

猪低蛋白质饲料研究进展

周俊言 曾祥芳 譙仕彦*

(中国农业大学动物科技学院,动物营养学国家重点实验室,北京 100193)

摘要: 通过补充工业晶体氨基酸,低蛋白质饲料可以在饲料蛋白质水平降低的条件下准确满足猪的氨基酸营养需要。正确应用低蛋白质饲料既能促进猪生长性能的发挥,又能减少其代谢负担,提高营养物质利用效率,促进肠道健康,节约生产成本与饲料资源,保护环境。本文从肠道微生物组成与代谢、非蛋白氮及N-氨甲酰谷氨酸的应用效果和淀粉组成对氨基酸吸收与肌肉合成的影响等方面综述了低蛋白质饲料近年来的研究进展,以为相关研究工作提供一定的参考和帮助。

关键词: 低蛋白质饲料;肠道微生物;非蛋白氮;N-氨甲酰谷氨酸;淀粉组成

中图分类号: S828

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2022)10-6146-06

蛋白质饲料资源短缺和排泄物污染是制约我国养殖业,尤其是养猪业可持续发展的两大瓶颈因素。近年来,低蛋白质饲料在突破养猪业此两大瓶颈中的重要贡献愈发突出,其环境友好型和资源可持续型特征受到越来越多的关注。低蛋白质饲料是根据蛋白质营养的实质和氨基酸营养平衡理论,在不影响畜禽生产性能和产品品质的条件下,通过添加适宜种类和数量的工业氨基酸,降低饲料蛋白质水平、减少蛋白质原料用量和氮排放的饲料。其不仅是人类深入认识蛋白质营养实质的突破,更是理论切实指导实践,在生产中能用、好用的实用技术。

猪低蛋白质饲料的研究始于1995年^[1],经过近30年的不断探索,其内涵逐渐丰富,标准化工作也逐渐完善。截至目前,我国已经对各体重阶段仔猪和生长育肥猪,以及妊娠和哺乳母猪的低蛋白质饲料蛋白质水平、净能水平、净能与赖氨酸比值以及各种必需氨基酸(essential amino acids, EAA)回肠末端可消化量给出了推荐范围^[2],并于2020年出台了仔猪、生长育肥猪配合饲料国家标准。本文综述了近年来关于低蛋白质饲料的研究

进展,并对其未来发展进行了展望。

1 饲料蛋白质水平对生长猪营养物质消化及肠道微生物组成和代谢的影响

饲料营养物质在猪胃肠道中的消化可分为以胃和小肠为主要消化部位的化学酶消化和以大肠为主要消化部位的微生物消化。消化酶活性是决定猪前肠道对营养物质消化吸收能力的关键因素,另外,猪肠道中存在着庞大的微生物系统,其发酵特性及产物对宿主营养物质利用和健康具有重要影响。

1.1 饲料蛋白质水平对生长猪营养物质消化率和消化酶活性的影响

通过补充晶体氨基酸,低蛋白质饲料可以准确满足猪的氨基酸营养需要。晶体氨基酸无需经过消化便可在小肠前段被快速吸收,可能导致饲料蛋白质对消化酶分泌的刺激减少,减弱猪对营养物质的消化吸收^[3]。王钰明^[4]通过在空肠前端和回肠末端造瘘的方式,探索了饲料蛋白质水平对生长猪空肠消化酶活性以及营养物质表观全肠道消化率和表观回肠消化率的影响。试验结果显

收稿日期:2022-08-01

基金项目:现代农业产业技术体系北京市家畜创新团队;中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XY-59)

作者简介:周俊言(1994—),男,山东淄博人,博士,主要从事猪营养与饲料科学研究。E-mail: zjycau@163.com

*通信作者:譙仕彦,院士,博士生导师,E-mail: qiaoshiyan@cau.edu.cn

示,相对于高蛋白质饲料(18%),降低饲料蛋白质水平至15%对生长猪粗蛋白质(CP)表观全肠道消化率及表观回肠消化率无显著影响;继续降低饲料蛋白质水平至12%后,生长猪空肠 α -淀粉酶的活性和CP表观全肠道消化率及表观回肠消化率均显著降低。He等^[5]的试验结果也显示当饲料蛋白质水平降低6个百分点时,生长猪空肠黏膜 α -淀粉酶的mRNA表达水平显著下降。另外,值得注意的是,王钰明^[4]研究发现,低蛋白质组猪中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的表观回肠消化率与高蛋白质组相比无显著差异,而表观全肠道消化率则显著降低,作者推测这可能与2组猪后肠道微生物的纤维发酵能力差异有关。

1.2 饲料蛋白质水平对生长猪肠道微生物组成和发酵代谢的影响

王钰明^[4]通过在生长猪盲肠的游离盲端造瘘,连续收集不同饲料蛋白质水平下的生长猪盲肠食糜和粪便,实现长期监测大肠中微生物对饲料蛋白质水平的适应性过程。试验结果表明,低蛋白质饲料提高了猪盲肠食糜中的微生物多样性。该试验还发现高蛋白质饲料组猪盲肠食糜中普雷沃氏菌科的相对丰度极显著高于低蛋白质饲料组。普雷沃氏菌参与后肠多糖的降解并可提高宿主对氨基酸和能量的利用效率^[6],其可对食糜中的营养物质进行充分发酵,产生乳酸、乙酸、异丁酸和异戊酸等发酵产物,这可能造成了高蛋白质饲料组猪盲肠食糜和粪便中乙酸和总挥发性脂肪酸浓度以及饲料营养物质消化率的提升。双歧杆菌在2组的相对丰度均高于1%,且低蛋白质饲料组中的相对丰度显著高于高蛋白质饲料组。双歧杆菌具有多种益生功能,如改善免疫系统紊乱导致的肠道疾病、抑制病原菌的入侵和缓解机体氧化损失等^[7]。因此,低蛋白质饲料组盲肠食糜中高相对丰度的双歧杆菌可能促进了生长猪的后肠健康,并与降低的血清内毒素含量相关。

低蛋白质饲料组猪粪便中的瘤胃球菌、拟杆菌_S24-7和氨基酸球菌等的相对丰度显著低于高蛋白质饲料组。瘤胃球菌相对丰度与饲料中纤维素和木质素的降解有关,是肠道中的主要产丁酸菌^[8];拟杆菌_S24-7是具有较强碳水化合物发酵性能的一类细菌,并可有效缓解小鼠的结肠炎^[9],此2类细菌相对丰度的降低可能与低蛋白质饲料中可发酵纤维含量较低有关。氨基酸球菌是单胃

动物后肠中主要的氨基酸降解菌,低蛋白质饲料大幅度降低饲料蛋白质水平使得进入后肠用于微生物发酵的蛋白质明显减少,致使氨基酸球菌相对丰度降低,这有利于减少蛋白质有害发酵产物生物胺等的产生^[10]。

另外,王钰明^[4]研究发现,低蛋白质饲料的营养物质表观回肠消化率与高蛋白质饲料无显著差异,但多种营养物质的表观全肠道消化率显著低于高蛋白质饲料,作者推断后肠道微生物发酵性能的差异是造成这一现象的主要原因。通过体外发酵试验,王钰明^[4]研究发现,高蛋白质饲料组猪粪便作为菌种发酵食糜的累计产气量显著高于低蛋白质饲料组,这说明在高蛋白质饲料饲喂下猪后肠道微生物发酵营养物质的能力增强。而当高蛋白质饲料组猪粪便发酵低蛋白质饲料组猪食糜时,达到最大产气量1/2的时间最短,这可能与高蛋白质饲料组粪便微生物发酵能力强而低蛋白质饲料组食糜中可供微生物发酵的营养物质含量少有关。以上研究说明,低蛋白质饲料营养结构及其引起的微生物结构变化不利于后肠微生物对营养物质的发酵代谢,但部分菌群相对丰度的变化有助于增强猪肠道健康。

2 低蛋白质饲料添加非蛋白氮(NPN)对生长育肥猪生长性能和氮平衡的影响

NPN是一类非蛋白态的含氮化合物的总称。研究发现,在必需氨基酸(EAA)充足的氮缺乏饲料中,添加铵盐和尿素能够促进小鼠的氮沉积和生长性能,这表明单胃动物能够利用NPN^[11]。Deguchi等^[12]研究表明,无特定病原体猪能够将尿素和柠檬酸铵的氮转移到各种体组织中,而无菌猪仅能够利用柠檬酸铵中的氮,这说明NPN需要先被微生物转化为氨态氮的形式才可被猪利用。近期研究发现,从盲肠瘘管注入尿素能够增强饲料非必需氨基酸(NEAA)缺乏饲料猪的整体氮沉积^[13]。而氨态氮则可有效促进生长猪生长性能的提高,且利用效率和完整蛋白质及EAA相同,但单独使用尿素却无此类效果,这进一步证实饲料尿素氮在吸收前必须被肠道微生物转化为氨态氮才可以被猪利用^[14-15]。Li等^[16]通过代谢试验发现,相比于低蛋白质饲料组,补充NPN后生长猪总氮和尿氮排出以及氮沉积均有数值上的增加,但效率低于蛋白氮。生长试验的数据显示,在育

肥猪低蛋白质饲料中添加 NPN 与 N-氨甲酰谷氨酸(NCG)后,猪平均日增重以及总能、CP、粗脂肪、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的表观全肠道消化率均显著提升。以上研究说明,NPN 应用于低蛋白质饲料可被猪部分利用,配合使用 NCG 可提高猪对营养物质的利用效率。

3 氮氨甲酰谷氨酸改善生长育肥猪低蛋白质饲料应用效果的研究

低蛋白质饲料降低了饲料蛋白质含量而提高了淀粉含量,由于淀粉的热增耗远低于蛋白质,使用代谢能体系配制低蛋白质饲料势必造成因能量过剩而导致的猪胴体过肥。应用净能体系并配合使用 NCG 是准确满足猪能量需要,促进肌肉蛋白质沉积,减少脂肪沉积的有效手段。NCG 是谷氨酸上的氨基被甲酰化后的产物,具有激活氨甲酰磷酸合成酶并促进猪内源精氨酸合成的作用。研究表明,精氨酸及其代谢产物可促进肠道血管和黏膜发育,改善肠道形态,促进营养物质吸收^[17];调节哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mTOR)信号通路和氨基酸及小肽转运载体表达^[18];减少小肠微生物对丙氨酸、苏氨酸和赖氨酸等氨基酸的代谢^[19]。相比于直接添加精氨酸,补充 NCG 具有独特的优势:不影响肠道对赖氨酸、色氨酸和组氨酸的吸收,有效剂量低,体内代谢稳定,半衰期相对长,合成成本低,易于推广应用^[20]。赵元等^[21]的研究发现,在育肥猪低蛋白质饲料中添加 0.1%或 0.2%的 NCG 后,育肥猪肌内脂肪含量、大理石花纹评分和血清精氨酸浓度分别提高 14.3%、15.9%、16.0%、17.7%和 12.6%、20.4%,第 10 肋背膘厚度、背最长肌滴水损失和血清尿素氮含量分别降低 13.0%、11.5%、11.5%、14.6%和 20.4%、16.7%。Ye 等^[22]发现在低蛋白质饲料中添加 NCG 可增强内源精氨酸和肌肉中亮氨酸的合成,促进育肥猪眼肌面积的增加,并降低背膘厚度。孙卫^[23]研究指出,适当添加 NCG 可以显著提高 30~50 kg、75~100 kg 和 90~120 kg 生长育肥猪的平均日增重,并改善其屠宰性能。

4 低蛋白质饲料淀粉组成对生长猪肌肉蛋白质合成的影响

营养物质在吸收入血之前被肠道首过代谢,

氨基酸在能量底物缺乏时可以被氧化供能。氨基酸释放速率过快可能因葡萄糖的暂时性缺乏导致低蛋白质饲料中氨基酸的肠道氧化损失增加^[24]。研究发现,当能量底物与氨基酸在肌肉合成部位以相平衡的数量同时供应时,可以实现蛋白质沉积的最大化^[25]。低蛋白质饲料氨基酸的快速吸收会导致猪采食后肌肉合成部位的能量相对缺乏,进而限制蛋白质合成。另外,葡萄糖作为重要的信号分子,可以通过 mTOR 途径增强氨基酸转运蛋白活性并促进蛋白质合成^[26]。且血糖的快速升高可以刺激具有促进蛋白质合成功能的激素,如胰岛素和瘦素的分泌^[27-28]。低蛋白质饲料导致葡萄糖和氨基酸消化吸收不同步,使得葡萄糖的促蛋白质合成作用无法充分发挥。

综上所述,优化饲料葡萄糖释放模式以促进氨基酸和葡萄糖的同步吸收代谢可能是改善低蛋白质饲料氨基酸利用效率的可行方案。通常情况下,相较于直链淀粉,具有网状结构的支链淀粉在动物胃肠道中会诱导更大的糊化,并拥有更大的与消化酶接触的面积,可以被畜禽快速消化并以葡萄糖的形式吸收^[29]。因此,适当提高支链淀粉含量以优化饲料淀粉组成,可能会改善低蛋白质饲料氨基酸和葡萄糖的消化吸收同步性,促进生长猪高效利用饲料氨基酸。

4.1 低蛋白质饲料淀粉组成对生长猪生长性能和氮平衡的影响

Zhou 等^[30]研究发现,在低蛋白质饲料中适量使用木薯作为支链淀粉来源替代玉米可以有效提升生长猪采食后葡萄糖的吸收速率,提高葡萄糖与氨基酸消化吸收的同步性,调节相关胃肠激素的分泌,并最终改善饲料氨基酸的利用效率和生长猪的采食量及平均日增重。周俊言^[24]研究指出,低蛋白质饲料的淀粉组成可以通过改变饲料葡萄糖释放模式来调整生长猪营养物质代谢,适宜的饲料葡萄糖释放模式可以有效增强生长猪全身蛋白质周转和氮利用效率,并提高其生长性能。

4.2 低蛋白质饲料淀粉组成对生长猪采食后氨基酸消化率随时间变化规律的影响

在畜禽的消化道中,淀粉和蛋白质混合存在于食糜中,饲料淀粉组成调整引起的淀粉消化速率变化可改变食糜中蛋白质与蛋白酶的接触程度,进而影响蛋白质的消化吸收。周俊言^[24]使用不同来源的纯化淀粉调节低蛋白质饲料淀粉组

成,在采食后 12 h 内连续收集回肠末端食糜,将每 2 h 的食糜作为 1 个样品进行分析,探讨了生长猪回肠末端食糜中干物质流量和氨基酸消化率随采食后时间的变化规律。结果显示,生长猪采食由蜡质玉米淀粉和玉米淀粉组成的低蛋白质饲料后,回肠末端食糜干物质流量先减少后增加,而采食高直链淀粉含量的豌豆淀粉饲料后,生长猪回肠末端食糜干物质流量逐渐降低后保持稳定。与蜡质玉米淀粉和玉米淀粉相比,豌豆淀粉配制低蛋白质饲料增加了生长猪回肠末端食糜干物质流量,降低饲料氨基酸的表现回肠消化率。

4.3 低蛋白质饲料淀粉组成对生长猪氨基酸肠道吸收和肌肉代谢的影响

动物机体的营养物质代谢处于变化的过程中,对代谢过程进行动态监测对于了解表型背后的内在机制具有重要意义。

营养物质从肠道吸收后首先进入门静脉血液。周俊言^[24]在生长猪门静脉处安装导管以动态监测氨基酸和葡萄糖的吸收。试验数据显示,相比于豌豆淀粉低蛋白质饲料,蜡质玉米淀粉低蛋白质饲料有效促进生长猪门静脉对多种氨基酸、总 EAA、总氨基酸和总支链氨基酸的吸收。骨骼肌对氨基酸的摄取主要用于沉积蛋白质,肌肉氨基酸净通量的增加意味着肌肉蛋白质合成增强^[31]。周俊言^[24]在生长猪的股动脉和股静脉中安装导管,探究低蛋白质饲料淀粉组成对氨基酸在后肢肌肉利用的影响。结果显示,高支链淀粉含量的低蛋白质饲料增加了生长猪后肢肌肉的氨基酸净通量,这表明肌肉合成得到改善。作者推测原因如下:首先,易消化的蜡质玉米淀粉能被胃肠道快速消化并释放葡萄糖,为肠道细胞氧化供能,使得本可能被用作肠道能量底物的氨基酸被吸收进入门静脉血液^[32]。其次,蜡质玉米淀粉组生长猪在采食后迅速提升的血糖浓度可以改善 mTOR 磷酸化并增强氨基酸的吸收及蛋白质合成^[33-34]。另外,豌豆淀粉中含有较高比例的直链淀粉,其消化速度较慢,这增加了食糜的黏度^[35],进而抑制营养物质与消化酶的接触,从而损害营养物质的消化吸收。此外,血糖的快速升高可以刺激促进蛋白质合成的激素的分泌,例如胰岛素和瘦素^[28-29]。

5 小结与展望

低蛋白质饲料通过补充工业晶体氨基酸,可在蛋白质水平降低的条件下准确满足畜禽的氨基酸营养需要。这是当前精准营养研究与应用的集中体现,也是现代动物营养学发展和现代氨基酸工业发展的必然结果。在蛋白质资源短缺和排泄物污染严重的大背景下,低蛋白质饲料的全国性推广已经被放到了重要的位置。然而任何技术在学习过程中都会暴露缺陷与不足,但也都会在不断的研究与实践得到完善。根据低蛋白质饲料的特点特性,开发与之匹配的技术措施,深入挖掘其功能潜力,进一步优化完善低蛋白质饲料将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] KERR B J, EASTER R A. Effect of feeding reduced protein, amino acid-supplemented diets on nitrogen and energy balance in grower pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(10):3000-3008.
- [2] WANG Y M, ZHOU J Y, WANG G, et al. Advances in low-protein diets for swine[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2018, 9:60.
- [3] PHONGTHAI S, D' AMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Fractionation and antioxidant properties of rice bran protein hydrolysates stimulated by *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 156-164.
- [4] 王钰明.日粮蛋白质水平对猪肠道营养物质消化代谢的影响及机制研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2020.
WANG Y M. Effects and mechanisms of dietary crude protein level on intestinal nutrient digestion and metabolism in pigs[D]. Ph. D. Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] HEINRITZ S N, WEISS E, EKLUND M, et al. Intestinal microbiota and microbial metabolites are changed in a pig model fed a high-fat/low-fiber or a low-fat/high-fiber diet [J]. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0154329.
- [7] SHARMA M, WASAN A, SHARMA R K. Recent de-

- velopments in probiotics: an emphasis on *Bifidobacterium* [J]. *Food Bioscience*, 2021, 41: 100993.
- [8] VAN DEN ABEELE P, BELZER C, GOOSSENS M, et al. Butyrate-producing *Clostridium cluster XIVa* species specifically colonize mucins in an *in vitro* gut model [J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(5): 949–961.
- [9] ORMEROD K L, WOOD D L A, LACHNER N, et al. Genomic characterization of the uncultured *Bacteroidales* family S24-7 inhabiting the guts of homeothermic animals [J]. *Microbiome*, 2016, 4(1): 36.
- [10] TILOCCA B, BURBACH K, HEYER C M E, et al. Dietary changes in nutritional studies shape the structural and functional composition of the pigs' fecal microbiome—from days to weeks [J]. *Microbiome*, 2017, 5(1): 144.
- [11] ROSE W C, SMITH L C, WOMACK M, et al. The utilization of the nitrogen of ammonium salts, urea, and certain other compounds in the synthesis of non-essential amino acids *in vivo* [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1949, 181(1): 307–316.
- [12] DEGUCHI E, NAMIOKA S. Synthesis ability of amino acids and protein from non-protein nitrogen and role of intestinal flora on this utilization in pigs [J]. *Bifidobacteria and Microflora*, 1989(8): 1–12.
- [13] MANSILLA W D, COLUMBUS D A, HTOO J K, et al. Nitrogen absorbed from the large intestine increases whole-body nitrogen retention in pigs fed a diet deficient in dispensable amino acid nitrogen [J]. *The Journal of Nutrition*, 2015, 145(6): 1163–1169.
- [14] MANSILLA W D, HTOO J K, DE LANGE C F M. Nitrogen from ammonia is as efficient as that from free amino acids or protein for improving growth performance of pigs fed diets deficient in nonessential amino acid nitrogen [J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(7): 3093–3102.
- [15] MANSILLA W D, SILVA K E, ZHU C L, et al. Ammonia-nitrogen added to low-crude-protein diets deficient in dispensable amino acid-nitrogen increases the net release of alanine, citrulline, and glutamate post-splanchnic organ metabolism in growing pigs [J]. *The Journal of Nutrition*, 2018, 148(7): 1081–1087.
- [16] LI P L, WU F, WANG Y M, et al. Combination of non-protein nitrogen and N-carbamylglutamate supplementation improves growth performance, nutrient digestibility and carcass characteristics in finishing pigs fed low protein diets [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 273: 114753.
- [17] WU X, RUAN Z, GAO Y L, et al. Dietary supplementation with *L*-arginine or N-carbamylglutamate enhances intestinal growth and heat shock protein-70 expression in weanling pigs fed a corn- and soybean meal-based diet [J]. *Amino Acids*, 2010, 39(3): 831–839.
- [18] ZHANG H, PENG A, YU Y, et al. N-Carbamylglutamate and *L*-arginine promote intestinal absorption of amino acids by regulating the mTOR signaling pathway and amino acid and peptide transporters in suckling lambs with intrauterine growth restriction [J]. *The Journal of Nutrition*, 2019, 149(6): 923–932.
- [19] DAI Z L, LI X L, XI P B, et al. Regulatory role for *L*-arginine in the utilization of amino acids by pig small-intestinal bacteria [J]. *Amino Acids*, 2012, 43(1): 233–244.
- [20] WU G Y, KNABE D A, KIM S W. Arginine nutrition in neonatal pigs [J]. *The Journal of Nutrition*, 2004, 134(10 Suppl): 2783S–2790S.
- [21] 赵元, 何立荣, 李金林, 等. 低蛋白质日粮添加 N-羧甲酰谷氨酸、维生素 A 对育肥猪肉品质的影响 [J]. *中国饲料*, 2016(21): 12–17.
- ZHAO Y, HE L R, LI J L, et al. Effects of N-carbamylglutamic acid and vitamin A supplementation on fattening pork quality in low-protein diets [J]. *China Feed*, 2016(21): 12–17. (in Chinese)
- [22] YE C C, ZENG X Z, ZHU J L, et al. Dietary N-carbamylglutamate supplementation in a reduced protein diet affects carcass traits and the profile of muscle amino acids and fatty acids in finishing pigs [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(28): 5751–5758.
- [23] 孙卫. 低蛋白质日粮添加 N-羧甲酰谷氨酸对生长育肥猪生长性能的影响 [D]. 硕士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2019.
- SUN W. Effects of N-carbamylglutamate on the growth performance of growing-finishing pigs fed low-protein diets [D]. Master's Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [24] 周俊言. 低蛋白质日粮淀粉组成改善生长猪氮利用效率的机制研究 [D]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2022.
- ZHOU J Y. Exploring the mechanism of starch composition in low-protein diets to improve nitrogen efficiency of growing pigs [D]. Ph. D. Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [25] FUJITA S, DREYER H C, DRUMMOND M J, et al.

- Nutrient signalling in the regulation of human muscle protein synthesis [J]. *The Journal of Physiology*, 2007, 582(2): 813–823.
- [26] ROOS S, LAGERLÖF O, WENNERGREN M, et al. Regulation of amino acid transporters by glucose and growth factors in cultured primary human trophoblast cells is mediated by mTOR signaling [J]. *American Journal of Physiology Cell Physiology*, 2009, 297(3): C723–C731.
- [27] DIMITRIADIS G, MITROU P, LAMBADIARI V, et al. Insulin effects in muscle and adipose tissue [J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2011, 93 Suppl 1: S52–S59.
- [28] MAO X B, ZENG X F, HUANG Z M, et al. Leptin and leucine synergistically regulate protein metabolism in C2C12 myotubes and mouse skeletal muscles [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2013, 110(2): 256–264.
- [29] TESTER R F, KARKALAS J, QI X. Starch—composition, fine structure and architecture [J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(2): 151–165.
- [30] ZHOU J Y, WANG L, ZHOU J C, et al. Effects of using cassava as an amylopectin source in low protein diets on growth performance, nitrogen efficiency, and postprandial changes in plasma glucose and related hormones concentrations of growing pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2021, 99(12): skab332.
- [31] ZHENG L F, ZUO F R, ZHAO S J, et al. Dietary supplementation of branched-chain amino acids increases muscle net amino acid fluxes through elevating their substrate availability and intramuscular catabolism in young pigs [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2017, 117(7): 911–922.
- [32] WU G. Intestinal mucosal amino acid catabolism [J]. *The Journal of Nutrition*, 1998, 128(8): 1249–1252.
- [33] YIN F G, ZHANG Z Z, HUANG J, et al. Digestion rate of dietary starch affects systemic circulation of amino acids in weaned pigs [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2010, 103(10): 1404–1412.
- [34] MAO Z, ZHANG W Z. Role of mTOR in glucose and lipid metabolism [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(7): 2043.
- [35] SASAKI T, YASUI T, MATSUKI J. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation, and pasting properties of starches from waxy and nonwaxy wheat and their F1 seeds [J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77(1): 58–63.

Advances in Low-Protein Diets Research for Swine

ZHOU Junyan ZENG Xiangfang QIAO Shiyan*

(State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: With industrial crystalline amino acids supplementation, low-protein diets can satisfy precisely amino acid nutritional requirement of pigs under reduced dietary protein conditions. The appreciated application of low-protein diets can promote the growth performance, reduce metabolic burden, improve the utilization efficiency of nutrients, enhance intestinal health, save production costs, and protect the environment. In the present review, the advances in low-protein diets research in recent years was reviewed from the aspects of intestinal microbial population and metabolites, non-protein nitrogen and N-carbamylglutamic acid application, and the modulation of dietary starch composition on amino acid absorption and muscle synthesis. The aim of the review is to provide reference for the related research work. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(10): 6146-6151]

Key words: low-protein diet; gut microbes; non-protein nitrogen; N-carbamylglutamic acid; starch composition