

猪圈内粪、尿、冲洗水分开收集系统设计与效果研究

吴华山, 常志州*, 杜 静, 黄红英, 马 艳

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 农业部长江下游农业环境重点研究室, 南京 210014)

摘 要: 养殖场污染物减排是养殖污染控制最有效手段之一, 为此在对猪排泄过程及行为观察基础上, 设计了一种能分别搜集猪粪、猪尿及冲洗水的猪圈, 并进行了实际运用效果监测研究。结果表明: 采用设计的新猪圈, 在冬、春季节猪粪收集率较对照猪圈分别提高 1.1% 和 3.8%, 猪尿收集量分别提高 20.5% 和 15.1%; 所收集猪粪含水量为 73.9% 和 69.6%, 分别降低 3.1% 和 4.8%; 猪粪中总氮、总磷较对照没有显著差异, 收集猪尿液中 COD、总氮和总磷含量均显著低于对照; 多次冲洗直到总氮、总磷检测为阴性时为止, 累计冲洗水用量, 新猪圈冲洗水量冬、春季较对照分别减少了 23.7% 和 30.5%, 冲洗水中 TN 分别降低 20.7% 和 24.6%, TP 降低 10.1% 和 12.3%, COD 降低 6.7% 和 2.5%, 达到了养猪场污染物减量减排的目标。

关键词: 猪圈; 粪; 尿; 冲圈水

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)08-1631-06 doi:10.11654/jaes.2014.08.023

Evaluation of a Novel System for Separate Collection of Feces, Urine and Flushing Water in Swine Lots

WU Hua-shan, CHANG Zhi-zhou*, DU Jing, HUANG Hong-ying, MA Yan

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Key Laboratory of Agro-Environment in downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Nan-jing 210014, China)

Abstract: Reducing pollutant discharges from animal farming systems is one of the most effective ways to control agricultural environmental pollution. A novel swine lot was designed to collect feces, urine and flushing water separately based on the excretion behaviors of swine. Its performances were then evaluated. The collection rates of feces in the designed swine lots (DSL) were increased by 1.1% and 3.8%, respectively, in winter and spring, as compared with those in the normal swine lots (CK). The rates of urine collection were enhanced by 20.5% in winter and 15.1% in spring in DSL. The water content in the feces from DSL was 73.9% in winter and 69.6% in spring, being 3.1% and 4.8% lower than from CK, respectively. There were no statistical differences in nitrogen and phosphorus contents in feces between DSL and CK. However, chemical oxygen demand (COD), nitrogen and phosphorus contents in the feces were significantly lower from DSL than from CK. In DSL, the consumption of flushed water was reduced by 23.7% and 30.5%, respectively, in winter and in spring, compared to CK. Nitrogen concentrations in the flushed water from DSL were reduced by 20.7% and 24.6%, phosphorus by 10.1% and 12.3%, and COD by 6.7% and 2.5%, respectively, during winter and spring, in comparison with CK. These findings show that the new waste collection system would help reduce pollutants from swine farming.

Keywords: swine lot; feces; urine; flushed water

规模化猪场一直被认为是畜牧养殖中的污染大户^[1], 据黄红英等^[2]估算, 2011 年江苏省畜禽粪便产生量达 7 567.01 万 t, 其中由养猪场排出的氮、磷量分别

占畜禽养殖排放总量的 43.2% 和 26.4%。养猪场产生的废弃物从形态上分为固体(猪粪)和液体(猪尿和污水)。其中以猪粪为主的固体部分收集、运输和后期处理相对比较容易; 但猪场产生的污水利用与处理则存在着困难, 如何减少养猪污水产生量、如何有效处理或利用养殖污水, 成为规模化养殖场污染治理中的热点与难点问题。

针对规模养猪场猪粪的处理与利用, 国内外有很

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 国家水专项(2012ZX07101-004-3)

作者简介: 吴华山(1978—), 男, 土壤学硕士, 助研, 从事农业废弃物资源化方面的研究。E-mail: 13667130@qq.com

* 通信作者: 常志州 E-mail: czhizhou@hotmail.com

多的研究和报道^[3-7]。对于污水的处理,归纳起来主要分为三个技术途径,一是源头减量技术,二是无害化处理后资源化利用,三是净化达标排放或回用。其中有关养猪场污水处理资源化与净化技术,已有大量文献报道,其主要技术有厌氧产沼气技术^[8-11]、UASB+SBR+氧化塘组合处理^[12-13]、人工湿地^[14]、化学去除法^[15]和介质物理吸附法^[16],等等。这些方法和技术能对养殖污水进行有效处理,但对于一些地区,受到投资和运行成本、气候条件、占地面积、环境要求等因素限制,在推广应用时还是存在着诸多困难^[17]。源头减量技术具有投资成本低、运行管理相对简单与减排效率高等特点,起到事半功倍的效果,因此受到养殖企业与环境工作者更多的关注。源头减量主要包括饲料优化、清扫方式、固液分离技术、发酵床等技术、新型猪舍改良。

通过饲料优化可以一定程度上减少排泄物量以及降低粪、尿中氮磷等养分浓度,能显著减少氮磷排放^[18-21],但难以减少最难处理的污水量;采用干清粪与水冲洗的方法,可以实现固液分离,显著减少污水量及污水中污染物浓度,但排放的污水中污染物负荷仍然较高^[22-23],即使通过进一步的机械固液分离,也远远超过一般污水生化处理所能达到的浓度^[24-26]。发酵床养猪技术是近年来推广应用较为成功的一项养殖场污染物减排技术^[27],但若对于已经建成的养猪场进行改造,需要大笔资金。国内外有很多关于粪污减排的猪舍(圈)改良研究^[28-31],设计出不同的新型猪圈、新型垫料或新型建筑材料等。以上方法都是养猪场污染物源头减量的好方法。

本研究在对猪排泄行为观察的基础上,设计了一

种新的猪圈,以实现猪粪与猪尿的分离、冲洗水与尿液分开,达到减少污水产生量与降低污水中污染物负荷的目的。该设计的特点是只需对普通猪圈地面进行简单改造和技术改善,就能一定程度上源头减排,并且投资小,见效快。现将其初步试验结果进行汇集报告,以期为养殖场污染物减排提供新的思路。

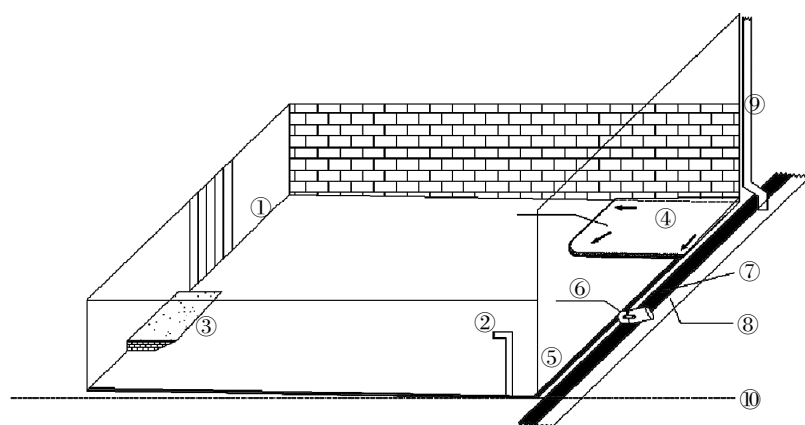
1 材料与方法

1.1 猪圈粪、尿与冲洗水分离收集系统设计

试验地点:江苏省宜兴市万石镇新坤兴猪业有限公司,对普通猪圈按图1所示进行改造。

猪圈长4.2 m,宽3.3 m。猪圈整个地平面为向排污口(⑥)倾斜;猪圈靠排污口一角有个0.8 m×0.6 m的猪粪排泄区(④),排泄区为平台结构,高于猪圈地面1~2 cm,平台向猪圈中心倾斜,墙角处最高;从饮水区到排污口的墙角处,以及排泄区周围到排污口的墙角处均有宽约2 cm深约2 cm的浅水槽,以供猪在饮水时的滴水 and 排泄时候的尿液能顺着引水槽流向排污口。排污口采用吊桥式管道设计见图2。

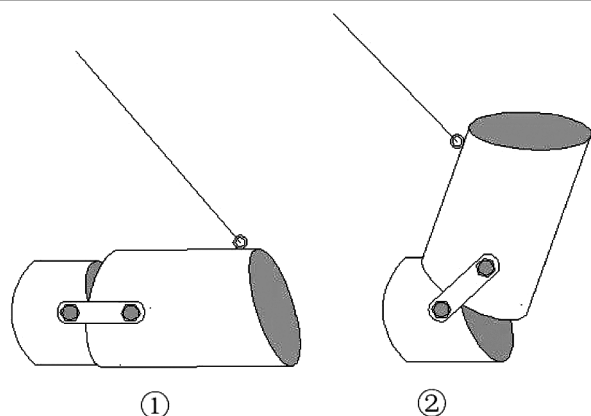
吊桥式排污管的设计方法是在原有管口上再添加一个吊桥管,当吊桥管放下时,污水会排放到外侧的雨水沟(图1⑧);当吊桥管拉起时,污水会排放到靠近猪圈的污水沟(图1⑦)。该设计的目的是猪圈在正常排放尿液和含粪污较多的冲圈水时,吊桥拉起,将尿液和污水排放到污水沟,汇集后流入沼气工程以供发酵;而当冲圈水达到国家排放标准时(主要是夏季降温用水或猪圈已经经过冲洗后的冲圈水),可以放下吊桥管,将冲圈水排放到雨水沟,直接排放或中水回收。



①猪圈门②饮水嘴③食槽④排泄区⑤引水槽⑥吊桥式排污口⑦污水沟⑧雨水沟⑨落水管⑩地平线

图1 粪尿分离猪圈示意图

Figure 1 Schematic diagram of a new pigsty for separate collection of solid and liquid wastes



①吊桥管放下; ②吊桥管拉起

图 2 吊桥式排污管口

Figure 2 Suspension bridge-style outlet

1.2 试验方案

本试验以常规猪圈(CK)和改造后的猪圈(处理)为研究对象,每种处理设 3 个重复。比较两种猪圈在相同饲养方式下的粪、尿收集量和总氮(TN)、总磷(TP)含量,以及冲圈水量和 TN、TP、COD 浓度。

每种猪圈内饲养 5 头体重基本相同的育肥猪(3 月龄以上),平均体重 72 kg。处理猪圈饲养猪入舍后,首先需经过 3~5 d 的调教,使猪能主动将粪便排泄到专门的排泄区。粪、尿和冲圈水的收集方法如下:

(1)粪便收集:采用“干清粪”工艺,每日早、晚清出猪圈内所有粪便,并称重,采集混合样以供分析。

(2)尿液收集:用密封较好的收集瓶在排污口接收流出的液体,每日测量一次体积,并取混合样供分析。

(3)冲圈水收集:在冲圈时,用大桶在排污口收集冲圈水,每次冲圈重复 3~4 遍,根据目测实际控制冲水量,确保猪圈干净,无明显粪污,测量每一次每一遍冲圈水的体积,并取样以供分析。冬季为每 15 d 冲洗一次,春季为每 10 d 冲洗一次。

试验时间为 2012 年 11 月(冬季)和 2013 年 3—4 月(春季)分别连续收集 30 d。

1.3 分析方法

所有粪、尿样均按照郭德杰^[3]提供的方法进行分析前保存和前处理。具体的检测方法如表 1。

1.4 统计分析

试验数据处理采用 SPASS 和 Excel 两种统计分析软件。

2 结果与讨论

2.1 猪粪、尿排泄量及养分对比

2.1.1 猪粪、尿排泄量

分别收集对照与处理两猪圈猪粪和猪尿,利用 t 检验对两组数据进行显著性检验。其结果见表 2。

表 2 两个季节猪圈内猪粪尿每日平均收集量

Table 2 Average daily amount of swine feces and urine in pigsty during two seasons

	项目	CK	处理	t 检验
冬季	鲜粪收集量/kg	7.67±1.09	7.07±0.93	显著
	含水率/%	76.27±0.89	73.91±1.09	极显著
	干粪收集量/kg	1.82±0.14	1.84±0.13	—
春季	猪尿收集量/L	11.73±1.52	14.14±2.11	极显著
	鲜粪收集量/kg	7.82±0.87	7.17±0.54	显著
	含水率/%	73.12±7.23	69.58±5.90	极显著
	干粪收集量/kg	2.10±0.12	2.18±0.19	—
	猪尿收集量/L	15.28±0.85	17.59±0.55	极显著

注:干粪收集量为鲜粪烘干重; $DF=58$, P (单尾) <0.05 。下同。

根据表 2,两个季节的数据虽然略有差异,但两组数据的变化趋势和 t 检验结果却基本相同。处理猪圈猪粪含水量为 69.58%~73.91%,极显著低于对照猪圈(73.12%~76.27%),平均下降了 3%左右。处理猪圈由于有单独的猪粪排泄区,且高于猪圈地表面,因此尿液不容易混到猪粪内,即使有尿液进入猪粪排泄区,也会随着斜面和导水槽流走,避免尿泡粪而降低了粪便含水量。这样可减少后续用于堆肥水分调节所需要的调理剂^[32],因而可降低堆肥成本。

表 1 粪尿(水)检测指标、方法、标准及测定仪器

Table 1 Method, standard and instruments for properties of swine feces and urine(water)

项目		监测方法	执行标准	主要仪器
猪粪	含水率	复混肥料中游离水含量测定	GB 8576—1988	电热鼓风干燥箱
	总氮	有机肥料中总氮含量测定	NY 525—2002	凯氏定氮装置
	总磷	有机肥料中总磷含量测定	NY 525—2002	紫外分光光度计
猪尿污水	总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(水质)	GB 11894—1989	凯氏定氮装置
	总磷	钼酸铵分光光度法(水质)	GB 11893—1989	紫外分光光度计
	COD	重铬酸盐法(水质)	GB 11914—1989	水质分析仪

猪尿收集:处理猪圈每头猪(育成猪)的尿液收集量冬、春季分别平均为2.8、3.5 L,极显著高于对照猪圈。这主要是处理猪圈较好地实现了粪尿分离,减少了混入粪便中的尿液量,另一方面也由于改造后的猪圈导尿槽利于尿液收集,减少了尿液地表蒸发损失。减少尿液在猪圈地表滞留时间,在改善猪圈环境的同时,也可减少清洗尿渍所需要的水量。

2.1.2 不同猪圈猪粪、尿污染物浓度比较

比较改造前后猪粪、尿污染物浓度,结果见表3。对照与处理猪圈,猪粪总氮和总磷含量差异性均不显著,但处理猪圈猪粪氮、磷收集量较对照提高了2%~3%。

比较对照与处理尿液中COD、TN、TP与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度可知,对照猪圈收集的尿液中COD、TN、TP与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均显著或极显著高于处理猪圈。这是因为对照猪圈尿液中混入了较多的猪粪,使其污染物浓度提高,也进一步证实了处理猪圈能很好实现粪、尿分离。

2.2 猪圈冲洗水量及COD、TN、TP浓度比较

为比较不同猪圈冲水量,在干清粪收集粪便的前提下,进行分次冲圈,记录用水量,直到人为确定猪圈内没有明显污物,且排放的冲圈水COD、TN、TP等污染物浓度低于《畜禽养殖业污染物排放标准》^[22]为止。在此前提下,累加不同猪圈最终冲水量,同时分析各次冲洗水中污染物浓度,通过加权计算得到冲洗水中的COD、TN和TP浓度,结果见表4。

由表4可知,处理猪圈冬、春季冲洗用水较对照猪圈分别减少了23.7%和30.5%,且冲洗水中TN浓度降低了20%以上,TP降低了10%以上,COD降低了2.5%以上。表明处理猪圈不仅能有效节约用水,而且能降低冲洗水中污染物负荷,极大地减轻养殖污水后续处理工程投资与运行费用,减少对水体环境污染的风险。

同时,依据本试验猪圈改造方案(图1),通过吊

表3 不同猪圈猪粪、尿污染物浓度和收集量

Table 3 Concentrations and amount of pollutants in swine feces and urine in different pigsties

项目		CK	处理	t 检验
冬季	猪粪 总氮含量/g·kg ⁻¹	27.89±2.55	28.17±2.78	—
	总磷含量/g·kg ⁻¹	16.31±0.47	16.50±0.74	—
	氮收集量/g	50.76±7.21	51.96±6.84	—
	磷收集量/g	29.69±4.22	30.44±4.00	—
	猪尿 COD/g·L ⁻¹	27.23±3.12	16.75±2.18	极显著
	铵态氮/g·L ⁻¹	1.98±0.20	1.73±0.11	极显著
	总氮含量/g·L ⁻¹	2.46±0.12	2.26±0.11	极显著
	总磷含量/g·L ⁻¹	0.44±0.05	0.41±0.02	极显著
	氮收集量/g	28.86±3.74	31.96±4.77	显著
	磷收集量/g	5.16±0.67	5.80±0.87	显著
春季	猪粪 总氮含量/g·kg ⁻¹	26.39±1.21	26.83±0.58	—
	总磷含量/g·kg ⁻¹	21.29±1.03	21.48±0.68	—
	氮收集量/g	56.77±6.17	58.52±4.41	—
	磷收集量/g	44.75±4.98	46.85±3.53	—
	猪尿 COD/g·L ⁻¹	36.28±3.28	18.36±1.84	极显著
	铵态氮/g·L ⁻¹	1.72±0.22	1.63±0.17	极显著
	总氮含量/g·L ⁻¹	2.41±0.32	2.18±0.19	显著
	总磷含量/g·L ⁻¹	0.73±0.046	0.69±0.028	显著
	氮收集量/g	36.82±2.05	38.35±1.20	显著
	磷收集量/g	11.15±0.82	12.14±0.38	显著

注:猪粪中养分含量以烘干为基础。下同。

桥管设计,将污染物负荷较低的冲洗水与高负荷污水分开排放,低浓度冲洗水收集后经过简单的无害化处理,既可以用于二次冲圈,可以减少污水产生量,同时也可以减轻后续污水处理的压力。

3 结论

(1)改造后的处理猪圈较对照猪圈,冬、春季猪粪(干)收集量虽然没有达到显著差异,但也分别提高了1.1%和3.8%;猪粪含水量达到极显著差异,分别下降了2.37%和3.54%;处理猪圈猪尿收集量较对照猪圈冬、春季分别提高20.55%和15.12%,其尿液中COD、

表4 不同猪圈冲洗水量及污染物浓度

Table 4 Amount and pollutant concentrations in flushed water from different pigsties

季节	项目	冲水量/L	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
冬季	CK	131±20.35	819.96±140.42	102.84±22.68	36.35±8.21
	处理	100±12.66	765.05±84.41	81.55±19.56	32.67±3.98
	削减率	-23.7%	-6.7%	-20.7%	-10.1%
春季	CK	174±24.75	733.16±112.82	80.83±20.21	29.41±6.93
	处理	121±26.87	714.54±109.93	60.97±16.73	25.80±3.21
	削减率	-30.5%	-2.5%	-24.6%	-12.3%

TN、TP 浓度在冬、春两季分别下降 38.49%、8.31%、6.82%和 49.39%、9.54%、8.88%。处理猪圈冲洗水量较对照猪圈冬、春季分别减少 23.7%和 30.5%,冲洗水中 COD、TN、TP 浓度在冬、春两季分别下降 6.7%、20.7%、10.1%和 2.5%、24.6%、12.3%。

(2)猪圈经过改造,并对猪群进行诱导训练后,可以实现猪粪的定点排泄,降低了粪便清扫难度;猪圈地面的微斜以及导水、导尿槽设计,减少了尿液在猪圈内的滞留,降低了猪粪对尿液的截留和吸附,因而明显降低了所收集猪尿中污染物浓度,同时也减少冲圈水量及其污染物负荷;猪圈中导流吊桥管设计可以将高浓度与低浓度污水分开排放,从而实现部分低浓度污水回用冲圈,进一步减少污水量,同时也便于后续污水处理与净化。

参考文献:

- [1] 王凯军,金冬霞,赵淑霞,等. 畜禽养殖污染防治技术与政策[M]. 北京:化学工业出版社,2004:1-18.
WANG Kai-jun, JIN Dong-xia, ZHAO Shu-xia, et al. Technology and policy of livestock and poultry breeding pollution prevention[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:1-18.
- [2] 黄红英,常志州,叶小梅,等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析——以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013,29(4):777-783.
HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Estimation of regional livestock manure production and farmland loading capacity: A case study of Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013,29(4):777-783.
- [3] 黄勤楼,黄秀声,陈钟佃,等. 规模化猪场污染及废弃物循环利用研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10):175-178.
HUANG Qin-lou, HUANG Xiu-sheng, CHEN Zhong-dian, et al. Research on the pollution situation of scal pig farms and waste circular utilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007,23(10):175-178.
- [4] 吴华山,郭德杰,马艳,等. 添加羊兔粪及稻草对猪粪堆肥腐熟进程的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1):58-64.
WU Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, et al. Effect of sheep manure, rabbit manure and straw on pig manure composting[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(1):58-64.
- [5] 李长生,王应宽. 集约化猪场粪污处理工艺的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1):86-90.
LI Chang-sheng, WANG Ying-kuan. Technoloy of swine manure treatment on intensive scaled swine farms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(1):86-90.
- [6] 张全国,李鹏鹏,倪慎军,等. 沼液复合型杀虫剂研究[J]. 农业工程学报, 2006,22(6):157-160.
ZHANG Quan-guo, LI Peng-peng, NI Shen-jun, et al. Experimental study on compound pesticide composed by the anaerobic fermentation slurry and additives[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6):157-160.
- [7] 朱开建,陈小麟,赵扬,等. 利用猪粪集约化生产蝇蛆的生态工程研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 42(2):253-256.
ZHU Kai-jian, CHEN Xiao-lin, ZHAO Yang, et al. Ecological engineering study on the intensive productin of housefly larvae by using pig manure[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2003,42(2):253-256.
- [8] Westerman P, Bicudo J. Management considerations for organic waster use in agriculture[J]. *Bioresoure Technology*, 2005, 96(5): 215-221.
- [9] 唐春富. 关于辽宁省集约化畜禽养殖场大中型沼气工程建设情况的调查[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊): 69-71.
TANG Chun-fu. Investigation report on comprehensive utilization of large-and-middle-scale biogas plant in live stock and poultry breeding farms of Liaoning Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(Supp1): 69-71.
- [10] 靳红梅,常志州,叶小梅,等. 江苏大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):291-296.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):291-296.
- [11] 杨雄年. 开阔思路、明确方向: 进一步推动沼肥综合利用工作[C]//全国沼肥综合利用现场经验交流会. 北京: 农业工程技术(新能源产业), 2011:2-4.
YANG Xiong-nian. Widen train of thought, clear direction: To further promote the comprehensive utilization of biogas fertilizer[C]//The comprehensive utilization of biogas fertilizer at the experience exchange conference. Beijing: Agricultural Engineering Technology(New Energy Industry), 2011:2-4.
- [12] Lettinga G, Van Velsen A F M, Hobma S W, et al. Use of concept treatment for biological wastewater upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treatment, especially for anaerobic[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1980, 22(4):669-737.
- [13] 林冀夫. UASB-生物接触氧化-氧化塘工艺处理养猪场废水[J]. 环境工程, 2009, 27(增刊):36-37.
LIN Ji-fu. Treatment of wastewater from pigsty with process of UASB-Biological contact oxidation-oxidation ponds[J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(Suppl):36-37.
- [14] Vymazal J J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3):48-65.
- [15] Ozturk I, Altimbaz M, Koyuncu I, et al. Advanced physicochemical treatment experiences on young municipal and fill leachates[J]. *Waste Management*, 2003, 23: 441-446.
- [16] Adnan A, Mavinic D S, Koch F A. Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization examining the process feasibility [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2003, 2(5): 315-324.
- [17] 康国虎,董红敏,陶秀萍. 美国零污水排放育肥猪圈生产状况[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊2):211-214
KANG Guo-hu, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping. Introduction to hoop structure for finishing pig production[J]. *Transactions of the Chi-*

- nese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(Suppl2):211-214.
- [18] Gromell G L, Stahly T S, Coffey R D, et al. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1993, 71(7): 1831-1840.
- [19] Jongbloed A W, Lenis N P, Mroz Z. Impact of nutrition on reduction of environmental pollution by pigs: An overview of recent research[J]. *Veterinary Quarterly*, 1997, 19(3):130-134.
- [20] Pedersen C, Boersma M G, Stein H H. Digestibility of energy and phosphorus in 10 samples of distillers dried grains with solubles fed to growing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 85(5):1168-1176.
- [21] 闫俊书, 周维仁, 宦海林, 等. 不同清洁型日粮降低规模猪场中氮/磷污染物排泄的研究[J]. *动物营养与饲料科学*, 2011, 38(5):38-41.
- YAN Jun-shu, ZHOU Wei-ren, HUAN Hai-lin, et al. Studies on the effect of different clean feeds on the excretion of N and P in large scale pig farm[J]. *Animal Nutrition and Feed Science*, 2011, 38(5):38-41.
- [22] 国家环境保护总局. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Pollution investigation and prevention countermeasures of large-scale livestock and poultry breeding industry in country[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [23] 刘永丰, 许振成, 吴根义, 等. 清粪方式对养猪废水中污染物迁移转化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(6):318-320.
- LIU Yong-feng, XU Zhen-cheng, WU Gen-yi, et al. Effect of pollutant migrating and transforming in pig wastewater by different cleaning[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(6):318-320.
- [24] Moller H B, Lund I, Sommer S G. Solid-liquid separation of livestock slurry: Efficiency and cost[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74(3): 223-229.
- [25] Burton C H. The potential contribution of separation technologies to the management of livestock manure[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3): 208-216.
- [26] 常志州, 黄红英, 吴军伟, 等. 猪和奶牛粪便的粒径及养分分布对固液分离效率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2):392-395.
- CHANG Zhi-hou, HUANG Hong-ying, WU Jun-wei, et al. Effect of particle sizes and nutrient contents in swine and cow manures on efficiency of solid-liquid separation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):392-395.
- [27] 陆扬, 吴淑杭, 周德平, 等. 发酵床养猪垫料的养分转化与植物毒素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7):1409-1412.
- LU Yang, WU Shu-hang, ZHOU De-ping, et al. Nutrition transformation and phytotoxicity of pig litters under pig-on-litter (POL) system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1409-1412.
- [28] 康国虎, 董红敏, 陶秀萍, 等. 少污水排放垫料猪舍生产和环境效果[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12):259-264.
- KANG Guo-hu, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping, et al. Evaluation on performance and thermal environment of hoop structure for finishing pigs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12):259-264.
- [29] Gentry J G, McGlone J J, Blanton J R, et al. Alternative housing system for pigs: Influence of growth composition and pork quality[J]. *J Anim Sci*, 2002, 80(7):1781-1790.
- [30] 汪开英, 代小蓉, 李震宇, 等. 不同地面结构的育肥猪舍 NH_3 排放系数[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1):163-166.
- WANG Kai-ying, DAI Xiao-rong, LI Zheng-yu, et al. NH_3 emission factors of fattening pig buildings with different floor systems[J]. *Transaction of the CSAM*, 2010, 41(1):163-166.
- [31] Honeyman M S, Harmon J D. Performance of finishing pigs in hoop structures and confinement during winter and summer[J]. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(1):1663-1670.
- [32] Huang G F, Wong J W, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8):805-813.