

沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响

张 进¹, 张妙仙¹, 单胜道¹, 骆林平¹, 王敏艳²

(1.浙江林学院环境科技学院, 浙江 临安 311300; 2.浙江大学环境与资源学院, 环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江杭州 310029)

摘 要:沼气发酵残余液(沼液)是一种典型的优质有机物料,目前我国每年产生 2 亿多吨的沼液,农业生产中寻求沼液的资源化利用,对避免环境二次污染和实现畜禽养殖业的生态可持续发展具有重大的现实意义和社会意义。在田间小区试验条件下,以梗稻‘亚优红一号’(*Oryza sativa* L.)为试材,就沼液作为肥源代替化学肥料施用对其营养生长、稻谷产量及稻米中重金属含量的影响作了初步探讨。结果表明,沼液作基肥,追肥施复合肥获得的水稻产量最高,达 55.9 g·plant⁻¹。虽然与当地习惯施肥(基肥和追肥施复合肥)相比稻谷产量没有明显差异,但是基肥用沼液代替化学肥料,显著降低了水稻生产成本。同时,沼液作基肥,追施复合肥明显促进了水稻分蘖和生长,虽然稻米中 Cu、Cd 含量没有显著变化,但强化了稻米 Fe、Zn 营养,显著降低了 Pb 含量,明显提升了稻米营养品质。可是,试验结果也显示,沼液完全代替化学肥料施用对水稻生长及其产量形成是不利的。

关键词:沼液;水稻(*Oryza sativa* L.);产量;铁;锌;铅;重金属

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-2005-05

Growth Status, Grain Yield and Heavy Metals Content of Rice(*Oryza sativa* L.) as Affected by Biogas Slurry Application

ZHANG Jin¹, ZHANG Miao-xian¹, SHAN Sheng-dao¹, LUO Lin-ping¹, WANG Min-yan²

(1.School of Environmental Science and Technology, Zhejiang Forestry University, Lin'an 311300, China; 2.MOE Key Lab of Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Biogas slurry, in agriculture, is a typical high-quality organic material. At present in China, two hundred million tons of biogas slurry is producing per year. So, the secondary use of biogas slurry in agriculture production is to avoid environmental pollution and to achieve the ecological sustainable development for the livestock and poultry industries, is of great practical significance and the social meanings. So the effects of biogas slurry and chemical fertilizer application on plant growth, grain yield and heavy metals content in rice seeds of the *japonica* ‘No.1 Ya You Hong’ were studied with series of field trials. The results showed that a highest rice grain yield(55.9 g·plant⁻¹) was obtained with the application of biogas slurry as basal fertilizer and the compound K₂SO₄ fertilizer(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15) as supplemental fertilizer. The cost of rice production was obviously low for biogas slurry as basal fertilizer though no significant grain yield improvement was observed in compare to the customarily local fertilization in which both the basal and supplemental fertilizers were K₂SO₄ compound fertilizers. Meanwhile, that biogas slurry as basal fertilizer and the compound fertilizer as supplemental fertilizer could increase markedly rice plant tillers and growth, and could enhance Fe and Zn contents and reduce significantly Pb content in rice seeds, although no significant changes in Cu and Cd contents in rice seeds were obtained. Uncertainly, the experiment results also showed that only biogas slurry application on rice production could not meet the nutrition demand for rice plant growth as well as grain yield.

Keywords: biogas slurry; rice(*Oryza sativa* L.); grain yield; Fe; Zn; Pb; heavy metals

近年来,随着农业产业结构调整和新农村建设,

规模化和集约化畜禽养殖业发展迅猛,由畜禽粪尿等养殖废物引起的环境问题随之日益加剧。据统计,早在 2000 年全国畜禽粪尿年排放量已经超过 27 亿 t,相当于工业废弃物年排放量的 3.4 倍。估算到 2010 年,我国畜禽养殖粪尿的排放量将达到 45 亿 t。畜禽养殖废物已成为我国农村面源污染的主要来源。目前由于资金与技术等问题,粪便无害与资源化以及商品

收稿日期:2009-03-12

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA06Z344);浙江林学院科研发展基金项目(2351000857)

作者简介:张 进(1979—),男,山东兖州人,博士,讲师,主要从事废弃资源利用和农业环境生理和生态调控研究。

E-mail: jzhang@zjfc.edu.cn

通讯作者:张妙仙 E-mail: zhangmx18@163.com

化处理率不到 5%, 畜禽粪尿等养殖废物的相对集中排放, 大大超过了环境承受能力, 给环境带来了巨大的压力, 同时也影响了当地居民的健康。

在解决大量畜禽养殖废物、作物秸秆和人类生活垃圾等环境污染物方面, 厌氧发酵处理技术(沼气工程)发挥了重要的作用^[1]。同时沼气发酵残余液(沼液)还是一种典型的优质有机物料, 通常呈中偏弱碱性(产甲烷阶段的腐熟沼液 pH 一般为 7.0~8.5), 除碳素损失较大(主要是 CH_4 和 CO_2)外, 仍保留了 90% 原料营养成分, 保 N 率高达 90% 以上, 且氮素较同质同量的堆沤肥高 40%~60%, 氮素结构得到优化, P 和 K 的回收率也高达 80%~90%^[2-3]。统计测定结果显示, 沼液中含全 N 0.026%~0.081%, 其中 NH_4^+-N 占 60%~75%, 其次为有机氮, 全 P 0.02%~0.07%, 全 K 0.047%~1.40%。另外, 沼液中还含有丰富的微量元素(如 Fe、Zn、Cu、B、Mo 等)、多种植物生长素(如赤霉素、吲哚乙酸等)、B 族维生素和某些抗菌素等^[4-6]。沼液在农业上既可用做基肥、追肥, 也可浸种和叶面喷施; 既可单施, 也可与化肥、农药、生长剂等混合施用^[7]。目前我国每年产生 2 亿多吨的沼液^[2], 农业生产中如何合理的资源化利用沼液, 对避免环境二次污染和实现畜禽养殖业的生态化可持续发展具有重大的现实意义和社会意义。

近年来, 关于沼液在农业上的利用研究开始活跃。但是, 迄今人们对施用沼液后会导致稻田生态系统环境污染, 有害物质残留土壤从而导致水稻减产、稻米品质下降等情况存在诸多猜测, 这显然不利于沼液的农业资源化利用, 更不利于畜禽养殖业、农业的和谐发展。因此, 本试验就沼液作为肥源代替化学肥料施用对水稻生长、稻谷产量及稻米中重金属含量的影响作了初步探讨, 以便为沼液资源化利用, 节约农业生产成本, 实现畜禽养殖业、农业可持续发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料、地点与方案

试验于 2007 年在浙江省临安市玲珑街道上泉村试验田内进行, 供试土壤为水稻土, 基础肥力为有机质 $14.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $60.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $48.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $74.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 (H_2O , 21 °C) 5.5。供试水稻品种为粳稻“亚优红一号”(*Oryza sativa* L.), 2007 年 5 月 20 日育苗, 6 月 20 日插秧移栽, 10 月 10 日收获。

沼液取自临安市板桥乡某猪场, 其养分指标为全

N 0.06%, P_2O_5 0.05%, K_2O 0.7%, Fe $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Mn $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $7.30 \text{ ug} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 (H_2O , 21 °C) 7.5, 符合农田灌溉水质标准(GB 5084—1992)。所用化学肥料为复合肥, K_2SO_4 型(安徽宁国化肥厂生产), N:P₂O₅:K₂O=15:15:15, 养分总含量 $\geq 41\%$ 。沼液与化学肥料配合施用试验设 4 个处理: ①CK(当地习惯施肥), 复合肥作基肥 ($350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 复合肥作追肥 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ②沼液作基肥 ($8.75 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 复合肥作追肥 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ③沼液作基肥 ($8.75 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 沼液作追肥 ($6.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$); ④复合肥作基肥 ($350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$), 沼液作追肥 ($6.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$) (沼液用量按与复合肥等 N 量施入计算)。基肥在水稻插秧前施入, 追肥在水稻插秧后 30 d 施入。每一试验小区面积 25 m^2 , 重复 3 次, 共计 12 个试验小区, 完全随机区组排列。每试验小区所种水稻秧苗数量一致, 种植间距为 $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 每穴 1 株。小区其余田间管理按常规进行。

1.2 样品处理与分析

水稻移栽入试验田小区后, 每隔 7 d 左右记录一次株高, 直至水稻收获。从水稻进入分蘖期开始, 每隔 7 d 左右记录一次分蘖数, 直至分蘖期结束。计量株高和分蘖数时, 先在每一试验小区随机标记 20 株水稻, 以后每次株高和分蘖数的记录都以标记的水稻株为准。株高用精度为毫米的钢尺量取, 同时记录分蘖数。

水稻成熟后, 在每一试验小区随机采集 20 株水稻植株样品, 带回实验室后先用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl (分析纯) 溶液浸洗 10 min 左右, 后用蒸馏水充分冲洗干净, 70 °C 烘干^[8]。风干后的植株样品分成稻穗、叶片、茎秆, 并分别称重。

稻谷用糙米机(JLGJ-45, 国产)去壳得到糙米, 然后经精米机(JB-20, 国产)得到精米, 精米中重金属 Fe、Zn、Cu、Mn、Cd、Pb、Al 含量用 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS, 美国) 测定^[9]。

1.3 数据分析

采用 STATISTICA 5.5 (StatSoft Inc., USA) 统计软件分析试验数据, 显著性检验 ($P < 0.05$) 用 Duncan's 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 沼液施用对水稻生长的影响

2.1.1 对分蘖期水稻分蘖数的影响

由图 1 可见, 沼液与化学肥料不同组合施用, 对

粳稻“亚优红一号”分蘖期分蘖数目的影响明显不同。施用处理3,在水稻整个分蘖期的分蘖数量最少,至分蘖末期(7月27日)时,处理3施肥的小区水稻平均分蘖数仅约为13.1个·株⁻¹,比对照处理的小区水稻分蘖数少6.4%,明显低于当地常规施肥处理(CK)。而处理2施肥则可以显著促进水稻分蘖,整个分蘖期其施肥小区水稻分蘖数明显高于其他施肥处理,至分蘖期末,与对照相比,水稻分蘖数显著提高了33.6%。

水稻采收后(10月10日),各处理水稻分蘖数均有一定程度减少,这可能与水稻分蘖并非全都是有效的分蘖有关(图1)。

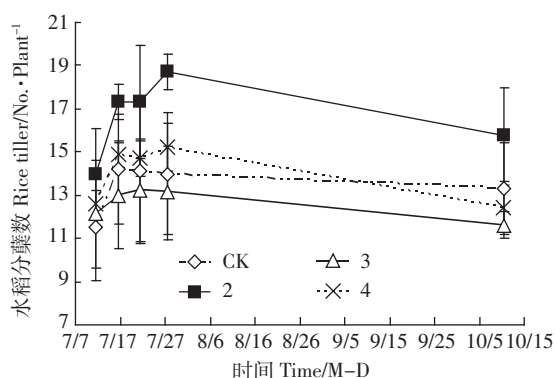


图1 不同施肥处理对水稻分蘖期分蘖数量的影响

Figure 1 Rice tiller number in tiller stage as affected by different fertilization treatments

2.1.2 对生育期水稻株高的影响

水稻生长前期(从插秧到7月中旬),各施肥处理的小区水稻株高没有显著差异(图2)。

至分蘖末期(7月27日),处理2施肥的小区水稻株高达到最高(95.4 cm),但与对照(92.3 cm)相比没有显著差异;处理3施肥的小区水稻株高最矮(88.9 cm),其次是处理4(图2)。但进入孕穗和灌浆期(8月至9月),各施肥处理的小区水稻株高没有显著差异(图2)。表明水稻进入生殖生长期,处理2施肥组合中肥料养分可能主要供给籽粒的形成,从而减缓了植株的营养生长。

收获期(10月10日),当地常规施肥处理的小区水稻株高最高,为168.3 cm,其次是处理2(167.0 cm),但二者之间没有显著差异。处理3施肥的小区水稻株高最矮,为161.1 cm,与对照比差异显著(图2)。

2.1.3 对水稻茎秆生物量的影响

由图3可见,各施肥处理对小区水稻茎秆干物质质量的影响没有显著差异,单株茎秆干重一般在13.6

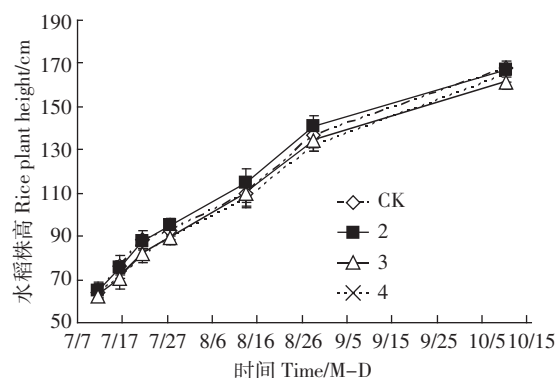
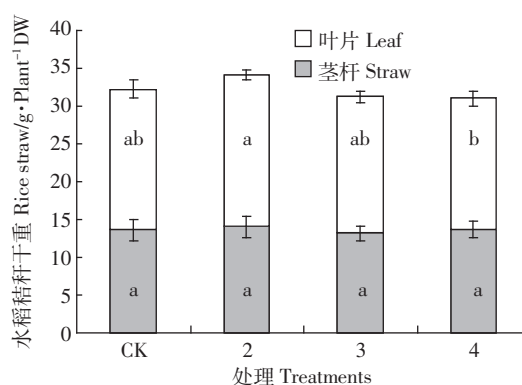


图2 不同施肥处理对生育期水稻株高的影响

Figure 2 Rice plant heights as affected by different fertilization treatments



柱状图中字母表示不同处理在水稻同一器官内的5%差异显著水平比较
Tables in column show 5% significant difference in the same rice organ with different treatments

图3 不同施肥处理对水稻茎秆生物量的影响

Figure 3 Rice straw dry weights as affected by different fertilization treatments

g左右。

处理2施肥的小区水稻叶片干物质质量最大,为20.1 g,但与CK相比,差异不显著。处理4施肥的小区水稻叶片干重最小,仅有17.4 g,与对照比差异也不显著,但处理2和处理4施肥的小区水稻叶片干重差异明显(图3)。

由图1和图3可见,处理2施肥不仅能显著促进水稻分蘖,还能明显增加叶片数量或叶片比表面积,这可能有利于水稻高产。

2.2 沼液施用对水稻产量的影响

由图4可见,处理2施肥水稻株产最高,为55.9 g,但与当地常规施肥相比差异不显著。处理3施肥水稻株产最低,仅为47.3 g,其次是处理4,两个施肥处理与当地常规施肥相比均没有显著差异,但处理2和处理3、4间差异明显。

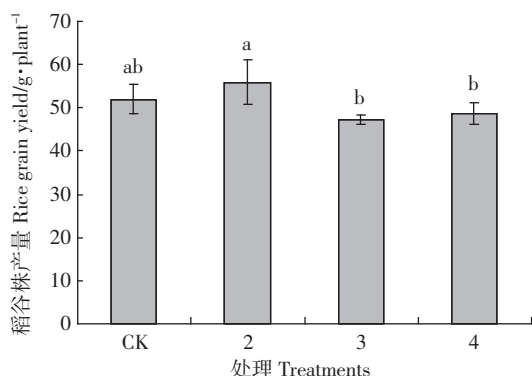


图 4 不同施肥处理对水稻产量的影响

Figure 4 Rice grain yield per plant as affected by different fertilization treatments

各施肥处理收获的稻谷产量与成熟期水稻株高和收获期秸秆干重之间不存在显著性相关关系, r 分别为 0.29 ($P < 0.05$) 和 0.45 ($P < 0.05$), 表明水稻生产中, 生育期水稻植株高矮指标不能反应水稻目标产量的情况。而各施肥处理收获的稻谷产量与分蘖期水稻的分蘖数、收获期水稻叶片干物质质量之间存在显著性相关关系, r 分别为 0.82* ($P < 0.05$) 和 0.73* ($P < 0.05$), 表明实际生产中, 可以通过观察分蘖期水稻分蘖情况, 生育期水稻长势等情况估测水稻目标产量。

2.3 沼液施用对稻米重金属含量的影响

不同肥料配合处理对粳稻“亚优红一号”稻米中重金属含量的影响见表 1。由表中可见, 处理 2 施肥的小区水稻精米中 Fe 含量最高, 为 $13.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与当地习惯施肥相比, 精米中 Fe 含量显著提升了 25.3%。处理 3 施肥的小区水稻精米中 Fe 含量最低, 仅有 $7.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于 CK。同样的, 处理 2 施肥的小区水稻精米中 Zn 含量最高 ($17.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但与当地习惯施肥相比没有明显差异。处理 3 和处理 4 施肥的小区水稻精米中 Zn 含量分别为 14.42 和 $14.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 两处理小区稻米 Zn 含量分别与对照相比, 虽然没有明显差异, 但与处理 2 相比差异显著。Fe 和 Zn 是人体必需的微量营养元素, 稻米 Fe 和 Zn 含量的提升有利于促进人体健康^[10]。

由表 1 可见, 按当地习惯施肥的小区水稻精米中 Cu 含量最低, 仅为 $8.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而有沼液作基肥或追施沼液的小区水稻精米中 Cu 含量都较高, 其中处理 3 施肥的小区水稻精米中 Cu 含量最高, 达 $11.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照显著增加了 31.8%。这表明, 稻米中 Cu 含量的增加可能与施用沼液有关。完全施用化学肥料的小区水稻精米中 Pb 的含量最高 ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),

表 1 不同施肥处理对精米中重金属含量的影响

Table 1 Heavy metal contents in polished rice as affected by different fertilization treatments

施肥处理 Treatments	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb
	mg·kg ⁻¹ grain				
CK	10.85 b	15.47 ab	8.76 b	8.10 a	0.22 a
2	13.60 a	17.98 a	11.24 ab	7.12 a	0.14 b
3	7.17 c	14.42 b	11.55 a	7.59 a	0.13 b
4	11.58 ab	14.24 b	10.30 ab	7.97 a	0.14 b

注: 同列数据后不同小写字母表示 5% 差异显著水平。

Note: Tables in every list show 5% significant difference in different treatments

而有沼液作基肥施用或追施沼液的小区水稻精米中 Pb 的含量却显著降低, 并达到无公害食品——稻米 Pb 的限量标准 (NY 5115—2008)。稻米中 Pb 可能主要来自于施入土壤的化学肥料。不同肥料配合处理对粳稻“亚优红一号”稻米中 Mn 的含量没有明显差异 (表 1)。

3 讨论

水稻生产中沼液与化学肥料搭配施用, 对其生育期各生物量、成熟期稻谷产量及稻米中重金属含量的影响明显不同。综上所述, 沼液作基肥, 追施复合肥获得的水稻产量最高。与当地常规施肥相比, 虽然稻谷产量没有显著提高, 但是基肥用沼液代替化学肥料, 明显降低了水稻生产成本。同时, 沼液作基肥, 追肥施复合肥还能促进水稻植株生长及分蘖, 强化稻米中 Fe、Zn 营养, 显著降低重金属 Pb 的含量, 明显提升了稻米营养品质。当然, 沼液完全代替化学肥料施用对水稻生长及其产量形成不利。

沼液在农业生产上被视为一种良好的肥源, 既可做基肥、追肥, 也可浸种和叶面喷施; 既可单施, 也可与化肥、农药、生长剂等混合施用, 对提高农产品产量、品质都有积极的作用^[3, 9]。另外, 沼液和沼渣还具有提高土壤有机质含量和丰富土壤氮素养分的作用^[11-13]。有研究表明, 和施用无机化肥相比, 施用沼肥的土壤, 有机质和 N、P、K 等营养元素的含量明显增加, 土壤酶活性增强, 土壤物理性状得到不同程度的改善^[14-16]。当沼肥用于土壤中时, 不但可以满足土壤中微生物对营养的需求, 而且能激活其中的微量元素和某些土壤酶^[7, 17-18]。

水稻是我国南方地区主要粮食作物, 种植面积和总产量分别占全国粮食作物的 40% 左右, 全国一半以上的人口以大米为主食。其传统施肥方式需肥量多, 肥料利用率低, 一般为 30%~35%^[19], 生产成本居

高不下,土壤质量下降明显。而随着沼气工程的快速发展,我国每年都要产生大量的沼肥。在我国南方地区如何在保证水稻高产优质的前提下最大限度地利用沼肥资源,培肥地力,减少化肥的使用量,降低农业生产成本,减少环境污染,促进农业生态平衡,将成为水稻生产中亟待解决的重大课题。

本试验研究结果显示,水稻生产中沼液作基肥,追肥用化学肥料的搭配施用方法可以促进水稻植株生长、提高单产、提升稻米营养品质,这为沼液在农业生产中的科学资源化利用提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 李淑兰, 邓良伟. 2007 年我国畜禽养殖废弃物处理的宏观政策及技术进展[J]. 猪业科学, 2008(1): 70-72.
LI Shu-lan, DENG Liang-wei. Macro-policy and technical progress of China's livestock and poultry waste treatments in 2007[J]. *Swine Industry Science*, 2008(1): 70-72.
- [2] 黄世文, 廖西元. 沼肥用于水稻的现状 & 展望[J]. 中国沼气, 2005, 23(2): 23-26.
HUANG Shi-wen, LIAO Xi-yuan. Progress and prospect of biogas fermentation residues (MFR) application on rice planting[J]. *China Biogas*, 2005, 23(2): 23-26.
- [3] 夏汉平, 敖惠修. 沼气发酵在复合农业生态系统中的作用[J]. 农村生态环境, 1996, 12(4): 47-50, 60.
XIA Han-ping, AO Hui-xiu. Biogas system and its roles in complex agro-ecosystem[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(4): 47-50, 60.
- [4] 王远远, 刘荣厚. 沼液综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1089-1091.
WANG Yuan-yuan, LIU Rong-hou. Progress of comprehensive utilization of biogas slurry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(4): 1089-1091.
- [5] 王慧霞, 张坐省. 沼液中的化学物质及在农业生产上的应用[J]. 陕西农业科学, 2006(3): 89-91.
WANG Hui-xia, ZHANG Zuo-sheng. Biogas chemicals and its application on agricultural production[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2006(3): 89-91.
- [6] 郭强, 柴晓利, 程海静, 等. 沼液的综合利用[J]. 再生资源研究, 2005(6): 37-41.
GUO Qiang, CHAI Xiao-li, CHENG Hai-jing, et al. Comprehensive utilizing of biogas liquid residue[J]. *Recycling Research*, 2005(6): 37-41.
- [7] 张亚莉, 董仁杰, 刘玉清. 沼肥在农业生产中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(35): 11549-11550.
ZHANG Ya-li, DONG Ren-jie, LIU Yu-qing. Utilization of biogas fertilizer in the agricultural production[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(35): 11549-11550.
- [8] Zhang Jin, Wu Lianghuan, Wang Minyan. Can iron and zinc in rice grains (*Oryza sativa* L.) be biofortified with nitrogen fertilization under pot conditions? [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88: 1172-1177.
- [9] 张进, 吴良欢, 王敏艳. 铁氮配施对稻米中铁、锌、钙、镁和蛋白质含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 122-125.
ZHANG Jin, WU Liang-huan, WANG Min-yan. Effect of iron and nitrogen mixed fertilizers on the content of Fe, Zn, Ca, Mg and protein in brown rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 122-125.
- [10] Zhang Jin, Wang Minyan, Wu Lianghuan, et al. Impacts of combination of foliar Iron and boron application on iron biofortification and nutritional quality of rice grain[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31: 1599-1611.
- [11] Berenguer P, Santiveri F, Boixadera J, et al. Fertilisation of irrigated maize with pig slurry combined with mineral nitrogen[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 635-645.
- [12] Chantigny M H, Angers D A, Morvan T, et al. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ^{15}N [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 637-643.
- [13] Sorensen P, Amato M. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil[J]. *European Journal of Agronomy*, 16: 81-95.
- [14] 何志强, 林金华. 农业生态系统中沼气综合利用的研究[J]. 中国沼气, 1994, 12(2): 42-44.
HE Zhi-qiang, LIN Jin-hua. Comprehensive utilization of biogas in agro-ecosystems[J]. *China Biogas*, 1994, 12(2): 42-44.
- [15] Guerrero C, Moral R, Gomez I, et al. Microbial biomass and activity of an agricultural soil amended with the solid phase of pig slurries[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 3259-3264.
- [16] Peu P, Brugere H, Pourcher A M, et al. Dynamics of a pig slurry microbial community during anaerobic storage and management[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(5): 3578-3585.
- [17] 于东波, 胡向军, 谢建, 等. 沼气发酵残留物减少蔬菜硝酸盐积累的研究与应用[J]. 云南师范大学学报, 2005, 25(1): 11-13.
YU Dong-bo, HU Xiang-jun, XIE Jian, et al. Application and research of BFR on nitrate accumulation in vegetables[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 25(1): 11-13.
- [18] 张无敌, 周长平, 刘士清. 厌氧消化残留物对改良土壤的作用[J]. 生态农业研究, 1996, 4(3): 35-37.
ZHANG Wu-di, ZHOU Chang-ping, LIU Shi-qing. Effects of methane fermentation residues on soil improvement[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1996, 4(3): 35-37.
- [19] 李庆远. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997.
LI Qing-kui. Fertilizer problem of sustainable development of agriculture in China[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1997.

致谢: 感谢浙江大学 Dr. Animesh Sarkar 先生对本文英文摘要的修改。