

邓盾, 王刚, 陈卫东, 马现永. 低蛋白日粮在不同生长阶段猪上的应用研究进展 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(4): 101-108.

低蛋白日粮在不同生长阶段猪上的应用研究进展

邓盾, 王刚, 陈卫东, 马现永

(广东省农业科学院动物科学研究所 / 畜禽育种国家重点实验室 /
农业部华南动物营养与饲料重点实验室 / 广东省畜禽育种与营养研究公共实验室 /
广东畜禽肉品质量安全控制与评定工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要: 蛋白质饲料资源短缺, 饲料利用率低以及污染问题制约了畜禽养殖行业的发展, 低蛋白日粮通过添加合成氨基酸, 减少了豆粕等蛋白原料的使用, 提高了饲料利用率, 有利于养殖业的可持续发展。综述了低蛋白日粮在不同生长阶段猪上的应用。从已有的研究中发现, 采用代谢能和消化能体系配制的低蛋白日粮易造成胴体变肥, 建议使用以净能体系为基础的日粮配制方法; 减少 1%~4% 蛋白质对各生长阶段猪的生长性能影响不大, 但减少氮排放的效果显著; 仔猪和母猪日粮中蛋白含量不宜过低, 多数研究建议蛋白质含量降低 1%~3% 为宜; 同时, 低蛋白日粮中添加支链氨基酸 *L*-Leu、*L*-Val 和 *L*-Ile 有利于机体生长性能和免疫性能的提升。最后探讨了目前低蛋白研究和应用过程中的相关问题, 认为低氮日粮具有广泛的应用前景。

关键词: 猪; 低蛋白日粮; 氨基酸平衡日粮; 净能体系; 氮排放; 支链氨基酸

中图分类号: S816

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2019) 04-0101-08

Research Progress on the Application of Low Protein Diets in Pigs at Different Growth Stages

DENG Dun, WANG Gang, CHEN Weidong, MA Xianyong

(*Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/ State Key Laboratory of Livestock and Poultry Breeding/ Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science in South China, Ministry of Agriculture / Guangdong Public Laboratory of Animal Breeding and Nutrition/ Guangdong Research Center of Livestock and Poultry Meat Quality Control and Evaluation Engineering Technology, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: The shortage of protein feed resources, low feed utilization rate and pollution problems have restricted the development of livestock and poultry breeding industry. Low protein diets balanced with synthetic amino acids could reduce the use of protein materials such as soybean meal, improve feed utilization rate, and be benefit to sustainable development of the breeding industry. The application of low protein diets in pigs at different growth stages were summarized in this article. Based on the previous studies, it was found that low protein diets prepared with metabolizable energy and digestible energy feeds were prone to cause carcass to become fat, and a net energy-based diet formulation method was recommended. Reducing the protein level of 1%~4% could improve the growth performance of pigs in each growth stage to some extent, and the effect of reducing nitrogen emission was remarkable. However, the protein content in the diets of piglets and sows should not be too low, and a reduction of 1%~3% in low protein diets was suggested in most studies. The addition of branched-

收稿日期: 2019-02-15

基金项目: 广东省农业科学院院长基金 (201807); 广东省畜禽育种与营养研究重点实验室开放运行项目 (2017B030314044); 广东省现代农业产业技术体系创新团队项目 (2018LM1080)

作者简介: 邓盾 (1985—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态养殖与环境控制, E-mail: dengdun2008@126.com

通信作者: 马现永 (1971—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为生态养殖与环境控制, E-mail: 407986619@qq.com

chain amino acids *L*-Leu, *L*-Val and *L*-Ile in low protein diets was beneficial to the improvement of growth performance and immune performance of the organism. Finally, based on these studies, issues related to the current research and application of low protein were discussed in this paper. It is believed that low nitrogen diets have broad application prospects.

Key words: pig; low protein diets; diets balanced with amino acids; net energysystem; nitrogen emission; branched-chain amino acids

畜禽养殖行业给人们提供了优质蛋白质产品的同时也带来了较为严重的环境污染问题。全世界 80% 的生猪养殖在中国, 如何减少猪的氮排放对于解决我国养殖行业的污染问题至关重要。饲料原料中过高比例的氮是增加污染的主要原因之一。据统计, 规模化养殖中约 6 成左右的氮以粪尿的形式排出体外, 这不仅造成资源浪费, 还引起空气、水域污染以及养殖环境恶化等问题^[1-3]。而且氨气等含氮臭气具有强刺激性, 极易溶解在猪的眼结膜和呼吸道粘膜上, 引起结膜炎、支气管炎等系列炎症^[4-5], 严重时会降低动物的采食量和日增重^[6], 影响动物福利^[7]。可见降低饲料中的氮比例, 提高消化利用率对于养殖行业的节能减排意义重大^[8]。

目前, 猪日粮主要是以豆粕等高粗蛋白(Crude protein, CP) 原料为基础的配方饲料, 其优点是氨基酸种类全面, 营养丰富。但是这部分氮营养难以被动物消化利用, 而且豆粕等原料多依赖于进口, 一旦出现贸易摩擦, 对我国养殖行业的发展将极为不利。低蛋白日粮通过添加合成氨基酸, 减少了豆粕等蛋白饲料的使用。同时, 由于添加了合成氨基酸, 降低蛋白质分解过程中的能耗和蛋白合成过程中氨基酸转运, 有利于机体的消化吸收, 减少氮排放^[9-11]。随着合成生物学和氨基酸工业的发展, 工业氨基酸价格逐渐降低, 低蛋白日粮的成本优势凸显, 必将成为饲料行业发展的新趋势。本综述对近年来有关低蛋白日粮在不同生长阶段猪上应用的研究进行了总结, 以期为养殖行业的节能减排工作提供依据。

1 低蛋白日粮的概念及功能

低蛋白日粮是指将饲料中氮水平按猪的营养需求 NRC2012 或我国《猪饲养标准》(NY/T 65-2004) 的推荐量降低 1%~4%, 并按照动物不同生长阶段的营养需求配制成的饲料。目前, 不断增大的环保压力和日益紧张的饲料原料资源推动着低蛋白日粮研发的飞速发展。按照添加氨基酸种类的不同, 低蛋白饲料大致可以分为 3 种: 完全

必需氨基酸平衡的低蛋白日粮、部分必需氨基酸平衡的低蛋白日粮和必需氨基酸 + 非必需氨基酸平衡的低蛋白日粮, 其中以部分必需氨基酸(如: *L*-Lys, *L*-Thr, *L*-Trp, *D,L*-Met) 平衡的低蛋白日粮为主。但无论哪种形式的低蛋白日粮, 都应根据氨基酸平衡理论和理想蛋白模型进行精准设计, 其总体的氮水平和能量水平都不应低于机体需求量。

根据氨基酸平衡理论, 所有的氨基酸都可以当成可消化和代谢的蛋白质, 饲料中氨基酸的比例和含量应与动物机体一致或者接近, 此时氨基酸利用率最高。但氨基酸的含量并非越多越好, 过多氨基酸只能通过脱氨基作用, 作为能源被利用, 增加机体能耗和排泄量。研究证实, 只要进行科学配比设计, 低蛋白日粮不仅不会降低猪的生产性能, 而且对于降低饲料成本、减少氮排放、减少对豆粕等蛋白原料的进口依赖度都大有益处。

2 低蛋白日粮在生猪养殖上的应用

2.1 低蛋白日粮在母猪上的应用

使用低蛋白日粮可明显减低母猪养殖环境中的氮排放, 从而有利于母猪健康状况和采食量的提高。研究表明, 16% 低蛋白饲料能够提高哺乳母猪的采食量 2%, 提高窝重 10%, 提高泌乳量 8.5%, 同时栏舍风机位置的氨气浓度从第 3 周开始明显减少 8.9%~10.9%^[12]。陈军等^[13]使用了更低水平的粗蛋白日粮, 对试验组妊娠期母猪饲喂 9.5% 的低蛋白日粮, 对照组饲喂 13.5% 的粗蛋白日粮, 结果试验组母猪的平均总产仔数、平均产活仔数、平均初生窝重均和对照组差异不显著, 但是氮的日排泄量和粪含氮量均显著降低。可见, 在母猪养殖过程中应用低蛋白日粮不会影响其生长性能。而且多个研究表明, 低蛋白日粮同样适用于梅山母猪^[13]、长大二元杂交母猪^[14]、金华初产母猪^[15]等多个品种, 不影响这些母猪的生长和生产性能。

L-Lys 是豆粕型日粮的第一限制氨基酸, 对

于母猪泌乳性能至关重要。降低母猪日粮的粗蛋白含量,但 *L*-Lys 的含量不能降低,泌乳母猪日粮中绝大多数 *L*-Lys 用于泌乳,在氨基酸平衡的低蛋白日粮中添加适当的 *L*-Lys 有利于提高母猪的泌乳性能^[16]。但是 *L*-Lys 含量并非越高越好,董志岩等^[17]在母猪 15.5% 的低蛋白日粮中添加不同水平的赖氨酸 (0.9%~1.05%),发现 0.90% 添加组比 1.00% 和 1.05% 添加组的仔猪窝均增重提高了 7.98% 和 9.81%,粪氮排放减少了 15% 左右。方桂友等^[18]在夏季高温条件下作了类似实验,结果说明减少 2.5% 的粗蛋白 (15.5%)、添加 0.83% *L*-Lys 的平衡日粮,能显著提高哺乳仔猪的平均日增重,减少母猪泌乳期失重,减少 16.11% 的粪氮排泄量。

2.2 低蛋白日粮在仔猪上的应用

低蛋白日粮在仔猪中同样应用效果良好,大量的研究 (表 1) 表明,适当降低日粮蛋白质水平、补充合成氨基酸,不会影响仔猪的生产性能,同时可有效降低仔猪的氮排放。罗增梅等^[19]将粗蛋白含量为 18% 的小麦-豆粕型仔猪日粮减少至 15%,结果仔猪血清中尿素氮水平减少了 35.2%,同时日增重增加了 0.71%,料肉比增加了 3.76%。曹开梅等^[20]采用玉米-豆粕型日粮做了相似的研究,将 18% 粗蛋白的仔猪日粮减少至 14%~17% 不等,结果表明仔猪日粮中降低 1%~3% 粗蛋白对仔猪生长性能影响不显著;但是继续减

少粗蛋白水平至 14% 则会降低动物的生长性能。荆园园等^[21]通过代谢组学分析, α -酮异戊酸和缬氨酸在 14% 粗蛋白日粮组显著降低;与此相反,血清总胆固醇、游离脂肪酸和肝脏 IGFBP-1 的 mRNA 表达水平却显著升高,因此低蛋白日粮造成仔猪生长受限,与肝脏 IGF- I 和 IGFBP-1 的表达有关,肝脏缬氨酸和 α -酮异戊酸等代谢关键物有可能在此过程中发挥重要作用^[21-23]。

豆粕含有较高的粗蛋白,可采用棉籽粕等低蛋白饲料原料代替豆粕配制低蛋白日粮,但棉籽粕中含有游离的棉酚等生长抑制因子,可能会抑制仔猪生长,补充合成氨基酸不仅能平衡棉籽粕的粗蛋白水平,还可缓解抑制因子的抑制作用。宋阳等^[24]采用普通棉籽粕替代 50% 的豆粕,通过补充 9 种氨基酸,使仔猪的平均采食量、平均日增重以及 G/F 值达到与纯豆粕日粮接近的效果。

低蛋白日粮结合其他一些技术可进一步提高节氮减排的效果。如采用微粉碎技术能进一步提高饲料利用率,减少氮排放。李伟跃等^[25]将仔猪日粮粗蛋白降低 1%,采用普通粉碎和超粉碎两种方式加工原料,粪尿氮减排率分别显著减少 26.79%、32.89%。在低蛋白日粮中添加酶制剂 (如蛋白酶、木聚糖酶等) 也是提高营养消化利用率的常用方式。窦勇等^[26]研究发现,添加 0.2% 复合酶制剂,粗蛋白表观消化率提高了 19.83%,粪尿氮排放量降低 42.27%,减排效果十分显著。

表 1 低蛋白日粮对仔猪生长性能的影响

Table 1 Effect of low protein diets on growth performance of piglets

蛋白水平 Protein level (%)	体重 Weight (kg)	氨基酸添加种类及比例 Types and proportions of amino acids (%)	平均日采食量 Average daily feed intake (kg/d)	平均日增重 Average daily gain (kg/d)	饲料转化率 Feed to gain ratio G/F	文献来源 Data sources
18	15	不平衡	0.782	0.42	1.86	[19]
17	15	Lys 0.73, Met 0.16, Thr 0.26, Typ 0.06	0.777	0.46	1.70	[19]
14	15	Lys 0.76, Met 0.29, Thr 0.37, Typ 0.07	0.785	0.41	1.93	[19]
18	25	不平衡	1.75	0.79	2.22	[20]
17	25	Lys 0.09, Thr 0.04, Typ 0.02	1.73	0.76	2.28	[20]
15	25	Lys 0.27, Thr 0.12, Typ 0.05	1.68	0.74	2.26	[20]
14	15	Lys 0.88, Met 0.57, Thr 0.43, Typ 0.11, Ile 0.45, leu 0.32, Val 0.41, Phe 0.34, His 0.22	1.08	0.58	1.86	[24]

2.3 低蛋白日粮在生长肥育猪上的应用

生长育肥阶段是整个生猪饲养过程中饲料消耗最大的阶段,占总耗料的 2/3,如何降低这一

部分能耗对于养殖行业的可持续发展至关重要。研究表明,降低生长肥育猪日粮中的粗蛋白水平,对于减少氮排放效果显著 (表 2)。日粮中蛋白

水平每降低 1%，氨气排放量降低 10% 左右，总氮排放量降低 8.0% [27]。吴东等 [28] 在生长育肥阶段使用 14% 和 15% 粗蛋白的低蛋白日粮，发现血清中的氮水平分别比 17% 粗蛋白日粮降低了 16.05% 和 11.59%，粪便中氨气分别减少了 17% 和 14.6%；而饲喂 13% 和 14% CP 的低蛋白日粮较 15% CP 的高蛋白日粮，生猪血清中的氮水平分别降低了 10.05% 和 17.31%，粪便中氨气最高降低了 15%。多数研究表明日粮降低 1%~4% 粗蛋白，对生长猪和肥育猪的生长性能、胴体性质、肉质均无显著影响 [29]。

一些关键的氨基酸对生长肥育猪的生长性能有明显影响 [30]。目前，平衡低氮日粮一般添加了一些限制性的必需氨基酸，通常使用 *L*-Thr、*L*-Trp、*L*-Lys、*D,L*-Met 等 [31]。李宁等 [29] 认为降低 *L*-Trp 水平会显著降低育肥猪平均日增重和采食量，而降低同样水平的 *L*-Thr 则无显著影响；通过分析血清中游离氨基酸含量发现，一些必需

氨基酸如 *L*-Ile 和 *L*-Val 含量明显升高，说明缺乏 *L*-Trp 影响到其他氨基酸的利用，进而干扰猪的其他生理代谢。该结论与 Nathalie 等 [32] 的研究结果基本一致，他们发现低蛋白饲料中 *L*-Trp 和 *L*-Val 的短缺将显著影响猪的平均日增重。必需氨基酸中的一些支链氨基酸有利于肥育猪生长性能和健康状况的提升。Jiao 等 [33] 认为补充 *L*-Trp、*L*-Ile 和 *L*-Val 比补充 *L*-lys、*L*-Thr 和 *D,L*-Met 更有利于肥育猪平均日增重的提高，同时 IgG 和 IgA 等免疫因子表达水平上升，有利于机体免疫力的提高。

另外，除了补充必需氨基酸外，一些非必需氨基酸也可调控生长肥育猪对低蛋白日粮利用状况。甄吉福等 [34] 在 12.5% 和 11% 的低蛋白日粮中补充 *L*-Glu 和其他一些必需氨基酸，发现添加 *L*-Glu 可降低育肥猪的尿氮和总氮排放量，提高蛋白质利用效率，但对育肥猪的生产性能则无显著影响。

表 2 低蛋白日粮对生长肥育猪生长性能的影响

Table 2 Effect of low protein diets on growth performance of growing and finishing pigs

蛋白水平 Protein level (%)	体重 Weight (kg)	氨基酸添加种类及比例 Types and proportions of amino acids (%)	平均日采食量 Average daily feed intake (kg/d)	平均日增重 Average daily gain (kg/d)	饲料转化率 Feed to gain ratio G/F	文献来源 Data sources
14	70	不平衡	2.29	0.77	2.94	[29]
10	70	Thr 0.67, Trp 0.60, Lys 0.20	2.52	0.83	3.03	[29]
14.5	55	Lys 0.28, Met 0.06, Thr 0.11, Trp 0.03	2.34	0.82	2.85	[27]
12.5	55	Lys 0.45, Met 0.12, Thr 0.19, Trp 0.05	2.33	0.80	2.93	[27]
14	55	Lys 0.17, Met 0.03, Thr 0.04, Trp 0.01, Cys 0.02	2.36	0.95	4.0	[34]
12.5	55	Lys 0.31, Met 0.05, Thr 0.10, Trp 0.03, Cys 0.04, Glu 0.43	2.44	0.96	3.9	[34]
11	55	Lys 0.48, Met 0.08, Thr 0.18, Trp 0.05, Cys 0.07, Val 0.10, Ile 0.08, Phe 0.02, Glu 0.87	2.59	0.95	3.7	[34]

3 生猪低蛋白日粮配制的相关问题

3.1 采用净能体系配制低蛋白日粮

目前，配制猪饲料普遍采用消化能和代谢能体系，但随着研究深入，人们发现消化能和代谢能体系已不能完全满足动物营养的需求，越来越多的学者推荐使用净能来配制日粮。净能是指饲料的代谢能扣除饲料在体内的热增耗后剩余的能量，也是动物采食饲料的总能减去粪便、尿液、气体排放的能量。由于高蛋白、纤维素等饲料原料在消化过程中代谢时间延长，过量的氮增加热量的消化，降低了饲料的净能。因此，饲料代谢

能并不能完全反映饲料能值，而净能相对而言更为准确。低蛋白日粮中添加适当的氨基酸，降低了机体对饲料代谢的能耗，因而有利于氮素营养的吸收 [35]。

大量研究和生产经验表明，若不使用净能体系配制低蛋白日粮，很容易导致生长育肥猪胴体变肥 [36-37]。这是因为采用消化能和代谢能配制的低蛋白日粮中，补充的氨基酸减少了蛋白质周转和机体代谢的能量损耗，氨基酸的脱氨作用也大大减少，多余的热量被贮存为脂肪，使得胴体变肥 [38]。准确配制低蛋白日粮必须对饲料原料

的净能值进行测定,但净能值测定的过程比较繁琐,这是制约其应用的一大因素。在实际中,通常将氨基酸的总能值乘以 0.75 转化为净能值使用^[39]。研究人员发现采用净能体系能很好地解决低蛋白日粮致胴体变肥的问题^[38],这一点得到了尹慧红等^[40]学者研究的证实,采用净能体系配制低蛋白日粮饲喂育肥猪,即使粗蛋白降低 4%,补充的合成氨基酸后也不影响机体胴体品质和肌肉品质。此外,不少研究表明,*L-Lys* 在机体生长发育中具有重要作用,是第一限制氨基酸,日粮中 *L-Lys* 和能量的绝对数量和比例对机体蛋白质和脂肪的沉积有显著影响,采用 *L-lys*/净能比配制低蛋白饲料,能更好地平衡营养,提高胴体性能^[38,41]。

3.2 从满足猪生长和营养两角度配制低蛋白日粮

目前生猪饲料配制都有考虑到猪不同生长阶段的营养需求特点,但很少有研究根据不同生长阶段生猪的生长特点来配制低蛋白日粮。随着氨基酸研究的深入,一些氨基酸功能逐渐被揭示出来,特别是一些支链氨基酸的功能,在不同生长阶段的猪中加入不同种类的支链氨基酸有利于机体机能和生产性能的提升,如在母猪低蛋白日粮中添加 *L-Val* 和 *L-Ile* 等支链氨基酸可以有效提高母猪泌乳和生产性能^[42];在仔猪低蛋白日粮中添加 *L-Leu*、*L-Val* 和 *L-Ile* 等支链氨基酸能刺激蛋白合成和提高免疫力^[43-46],促进仔猪健康生长,减少抗生素使用;在生长肥育猪低蛋白日粮中添加 *L-Arg*,可提高瘦肉率、降低脂肪率、改善猪肉肉质性状^[47]。因此,在低蛋白日粮配制过程中应充分考虑猪的营养需求和功能需求。

3.3 提升氨基酸制备工艺促进低蛋白日粮的应用

在整个猪养殖成本中,饲料成本占 60%~70%,如何降低饲料成本是市场关注焦点。减少豆粕等高成本原料的使用是节约成本的关键。研究表明,在 25 kg 生长猪上,减少日粮 2% 粗蛋白,成本可下降 0.3 元/kg;减少日粮 3% 粗蛋白,成本可下降 0.5 元/kg^[48]。和玉丹等^[49]研究指出,在 50 kg 中猪上,减少日粮 3% 粗蛋白,成本可减少 0.17 元/kg。此外,随着环保压力的增大,粪污处理成本在规模养殖中的比例逐渐增大,低蛋白日粮由于减少了氮排放,也将显著减少环保处理成本。

尽管优势明显,但低蛋白日粮在应用过程中

依然存在一些问题。从营养和功能角度,添加全部 8 种必需氨基酸和一些关键非必需氨基酸更能满足动物生长需求。但由于氨基酸生产工艺和成本等原因,*L-Lys*、*L-Thr*、*L-Trp* 工艺相对成熟,价格较低,现阶段饲料和养殖企业主要采用添加一些低成本的限制性必需氨基酸来配制低蛋白日粮。但一些重要的氨基酸如 *L-Leu*、*L-Val* 和 *L-Ile* 等对猪的生长性能有显著影响^[43-46,50],却很少添加。因此加强此类氨基酸生产工艺的研发,是进一步降低低蛋白日粮成本,提高养殖业经济效益的关键。

4 展望

随着饲料短缺和环保问题的日益紧迫,低蛋白日粮的研究和技术推广势在必行。大量研究表明,将猪各个阶段的日粮粗蛋白水平降低 2%~3% 不会对猪的生长性能产生负面影响,相反对养殖成本的降低、猪的消化利用率的提高、氮气排放的减少等具有明显效果。但是现阶段低蛋白日粮在研究和应用中存在一些问题,例如饲料配制过程中仍采用以代谢能和消化能为基础的配制方法为主,而以净能为基础的饲料配制方法没有得到广泛推广和应用;此外鉴于 *L-Lys* 在动物代谢中的重要地位,建议采用 *L-lys*/净能比配制低蛋白饲料,针对不同生长阶段猪研究合适的饲料净能需求。此外,受制于氨基酸制备工艺,目前配制低蛋白日粮使用的还是 *L-Lys*、*L-Thr*、*L-Trp*、*D,L-Met* 部分必需氨基酸,而不是全部 8 种必需氨基酸,加强氨基酸制备工艺的研发,降低氨基酸使用成本是进一步提高低蛋白日粮经济效益、提升低蛋白日粮使用效果的关键。尽管低蛋白日粮的使用效果显著,但也要结合不同生长阶段猪的生长特点配制低蛋白日粮,比如仔猪阶段,过多减少粗蛋白含量会使机体生长受限,也会导致母猪乳蛋白合成受到抑制,建议使用的粗蛋白水平比正常值低 2%,相关研究也需进一步加强,以提供优质、经济、高效的低蛋白日粮。

参考文献 (References):

- [1] 熊毅俊,林群,孙明华,万忠. 2016 年上半年广东生猪产业发展形势与对策建议[J]. 广东农业科学, 2016, 43(10): 15-20. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2016.10.004.
XIONG Y J, LIN Q, SUN M H, WAN Z. Development situation and countermeasures of Guangdong pig industry in the first half of 2016[J].

- Guangdong Agricultural Sciences*,2016,43(10):15–20. doi:10.16768/j.issn.1004–874X.2016.10.004.
- [2] WANG Y, DONG H M, ZHU Z P, LI L L, ZHOU T L, BO J, XIN H W. CH_4 , NH_3 , N_2O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016,217:1–12. doi:10.1016/j.agee.2015.10.020.
- [3] PETERSEN S T. The potential ability of swine nutrition to influence environmental factors positively [J]. *Journal of Animal Science*,2010,88(S13):E95–E101. doi:10.2527/jas.2009–2348.
- [4] 陈俊李. 14 例急性氨气中毒气道损伤患者的整体护理 [J]. 当代护士 (下旬刊), 2016 (4) : 82–83.
CHEN J L. Holistic nursing of 14 patients with acute ammonia poisoning airway injury [J]. *Contemporary Nurse (Late Issue)*,2016(4):82–83.
- [5] 李季, 王同心, 姚卫磊, 胡麟, 高云, 黄飞若. 畜禽舍氨气排放规律及对畜禽健康的危害 [J]. 动物营养学报, 2017, 29 (10) : 3472–3481. doi: 10.3969/j.issn.1006–267X.2017.10.007.
LI J, WANG T X, YAO W L, HU L, GAO Y, HUANG F R. Ammonia emission characteristic from livestock and poultry house and its harm to livestock and poultry health [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017,29(10):3472–3481. doi: 10.3969/j.issn.1006–267X.2017.10.007.
- [6] 曹进, 张峥. 封闭猪场氨气对猪群生产性能的影响及控制试验 [J]. 养猪, 2003 (4) : 42–44. doi: 10.3969/j.issn.1002–1957.2003.04.023.
CAO J, ZHANG Z. Effect of ammonia gas in closed pig farm on production performance of pigs and control experiment [J]. *Swine Production*, 2003(4):42–44. doi: 10.3969/j.issn.1002–1957.2003.04.023.
- [7] 孟丽辉, 李聪, 卢庆萍, 张宏福, 马金霞. 不同氨气浓度对肉鸡福利的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2016, 47 (8) : 1574–1580. doi:10.11843/j.issn.0366–6964.2016.08.007.
MENG L H, LI C, LU Q P, ZHANG H F, MA J X. Effect of different ammonia concentrations on broiler welfare [J]. *Acta Veterinaria Et Zootechnica Sinica*, 2016,47(8):1574–1580. doi:10.11843/j.issn.0366–6964.2016.08.007.
- [8] DALGAARD T, HANSEN B, HASLER B, HERTEL O, HUTCHINGS N J, JACOBSEN B H, JENSEN L S, KRONVANG B, OLESEN J E, SCHJ RRING J K. Policies for agricultural nitrogen management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2014,9(11):115002. doi:10.1088/1748–9326/9/11/115002.
- [9] WANG Y M, ZHOU J Y, WANG G, CAI S, ZENG X F, QIAO S Y. Advances in low–protein diets for swine [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2018,9(4):60. doi:10.1186/s40104–018–0276–7.
- [10] LI Y H, LI F N, DUAN Y H, GUO Q, WANG W, WEN C, HUANG X, YIN Y. The Protein and energy metabolic response of skeletal muscle to the low–protein diets in growing pigs [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017,65(39):8544–8551. doi:10.1021/acs.jafc.7b02461.
- [11] PIERER M, AMON B, WINIWARTER W. Adapting feeding methods for less nitrogen pollution from pig and dairy cattle farming: abatement costs and uncertainties [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016,104(2):201–220. doi:10.1007/s10705–016–9767–0.
- [12] 张光磊, 蒋载阳, 廖奇, 江书忠, 曹霞, 燕富水, 肖淑华. 低蛋白日粮对哺乳母猪生产性能和猪舍氨气浓度的影响 [J]. 饲料博览, 2018 (1) : 10–12. doi:1001–0084(2018)01–0010–03.
ZHANG G L, JIANG Z Y, LIAO Q, JIANG S Z, CAO X, YAN F Y, XIAO S H. Effects of low protein diet on growth performance and ammonia concentration in lactating sows [J]. *Experimental Study*, 2018(1):10–12. doi:1001–0084(2018)01–0010–03.
- [13] 陈军, 宋春雷, 庄晓峰, 贺爱, 龚兵, 张海琴. 低蛋白添加氨基酸日粮饲喂妊娠母猪试验 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017 (24) : 60–62. doi:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2017.2060.
CHEN J, SONG C J, ZHUANG X F, HE A, GONG B, ZHANG H Q. Low protein added amino acid diet for feeding pregnant sows [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017(24):60–62. doi:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2017.2060.
- [14] 董志岩, 林维雄, 刘景, 黄建锋, 方桂友, 林长光, 缪伏荣. 不同蛋白质水平的氨基酸平衡日粮对泌乳母猪生产性能、氮排泄量的影响 [J]. 福建农业学报, 2012, 27 (9) : 957–960. doi:10.3969/j.issn.1008–0384.2012.09.009.
DONG Z Y, LIN W X, LIU J, HUANG J F, FANG G Y, LIN C G, MIAO F R. Effect of amino acid balanced diets with different protein levels on productive performance and N excretion of Lactating Sows [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012,27 (9):957–960. doi:10.3969/j.issn.1008–0384.2012.09.009.
- [15] 赵青, 钟土木. 不同营养水平对金华猪繁殖性能的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45 (19) : 56–57.
ZHAO Q, ZHONG T M. Effects of different nutrition levels on the reproductive performance of Jinhua pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2009,45(19):56–57.
- [16] NRC. Nutrient requirements of swine [M]. 11th. ed. Washington DC: National Academy Press, 2012.
- [17] 董志岩, 林长光, 刘亚轩, 刘景, 郭长明, 缪伏荣. 不同赖氨酸水平的低蛋白质日粮对泌乳母猪生产性能和氮排泄量的影响 [J]. 家畜生态学报, 2013, 34 (9) : 32–37. doi:10.3969/j.issn.1673–1182.2013.09.007.
DONG Z Y, LIN C G, LIU Y X, LIU J, GUO C M, MIAO F R. Effect of different lysine levels on productive performance and N excretion of lactating sows fed low crude protein diets [J]. *Acta Ecologica Animalis Domastici*, 2013,34(9):32–37. doi:10.3969/j.issn.1673–1182.2013.09.007.
- [18] 方桂友, 周万胜, 邱华玲, 董志岩, 刘景. 夏季高温时蛋白质和赖氨酸水平对泌乳母猪生产性能及粪氮排泄量的影响 [J]. 福建畜牧兽医, 2018 (2) : 3–7.
FANG G Y, ZHOU W S, QIU H L, DONG Z Y, LIU J. Effect of dietary protein and lysine levels on productive performance and N excretion of lactating sows in summer [J]. *Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine Fujian*, 2018(2):3–7.
- [19] 罗增海, 朱海梅, 吴君, 马洪青. 小麦–杂粕型低蛋白氨基酸平衡日

- 粮对仔猪生长性能及血清尿素氮的影响研究[J]. 饲料工业, 2010, 31(5): 12-14. doi:10.3969/j.issn.1001-991X.2010.05.004.
- LOU Z H, ZHU H M, WU J, MA H Q. Effects of wheat-mixed ration with low protein amino acid balance on growing performance and blood index of weaning piglets [J]. *Feed Industry*, 2010, 31(5): 12-14. doi:10.3969/j.issn.1001-991X.2010.05.004.
- [20] 曹开梅. 不同粗蛋白日粮添加氨基酸和植酸酶对仔猪生长性能的影响[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2013(11): 170-171.
- CAO K M. Effects of adding amino acids and phytase in different crude protein diets on growth performance of piglets [J]. *Chinese Animal Husbandry Veterinarian (Abstract)*, 2013(11): 170-171.
- [21] 荆园园, 邢孔萍, 蔡兴才, 万小娟, 朱晓彤, 王松波, 高萍, 江青艳, 束刚. 氨基酸平衡低蛋白日粮对仔猪血清生理生化指标及肝脏关键代谢标志物的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(21): 39-44. doi:10.3969/j.issn.0258-7033.2016.21.010.
- JING Y Y, XING K P, CAI X C, WAN X J, ZHU X T, WANG S B, GAO P, JIANG Q Y, SHU G. Effects of amino acid balanced low-protein diets on serum indice and key metabolic markers in liver of piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(21): 39-44. doi:10.3969/j.issn.0258-7033.2016.21.010.
- [22] CHEN J H, KANG B J, JIANG Q, HAN M, ZHAO Y, LONG L, FU C, YAO K. Alpha-ketoglutarate in low-protein diets for growing pigs: effects on cecal microbial communities and parameters of microbial metabolism [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1057. doi:10.3389/fmicb.2018.01057.
- [23] CHEN J S, WU F, YANG H S, LI F N, JIANG Q, LIU S J, KANG B J, LI S, ADEBOWALE T O, HUANG N. Growth performance, nitrogen balance, and metabolism of calcium and phosphorus in growing pigs fed diets supplemented with alpha-ketoglutarate [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2017, 226: 21-28. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.12.013.
- [24] 宋阳, 孙会, 韩慧慧, 曹克飞, 张海环. 极低蛋白日粮不同蛋白源对仔猪生长性能和氮代谢的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(3): 26-30. doi:10.3969/j.issn.0258-7033.2016.03.007.
- SONG Y, SUN H, HAN H H, CAO K F, ZHANG H H. Effects of different protein source in extremely low protein diet on growth performance and nitrogen metabolism in piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(3): 26-30. doi:10.3969/j.issn.0258-7033.2016.03.007.
- [25] 李伟跃, 石英, 左兆云, 宋宪勃, 杨红艳. 微粉碎和低蛋白日粮添加氨基酸对仔猪粪尿氮磷排泄的影响[J]. 中国饲料, 2017(8): 29-32. doi:10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20170808.
- LI W Y, SHI Y, ZUO Z Y, SONG X B, YANG H Y. Effects of micro-crushing and low protein diets on the excretion of nitrogen and phosphorus in piglet feces [J]. *China Feed*, 2017(8): 29-32. doi:10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20170808.
- [26] 窦勇, 彭聚华, 胡佩红, 顾鹏程. 低蛋白日粮中添加复合酶制剂对仔猪生产性能、表观消化率及氮排放量的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(9): 146-150. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.09.032.
- DOU Y, PENG J H, HU P H, GU P C. Effect of compound enzyme preparation added in low protein diets on growth performance, apparent digestibility and nitrogen content in manure of piglets [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(9): 146-150. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.09.032.
- [27] CANH T T, AARNINK A J A, SCHUTTE J B, SUTTON A, LANGHOUT D J, VERSTEGEN M W A. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs [J]. *Livestock Production Science*, 1998, 56(3): 181-191. doi:10.1016/s0301-6226(98)00156-0.
- [28] 吴东, 赵辉玲, 陈胜. 低蛋白日粮添加氨基酸对生长肥育猪生长性能和氮排泄的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(5): 39-41. doi: 10.3969/j.issn.1672-5190.2010.05.021.
- WU D, ZHAO H L, CHEN S. Effects of supplements of amino acid in low protein diets on growth of fattening pigs and its excretion of N pollutant [J]. *Animal Husbandry And Feed Science*, 2010, 31(5): 39-41. doi: 10.3969/j.issn.1672-5190.2010.05.021.
- [29] 李宁, 谢春元, 曾祥芳, 王德辉, 谯仕彦. 饲料粗蛋白水平和氨基酸平衡性对肥育猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2018(2): 498-506.
- LI N, XIE C Y, ZENG X F, WANG D H, QIAO S Y. Effects of dietary crude protein level and amino acid balance on growth performance, carcass traits and meat quality of finishing pigs [J]. *Chinese Journal Of Animal Nutrition*, 2018(2): 498-506. doi:10.3969/j.issn.1006-267x.2018.02.013.
- [30] 魏立民, 孙瑞萍, 郑心力, 王峰, 黄丽丽, 刘阔炜, 刘海隆, 晁哲. 日粮赖氨酸水平对海南黑猪生产性能和血清生化指标的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(3): 115-117. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2014.03.028
- WEI L M, SUN R P, ZHENG X L, WANG F, HUANG L L, LIU Q W, LIU H L, CHAO Z. Effect of dietary lysine level on growth performances and serum biochemical indices of Hainan black pig [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(3): 115-117. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2014.03.028.
- [31] LI Y H, LI F N, DUAN Y H, GUO Q P, WEN C Y, WANG W L, HUANG X G, YIN Y L. Low-protein diet improves meat quality of growing and finishing pigs through changing lipid metabolism, fiber characteristics, and free amino acid profile of the muscle [J]. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(8): 3221-3232. doi: 10.1093/jas/sky116.
- [32] NATHALIE L F H, FLORENCE G, J JACQUES M, H L NE Q. Towards amino acid recommendations for specific physiological and patho-physiological states in pigs [J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2012, 71(3): 425-432. doi:10.1017/s0029665112000560.
- [33] JIAO X, MA W F, CHEN Y R, LI Z. Effects of amino acids supplementation in low crude protein diets on growth performance, carcass traits and serum parameters in finishing gilts [J]. *Animal Science Journal*, 2016, 87(10): 1252-1257. doi:10.1111/asj.12542.
- [34] 甄吉福, 许庆庆, 李貌, 孙志洪. 低蛋白质饲料添加谷氨酸对育肥猪蛋白质利用和生产性能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(2): 507-514. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2018.02.014.
- ZHEN J F, XU Q Q, LI M, SUN Z H. Effects of Low protein diet supplemented with glutamate protein utilization and performance of finishing pigs [J]. *Chinese Journal of Animal*

- Nutrition*,2018,30(2):507-514. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2018.02.014.
- [35] 朱立鑫, 谯仕彦. 猪净能体系及其研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45(15): 61-64.
ZHU L X, QIAO S Y. Advance in the net energy system of pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Science*,2009,45(15):61-64.
- [36] FULLER M F, CADENHEAD A, PENNIE K. Effects of omitting lysine from diets conforming to Agricultural Research Council (1981) standards for pigs [J]. *Animal Science*,2010,39(3):449-453. doi: 10.1017/S0003356100032190.
- [37] 梁郁均, 叶荣荣. 用赖氨酸加蛋氨酸代替鱼粉结合木薯代替部分玉米养猪试验[J]. 广东农业科学, 1990(5): 41-43. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.1990.05.017.
LIANG Y J, YE R R. Experiment on pig raising by substituting lysine and Methionine for fish meal and cassava for part of corn [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*,1990(5):41-43. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.1990.05.017.
- [38] 唐燕军, 张石蕊, 贺喜, 王荣发, 易学武, 杨强, 谯仕彦. 低蛋白质日粮中净能水平和赖氨酸净能比对育肥猪生长性能和胴体品质的影响[J]. 动物营养学报, 2009, 21(6): 822-828. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2009.06.004.
TAN Y J, ZHANG S R, HE X, WANG R F, YI X W, YANG Q, QIAO S Y. Effect of net energy level and lysine to net energy ratio on growth performance and carcass characteristic of finishing swines fed low protein diet [J]. *Chinese Journal Of Animal Nutrition*,2009,21(6):822-828. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2009.06.004.
- [39] NOBLET J, FORTUNE H, SHI X S, DUBOIS S. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs [J]. *Journal of Animal Science*,1994,72(2):344. doi:10.1016/0168-1591(94)90137-6.
- [40] 尹慧红, 张石蕊, 孙建广, 易学武, 谯仕彦. 不同净能水平的低蛋白日粮对猪生长性能和养分消化率的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2008, 44(13): 25-28.
YIN H H, ZHANG S R, SUN J G, YI X W, QIAO S Y. Effects of different net energy levels on the growth performance, nutrient digestibility, and concentrations of serum amino acids and urea nitrogen in growing pigs fed low crude protein diets [J]. *Chinese Journal of Animal Science*,2008,44(13):25-28.
- [41] 徐海军, 印遇龙, 黄瑞林, 孔祥峰. 蛋白质和脂肪在肥育猪体内的分配沉积规律研究进展[J]. 广东农业科学, 2007(10): 72-76. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2007.10.027.
XU H J, YIN Y L, HUANG R L, KONG X F. Progress on the law of protein and fat partitioning and depositing in finishing pig [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*,2007(10):72-76. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2007.10.027.
- [42] 黄红英, 贺建华, 范志勇, 杨灿. 添加缬氨酸和异亮氨酸对哺乳母猪及其仔猪生产性能的影响[J]. 动物营养学报, 2008, 20(3): 281-287. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2008.03.007.
HUANG H Y, HE J H, FAN Z Y, YANG C. Effects of valine and isoleucine on production performance of lactating sows and litters [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*,2008,20(3):281-287. doi:10.3969/j.issn.1006-267X.2008.03.007.
- [43] ZHANG S H, QIAO S Y, REN M, ZENG X, MA X, WU Z, THACKER P, WU G. Supplementation with branched-chain amino acids to a low-protein diet regulates intestinal expression of amino acid and peptide transporters in weanling pigs [J]. *Amino Acids*,2013,45(5):1191-1205. doi: 10.1007/s00726-013-1577-y.
- [44] REN M, ZHANG S H, ZENG X F, LIU H, QIAO S Y. Branched-chain amino acids are beneficial to maintain growth performance and intestinal immune-related function in weaned piglets fed protein restricted diet [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*,2015,28(12):1742-1750. doi:10.5713/ajas.14.0131.
- [45] J.V.NORGAARD, 杨林, 刘小龙. 在5-8周龄仔猪日粮中添加异亮氨酸和缬氨酸减少粗蛋白使用的研究[J]. 广东饲料, 2009, 18(12): 36-39. doi:10.3969/j.issn.1005-8613.2009.12.013.
J.V.NORGAARD, YANG L, LIU X L. Study on reducing crude protein usage by adding isoleucine and valine to diets of piglets aged 5-8 weeks [J]. *Guang Dong Feed*,2009,18(12):36-39. doi:10.3969/j.issn.1005-8613.2009.12.013.
- [46] CHE L Q, PENG X, HU L, WU C, XU Q, FANG Z F, LIN Y, XU S Y, LI J, FENG B. The addition of protein-bound amino acids in low-protein diets improves the metabolic and immunological characteristics in fifteen- to thirty-five-kg pigs [J]. *Journal of Animal Science*,2017,95(3):1277-1287. doi:10.2527/jas.2016.0990.
- [47] 周招洪, 陈代文, 郑萍, 虞洁, 毛湘冰, 余冰. 饲料能量和精氨酸水平对育肥猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(15): 40-45. doi: 10.3969/j.issn.0258-7033.2013.15.011.
ZHOU Z H, CHEN D W, ZHENG P, YU J, MAO X B, YU B. Effect of dietary energy and arginine levels on growth performance, carcass traits and meat quality of finishing pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Science*,2013,49(15):40-45. doi: 10.3969/j.issn.0258-7033.2013.15.011.
- [48] 梁利军, 张伟峰. 应用低蛋白日粮饲喂育成猪效益分析[J]. 今日养猪业, 2013, (1): 39-41. doi:10.3969/j.issn.1673-8977.2013.01.016.
LIANG L J, ZHANG W F. Benefit analysis of raising pigs on low protein diet [J]. *Pigs Today*,2013,(1):39-41. doi:10.3969/j.issn.1673-8977.2013.01.016.
- [49] 和玉丹, 邹君彪. 低蛋白氨基酸平衡日粮在生长肥育猪阶段的应用效果报告[J]. 国外畜牧学-猪与禽, 2012, 32(2): 43-45. doi: 10.3969/j.issn.1001-0769.2012.02.023.
HE Y D, ZHOU J B. Effect of low protein amino acid balanced diet on growing and finishing pigs [J]. *Animal Science Abroad*, 2012,32(2):43-45. doi: 10.3969/j.issn.1001-0769.2012.02.023.
- [50] MAVROMICHALIS I, WEBEL D M, EMMERT J L, MOSER R L, BAKER D H. Limiting order of amino acids in a low-protein corn-soybean meal-whey-based diet for nursery pigs [J]. *Journal of Animal Science*,1998,76(11):2833-2837. doi: 10.2527/1998.76112833x.