

靳红梅, 吴华山, 郭瑞华, 等. 多级处理模式下粪污中氮、磷削减规律及其农田可消纳量——以苏南水网地区规模猪场为例[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 237-244.

JIN Hong-mei, WU Hua-shan, GUO Rui-hua, et al. Removal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus and Their Land Application Rates During a Multi-level Treatment Process for Manure and Waste Water: An Example from Intensive Swine Farm in Water Network Region of Southern Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 237-244.

## 多级处理模式下粪污中氮、磷削减规律及其农田可消纳量 ——以苏南水网地区规模猪场为例

靳红梅<sup>1,2,3</sup>, 吴华山<sup>1,2,3</sup>, 郭瑞华<sup>1</sup>, 黄红英<sup>1,2,3</sup>

(1.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014; 2.农业部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 3.江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 江苏 南京 210014)

**摘要:**针对规模养殖场粪污多级处理模式下氮、磷削减规律及土地承载力不清等问题,以苏南水网地区一规模猪场为研究对象,系统分析了污水经二级厌氧消化、三级沉淀池和水生植物塘逐级处理后氮、磷的去除特征,进一步核算了此模式下粪污实际农田可消纳量。结果表明:猪场全年粪、尿总产生量分别约为4 086.9 t和10 995.8 t,粪便收集率约为90.5%。收集的粪污中可利用的总氮(TN)和总磷(TP)量分别为183.12 t和148.97 t。粪污经过厌氧消化后TN和TP去除率小于25.3%和57.2%,进一步通过三级沉淀池处理后二者可去除80%以上,最终通过水生植物生态处理后二者去除率均达95%以上。养殖废水经过多级处理工艺,可大幅提高其农田消纳量,降低粪污处理成本,特别适用于集约化程度高、经济发达、土地资源有限地区的畜禽养殖场。

**关键词:**多级处理;氮磷削减;可消纳量;水网地区;规模猪场

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)03-0237-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0312

### Removal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus and Their Land Application Rates During a Multi-level Treatment Process for Manure and Waste Water: An Example from Intensive Swine Farm in Water Network Region of Southern Jiangsu Province, China

JIN Hong-mei<sup>1,2,3</sup>, WU Hua-shan<sup>1,2,3</sup>, GUO Rui-hua<sup>1</sup>, HUANG Hong-ying<sup>1,2,3</sup>

(1.Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 3.Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The actual removal rates of nitrogen and phosphorus in animal manure and waste water during multi-level treatment process remain vague for large-scale farms. This limits its land application in water network regions of China. The aims of this study were: (1) to verify the removal characteristics of total nitrogen(TN) and phosphorus(TP) during a multi-level treatment process for swine manure and waste water, and(2) to calculate its land carrying capacity. An intensive swine farm in Southern Jiangsu, which possessed a typical manure and waste water treatment plant with two anaerobic digesters, three natural sediment ponds, and one aquatic plant ponds, was chosen to monitor for the four seasons during a whole year. The results showed that total productions of manure and urine were 4 086.9 t and 10 995.8 t, respectively, in 2016. The collection rate of manure was around 90.5%. The available TN and TP were 183.12 t and 148.97 t, respectively, for land application. The removal rates of TN and TP were less than 25.3% and 57.2% respectively, after secondary anaerobic digestion. The residual TN and TP in the digestates could be removed more than 80% by oxygen ponds treatments. Then the effluent was processed by

收稿日期:2017-10-10 录用日期:2017-12-15

基金项目:江苏省重点研发计划面上项目(BE2017363);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)1003-1,CX(17)1005-4);国家重点研发计划(2017YF0801403)

作者简介:靳红梅(1982—),女,河北吴桥人,博士,副研究员,主要从事农业废弃物无害化处理与资源化利用研究。E-mail:hmjin@jaas.ac.cn

aquatic plants, and the removal rates for TN and TP were more than 95%, which guaranteed the effluent to be up to the discharge standard. The multi-level processing technology could improve the land carrying capacity and reduce the manure and waste water treatment costs for the intensive animal farms, which were suitable for very intensive, economically developed and land resource limited regions.

**Keywords:** multi-level treatment process; removals of nitrogen and phosphorus; land carrying capacity; water network region; intensive swine farm

畜禽养殖业是我国农业面源污染最主要的污染排放源,实现畜禽养殖业发展与环境保护的双赢目标,成为摆在各级政府面前的重大课题<sup>[1-2]</sup>。近年来,中央和地方陆续出台了一系列污染防治政策。2013年,国务院颁布实施的《畜禽规模养殖污染防治条例》,是我国第一部农业农村环境保护行政法规;2017年,《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》出台,是我国畜牧发展史上第一个针对畜禽养殖废弃物处理和利用的指导性文件。这些都凸显了现阶段我国政府对畜牧业污染防治,尤其是对规模化畜禽养殖污染防治的重视与决心。

将畜禽粪便还田利用,推动种养业废弃物资源化和无害化,是促进循环农业的关键环节,是实现农业面源污染综合防治、化肥农药使用量零增长的最有效技术途径。以万头猪场为例,完全消纳其产生的固体粪便和污水,分别约需要蔬菜瓜果地 18.4 hm<sup>2</sup> 和 41.4 hm<sup>2</sup>、林地 38.4 hm<sup>2</sup> 和 74.1 hm<sup>2</sup>、大田作物地 34.4 hm<sup>2</sup> 和 42.2 hm<sup>2</sup>[分别以总氮(Total nitrogen, TN)和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计]<sup>[3]</sup>。可见,规模养殖场粪污作为肥料直接施用需要大量的农田消纳,并且由于粪便和污水中氮磷的含量差别很大,如果以一种养分平衡来考虑粪污消纳,很可能超过作物的实际需求,进而造成农田的其他养分过量和环境污染<sup>[3]</sup>。此外,尽管种植业有大量的肥料需求,但这种需求有季节性;而养殖场产生的粪污量大集中,且养分含量无明显季节性。在我国大多数养殖场,由于很少考虑养殖用水的减量化问题,导致污水产生量特别大,不仅处理成本高,而且资源化效率低,对养殖粪污后续的处理和利用造成了巨大的压力。这些客观因素导致了养殖场粪污难以通过农田进行有效的消纳<sup>[4]</sup>。在东部发达地区或南方水网地区,土地资源十分有限,种植业和养殖业在地理位置和经营主体上分离严重,畜禽养殖粪便作为肥料往往不能就近利用<sup>[5-6]</sup>。更为严重的是,缺乏保障种养结合顺利实施的相关政策法规或者社会管理办法,这为畜禽粪便的资源化利用提出了巨大的难题。

我国是生猪养殖大国,截至 2016 年生猪年饲养总量(出栏+存栏)近 12 亿头<sup>[4]</sup>。随着养殖规模不断扩

大,产生的粪尿及污水也相对集中,猪粪的处理已成为畜禽污染处理和防治重点<sup>[6-7]</sup>。猪场废水处理是粪污处理的难点和重点,国内外普遍采用厌氧消化工艺处理,一方面可有效降低废水中化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD<sub>C</sub>),另一方面可产生沼气等清洁能源以及沼液和沼渣等优质肥料<sup>[8]</sup>。但沼液产生量大,在南方集约化猪场周边很难有足够的土地将其完全消纳<sup>[9]</sup>。对沼液等养殖废水进行多级处理,可有效降低其中氮磷等养分含量<sup>[8]</sup>,提高其农田可消纳量。但目前,对于规模猪场粪尿产生量的模型估算和环境承载力评估等研究较多<sup>[1,3,6-7,10-13]</sup>,而粪污的实际收集量和环境排放量研究仅有少量报道<sup>[14-16]</sup>,特别是对于粪污各处理环节氮、磷等的季节排放特征数据几乎空白,不利于农田养殖承载力的确定和还田利用环境安全性的预测。

基于此,本研究以江苏省金坛市某规模生猪养殖场为研究对象,分析春、夏、秋、冬四个季节养殖场污水处理过程中 COD、TN 和总磷(Total phosphorus, TP)等的削减效果,在此基础上探讨猪粪污多级处理模式下其农田可消纳量,为全国畜禽养殖污染排放强度定量评估和预测,以及养殖业污染源产生量、排放量动态更新提供科学依据,同时为养殖企业对粪污综合治理技术的选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

本研究选择江苏省金坛市一家大型生猪养殖场为长期粪污排放监测点。该公司属私营独资企业,成立于 2004 年 2 月,常年生猪存栏量 11 000 头以上,占地面积 33.33 hm<sup>2</sup>,位于苏南典型农区。养殖场养殖管理规范,有详细生产记录,配备较完善的固体粪便收集、贮存或处理设施以及污水收集、贮存和处理设施,废弃物收集量和处理量可计量、可监测。内部水系基本独立,遇到梅雨或大暴雨往外河排水可计量,在南方水网地区的养殖场中具有代表性。

猪场养殖区分为繁育区、保育区和育肥区,建立了雨污分离系统。粪便收集采取干清粪方式,清出的

粪便转移至猪场临时堆放大棚, 后出售给有机肥厂做堆肥原料; 尿液及冲圈水(含部分粪便)经污水管道进入收集池, 固液分离后的固体部分作为堆肥原料, 液体部分进行厌氧发酵。猪场现有大型沼气池 2 座, 发酵罐容积分别为 1 500 m<sup>3</sup>(1#)和 1 200 m<sup>3</sup>(2#), 全部污水和部分粪便首先进入 1# 厌氧消化罐发酵, 排出的发酵液再进入 2# 厌氧消化罐二次发酵。经二次消化后排出的沼液一部分直接灌溉苗木, 另一部分则通过污水管道依次进入一级(15 000 m<sup>3</sup>)、二级(10 000 m<sup>3</sup>)和三级(5 000 m<sup>3</sup>)沉淀池, 主要作用是通过自然重力作用去除污水中的颗粒悬浮物。经三级沉淀处理后的污水进入种有水葫芦(*Eichhornia crassipes*)和空心莲子草[*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.]的水生植物塘(面积约为 600 m<sup>2</sup>)深度净化, 最终出水用于猪舍冲洗和周边近 20 hm<sup>2</sup> 苗木基地灌溉。猪场粪污处理过程详见图 1。

监测工作开始于 2014 年秋季, 后续每年在春、夏、秋、冬分别进行连续取样分析。本研究仅选取了

2016 年全年的数据进行分析, 当年该猪场商品猪出栏数 22 535 头, 各阶段养殖情况详见表 1。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 取样点设置

(1) 粪便取样点: 粪便样品仅采集新鲜粪便, 采样点分别设置在妊娠猪舍(5#)、保育猪舍(11#)和育肥猪舍(北 7#)内; 而临时堆放点粪便仅储存 1~3 d, 粪便成分变化极小, 故不对储存后的粪便进行取样。

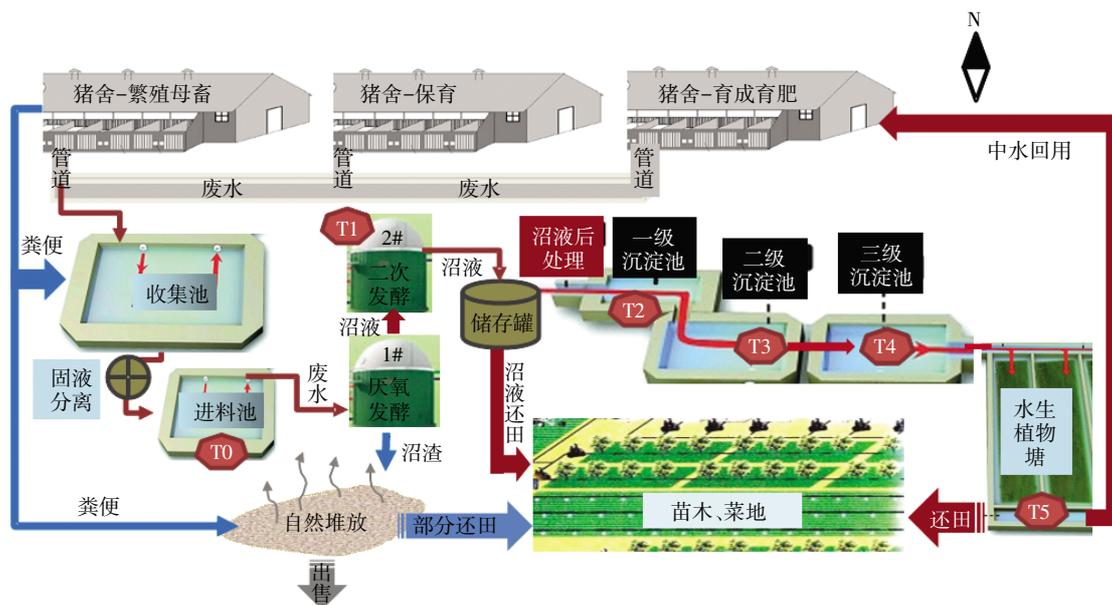
(2) 污水取样点: 污水取样点如图 1 所示, 分别设置在进料池、2# 发酵罐出水口(沼液)以及一级、二级、三级沉淀池出水口和水生植物塘出水口。

#### 1.2.2 取样时间

每年在春、夏、秋、冬四个季节进行取样, 每次连续取样 3~5 d, 保证 3 d 有效数据。2016 年具体取样时间为: 1 月 22—25 日、4 月 9—11 日、7 月 15—18 日和 10 月 25—27 日。

#### 1.2.3 取样及保存方法

(1) 粪便样品: 在采样猪舍内随机选取 9 个采样



取样点: T0-进料池; T1-二次发酵后沼液; T2-一级沉淀池出水口; T3-二级沉淀池出水口; T4-三级沉淀池出水口; T5-水生植物塘出水口。下同

图 1 监测点粪污处理环节及取样点示意图

Figure 1 Schematic diagram of manure and waste water treatment steps and sampling sites in the monitoring swine farm

表 1 2016 年猪场各养殖阶段基本情况表

Table 1 Basic information of each breeding stage in the monitoring swine farm in 2016

养殖阶段	存栏量/头	饲养周期/d	体重范围/kg	饲料采食量/kg·d <sup>-1</sup>	饲料主要成分指标			
					粗蛋白/%	磷/%	铜/mg·kg <sup>-1</sup>	锌/mg·kg <sup>-1</sup>
妊娠阶段	1 135	365	200~359	4.0	14.5	0.65	5~10	40
保育阶段	4 563	60	3~25	1~1.5	17.0	0.70	30	80
育肥阶段	5 322	90	25~110	1.5~3.5	13.5	0.55	10	60

点,每个点采集固体粪便约 200 g,装入样品混合盆中混匀,采用四分法取 3 个样品,每个样品约 450 g。其中 1 个不进行任何预处理用于测定含水率、pH 值等指标,另外 2 个需要进行加酸预处理,用于测定其他指标和留样备用。酸溶液为 4.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,添加比例为 5:1(W/V)。粪便样品保存在低温运输箱中(4℃左右),24 h 之内送至检测实验室测定分析。

(2)污水样品:采用自制取水器,每个取样点随机布置 3 个采样点,将取样器浸入水槽采样点液面下有效水深的一半采集样品,将所采样品倒入 20 L 混合桶中,在不同采样点连续采集数次,使混合桶中的污水量达到 10~15 L。搅拌桶中液体,使样品混合均匀后分装。每批次采集 2 个样品,1 个送样分析,1 个作为备用。依据 GB 12999—1991《水质采样样品的保存和管理技术规定》要求对污水样品进行现场预处理和保存,其中需要测定 COD、TN、氨氮(Ammonia nitrogen, NH<sub>3</sub>-N)和 TP 指标的样品用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节 pH<2,24 h 之内送至检测实验室测定分析。

#### 1.2.4 测定方法

粪便样品分析指标:含水率、有机质(Organic matter, OM)、挥发性固体(Volatile solid, VS)、TN 和 TP;污水样品分析指标:COD<sub>Cr</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP。测定方法详见表 2。

#### 1.3 数据分析

全年粪便(尿)产生量按公式(1)计算:

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^p f_i \times N_i) \times 90}{1\ 000} \quad (1)$$

式中:F 为猪粪(尿)总产生量,t;l 为季节;p 为季节数;f 为日产粪(尿)量,kg·头<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>;N 为猪数量,头;i 为猪群种类,本研究中为妊娠母猪、保育猪和育肥猪;90 为每个季节的天数;1 000 为单位转换系数。

基于污水利用的匹配农田面积按公式(2)计算:

$$B_{N,P} = \frac{R_{N,P} \times (100 - L_{N,P})}{100 \times D_{N,P}} \quad (2)$$

式中:B<sub>N,P</sub> 为基于污水养分(以 TN 或 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)的种植作物农田匹配面积, hm<sup>2</sup>;R<sub>N,P</sub> 为污水养分(以 TN 或 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)量, kg;L<sub>N,P</sub> 为沼液利用过程中的养分(以 TN 或 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)损失率, %;D<sub>N,P</sub> 为作物养分(以 TN 或 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)需求量, kg·hm<sup>-2</sup>;100 为单位转换系数。

各指标在不同处理环节的差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用最小显著差法(Least-Significant Difference, LSD),α=0.05。数据分析软件为 SPSS 13.0(SPSS 公司,美国)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粪污产生量及养分含量

不同猪群排泄系数参考本研究室前期工作结果<sup>[12]</sup>,通过计算得到各季度及全年粪尿产生量(表 3)。全年粪尿总产生量约为 15 082.7 t,各季节排放量大小表现为夏季>秋季>冬季>春季。这主要与养殖数量和动物代谢有关。该猪场清粪方式为人工干清粪,冲洗废水(含尿)年排放总量为 29 715.8 m<sup>3</sup>,各季节排放量大小表现为夏季>秋季>春季>冬季。除了与养殖数量有关外,夏季防疫和冲洗降温也是重要的因素。猪场污水排放量为 0.68~0.99 m<sup>3</sup>·百头<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>,符合《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)<sup>[25]</sup>。

粪便和污水中主要理化指标含量如表 4 所示。可以看出,污水中 TN 和 TP 在不同季节间差异显著(P<0.05)。总体上,粪便中 OM 和 TN 与前期研究结果相近<sup>[10]</sup>,但 TP 略高,可能是由于饲料中磷含量高(表 1)造成的。污水中各指标均表现为冬季>夏季>春季>秋季。除了不同季节猪尿中养分含量的差异外<sup>[12]</sup>,冬季污水中各指标浓度高的主要原因是由于本季冲洗水

表 2 粪便及污水的检测指标和方法

Table 2 The testing indicators and methods for manure and waste water

项目	指标	测定方法	方法标准号
粪便	含水率	复混肥料中游离水含量测定 真空烘箱法	GB 8576—1988
	VS	煤的工业分析方法	GB/T 212—2008
	OM	有机肥料(有机质含量测定)	NY 525—2012
	TN	有机肥料(全氮含量测定)	NY 525—2012
	TP	有机肥料(全磷含量测定)	NY 525—2012
污水	COD <sub>Cr</sub>	水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法	HJ 828—2017
	NH <sub>3</sub> -N	水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法	HJ 535—2009
	TN	水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636—2012
	TP	水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法	GB 11893—1989

表3 全年猪场粪污产生量

Table 3 Annual production of manure and waste water in the monitoring swine farm

季节	粪便/t					尿液/t				污水(含尿)收集量/m <sup>3</sup>
	妊娠猪	保育猪	育肥猪	总产量	总收集量	妊娠猪	保育猪	育肥猪	总产量	
春季	149.0	263.3	418.4	830.8	800.0	640.4	430.9	1 078.4	2 149.8	6 379.8
夏季	156.1	282.0	719.2	1 157.3	1 050.0	954.1	474.6	2 245.0	3 673.6	9 883.6
秋季	161.8	363.7	537.0	1 062.5	950.0	686.3	559.6	1 442.6	2 688.5	7 818.5
冬季	154.2	362.5	519.6	1 036.3	900.0	630.3	672.0	1 181.7	2 483.9	5 633.9
合计	621.1	1 271.5	2 194.2	4 086.9	3 700.0	2 911.1	2 137.1	5 947.7	10 995.8	29 715.8

表4 猪粪及污水中各指标含量

Table 4 Contents of the major indicators in swine manure and waste water

项目	指标	春季	夏季	秋季	冬季	全年均值
粪便	VS/%	21.6±0.3a	20.4±0.4a	20.5±0.6a	20.7±0.3a	20.8±0.2
	OM/%	49.4±0.2b	48.0±1.6b	48.8±0.1b	55.8±0.4a	50.5±1.0
	TN/%	3.3±0.1a	2.7±0.2b	2.8±0.1b	2.9±0.1b	3.0±0.1
	TP/%	3.1±0.1b	2.7±0.1c	4.1±0.3a	3.8±0.1a	3.4±0.2
污水	COD <sub>Cr</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	32 045.5±869.3b	35 740.4±1 286.5b	12 258.9±940.4c	53 328.1±1 454.7a	33 343.2±4 426.7
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	2 667.1±83.8b	2 870.9±29.9ab	1 737.4±68.9c	2 962.9±33.7a	2 024.2±105.4
	NH <sub>3</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	2 063.2±45.4b	2 168.2±47.5a	1 489.5±35.4c	2 375.9±152.1a	2 559.6±148.8
	TP/mg·L <sup>-1</sup>	957.6±63.6b	585.9±10.0c	441.0±10.9d	1 299.4±42.4a	812.6±105.4

注:表中数值为据平均值±标准误(n=3);不同小写字母表示各季节间的差异显著(P<0.05)。下同。

用量少,导致其被稀释程度较小;而夏季虽然用水量,但粪尿产生量也最高,所以污水中各指标水平偏高。

## 2.2 各处理环节对污水中 TN 和 TP 等的去除

相对于粪便而言,规模化猪场污水产生量大、达标排放难、处理成本高,其无害化处理一直是养殖污染防治的难题<sup>[17]</sup>。大中型沼气工程是处理规模养殖场粪污的有效途径之一,不仅可获得清洁能源,也是减轻环境污染问题、发展生态农业的重要纽带<sup>[18]</sup>。监测猪场虽然配备二级发酵罐,但出料沼液中各污染指标浓度仍然偏高(图2)。经过厌氧发酵,沼液中的 COD<sub>Cr</sub> 去除率<40%(表5),说明有相当部分的污水未得到充分降解。沼液中 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度远大于 5 000 mg·L<sup>-1</sup>(图2a),未达到 GB 18596—2001 规定的污水排放要求浓度。这与目前规模养殖场沼气工程运行存在的问题相一致<sup>[18-19]</sup>:一是猪场清粪过程中会向进料池加入部分猪粪,导致发酵原料浓度过高;二是水力停留时间过短(10~15 d),消化不良<sup>[19-20]</sup>。厌氧发酵对 TN 和 TP 的削减率分别为 11%~25%和 8%~57%(表5),沼液中 TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度(图2b~图2d)均远高于 GB 18596—2001 的规定。TN 的削减率与前期的室内模拟结果相符<sup>[21]</sup>,但 TP 削减率相对较低,主要与发酵不完全有关<sup>[22]</sup>。

多级沉淀池对减少沼液的二次环境污染有重要的作用<sup>[8,23]</sup>。分析结果表明,通过沉淀池处理后污水中 COD<sub>Cr</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度均有大幅降低,且三级沉淀池处理效果显著高于单级沉淀池(图2),削减率分别为>95%、>80%、>80%和>95%(表5)。但经沉淀池处理后出水中 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度仍然高于 GB 18596—2001 规定的排放浓度。可见,由于沉淀池是一种利用天然净化能力对污水进行处理的设施,其净化过程与自然水体的自净过程相似,因此其对养殖污水中氮、磷等物质的削减作用有限。

水生植物对于污水生态处理起着重要作用,其工艺简单、投资少、效果明显,是养殖场污水深度净化处理的有效途径<sup>[24-25]</sup>。本研究中,猪场水生植物塘种植的植物为水葫芦和空心莲子草,具有极强的氮磷去除效果<sup>[25-26]</sup>。结果表明,水生植物塘对沉淀池的出水具有良好的净化作用,特别是对春、秋季污水中 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除效果最好,削减率均达 95%以上,处理后出水达到 GB 18596—2001 的排放标准。同时,收集的水生植物可作为猪饲料加以利用,达到经济和生态效益双赢。

## 2.3 多级粪污处理模式下农牧结合规模配置

畜禽粪便作为肥料还田利用是规模养殖场粪污处理和资源循环利用最有效的途径<sup>[27]</sup>。美国相关法规

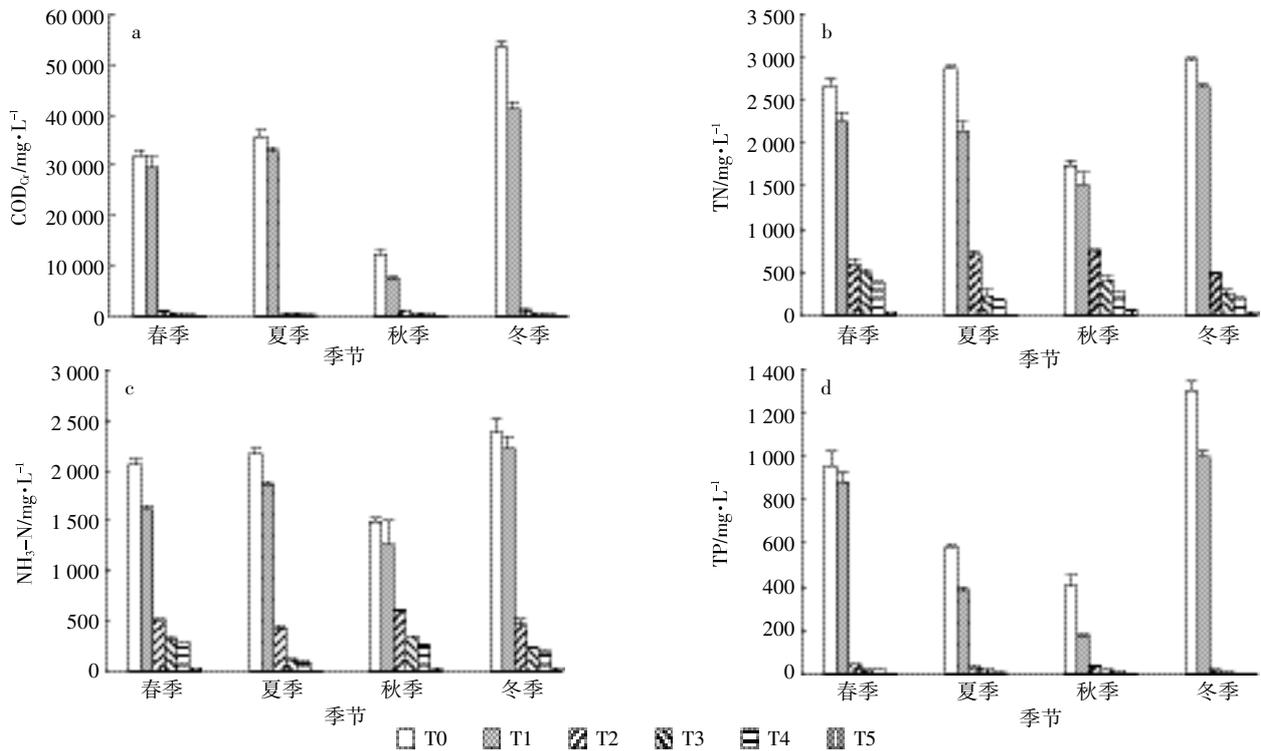


图 2 污水处理后的污染物浓度

Figure 2 Concentrations of pollutants in waste water after treatments

表 5 各污水处理环节对氮、磷等物质的去除率(%)

Table 5 The removal rates for nitrogen and phosphorus after each waste water treatment steps(%)

主要指标	季节	处理环节				
		T1	T2	T3	T4	T5
COD <sub>Cr</sub>	春季	7.9	96.7	97.6	98.0	99.7
	夏季	8.6	98.0	98.3	99.0	99.9
	秋季	37.4	89.7	93.7	95.1	98.7
	冬季	22.5	97.5	98.9	99.3	99.8
TN	春季	15.6	77.5	81.5	85.9	98.7
	夏季	25.3	75.7	92.4	93.7	99.6
	秋季	12.1	56.9	75.9	84.2	96.5
	冬季	10.6	83.6	91.3	93.6	98.5
NH <sub>3</sub> -N	春季	22.1	75.4	84.2	85.7	98.4
	夏季	14.3	80.0	94.6	95.7	99.7
	秋季	14.8	59.6	76.4	82.5	97.7
	冬季	6.5	79.9	90.2	91.8	98.5
TP	春季	7.9	95.3	98.0	97.7	99.7
	夏季	35.0	94.8	95.9	97.9	99.8
	秋季	57.2	90.7	94.9	95.5	99.0
	冬季	23.3	98.5	99.4	99.6	99.8

规定,所有规模化畜禽养殖场都必须制定综合养分管理计划(Comprehensive nutrient management planning, CNMP),并据此进行农田利用;而欧洲(如荷兰)虽然

土地资源有限,但仍有 75%的畜禽粪便通过农田利用进行消纳<sup>[4]</sup>。除了收集过程中损失的粪便和氮磷<sup>[10]</sup>,猪场全年可收集的粪便总量约为 3 700 t,收集率约为 86.8%~96.3%;全年粪便可利用的 TN 和 TP 量分别为 107.45 t 和 126.30 t,污水中二者分别为 75.67 t 和 22.67 t(表 6),全量还田后每年可节约尿素和磷肥(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)近 400 t 和 340 t。

从养分全量消纳和二次污染防治的角度分析,要完全消纳粪污直接厌氧发酵后的出水,猪场至少需匹配粮油作物地 400 hm<sup>2</sup>,或茄果类蔬菜地 200 hm<sup>2</sup>,或果树苗木地 667 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,而目前的农田匹配量远小于理论需求量。因此,在集约化程度高、经济发达、土地资源有限地区的养殖场,对粪污进行逐级处理是非常必要的。目前,猪场粪便主要用于厌氧发酵产沼气和生产有机肥,夏季用于厌氧发酵的粪便量远高于其他季节,主要由于夏季温度较高,露天堆放臭味过大,因此大部分先进入沼气池发酵。收集的污水经厌氧发酵后,出水沼液的 70%~90%进入下一级污水净化系统,只有约 10%~30%的沼液直接用于 20 hm<sup>2</sup>苗木基地的灌溉(表 7)。根据规模养猪场农牧结合规模配置研究,每 667 m<sup>2</sup>苗木地大约可消纳 20~30 t 沼液<sup>[9]</sup>;由于本研究中沼液氮磷含量过高,所以每 667 m<sup>2</sup>消纳量

表6 全年猪场粪污养分总量

Table 6 Annual nutrient production in the monitoring swine farm

季节	粪便		污水	
	TN/t	TP/t	TN/t	TP/t
春季	26.40	24.80	17.02	6.11
夏季	28.35	28.35	28.37	5.79
秋季	26.60	38.95	13.58	3.45
冬季	26.10	34.20	16.69	7.32
合计	107.45	126.30	75.67	22.67

表7 猪场粪污主要利用方式和比例

Table 7 Utilization patterns and application rates of manure and waste water in the monitoring swine farm

季节	粪利用方式及比例/%		污水利用方式及比例/%		
	生产沼气	生产有机肥	生产沼气	农田回用*	净化处理*
春季	20	80	100	30	70
夏季	60	40	100	10	90
秋季	30	70	100	20	80
冬季	20	80	100	10	90

注:\* 指生产沼气后排出的沼液。

大约为 15~20 t。因此,除了春季沼液农田施用量每 667 m<sup>2</sup> 25.5 t 高于农田承载量外,其他季节沼液的农田施用量基本合理,建议春季沼液农田施用比例约为沼液总量的 23%。

### 3 结论

通过分析苏南地区规模猪场多级处理模式下粪污中氮、磷含量,结合猪群结构及季节变化,计算出猪场全年粪、尿总产生量分别约为 4 086.9 t 和 10 995.8 t,粪便收集率约为 90.6%,粪便中 TN 和 TP 量分别为 183.12 t 和 148.97 t,为区域规模猪场粪便农田负荷和污染风险评价提供了更加准确的数据支撑。

猪场匹配的农田只能消纳粪污总量的 10%~30%,而剩余的 70%~90%粪污需进行逐级净化。经过二级发酵罐后氮、磷去除率小于 25.3%和 57.2%,进一步通过三级沉淀池处理后二者削减 80%以上,最终通过水生植物生态处理后二者去除率均达 95%以上。此工艺是典型养殖废水厌氧消化工艺的深化,是可广泛应用的成熟工艺,对污水中氮、磷的去除效果显著,特别适用于周边可消纳粪污农田面积较小的规模养殖场。

#### 参考文献:

[1] 王方浩,马文奇,窦争霞,等.中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J].中国环境科学,2006,26(5):614-617.

WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):614-617. (in Chinese)

[2] 杨林章,冯彦房,施卫明,等.我国农业面源污染治理技术研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.

YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101. (in Chinese)

[3] 沈根祥,钱晓雍,梁丹涛,等.基于氮磷养分管理的畜禽场粪便匹配农田面积[J].农业工程学报,2007,22(增刊2):268-271.

SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, LIANG Dan-tao, et al. Research on suitable area for cropland application of animal manure based on nutrient management of nitrogen and phosphorus[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 22(S2):268-271. (in Chinese)

[4] 董红敏.力推肥料化和能源化利用,破解畜禽粪污治理难题[N/OL]. [2017-10-10]. [http://szb.farmer.com.cn/nmrb/html/2017-07/10/nw.D110000nmrb\\_20170710\\_2-02.htm?div=-1](http://szb.farmer.com.cn/nmrb/html/2017-07/10/nw.D110000nmrb_20170710_2-02.htm?div=-1).

DONG Hong-min. Solving problems of pollution control by fertilization and recycle of livestock and poultry manure[N/OL]. [2017-10-10]. [http://szb.farmer.com.cn/nmrb/html/2017-07/10/nw.D110000nmrb\\_20170710\\_2-02.htm?div=-1](http://szb.farmer.com.cn/nmrb/html/2017-07/10/nw.D110000nmrb_20170710_2-02.htm?div=-1). (in Chinese)

[5] 薛念涛.畜禽污染防治现状与趋势的文献计量分析[J].农业环境科学学报,2014,33(3):429-434.

XUE Nian-tao. Status and trend of control over livestock and poultry pollution based on bibliometrics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):429-434. (in Chinese)

[6] 仇焕广,廖绍攀,井月,等.我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J].环境科学,2013,34(7):2766-2774.

QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7):2766-2774. (in Chinese)

[7] 李帷,李艳霞,张丰松,等.东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26(6):2350-2357.

LI Wei, LI Yan-xia, ZHANG Feng-song, et al. The spatial and temporal distribution features of animal production in three northeast provinces and the impacts of manure nutrients on the local environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2350-2357. (in Chinese)

[8] 靳红梅,常志州,叶小梅,等.江苏省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]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1):291-296. (in Chinese)

[9] 盛婧,孙国峰,郑建初.典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究 I.固液分离-液体厌氧发酵模式[J].中国生态农业学报,2015,23(2):199-206.

SHENG Jing, SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment modes: A case study of

- anaerobic liquid fermentation following solid-liquid separation of waste [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 199-206. (in Chinese)
- [10] 杜娟, 张永青, 徐文红, 等. 基于种养结合下南京市畜禽养殖承载能力的研究[J]. *畜牧与兽医*, 2015, 47(12): 69-74.  
DU Juan, ZHANG Yong-qing, XU Wen-hong, et al. The capacity potential of livestock farms in Nanjing based on planting combined with raising[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2015, 47(12): 69-74. (in Chinese)
- [11] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 435-445.  
ZHU Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435-445. (in Chinese)
- [12] 郭德杰, 吴华山, 马艳, 等. 不同猪群粪、尿产生量的监测[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(3): 516-522.  
GUO De-jie, WU Hua-shan, MA Yan, et al. Monitoring of the amount of pig manure and urine in different swineries[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 27(3): 516-522. (in Chinese)
- [13] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 303-308.  
DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 303-308. (in Chinese)
- [14] 朱志平, 董红敏, 尚斌, 等. 规模化猪场固体粪便收集系数与成分测定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增刊 2): 179-182.  
ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Measurement of solid manure collection coefficient and composition on a concentrated pig farm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(S2): 179-182. (in Chinese)
- [15] Pohl S. 猪场的粪便管理系统[J]. *国外畜牧学·猪与禽*, 2003, 23(5): 41-45.  
Pohl S. Manure management systems for swine operations[J]. *Animal Science Abroad·Pigs and Poultry*, 2003, 23(5): 41-45. (in Chinese)
- [16] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积及处理单元氮损失率研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1068-1077.  
CHANG Zhi-zhou, JIN Hong-mei, HUANG Hong-ying, et al. Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1068-1077. (in Chinese)
- [17] 李同, 董红敏, 陶秀萍. 畜禽养殖污水消毒技术研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(2): 137-143.  
LI Tong, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping. Research progress on disinfection technology of wastewater from animal production[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(2): 137-143. (in Chinese)
- [18] 李景明, 薛梅. 中国沼气产业发展的回顾与展望[J]. *可再生能源*, 2010, 28(6): 1-5.  
LI Jing-ming, XUE Mei. Review and prospect on biogas development in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(6): 1-5. (in Chinese)
- [19] 叶小梅, 常志州, 钱玉婷, 等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 222-227.  
YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou, QIAN Yu-ting, et al. Investigation on large and medium scale biogas plants and biological properties of digestate in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 222-227. (in Chinese)
- [20] Madani-Hosseini M, Mulligan C N, Barrington S. Microbial kinetic for In-Storage-Psychrophilic Anaerobic Digestion (ISPAD)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 59-68.
- [21] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 208-214.  
JIN Hong-mei, FU Guang-qing, CHANG Zhi-zhou, et al. Distribution of nitrogen in liquid and solid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(21): 208-214. (in Chinese)
- [22] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 179-184.  
FU Guang-qing, YE Xiao-mei, JIN Hong-mei, et al. Effect of anaerobic digestion on phosphorus transformation of both pig and dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 179-184. (in Chinese)
- [23] Jin H M, Chang Z Z. Distribution of heavy metal contents and chemical fractions in anaerobically digested manure slurry[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 164(3): 268-282.
- [24] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(增刊): 1-6.  
HUANG Liang, WU Nai-cheng, TANG Tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(Suppl): 1-6. (in Chinese)
- [25] 张志勇, 刘海琴, 严少华, 等. 水葫芦去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(5): 1039-1046.  
ZHANG Zhi-yong, LIU Hai-qin, YAN Shao-hua, et al. Comparison of the removal ability of nitrogen and phosphorus by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in different eutrophic water[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(5): 1039-1046. (in Chinese)
- [26] 刘海琴, 高运强, 宋伟, 等. 水花生去除富营养化水体中氮磷及抑藻效果的实验研究[J]. *现代农业研究*, 2008, 15(2): 89-92.  
LIU Hai-qin, GAO Yun-qiang, SONG Wei, et al. A experimental study on the removal the nitrogen phosphorus of eutrophication-water and restraint of algae by *Alternanthera philoxeroides*[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2008, 15(2): 89-92. (in Chinese)
- [27] 尹昌斌, 周颖, 刘利花. 我国循环农业发展理论与实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 47-53.  
YIN Chang-bin, ZHOU Ying, LIU Li-hua. Theory and practice of recycle agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 47-53. (in Chinese)