B A, Kolpin D W, Halling-Sorensen B, *et al.* Are veterinary medicines causing environmental risks? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(15): 286A-294A.
- [16] 孙建平, 郑平, 胡宝兰. 多种抗生素对畜禽废水厌氧消化的联合抑制[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2619-2624.

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