

低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道健康影响的研究进展

刘雅婷 孔祥峰*

(中国科学院亚热带农业生态研究所,中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室,
动物营养生理与代谢过程湖南省重点实验室,长沙 410128)

摘要: 肠道不仅是动物消化吸收的重要器官,也是重要的免疫和内分泌器官。饲料蛋白质及其消化产物可以通过对胃肠道激素、微生物菌群和相关基因的调控来影响猪的肠道健康,而低蛋白质氨基酸平衡饲料可有效缓解断奶仔猪腹泻,对肠道健康和功能具有重要作用。本文综述了低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道屏障、消化吸收功能和抗氧化能力等方面的影响,并探讨了可能的作用机制,旨在为低蛋白质氨基酸平衡饲料在养猪生产中的应用提供依据。

关键词: 低蛋白质饲料;肠道屏障;消化吸收功能;抗氧化能力;猪;氨基酸平衡

中图分类号:S831

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2021)02-0679-07

随着养猪业的规模化发展,我国对蛋白质等饲料资源的需要量越来越大,饲料原料价格不断攀升,加上中美“贸易战”造成的豆粕价格持续上涨,降低饲料成本已成为我国养猪业的迫切需求。自2020年7月1日起,我国正式禁用各种饲用抗生素,研究人员已经研发了多种饲用抗生素的替代技术,其中低蛋白质氨基酸平衡饲料被越来越多地应用推广。低蛋白质氨基酸平衡饲料是指饲料中的粗蛋白质(crude protein, CP)水平降低2~4个百分点,并通过补充必需氨基酸来平衡饲料中的氨基酸水平^[1]。随着越来越多的工业合成氨基酸的大量上市和价格的逐渐降低,使得低蛋白质氨基酸平衡饲料在养猪生产中的推广成为可能。目前,关于低蛋白质氨基酸平衡饲料在猪上的研究主要集中在生长性能、腹泻率和胴体品质等方面^[2-3],而其对猪肠道功能和健康影响的研究报道较少。本文综述了低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道屏障、消化吸收功能和抗氧化能力等方面的影响,旨在为其在养猪生产中的应用提供依据。

1 猪的低蛋白质氨基酸平衡饲料研究概况

近年来,低蛋白质氨基酸平衡饲料成为动物营养领域的研究热点,并取得了较大进展。NRC(2012)对饲料CP的推荐量相对于NRC(1998)降低了2~4个百分点。低蛋白质饲料补充合成氨基酸对不同体重猪的饲喂效果见表1。

2 低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道屏障的影响

肠道屏障主要由机械屏障、生物屏障、化学屏障和免疫屏障4部分组成。研究表明,低蛋白质氨基酸平衡饲料对肠道屏障功能会产生不同程度的影响。

2.1 对肠道机械屏障的影响

机械屏障也称物理屏障,是维持肠上皮选择通透性和屏障功能的结构基础,而紧密连接蛋白的表达是决定肠上皮细胞通透性大小的主要因

收稿日期:2020-06-08

基金项目:湖南省科技领军人才项目“猪生理代谢与机体健康创新团队”(2019RS3022);广西科技基地和人才专项“广西环江香猪产业促进与升级院士工作站能力建设”(桂科AD17195043)

作者简介:刘雅婷(1997—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: liuyating19@mails.ucas.ac.cn

*通信作者:孔祥峰,研究员,博士生导师,E-mail: nnkxf@isa.ac.cn

素^[13]。研究表明,饲粮 CP 水平(20%)降低 3 个百分点不会显著影响断奶仔猪的回肠形态结构和紧密连接蛋白表达^[14],提示适度降低饲粮 CP 水平不影响肠黏膜的机械屏障功能。而 Yu 等^[4]研究发现,饲粮 CP 水平(20%)降低 3~6 个百分点,虽然不影响仔猪的回肠形态结构,但会降低十二

指肠和空肠绒毛高度以及空肠绒毛高度/隐窝深度,增加空肠隐窝深度,说明降低饲粮 CP 水平会降低小肠的消化吸收能力。Almeida 等^[15]和 Qpa-peju 等^[16]也得出了类似的结论,初步推测可能与试验中未补充合成氨基酸有关,且对不同部位肠道的影响不同。

表 1 低蛋白质饲粮补充合成氨基酸对不同体重猪的饲喂效果

Table 1 Feeding effects of low-protein diets supplemented synthetic amino acids on pigs at different body weight

始重 Initial weight/ kg	对照组粗蛋 白质水平 CP level in control group/%	试验组粗 蛋白质水平 CP level in experimental group/%	添加氨基酸种类 Supplemented amino acids types	饲喂效果 Feeding effects	参考文献 References
9.57	20	14、17	Lys、Met、 Thr 和 Trp	小肠绒毛萎缩,绒毛高度和绒毛高度/ 隐窝深度降低,胃蛋白酶活性降低, 结肠氨氮含量降低	Yu 等 ^[4]
7.96	21	17	Lys、Met、 Thr 和 Trp	生长性能显著降低,血浆 尿素氮含量降低	刘尧君等 ^[5]
70.70	14.5	10	Leu	血浆尿素氮含量降低,氮沉积率增加, 添加 0.4% 的 Leu 效果最佳	黄烁等 ^[6]
15.57	17	13	NEAA	回肠双歧杆菌、乳酸杆菌和消化链球菌 属细菌数量显著降低,回肠短链脂肪酸、 氨氮和生物胺含量显著降低;肠道屏障 功能相关基因表达量显著下调	刘壮等 ^[7]
10.00	20	14	Lys、Met、 Thr 和 Trp	采食量降低,料重比增加,CP 和 碳水化合物发酵产物量显著降低	Luo 等 ^[8]
9.58	20	14、17	Lys、Met、 Thr 和 Trp	血液尿素氮和肠道氨氮含量降低, 肠道有益菌丰度一定程度上增加	虞德夫等 ^[9]
50.00	18	12、15	Arg	机体免疫和抗氧化能力增强	张迁等 ^[10]
36.50	18	12、15	Lys、Met、 Thr 和 Trp	体重降低,CP 和赖氨酸 等的消化率增加	He 等 ^[11]
36.47	18	15	Lys、Met、 Thr 和 Trp	肠道形态不受影响,空肠中 紧密连接相关蛋白基因表达水平不变	Li 等 ^[12]

Lys: 赖氨酸 lysine; Met: 蛋氨酸 methionine; Thr: 苏氨酸 threonine; Trp: 色氨酸 tryptophan; Leu: 亮氨酸 leucine; NEAA: 非必需氨基酸 nonessential amino acids; Arg: 精氨酸 arginine。

刘壮等^[7]研究发现,与低蛋白质(15% CP)饲粮相比,补充所有氨基酸的极低蛋白质(13% CP)饲粮仍会显著下调生长猪部分与肠道屏障功能相关基因的表达,而在极低蛋白质饲粮中补充 3% 酪蛋白不影响上述基因的表达。这说明单体氨基酸或许不能完全替代蛋白质,因为小肽等物质也起着重要作用,但其机制仍需进一步研究。

2.2 对肠道生物屏障的影响

生物屏障是由肠道内菌群与肠黏膜共同构成的,能有效阻止致病菌在肠上皮细胞的黏附和定

植,抑制致病菌的活性,促进肠道发挥免疫功能。未被完全消化的蛋白质在大肠中作为细菌的发酵底物被微生物利用,影响微生物区系,使致病菌产生毒素,损害肠道健康,引起仔猪腹泻^[13]。虞德夫等^[9]研究证明,饲粮 CP 水平(20%)降低 3 或 6 个百分点,会提高断奶仔猪肠道中乳酸杆菌等有益菌的丰度,这与 Wellock 等^[17]的报道一致。但 Zhou 等^[18]研究发现,在 NRC(1998)标准饲粮的基础上,饲粮 CP 水平(18%)降低 3 个百分点并补充赖氨酸(Lys)、蛋氨酸(Met)、苏氨酸(Thr)和色

氨酸(Trp)等必需氨基酸,生长猪盲肠中乳酸杆菌的丰度仍显著降低。另有研究表明,降低饲料 CP 水平并不能改变育肥猪肠道菌群的丰度^[19]。上述差异可能与猪的生长阶段有关,虞德夫等^[9]的试验对象是断奶仔猪,而 Zhou 等^[18]的试验对象是生长猪,不同生长阶段猪的肠道发育程度不同,肠道菌群稳定性也有一定差异。另外,虽然上述研究中试验组饲料 CP 水平降低的百分点相同,但因对照组饲料 CP 水平不同,所以试验结果各异。这提示在评价低蛋白质饲料对猪肠道微生物的影响时,应同时考虑猪的生长阶段和基础饲料 CP 水平的影响。

2.3 对肠道化学屏障的影响

肠黏膜化学屏障主要由肠道分泌的胃酸、黏液、消化酶、黏蛋白和胆汁等化学物质组成,可保护肠黏膜不受酸、碱和酶的侵蚀。研究表明,饲料 CP 水平(20%)降低 3 或 6 个百分点,同时补充 4 种必需氨基酸,断奶仔猪胃蛋白酶的活性均显著下降^[4];与 18% CP 水平饲料组相比,饲料 CP 水平降低 6 个百分点,生长猪的 α -淀粉酶活性显著降低,其他酶活性不受影响^[20]。因为酶的本质是蛋白质,饲料 CP 水平低于一定水平时可能会影响酶的合成或活性。另外,蛋白酶活性的降低还可能与断奶仔猪的肠道发育程度有关。Li 等^[12]报道认为,饲料 CP 水平(18%)降低 3 个百分点不影响生长猪空肠黏蛋白的表达水平,可能是因为生长猪的肠道发育较断奶仔猪更完善。

2.4 对肠道免疫屏障的影响

肠道免疫屏障是由弥散分布在肠上皮细胞之间的免疫细胞、免疫分子等肠道相关淋巴组织组成,能对肠道中的抗原产生免疫反应,与肠道微生物相互协作,保护小肠免受有害物质的入侵。Peng 等^[21]研究发现,饲料 CP 水平从 20.0% 降低至 15.3% 不影响生长猪的免疫功能,而进一步降至 13.9% 则显著下调生长猪空肠中 Toll 样受体 4 (Toll-like receptors 4, *TLR4*)、髓样分化因子 88 (myeloid differentiation factor 88, *MyD88*) 和核因子- κ B (nuclear factor kappa-B, *NF- κ B*) 等免疫相关基因的表达,提示低蛋白质饲料通过 *TLR4-MyD88-NF- κ B* 信号通路调节炎症反应,进而影响肠道免疫功能^[22]。Wang 等^[23]研究指出,饲料 CP 水平(16%)降低 3 个百分点可下调生长育肥猪炎症相关因子的表达,与补充游离氨基酸相比,在低

蛋白质饲料中补充酪蛋白水解物对黏膜免疫功能有显著的改善作用。夏密等^[14]报道认为,在 NRC (2012) 饲料基础上 CP 水平(20.09%)降低 3 个百分点,不影响断奶仔猪的肠黏膜免疫功能。张迁等^[10]研究发现,在低蛋白质饲料中补充适量精氨酸(Arg)可增强育肥猪的免疫功能,随 CP 水平的降低血清免疫球蛋白 G (IgG) 含量显著升高。上述差异可能与饲料 CP 水平降低的程度有关,饲料 CP 水平过低不利于免疫相关蛋白的合成,从而减弱机体的免疫功能。

3 低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道消化吸收功能的影响

3.1 对肠道内分泌功能的影响

胃肠道既是机体重要的消化器官,也是最大的内分泌器官,主要分泌胃泌素(gastrin)、胆囊收缩素(cholecystokinin, CCK)和酪酪肽(peptide tyrosine tyrosine, PYY)等胃肠激素。赵秀英等^[24]报道认为,饲料 CP 水平降低 6 个百分点,不同生长阶段猪的小肠钙感受体(calcium sensing receptor, *CaSR*)基因表达水平和血清中 CCK 等胃肠激素的分泌均显著下降,该影响可能通过 *CaSR* 介导。Yu 等^[25]报道也认为,断奶仔猪长期采食低蛋白质饲料可能会损害肠道形态,抑制肠道激素分泌。胃肠激素在化学结构上属于肽类,饲喂低蛋白质水平饲料时机体对 CP 和氨基酸的摄入量减少,过低的饲料 CP 水平会影响胃肠激素的合成与分泌。但 Tian 等^[26]报道认为,17% CP 组胃窦中 CCK 和生长抑素含量均升高,提示 17% CP 水平饲料有利于断奶仔猪对营养物质的消化。

3.2 对肠道消化功能的影响

猪饲料中 CP 和碳水化合物的消化是由消化道中的多种消化酶共同完成的,消化酶的活性决定了不同饲料的营养价值。He 等^[11]报道认为,与 18% CP 水平相比,12% CP 水平生长猪的胰蛋白酶、糜蛋白酶和二肽酶基因表达显著下调;与 16% CP 水平相比,12% CP 水平育肥猪的胰蛋白酶、二肽酶和胰淀粉酶基因表达下调,10% CP 水平的胰蛋白酶和二肽酶基因表达水平最低。而 Yu 等^[25]研究发现,饲料 CP 水平(18%)降低 6 个百分点,生长育肥猪胃蛋白酶和氢/钾-三磷酸腺苷(H^+/K^+ -adenosine triphosphate, H^+/K^+ -ATP)酶活性显著升高,而空肠和回肠的胰蛋白酶活性不受影响。

Wang 等^[20]报道认为,饲料 CP 水平(20%)适度降低不影响生长猪空肠胰蛋白酶、糜蛋白酶等的活性。Tian 等^[26]报道认为,17% CP 水平饲料有利于断奶仔猪胃肠道消化酶的分泌。上述差异可能与研究中试验动物生长阶段有关,试验组不同的 CP 水平也会影响试验结果。

3.3 对肠道吸收功能的影响

研究证明,适度降低饲料 CP 水平并适量补充合成氨基酸可显著降低氮排放,提高饲料氮利用率,进而减少环境污染^[27-28]。Luo 等^[8]研究发现,饲料 CP 水平(20%)降低 6 个百分点并补充 4 种必需氨基酸时,仔猪的采食量下降,料重比升高,提示氮的沉积效率增加;肠道氨氮、尸胺、支链脂肪酸和乙酸含量也有所降低,提示低蛋白质饲料能减弱微生物代谢产物对仔猪肠道产生的负面影响。Zhao 等^[29]和 Wu 等^[30]也得到了相似的结论。刘尧君等^[5]研究发现,与只补充 4 种必需氨基酸的低蛋白质饲料(17% CP)相比,额外添加亮氨酸(Leu)、异亮氨酸(Ile)和缬氨酸(Val)的低蛋白质饲料可提高断奶仔猪血液相应氨基酸含量;但与对照组相比,血浆尿素氮含量降低,提示补充支链氨基酸能够进一步平衡饲料氨基酸组成,提高机体对 CP 的利用率。上述结果表明,当饲料 CP 水平下降超过一定限度时,仅添加 4 种必需氨基酸或许不能满足机体对氨基酸的需要,饲料 CP 水平降低越多,其中的限制性氨基酸种类就越多。

4 低蛋白质氨基酸平衡饲料对猪肠道氧化应激的影响

氧化应激是指当动物受到各种外来有害刺激时,机体内的活性氧等分子产生过多,扰乱机体氧化和抗氧化系统平衡,从而导致组织损伤。刘尧君等^[5]研究发现,在补充了 4 种必需氨基酸的低蛋白质饲料(17% CP)中额外添加 Leu、Ile 和 Val,可提高仔猪空肠超氧化物歧化酶(SOD)活性,表明支链氨基酸能更有效地平衡饲料氨基酸组成,提高仔猪的抗氧化能力。而张迁等^[10]研究发现,低蛋白质饲料中添加 Arg 可显著增强生长猪的抗氧化能力,饲料 CP 水平从 18%降至 12%,血浆总抗氧化能力、SOD 和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性显著增加。上述结果说明,在低蛋白质饲料中添加除 4 种必需氨基酸外的其他氨基酸,可有效提高猪的抗氧化能力。但是关于其他

氨基酸的添加量及其增强机体抗氧化能力的效果,仍需要进一步研究。

5 低蛋白质氨基酸平衡饲料调控猪肠道健康的机制

猪在采食低 CP 水平饲料时虽然减少了对氨基酸的摄取,但代偿性地上调了相关消化酶的表达和活性,进而提高了氨基酸的消化率。低 CP 水平饲料对猪肠道健康产生影响,可能与饲料中的功能性氨基酸和小肽有关。Duan 等^[31]在生长猪空肠上皮细胞的研究发现,支链氨基酸可通过介导氨基酸转运载体的表达增加肠道氨基酸的吸收,促进肠道蛋白质的周转。Zhang 等^[32]在 IPEC-J2 细胞上的研究发现,Leu 可通过细胞外调节蛋白激酶(extracellular regulated protein kinases, ERK)和磷脂酰肌醇激酶/蛋白激酶 B/哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(phosphatidylinositol kinases/protein kinase B/mammalian target of rapamycin, PI3K/Akt/mTOR)信号通路上调氨基酸转运载体 2(α-amino-acid transporter 2, ASCT2)的表达。Yin 等^[33]报道认为,降低低蛋白质饲料中 30%的 Lys 会引起仔猪缺乏 Lys, Lys 限制会通过影响肠道微生物组成来介导氨基酸的转运,其中放线菌门、糖化菌门和增效菌门细菌发挥关键作用。Han 等^[34]研究发现, Lys 限制(含量为 70%)会通过调控 ERK1/2 和 NF-κB 信号通路调节炎症因子、免疫球蛋白 M(IgM)和 IgG 的水平,进而影响仔猪的免疫功能。Chen 等^[35]研究表明,饲料补充 Arg 可抑制断奶仔猪 TLR4-Myd88 信号通路的过度激活,从而减轻 S.C500 免疫应答引起的负面作用。上述结果表明,低蛋白质饲料补充不同浓度和种类的功能性氨基酸会对不同生长阶段猪产生影响,其作用机制也有所差异。

6 小结

总之,适当降低饲料 CP 水平可改善不同生长阶段猪的肠道屏障功能,不影响胃肠激素和消化酶的分泌,并增强机体的免疫功能和抗氧化能力,一定程度上缓解断奶仔猪腹泻,节约蛋白质饲料资源。但是当过低 CP 水平饲料中氨基酸供给不足时,不仅会影响猪的肠道屏障功能,还会对生长性能产生负面影响。因此,未来还需要进一步完善低蛋白质氨基酸平衡饲料体系。首先,需要确

定不同生长阶段猪的最适饲料 CP 水平,保证在不影响其肠道健康和生长性能的前提下,最大程度地降低饲料 CP 水平;其次,确定不同程度上降低饲料 CP 水平时,需要补充的氨基酸种类和水平,以满足猪的健康和生产需要;另外,因降低 CP 水平导致的饲料配方改变,能量和碳水化合物含量对猪肠道微生物的影响仍需要进一步验证。在饲料中添加合成氨基酸和小肽会对机体产生不同的影响,平衡氨基酸后添加其他生物活性物质的效果及其添加量仍需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王钰明,曾祥芳,谯仕彦.猪低蛋白质日粮的研究与应用现状及展望[J].中国畜牧杂志,2018,54(11):1-4.
WANG Y M, ZENG X F, QIAO S Y. Research and application status and prospect of pig low protein diet [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2018, 54(11):1-4. (in Chinese)
- [2] WANG Y M, YU H T, ZHOU J Y. Effects of feeding growing-finishing pigs with low crude protein diets on growth performance, carcass characteristics, meat quality and nutrient digestibility in different areas of China [J]. Animal Feed Science and Technology, 2019, 256:114256.
- [3] LI R, HOU G F, SONG Z H, et al. Effects of different protein sources completely replacing fish meal in low-protein diet on growth performance, intestinal digestive physiology, and nitrogen digestion and metabolism in nursery pigs [J]. Animal Science Journal, 2019, 90(8):977-989.
- [4] YU D F, ZHU W Y, HANG S Q. Effects of low-protein diet on the intestinal morphology, digestive enzyme activity, blood urea nitrogen, and gut microbiota and metabolites in weaned pigs [J]. Archives of Animal Nutrition, 2019, 73(4):287-305.
- [5] 刘尧君,任曼,曾祥芳,等.低氮日粮补充支链氨基酸提高断奶仔猪生长性能和氮的利用效率[J].中国畜牧杂志,2014,50(7):44-47.
LIU R J, REN M, ZENG X F, et al. Low protein diet supplemented with branched chain amino acids improves growth performance and nitrogen utilization in weaned piglet [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2014, 50(7):44-47. (in Chinese)
- [6] 黄烁,楚丽翠,王钢,等.低蛋白质饲料中添加不同水平亮氨酸对育肥猪氮平衡的影响[J].动物营养学报,2019,31(6):2579-2588.
HUANG S, CHU L C, WANG G, et al. Effects of low-protein diets supplemented with different levels of leucine on nitrogen balance of finishing pigs [J]. Animal Nutrition, 2019, 31(6):2579-2588. (in Chinese)
- [7] 刘壮,慕春龙,彭宇,等.极低蛋白日粮补充不同形式氮营养素对生长猪回肠食糜菌群、代谢产物和屏障功能的影响[J].南京农业大学学报,2019,42(3):526-534.
LIU Z, MU C L, PENG Y, et al. Effects of extremely-low-protein diets supplemented with different nitrogen source on ileal microbial communities, metabolites profiles and barrier function of growing pigs [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(3):526-534. (in Chinese)
- [8] LUO Z, LI C B, CHENG Y F, et al. Effects of low dietary protein on the metabolites and microbial communities in the caecal digesta of piglets [J]. Archives of Animal Nutrition, 2015, 69(3):212-226.
- [9] 虞德夫,朱晓峰,冯江银,等.低蛋白质日粮对断奶仔猪生长相关激素和肠道微生物区系的影响[J].微生物学报,2019,59(9):1695-1704.
YU D F, ZHU X F, FENG J Y, et al. Effect of low-protein diet on hormones associated with growth and on gut microbiota in weaned piglets [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(9):1695-1704. (in Chinese)
- [10] 张迁,杨公社.精氨酸对不同蛋白水平日粮条件下生长育肥猪血液生化指标及免疫功能的影响[J].当代畜牧,2018(12):19-21.
ZHANG Q, YANG G S. Effects of arginine on blood biochemical indices and immune function of growth and finishing pigs fed with different protein levels [J]. Contemporary Animal Husbandry, 2018(12):19-21. (in Chinese)
- [11] HE L Q, WU L, XU Z Q, et al. Low-protein diets affect ileal amino acid digestibility and gene expression of digestive enzymes in growing and finishing pigs [J]. Amino Acids, 2016, 48(1):21-30.
- [12] LI Y Y, LU X X, WU H Q, et al. The effect of dietary supplementation of low crude protein on intestinal morphology in pigs [J]. Research in Veterinary Science, 2019, 122:15-21.
- [13] DAVILA A M, BLACHIER F, GOTTELAND M, et al. Re-print of "intestinal luminal nitrogen metabolism: role of the gut microbiota and consequences for the host" [J]. Pharmacological Research, 2013, 69

- (1):114-126.
- [14] 夏密,胡唯伟,朱立麒,等.饲料氮营养水平对断奶仔猪回肠黏膜屏障的影响[J].畜牧与兽医,2016,48(2):77-81.
XIA M, HU W W, ZHU L Q, et al. Effect of feed nitrogen nutrient level on ileal mucosal barrier of weaned piglets[J]. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016, 48(2):77-81. (in Chinese)
- [15] ALMEIDA V V, NUÑEZ A J C, SCHINCKEL A P, et al. Interactive effect of dietary protein and dried citrus pulp levels on growth performance, small intestinal morphology, and hindgut fermentation of weaning pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(1):257-269.
- [16] OPAPEJU F O, KRAUSE D O, PAYNE R L, et al. Effect of dietary protein level on growth performance, indicators of enteric health, and gastrointestinal microbial ecology of weaned pigs induced with postweaning colibacillosis[J]. *Journal of Animal Science*, 2009, 87(8):2635-2643.
- [17] WELLOCK I J, FORTOMARIS P D, HOUDIJK J G M, et al. The effect of dietary protein supply on the performance and risk of post-weaning enteric disorders in newly weaned pigs[J]. *Animal Science*, 2006, 82(3):327-335.
- [18] ZHOU L P, FANG L D, SUN Y, et al. Effects of the dietary protein level on the microbial composition and metabolomic profile in the hindgut of the pig[J]. *Anaerobe*, 2016, 38:61-69.
- [19] 罗振,成艳芬,朱伟云.低蛋白日粮对育肥猪盲肠代谢产物及菌群的影响[J].畜牧与兽医,2015,47(10):5-9.
LUO Z, CHENG Y F, ZHU W Y. Effects of low protein diets on the metabolites and microbial community in the caecum of fattening pigs[J]. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2015, 47(10):5-9. (in Chinese)
- [20] WANG Y M, HAN S J, ZHOU J Y, et al. Effects of dietary crude protein level and N-carbamylglutamate supplementation on nutrient digestibility and digestive enzyme activity of jejunum in growing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2020, 98(4):skaa088.
- [21] PENG X, HU L, LIU Y, et al. Effects of low-protein diets supplemented with indispensable amino acids on growth performance, intestinal morphology and immunological parameters in 13 to 35 kg pigs[J]. *Animal*, 2016, 10(11):1812-1820.
- [22] KAWAI T, AKIRA S. The roles of TLRs, RLRs and NLRs in pathogen recognition[J]. *International Immunology*, 2009, 21(4):317-337.
- [23] WANG H S, SHEN J H, PI Y, et al. Low-protein diets supplemented with casein hydrolysate favor the microbiota and enhance the mucosal humoral immunity in the colon of pigs[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2020, 11(1):79.
- [24] 赵秀英,孟祥龙,伍力,等.日粮不同蛋白水平对猪小肠 CaSR 基因表达及胃肠激素分泌的影响[J].畜牧与兽医,2016,48(12):30-35.
ZHAO X Y, MENG X L, WU L, et al. Effects of dietary protein contents on CaSR expressions in small intestine and serum gastrointestinal hormone levels[J]. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016, 48(12):30-35. (in Chinese)
- [25] YU D F, ZHU W Y, HANG S Q, et al. Effects of long-term dietary protein restriction on intestinal morphology, digestive enzymes, gut hormones, and colonic microbiota in pigs[J]. *Animals*, 2019, 9(4):180.
- [26] TIAN Z M, MA X Y, YANG X F, et al. Influence of low protein diets on gene expression of digestive enzymes and hormone secretion in the gastrointestinal tract of young weaned piglets[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2016, 17(10):742-751.
- [27] GALASSI G, COLOMBINI S, MALAGUTTI L, et al. Effects of high fibre and low protein diets on performance, digestibility, nitrogen excretion and ammonia emission in the heavy pig[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2010, 161(3/4):140-148.
- [28] BLAT S, MORISE A, SAURET A, et al. The protein level of isoenergetic formulae does not modulate postprandial insulin secretion in piglets and has no consequences on later glucose tolerance[J]. *British Journal of Nutrition*, 2012, 108(1):102-112.
- [29] ZHAO Y M, TIAN G, CHEN D W, et al. Effect of different dietary protein levels and amino acids supplementation patterns on growth performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in growing-finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2019, 10(1):75.
- [30] WU L T, ZHANG X X, TANG Z R, et al. Low-protein diets decrease porcine nitrogen excretion but with restrictive effects on amino acid utilization[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(31):8262-8271.
- [31] DUAN Y H, TAN B E, LI J J, et al. Optimal

- branched-chain amino acid ratio improves cell proliferation and protein metabolism of porcine enterocytes *in vivo* and *in vitro* [J]. *Nutrition*, 2018, 54:173–181.
- [32] ZHANG S H, REN M, ZENG X F, et al. Leucine stimulates ASCT2 amino acid transporter expression in porcine jejunal epithelial cell line (IPEC J2) through PI3K/Akt/mTOR and ERK signaling pathways [J]. *Amino Acids*, 2014, 46(12):2633–2642.
- [33] YIN J, HAN H, LI Y, et al. Lysine restriction affects feed intake and amino acid metabolism via gut microbiome in piglets [J]. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 2017, 44(5):1749–1761.
- [34] HAN H, YIN J, WANG B, et al. Effects of dietary lysine restriction on inflammatory responses in piglets [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):2451.
- [35] CHEN Y, CHEN D W, TIAN G, et al. Dietary arginine supplementation alleviates immune challenge induced by *Salmonella enterica* serovar choleraesuis bacterin potentially through the Toll-like receptor 4-myeloid differentiation factor 88 signalling pathway in weaned piglets [J]. *British Journal of Nutrition*, 2012, 108(6):1069–1076.

Advance: Effects of Low Protein Diets with Balanced Amino Acids on Intestinal Health of Pigs

LIU Yating KONG Xiangfeng*

(Hunan Provincial Key Laboratory of Animal Nutrition Physiology and Metabolism Process, Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410128, China)

Abstract: The intestinal tract is not only an important organ for digestion and absorption, but also an important organ for immunity and endocrine of animals. Dietary protein and its digestive products can influence the intestinal health of pigs by regulating gastrointestinal hormones, microflora and related genes. Low protein-amino acid balanced diets can effectively relieve diarrhea of weaned piglets and has an important impact on intestinal health and function. This article reviewed the effects of low protein-amino acid balanced diets on intestinal barrier, digestion and absorption function and antioxidant capacity of pigs, and discussed the underlying mechanism to provide a basis for the application of low protein-amino acid balanced diets in pig production. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(2):679-685]

Key words: low protein diets; intestinal barrier; digestion and absorption function; antioxidant capacity; pigs; amino acid balance