

天然植物活性成分与猪肠道健康的研究进展

易丹 侯永清*

(武汉轻工大学动物科学与营养工程学院,湖北省动物营养与肠道健康国际科技合作基地,武汉 430023)

摘要: 肠道健康问题仍是制约养猪业快速发展的一大难题。天然植物活性成分(NPBCs)由于残留少、耐药性和毒副作用小、安全性高等优点受到养猪业广泛关注,可提高生猪肠道健康水平和生产性能。本文通过综述 NPBCs 对猪肠道形态结构、消化吸收能力、屏障功能、抗氧化功能、免疫功能和菌落结构的影响,并提出了尚需要进一步研究的问题,以期为 NPBCs 在养猪生产上的应用提供参考。

关键词: 天然植物活性成分;猪;肠道健康;屏障功能

中图分类号: S828

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2020)10-4518-07

当前,肠道健康问题仍是制约养猪业快速发展的一大难题。传统的饲用抗生素由于残留性和耐药性问题已被大多数国家禁用。天然植物活性成分(natural plant bioactive compounds, NPBCs)由于残留少、耐药性和毒副作用小、安全性高等优点受到养猪业广泛关注。NPBCs 通常指植物化学物质、植物营养素或植物次生代谢物等^[1],主要包括植物精油、黄酮、多酚、多糖、生物碱、皂甙、单宁、有机酸等物质^[2]。研究表明,NPBCs 具有抗氧化、抗菌、抗应激、调节免疫、促生长等功能^[3],被认为是饲用抗生素的理想替代品。有关 NPBCs 对猪肠道功能的影响研究比较多,但相关研究资料比较零散,且 NPBCs 种类繁多、成分复杂,存在作用机制不清楚、效果不稳定等问题。为此,笔者在充分查阅了 NPBCs 对猪肠道功能影响的相关文献基础上,结合自己的研究发现,综述了 NPBCs 对猪肠道健康的研究进展,以期为 NPBCs 在养猪生产上的应用提供参考。

1 植物精油

植物精油是从植物提取和分离得到的含芳香分子的油状物质,在食品、医药和化妆品行业应用

广泛。植物精油种类多、成分复杂,包括萜烯类、芳香类、脂肪类、含氮含硫类等化合物,具有易挥发、不稳定、不溶于水、含有特殊气味等特点^[4]。大量研究表明,植物精油可促进仔猪生长、降低腹泻^[5-8],这主要与植物精油的促进激素分泌、抗菌、抗氧化、免疫调节等功能相关。在调控肠道健康方面,植物精油通过增强屏障与抗氧化功能、改善肠道组织形态和消化吸收功能、调节免疫与菌群结构等途径维护仔猪肠道健康。Zou 等^[9]研究表明,给 72 kg 猪饲喂 25 mg/kg 牛至油(含 81% 香芹酚)4 周后,血清内毒素含量和肠道核因子- κ B(NF- κ B)p65 蛋白含量显著降低,而空肠绒毛高度及紧密连接蛋白[闭锁蛋白(occludin)和紧密连接蛋白-1(ZO-1)]的蛋白表达显著增加,表明牛至油可提高猪肠道的屏障功能。饲喂香芹酚和百里香酚按 1:1 组成的复合精油减少了断奶仔猪腹泻率和肿瘤坏死因子- α (TNF- α)基因表达,但提高了肠 occludin 基因表达、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性、绒毛高度和绒毛隐比^[4,10]。肉桂油(主要成分肉桂醛)是另一种对猪肠道功能具有明显改善作用的植物精油,对猪源产肠毒素大肠杆菌 K88 和霍乱沙门菌 A72 的最小抑菌质量浓度

收稿日期:2020-08-03

基金项目:国家重点研发计划专项“十三五”子项目(2016YFD0501210);湖北省技术创新专项重大项目(2019ABA083)

作者简介:易丹(1981—),男,湖北谷城人,副教授,博士,主要从事猪营养与肠道功能研究。E-mail: yidan810204@163.com

* 通信作者:侯永清,教授,博士生导师,E-mail: houyq@aliyun.com

(MIC)为 400~800 $\mu\text{L/L}$ ^[11],可降低仔猪腹泻率,提高肠道抗氧化能力和 Ras 及闭合蛋白-1 (claudin-1) 的蛋白表达^[8,12]。在调节肠道免疫功能方面,肉桂油有降低细胞因子表达的趋势,提高 CD19、养分转运载体[钠/葡萄糖协同转运蛋白 1 (SLC5A1)、钠/葡萄糖协同转运蛋白 2 (SLC2A2)] 的基因表达及离子转运^[7,13]。通过将肉桂醛和百里香酚复合(1:1)饲喂仔猪(50 mg/kg),腹泻率、回肠巨噬细胞和 Peyer 结的密度及白细胞介素-1 α (IL-1 α) 基因表达量均显著降低^[14-15]。此外,大蒜提取物、姜黄油、辣椒油、茶树油、橄榄油等其他植物精油也可降低仔猪腹泻,改善肠道屏障功能和吸收功能^[5-6,16-17]。多种植物精油的复合也可改善肠道组织形态^[18],调节猪肠道免疫功能^[19-20]。需要特别指出的是,植物精油对猪肠道功能的作用效果并不完全等同于其主要活性成分。笔者所在研究团队前期发现,将百里香酚、香芹酚和肉桂醛按 1:1:1 比例配制成的复合物虽然降低了仔猪的腹泻率,但与天然植物精油(肉桂油、牛至油和百里香油)相比,精油主要成分复合物使脂多糖刺激仔猪的死亡率显著增加(+12.5%)^[11],这可能与这些天然精油的主要活性成分的毒副作用有关。因此,植物精油复杂的组分具有多靶点效应、互补与互作效应,可减弱或中和其对机体的毒副作用^[21]。

植物精油改善肠道健康的另一个重要机制与其抑菌作用相关。通常认为,植物精油抑菌作用主要与其所含的活性成分相关,如香芹酚、百里香酚、丁香酚、肉桂醛、倍半萜、芳樟醇、柠檬醛等物质,这些活性成分抑菌的主要机理包括:改变菌体细胞膜结构和新陈代谢、增加细胞膜渗透性、加剧细胞内容物流失、抑制细菌毒力因子表达、降低生物能量和细菌黏附能力^[2,21-22]。研究表明,饲料中添加牛至油、肉桂油、香芹酚与肉桂醛复合物、刺五加精油等均可降低肠道大肠杆菌数量,提高有益菌数量^[8,14,23-25]。香芹酚与百里香酚复合物、茶树油还可增加肠道微生物菌群丰度及多样性,影响肠道厚壁菌门和拟杆菌门数量,提高肠道菌群丁酸盐和丙酸盐代谢功能^[4,6]。随着肠道微生物菌群的改变,其代谢物(如挥发性脂肪酸、支链氨基酸等)也随着发生变化,进而影响肠道健康。扶雄锋^[4]通过 16S rRNA 基因测序和代谢组学技术,发现断奶仔猪饲料中添加 500 mg/kg 复合植物精

油(含 7.5% 香芹酚和 7.5% 百里香酚)可提高结肠厚壁菌门、乳杆菌目、巨型球菌属和链球菌属相对丰度,这与缬氨酸、异亮氨酸、丙氨酸、N-甲基-DL-丙氨酸等代谢产物的含量呈正相关。张玲玲等^[26]通过给仔猪饲喂含 1 000 mg/kg 植物精油(15% 肉桂醛和 5% 百里香酚)降低了粪便大肠杆菌数量、氨态氮含量及脲酶活性,提高了仔猪生长性能。

2 黄酮类

黄酮类植物活性成分是一类以黄酮(2-苯基色原酮)为母核结构而衍生的黄色色素,属植物次生代谢产物,分为黄酮类、黄酮醇类、黄烷酮类、异黄酮类、黄烷醇类、花色素类等^[27]。黄酮类植物活性成分具有多种生物学功能,如抗氧化、抗菌、抗病毒、免疫调节等功能,其在畜牧生产上的应用也能提高动物的生产性能和抗病能力。研究指出,黄酮类植物提取物的生物学功能与其主要活性成分的超强抗氧化、清除自由基功能相关^[28]。Gan 等^[29]给仔猪饲喂 300 mg/kg 姜黄素 28 d,降低了空肠和回肠丙二醛(MDA)与氧化型谷胱甘肽(GSSG)含量。Zou 等^[24]给育肥猪饲喂 25 mg/kg 槲皮素 4 周后,降低了运输应激猪空肠活性氧(ROS)和 MDA 含量、炎症细胞因子[白细胞介素-1 β (IL-1 β)、白细胞介素-6 (IL-6)、TNF- α]的 mRNA 表达水平及 NF- κ B p65 蛋白含量。林厦菁等^[30]给仔猪饲喂 40 mg/kg 大豆异黄酮 42 d 后,提高断奶后仔猪空肠超氧化物歧化酶(SOD)和 GSH-Px 活性,改善肠黏膜绒毛结构。大豆异黄酮还降低了氧化鱼油处理仔猪空肠的 MDA、IL-1 β 、白细胞介素-2 (IL-2) 和 NF- κ B 含量,但提高了 GSH-Px 活性和分泌型免疫球蛋白 A (sIgA) 及白细胞介素-4 (IL-4) 含量^[31]。我们前期的研究也发现,葛根素可以提高猪流行性腹泻病毒感染(PEDV)仔猪肠道的抗氧化能力,包括增强十二指肠和结肠 SOD 和 GSH-Px 活性,降低回肠过氧化氢(H₂O₂)和 MDA 含量。研究表明,黄酮类植物活性成分结构中的 C 环双键和 4-羰基均是抗氧化自由基的活性基团,可直接进入机体细胞内,发挥自由基清除功能^[32]。此外,黄酮类化合物还可通过调控肠细胞红系衍生的核因子 2 相关因子/Kelch 样环氧氯丙烷相关蛋白 1 (Nrf2/Keap1) 系统促进抗氧化酶表达^[1]。

黄酮类植物活性成分还可提高肠道的屏障功能和免疫功能。25 mg/kg 槲皮素可提高猪空肠 *occludin* 和 *ZO-1* 的基因表达,并降低血液内毒素含量^[24],而槲皮素糖苷可通过竞争抑制 *SGLT1* 降低钠依赖性的葡萄糖吸收^[33]。Xun 等^[34]给仔猪饲喂 300 或 400 mg/kg 姜黄素 21 d 后,提高了肠绒毛高度、sIgA 含量、杯状细胞数量和白细胞介素-10 (*IL-10*) 的 mRNA 水平表达,但降低了血液 *D*-乳酸含量、二胺氧化酶 (DAO) 活性、上皮层淋巴细胞数量以及 Toll 样受体 4 (*TLR4*) 和 *TNF- α* 与 *IL-1 β* 的基因表达。Wu 等^[35]利用 PEDV 感染仔猪模型发现,葛根素抑制了肠道 PEDV 增殖,降低了仔猪腹泻率和肠黏膜 *IL-1 β* 、*IL-6*、*IL-8* 及 *NF- κ B* 含量,蛋白质组学结果揭示葛根素增强肠道抗病毒能力与调控 I 型干扰素信号通路相关。因此,黄酮类植物活性成分可增强肠道屏障功能、免疫功能和抗病毒能力。此外,黄酮类植物活性成分具有抗菌活性,如甘草总黄酮、苦瓜黄酮、藤茶黄酮、黄芩黄酮等,它们通过干扰细菌细胞新陈代谢和破坏膜完整性抑制有害细菌生长^[2],从而改善肠道菌群结构,如大豆异黄酮可提高肠粪便双歧杆菌数量,降低大肠杆菌数量^[36]。

3 多酚类

植物多酚类化合物是一类广泛存在于植物体内、含有多个羟基的酚类植物成分总称,主要包括酚酸类化合物、单宁及黄酮类化合物(上文提及)等。由于酚羟基可作为氢供体,多酚类化合物可清除体内 ROS,并与铁离子、铜离子等具有促进 ROS 生成的金属离子发生螯合反应,从而保护机体免受氧化应激损伤^[28]。Gan 等^[29]给仔猪饲喂 300 mg/kg 白藜芦醇 28 d,提高了空肠和回肠谷胱甘肽 (GSH) 含量及空肠 SOD 活性,但降低了回肠 MDA 含量。胡瑶莲等^[37]给生长育肥猪饲喂 600 mg/kg 白藜芦醇 119 d,提高了血清过氧化氢酶 (CAT) 活性和总抗氧化能力 (T-AOC),但对肠道抗氧化指标无显著影响。Gessner 等^[38]发现,葡萄籽和葡萄渣提取物可降低十二指肠黏膜转录因子 *NF- κ B* 和 *Nrf2* 的表达,改善机体氧化应激。关于肠道屏障功能与免疫功能方面,多酚类化合物也具有积极的作用效果,如白藜芦醇可提高肠细胞 *occludin*、*claudin-1*、*claudin-4* 和 *ZO-1* 等基因表达,提高肠细胞单层的跨膜电阻 (TEER) 值和空肠

IL-10 含量,并降低空肠 *IL-6* 含量^[37,39];葡萄籽和葡萄渣提取物还可抑制肠黏膜细胞间黏附分子 1 (*ICAM1*)、趋化因子 2 (*CCL2*)、*TNF- α* 、白细胞介素-8 (*IL-8*) 的基因表达^[38]。张露滢等^[40]认为,植物多酚可通过调节肠上皮细胞内的信号分子来影响信号通路的活化和炎症因子的表达,从而改善受损的肠黏膜屏障功能,降低肠道通透性。值得注意的是,多酚类化合物还可影响肠道消化酶的分泌和养分转运。孙展英等^[41]给仔猪饲喂 0.5 或 1.0 g/kg 单宁酸 30 d 后,降低了断奶仔猪的腹泻率,但提高胃蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶活性。Guschlbauer 等^[42]通过体外细胞培养试验发现,反式-白藜芦醇可降低肠道钠离子依赖性的葡萄糖吸收和丙氨酸转运。

另外,有关多酚类化合物与肠道菌群的相关作用也值得研究。一方面,植物多酚可直接影响肠道微生物的组成,选择性促进益生菌或抑制病原菌的生长,从而改变肠道微生态,如白藜芦醇可降低结肠大肠杆菌数量,提高双歧杆菌数量;单宁酸可提高空肠乳酸菌数量,并降低盲肠氨、异丁酸等气体含量^[43]。另一方面,植物多酚被大肠微生物分解代谢,变成小分子物质且具有更高的生物活性,如产生肠上皮细胞的重要能量来源丁酸,在调节宿主免疫应答与氧化应激反应、增强肠道屏障功能等方面具有积极作用^[44]。

4 多糖类

植物多糖是指植物提取物中含有 10 个以上糖基并以 α - β -糖苷键连接的化合物,具有抗氧化、抗菌和免疫调节等多种生物学功能^[22,28,44]。关于植物多糖的抗氧化功能,一方面,多糖分子存在还原性半醛羟基和醇羟基,可与超氧离子自由基发生氧化还原反应或与金属离子螯合,减少细胞多余的 ROS 产生;另一方面,植物多糖可提高动物机体抗氧化酶活性^[28,44]。然而,关于植物多糖与猪肠道抗氧化功能的研究报道仍很少。另外,植物多糖可增强肠道屏障功能和免疫功能、调节肠道菌群结构。甄玉国等^[45]给断奶仔猪饲喂含 200 mg/kg 黄芪多糖的饲料,提高了盲肠菌群的丰富度,降低肠道 pH。谢红兵等^[46-47]通过给断奶仔猪饲喂 800 mg/kg 的黄芪多糖、白术多糖或牛膝多糖 28 d 后,降低了仔猪腹泻率、盲肠和结肠内容物 pH、大肠杆菌数量,但提高了肠绒毛高度、肠道

乳酸菌和双歧杆菌数量、总挥发性脂肪酸含量以及 *occludin*、*claudin-1* 和 *ZO-1* 的基因表达水平,表明这 3 种植物多糖可改善肠道屏障和微生态环境,且这 3 种多糖的联合作用效果更佳。Wang 等^[48]发现香菇多糖提高了回肠绒毛高度、*claudin-1* 蛋白表达及盲肠挥发性脂肪酸含量,调控肠道菌群组成。通常认为,植物多糖作为一种不易被动物消化的碳水化合物,可以选择性地被肠道有益菌利用后产生大量的挥发性脂肪酸,降低肠道 pH,抑制其他病原菌生长。此外,刘旺景等^[2]认为植物多糖抗菌作用还与破坏细菌细胞壁结构、提高细胞膜通透性相关。然而,植物多糖促进肠道紧密连接蛋白和基因表达的相关机制尚需进一步研究。谢红兵等^[47]认为,植物多糖提高紧密连接蛋白的表达可能与植物多糖本身的抗菌性能有关。植物多糖通过抑制大肠杆菌、沙门菌等细菌的产生,阻止有害菌对 *occludin*、*claudin-1* 和 *ZO-1* 的破坏。但陈景杰等^[49]通过体外细胞试验发现,猴头菇多糖可直接促进肠细胞增殖和上调紧密连接相关蛋白的基因表达,提示存在其他途径影响肠细胞紧密连接蛋白的表达。值得注意的是,调节肠道免疫功能可能也是一个重要机制,如 Wang 等^[48]报道香菇多糖可抑制炎症信号通路和促炎细胞因子;李成等^[50]发现党参多糖极大提高了断奶仔猪小肠 sIgA、免疫球蛋白 G (IgG) 和免疫球蛋白 M (IgM) 蛋白及基因表达水平。

5 其他

生物碱类也是天然植物中具有重要生物学活性的一类含氮化合物,在维护猪肠道健康和降低腹泻率方面具有积极的效果。50 mg/kg 的血根碱降低了断奶仔猪腹泻率,提高了十二指肠绒毛高度、绒毛高度/隐窝深度、小肠黏膜 IgA、IgG 和 IgM 含量,且效果与金霉素组无显著差异^[51]。采食苦参碱粗提物的仔猪腹泻率明显降低,但胃黏膜肥大细胞数量明显增加^[52]。在调节肠道菌群方面,小檗碱和杜仲生物碱可降低生长育肥猪腹泻率和粪便大肠杆菌数量,但提高了乳酸菌数量^[53-54]。有关生物碱抑制肠道细菌的作用机理尚不清楚,刘旺景等^[2]认为这种抑菌作用可能与阻断菌体细胞养分转运、破坏细胞膜结构有关。

皂苷结构复杂,由皂苷元、糖和糖醛酸或其他有机酸组成,主要分为甾体皂苷和三萜皂苷两大

类^[55],具有抗氧化和抗菌功能。有关皂苷在猪肠道功能上的研究资料比较有限。王洁^[56]研究发现,给断奶仔猪饲喂 2.5 g/kg 苜蓿皂苷 30 d 可提高十二指肠、空肠和回肠中乳酸菌数量,上调十二指肠和回肠 *CAT* 及空肠 *GSH-Px* 的基因表达,并降低十二指肠和盲肠的 pH,提示苜蓿皂苷可调节肠道抗氧化酶表达和改善肠道菌群结构。

糖萜素是一种含有大量多糖和皂苷的混合物,具有调节动物免疫水平、提高抗氧化能力、改善肠道养分吸收等功能^[57-59]。通过给断奶仔猪饲喂 500 mg/kg 的糖萜素 35 d 后,王曼^[59]发现仔猪肠绒毛高度、空肠淀粉酶、胰蛋白酶和脂肪酶的活性均显著提高,且肠黏膜紧密连接蛋白 *ZO-1* 和 *occludin*、黏液素 1 (*MUC1*) 和黏液素 2 (*MUC2*)、葡萄糖转运蛋白-1 (*SGLT-1*) 等基因表达增加,表明糖萜素可提高肠道消化功能和屏障功能。进一步分析发现,糖萜素还可调节肠道微生物组成,提高盲肠双歧杆菌和乳酸杆菌的数量,并降低肠道内容物的 pH。

6 小结

天然植物活性成分以其绿色、环保、多效等特点成为了饲用抗生素的潜在替代品。这些 NPBCs 可改善猪肠道组织形态和消化吸收能力,增强肠道屏障和抗氧化功能,调节免疫力,优化肠道菌落结构和内环境,进而维护肠道健康,其应用将为养猪业快速发展提供重要保障。然而,由于大多数 NPBCs 含有多种化合物成分,相互协同作用强,其对肠道功能的调节机制尚不明确。此外,NPBCs 的提取工艺、代谢途径、安全剂量、添加方式等方面研究不足也是限制 NPBCs 在养猪生产上广泛应用的重要因素。

参考文献:

- [1] PATRA A K, AMASHEH S, ASCHENBACH J R. Modulation of gastrointestinal barrier and nutrient transport function in farm animals by natural plant bioactive compounds—a comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59 (20): 3237–3266.
- [2] 刘旺景, 敖长金, 萨茹丽, 等. 植物提取物抑菌活性及作用机理[J]. 动物营养学报, 2016, 28 (8): 2344–24352.
- [3] 崔志娟, 肖定福, 陈宇光. 植物提取物替代抗生素在

- 仔猪肠道中的应用[J]. 饲料博览, 2019(11): 22-27.
- [4] 扶雄锋. 植物精油对断奶仔猪生产性能、肠道菌群及其代谢影响的研究[D]. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [5] LIU Y, SONG M, CHE T M, et al. Dietary plant extracts alleviate diarrhea and alter immune responses of weaned pigs experimentally infected with a pathogenic *Escherichia coli* [J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(11): 5294-5306.
- [6] 王淑楠. 茶树油对断奶仔猪生长性能及肠道屏障功能的影响[D]. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [7] WILLIAMS A R, HANSEN T V A, KRYCH L, et al. Dietary cinnamaldehyde enhances acquisition of specific antibodies following helminth infection in pigs [J]. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2017, 189: 43-52.
- [8] YI D, FANG Q H, HOU Y Q, et al. Dietary supplementation with oleum cinnamomi improves intestinal functions in piglets [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(5): 1284.
- [9] ZOU Y, XIANG Q H, WANG J, et al. Oregano essential oil improves intestinal morphology and expression of tight junction proteins associated with modulation of selected intestinal bacteria and immune status in a pig model [J]. *Biomed Research International*, 2016, 2016: 5436738.
- [10] WEI H K, XUE H X, ZHOU Z X, et al. A carvacrol-thymol blend decreased intestinal oxidative stress and influenced selected microbes without changing the messenger RNA levels of tight junction proteins in jejunal mucosa of weaning piglets [J]. *Animal*, 2017, 11(2): 193-201.
- [11] 汪中兴. 复合植物精油在仔猪饲料中的应用效果研究[D]. 硕士学位论文. 武汉: 武汉轻工大学, 2014.
- [12] WANG L, HOU Y D, YI D, et al. Beneficial roles of dietary oleum cinnamomi in alleviating intestinal injury [J]. *Frontiers in Bioscience (Landmark)*, 2015, 20(5): 814-828.
- [13] BOUDRY G, PERRIER C. Thyme and cinnamon extracts induce anion secretion in piglet small intestine via cholinergic pathways [J]. *Journal of Physiology and Pharmacology*, 2008, 59(3): 543-552.
- [14] LI S Y, RU Y J, LIU M, et al. The effect of essential oils on performance, immunity and gut microbial population in weaner pigs [J]. *Livestock Science*, 2012, 145(1/2/3): 119-123.
- [15] JIANG X R, AWATI A, AGAZZI A, et al. Effects of a blend of essential oils and an enzyme combination on nutrient digestibility, ileum histology and expression of inflammatory mediators in weaned piglets [J]. *Animal*, 2015, 9(3): 417-426.
- [16] LIU Y, SONG M, CHE T M, et al. Dietary plant extracts modulate gene expression profiles in ileal mucosa of weaned pigs after an *Escherichia coli* infection [J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(5): 2050-2062.
- [17] LIEHR M, MEREU A, PASTOR J J, et al. Olive oil bioactives protect pigs against experimentally-induced chronic inflammation independently of alterations in gut microbiota [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0174239.
- [18] 宋转, 赵广宇, 董毅, 等. 复合植物精油对脂多糖刺激断奶仔猪肠道形态结构和抗氧化能力的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2019, 46(3): 684-689.
- [19] MANZANILLA E G, NOFRARÍAS M, ANGUITA M, et al. Effects of butyrate, avilamycin, and a plant extract combination on the intestinal equilibrium of early-weaned pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2006, 84(10): 2743-2751.
- [20] KROISMAYR A, SEHM J, PFAFFL M W, et al. Effects of avilamycin and essential oils on mRNA expression of apoptotic and inflammatory markers and gut morphology of piglets [J]. *Czech Journal of Animal Science*, 2008, 53(9): 377-387.
- [21] WINDISCH W, ROHRER E, SCHEDLE K. Phyto-genic feed additives to young piglets and poultry: mechanisms and application [M] // STEINER T. *Phytogenics in animal nutrition: natural concepts to optimize gut health and performance*. Nottingham: Nottingham University Press, 2009: 19-38.
- [22] 张晶, 邢媛媛, 徐元庆, 等. 植物提取物活性成分的提取工艺及抑菌活性研究进展 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31(12): 5461-5467.
- [23] FANG J, YAN F Y, KONG X F, et al. Dietary supplementation with *Acanthopanax senticosus* extract enhances gut health in weaning piglets [J]. *Livestock Science*, 2009, 123(2/3): 268-275.
- [24] ZOU Y, WEI H K, XIANG Q H, et al. Protective effect of quercetin on pig intestinal integrity after transport stress is associated with regulation oxidative status and inflammation [J]. *Journal of Veterinary Medical Science*, 2016, 78(9): 1487-1494.
- [25] JIANG X R, AGAZZI A, AWATI A, et al. Influence

- of a blend of essential oils and an enzyme combination on growth performance, microbial counts, ileum microscopic anatomy and the expression of inflammatory mediators in weaned piglets following an *Escherichia coli* infection [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, 209: 219-229.
- [26] 张玲玲,冯杰,李慧,等.植物精油与丁酸钠复合制剂对断奶仔猪生长性能、血清抗氧化指标、粪便菌群及氨逸失的影响[J].*动物营养学报*,2018,30(2):678-684.
- [27] 文开新,王成章,严学兵,等.黄酮类化合物生物学活性研究进展[J].*草业科学*,2010,27(6):115-122.
- [28] 萨茹丽,杨斌,敖长金.天然植物提取物在动物氧化应激中的研究概况[J].*动物营养学报*,2018,30(6):2021-2026.
- [29] GAN Z D, WEI W Y, WU J M, et al. Resveratrol and curcumin improve intestinal mucosal integrity and decrease m6A RNA methylation in the intestine of weaning piglets [J]. *ACS Omega*, 2019, 4 (17): 17438-17446.
- [30] 林厦菁,陈芳,蒋守群,等.大豆异黄酮对早期断奶仔猪生长性能、抗氧化功能及肠黏膜形态结构的影响[J].*中国农业科学*,2020,53(10):2101-2111.
- [31] HUANG L, MA X Y, JIANG Z Y, et al. Effects of soybean isoflavone on intestinal antioxidant capacity and cytokines in young piglets fed oxidized fish oil [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*, 2016, 17(12):965-974.
- [32] 杨硕,徐元庆,邢媛媛,等.植物源黄酮类化合物对动物免疫和抗氧化功能影响的研究进展[J].*动物营养学报*,2019,31(7):2958-2964.
- [33] CERMAK R, LANDGRAF S, WOLFFRAM S. Quercetin glucosides inhibit glucose uptake into brush-border-membrane vesicles of porcine jejunum [J]. *British Journal of Nutrition*, 2004, 91(6):849-855.
- [34] XUN W J, SHI L G, ZHOU H L, et al. Effects of curcumin on growth performance, jejunal mucosal membrane integrity, morphology and immune status in weaned piglets challenged with enterotoxigenic *Escherichia coli* [J]. *International Immunopharmacology*, 2015, 27(1):46-52.
- [35] WU M J, ZHANG Q, YI D, et al. Quantitative proteomic analysis reveals antiviral and anti-inflammatory effects of puerarin in piglets infected with porcine epidemic diarrhea virus [J]. *Frontiers in Immunology*, 2020, 11: 169.
- [36] TAMURA M, HIRAYAMA K, ITOH K, et al. Effects of soy protein-isoflavone diet on plasma isoflavone and intestinal microflora in adult mice [J]. *Nutrition Research*, 2002, 22(6):705-713.
- [37] 胡瑶莲,张恒志,陈代文,等.白藜芦醇对生长育肥猪抗氧化能力、空肠黏膜免疫及结肠菌群的影响[J].*动物营养学报*,2019,31(1):459-468.
- [38] GESSNER D K, FIESEL A, MOST E, et al. Supplementation of a grape seed and grape marc meal extract decreases activities of the oxidative stress-responsive transcription factors NF- κ B and Nrf2 in the duodenal mucosa of pigs [J]. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2013, 55: 18.
- [39] LING K H, WAN M L Y, EL-NEZAMI H, et al. Protective capacity of resveratrol, a natural polyphenolic compound, against deoxynivalenol-induced intestinal barrier dysfunction and bacterial translocation [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2016, 29(5):823-833.
- [40] 张露滢,赵健,兰欢,等.植物多酚类化合物与肠道通透性相关研究进展[J].*胃肠病学和肝病学杂志*,2019,28(12):1421-1424.
- [41] 孙展英,李建涛,陈宝江.单宁酸对仔猪生长性能、营养物质利用率及相关消化酶活性的影响[J].*饲料研究*,2014(1):46-49.
- [42] GUSCHLBAUER M, KLINGER S, BURMESTER M, et al. *Trans*-resveratrol and ϵ -viniferin decrease glucose absorption in porcine jejunum and ileum *in vitro* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2013, 165(3):313-318.
- [43] BIAGI G, CIPOLLINI I, PAULICKS B R, et al. Effect of tannins on growth performance and intestinal ecosystem in weaned piglets [J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2010, 64(2):121-135.
- [44] 杨玲,胡睿智,夏嗣廷,等.植物多糖的功能性研究进展及其在动物生产中的应用[J].*动物营养学报*,2019,31(6):2534-2543.
- [45] 甄玉国,陈雪,王晓磊,等.黄芪多糖(APS)对断奶仔猪生长性能、血液生理生化指标及菌群多样性的影响[J].*中国兽医学报*,2016,36(11):1954-1958,1968.
- [46] 谢红兵,邹云,刘丽莉,等.植物多糖对断奶仔猪生长性能及肠道内环境的影响[J].*动物营养学报*,2018,30(7):2662-2671.
- [47] 谢红兵,邹云,刘丽莉,等.植物多糖对断奶仔猪小肠黏膜形态及肠黏膜屏障功能的影响[J].*中国兽医学报*,2019,39(1):150-157,187.

- [48] WANG X Y, WANG W J, WANG L M, et al. Lentinan modulates intestinal microbiota and enhances barrier integrity in a piglet model challenged with lipopolysaccharide [J]. *Food & Function*, 2019, 10(1): 479-489.
- [49] 陈景杰, 陈新瑶, 董星, 等. 猴头菇多糖对氧化应激状态下猪小肠上皮细胞紧密连接相关基因表达的影响 [J]. *中国兽医科学*, 2017, 47(1): 128-134.
- [50] 李成, 尹莉莉, 朱电锋, 等. 党参多糖对仔猪小肠黏膜免疫功能的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(2): 347-355.
- [51] 陈家顺, 康宝聚, 曾建国, 等. 血根碱对断奶仔猪生长性能、肠道形态结构及小肠黏膜免疫功能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(5): 1845-1853.
- [52] 姚红艳, 李诗举, 李秀富, 等. 苦参碱对断奶仔猪腹泻及胃肥大细胞的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2011, 47(5): 52-54.
- [53] 曹国文, 曾代勤, 戴荣国, 等. 中药添加剂对生长猪肠道菌群与生产性能的影响 [J]. *四川畜牧兽医*, 2003, 30(10): 19-20.
- [54] FAN G G, CHANG J, YIN Q Q, et al. Effects of probiotics, oligosaccharides, and berberine combinations on growth performance of pigs [J]. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 2015, 39(6): 637-642.
- [55] 姜茂成, 占今舜. 天然植物提取物——皂苷在仔猪生产中的应用 [J]. *猪业科学*, 2016, 33(11): 86-87.
- [56] 王洁. 苜蓿皂苷调控断奶仔猪肝脏代谢的关键蛋白筛选 [D]. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [57] 李官兵. 糖萜素对母猪、仔猪免疫力和生产性能的影响 [J]. *今日畜牧兽医*, 2011(5): 24-25.
- [58] 唐晓玲, 刘振湘, 张石蕊, 等. 糖萜素对早期断奶仔猪血液生化指标及免疫机能的影响研究 [J]. *湖南环境生物职业技术学院学报*, 2005, 11(3): 239-243.
- [59] 王曼. 糖萜素在仔猪上的耐受性评价及其对仔猪肠道健康影响的研究 [D]. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学, 2018.

Research Progress on Natural Plant Bioactive Compounds and Swine Intestinal Health

YI Dan HOU Yongqing*

(Hubei International Scientific and Technological Cooperation Base of Animal Nutrition and Gut Health, School of Animal Science and Nutrition Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The intestinal health problem can largely impede the development of pig industry. With the ban in in-feed antibiotics, natural plant bioactive compounds (NPBCs) characterized by little residue, no resistance, and minimal side effects, are attracted great attention and have been reported to improve intestinal health and growth performance in pigs. This review summarizes the effects of NPBCs on intestinal morphology, digestion and absorption function, barrier function, antioxidative capacity, immune function, and microflora in pigs, and raises several problems needed to be further studied, and thereby providing theoretical basis for the application of NPBCs in pig industry. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(10): 4518-4524]

Key words: natural plant bioactive compounds; swine; intestinal health; barrier function