植物多酚对畜禽肠道健康的保护作用研究进展

文秋, 杨瑞瑞, 金晓露*

中国农业大学动物科学技术学院, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193

* 联系人, E-mail: jinxiaolu@cau.edu.cn

收稿日期: 2020-04-23; 接受日期: 2020-06-07; 网络版发表日期: 2020-09-08

国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 31702287)和中国农业大学动物科学技术学院动物科学专业训练与产业实践课程资助

摘要 肠道疾病造成畜牧业的巨大经济损失, 畜禽肠道健康对于畜禽养殖具有重要意义. 传统方式一直将抗生素应用于畜禽肠道疾病防治中, 极易造成抗生素滥用, 也极大地限制了现代畜牧业的健康发展. 抗生素替代是产业需求, 而植物多酚作为无毒副作用、无药残的抗生素替代物之一, 在畜禽生产及畜禽疾病中有广泛的应用价值. 本文主要从植物多酚作为抗生素替代品在畜禽生产中的应用, 对畜禽肠道的保护功效, 以及对畜禽肠道健康的保护作用机制三个方面对其研究进展进行了综述.

关键词 植物多酚, 抗生素替代, 畜禽, 肠道

畜牧业是现代农业产业体系的重要组成部分. 规模化、集约化、标准化养殖极大地提高了现代畜牧业生产效率, 其中也伴随着抗生素类生长促进剂(antibiotic growth promoters, AGPs)的广泛使用^[1]. 20世纪70年代以来, AGPs被广泛用于畜禽生产, 在一定程度上发挥了促进动物生长、抑制病原菌感染、增强动物免疫力等作用, 但长期滥用抗生素所导致的诸多不良影响也在逐渐显现, 所造成的细菌耐药、畜禽肠道菌群紊乱、畜产品抗生素残留、养殖场环境污染等问题也极大地限制了现代畜牧业的健康发展, 严重威胁着人类健康与生态环境^[2,3]. 欧盟已于2006年广泛禁止抗生素作为饲料添加剂在动物饲料中使用, 而我国农业农村部发布相关公告, 明确指出自2020年7月1日起, 禁止饲料生产企业生产含有促生长类药物饲料添

加剂(中药类除外)的商品饲料. 全面“无抗”的畜牧业生产新时代即将到来. 抗生素替代是产业需求, 研究符合绿色生态畜牧业发展需求的抗生素替代品刻不容缓^[4].

植物多酚作为无毒副作用、无药残的抗生素替代物之一, 在畜禽生产及畜禽疾病中有广泛的应用^[5]. 近年来的研究表明, 植物多酚提取物及多酚单体化合物具有免疫调节、抑菌、抗氧化、调节肠道菌群等多种功能活性, 可有效改善畜禽肠道微环境^[6-9]. 因此, 本文就植物多酚对畜禽肠道健康影响进行了综述, 重点阐释了植物多酚提取物及多酚类单体化合物对畜禽肠道菌群、肠道屏障功能、肠道免疫功能的影响及其可能的作用机制, 以期对植物多酚在抗生素类生长促进剂替代品的开发提供思路和依据.

引用格式: 文秋, 杨瑞瑞, 金晓露. 植物多酚对畜禽肠道健康的保护作用研究进展. 中国科学: 生命科学, 2020, 50: 914-926

Wen Q, Yang R R, Jin X L. Research advances on the beneficial effects of plant polyphenols on intestinal health in farm animals (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2020, 50: 914-926, doi: [10.1360/SSV-2020-0046](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0046)

1 植物多酚及其作为抗生素替代品在畜禽生产中的应用

1.1 植物多酚定义及其分类

植物多酚是一大类具有多元酚结构单元的植物次生代谢产物, 广泛分布于植物的皮、根、木、叶、果实中, 其含量仅次于纤维素、半纤维素和木质素, 是植物中第4大主要成分^[10]. 目前, 人们已经鉴定出超过8000余种的植物多酚类成分^[11].

狭义概念认为, 植物多酚仅指相对分子质量在500~3000之间单宁(tannins). 此概念最早由Bate-Smith^[12]于1958年提出, 指能沉淀生物碱、明胶和蛋白质等的简单水溶性含酚羟基化合物. 根据其化学结构, 单宁亦可分为水解单宁和缩合单宁两大类. 水解单宁主要是聚羟酸酯类多酚, 可进一步细分为槲单宁和鞣花单宁两大类物质; 而缩合单宁主要是C6-C3-C6羟基黄烷醇类和/或C6-C2-C6的芪类单体的缩合物, 单体间以C-C键相连^[13].

随着研究的深入, 植物多酚的概念也进一步扩展, Haslam等人^[14]根据单宁的分子结构及分子量对“植物多酚”这一概念进行了初步定义, 除了单宁类物质外, 其他与单宁有生源关系的化合物(如单宁的前体化合物和单宁的聚合物)也被归为植物多酚. 因此, 目前也有研究将植物多酚分为三大类物质: 黄酮类(包括黄酮、黄酮醇、黄烷酮、花青素、原花色素、异黄酮等)、酚酸类(芳香族羧酸的羟基衍生物)和非黄酮类化合物(芪类化合物等). 此外, 也可根据植物提取来源对其直接命名, 如茶多酚、海藻多酚、葡萄多酚、丹参多酚等混合物, 其组成也受植物来源、提取方法、环境因素等影响^[15].

植物多酚具有丰富多样的生物学活性, 如抗氧化、抗炎、抑菌、免疫调节、抗衰老、心血管保护、抗病毒等, 是人类获得药理活性成分及新药开发先导化合物的重要来源, 对人类健康有积极意义^[10,13~17]. 同时, 近年来越来越多的研究表明, 植物多酚对于提高动物生产性能, 缓解畜禽应激状态, 维持肠道健康具有积极作用. 动物饲料中添加适量的植物多酚提取物或多酚单体化合物, 能改善畜禽健康状况和提升畜禽产品质量, 绿色安全, 同时也不易产生耐药性, 是一类极具开发潜力的绿色抗生素替代物, 具有广阔的开发前景.

1.2 植物多酚作为抗生素替代品在畜禽生产中的应用

我国养殖业的快速发展极大地改善了我国民众的饮食与营养结构, 但与此同时也带来了严重的饲料滥用抗生素等问题. 开发抗生素替代品, 对于养殖业的可持续发展具有重要的现实意义. 理想的抗生素替代品应具有与AGP相同的有益作用, 在确保动物生长性能不受影响的同时, 增加动物的营养供应^[1,2]. 鉴于AGP在调节肠道畜禽微生物和提高动物免疫力中的作用, 实际的AGP替代物也应具有类似的作用. 目前, 研究较多和有实际应用的AGP替代品主要包括微生态制剂、寡聚糖类、酶制剂类、酸化剂和天然植物提取物等^[16]. 植物多酚作为天然植物重要功能性组分, 其安全性和有效性也得到了广泛认可, 且它们具有分布广泛、储量丰富、价格低廉、功效多样、绿色环保等多种优点, 在抗生素替代物领域的研究与应用也成为动物营养与健康研究的热点.

植物多酚类单体物质可以固体、液体或粉末形式加入到饲料中饲喂动物, 也可以直接作为粗制或浓缩的提取物使用. 但与常规营养素不同, 植物多酚大部分不被小肠吸收, 绝大多数(约85%~95%)会到达结肠, 在肠道菌群的作用下分解吸收^[17]. 因此, 为提高植物多酚类物质的消化吸收率, 已有一些研究从排除消化道环境对植物多酚干扰角度出发, 开发出磷脂复合物技术、纳米晶体技术、包埋技术或微乳液等^[18], 这些技术使植物多酚在畜禽肠道内的释放时间大大增加, 同时也在一定程度上提升了植物多酚的适口性.

近年来, 植物多酚已广泛应用于畜禽生产实践中. 有研究表明, 在猪生产中, 肉猪饲料中添加400 mg/kg的茶多酚可显著改善肉猪的平均日增重和净增重, 提高肝脏抗氧化指标, 但对肉猪的胴体品质和肉质无显著影响^[19]. 肥育猪生长后期饲喂茶多酚(60 mg/kg)和维生素E(200 mg/kg)可显著改善猪肉品质^[20]. 在反刍动物生产中, 没食子酸和缩合单宁均可抑制肉牛瘤胃甲烷的产生并保护饲料蛋白质^[21]. 在湖羊饲料中混合添加缩合单宁与纤维素酶, 可有效保护过瘤胃蛋白且不影响纤维素在瘤胃中的降解, 提高饲料利用率^[22]. 在家禽生产中, 基础日粮中添加7.5 mg/kg的葡萄多酚能增加肉仔鸡外周血中CD3⁺、CD8⁺和 $\gamma\delta$ T细胞数量, 促进生长, 调节肉仔鸡的免疫功能^[23]. 添加一定量的

茶多酚(250 mg/kg)和茶皂素(150 mg/kg)后,可提高感染鸡球虫肉仔鸡的生长性能和抗氧化能力,改善其盲肠微生物组成^[24]。

2 植物多酚在保护畜禽肠道健康领域的应用

植物多酚作为一类新型的绿色饲料添加剂和抗生素替代物,可在一定程度上促进动物生长,增强动物免疫力。而合理使用植物多酚,其更重要的意义在于可显著改善畜禽肠道健康,维持畜禽肠道微生态平衡,促进肠黏膜发育和提升肠道屏障功能,缓解外界环境或病原菌造成的肠道氧化应激和免疫失衡。

2.1 猪

多种多酚单体和多酚提取物可应用于猪的生产,用以防治猪的部分肠道疾病。部分植物多酚已被证明对某些肠道疾病有防治作用,有望被开发成新型饲料添加剂和兽药。

植物多酚可作为功能性饲料添加剂,改善猪肉品质和维持肠道健康。杜仲是一种重要的中药和经济类作物,其叶资源非常丰富。研究表明,杜仲叶中富含绿原酸。周艳等人^[25,26]研究发现,杜仲叶多酚提取物对瘦肉型猪肉品质具有改良作用,而其活性成分绿原酸可降低肠道线粒体的脂质过氧化程度,提高NADH脱氢酶的活力,缓解动物的肝-肠道损伤。竹酢粉(bamboo vinegar powder)是竹材在烧制成竹炭过程中所产生的副产品经干燥获得的富含多酚类物质的复合物。刘正旭^[27]研究了竹酢粉对断奶仔猪生产性能、免疫机能及肠道微生物区系的影响,发现饲料中添加0.5%竹酢粉可提高断奶仔猪生长性能,减少腹泻,该作用可能与其调节免疫相关基因的表达和调控肠道微生物区系有关。牛至油(oregano oil)是从草本植物牛至中提取的具有特殊芳香气味的挥发油,其主要化学成分是多酚类、萜烯类、甾醇等,尤其富含百里香酚(thymol)和香芹酚(carvacrol),具有良好的抗微生物活性^[28]。韩庆功等人^[29]研究了牛至油对仔猪生产性能、抗体水平及粪便微生物的影响。结果发现,仔猪日粮中添加300 g/t的牛至油,其粪便中大肠杆菌数量比对照组、抗生素组少,而乳酸杆菌、双歧杆菌数量均比对照组、抗生素组多,说明牛至油起到一定的抗生素替

代作用,具有良好的促生长效果。

此外,植物多酚在防治猪消化道疾病领域也有广泛的应用。猪水肿病又被称为猪肠毒血症,是由猪溶血性大肠杆菌感染引起的一种传染病,断奶前后患病仔猪死亡率高达90%,严重危害养猪产业。黄芩注射液由中药黄芩提取研制而成,主要成分为黄酮,具有抗炎、利尿、抑菌等作用。胡汐柔^[30]通过临床试验发现,肌肉注射黄芩注射液对猪水肿病有良好的治疗效果,临床推荐剂量为0.2 mL/kg,一日1次,连用5日。猪传染性胃肠炎(transmissible gastroenteritis, TGE)是由传染性胃肠炎病毒(transmissible gastroenteritis virus, TGEV)引起的急性肠道传染病,对仔猪危害严重,病死率很高^[31]。金修哲等人^[32]发现,连翘苷、连翘苷元、绿原酸、咖啡酸、丁香酚、丹皮酚均对TGEV在猪睾丸细胞(swine testicle, ST)细胞上的增殖有抑制作用,且咖啡酸直接灭活病毒的作用最显著,有望被开发成抗病毒药物。雷用东等人^[33-35]先后发现,紫甘薯花色苷对TGEV有良好的预防和治疗效果,在20~60 µg/mL质量浓度范围内对TGEV有很好的抗病毒功效;接骨木花色苷具有体外抑制TGEV活性,对TGEV有良好的预防和治疗效果,50 µg/mL的接骨木花色苷抗TGEV的活性最大;紫甘蓝花色苷通过抑制TGEV的增殖和TGEV诱导的ST细胞形态变化,发挥抗TGEV的生物活性作用。三种花色苷均有望被开发成新型植物源抗病毒剂,或可成为治疗TGE的新型药物。Huang等人^[36]研究发现,饲料中添加黄芩提取物可以缓解大肠杆菌K88诱导的断奶仔猪急性肠道损伤,有效减轻断奶仔猪的腹泻症状。

2.2 家禽

植物多酚在家禽疾病防治方面的作用大多处在研究阶段,多数还未应用于生产实践,但是实验室研究已有较理想的效果,多项实验结果为植物多酚的开发利用提供了理论依据。鸡白痢是一种由沙门氏菌引起的传染性疾病,世界各地均有发生,主要危害10~20日龄以内的雏鸡,是危害养鸡业最严重的疾病之一。徐亚慧^[37]研究了马齿苋发酵物对人工感染沙门氏菌的雏鸡的作用效果发现,马齿苋发酵物对雏鸡白痢防治效果明显,可有效缓解肉鸡因鸡白痢后导致的肝、肾损伤,提升免疫力水平,显著降低盲肠中的沙门氏菌数量并显著升高乳酸菌和双歧杆菌的数量,且浓度为4 mL/L

的马齿苋发酵物对雏鸡白痢防治效果明显,可代替氟苯尼考作为养禽业的新型绿色开口药。A型产气荚膜梭菌引起的坏死性肠炎,主要危害2~6周龄肉仔鸡。刘宗争等人^[38]研究了甘草总黄酮对坏死性肠炎模型肉仔鸡的治疗效果发现,甘草黄酮能明显缓解患病肉鸡的肠道损伤,减少坏死性肠炎造成的生产性能损失。

2.3 反刍动物

植物多酚在反刍动物生产上多作为饲料添加剂使用。传统观点认为,单宁类化合物会因其涩味导致反刍动物采食量的降低,故被归为饲料中的抗营养因子,但近年来大量研究表明,单宁可通过调控瘤胃微生物活性,而成为一种新型反刍动物饲料添加剂。相关研究表明,单宁与蛋白质相结合,可抑制蛋白质被瘤胃过度降解,因而可有效保护过瘤胃蛋白,从而增加蛋白质在后肠内的消化吸收,提高反刍动物对氮元素的利用率。此外,单宁在调控瘤胃发酵和抑制甲烷排放方面表现出积极作用^[39,40]。另外,植物类黄酮在反刍动物中也被广泛使用,特别是大豆异黄酮的应用极为广泛。犊牛的饲料中添加桑叶黄酮可以通过提高犊牛机体免疫力、降低腹泻率,提高饲料转化率和犊牛的日增重^[41]。此外,研究表明,大豆异黄酮主要在动物的小肠吸收,且复胃动物的吸收能力较单胃动物更强。饲喂荷斯坦犊牛大豆异黄酮有降低犊牛腹泻率的作用,且饲喂浓度为600 mg/kg时效果最佳^[42]。在羊饲料中添加大豆异黄酮可以升高瘤胃液的pH,增强总脱氢酶活性,改善瘤胃代谢^[43]。此外,大豆异黄酮还可以显著促进小尾寒羊增重^[44]。

3 植物多酚对畜禽肠道的保护功效

植物多酚有显著改善畜禽肠道健康的积极作用,其改善作用主要包括4个方面,包括对肠道屏障功能的调节作用;调控肠道菌群,维持肠道微生态平衡;维持肠道免疫功能,提高畜禽肠道对病原的应答敏感度、缓解肠道应激状态;改善肠道微环境,增强消化酶功能,调节畜禽消化吸收能力等。

3.1 肠道屏障调节

多种植物多酚可以通过保护肠黏膜屏障,减少肠道损伤,达到保护畜禽肠道的作用。肠黏膜屏障由4道

屏障组成:机械屏障、化学屏障、免疫屏障和微生物屏障。肠黏膜屏障将肠腔与机体内环境分隔开来以保持机体内稳态,维持机体正常活动。阿魏酸通过抑制MAPK和NF- κ B信号通路的激活,减少炎性因子释放,缓解热应激大鼠小肠黏膜形态损伤和紧密结构破坏,缓解黏膜屏障功能损伤,同时阿魏酸能够有效缓解热应激诱导的IEC-6细胞屏障功能损伤^[45]。白藜芦醇可通过TGF- β 信号通路对肠黏膜屏障功能发挥作用;并可通过抑制肠上皮细胞凋亡保持肠道屏障的完整,减轻肠道损伤,防止细菌和内毒素移位^[46]。在Caco-2肠细胞中,白藜芦醇可以保护肠细胞紧密连接屏障,并提高紧密连接屏障的完整性^[47]。染料木黄酮通过酪氨酸激酶抑制和Akt信号分子改善肠道屏障功能,同时能够增强机体体液和细胞免疫,抑制肠道屏障功能受损,降低肉鸡大肠杆菌病的死亡率^[48]。绿茶多酚通过抑制肠道JAK2/STAT3信号通路发挥抑制肠道炎症及保护肠黏膜屏障结构的作用^[49]。姜黄素也可以改善肠道屏障功能^[50]。总之,无论是类黄酮多酚还是非类黄酮多酚,都对肠道屏障调节有一定作用,从而保护畜禽肠道健康。

3.2 肠道微生态调节

肠道微生物菌群是一个复杂、庞大的微生物生态系统,同时也是肠黏膜屏障之一,菌群失调引起畜禽免疫力降低,繁殖力下降,甚至引起疾病,从而导致畜禽生产力降低。植物多酚可以通过促进有益菌的生长抑制有害菌的繁殖从而维持肠道微生态平衡^[51]。Kemperman等人^[52]通过模拟肠道微生态系统发现,葡萄渣多酚可通过抑制或促进某些微生物的生长改变肠道菌群,实现对肠道微生态的调节。茶叶的主要成分为茶多酚,大多数茶多酚在肠道内被肠道菌群代谢生成衍生物,从而实现对肠道微生态的调节^[53]。李登辉^[54]发现,茶多酚能够显著提高球虫感染肉鸡肠道中乳酸菌、双歧杆菌的含量,降低大肠杆菌含量,维护肠道内正常的微生物区系。何梦晓^[55]研究发现,饲料中添加夏秋茶叶粉可以显著改变仔猪肠道菌群结构,盲肠中总细菌、乳酸杆菌、拟杆菌门细菌和双歧杆菌数量显著增加,大肠杆菌数量均显著降低,拟杆菌门细菌占总细菌的比例显著增大而厚壁菌门细菌的比例显著降低,在一定程度上改善了仔猪肠道微生态。赖星等人^[56]证明,绿原酸能维持断奶仔猪肠道微生物区系的多样性。张

美英等人^[57]发现, 日粮中添加山楂提取物能显著降低肠道大肠杆菌的数量, 对乳酸杆菌等有益菌的增殖有促进作用。可见, 多种植物多酚都能有效调节肠道微生态, 保持肠道微生物区系的平衡, 保护畜禽肠道健康。

3.3 肠道免疫调节

多种植物多酚可以调节机体免疫能力, 促进免疫细胞和免疫器官发挥免疫作用。饲喂小鼠绿茶粉可修复其肠道屏障, 增强免疫应激小鼠的体液免疫, 从而减轻肠道炎症, 达到保护肠道的作用^[58]。研究表明, 姜黄素可通过提高机体免疫器官指数以及免疫因子水平而改善机体免疫性能^[59]。王海良等人^[60]研究发现, 在日粮中添加橙皮苷, 肉鸡的胸腺、脾脏和法氏囊指数均高于对照组, 橙皮苷在一定程度上可以促进免疫器官的生长。Ren等人^[61]报道, 注射绿原酸能促进小鼠脾脏和胸腺细胞的增殖。Wu等人^[62]研究表明, 从金银花中提取的绿原酸能通过激活神经钙蛋白, 显著增强巨噬细胞功能。白芦藜醇通常作用于白细胞、腹腔巨噬细胞以及淋巴细胞等免疫细胞, 从而发挥免疫调节功能^[63]。综上所述, 多种植物多酚都具有良好的免疫活性, 可以改善畜禽的免疫性能, 维持畜禽的机体健康, 进而保证畜禽的肠道健康。

3.4 肠道消化吸收调节

多种植物多酚可以增强机体胃肠道的消化功能, 促进消化液的分泌, 增加消化酶的活性, 从而加速肠道对营养物质的消化吸收。林成招等人^[64]发现, 大豆异黄酮可以促进大鼠小肠细胞生长以及离体小肠对葡萄糖的吸收。张美英等人^[57]研究发现, 日粮中添加山楂提取物能显著提高AA肉鸡的平均采食量、日增重, 提高生长后期的饲料转化率, 提高粗蛋白、钙、磷的表观消化率, 提高胰蛋白酶、胰脂肪酶、淀粉活性。孙耀贵等人^[65]报道, 日粮中添加山楂叶总黄酮可以提高肉仔鸡对营养物质的消化利用率, 提高肠道胰蛋白酶、淀粉酶活性, 降低脂肪酶活性。孙占鳌^[66]研究了黄酮成分对鸡肠道酶活性影响发现, 黄酮成分对肠道消化酶活性有显著的提高作用。李华丽^[67]的实验证明, 茶多酚降低了肉鸡小肠脂肪酶和胃蛋白酶活性, 显著提高了胰脂肪酶、胰蛋白酶活性。王宇^[68]的研究表明, 在仔猪饲料中添加绿原酸可以改善肠道形态, 增强肠

道消化酶活性。总之, 植物多酚通过多种途径促进畜禽肠道的消化吸收, 从而达到保护畜禽肠道健康的效果。

4 植物多酚对畜禽肠道健康的保护作用机制

随着研究的不断深入, 大量研究利用动物实验模型也揭示了植物多酚对与肠道健康保护作用机制。植物多酚主要调控机制包括对肠道细胞信号通路调节、肠道菌群调节、抗炎、抗氧化作用等(图1)。

4.1 肠道细胞信号通路调节作用

植物多酚可以通过调节肠道细胞相关基因表达, 控制相关蛋白的表达, 调节相关信号通路, 维持肠道细胞正常功能。染料木黄酮能够降低空肠CD4⁺细胞和肠道通透性, 增加肠道紧密连接蛋白ZO-1和Claudin-1的基因表达, 维持肠道功能^[48]。糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)作用于回肠与结肠段黏膜层的肠道L细胞, 可上调细胞GAGE受体表达, 激活NADPH氧化酶, 促进NF- κ B因子表达, 释放炎症因子并调节细胞凋亡相关蛋白的表达, 从而导致肠道细胞炎症损伤与凋亡。黄属葵花中黄酮类成分能显著调节肠细胞中AGEs/RAGE/NF- κ B信号通路, 减少肠道细胞损伤^[69]。肠道是糖代谢的主要器官, 植物多酚可以通过影响SGLT-1, Glut-2的动力学参数, 转运体的表达以及转运过程的能量消耗来影响葡萄糖的转运和吸收, 从而调控糖代谢并维持肠道健康^[70]。

4.2 菌群调节作用

植物多酚通过促进有益菌生长以及抑制有害菌来调节动物机体菌群的平衡, 从而维持肠道健康。植物多酚作为益生元的一种, 可以促进体内有益菌的代谢和增殖。茶多酚和差皂素可以增加盲肠乳酸杆菌数量^[24]; 黄烷酮柚皮素促进双歧杆菌生长^[71]; 日粮中添加绿茶末可促进肉鸡回肠和盲肠乳酸杆菌和双歧杆菌的生长^[72]; 酸樱桃浓缩汁中的多酚物质在体外诱导拟杆菌的大量增生, 绿原酸使双歧杆菌的数量增加^[73]。此外, 植物多酚也可以抑制有害菌生长和增殖。绿原酸可通过改变细胞通透性, 阻碍物质和能量代谢以及抑制蛋白合成, 共同完成对金黄色葡萄球菌的抑制作用^[74]。

图1 植物多酚对畜禽肠道健康的保护作用机制。ROS: 活性氧自由基; 图中箭头表示促进作用, T-箭头表示抑制作用

Figure 1 Protective mechanisms of plant polyphenols on intestinal health of livestock and poultry. ROS, reactive oxygen species; the arrow in the figure indicates the promotive effect, and the T-arrow indicates the inhibitive effect

茶多酚对金黄色葡萄球菌、枯草杆菌、蜡样芽胞杆菌具有抑制作用, 主要通过损伤细菌细胞膜、抑制细菌脂肪酸合成、抑制细菌酶的活性及组织细菌对黏膜上皮的结合来实现抗菌目的^[75]。在基础饲料中添加适宜剂量槲皮素可以提高蛋鸡肠道有益菌群(双歧杆菌)菌落总数, 降低有害菌群(大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、绿脓杆菌、粪链球菌、肠球菌)菌落总数, 从而发挥体内抑菌作用; 在体外, 适宜剂量的槲皮素通过影响有害菌细胞壁和细胞膜发挥抑菌作用^[76]。黄芩素通过降低*ica A*和*cid A*基因的表达量, 影响多糖细胞间黏附素(polysaccharide intercellular adhesion, PIA)的合成和胞外DNA(extracellular DNA, eDNA)的释放, 从而抑制金黄色葡萄球菌生物被膜的形成^[77]。绿原酸和异绿原酸可以破坏细菌细胞壁和细胞膜, 使细菌通透性增加, 导致细菌核苷酸、酶内容物外泄, 从而影响蛋白质合成, 达到对大肠杆菌的抑菌效果^[78]。植物多酚通过对肠道菌群的调节, 保持肠道微生态系统平衡, 维持肠道健康水平。

4.3 抗炎作用

植物多酚利用其氧化活性抑制炎症信号通路的酶活性和蛋白表达, 从而具有抗炎活性。炎症由多种细胞因子调控, 包括炎症细胞因子和促炎细胞因子。花青素可以抑制肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白细胞介素(IL-6, IL-8和IL-1 β)等促炎细胞因子的表达从而发挥抗炎作用, 还可以通过抑制NF- κ B信号通路阻止促炎细胞因子的过度表达调节炎症反应, 此外, 还可以体外抑制iNOS的表达活性, 从而减轻NO过度产生引起的促炎作用^[79]。Peng等人^[80]研究了从黑枸杞中提取的原花青素(anthocyanins, ACN)对葡聚糖硫酸钠(dextran sodium sulfate, DSS)诱导的小鼠结肠炎的治疗效果。结果表明, ACN通过减少促炎细胞因子, 抑制相关mRNA的表达(如TNF-1, IL-6, IL-1和IFN-1), 以及调节肠道微生物区系3个方面减轻了DSS诱导的小鼠结肠炎。赖星等人^[56]报道了绿原酸通过提高TGF- β 1和TNF- α 发挥抗炎作用。Zhang等人^[81]发现, 白藜芦醇可以通过降低NF- κ B信号通路的活性

和调节miRNA组成比例来发挥抗炎作用. 王光熙^[82]研究发现, 白藜芦醇通过下调促炎因子IL-1, IL-1 β , IL-6, NO, iNOS和COX2并上调抗炎因子IL-10发挥抗炎作用, 还可通过抑制基因转录和蛋白翻译来抑制TLR4通路的激活, 从而抑制NF- κ B-p65和MAPK信号通路的激活, 并通过对TLR4/NF- κ B-p65/MAPKs通路的级联抑制作用最终调节血清中促炎因子和抗炎因子的表达发挥抗炎作用. 利用植物多酚的抗炎活性, 可减少肠道细胞的损伤, 达到维持畜禽肠道健康的作用.

4.4 抗氧化作用

植物多酚因其特殊的结构而具有较强的抗氧化作用, 能够通过清除自由基、螯合金属离子、抑制氧化酶活性、保护内源抗氧化酶而起到抗氧化作用^[15]. 儿茶素B环和C环上的酚羟基有供氢体的活性, 在氧化过程中生成邻醌类及联苯酚醌. 茶多酚通过作用于与自由基有关的酶, 来抑制氧化酶活性, 增强抗氧化酶活性; 直接作用于自由基时, 自由基反应生成较为稳定的酚氧自由基, 从而失活; 也可与诱导氧化的过渡金属离子如Cu²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺等络合; 同时, 茶多酚亦可与体内其他高效抗氧化剂(如维生素C、维生素E、还原型谷胱甘肽等)协同作用, 共同发挥抗氧化功能^[83]. 大豆黄酮能增强小鼠谷胱甘肽过氧化物酶和一氧化氮合酶等抗氧化酶的活性^[84]. 刺五加茎皮中提取的黄酮有很好的抗氧化能力, 该黄酮对DPPH自由基、超氧阴离子、过氧化氢、羟基自由基和ABTS自由基有较高的清除率, 也可以提高细胞的总抗氧化能力(total anti-oxidation capacity, T-AOC)并提高过氧化物酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione per-

oxidase, GSH-Px)的活性^[85]. 饲料中添加0.4%苜蓿黄酮可显著提高总超氧化物歧化酶的活性^[86]. 过量活性氧自由基得不到及时清除会造成细胞、组织、机体的损伤, 肠道极易发生的氧化应激也会引起肠道细胞的氧化损伤, 诱导细胞炎症或凋亡反应. 利用植物多酚的抗氧化作用, 可显著降低肠道氧化应激水平, 缓解肠道炎症, 进而保护畜禽的肠道健康.

5 总结与展望

植物多酚具有多种多样的生物活性, 除上述提到的各种生物活性外, 还具有抗病毒、抗热应激、免疫增强等作用, 在畜禽养殖业中具有极大的应用前景, 可用于饲料添加剂以及药物治疗甚至更多样化的应用. 植物多酚的来源范围广、种类多样, 随着植物多酚提取纯化技术的进步, 其开发和应用空间会越来越广阔. 但是目前对植物多酚的研究仍存在不足之处: (i) 从植物中提取出来的多酚化合物成分复杂, 难以确定其中具体物质的实际作用; (ii) 规模生产的植物多酚产品不多, 植物多酚在畜禽养殖业中难以得到广泛应用; (iii) 植物多酚在抗生素替代方面的机制研究少, 还不够深入.

肠道健康对畜禽生长、免疫乃至繁殖性能至关重要. 在未来的研究中, 需以植物多酚对于肠道的保护作用为出发点, 有针对性地提高植物多酚的分离纯化技术, 同时进行更多的标准化实验对其功效加以验证, 并利用现代生物技术对植物多酚的肠道保护作用机制进行更加深入的研究. 更多更深入的研究将为植物多酚作为抗生素的替代物在畜禽养殖业中的广泛应用奠定基础.

致谢 感谢四川铁骑力士实业有限公司的支持.

参考文献

- 1 Ding J, Hu Y, Shao D. Advance in the regulation of antibiotic growth promoters on intestinal barrier function of livestock (in Chinese). *Chin J Anim Sci*, 2019, 55: 47–52 [丁健, 胡艳, 邵丹. 抗生素类生长促进剂对畜禽肠道屏障功能的调节研究进展. *中国畜牧杂志*, 2019, 55: 47–52]
- 2 Lillehoj H, Liu Y, Calsamiglia S, et al. Phytochemicals as antibiotic alternatives to promote growth and enhance host health. *Vet Res*, 2018, 49: 76
- 3 Liu J Q, Wu H C, Ren W K, et al. Regulation of development of central nervous system and related diseases by gut microflora (in Chinese). *Sci*

- [Sin Vitae](#), 2020, 50: 329–337 [刘家奇, 武琬琮, 任文凯, 等. 肠道微生物菌群调节中枢神经系统发育及相关疾病的研究进展. 中国科学: 生命科学, 2020, 50: 329–337]
- 4 Wang T W, Teng K L, Liu G, et al. The functions and mechanisms of microecological agents in weaning piglet intestine (in Chinese). [Sci Sin Vitae](#), 2019, 49: 97–107 [王天威, 滕坤玲, 刘刚, 等. 微生态制剂对断奶仔猪肠道健康的影响及作用机制. 中国科学: 生命科学, 2019, 49: 97–107]
 - 5 Lee M T, Lin W C, Yu B, et al. Antioxidant capacity of phytochemicals and their potential effects on oxidative status in animals—A review. [Asian-Australas J Anim Sci](#), 2017, 30: 299–308
 - 6 Geng D, Fang M Y, Li D L, et al. Research progress in terms of interaction between Chinese medicine components and intestinal microenvironment (in Chinese). [Sci Sin Vitae](#), 2018, 48: 379–389 [賡迪, 方明月, 李德利, 等. 中药与肠道微环境相互作用研究进展. 中国科学: 生命科学, 2018, 48: 379–389]
 - 7 Surai P F. Polyphenol compounds in the chicken/animal diet: from the past to the future. [J Anim Physiol Anim Nutr](#), 2014, 98: 19–31
 - 8 Gessner D K, Ringseis R, Eder K. Potential of plant polyphenols to combat oxidative stress and inflammatory processes in farm animals. [J Anim Physiol Anim Nutr](#), 2017, 101: 605–628
 - 9 Theodorou M K, Kingston-Smith A H, Winters A L, et al. Polyphenols and their influence on gut function and health in ruminants: a review. [Environ Chem Lett](#), 2006, 4: 121–126
 - 10 Durazzo A, Lucarini M, Souto E B, et al. Polyphenols: A concise overview on the chemistry, occurrence, and human health. [Phytother Res](#), 2019, 33: 2221–2243
 - 11 Hossen I, Hua W, Ting L, et al. Phytochemicals and inflammatory bowel disease: A review. [Crit Rev Food Sci Nutr](#), 2020, 60: 1321–1345
 - 12 Bate-Smith E C. The contribution of phenolic substances to quality in plant products. [Plant Food Hum Nutr](#), 1958, 3: 440–455
 - 13 Wang S, Ren D D, Wu Z, et al. Research progress on polyphenols and its application in aquatic products preservation (in Chinese). [J Food Safe Qual](#), 2019, 10: 7200–7206 [王帅, 任丹丹, 吴哲, 等. 多酚类化合物及其在水产品保鲜中的应用研究进展. 食品安全质量检测学报, 2019, 10: 7200–7206]
 - 14 Haslam E, Lilley T H, Cai Y, et al. Traditional herbal medicines—The role of polyphenols. [Planta Med](#), 1989, 55: 1–8
 - 15 Huang L, Ding B. Antioxidant mechanism of plant polyphenols and its application in animal production (in Chinese). [China Anim Husbandry Vet Med](#), 2018, 45: 2471–2477 [黄莉, 丁波. 植物多酚的抗氧化机理及其在动物生产中的应用. 中国畜牧兽医, 2018, 45: 2471–2477]
 - 16 Tian Z M, Cui Y Y, Du Z L, et al. Advances in researches and applications of antibiotic alternatives in livestock breeding (in Chinese). [Chin J Anim Nutr](#), 2020, 32: 1516–1525 [田志梅, 崔艺燕, 杜宗亮, 等. 抗生素替代物在畜禽养殖中的研究及应用进展. 动物营养学报, 2020, 32: 1516–1525]
 - 17 Williamson G. The role of polyphenols in modern nutrition. [Nutr Bull](#), 2017, 42: 226–235
 - 18 Liang J, Yan H, Puligundla P, et al. Applications of chitosan nanoparticles to enhance absorption and bioavailability of tea polyphenols: A review. [Food Hydrocolloid](#), 2017, 69: 286–292
 - 19 Chao Y M, Chen D W, Yu B, et al. Effects of tea polyphenol on growth performance, antioxidant capacity, carcass performance and meat quality of finishing pigs (in Chinese). [Chin J Anim Nutr](#), 2016, 28: 3996–4005 [晁娅梅, 陈代文, 余冰, 等. 茶多酚对育肥猪生长性能、抗氧化能力、胴体品质和肉品质的影响. 动物营养学报, 2016, 28: 3996–4005]
 - 20 Chen J J. Effects of dietary supplementation of tea polyphenols on vitamin E status, antioxidant capacity and meat quality of growing pigs (in Chinese). [China Feed](#), 2019, 4: 55–58 [陈君君. 茶多酚对生长猪机体维生素E状态、抗氧化性能及肉质的影响. 中国饲料, 2019, 4: 55–58]
 - 21 Wei C. Studies on the effects of gallic acid and condensed tannin on rumen fermentation and nutrient digestion, methane production and nitrogen metabolism in beef cattle *in vitro* (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2017 [魏晨. 没食子酸和缩合单宁对体外瘤胃发酵及肉牛营养物质消化、甲烷产量和氮代谢影响的研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017]
 - 22 Di L F. Effect of feed cellulase and tannin on the performance of meat Hu sheep (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Yanji: Yanbian University, 2018 [邸凌峰. 饲用纤维素酶与单宁对肉用湖羊生产性能的影响. 硕士学位论文. 延吉: 延边大学, 2018]
 - 23 Zhang H J, Xu L, Yue H Y, et al. Effect of grape procyanidins on growth performance and immune function in broilers (in Chinese). [China Anim Husbandry Vet Med](#), 2012, 39: 99–103 [张海军, 徐磊, 岳洪源, 等. 葡萄多酚对肉鸡生产性能和免疫机能的影响. 中国畜牧兽医, 2012, 39: 99–103]
 - 24 He M X, Cai H Y, Mao Y. Effects of tea polyphenols and saponin on growth performance, intestinal microflora and antioxidant function of broilers with coccidian challenge (in Chinese). [J Yangzhou Univ \(Agric Life Sci Ed\)](#), 2017, 38: 32–39 [何梦晓, 蔡海莹, 毛悦. 茶多酚和茶皂素

- 对感染鸡球虫肉仔鸡的生长性能、肠道微生物和抗氧化性能的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38: 32–39]
- 25 Zhou Y. Eucommia ulmoides polyphenols extract pork quality and chlorogenic acid relieve liver-intestinal damage (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanchang: Nanchang University, 2015 [周艳. 杜仲叶多酚提取物对猪肉品质及绿原酸缓解肝-肠损伤研究. 博士学位论文. 南昌: 南昌大学, 2015]
- 26 Zhou Y, Ruan Z, Li X L, et al. Eucommia ulmoides olive leaf polyphenol supplementation improves meat quality and regulates myofiber type in finishing pigs. *J Anim Sci*, 2016, 94: 164–168
- 27 Liu Z X. Effects of bamboo vinegar powder on production performance, immune function and intestinal microflora of weaned piglets (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Yangzhou: Yangzhou University, 2016 [刘正旭. 竹酢粉对断奶仔猪生产性能、免疫机能及肠道微生物区系的影响. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学, 2016]
- 28 Wu R. Research progress of oregano oil (in Chinese). *Feed Ind*, 2019, 40: 1–4 [武瑞. 牛至油研究进展. 饲料工业, 2019, 40: 1–4]
- 29 Han Q G, Song Y Y, Cui Y H, et al. Effects of oregano oil on the performance, serum antibody and fecal microbe of piglet (in Chinese). *J Henan Agric Sci*, 2016, 45: 113–117 [韩庆功, 宋云义, 崔艳红, 等. 牛至油对仔猪生产性能、抗体水平及粪便微生物的影响. 河南农业科学, 2016, 45: 113–117]
- 30 Hu X R. Study on therapeutic effect of Huangqin injection on swine edema disease (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changchun: Jili University, 2014 [胡汐柔. 黄芩注射液对猪水肿病的治疗作用研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2014]
- 31 Hu Y Q, Ren Y F, Fang Z. Clinical differential diagnosis of transmissible gastroenteritis in pigs (in Chinese). *Chin J Anim Husbandry Vet Med*, 2019, 10: 133 [胡永倩, 任钰峰, 方珍. 猪传染性胃肠炎的临床鉴别诊断. 畜牧兽医科技信息, 2019, 10: 133]
- 32 Jin X Z, He L, Cheng X C, et al. Effect of six Chinese traditional medicine components on inhibiting swine transmissible gastroenteritis virus *in vitro* (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 2234–2244 [金修哲, 何雷, 程相朝, 等. 6种中药成分对猪传染性胃肠炎病毒的体外抑制作用. 中国农业科学, 2016, 49: 2234–2244]
- 33 Lei Y D, Chen S S, Zhao X Y, et al. Preparation and anti-TGEV activity of anthocyanin from purple sweet potato (in Chinese). *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33: 349–352 [雷用东, 陈姗姗, 赵晓燕, 等. 紫甘薯花色苷制备及其抗猪传染性胃肠炎病毒(TGEV)活性的研究. 食品工业科技, 2012, 33: 349–352]
- 34 Lei Y D, Wang D, Tong J M, et al. The anthocyanin profiles from *Sambucus williamsii* Hance and analysis of its anti-transmissible gastroenteritis virus (TGEV) activity (in Chinese). *J Agric Biotechnol*, 2013, 21: 1185–1192 [雷用东, 王丹, 童军茂, 等. 接骨木花色苷组成及抗猪传染性胃肠炎病毒(TGEV)活性分析. 农业生物技术学报, 2013, 21: 1185–1192]
- 35 Lei Y D, Wei X L, Luo X L, et al. Analysis of the anthocyanin profiles and anti-TGEV activity from purple cabbage (in Chinese). *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36: 95–98 [雷用东, 魏向利, 罗小玲, 等. 紫甘蓝花色苷组成及抗猪传染性胃肠炎病毒活性分析. 食品工业科技, 2015, 36: 95–98]
- 36 Huang C, Wang Y, He X, et al. The involvement of NF- κ B/P38 pathways in *Scutellaria baicalensis* extracts attenuating of *Escherichia coli* K88-induced acute intestinal injury in weaned piglets. *Br J Nutr*, 2019, 122: 152–161
- 37 Xu Y H. Study on the effect of fermented purslane on the prevention and treatment of chicken diarrhea and intestinal flora (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018 [徐亚慧. 马齿苋发酵物对雏鸡白痢的防治及肠道菌群的影响研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学, 2018]
- 38 Liu Z Z, Deng X M, Wang J F. Therapeutic effect of glycyrrhiza flavonoid on necrotic enteritis caused by *Clostridium perfringens* (in Chinese). *Chin J Vet Sci*, 2019, 39: 716–721 [刘宗争, 邓旭明, 王建锋. 甘草总黄酮对鸡产气荚膜梭菌坏死性肠炎的治疗作用. 中国兽医学报, 2019, 39: 716–721]
- 39 Dong C X, Zhang J L, Guo X F, et al. Advances in research on the effects of tannins on ruminant production performance, rumen fermentation and microflora (in Chinese). *Acta Vet et Zoo Sin*, 2020, 51: 234–242 [董春晓, 张金龙, 郭晓飞, 等. 单宁对反刍动物生产性能、瘤胃发酵及微生物区系影响的研究进展. 畜牧兽医学报, 2020, 51: 234–242]
- 40 Wei C, You W, Zhang X L, et al. Bioactivity and application in ruminant of tannins (in Chinese). *China Feed*, 2019, 3: 10–13 [魏晨, 游伟, 张相伦, 等. 单宁的生物活性及其在反刍动物生产中的应用. 中国饲料, 2019, 3: 10–13]
- 41 Yang C T. Effects of *Candida tropicalis* and mulberry leaf flavonoids on calf growth and gastrointestinal development (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 [杨春涛. 热带假丝酵母与桑叶黄酮对犊牛生长和胃肠道发育的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2016]
- 42 Xiao F, Shen F, Yu X, et al. Effects of soy isoflavones on growth performance and diarrhea of *Holstein calves* (in Chinese). *Feed Ind*, 2019, 40:

- 39–44 [肖凡, 沈菲, 余雄, 等. 饲喂大豆异黄酮对荷斯坦犊牛生长性能及腹泻的影响. 饲料工业, 2019, 40: 39–44]
- 43 Zhang Z W, Li L, Hua W L, et al. Research progress of soy isoflavones application in sheep production (in Chinese). *Feed Rev*, 2011, 10: 24–26 [张振伟, 李俐, 花万里, 等. 大豆异黄酮在养羊生产中的研究进展. 饲料博览, 2011, 10: 24–26]
- 44 Ren H W. Effect of different doses of daidzein on rumen metabolism and immunity of small-tailed Han sheep (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. HarBin: Northeast Agricultural University, 2016 [任皓威. 不同剂量大豆黄酮对小尾寒羊瘤胃代谢及免疫的影响. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016]
- 45 He S S. Protective effect and mechanism of ferulic acid on intestinal mucosal barrier injury in heat stress rats (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2016 [何莎莎. 阿魏酸对热应激大鼠小肠黏膜屏障损伤的保护作用及机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2016]
- 46 Huang J, Yin H C, Zhang Y, et al. Regulation of resveratrol on intestinal mucosal barrier function based on TGF- β signaling pathway (in Chinese). *Feed Res*, 2019, 42: 112–114 [黄进, 殷海成, 张勇, 等. 白藜芦醇通过TGF- β 信号通路对肠黏膜屏障功能的调控. 饲料研究, 2019, 42: 112–114]
- 47 Zhao W, Huang X, Han X, et al. Resveratrol suppresses gut-derived NLRP3 inflammasome partly through stabilizing mast cells in a rat model. *Mediators Inflamm*, 2018, 2018: 1–10
- 48 Zhang M. Protective effect and mechanism of genistein on *Escherichia coli* challenged broilers (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2018 [张明. 染料木黄酮对大肠杆菌攻毒肉鸡的保护作用及机理. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2018]
- 49 Xi J, Ge S T, Zuo L G, et al. Protective role of green tea polyphenols in intestinal mucosal barrier function of mice with colitis induced by TNBS through inhibiting JAK2/STAT3 pathway (in Chinese). *Chin J Cell Mol Immunol*, 2018, 34: 237–241 [席进, 葛思堂, 左芦根, 等. 绿茶多酚抑制肠道JAK2/STAT3信号通路保护三硝基苯磺酸诱导的小鼠结肠炎肠黏膜屏障. 细胞与分子免疫学杂志, 2018, 34: 237–241]
- 50 Feng D, Zou J, Su D, et al. Curcumin prevents high-fat diet-induced hepatic steatosis in ApoE^{-/-} mice by improving intestinal barrier function and reducing endotoxin and liver TLR4/NF- κ B inflammation. *Nutr Metab (Lond)*, 2019, 16: 79
- 51 Ma X W, Lu L Z, Zou X T. Relationship between intestinal microecology and immunity in poultry (in Chinese). *China Poultry*, 2019, 41: 42–46 [马晓汶, 卢立志, 邹晓庭. 家禽肠道微生态与免疫的关系. 中国家禽, 2019, 41: 42–46]
- 52 Kemperman R A, Gross G, Mondot S, et al. Impact of polyphenols from black tea and red wine/grape juice on a gut model microbiome. *Food Res Int*, 2013, 53: 659–669
- 53 Zhao Y, Zhang X. Interactions of tea polyphenols with intestinal microbiota and their implication for anti-obesity. *J Sci Food Agric*, 2020, 100: 897–903
- 54 Li D H. Effects of tea polyphenols on intestinal microecology of broilers infected with coccidiosis and its mechanism (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015 [李登辉. 茶多酚对感染球虫肉鸡肠道微生态影响及其作用机理研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学, 2015]
- 55 He M X. Effects of summer and autumn tea powder on intestinal microecology and fat metabolism of piglets (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017 [何梦晓. 夏秋茶叶粉对仔猪肠道微生态和脂肪代谢的影响. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学, 2017]
- 56 Lai X, Chen Q J, Lu C W, et al. The effects of dietary chlorogenic acid and hesperidin on growth performance and intestinal function in weaned piglets (in Chinese). *Acta Vet et Zoo Sin*, 2019, 50: 570–580 [赖星, 陈庆菊, 卢昌文, 等. 日粮添加绿原酸和橙皮苷对断奶仔猪生长性能与肠道功能的影响. 畜牧兽医学报, 2019, 50: 570–580]
- 57 Zhang M Y, Sun Y G, Fan W N, et al. Effects of hawthorn extract on growth performance and intestinal microflora of broilers (in Chinese). *Acta Agric Boreali-occidit Sin*, 2009, 18: 52–55+146 [张美英, 孙永刚, 樊文娜, 等. 山楂提取物对肉鸡生产性能及肠道微生物的影响. 西北农业学报, 2009, 18: 52–55+146]
- 58 Wang Y H, Bai C X, Yang K K, et al. Mechanism of green tea powder improving intestinal barrier of immune stressed mice (in Chinese). *Acta Agric Boreali-Sin*, 2019, 34: 136–142 [王元红, 白彩霞, 杨侃侃, 等. 绿茶粉改善免疫应激小鼠肠道屏障的作用机制. 华北农学报, 2019, 34: 136–142]
- 59 Chen H. Mechanism of green tea powder improving intestinal barrier of immune stressed mice (in Chinese). *Swine Prod*, 2019, 6: 25–30 [陈辉. 姜黄素的生物学功能及其在养猪生产中的应用. 养猪, 2019, 6: 25–30]
- 60 Wang H L, Cui H, Lv H Y, et al. Effects of hesperidin on the performance of broiler production, slaughter performance and immune function (in

- Chinese). *Chin J Anim Sci*, 2013, 49: 57–60 [王海良, 崔虎, 吕慧源, 等. 橙皮苷对肉仔鸡生产性能、屠宰性能及免疫机能的影响. 中国畜牧杂志, 2013, 49: 57–60]
- 61 Ren S, Wu M, Guo J, et al. Sterilization of polydimethylsiloxane surface with Chinese herb extract: a new antibiotic mechanism of chlorogenic acid. *Sci Rep*, 2015, 5: 10464
- 62 Wu H Z, Luo J, Yin Y X, et al. Effects of chlorogenic acid, an active compound activating calcineurin, purified from *Flos Lonicerae* on macrophage. *Acta Pharmacol Sin*, 2004, 25: 1685–1689
- 63 Ma Y J, He R X, Yang L, et al. The biological function of resveratrol and its application in animal production (in Chinese). *China Anim Husbandry Vet Med*, 2019, 46: 3234–3243 [马玉静, 何荣香, 杨玲, 等. 白藜芦醇的生物学功能及其在动物生产中的应用. 中国畜牧兽医, 2019, 46: 3234–3243]
- 64 Lin C Z, Ma H T, Zou S X, et al. Effects of soybean isoflavone on the growth of the rat epithelial cell and absorption of glucose and amino acids of small intestine (in Chinese). *J Nanjing Agric Univ*, 2005, 1: 71–75 [林成招, 马海田, 邹思湘, 等. 大豆异黄酮对大鼠小肠上皮细胞生长及葡萄糖和氨基酸吸收的影响. 南京农业大学学报, 2005, 1: 71–75]
- 65 Sun Y G, Zhang X J, Cheng J, et al. Effects of two Chinese medicinal ingredients on growth performance, digestive utilization ratios of nutrients, digestive enzyme activity and intestinal bacterial in broilers (in Chinese). *China Anim Husbandry Vet Med*, 2013, 40: 93–98 [孙耀贵, 张向杰, 程佳, 等. 2种中药成分对肉鸡生产性能、营养物质消化利用率、肠道消化酶活性和肠道菌群的影响. 中国畜牧兽医, 2013, 40: 93–98]
- 66 Sun Z A. Study on the pharmacological effects of compound flavonoids and enteric coated microcapsules of traditional Chinese medicine (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 [孙占鳌. 中药黄酮成分复方及其肠溶微囊的药理作用研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2013]
- 67 Li H L. Effects of lactic acid bacteria and tea polyphenols on physiological and biochemical performance and immune function of broilers (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015 [李华丽. 乳酸菌与茶多酚对肉鸡生理生化性能及免疫机能的研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学, 2015]
- 68 Wang Y. Effects of chlorogenic acid on performance, intestinal health and antioxidant capacity of weaned piglets (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017 [王宇. 绿原酸对断奶仔猪生产性能、肠道健康及抗氧化能力的影响. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学, 2017]
- 69 Cai H S, Su S L, Tao W W, et al. Regulation of flavonoids from *Abelmoschus manihot* on AGEs/RAGE/p38MAPK/NF- κ B signal pathway in GLUTag cells (in Chinese). *Chin Pharmacol Bull*, 2017, 33: 798–805 [蔡红蝶, 宿树兰, 陶伟伟, 等. 黄蜀葵花中5种黄酮类化合物对肠道L细胞 AGEs/RAGE/p38MAPK/NF- κ B信号通路的调节作用. 中国药理学通报, 2017, 33: 798–805]
- 70 Song Z, Wang Z. Impact of dietary polyphenols on sugar absorption and metabolism in gut (in Chinese). *Food Nutr China*, 2014, 20: 64–68 [宋卓, 王征. 食物多酚对肠道糖吸收与代谢的影响. 中国食物与营养, 2014, 20: 64–68]
- 71 Firman J, Liu L S, Argoty G A, et al. Analysis of temporal changes in growth and gene expression for commensal gut microbes in response to the polyphenol naringenin. *Microbiol Insights*, 2018, 11: 117863611877510
- 72 Huang Q C. Effects of green tea on growth and development, meat quality and intestinal microflora structure of broilers (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017 [黄全成. 绿茶对肉仔鸡生长发育、肉品质和肠道菌群结构的影响. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学, 2017]
- 73 Mayta-Apaza A C, Pottgen E, De Bodt J, et al. Impact of tart cherries polyphenols on the human gut microbiota and phenolic metabolites *in vitro* and *in vivo*. *J Nutr Biochem*, 2018, 59: 160–172
- 74 Luo Y C, Huang Li M, Yang Y, et al. Study on the mechanism of chlorogenic acid inhibiting *Staphylococcus aureus* (in Chinese). *J Southwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 38: 15–19 [罗艺晨, 黄利明, 杨颖, 等. 绿原酸抑制金黄色葡萄球菌机理研究. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38: 15–19]
- 75 Chen M, He M. Research progress in antibacterial activity of tea polyphenols (in Chinese). *Feed Res*, 2015, 22: 10–12 [陈敏, 何敏. 茶多酚抗菌作用研究进展. 饲料研究, 2015, 22: 10–12]
- 76 Teng N. *In vitro* and *in vitro* study of quercetin's antibacterial effect (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. HarBin: Northeast Agricultural University, 2015 [滕楠. 槲皮素抑菌作用的体内和体外研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015]
- 77 Zhang M J, Xie M J. Inhibition of *Staphylococcus aureus* biofilm by baicalein (in Chinese). *Chin J Biochem Mol Biol*, 2018, 34: 334–340 [张沼嘉, 谢明杰. 黄芩素抑制金黄色葡萄球菌生物被膜的形成. 中国生物化学与分子生物学报, 2018, 34: 334–340]
- 78 Zhou Z E, Luo Q S, Xiong J H, et al. Antimicrobial mechanisms of 3-O-caffeoyl quinic acid and 3, 5-di-O-caffeoyl quinic acid against

- Escherichia coli* (in Chinese). Food Sci Technol, 2014, 39: 228–232 [周志娥, 罗秋水, 熊建华, 等. 绿原酸、异绿原酸A对大肠杆菌的抑菌机制. 食品科技, 2014, 39: 228–232]
- 79 Vendrame S, Klimis-Zacas D. Anti-inflammatory effect of anthocyanins via modulation of nuclear factor- κ B and mitogen-activated protein kinase signaling cascades. *Nutr Rev*, 2015, 73: 348–358
- 80 Peng Y, Yan Y, Wan P, et al. Gut microbiota modulation and anti-inflammatory properties of anthocyanins from the fruits of *Lycium ruthenicum* Murray in dextran sodium sulfate-induced colitis in mice. *Free Radic Biol Med*, 2019, 136: 96–108
- 81 Zhang C Y, Huang J, Kang X T. Resveratrol attenuates LPS-induced apoptosis via inhibiting NF- κ B activity in chicken peripheral lymphocyte cultures. *Braz J Poult Sci*, 2018, 20: 747–752
- 82 Wang G X. Anti-inflammatory effect of resveratrol and it mitigates lipopolysaccharide-mediated acute inflammation in rats by inhibiting the TLR4/NF- κ Bp65/MAPKs signaling cascade (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017 [王光照. 白藜芦醇的抗炎活性及其介TLR4/NF- κ Bp65/MAPKs信号通路发挥抗炎效应的机制研究. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学, 2017]
- 83 Wang J L. Effects of tea polyphenols and VC on antioxidant and immune performance of broilers (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008 [王吉磊. 茶多酚和VC对肉仔鸡抗氧化性能和免疫性能的影响. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008]
- 84 Shan Q, Cai J L, Mao Z, et al. Regulation of daidzein on activity level of three oxidases in mice's brain tissue (in Chinese). *J Jiangsu Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2005, 2: 71–73 [单群, 才金玲, 毛缙, 等. 大豆黄酮对衰老小鼠脑组织3种氧化酶水平的调节. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2005, 2: 71–73]
- 85 Gao T. Study on extraction of flavonoids from the stem bark of *Acanthopanax senticosus* and its antioxidant function (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Liaocheng: Liaocheng University, 2018 [高腾. 刺五加茎皮中黄酮的提取及其抗氧化功能研究. 硕士学位论文. 聊城: 聊城大学, 2018]
- 86 Qu G. Effects of alfalfa meal and alfalfa flavonoids on growth performance, immunity and antioxidant performance, colonic microflora of weaned piglets (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018 [曲根. 苜蓿草粉和苜蓿黄酮对断奶仔猪生长性能、免疫及抗氧化性能、结肠微生物区系的影响. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学, 2018]

Research advances on the beneficial effects of plant polyphenols on intestinal health in farm animals

WEN Qiu, YANG RuiRui & JIN XiaoLu

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

Intestinal diseases cause huge economic losses in farm animals, and the gut health of livestock and poultry is of great significance for livestock and poultry breeding. The traditional treatment of livestock and poultry involved large-scale use of antibiotics and led to antibiotic abuse. The replacement of antibiotics is an industrial demand, and plant polyphenols, as one of the non-toxic side effects and residues of antibiotics, have wide applications in livestock and poultry production and diseases. As a non-traditional nutrient with many advantages, plant polyphenols have great potential and great research value. This article summarizes research advances on the beneficial effects of plant polyphenols on intestinal health in farm animals from three aspects: the application of plant polyphenols as antibiotic substitutes in livestock and poultry production, the protective effects of plant polyphenols on the intestinal tract of livestock and poultry, and the protective mechanism.

plant polyphenols, replacement of antibiotics, livestock and poultry, gut

doi: [10.1360/SSV-2020-0046](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0046)