

猪舍内粪污废弃物和有害气体减量化工程技术研究

刘安芳¹, 阮蓉丹^{1,2}, 李厅厅^{1,2}, 刘作华², 曾雅琼²,
龙定彪², 蒲施桦², 王 浩^{2*}

(1. 西南大学动物科学学院, 重庆 402460;

2. 重庆市畜牧科学院, 农业农村部西南设施养殖工程科学观测实验站, 重庆 402460)

摘 要: 源头减量和过程控制是猪场废弃物综合治理的关键环节, 而猪舍是废弃物产生的源头场所, 该文针对猪舍内部污水和有害气体等养殖废弃物, 从饮水系统、圈栏设计和清粪方式等 3 个方面, 介绍分析了当前国内外在舍内废弃物减量化工程技术领域的研究进展。其中减少猪只饮水浪费水量是舍内污水减量的首要环节, 通过优化饮水器选型、调整饮水器安装方式、选择适当水流速度可以降低饮水浪费水量; 合理的圈栏布置和地面类型可以促进猪只定点排泄, 从而降低圈栏污染程度以及舍内有害气体浓度, 配合适当的圈舍冲洗方式可以减少大量圈舍冲洗用水; 不同的清粪方式会影响舍内空气环境、污水产生量及污染物浓度, 与干清粪相比, 水冲粪和水泡粪都存在耗水量大、污水产生量大及其污染物浓度高、舍内有害气体含量高等问题, 从清洁生产的角度考虑, 干清粪工艺是规模化猪场的必然选择。该文旨在为减少猪场废弃物总量、降低处理利用成本和实现清洁健康养殖提供工程技术支撑, 促进中国生猪养殖业绿色转型升级。

关键词: 废弃物; 污染控制; 猪场; 减量化; 圈栏布局; 清粪

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.15.025

中图分类号: S817.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-15-0200-11

刘安芳, 阮蓉丹, 李厅厅, 刘作华, 曾雅琼, 龙定彪, 蒲施桦, 王 浩. 猪舍内粪污废弃物和有害气体减量化工程技术研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 200—210. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.15.025 <http://www.tcsae.org>
Liu Anfang, Ruan Rongdan, Li Tingting, Liu Zuohua, Zeng Yaqiong, Long Dingbiao, Pu Shihua, Wang Hao. Research progress of in-house reduce engineering technology for piggery manure wastes and poisonous gas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(15): 200—210. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.15.025 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来, 中国生猪养殖业规模化水平不断提高, 为食品供给提供了坚实保障, 但大量养殖废弃物没有得到有效处理和利用, 成为农村环境治理的一大难题, 也制约了生猪养殖产业自身的可持续发展。养殖废弃物综合治理的路径包括源头减量、过程控制、末端利用 3 个环节, 当前, 国内外大部分的养殖污染治理都不注重源头减排和过程治理, 导致养殖过程中产生大量的有害气体和粪污, 尤其是污水产生量偏大。Donham 等^[1]研究发现当畜舍中的 NH_3 浓度过高会危害饲养人员的健康 (达到 7 mg/m^3), 还会引起猪的应激反应 (达到 $11 \sim 25 \text{ mg/m}^3$)。同时, 固态粪便中的氮、磷、有机质等营养物质溶入污水中, 使粪便的肥效降低, 污水的排放量大、成分复杂且浓度高, 致使后续处理难度增加; 并且粪污处理技术难度大、费用高, 很多猪场都没有设置配套的粪污处理

设备, 猪场产生的粪污得不到规范处理而直接排放; 由此给人们的生存环境带来了许多环境污染问题。针对此类环境问题, 1989 年联合国环境规划署首次提出“清洁生产”的概念——生产的整个过程都进行污染控制^[2]。清洁生产是以节能、降耗、减污为目标, 以技术和管理为手段, 注重在污染产生前就将其减弱。如何利用新工艺、新技术、新设备等从猪舍内部污染物产生的源头, 如粪尿量、饮水浪费水、圈舍冲洗水以及清粪方式等入手^[3], 尽量减少其产生量和排放量, 实现废弃物减量化已经成为养殖污染治理的首要环节。

规模化猪场所采用的饲养管理方式及其配套设施, 包括饲喂、饮水、清粪方式和圈栏设计等都会直接影响猪舍内环境控制、后期粪污处理与资源化利用的水平。在实际生产中通过科学的饲养管理, 同时采用节水型饮水器、合理的圈栏布置与圈舍冲洗方式以及清洁的清粪工艺等, 将养殖污染控制在生猪养殖的源头, 降低舍内有害气体浓度, 减少污水的产生及污染物浓度, 提高资源化利用的水平, 降低生猪养殖对环境的影响。目前, 解决生猪养殖污染的最佳途径是: 在生猪养殖过程中实行污染物源头减排, 同时对养殖中产生的污染物进行无害化处理, 最后进行资源化利用^[4]。本文从 3 个方面分别介绍了国内外的减少饮水浪费水量、控制圈舍冲洗水量、优化清粪方式等污染源减排措施, 并分析了各种措施所能

收稿日期: 2019-05-21 修订日期: 2019-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0500704); 重庆市财政专项资金项目 (19520); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-35)

作者简介: 刘安芳, 教授, 研究方向为动物遗传育种与繁殖。

Email: anfangliu@126.com

*通信作者: 王 浩, 助理研究员, 研究方向为畜禽养殖设施与智能化。

Email: wanghaocau@163.com

中国农业工程学会会员 (E040400010M)

达到的减排效果，为国内开展生猪清洁生产提供参考。

1 减少猪只饮水浪费，间接减少粪水量

减少饮水浪费是养殖污水减排的首要环节，大量研究表明通过优化饮水器设计、调整饮水器的安装方式、选择适当的水流速度等都可以降低浪费水量。在生猪养殖过程中应用自动饮水器是为保证猪能随时饮用到新鲜水，但是自动饮水器一般都存在浪费水的问题，如表 1 所示。猪只在饮水、玩水以及蹭到饮水器的水嘴等过程中都会造成水的浪费^[8]，同时饮水器如果管理不善也会浪

费大量的水，例如 Brooks^[12]发现乳头式饮水器管理不善会浪费 60%左右的水。当环境温度较高时猪只需要大量的水来降低自身的热量，使机体达到舒适状态，所以也会造成大量的水浪费。饮水器浪费水一般会流入粪沟与粪尿混合成为污水，导致污水量以及粪污处理难度增加^[14]，所以生产中可以从浪费水量的角度间接分析饮水器的使用对控制污水量的影响。因此通过优化饮水器的设计来减少水的浪费可以从源头降低污水污染，生产管理中猪只的饮水浪费水量与饮水器的选型、安装方式(高度、密度、位置)以及水流速度等有密切关系^[15-16]。

表 1 不同饮水器的日浪费水量
Table 1 Dailywater leakage amount of different drinkers

猪只类型 Types of pig	饮水器类型 Types of drinker	浪费水量 Water leakage/ (L·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	总用水量 Water consumption/ (L·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	浪费水量/总用水量 Water leakage/water consumption/%	参考文献 Reference
保育猪 Nursery pig	杯式 Bowl drinker	—	—	15 (最高环境温度 25 ℃)	[5]
	杯式 Bowl drinker	13.5	16.2	83 (最高环境温度 32 ℃)	
	标准 Swing 式 Standard Swing drinker	4.4	9.4	46	[6]
	带片 Swing 式 Swing drinker with blades	6.8	9.4	60	
	鸭嘴式 Bite drinker	1.93	7.73	25	
	Swing 式 Swing drinker	1.42	8.07	18	[7]
	杯式 Bowl drinker	1.13	7.46	15	
生长猪 Growing pigs	鸭嘴式 Bite drinker	3.3	8.7	38	[8]
	乳头式 Nipple drinker	2.14	7.14	>30	[9]
	乳头式 Nipple drinker	1.29	5.29	24	[10]
育肥猪 Fattening pigs	乳头式 Nipple drinker	2.06	7.44	27	[10-11]
	乳头式 Nipple drinker	/	/	60 (管理不善)	[12]
	杯式 Bowl drinker	14.27	22.89	62	[13]

1.1 饮水器类型

目前猪用自动饮水器包括鸭嘴式、乳头式、杯式和 Swing 饮水器^[17]，如图 1 所示。

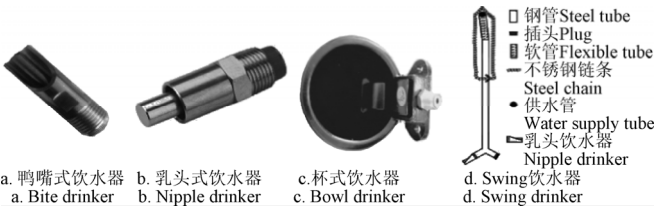


图 1 猪用自动饮水器
Fig.1 Automatic drinker for pig

在饲养管理过程中按照不同阶段猪只的饮水标准配置合适的饮水器，可以减少水的浪费。大量研究人员发现给保育阶段的猪配制杯式或 Swing 饮水器、生长阶段（20~30 kg 的育成猪）的猪配制乳头式饮水器能达到最少的浪费水量^[8-9]。彭河山等^[18]将鸭嘴式和碗式饮水器组装为一种新的组合式饮水器，通过试验发现一头 75 kg 的育肥猪利用鸭嘴式饮水器时会产生 11.8 L/d 的污水量，采用组合式饮水器可减少 10.1 L/d 的污水量。组合式饮水器在饮水过程中比鸭嘴式饮水器的污水产生量平均能减少 85%左右，碗式饮水器比鸭嘴式和乳头式饮水器能减少 50%以上的水流入污水中。目前市场上主流的杯式饮水

器价格在 30~60 元/个不等，鸭嘴式、乳头式饮水器都在 10 元/个左右。乳头式饮水器与鸭嘴式饮水器一样都属于造价比较低的饮水设备，但是这 2 种饮水器都有浪费水的问题，且因水流过急而不利于猪只福利。杯式饮水器虽然造价相对较高，但是可以有效提高猪只福利、节约用水量。

1.2 饮水器安装方式

合适的安装高度、密度及位置可以使猪只减少在饮水过程中的打斗，还可以避免猪只玩弄饮水器，从而减少水的浪费，避免污水量的增加，维持猪舍环境卫生。Brumm^[19]推荐在生长期和育肥期将乳头式和 Swing 饮水器安装在高出该圈最小猪肩部（肩高[mm]=150×体质量[kg]^{0.33}）^[20]5 cm 的高度处能有效减少水的浪费量；Gonyou 等^[21]推荐杯式饮水器的安装高度应该在最小猪高度的 40%；Torrey 等^[22]和 Tavares 等^[14]认为对于断奶仔猪和生长育肥猪来说，杯式饮水器应该分别安装在离地面高出 10 和 20 cm 的地方。根据猪只的生长阶段来调整饮水器的高度可以减少浪费水量，但是在实际的养殖过程中不停地调整饮水器高度会增加猪场的运行成本。相邻饮水器之间的距离至少要在 500 mm 以上，保证有足够的空间能让多头猪同时喝水^[3]。饮水器的安装密度与饲养规模呈正相关，当圈舍内的猪只数量大于 10 头时，为避免饮水前的打斗、排队等行为，应保证 8~10 头猪用 1 个饮水器^[23]。

粪的时间。Vermeer 等^[28]发现与只在舍内漏缝地板区域安装一个饮水器相比, 在舍外漏缝地板区额外增加一个饮水器会增加舍内的污染程度, 尤其是舍内饮水器周围。在舍外漏缝地板区域安装饮水器可以使圈栏更加清洁; 但是应避免同时在舍内舍外安装饮水器, 因为在有舍外饮水器时, 猪只一般不会在舍内饮水, 如果猪不使用舍内饮水器, 那这一区域就会成为排泄区。Andersen 等^[39]研究表明母猪在排泄时头会尽量远离休息区和饲槽。当饲槽朝向邻近的圈栏时, 母猪排泄时的首选位置是头朝向过道, 因此在饲槽相对端的漏缝地板区和实体地板区设置一段隔墙, 可以帮助母猪在排泄时将其身体的后 1/4 保持在漏粪地板上。

2.1.2 圈栏形状与面积

Wiegand 等^[40]和李以翠等^[42]都发现圈栏形状对排泄区面积没有影响, 但是将排泄区设置在圈栏短向侧墙处, 猪只远离干扰的空间就相对大一些。如果将圈栏设计的过于长窄, 而且不论其他猪在躺卧还是采食, 排泄猪只都不愿意经过它们到排泄区排泄。同时, 李以翠等^[42]发现圈栏面积是影响猪只排泄地点选择的最主要因素, 在育成阶段面积较小圈舍的猪会到漏缝地板处排泄、实体地板处躺卧。饲养密度过大导致猪只活动空间过小, 不能形成功能分区, 猪会在排泄区躺卧; 饲养密度过小导致猪只不能形成群体行为而到处排泄, 使排泄区变大。杨伟等^[46]研究发现相对于小圈饲养 (18 头/圈) 来说, 大圈饲养 (54 头/圈) 能有效减少圈栏的污染面积。饲养工艺上建议将育成和育肥阶段分开, 并设计适宜的饲养密度, 促使猪只能够定点排泄。

2.1.3 圈栏分隔方式

Hacker 等^[31]和李以翠等^[42]设计了 2 种类型的圈栏分隔方式, 并通过试验发现封闭式圈栏比开放式圈栏的排泄区更集中、圈栏更干净。猪只通常在通风较好的地方排泄, 避免在空气流动较大的地方躺卧^[47]。圈栏的分隔方式是影响猪圈微环境的重要因素, 实体隔墙可以减少空气流动、保持躺卧区温暖, 使圈栏内形成温度梯度, 并刺激猪只寻找潮湿、凉爽、开放的区域进行排泄。研究发现若圈栏内躺卧区的温度比排泄区高, 躺卧区的污染程度会相对降低^[48-50]。但是, Aarnink 等^[51]发现在夏季温度较高时, 随着舍内温度的升高, 猪更倾向于躺卧在凉爽的漏缝地板区域, 而实体地板区域则被当作排泄区。例如, Marko 等^[45]研究发现当舍内温度升高 6 °C, 实体地板上躺卧行为减少 42.3%, 排尿和排便行为分别增加 75.8%和 139.5%。同时由于猪的领地行为, 圈舍的隔栏交界处也容易形成排泄区。

2.2 圈舍地面类型

目前国内外规模化猪场常用的圈舍地面包括漏缝地板 (半漏缝地板和全漏缝地板)、实体地板 (可铺设垫料) 以及生物发酵床等, 如图 3 所示。在选择猪舍地板类型时不但要考虑猪只的舒适度、地板的耐用性和成本, 还要考虑地板的易清洁性。如果圈舍地板设计不合理会导致猪没有固定的排泄区, 造成舍内环境卫生差; 且地

面残留的粪便越多, 污染程度越高, 此时需要用大量的水冲洗圈舍, 造成水的浪费且增加粪污量和污水处理难度以及清粪工作强度, 降低资源化利用的水平, 根本不能满足清洁生产的要求。

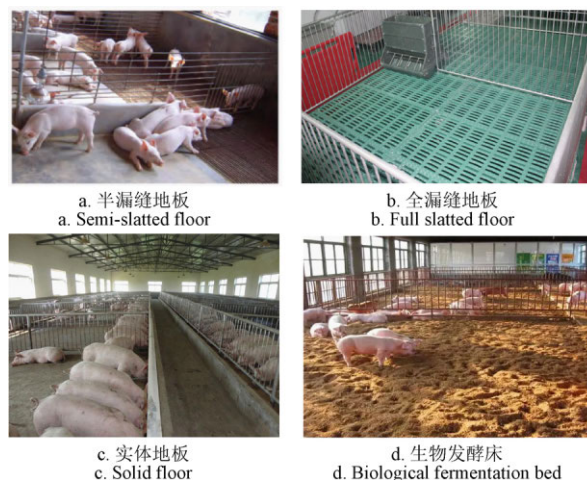


图 3 猪舍常用圈舍地面类型

Fig.3 Ground types of common pigsty pens

2.2.1 漏缝地板对有害气体及漏粪性的影响

使用基于干清粪工艺的漏缝地板可以实现粪尿、污水的初步分离, 并且保持畜舍的清洁度, 但是漏缝地板上的猪粪只有经过猪的踩踏才会从缝隙中落下。漏缝地板的面积、板条结构及材料等都会影响 NH_3 的排放, 同时对于漏缝地板来说, 关注重点还有地板的漏粪性。漏粪地板的漏粪性与地板的材料、厚度、形状和缝隙宽度等相关, 当材料越光滑、地板越薄、缝隙越宽漏粪性越好^[52]。

漏缝地板的材料会影响其漏粪性及氨排放, 还会影响猪只的行为表现。用来制作漏缝地板的材料包括金属、塑料、混凝土, 混凝土地板持久耐用, 但是表面粗糙且较厚, 漏粪性不好; 金属或塑料地板表面光滑且薄, 当缝隙宽度很小时也能保证一定的漏粪性, 但容易打滑不利于猪的行动且价格较高。Aarnink 等^[53]发现在带凸起且横截面为三角形的金属材料漏缝地板区域, 猪只的躺卧行为占 6.1%, 排尿、排便行为分别占 76.2%、95.1%; 混凝土漏缝地板区域猪只的躺卧行为占 9%, 排尿、排便行为分别占 69.4%、85.6%。带凸起的漏缝地板可以减少该区域猪的躺卧行为, 从而减少实体地板上的尿液和粪便污染; 同时带凸起且横截面为三角形的金属材料漏缝地板氨排放量为 64%, 与混凝土漏缝地板相比, 其排放量显著降低 36%。

漏缝地板的缝隙有助于减少地板上粪便的堆积, 但是漏缝地板结构不合理会损伤猪蹄^[54-56]。一般地板的缝隙宽度为 10~25 mm, 缝隙越小漏粪性越差, 同时漏缝地板的断面形状也会影响漏粪性。陈刚等^[57-58]以干清粪工艺为基础研发出了缝隙宽度在 10 mm 以下的混凝土微缝地板及配套的清粪设施, 试验发现几乎所有的粪便都留在地板上。Yan 等^[59]研究了母猪产房 2 种不同的全漏

缝地板板条宽度和缝隙宽度(板条宽 105 mm、缝隙宽 19 mm、板条宽 125 mm、缝隙宽 25 mm), 结果表明 2 种结构的漏缝地板在空气质量、地板清洁度和母猪清洁度上均无显著性差异。成冰等^[60]研究了 2 种缝隙宽度和断面形状的混凝土漏缝地板的漏粪性, 发现缝隙宽度为 10 mm、断面为倒梯形的漏缝地板的漏粪性比缝隙宽度为 5 mm、断面形状为有一截直线段的倒梯形的漏缝地板的漏粪性好。Hamelin 等^[61]研究发现混凝土漏缝地板的断面上沿做成槽口形状与未做成槽口形状相比, 残留在地板上的粪便更少, 舍内氨气浓度降低 20%~40%。因此, 漏缝地板的板条宽度、断面结构及间隙宽度的适当配置, 不仅可以实现粪便的有效清除, 还可最大限度地减少猪步态的损害。

漏缝地板的面积比例会影响猪舍的氨排放量以及猪只的福利健康。Ni 等^[62]发现 NH_3 排放量与粪便对地面的污染有很高的相关性 ($r=0.852$)。例如, 与实体地板相比, 局部漏缝地板上面积累的粪便量更少, NH_3 排放量能降低 40%~60%^[63-66]。猪舍局部使用漏缝地板能有效降低 NH_3 排放量, 漏缝地板的占地面积比例降低, NH_3 排放量也会随之减少。Sun 等^[67]把猪舍漏缝地板的面积从围栏面积的 50%降到 25%, 每天的 NH_3 排放量则从 6.4 g 及减少到 5.7 g。Joahnn 等^[68]比较了漏缝地板面积 84%以上和 35%以下的 2 种猪舍在冬夏两季的 NH_3 排放量, 结果发现冬夏两季漏缝地板面积 35%以下的猪舍 NH_3 排放量比面积 84%以上的猪舍分别降低了 49%、85%。 NH_3 排放明显还受到季节的影响, 夏季时猪舍的 NH_3 释放量比冬季高, 特别是当漏缝地板的面积较大时氨气的释放量也会增加, 所以漏缝地板面积减小时夏季 NH_3 排放量的降低幅度明显比冬季时大。漏缝地板猪舍的设计可以降低舍内环境的负面影响, 但是全漏缝地板相对于半漏缝地板来说, 粪便散落面积较大, 湿度也随之增大, 因此地面污染程度较高, 而且全漏缝地板会导致猪的蹄部损伤、舒适度下降, 荷兰已经禁止使用这种地板^[69]。采用全漏缝地板需要对舍内环境进行自动调控, 对于中国来说这种耗能较高、技术难度大、密闭式全自动的调控方式显然不太适用。

2.2.2 实体地板对有害气体的影响

调查显示, 国内很多猪场圈舍实体地板都是水平的, 粪尿容易堆积在地面上, 致使清粪工作量大, 在清粪过程中要耗费大量的水来冲洗圈舍, 会导致污水量的增加; 如果粪便没有及时清出舍外, 舍内也容易产生大量有害气体, 危害猪只和饲养人员的健康。在生产中可以将地面设计一定的坡度, 例如母猪产房的地面稍微倾斜呈“V 型”与水平地面相比能减少粪尿的堆积, 有利于尿液和污水的自然流失和粪便的清除, 节约了大量的圈舍冲洗水; “V 型”地面设计舍内 NH_3 、 H_2S 质量浓度分别为 2.66、0.25 mg/m^3 , 水平地面设计舍内 NH_3 、 H_2S 质量浓度分别为 5.48、0.31 mg/m^3 , “V 型”地面设计能有效降低舍内 NH_3 和 H_2S 浓度。朱志平等^[70]在猪舍水泥地板的基础上铺设了垫草, 结果发现垫料地板猪舍的 NH_3 质量

浓度为 5.9~6.8 mg/m^3 , 水泥地板猪舍的 NH_3 质量浓度 14.5~16.7 mg/m^3 , 垫料地板猪舍的 NH_3 浓度只有水泥地板猪舍的 40%。Vermeer 等^[28]发现在舍外实心地板上铺设新鲜切碎的苜蓿干草可以吸引更多的猪到舍外活动, 从而提高整个圈栏的清洁度, 特别是舍外的清洁度。在实体地板上铺设垫料可以降低舍内环境的负面影响, 提高圈栏清洁性, 改善猪只福利。

2.2.3 生物发酵床对有害气体的影响

郭玉光等^[71]研究发现发酵床圈栏中猪的排泄地点比传统水泥地板圈栏更分散, 排泄区域更大; 发酵床圈栏中的猪更倾向于靠近饮水器和窗户的区域排泄。汪开英等^[72]研究了 3 种育肥猪舍的地面类型, 结果表明生物发酵床、水泥实心地面、全漏缝地面猪舍的恶臭质量浓度分别为 37.7~136.5、116.2~294.9、89.6~186.3 mg/m^3 , 恶臭排放系数分别为 3.39、3.70、4.33 $\text{OU}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 全漏缝地面猪舍与生物发酵床猪舍的恶臭浓度比水泥实心地面猪舍分别低 20%、47%。国内外研究人员研究发现半漏缝地板、实心地板、生物发酵床猪舍的 NH_3 质量浓度分别为 4.32、5.98、1.31 mg/m^3 , NH_3 排放系数分别为 9.47、11.23、4.27 $\text{g}/(\text{d}\cdot\text{头})$, 相对于漏缝地板(半/全)和实体地板来说, 生物发酵床具有明显的 NH_3 减排作用^[73-75], 这可能是因为发酵床微生物活性随粪尿的积累而增强, 导致粪尿中含氮物质的降解加快, 从而减少氨的释放。与局部漏缝地板和实体地板相比, 生物发酵床的设计能降低有害气体的浓度与排放系数, 有效缓解舍内空气环境的负面影响。

3 优化清粪方式

Brockmann 等^[76]发现适当的粪污管理对避免环境影响和提高养分回收率至关重要。合理的清粪工艺、清粪频率等都会在很大程度上降低猪舍内有害气体的浓度、污水排放量及其有机污染物浓度, 提高猪场经济效益。

3.1 清粪工艺

猪的排泄行为会影响猪舍的清粪方式^[77], 规模化猪场的清粪工艺主要有水泡粪、水冲粪、干清粪(人工干清粪和机械干清粪)3 种, 不同的清粪方式会影响舍内环境、粪便的肥效、污水的水质以及粪污的总排放量。水冲粪虽然能及时有效地清除舍内粪便, 但是需要大量的水来冲洗圈舍, 极大地增加了粪污量, 同时固体粪便的肥效也大大降低, 此清粪工艺因为存在极大的弊端几乎已被淘汰。水泡粪工艺是在水冲粪工艺的基础上改造的, 此工艺能减少部分圈舍冲洗水, 但是因为粪尿长时间留在舍内易形成厌氧发酵产生大量有害气体; 固态粪便中的氮、磷、有机质等营养物质溶入污水中, 污水中污染物的浓度就相对变高, 增加了污水的后期处理难度。干清粪工艺包括人工干清粪和机械干清粪, 此工艺能实现粪尿的即时分离, 并且能及时将粪便清出舍外, 保持舍内环境卫生, 产生的污水量少且污染物含量低, 粪便中的营养成分损失小, 实现了猪场污染物的减量排放。其中人工干清粪工艺劳动强度大、人工成本高且工作效率

低,研究发现人工清粪的劳动消耗量大约是机械清粪的 2 倍^[78];机械干清粪工艺实现了对猪场清粪设施的自动化控制,并且减少了人与猪的接触,降低疾病传播的概率,从而提高了猪场的生产效率和自动化水平,从生猪养殖持续、健康的发展考虑,机械干清粪代替人工清粪势在必行。

表 3 不同清粪方式下污水中污染物的浓度
Table 3 Concentration of pollutants in sewage under different cleaning feces manners

清粪方式 Cleaning feces manners	污染物浓度 Pollutant concentration/(mg·L ⁻¹)							参考文献 Reference
	pH 值 pH value	总氮 Total nitrogen TN	氨氮 Ammonia nitrogen NH ₃ -N	总磷 Total phosphorus TP	总钾 Total potassium TK	化学需氧量 Chemical oxygen demand COD	生化需氧量 Biochemistry oxygen demand BOD	
水冲粪 Washing excrement with water	/	800~1 500	600~1 200	204~600	/	6 500~15 000	3 300~10 000	[80]
水泡粪 Soaking excrement with water	7.0	950	/	116	108	8823	/	[78]
人工清粪 Clearing feces by labor	/	805~1 800	515~1 500	59~130	/	5 340~20 000	3 312~12 000	[80]
	7.8	550~650	/	55~65	41~46	4 198~4 321	/	[78]
	/	481~730	434~610	43~730	/	1 000~7 600	700~4 100	[80]
机械清粪 Clearing feces by mechanic	/	287~384	78~139	43~71	/	872~1 043	/	[19]
	8.0	261	/	40	30	3247	/	[78]

由表 3 可以看出,虽然不同文献所测得的污水污染物浓度相差较大,但是同一文献检测的污水中采用干清粪工艺产生的污水各污染物浓度都比水泡粪和水冲粪低。利用水冲粪和水泡粪工艺产生的污水有机污染物浓度都比较高,其中 COD 一般在 5 000~20 000 mg/L,利用沼气发酵后有机物浓度仍然较高,很难达到养殖污染物排放标准。干清粪产生的污水污染物浓度都比较低,其中 COD 一般在 1 000~7 600 mg/L,可以采用发酵水力负荷较高的上流式厌氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB)、复合式厌氧流化床反应器(Up-flow blanket filter, UBF)、升流式厌氧固体反应器(upflow Anaerobic Solid Reactor, USR)等工艺^[81]。利用沼气厌氧发酵可以有效地去除清粪后原水中的污染物,但是水泡粪工艺经过厌氧处理后各污染物的浓度仍然高于机械清粪,由此也可以说明机械干清粪可以有效地降低污水中污染物的浓度。

不同清粪工艺所产生的污水量如表 4 所示。机械干清粪与人工干清粪产生的污水量远低于水泡粪工艺,其中人工清粪方式的污水排放量是水冲粪和水泡粪工艺的 0.3%~0.5%^[82]。赵许可^[78]研究得出,水泡粪工艺产生的粪污总量是人工清粪工艺的 1.89 倍,其中污水量是人工清粪的 3.66 倍;人工清粪工艺产生的污水量与机械清粪工艺相差不大。机械和人工干清粪模式可以从源头上减少粪污排放量。尤其是污水的排放,做到粪尿初步干湿分离,这样更有利于做到排放减量化。据统计,一个年出栏万头的规模化猪场采用水泡粪工艺在粪污处理方面的费用比人工清粪要高出 40 多万,主要包括多出的污水处理、清洁用水、污水处理基建投资等费用,有机肥价值降低造成的损失,污水处理难度增加带来的额外费用;

3.1.1 污水排放量及污染物

总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)等的浓度是衡量污水有机污染的主要指标,其数值的大小代表水体富营养化的程度^[79]。不同清粪工艺污水中污染物的浓度如表 3 所示。

采用机械清粪所需费用共 77 万元(34 台清粪机 68 万、3 个人工费 9 万、电费可忽略不计),采用人工清粪需要人工费(7 人)21 万元,从提高生产效率、减少劳动强度来看机械清粪只需 5 a 则可收回成本。机械清粪工艺极大地降低了工人劳动量,且工作效果较好、性能可靠、成本适当,能够实现规模化猪场机械化、自动化、集约化等目标。

表 4 不同清粪工艺产生的污水量
Table 4 Sewage under different cleaning feces manners

猪只种类 Types of pig	清粪方式 Cleaning feces manners	污水量 Sewage volume	参考文献 Reference
保育猪 Nursery pig	水泡粪	5.27 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	[78]
	人工干清粪	1.43 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
生长猪 Growing pigs	机械干清粪	2.22 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
	人工干清粪	1.94 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	[83]
育肥猪 Fattening pigs	机械干清粪	4.87 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
	水泡粪	5.02 (kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
规模化猪场 Large-scale pig farm	水冲粪	28~40 (L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	[80]
	水泡粪	22~24 (L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
	人工干清粪	10~14 (L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
规模化猪场 Large-scale pig farm	水冲粪	21~24(L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	[82]
	水泡粪	12~15 (L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	
	人工干清粪	6~9 (L·d ⁻¹ ·头 ⁻¹)	

3.1.2 舍内有害气体

舍内温湿度受舍外环境影响的同时也受清粪方式的影响。大量研究表明,舍内温度升高会促进 NH₃的释放,因为温度升高会使脲酶活性增高进而使水相的 NH₄⁺迅速转化为气相的 NH₃,例如当温度升高 10 ℃舍内 NH₃浓度会升高到原来的 2 倍^[84-89]。与水泡粪工艺相比,干清粪工艺舍内的温湿度相对较低,人工干清粪和机械干清

粪工艺都能有效的降低猪舍内的 H_2S 和 NH_3 浓度, 并且水泡粪工艺的工作效率并不比机械干清粪低^[90]。赵许可^[78]研究发现与人工干清粪工艺相比, 输送带式机械清粪能有效降低猪舍内 NH_3 浓度, 并且能更好的控制舍内环境。Voermans 等^[91]发现利用刮粪板清粪也能够有效的减少 NH_3 的产生量。

干清粪工艺产生的污水量远小于水冲粪和水泡粪工艺, 其中污染物浓度低于水冲粪和水泡粪工艺, 舍内环境也优于其他 2 种工艺, 并且机械清粪的工作效率高于人工清粪。从规模化生猪养殖的长远发展来看, 机械干清粪工艺代替水冲粪、水泡粪工艺势在必行。

3.2 清粪制度

根据猪只的排泄特征、饲养规模以及气候环境的变化为其制定适宜的清粪时间和频次, 可以降低猪舍有害气体含量, 改善猪舍空气环境, 减少粪便养分损失和后期粪污处理难度。Philippe 等^[93]发现用 V 型刮板或传送带及时将猪舍内粪便清出能有效减少舍内 50% 的 NH_3 产生量。Amon 等^[92]发现在整个试验期间不清理粪污和每天清理粪污的情况下, 每个猪舍每年的 NH_3 排放量分别为 2.1、1.9 kg, CH_4 排放量分别为 1.24、0.54 kg, 每天将粪污及时的移出舍外可以减少猪舍有害气体的排放。牛欢等^[94]也发现采用机械清粪及时地将粪尿送出舍外, 能缩短有害气体在舍内产生的时间, 但是在快速清粪的同时会加速 NH_3 释放, 清粪过程中 NH_3 浓度会提高 70%~75%, 在清粪 1 h 后 NH_3 浓度会降低到刮粪前浓度的 80%~85%。Misselbrook 等^[95]和 Wood 等^[96]研究发现, 粪污表面结壳形成已被确定为潜在的 NH_3 缓解策略, 去除结壳可能导致舍内产生更高水平的 NH_3 。清粪时伴随着粪便的翻滚, 粪便表面就不容易形成结壳, 过高的清粪频率增加了粪便堆放表面积与空气的接触, 从而使舍内的 NH_3 产生并挥发到空气中。

3.3 圈舍冲洗方式

不论如何布置圈舍、采用何种清粪方式都需要定期科学合理的冲洗圈舍, 控制圈舍冲洗水也是养殖污水减排的重要环节, 选择合适的冲洗方式可以很大程度的降低污水量。圈栏冲洗用水是猪场污水的重要组成部分, 选择合适的冲洗方式可以很大程度的降低污水量, 目前主要的圈舍冲洗方式包括常压冲洗、高压冲洗、水气混合冲洗等。彭河山等^[18]研究了 3 种圈舍冲洗方式所需用水量以及污水中各物质的排放量, 发现水气混合、高压、常压冲洗方式用水量分别为 3~4、4~6、7~9 L/(头·d), 水气混合冲洗方式所需用水量最少, 所以采用水气混合冲洗方式对圈栏进行清洗可明显减少污水产生量, 同时污水中 COD_{Cr} 、TN、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的排放量相对于常压和高压冲洗方式也是最少的。猪场的饲养管理也会影响圈舍冲洗用水, 例如饲养员为了保持圈栏清洁度且不愿意花费大量劳力去清扫圈栏而加大冲洗量, 那么浪费水量也会增加, 这种情况在人工干清粪工艺中最为明显。在生产中应制定科学合理的圈舍冲洗制度, 并按照规定选择合适的冲洗方式定期清洗圈舍。

4 讨论与建议

4.1 讨论

尽管目前很多国内外学者针对猪场废弃物源头减量与过程控制的工程技术开展了大量研究, 并取得了较大突破, 但仍存在以下问题: 1) 猪只饮水浪费水是猪舍污水的来源之一, 但当前大部分研究仍停留在不同因素对浪费水量多少的影响, 而饮水浪费水量对猪舍污水产生量、污水污染物成分的影响程度尚没有直接研究, 尤其是对不同清粪模式下污水形成与增量的机制仍未明确, 进而制约了从饮水节水的角度实现污水减量的工程技术创新; 2) 现有研究揭示了粪尿在猪圈内的分布情况是决定猪舍有害气体产生和猪圈冲洗用水的重要因素, 基于猪只的排泄规律提出了圈栏优化设计方案, 但在猪只定点排泄训练、诱导等饲养管理技术方面缺乏配套研究, 影响了新型圈栏设计方案有益效果的发挥; 3) 清粪作为粪污的收集环节, 是决定猪舍有害气体和污水的关键因素, 现有研究提出的机械干清粪模式显著降低了污水产生量及其污染物成分, 但由于其涉及到机械、建筑、畜牧和自动控制等多专业领域, 现有的机械清粪系统仍存在施工难度大、运行稳定性差和维修维护困难等问题, 制约了该技术在中国的推广和应用。

4.2 建议

针对上述问题, 对未来研究重点提出如下建议:

1) 研究确定影响猪只饮水浪费水量的关键因素, 基于猪体特性、饮水需求和行为特征研发节水福利型饮水器, 既满足猪只饮水功能, 又能显著降低饮水过程的浪费水量, 研究猪只饮水浪费水转化为污水的过程机制, 结合猪舍建筑结构设计和圈栏设施布局, 研发饮水浪费水收集系统和利用技术, 实现“水”和“粪尿”的分离收集。

2) 基于猪只行为规律, 研发猪只定点排泄训练与诱导等饲养管理技术规程, 进一步提高猪圈清洁度和猪舍空气质量, 同时研发猪舍清洁机器人, 代替人工水冲猪圈方式, 降低猪舍冲洗过程产生的污水量。

3) 综合考虑猪舍建造施工、机械装备、饲养管理和自动控制等方面, 优化机械清粪的系统结构、配套设施和控制方式, 降低系统运行故障率, 简化维修维护过程, 提高清粪效率, 同时针对不同地区资源禀赋特征, 研发新型清粪工艺及配套设施装备, 从粪污收集环节促进清洁生产。

4) 集成饮水系统、圈栏布局、清粪方式及其他工程技术, 进行系统设计和模式创新, 创制清洁猪舍工程技术模式。

5 结论

本文围绕猪舍内部这一猪场废弃物产生的源头场所, 以有害气体和粪污作为废弃物减量化控制的主要对象, 从减少猪只饮水浪费水量、优化圈栏设计和清粪模式等 3 个方面, 阐述了当前国内外研究现状和应用效果, 分析了存在主要技术问题, 并针对性提出未来研究的建

议。源头减量和过程控制作为猪场废弃物处理与资源化利用的关键环节, 是生猪养殖业健康可持续发展的主要技术需求领域之一, 因此应该大力开展猪场废弃物减量化的工程技术与工艺模式创新, 同时, 可利用物联网、大数据、人工智能等电子信息技术, 研发智能化饮水、清粪、除臭等废弃物减量化养殖设备, 提高设备稳定性和智能化管理水平, 为减少猪场废弃物总量、降低处理利用成本和实现清洁高效养殖提供工程技术支撑, 促进中国生猪养殖业绿色转型升级。

[参 考 文 献]

- [1] Donham K, Haglund P, Peterson Y, et al. Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings[J]. *British Journal of Industrial Medicine*, 1989, 46(1): 31—37.
- [2] 莫测辉, 吴启堂, 李桂荣, 等. 关于我国 21 世纪农业清洁生产的思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 2000(1): 47—50.
- [3] 李保明. 养殖节水减排技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [4] 江滔, 温志国, 马旭光, 等. 畜禽粪便固液分离技术特点及效率评估[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊 2): 218—225.
Jiang Tao, Wen Zhiguo, Ma Xuguang, et al. Characteristics and efficiency evaluation of livestock slurry separation technologies[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(Supp.2): 218—225. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王美芝, 刘继军, 赵婉莹, 等. 北京夏季机械通风育肥猪舍 CO₂、NH₃ 排放和耗水量研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 152—160.
Wang Meizhi, Liu Jijun, Zhao Wanying, et al. CO₂ and NH₃ emissions and water consumption at mechanically ventilated finishing pig house in Beijing equipped with pull-plug manure removal system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(17): 152—160. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang Meizhi, Yi Lu, Liu Jijun, et al. Water consumption and wastage of nursery pig with different drinkers at different water pressures in summer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(17): 161—166.
王美芝, 易路, 刘继军, 等. 夏季不同饮水器和水压对保育猪水利用情况的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 161—166 (in English with Chinese abstract)
- [7] 王美芝, 赵婉莹, 吴中红, 等. 不同饮水器保育猪用水量及浪费水量对比试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 250—255.
Wang Meizhi, Zhao Wanying, Wu Zhonghong, et al. Comparison experiment of total water consumption and water leakage of different types of drinker for nursery pig[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(4): 242—247. (in Chinese with English abstract)
- [8] Olsson O. Evaluation of bite drinkers for fattening pigs[J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(5): 1495—1498.
- [9] Andersen H M L, Dybkjær L, Herskin M S. Growing pigs' drinking behaviour: Number of visits, duration, water intake and diurnal variation[J]. *Animal*, 2014, 8(11): 1881—1888.
- [10] 汪勇, 邓仕伟, 薛春芳. 生长猪和育成猪在乳头式饮水器条件下的日摄水量和浪费水量研究[J]. *中国猪业*, 2006(4): 48.
- [11] Li Y Z, Chenard L, Lemay S P, et al. Water intake and wastage at nipple drinkers by growing-finishing pigs[J]. *J Anim Sci*, 2005, 83(6): 1413—1422.
- [12] Brooks P H. Water-Forbidden nutrient and novel delivery system[M]//*Biotechnology in the Feed Industry*. Nottingham Press, Leicestershire, U.K, 1994.
- [13] 王美芝, 薛晓柳, 刘继军, 等. 不同饲喂器和饮水器配置对育肥猪生产性能和节水的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(增刊): 66—72.
Wang Meizhi, Xue Xiaoliu, Liu Jijun, et al. Effect of different allocations of wet-dry feeders and drinkers on production performance and water saving of finishing pigs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(Supp.): 66—72. (in Chinese with English abstract)
- [14] Tavares J M R, Filho P B, Coldebella A, et al. The water disappearance and manure production at commercial growing-finishing pig farms[J]. *Livestock Science*, 2014, 169: 146—154.
- [15] Babot B D, Hermida B, Balcells J, et al. Farm technological innovations on swine manure in southern Europe[J]. *R Bras Zootec*, 2011, 40: S334—S343.
- [16] Brumm M C, Dahlquist J M, Heemstra J M. Impact of feeders and drinker devices on pig performance, water use, and manure volume[J]. *Swine Health Prod*, 2000, 8: 51—57.
- [17] 刘继军, 贾永全. 畜牧场规划设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [18] 彭河山, 李汪晟, 宋李思莹, 等. 中小型生猪养殖场污染源控制技术[J]. *中国猪业*, 2016, 11(11): 29—32.
- [19] Brumm M. Water systems for growing swine[EB/OL]. (2005-07). [https://projects.ncsu.edu/project/swineextension/swine_news/2005/sn_v2806%20\(july\).htm](https://projects.ncsu.edu/project/swineextension/swine_news/2005/sn_v2806%20(july).htm)
- [20] Petherick J C. A note on allometric relations in Large White×Landracepigs[J]. *Animal Science*, 1983, 36(3): 497—500.
- [21] Gonyou H W. Water use and drinker management: A review[C]//*In Prairie Swine Centre Proceedings 1996 Ann. Rep. Saskatoon, Saskatchewan, Canada*, 1996: 74—80.
- [22] Torrey S, Widowski T M. A note on piglets' preferences for drinker types at two weaning ages[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2006, 100(3/4): 333—341.
- [23] 谭磊, 顾宪红. 猪用乳头式饮水器的水流速率和安装高度及数量的研究[J]. *畜牧与兽医*, 2009(11): 47—49.
- [24] Zhang J H, Zhang S C. Swing farm water management[J]. *Swine Production*, 2009(5): 78—80.
- [25] 车文利. 饮水的流速对生长育肥猪生长性能的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
Che Wenli. Effect of Drinking Water Velocity on Growth Performance of Growing-Finishing Pigs[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ocepek M, Škorjanc D. Does rearing system (conventional vs. organic) affect ammonia emissions during the growing and fattening periods of pigs?[J] *Biosyst Eng*, 2016, 147: 81—89.
- [27] Guo Y, Lian X, Yan P. Diurnal rhythms, locations and behavioural sequences associated with eliminative behaviours in fattening pigs[J]. *Appl Anim Behav Sci*, 2015, 168: 18—23.
- [28] Vermeer H M, Altena H, Vereijken P F G, et al. Rooting area and drinker affect dunging behaviour of organic pigs[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2015, 165: 66—71.
- [29] Stolba A, Wood-Gush D G M. The behavior of pigs in a semi-natural environment[J]. *Anim Prod*, 1989, 48(2): 419—425.
- [30] Pedersen P, Sousa L, Anderson K H, et al. Thermoregulatory behaviour of growing/finishing pigs in pens with access to outdoor areas[J]. *CigrEjournal*, 2003, 5.

- [31] Hacker R R, Ogilvie J R, Morrison W D, et al. Factors affecting excretory behavior of pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1994, 72(6): 1455—1460.
- [32] Blanes-Vidal V, Hansen M N, Pedersen S, et al. Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(3): 237—244.
- [33] Aarnink A J A, Koetsier A C, Van der Berg A J. Dunning and lying behaviour of fattening pigs in relation to pen design and ammonia emission[C]//Fourth International Symposium and Livestock Environment. University of Warwick, Coventry, England, ASAE, USA. 1993.
- [34] Lemay S P, Welford E L, Zyla L, et al. Pig urination behaviour related to ammonia emissions[J]. *CSAE-SCGR Paper No*, 2002: 02—507.
- [35] Watson T S. Development of eliminative behaviour in piglets[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1985, 14: 365—377.
- [36] Baxter M R. Environmental determinants of excretory and lying areas in domestic pigs[J]. *Applied Animal Ethology*, 1982, 9(2): 195.
- [37] Buchenauer D, Luft C, Grauvogl A. Investigations on the eliminative behaviour of piglets[J]. *Applied Animal Ethology*, 1982, 9(2): 153—164.
- [38] Wechsler B, Bachmann I. A sequential analysis of eliminative behaviour in domestic pigs[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1998, 56(1): 29—36.
- [39] Andersen M L, Pedersen L J. The effect of feed trough position on choice of defecation area in farrowing pens by loose sows[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2011, 131(1/2): 48—52.
- [40] Wiegand R M, Gonyou H W, Curtis S E. Pen shape and size: effects on pig behavior and performance[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1994, 39(1): 49—61.
- [41] Olsen A W, Simonsen H B. Behaviour of growing pigs kept in pens with outdoor runs II. Temperature regulatory behaviour, comfort behaviour and dunning preferences[J]. *Livestock Production Science*, 2001, 69(3): 255—264.
- [42] 李以翠, 李保明, 施正香. 圈栏面积、形状和隔栏方式对猪排泄行为的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 206—211.
- Li Yicui, Li Baoming, Shi Zhengxiang. Influence on excretion of area, shape of cubicle in pig houses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(11): 206—211. (in Chinese with English abstract)
- [43] Salomon E, Helena Åkerhielm, Lindahl C, et al. Outdoor pig fattening at two Swedish organic farms: Spatial and temporal load of nutrients and potential environmental impact[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 407—418.
- [44] Simonsen H B. Behaviour and distribution of fattening pigs in the multi-activity pen[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1990, 27(4): 311—324.
- [45] Marko Oceppek, Conor MGoold, Mirjana Busančić, et al. Drinker position influences the cleanliness of the lying area of pigs in a welfare-friendly housing facility[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2018, 198: 44—45.
- [46] 杨伟, 时建忠, 顾宪红, 等. 群体规模和玩具对生长猪生产性能及应激水平的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2010, 41(2): 174—179.
- Yang Wei, Shi Jianzhong, Gu Xianhong, et al. Effects of Group Size and Toys on Production Performance and Stress Level in Growing Pigs[J]. *Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2010, 41(2): 174—179. (in Chinese with English abstract)
- [47] Boon C R. The effect of air speed changes on the group postural behaviour of pigs[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1982, 27(1): 71—79.
- [48] Randall J M, Armsby A W, Sharp J R. Cooling gradients across pens in a finishing piggery: II. Effects on excretory behaviour[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1983, 28(3): 247—259.
- [49] Fritschen R D. Toilet Training of Pigs On Partly Slatted Floors[M]. University of Nebraska, Lincoln, NebGuidc G, 1975: 74—140.
- [50] Boon C R. The effect of departures from lower critical temperature on the group postural behaviour of pigs[J]. *Anim Prod*, 1981, 33: 71—79.
- [51] Aarnink A J A, Schrama J W, Heetkamp M J W, et al. Temperature and body weight affect fouling of pig pens[J]. *Journal of Animal Science*, 2006, 84(8): 2224—2231.
- [52] 成冰. 猪用混凝土微缝地板的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- Cheng Bing. Study of Application of Slatted Floor in Pig Houses[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [53] Aarnink A J A, Swierstra D, Berg A J V D, et al. Effect of type of slatted floor and degree of fouling of solid floor on ammonia emission rates from fattening piggeries[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 66(2): 93—102.
- [54] Kilbride A, Gillman C, Green L. A cross-sectional study of the prevalence of lameness in finishing pigs, gilts and pregnant sows and associations with limb lesions and floor types on commercial farms in England[J]. *Animal Welfare*, 2009, 18(3): 215—224.
- [55] Ehlorsson C, Olsson O, Lundeheim N. Inventory of claw health in different husbandry systems for sows[J]. *Swedish Veterinary Journal*, 2002, 54(6): 297—304.
- [56] Gjein H. Housing of Pregnant Sows: A Field Study on Health And Welfare, with Special Emphasis on Claw Lesions[D]. Oslo, Norway: Norwegian College of Veterinary Medicine, 1994.
- [57] 陈刚, 李保明, 施正香, 等. 离地圈养猪床[P]. 200310101963, 2004-09-15.
- [58] Ye Z, Li B, Cheng B, et al. A concrete slatted floor system for separation of faeces and urine in pig houses[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98: 206—214.
- [59] Yan Xiaojie, Zhang Qiang, Laurie Connor. Effect of slatted floor configuration on air quality and floor cleanliness in a sow barn[R]. Nebraska, USA: 10th International Livestock Environment Symposium (ILES X), 2018.
- [60] 成冰, 陈刚. 干清粪工艺配套猪用混凝土微缝地板使用效果研究[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2006(5): 44—46.
- Cheng Bing, Chen Gang. Study of application of slatted floor attached to dry cleaning techniques[J]. *Hei Longjiang Animal Husbandry and Veterinary*, 2006(5): 44—46. (in Chinese with English abstract)
- [61] Hamelin L, Godbout S, Thériault R, et al. Evaluating ammonia emission potential from concrete slat designs for pig housing[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(4): 455—465.
- [62] Ni J Q, Vinckier C, Coenegrachts J, et al. Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor[J]. *Livestock Production Science*, 1999, 59(1): 25—31.
- [63] Geir Næss, Knut EgilBøe, Lars Erik Ruud. Floor cleanliness in dairy freestall barns[R]. Nebraska, USA: 10th International Livestock Environment Symposium (ILES X), 2018.
- [64] Cai L, Yu J, Zhang J, et al. The effects of slatted floors and manure scraper systems on the concentrations and emission rates of ammonia, methane and carbon dioxide in goat buildings[J]. *Small Ruminant Research*, 2015, 132: 103—

- 110.
- [65] Fraley S M, Fraley G S, Karcher D M, et al. Influence of Plastic slatted floors compared with pine shaving litter on pekin duck condition during the summer months[J]. Poultry Science, 2013, 92(7): 1706.
- [66] Svennerstedt B. Drainage properties and ammonia emissions in slatted floor systems for animal buildings[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(1): 19—25.
- [67] Sun G, Guo H Q, Peterson J. Seasonal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide concentrations and emissions from swine grower-finisher rooms[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2010, 60(4): 471—480.
- [68] Joahnn H Palacios, Stéphane Godbout, SébastienTurcotte. Impact of slatted floor on ammonia emissions in fattening swine housing[R]. Nebraska, USA: 10th International Livestock Environment Symposium (ILES X), 2018.
- [69] 戚咸理, 黄兴国, 陈铁桥. 改善畜床环境对减小猪肢蹄损伤发病率影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 203—206.
Qi Xianli, Huang Xingguo, Chen Tieqiao. Influence of improved environmental conditions of stall floors on incidence rate of foot and limb injuries among sows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(2): 203—206. (in Chinese with English abstract)
- [70] 朱志平, 康国虎, 董红敏, 等. 垫料型猪舍春夏育肥季节的氨气和温室气体状况测试[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 356—361.
- [71] 郭玉光, 颜培实. 饲养模式对杜梅黑猪排泄行为影响研究[C]//中国畜牧兽医学学会 2013 年学术年会.
- [72] 汪开英, 魏波, 应洪仓, 等. 不同地面结构育肥猪舍的恶臭排放影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 186—190.
Wang Kaiying, Wei Bo, Ying Hongcang, et al. Odor Emissions and Impact Factors of Fattening Pig Rooms with Different Floor Systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 42(9): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [73] 汪开英, 代小蓉, 李震宇, 等. 不同地面结构的育肥猪舍 NH₃ 排放系数[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 163—166.
Wang Kaiying, Dai Xiaorong, Li Zhenyu, et al. Ammonia emission factor of different floor structure in fattening pig houses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 163—166. (in Chinese with English abstract)
- [74] Kim K Y, Jong K H, Tae K H, et al. Quantification of ammonia and hydrogen sulfide emitted from pig buildings in Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(2): 195—202.
- [75] Kavovelis B. Impact of animal housing systems on ammonia emission rates[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2006, 15: 739—745.
- [76] Brockmann D, Hanhoun M, Negri O, et al. Environmental assessment of nutrient recycling from biological pig slurry treatment e Impact of fertilizer substitution and field emissions[J]. Bioresource Technology, 2014, 163: 270—279.
- [77] 施正香, 李保明, 陈刚, 等. 猪的舍饲散养清洁生产工艺及其关键生产技术[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 180—184.
Shi Zhengxiang, Li Baoming, Chen Gang, et al. Technology and key techiques for clean production in pig loo se housing breeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(12): 180—184. (in Chinese with English abstract)
- [78] 赵许可. 规模猪场不同清粪方式对主生产性能、舍内环境、粪污排放的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Zhao Xuke. Effects of Different Manure Desludging Methods on Pig Production Performance Piggerv Environment. Manure. Emissions jn Scale Pig Farm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [79] 李如治. 家畜环境卫生学. 普通高等教育“十五”国家级规划教材[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [80] 祝其丽, 李清, 胡启春, 等. 猪场清粪方式调查与沼气工程适用性分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 26—28.
Zhu Qili, Li Qing, Hu Qichun, et al. Investigation and analysis of animal manure collection methods on pig farms and their applicability to the anaerobic digestion[J]. Biogas in China, 2011, 29(1): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [81] Fernandes L, McKyes EWarith M, et al. Treatment of liquid swine manure in the sequencing batch reactor under aerobic and anoxicconditions[J]. Canadian Agricultural Engineering, 2003, 33(2): 373—379.
- [82] 杨朝飞. 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.
- [83] 向际秒. 规模化猪场机械干清粪与水泡粪工艺应用效果比较探究[J]. 湖南畜牧兽医, 2017(6): 47—48.
- [84] 李保明, 施正香, Zhang G, 等. 丹麦舍饲散养自然通风奶牛舍的空气环境分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 231—236.
Li Baoming, Shi Zhengxiang, Zhang G, et al. Contaminant gas survey of naturally ventilated dairy-cow f reestall houses in Denmark[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 231—236. (in Chinese with English abstract)
- [85] Blunden J, Aneja V P, Westerman P W. Measurement and analysis of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a mechanically ventilated swine confinement building in NorthCarolina[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(14): 3315—3331.
- [86] Pereira J, Fanguero D, Misselbrook T H, et al. Ammoniaand greenhouse gas emissions from slatted and solid floors indairy cattle houses: A scale model study[J]. Biosystems En-gineering, 2011, 109(2): 148—157.
- [87] 朱志平, 董红敏, 尚斌, 等. 育肥猪舍氨气浓度测定与排放通量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 1076—1080.
Zhu Zhiping, Dong Hongmin, Shang Bin, et al. Measurement of ammonia concentration and estimation on emission flux of finishing pig in pig house[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2006, 25(4) : 1076—1080. (in Chinese with English abstract)
- [88] Misselbrook T, Hunt J, Perazzolo F, et al. Greenhouse gas and ammonia emissions from slurry storage: Impacts of temperature and potential mitigation through covering (pig slurry) or acidification (cattle slurry)[J]. J Environ Qual, 2016, 45: 1520—1530.
- [89] Haeussermann A, Hartung E, Gallmann E, et al. Influence of season, ventilation strategy, and slurry removal on methane emissions from pig houses[J]. Agr Ecosyst Environ, 2006, 112(2): 115—121.
- [90] Predicala B Z, Cortus E L, Fengler R, et al. Christianson. Assessing the performance of hydrogen sulfide monitoring devices and a water spray method to reduce worker exposure in swine buildings[J]. ASABE, 2006: 064150.
- [91] Voermans J A M, Poppel F van. Scraper systems in pig houses[C]//Symposium on Livestock Environment, St. Joseph, Mich: ASAE. 1993: 650—656.
- [92] Amon B, Kryvoruchko V, Frhlich M, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions from a straw flow system for fattening pigs: Housing and manure storage[J]. Livest Sci, 2007, 112(3): 199—207.

- [93] Philippe F X, Cabaraux J F, Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2011, 141(3): 245–260.
- [94] 牛欢, 张政, 颜培实. 冬季机械清粪牛舍与人工清粪牛舍空气环境分析[J]. *畜牧与兽医*, 2015, 47(6): 26–31.
Niu Huan, Zhang Zheng, Yan Peishi, et al. Analysis of air environment between mechanical and artificial nightsoil barn in winter season[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2015, 47(6): 26–31. (in Chinese with English abstract)
- [95] Misselbrook T H, Brookman S K E, Smith K A, et al. Crusting of stored dairy slurry to abate ammonia emissions: Pilot-scale studies[J]. *J Environ Qual*, 2005, 34(2): 411–419.
- [96] Wood J D, Gordon R J, Wagner-Riddle C, et al. Relationships between dairy slurry total solids, gas emissions, and surface crusts[J]. *J Environ Qual*, 2012, 41(3): 694–704.

Research progress of in-house reduce engineering technology for piggery manure wastes and poisonous gas

Liu Anfang¹, Ruan Rongdan^{1,2}, Li Tingting^{1,2}, Liu Zuohua², Zeng Yaqiong²,
Long Dingbiao², Pu Shihua², Wang Hao^{2*}

(1. College of Animal Science, Southwest University, Chongqing 402460, China; 2. Chongqing Academy of Animal Sciences, Scientific Observation and Experiment Station of Livestock Equipment Engineering in Southwest for Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing 402460, China)

Abstract: Source reduction and process control are the key links of comprehensive treatment of pig farm wastes, and pig house is the source of waste generation. In this paper, the effects of wasted water quantity of water dispenser, flushing water quantity of enclosure and dung method on harmful gases, sewage discharge and pollutant concentration in large-scale pig farms were expounded from three aspects, and three measures for emission reduction from the source of pollutants generated in the enclosure were put forward. Under the scientific feeding and management, according to the different stages of pig drinking water standard, the suitable drinking water and water flow speed can be allocated. According to the density of drinker, the suitable drinking water can be provided, and the drinkers were installed at the right place and height. In general, their behavior of lying down, eating, drinking and excreting was continuous. According to their excretion behavior, water dispensers were usually installed in the leaky floor area, the excretion area was located in the short side wall of the pen, and the separation mode of the pen was designed to be closed. It was suggested that the breeding and fattening stages should be separated from each other in the feeding process, and the appropriate feeding density should be designed so that pigs could only excrete at the fixed points. In the case of guaranteeing the minimum discharge of wasted water from drinking water appliances and flushing water from enclosures, the mode of manure scavenging was a relatively important factor affecting harmful gases, sewage discharge and pollutant concentration in enclosures in emission reduction measures of pollutant sources. Compared with the blister manure and water flushing manure, mechanical dry-dung cleaning process could reduce the harmful gas concentration, sewage discharge and pollutant concentration to the greatest extent. Under the conditions of pig farm, it was suggested that the floor of pig house should be designed as a semi-leaky seam floor and equipped with mechanical dry-dung cleaning technology, which could reduce the pollutant emission of pig house to a large extent. At present, the great breakthroughs had been made in the research of engineering technology for reducing pollutant sources in pig farms in China, but the popularization and application of this technology in pig production was still in its infancy. The related technical equipment in this field still faced many problems, such as insufficient matching, complex operation and management, high cost and poor stability. Therefore, it was suggested to vigorously develop the research and application of pig farm waste source reduction technology model, comprehensively consider the drinking water system, fence layout, fecal clearance mode and other engineering technologies, design and develop the mechanical dry-dung cleaning system and its supporting facilities and equipment. At the same time, the intelligent drinking water, excrement and deodorization could be developed by using electronic information technology such as Internet of Things, big data, artificial intelligence and so on. Such as waste reduction breeding equipment improved the stability of equipment and intelligent management level. The purpose of this paper was to provide technical support for reducing the total amount of pig wastes, reducing the cost of treatment and utilization, and realizing clean and healthy breeding, so as to promote the green transformation and upgrading of pig breeding industry in China.

Keywords: wastes; pollution control; pig farm; reduction; pen layout; manure cleaning