

闫 雷, 王 喆, 张克强, 等. 规模化生猪养殖场后备母猪氮磷污染物排放特征[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1329-1335.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.06.021

规模化生猪养殖场后备母猪氮磷污染物排放特征

闫 雷¹, 王 喆^{1,2}, 张克强², 沈丰菊², 赵 润², 李佳佳²

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300100)

摘要: 为明确生猪养殖氮磷污染物排放规律, 以规模化生猪养殖场断奶仔猪为研究对象, 结合种猪性能测定系统, 对后备母猪全生育期内饲料和粪尿样品进行连续动态监测分析。结果表明, 全生育期内饲料中氮素和磷素含量变化较小, 且氮磷比为 14.41 ± 2.91 。不同生育期间猪粪和猪尿样品氮磷污染物排放总量有显著性差异, 其中总氮 > 硝态氮 > 铵态氮, 且猪尿总氮排放量明显高于猪粪。全生育期内每头仔猪总氮和总磷排放量分别为 2 059.78 g 和 28.71 g, 分别占饲料氮磷投入总量的 52.87% 和 10.37%。

关键词: 规模化养殖场; 后备母猪; 氮; 磷; 污染物排放

中图分类号: X835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)06-1329-07

Emission of nitrogen and phosphorus during gilts growth in a large-scale pig farm

YAN Lei¹, WANG Zhe^{1,2}, ZHANG Ke-qiang², SHEN Feng-ju², ZHAO Run², LI Jia-jia²

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Heilongjiang 150030, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300100, China)

Abstract: To investigate the characterization of nitrogen and phosphorus pollutants during the complete period of gilts growth in a large-scale breeding farm, the characteristics of gilts feed, manure and urine were analyzed continuously during various gilts growth period combined with Nedap Velos livestock management system. The results showed that the concentration of different forms of nitrogen and phosphorus changed slightly in gilts feed during the whole growth period, and the N/P ratio was 14.41 ± 2.91 . Significant differences were found between nitrogen and phosphorus emission at different growth stages in pig manure and urine samples, which were total nitrogen (TN) > NO_3^- -N > NH_4^+ -N. TN emission in the urine was extremely higher than that in the manure. TN and total phosphorus (TP) emission in the whole growth of a pig were 2 059.78 g and 28.71 g, respectively, which were 52.87% and 10.37% of the total nitrogen and phosphorus in the feed.

Key words: large-scale farm; gilt; nitrogen; phosphorus; pollutant emission

收稿日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51508284);
中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015-szj-ljj-03)

作者简介: 闫 雷(1974-), 女, 黑龙江牡丹江人, 博士, 教授,
主要从事土壤环境保护研究。(E-mail) yanlei_74@163.com

通讯作者: 李佳佳, (E-mail) aepi_ljj@126.com

中国是世界第一养猪大国, 最近 10 年内生猪养殖量增长了 21.77%, 至 2014 年生猪出栏量达到 7.35×10^8 头^[1]。生猪养殖业的迅猛发展, 带来了巨大的经济效益, 同时也引发了一系列环境问题。目前, 在北京、天津等 14 个东部沿海经济发达省份及地区, 生猪养殖量已超过环境实际容量, 存在较高潜在的氮、磷污染风险^[2-3]。潘洁等参考欧盟标准, 对天津市 2011 年畜禽养殖粪便产生量和畜禽粪便氮、

磷、钾养分资源量进行估算,发现北辰区、宁河县、蓟县及滨海新区汉沽4个地区的畜禽粪便量及氮、磷养分耕地平均负荷量全部超标^[4]。畜禽养殖环境问题日益突出,已经引起社会各界的广泛关注。

中国生猪养殖业环境问题的研究重点主要集中在调控日粮成分降低氮磷排放^[5-6]和生猪污染物重金属及抗生素对环境的影响^[7-8]等方面。第一次全国污染源普查工作中,以同一时间段不同体重生猪粪污排放量为依据,建立了畜禽养殖业源产排污系数手册。但目前,对全生育期内生猪养殖过程中粪尿排放特征的监测性研究较少,相关报道更是寥寥无几。何余湧等提出,有必要开展正常饲喂情况下饲料营养和饲喂水平对粪便产量及粪便污染物含量的影响研究,以推动生猪养殖过程清洁生产和变末端治理为源头控制等相关政策的制定^[9]。因此,做好规模化生猪养殖场前端饲喂水平对粪便污染物排放量影响的监测工作,对有效评估生猪养殖污染物排放能力,促进养殖废弃物综合利用具有重要意义。

本研究以规模化养殖场为例,在正常饲喂条件下,对从断奶仔猪到后备母猪育成全过程的饲喂水平及生猪粪便和尿液氮磷元素排放特征,进行长期连续动态监测分析,以期明确饲料投入水平与粪污排放量之间的相互关系,为制定畜禽污染物源头减排方案提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选择丹系长白断奶仔猪2圈,每圈10头,在仔猪出生后28 d,分开母猪进行单独饲喂。5 d后选择体质量差异较小的健康仔猪转入种猪测定站,采用Nedap Velos种猪性能测定系统进行自动化饲喂,直至转入待配监测猪舍,全过程共63 d。

仔猪出生后34 d至96 d采集饲料、尿液和粪便样品,每10 d采样1次,每次连续采样3 d。饲料样品采集:每天从进料口采集1次,室内干燥保存。尿液样品采集:每天将新鲜尿液全部收集至塑料桶中混匀,-20℃密封保存待测。粪便样品采集:按照四分法进行采集(GB/T 25169-2010),每天早8:00和晚20:00各取样1次,将采集的猪粪样品分成2份,一份经风干处理后过0.25 mm筛,室内干燥保存,另一份置于-20℃冷冻保存。共采集7批次样品,合计21份饲料样品、42份猪尿样品和84份猪粪样品。

生猪采食量及体质量由Nedap Velos种猪性能测定系统自动记录。猪舍内采用干清粪工艺,收集猪粪并称总质量;地面下方单独设置尿液收集设施,收集猪尿并测量体积。

1.2 测定方法

对饲料、猪尿和猪粪样品进行基础理化性质测定,包括总固体物质含量(TS)、挥发性固体物质含量(VS)以及酸碱度(pH)。其中,TS和VS测定分别采用真空烘箱法和粗灰分测定法,pH值测定采用pH计法。饲料、猪尿和猪粪样品的排放特征分析,包括不同形态氮元素含量和总磷含量的测定,其中饲料和猪粪样品消解处理按照有机肥测定标准(NY 525-2012)进行。总氮(TN)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量采用凯氏定氮仪测定,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量采用酚二磺酸分光光度法(GB/T7480-1987)测定,总磷(TP)含量采用钼酸铵分光光度法(GB/T11893-1989)测定。每项测定指标均重复测定3次。

1.3 数据处理与统计分析

采用Excel 2010和Origin 9.0分别对饲料、猪尿和猪粪各项测定指标及不同生育期生猪体质量进行回归分析,采用SAS 9.1.3 Portable对不同样品各测定参数进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 后备母猪饲料氮磷元素变化特征

不同生育期后备母猪饲料中铵态氮和硝态氮含量分别为3.43~5.25 g/kg和0.53~1.52 g/kg,铵态氮含量是硝态氮含量的3.41至6.54倍(图1)。育肥猪前期(生猪体质量40.1~70.0 kg)饲料总氮含量最高,达到48.99 g/kg,比仔猪阶段(生猪体质量20.1~40.0 kg)和育肥猪后期(生猪体质量70.1~90.0 kg)饲料总氮含量分别高出7.69%和12.60%。与总氮含量相比,饲料中总磷含量较低,为2.56~3.74 g/kg,仅为总氮含量的5.82%~7.82%。全生育期内后备母猪饲料氮磷比为14.41±2.91。

随着后备母猪采食量增加,饲料中氮、磷素日均饲喂量明显升高,至生长中后期,氮磷日均饲喂量趋于稳定(图1)。全生育期内每头后备母猪总氮、铵态氮、硝态氮和总磷饲喂总量分别为3 895.80 g、422.17 g、100.70 g和277.00 g。饲料中氮元素含量的高低,直接影响生猪体内蛋白质水平,而磷元素作为骨骼的主要成分,对血液的凝固、神经与肌肉的功

能、体液的酸碱平衡、泌乳等方面起着重要作用,因此,合理的氮磷配方饲料有利于生猪的健康快速生长。然而,有研究结果表明,生猪氮表观利用率仅为

44.46% ~ 52.83%^[10],磷利用效率也仅为38.09% ~ 43.18%^[11]。日粮配方中过高估算了动物的氮磷营养需求^[12]。

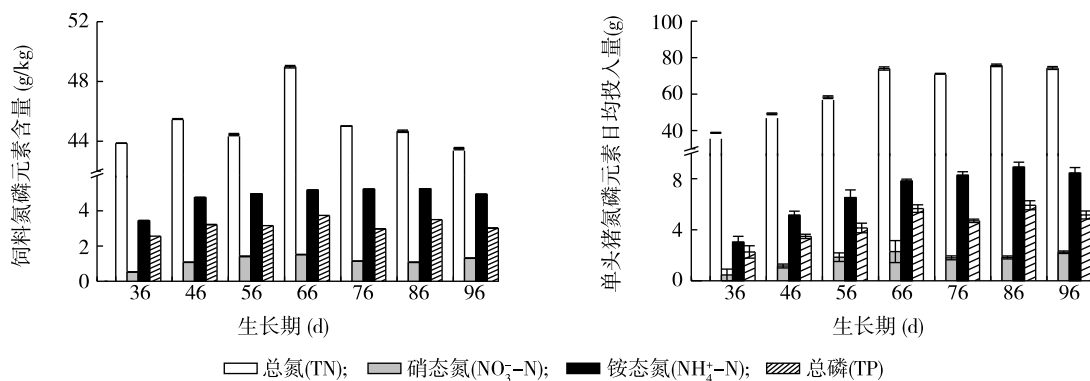


图1 不同生育期后备母猪饲料氮磷营养元素变化特征

Fig. 1 Characterization of nitrogen and phosphorus in gilts feed at different growth stages

2.2 不同生育期后备母猪尿液氮磷元素排放特征

后备母猪尿液总氮含量随体质量增加呈上升趋势(图2)。仔猪阶段尿液总氮含量为4.84 ~ 5.64 g/L,约为育肥猪前期与后期阶段尿液平均总氮含量的50%。铵态氮含量变化趋势与总氮含量较为相似,尤其在育肥后期阶段,尿液中铵态氮含量明显升

高,最高达到1.98 g/L。随着体质量增加,单头后备母猪尿液总氮和铵态氮日均排放量升高,分别为6.32 ~ 38.21 g/d和0.14 ~ 7.13 g/d(图2)。全生育期内单头后备母猪尿液总氮排放量达到1 130.42 g,其氮素排放能力是相关文献报道的1.15倍^[13-14],这可能与饲料配方中氮含量较高有关。

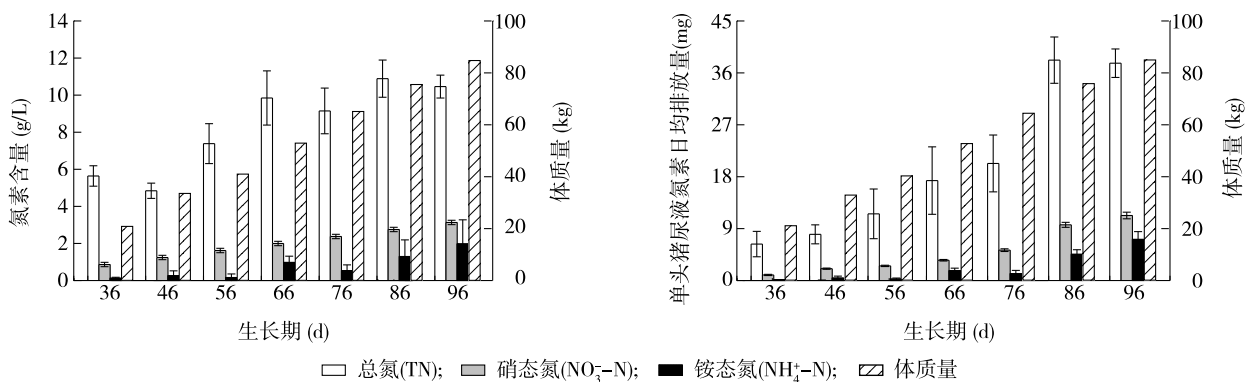


图2 不同生育期后备母猪尿液氮素排放量

Fig. 2 Emissions of nitrogen in gilts urine at different growth stages

在各生育期内后备母猪尿液硝态氮排放量均高于铵态氮,尿液硝态氮浓度和每头日均排放量分别为0.86 ~ 3.13 g/L和0.97 ~ 11.28 g/d。猪尿液硝态氮含量与生长周期具有良好的线性拟合度, R^2 值达到0.995,有助于生猪产排污系数的估算^[15-16]。与饲料中铵态氮含量大于硝态氮含量相反,猪尿液中铵态氮含量与硝态氮含量比值明显下降,仅为0.10 ~ 0.63,说明饲料经过消化后氮素形态发生了变化。

不同生育期后备母猪尿液总磷排放差异较大(图3)。20 kg仔猪尿液总磷含量最低,仅为0.54 mg/L;85 kg育肥猪尿液总磷含量最高,达到35.35 mg/L。尿液总磷日均排放量随后母猪体质量增加明显升高。刘静波等^[11]测定48 kg生猪的尿液磷排放量为 (29.00 ± 1.73) mg/d,高于本试验监测结果。单头后备母猪全生育期内尿液总磷排放量为1 182.37 mg,仅为尿液总氮排放量的0.10%。

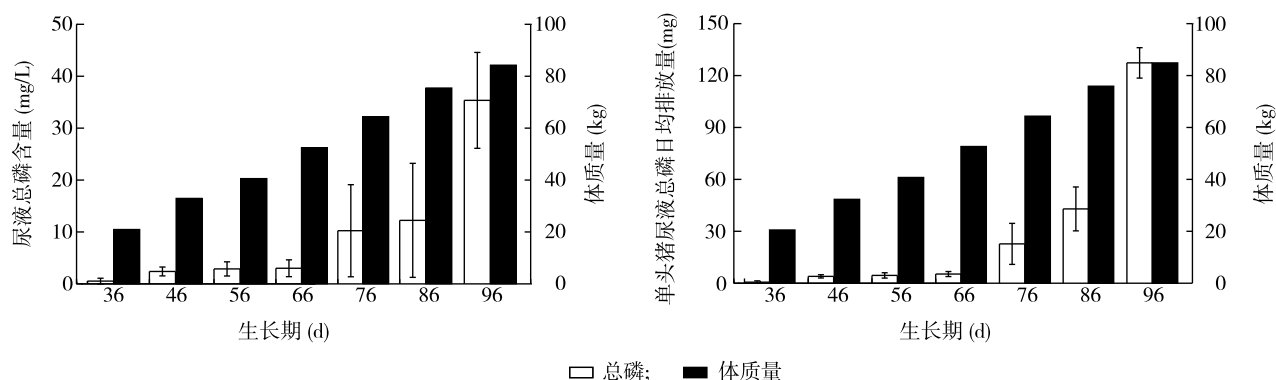


图3 不同生育期后备母猪尿液磷素排放量

Fig.3 Emissions of phosphorus in gilts urine at different growth stages

2.3 不同生育期后备母猪粪便氮磷元素排放特征

后备母猪粪便中不同形态氮素含量变化特征如图4所示。仔猪阶段粪便总氮含量平均为41.65 g/kg,与相应生长阶段饲料总氮含量较为接近。随着生猪体重快速增加,采食量明显增加,育肥猪前期阶段猪粪总氮含量迅速增高,至第54 d达到142.21 g/kg。生长后

期,因生猪消化能力进一步提升,粪便总氮含量下降,并稳定在55 g/kg左右,高于郭德杰等报道的研究结果^[17]。猪粪总氮日均排放量变化趋势与其总氮含量变化趋势较为相近。40 kg猪总氮日均排放量最高,达到29.08 g/d。全生育期内单头猪粪总氮排放总量为929.36 g,占猪粪干物质排放量的6.96%。

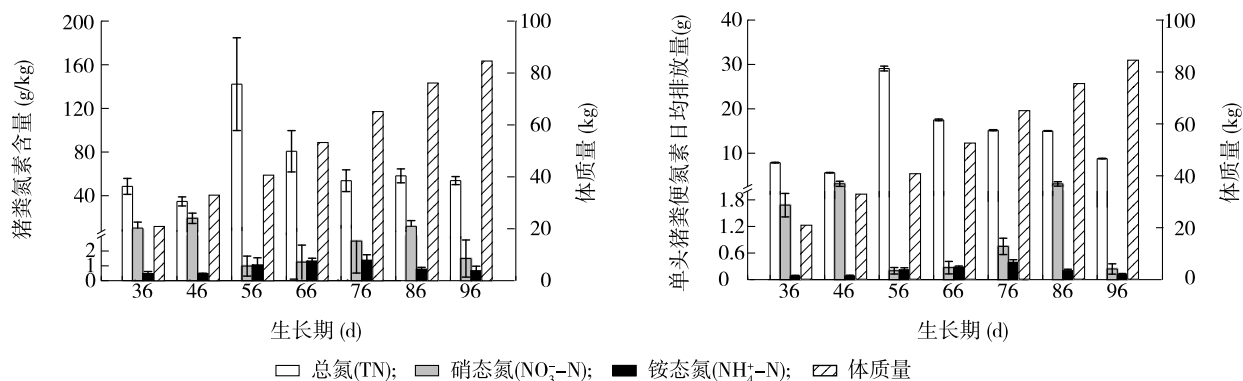


图4 不同生育期后备母猪粪便氮素排放量

Fig.4 Emissions of nitrogen in gilts manure at different growth stages

猪粪铵态氮含量与猪尿铵态氮含量变化趋势不同,育肥前期粪便铵态氮含量明显高于仔猪和育肥后期。全生育期内后备母猪粪便铵态氮排放总量占总氮排放量的1.37%,其铵态氮与总氮比值低于尿液。

不同生育期后备母猪粪便硝态氮含量差异较大,在0.98 g/kg至19.28 g/kg范围内变化。其中,仔猪阶段硝态氮日均排放量较高,且呈上升趋势。因为断奶仔猪对配方饲料未完全适应,氮的表观消化率较低^[18-19],饲料中氨基酸分解生成的无机盐,不能被完全吸收而排出体外,因此出现峰值。育肥前期硝态氮日均排放量明显下降,并在生长中后期

呈现小幅度升高趋势。随生猪体重进一步增加,硝态氮含量再一次下降。整个生育期内,猪粪硝态氮排放量是铵态氮排放量的7.22倍。通过对比猪粪内不同形态氮素排放量,发现总氮排放量远高于铵态氮和硝态氮,说明大量氮素以有机态形式存在于猪粪中。猪粪不同形态氮素排放总量均低于猪尿,育肥猪前期尿液总氮和硝态氮排放总量分别是猪粪的1.21倍和2.98倍。由此可见,尿液是后备母猪培育过程中氮素污染物最大排放源。

后备母猪粪便中总磷排放特征见图5,其中20 kg断奶仔猪粪便中总磷含量最高,达到2.89 g/kg。

整个生育期内,猪粪总磷含量均明显高于同阶段猪尿总磷含量。后备母猪生育早期磷素消化率较低,大量磷素排出体外,这与仔猪处于断奶期,未能完全适应饲料有关^[20-21]。单头后备母猪粪便总磷日均

排放量为0.27~0.53 g/d,低于粪便总氮日均排放量。全生育期内单头后备母猪粪便中总磷排放量为27.53 g,是尿液总磷排放量的23.28倍,说明后备母猪培育过程中磷素污染物的主要排放源为粪便。

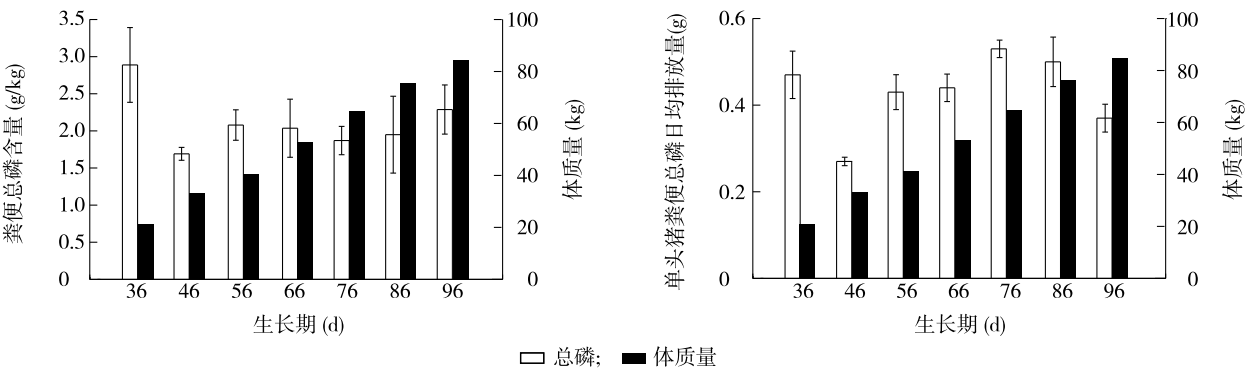


图5 不同生育期后备母猪粪便总磷排放量
Fig.5 Emissions of phosphorus in gilts manure at different growth stages

针对不同生育期后备母猪昼夜活动习性不同,对猪粪氮磷元素昼夜排放特征进行对比分析(表1)。猪粪总固体物质含量(TS)和挥发性固体物质含量(VS)分别为27.33%~31.79%和20.44%~23.05%,同一生育期内猪粪总固体物质含量和挥发性固体物质含量昼、夜间没有显著性差异。全生育期内猪粪pH值变化范围为6.32~7.30,相同生育

期内昼、夜间粪便样品pH值没有显著差异。仔猪阶段(34~36 d)粪便样品总氮和硝态氮含量昼、夜之间差异显著($P<0.05$),育肥前期阶段(74~76 d)粪便样品铵态氮含量昼、夜之间差异显著($P<0.05$)。粪便总磷含量变化范围为1.67~3.05 g/kg,相同生育期内昼、夜粪便总磷含量没有显著差异。

表1 后备母猪粪便氮磷元素昼夜排放特征比较

Table 1 Comparison of nitrogen and phosphorus emissions in gilts manure between day and night

生长时间 (d)	昼/夜	总固体物质含量 (%)	挥发性固体物质含量 (%)	pH 值	铵态氮含量 (g/kg)	硝态氮含量 (g/kg)	总氮含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)
34~36	昼	31.79a	20.64e	6.96ab	0.40h	12.98b	43.05e	2.73ab
	夜	31.67ab	20.93e	6.33b	0.56fgh	7.73c	54.02cd	3.05a
44~46	昼	27.57e	21.31e	6.61b	0.48gh	20.70a	31.37f	1.67f
	夜	27.33e	20.44e	6.34b	0.49gh	17.87a	38.14f	1.71f
54~56	昼	28.22de	21.81cde	6.65ab	0.98dc	0.75d	142.72a	2.04cdef
	夜	30.01abcd	23.05abcd	6.69ab	1.13bc	1.22d	141.70a	2.12cde
64~66	昼	28.19de	22.02bcde	6.47b	1.32b	1.00d	84.29b	2.04cdef
	夜	29.18bcde	20.95e	6.38b	1.31b	1.50d	77.13b	2.03cdef
74~76	昼	30.58abcd	23.47ab	7.30a	1.55a	3.00d	57.40cd	1.93def
	夜	30.86abc	23.62a	6.94ab	1.19bc	2.33d	50.08de	1.80ef
84~86	昼	28.83cde	21.40de	6.32b	0.80de	10.85bc	59.82c	1.78ef
	夜	29.59abcde	22.19abcde	6.20b	0.74ef	13.12b	56.57cd	2.12cde
94~96	昼	30.56abcd	23.02abc	6.80ab	0.65efg	1.15d	54.22cd	2.21cd
	夜	30.47abcd	22.81abcd	6.94ab	0.68efg	1.83d	53.46cd	2.36bc

同列不同字母表示差异达到0.05显著水平。

2.4 后备母猪氮磷污染物排放特征与饲喂投入水平的关系

后备母猪育成过程中,饲料配方及生猪采食量决定了饲喂投入水平。本研究中,在生育期63 d内,后备母猪采食量从每头0.89 kg/d增加至每头1.93 kg/d。仔猪阶段,后备母猪饲喂氮磷投入水平随着采食量的增加而升高,至育肥阶段,饲料总氮和总磷日均饲喂量分别维持在每头73.84 g/d和5.32 g/d。

图6所示为不同生育期后备母猪氮磷排放量与饲料投入水平比值。全生育期内总氮和总磷排放量分别为每头2 059.78 g和28.71 g,占饲料氮磷投入

总量的52.87%和10.37%。育肥前期阶段和育肥后期阶段总氮排放量与饲喂氮素投入总量的比值明显高于仔猪阶段,其中54~56 d和84~86 d该比值最大,达到0.70。铵态氮排出量与投入量比值随后备母猪的生长呈上升趋势,育肥后期铵态氮排出量与投入量比值达到0.86。不同生育期内粪尿硝态氮排放量与饲喂硝态氮投入量比值呈现倍数增长,仔猪阶段和育肥后期硝态氮排放量分别是饲料硝态氮投入量的5.08倍和6.07倍。粪尿总磷排放量与饲喂投入量比值仅在仔猪生长阶段表现较高,达到0.21,育肥期阶段该比值随猪体对磷素吸收利用效率提高而下降至0.09。

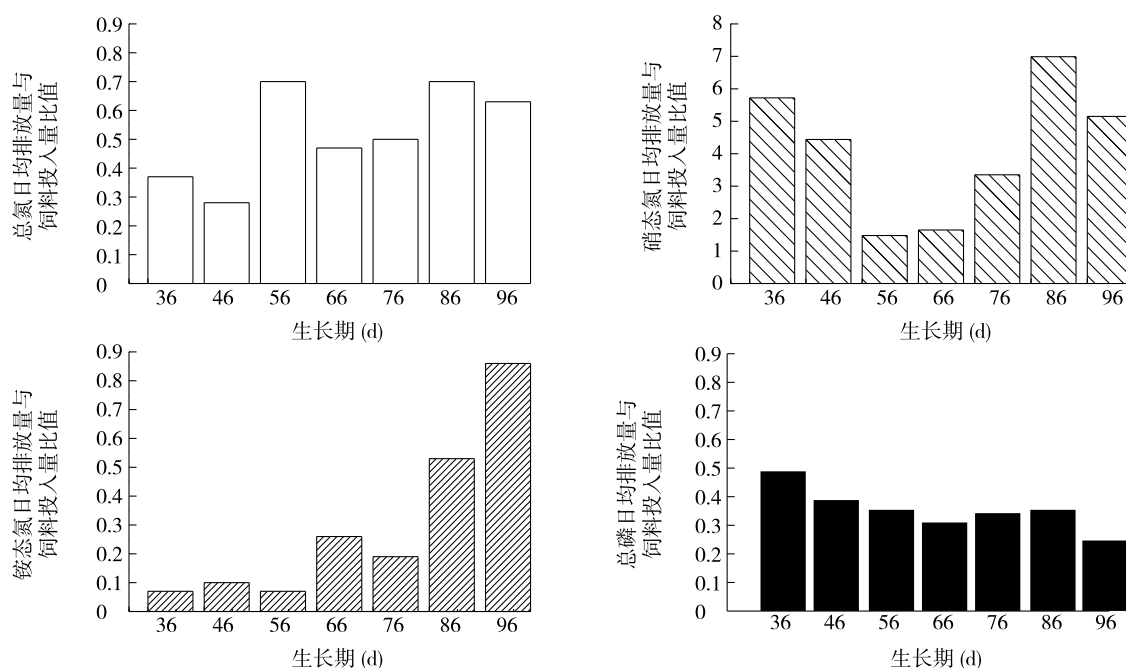


图6 不同生育期后备母猪氮磷污染物排放量与饲料投入水平比值

Fig. 6 The ratio of nitrogen and phosphorus emission and feed input at different growth stages of gilts

3 讨论

在仔猪断奶初期,因氮表观消化率和磷消化率较低,导致大部分氮和磷素以粪尿形式排出体外。因此,建议在仔猪生育前期添加无抗发酵饲料,通过改善断奶仔猪肠道菌群结构减少腹泻率,提高氮磷吸收利用效率^[22]。猪尿中不同形态氮素和磷素日均排放量在生猪生长期均随生猪体质量增加呈现上升趋势,尤其在育肥后期阶段,氮素日均排放量最高,达到37.94 g/d。因此,建议在后备母猪生育中

后期饲料配方中添加植酸酶^[23],以减少尿氮排放量。此外,粪便长期堆放对生猪健康和生产性能有较大影响,尤其是全漏缝地板式猪舍,其舍内 NH_3 挥发量是半漏缝地板的2.5倍^[24-25]。本研究结果表明,育肥后期猪粪尿总氮日均排放量最高,因此,针对不同生育期制定猪粪尿管理措施,减少舍内猪粪尿储备时间,对保障生猪健康生长具有积极促进作用。

本试验属于基础监测研究,以群体断奶仔猪为研究对象,监测范围涵盖全生育期,饲喂水平和氮磷

污染物排放特征具有一定代表性。试验数据表明氮磷污染物排放量低于或略低于第1次污染源普查华北地区相应生猪生育期产物系数。后续工作将通过开展不同饲喂水平下生猪全生育期氮磷迁移特征研究,为开展生命周期评价^[26-27],进一步积累数据。长期的规模化养殖场环境监测工作,对因地制宜制定环境风险调控机制,保障生猪养殖业健康发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [2] 朱建春, 张增强, 樊志民. 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.
- [3] 胡向东, 黄仁, 何忠伟. 畜禽规模养殖场废弃物处理的现状分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 302-304.
- [4] 潘洁, 肖辉, 陆文龙. 天津市畜禽养殖粪便产生量估算及耕地负载初步评估[J]. 山西农业科学, 2014, 42(5): 517-520.
- [5] 谭新. 猪排泄物中氮、磷、铜对周围环境的影响及其营养调控措施[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [6] LEEK A B G, CALLAN J J, REILLY P, et al. Apparent component digestibility and manure ammonia emission in finishing pigs fed diets based on barley, maize or wheat prepared without or with exogenous non-starch polysaccharide enzymes[J]. Animal Feed Science and Technology, 2007, 35: 86-99.
- [7] HOLZEL C S, MULLER C, HARMS K S, et al. Heavy metals in liquid pig manure in light of bacterial antimicrobial resistance[J]. Environmental Research, 2012, 113: 21-27.
- [8] RADL V, KINDLE R, WELZL G, et al. Drying and rewetting events change the response pattern of nitrifiers but not denitrifiers to the application of manure containing[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 95: 99-106.
- [9] 何余湧, 罗建华, 吴志勇, 等. 饲料对生猪养殖小区粪便产量及污染物背景值的影响[J]. 饲料工业, 2010, 31(15): 51-54.
- [10] 姜建阳, 远德龙, 朱绍伟, 等. 低蛋白日粮添加合成氨基酸对鲁菜生长猪氮平衡和氨基酸消化率的影响[J]. 营养饲料, 2015, 51(19): 29-33.
- [11] 刘静波, 杨跃奎, 何健. 日粮磷水平对线性回归法测定磷真消化率的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2014, 45(4): 572-577.
- [12] 印遇龙, 黄瑞林, 张宇喆, 等. 生猪集体氮代谢及其减排调控研究进展[C]//中国畜牧兽医学会. 生态环境与畜牧业可持续发展学术研讨会暨中国畜牧兽医学会2012年学术年会和第七届全国畜牧兽医青年科技工作者学术研讨会论文集. 北京: 中国畜牧兽医学会, 2012: 2-19.
- [13] 董殿元. 低蛋白质氨基酸平衡饲料对生长猪生长性能和氮素减排的影响研究[J]. 养猪, 2015(1): 41-44.
- [14] 董志岩, 方桂友, 陈婉如, 等. 日粮粗蛋白质、可消化赖氨酸水平对生长猪生长性能和氮排泄量的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(3): 227-231.
- [15] WANG X, DADOUMA A, CHEN Y, et al. Sustainability evaluation of the large-scale pig farming system in North China: an emergy analysis based on life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 102: 144-164.
- [16] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产物系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303-307.
- [17] 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.
- [18] 吴信, 张永刚, 燕富永, 等. 猪日粮有效磷水平对氮磷排放的影响[J]. 家畜生态学报, 2007, 28(5): 62-67.
- [19] 周丽, 黄彪. 日粮营养物质对猪粪中氮、磷、铜、锌和氨气含量的影响[J]. 饲料工业, 2008, 29(17): 60-64.
- [20] FAN M Z, SAUER W C. Additivity of apparent ileal and fecal phosphorus digestibility values measured in single feed ingredients for growing-finishing pigs[J]. Canadian Journal of Animal Science, 2002, 82: 183-191.
- [21] YOON J H, INGALE S L, KIM J S, et al. Effects of dietary supplementation of synthetic antimicrobial peptide-A3 and P5 on growth performance, apparent total tract digestibility of nutrients, fecal and intestinal microflora and intestinal morphology in weanling pigs[J]. Livestock Science, 2014, 159: 53-60.
- [22] 胡新旭, 周应华, 刘惠知, 等. 无抗发酵饲料对断奶仔猪生长性能、肠道菌群、生化指标和免疫性能的影响[J]. 动物营养学报, 2013, 25(12): 2989-2997.
- [23] 潘雪男, 山本朱美. 减少猪尿氮排泄量及粪尿氮量的技术[J]. 国外畜牧学——猪与禽, 2005, 25(3): 29-33.
- [24] 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.
- [25] PHILIPPE F X, CABARAUX J F, NICKS B, et al. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 141: 245-260.
- [26] GUTIERREZ A S, ERAS J J C, BILLEN P, et al. Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(4): 2518-2528.
- [27] AITKEN D, BULBOA C, FAUNDEZ A G, et al. Life cycle assessment of macroalgae cultivation and processing for biofuel production[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 75: 45-56.

(责任编辑: 张震林)