

植物活性多糖的生理功效及其在反刍动物生产中的应用研究进展

李海源^{1,2}, 李俊³, 何利梅^{1,2}, 崔博^{1,2}, 柏雪^{1,2*}

(1. 西南民族大学畜牧兽医学院, 成都 610041; 2. 动物科学国家民委重点实验室, 成都 610041;
3. 中国农业科学研究院饲料研究所, 北京 100081)

摘要: 植物活性多糖作为饲料添加剂, 因具有来源广泛、安全高效、无毒副作用、生物活性作用效果突出的特点而备受关注。它不仅可以增强机体免疫力、抗氧化、抗肿瘤、抗病毒、降血脂, 还可以提高反刍动物的生长性能、改善瘤胃发酵模式、维持肠道微生态平衡、提高精液保存效果、增强疫苗免疫活性、缓解机体免疫应激。本文主要阐述了植物活性多糖的生物学功能及其作用机制, 综述了近些年其在反刍动物安全生产中的应用, 并对其应用前景进行展望, 以期植物活性多糖在反刍动物安全生产方面的理论研究及进一步应用提供参考。

关键词: 植物活性多糖; 生物学功能; 反刍动物; 瘤胃发酵; 免疫; 肠道菌群

Physiological function of plant active polysaccharides and research progress on its application in ruminant production

LI Hai-Yuan^{1,2}, LI Jun³, HE Li-Mei^{1,2}, CUI Bo^{1,2}, BAI Xue^{1,2*}

(1. College of Animal and Veterinary Sciences, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Animal Science of National Civil Affairs Commission, Chengdu 610041, China; 3. Feed Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Plant active polysaccharides, as feed additives, have attracted much attention because of their extensive sources, safety and high efficiency, non-toxic side effects and outstanding biological activity effect. It can not only enhance immunity, anti-oxidation, anti-tumor, anti-virus, and reduce blood lipid, but also improve growth performance of ruminants, improve rumen fermentation mode, maintain intestinal microecological balance, improve semen preservation effect, enhance vaccine immune activity, and relieve immune stress. This paper expounded the biological function and mechanism of plant active polysaccharides, and reviewed the application of plant active polysaccharides in ruminant safety production in recent years, and prospected its application prospect, in order to provide reference for theoretical research and further application of plant active polysaccharides in ruminant production safety.

KEY WORDS: plant active polysaccharides; biological functions; ruminants; rumen fermentation; immunity; intestinal flora

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2020YFN0068)、农业农村部 2020 年饲料质量安全风险预警监测计划

Fund: Supported by the Key Research and Development Project of Sichuan Provincial Science and Technology Plan (2020YFN0068), and the 2020 Feed Quality and Safety Risk Early Warning and Monitoring Plan of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs

*通信作者: 柏雪, 博士, 副研究员, 主要研究方向为饲料及畜产品安全。E-mail: baixue@swun.edu.cn

*Corresponding author: BAI Xue, Ph.D, Associate Professor, College of Animal and Veterinary Sciences, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China. E-mail: baixue@swun.edu.cn

0 引言

抗生素的大量使用带来的药物残留和耐药性等问题日益凸显,严重威胁畜禽产品安全及消费者健康。高效、安全、无耐药性、无残留的抗生素替代品的研究开发已成为热点^[1]。植物活性多糖作为抗生素替代品的一种,是由醛糖和酮糖通过糖苷键连接而成的一类高分子化合物^[2]。大量研究结果表明,植物活性多糖具有提高动物生长性能^[3]、增强免疫功能^[4]、抗氧化^[5]、抗病毒^[6]、抗菌^[7]、调节肠道菌群^[8]等多种生理活性功能,目前通常作为饲料添加剂被广泛应用于畜牧生产中。本文通过对植物活性多糖的生物学功能及其在反刍动物生产中的应用进行综述,以期对植物活性多糖在反刍动物安全生产方面的理论研究及其进一步应用提供参考。

1 植物活性多糖的生物学功能

1.1 调节免疫

免疫功能的强弱对生物机体的健康起着至关重要的作用。而植物活性多糖具有显著的免疫调节作用,它能够通过有效调节免疫释放因子和免疫细胞,来调节免疫功能。植物活性多糖发挥免疫调节作用主要从以下几条途径:

其一,通过促进免疫器官的生长发育,来提高免疫力;其二,激活巨噬细胞并增强其吞噬活性;其三,激活淋巴细胞,并促进 T、B 淋巴细胞的增殖分化和抗体的分泌,进而增强肿瘤坏死因子(tumor necrosis factor- α , TNF- α)、重组人白细胞介素-1 β (human IL-1 beta protein, IL-1 β)、 γ -干扰素(interferon γ , IFN- γ)等细胞因子的分泌;其四,有效抑制机体释放促炎因子;其五,激活补体系统,协同抗体或吞噬细胞来杀灭病原微生物,同时活化自然杀伤细胞,并提高杀伤活性。时菲菲等^[9]研究表明,在氢化可的松的免疫抑制模型中,党参多糖可提高免疫器官指数,增强单核巨噬细胞吞噬能力,显著提高血清中的 TNF- α 、IFN- γ 、白细胞介素-2 (interleukin-2, IL-2)、白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-10 (interleukin-10, IL-10)、白细胞介素-12 (interleukin-12, IL-12)细胞因子含量。WANG 等^[10]研究表明,在断奶仔猪的日粮中添加黄芪多糖和人参多糖,均可上调 TNF- α 、IL-6 的基因表达,快速激活 Toll 样受体 4 (toll like receptor 4, TLR4)通路上的相关基因的表达,进而提高免疫功能。陈广勇等^[11]研究发现,黄芪多糖可缓解由脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)刺激所造成的巨噬细胞 TLR4、髓样分化因子(myeloid differentiation factor 88, MyD88)、核因子 κ B (nuclear factor kappa-B, NF- κ B)的 mRNA 相关表达量的升高,来降低促炎症因子 IL-1 β 和 TNF- α 的分泌,同时能够改善小鼠巨噬细胞形态,恢复细胞增殖能力。

1.2 抗氧化

在动物机体生长代谢过程中,氧化产生自由基是不可避免的。而植物多糖可通过提高抗氧化酶活性,清除羟基自由基来提高抗氧化能力。康文锦等^[12]研究发现,蒲公英多糖能显著提高小鼠血清和肝脏组织中谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性及总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC),同时也能提高肝脏组织中抗氧化基因 Mn-SOD、GPH-1 的 mRNA 相关表达量。肖传刚等^[13]研究发现,刺五加多糖和淫羊藿多糖均能不同程度上增强血清中抗氧化物质 SOD、GSH-Px、过氧化氢酶(catalase from micrococcus lysodeikticus, CAT)的活性,降低氧化物质丙二醛(malondialdehyde, MDA)的活性及含量,进而提高抗氧化能力。CHEN 等^[14]研究发现,在给免疫抑制小鼠灌胃黄梨渣多糖后,小鼠肝、肾、心组织中的 MDA 含量显著降低,而 SOD、GSH-Px、CAT 的活性显著增强。张志宏等^[15]通过使用交换树脂柱和离子交换纤维素将黄瓜子多糖进行分离得到了 33 种不同分子量的多糖 CCL-M2、CCL-M3 和 CCL-M6,然后采用体外抗氧化法对其测定发现,33 种多糖对 DPPH、羟自由基(OH $\cdot$)、超氧根离子(O $_2^{\cdot-}$)均具有一定的清除作用。

1.3 抗肿瘤

植物活性多糖发挥抗肿瘤作用主要有以下几个方面:(1)通过增强机体免疫力和抗氧化活性来抑制肿瘤细胞的生长;(2)直接作用于肿瘤细胞,抑制其增殖和分化;(3)通过影响肿瘤细胞的细胞周期来起到抗肿瘤作用。于忠芳^[16]研究表明,银杏叶多糖可作用于 PI3K/AKT/mTOR 信号通路,诱导 HepG2 细胞发生凋亡和自噬。LI 等^[17]通过研究花粉多糖对小鼠肺癌的影响,结果表明花粉多糖可通过增加 IL-6 的分泌,调节免疫功能,并将细胞周期阻滞在 G2/M 期来抑制肿瘤细胞的生长。柴军红等^[18]研究表明,在体外抗氧化实验中,五叶地锦果实多糖既能抑制 HepG2 和 SMMC-72212 中 2 种肝癌细胞的生长,同时表现出了良好的抗氧化能力,且二者之间存在着一定的相关性。李孝平等^[19]研究表明,将胃癌细胞 AGS 用不同浓度的山渣多糖提取物进行处理,多糖组较对照组相比,可显著降低 AGS 的细胞增殖率,提高胃癌细胞细胞凋亡率,并使 miR-146a-5p 的表达水平升高, β -catenin 的表达水平降低。

1.4 抗病毒

研究发现,植物活性多糖主要对免疫缺陷病毒、流感病毒、单纯疱疹病毒等具有抑制作用。其作用机制主要为:其一,调节机体免疫,并增强机体抗病毒作用;其二,阻碍病毒吸附并限制其进入细胞,同时抑制病毒的合成与增殖。杨佳等^[20]研究表明,细辛多糖可通过调节炎

症因子的分泌来调节免疫功能,并直接作用于 H1N1 病毒来抑制其活性。蒙明瑜等^[21]研究表明,剑叶耳草多糖能够明显抑制 HepG2 细胞的分泌及 DNA 的表达,从而来抑制病毒的增殖和分化。KOMATSU 等^[22]研究发现,绿藻多糖可抑制甲型流感病毒 H1N1、H2N2 和 H3N2 的表达,并阻断病毒与宿主之间的联系,进而起到抗病毒的作用。于超等^[23]通过体外实验研究表明,浒苔多糖可直接杀灭 H9N2 禽流感病毒,并抑制病毒的复制,阻断其吸附作用,进而起到抗病毒的作用。

1.5 降血脂

植物活性多糖可以通过降低血糖和血脂水平,并抑制相关脂肪酶的活性,来降低体内脂肪酸的合成与代谢,进而抑制胆固醇的生成,最终通过调节脂质代谢来降低血脂。相关研究表明,降血脂与抗氧化具有一定的相关性。崔敬爱等^[24]在 40 只 SD 大鼠的饲料中添加桦褐孔菌多糖研究其对降血脂、抗氧化损伤、肝脏保护的作用,结果发现 200 mg/kg 的桦褐孔菌多糖可以显著地降低大鼠体内的血脂水平,并抑制脂肪酸合成酶和羟甲基戊二酰辅酶 A 还原酶的活性,同时能保护肝脏损伤,并提高抗氧化酶的活性,且脂质水平的下降与抗氧化作用有关。李晓等^[25]通过给高脂血症大鼠灌胃姬松茸多糖提取物 42 d 后发现,姬松茸多糖可显著降低血清中总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)的含量,提高高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)的含量,减少肝脏内脂滴沉积;同时也可以使肝脏中低密度脂蛋白受体(low density lipoprotein receptor, LDL-R)、B 类清道夫 F (scavenger receptor class b member 1F, SCARB-1F)、胆固醇 7 α -羟化酶(cholesterol 7 α hydroxylase, CYP7 α -1)、过氧化物酶体增殖物激活受体 α (peroxisome proliferators-activated receptor- α , PPAR- α) mRNA 的表达量显著升高,并降低 SREBP-1C mRNA 的相对表达量。曾红亮^[26]以高脂饲料构建大鼠脂质代谢紊乱模型,并使用金柑多糖灌胃后发现,多糖可通过提高脂肪酶活性、降低血清中脂质水平、降低体内胆固醇含量、增强抗氧化酶的相关活性等多种途径来达到降血脂的作用。

1.6 缓解免疫应激

免疫应激的发病原因主要为动物机体在病毒或细菌的侵袭下产生免疫应激反应,致使其小肠肠黏膜通透性增加,进而引起小肠病变,并引起其他脏器受损。长期影响下,这将导致动物采食量下降,生长性能降低,死亡率升高。大量实验研究表明,植物活性多糖可通过修复小肠肠道屏障,调控肠道促炎因子,进而缓解免疫应激。韩杰等^[27]研究表明,在仔猪的饲料中添加刺五加多糖,能够显著降低由 LPS 造成的免疫应激仔猪肠黏膜的通透性,进而降低

腹泻发病率和发病症状。王雄等^[28]通过 LPS 所致免疫应激模型研究表明,牛膝多糖可通过 TLR4/NF- κ B 信号转导途径来调控促炎细胞因子的分泌,从而缓解免疫应激,低浓度牛膝多糖通过直接抑制 NF- κ B 磷酸化过程来降低免疫应激,高浓度牛膝多糖则是通过抑制 TLR4 mRNA、NF- κ B mRNA 和 NF- κ B 蛋白的表达量来缓解免疫应激。刘磊等^[29]通过脂多糖建立了肉鸡的免疫应激模型,在饲料中添加 3 g/kg 黄芪多糖可提高其平均日采食量和平均日增重;提高左侧胸肌的蛋白质沉积量和沉积率;显著抑制脾脏蛋白质沉积量和沉积率的上升,进而来缓解免疫应激。韩乾杰^[30]研究发现黄芪多糖和人参多糖可以调节仔猪肠道微生物平衡,增加肠道内挥发性脂肪酸的含量,同时增强免疫功能;调节肠道 TLR4/NF- κ B 信号通路,缓解动物体的免疫应激。

2 植物活性多糖在反刍动物生产中的应用

2.1 改善瘤胃发酵模式

在成年反刍动物的能量代谢过程中,70%的饲料消化能是以挥发性脂肪酸的形式供给的,其中乙酸和丙酸的比例直接反映了瘤胃发酵模式^[31]。包雨洪^[32]研究表明,在绵羊的日粮中添加沙葱多糖可以使其瘤胃中的氨态氮含量降低,同时可以降低乙酸和丙酸的含量比。ZHONG 等^[33]研究表明,在羔羊的日粮中添加黄芪多糖,可显著提高丙酸的浓度,并降低乙酸和丙酸的浓度比,同时影响氨态氮的浓度,进而改善动物体的瘤胃发酵模式。吴和龙^[34]研究报道,在体外发酵实验中添加 5 mg/kg 的菌草灵芝菌糠多糖可使氨态氮的含量提高 14%,使微生物蛋白的浓度提高 5%,挥发性脂肪酸的浓度提高 31%,进而改善瘤胃发酵特性。以上的研究结果表明,植物多糖可通过改变瘤胃内氨态氮的含量、挥发性脂肪酸的浓度和组成来改善瘤胃发酵模式,但根据不同植物多糖的种类及添加含量不同,瘤胃发酵效果有所不同。

2.2 增强疫苗的免疫活性

疫苗作为保证动物机体健康、降低疾病传播的有效手段之一,在畜牧养殖过程中有着至关重要的作用。植物活性多糖在反刍动物的生产中,不仅可以提高动物的免疫能力,还能增强疫苗的免疫活性。徐晓静等^[35]研究报道,在绵羊的饲料中添加 400 g/t 的黄芪多糖粉可显著提高口蹄疫疫苗的免疫活性效果。杜继红等^[36]研究发现,不同剂量的黄芪多糖粉不仅能提高亚洲 I 型和 O 型口蹄疫疫苗的抗体效价,而且奶牛的产奶量也有一定的提高。李任军等^[37]研究报道,黄芪多糖可通过增强血清中口蹄疫疫苗特异性的 IgG 及其亚类水平来提高疫苗的免疫效果。邢玉娟等^[38]按照 0.4 g/kg 的配比在绵羊的精料中添加黄芪多糖粉,结果表明黄芪多糖可维持口蹄疫疫苗的高抗体水平,延长疫

苗的保护期。

2.3 调节瘤胃及肠道微生物菌群

植物活性多糖调节瘤胃和肠道微生物菌群主要是通过抑制肠道菌群中有害菌的生长,促进有益菌的增殖分化,进而提高瘤胃内纤维类物质的分解效率,来提高饲料转化率,最终提高其生长性能。冯士彬等^[39]研究发现,在湖羊羔羊的日粮中添加黄芪多糖不仅可以提高其免疫力、抗氧化能力、养分物质表观消化率,还能够通过提高放线细菌门和拟杆菌门的细菌数量来改善肠道微生态。蔺婷娟^[40]报道了沙蒿多糖可显著增加肉羊盲肠和结肠内乳酸杆菌的数量,减少大肠杆菌的数量,从而改善其肠道内菌群状况,促进动物生长发育。潘双子^[41]采用实时荧光定量 PCR 法测定 3 种多糖对瘤胃微生物影响。结果显示,香菇多糖、灵芝多糖及虫草多糖可提高瘤胃总细菌的丰度,且减少产甲烷菌和原虫的丰度。金鹿等^[42]研究表明,在断奶滩羊的日粮中添加沙蒿多糖组合制剂可以提高其瘤胃内厚壁菌门和丝状杆菌门的数量,而这 22 类菌群又促进了纤维物质通过瘤胃发酵产生乙酸和丙酸。李胜利^[43]通过采用 16S rDNA 高通量测定技术测定瘤胃内细菌组成及细菌群落多样性变化显示,沙蒿多糖可提高瘤胃内纤维杆菌门菌群的比例,减少弧菌属、空肠弯曲菌细菌相关致病菌的比例。

2.4 改善肉品质

在畜牧生产及加工过程中,肉产品的肉色、剪切力、pH、滴水损失率、熟肉率通常是被用来衡量肉品质的重要指标,而大量研究表明,植物活性多糖可以改善反刍动物的肉品质。张俊丽等^[44]研究表明,在断奶滩羊的日粮中添加沙蒿多糖提取物可降低羊肉的滴水损失率,显著降低羊肉的剪切力,从而提高羊肉嫩度,进而改善羊肉的品质。胡宇超等^[45]研究发现,在给 6 周龄的羔羊连续饲喂含发酵麸皮多糖的饲料 56 d 后,可以降低肉羊背最长肌的剪切力,来提高肉质的嫩度;同时提高肌肉的抗氧化能力,改善其氨基酸组成,来提高羊肉的风味。郭贝贝等^[46]研究表明,在给 4 月龄的母羔羊饲喂含有植物多糖的日粮后,植物多糖组的肌肉滴水损失显著降低,苍白肉的含量也显著降低。胡亦清等^[47]研究表明,在饲料中添加 0.1% 植物多糖可以促进 4 月龄山羊的养分代谢,提高生长性能,同时改善肉品质。

2.5 提高精液保存效果

在畜牧生产中,冷冻精液保存技术对提高种畜繁殖率、扩大种群数量具有至关重要的作用。植物活性多糖对于冷冻种公畜精液的保存具有明显的改善作用,其作用机制主要为以下几点:其一,植物活性多糖可通过提高精液中精子活率、直线速率、曲线运动速度和平均路径速度来提高精子活性,进而提高精液保存效果;其二,植物活性

多糖可通过提高精子的质膜完整率和顶体完整率,来减少低温冷冻对精子结构功能的破坏;其三,在冷冻精液中加入植物活性多糖可提高精液中 T-AOC 和 GSH-Px 的活性,降低 MDA 含量,进而减少冷冻对精子的氧化损伤。李方舟等^[48]研究表明,不同浓度的海带多糖和枸杞多糖可显著提高山羊冷冻稀释液中精子活率、顶体完整率、质膜完整率及线粒体活性,从而提高山羊冷冻精液的保存效果。陈晓英等^[49]通过给高海拔环境中娟珊牛改良西藏黄牛 F3 代精液中添加不同浓度的红景天多糖,结果表明,0.08 mg/mL 的红景天多糖可明显提高娟珊牛改良西藏黄牛 F3 代精液中精子活力、顶体完整率和 GR 酶活性,并降低 CAT 含量,从而提高抗氧化保护作用和精液品质。陈帅^[50]研究表明,香菇多糖可提高解冻奶牛精液稀释液中的精子活率、前向运动率、质膜完整性、顶体完整率、直线速率及抗氧化酶的活性,并降低 MDA 的含量,且浓度过高不仅不会增强其保存效果,还会抑制精子活性。李宇^[51]研究表明,3.0 mg/mL 淫羊藿多糖可显著提高精子中 ATP 水平及线粒体的比例、精子活率、质膜完整率和抗氧化酶活性。

3 结束语

在畜牧生产中,植物活性多糖作为一种绿色饲料添加剂,有着来源广泛、高效、无污染、无耐药性、无残留等特点,具有广阔的发展前景。植物活性多糖在反刍动物生产中主要发挥改善瘤胃内环境,调节肠道菌群,促进生长,改善肉品质,增强机体免疫功能等作用,同时和疫苗配合使用,具有增强疫苗免疫保护效果的作用。

目前,植物多糖的研究主要集中在畜牧业养殖应用方面。但这其中还存在着许多问题:其一,植物活性多糖种类繁多,分子结构与生物活性作用机制尚不明确;其二,产业化方面进展缓慢,除黄芪多糖产品外,其他植物活性多糖缺乏成型的产品;其三,植物活性多糖提取效率较低,生产成本较高,分离纯化困难,相关类产品缺乏质量控制程序,存在添加麦芽糊精及其他劣质多糖以次充好的情况。随着科学技术的进步与相关研究的深入,植物活性多糖的研究更应该着力于分子结构、作用机制、分离纯化和质量控制等方面,为植物活性多糖在反刍动物生产中的使用提供更广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 崔鹤馨,王楠,呼延含蓉,等.泰山松花粉多糖对仔猪生长性能、肠道细菌及消化道酶活性的影响[J].中国畜牧杂志,2020,56(11):130-134. CUI HX, WANG N, HUYAN HR, *et al.* Effects of fat source on reproductive performance and colostrum composition of sows [J]. Chin J Anim Husbandry, 2020, 56(11): 130-134.
- [2] 何坤明,王国锐,白新鹏,等.山茱萸籽多糖分离纯化、结构表征及抗氧化活性[J/OL].食品科学:1-15. [2021-02-09]. <http://kns.cnki.net>

- cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210115.1608.036.html
- HE KM, WANG GD, BAI XP, *et al.* Isolation, purification, structure characterization and antioxidant activity of *Cornus officinalis* seeds polysaccharides [J/OL]. Food Sci: 1-15. [2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210115.1608.036.html>
- [3] WANG Q, WANG XF, XING T, *et al.* The combined impact of xylo-oligosaccharides and gamma-irradiated *Astragalus* polysaccharides on growth performance and intestinal mucosal barrier function of broilers [J]. Poul Sci, 2020, 100(3): 100909.
- [4] HAN C, WANG X, ZHANG D, *et al.* Synergistic use of florfenicol and *Salvia miltiorrhiza* polysaccharide can enhance immune responses in broilers [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2021, 210: 111825.
- [5] 尹业鑫, 王芳, 余东明, 等. 饲料中添加枸杞多糖对断奶大鼠生长性能、抗氧化能力、肠黏膜免疫功能以及肠道形态结构的影响[J/OL]. 动物营养学报: 1-9. [2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5461.s.20201215.0857.014.html>
- YIN YX, WANG F, YU DM, *et al.* Effects of dietary *Lycium barbarum* polysaccharide on growth performance, antioxidant capacity, intestinal mucosal immune function and intestinal morphology of weaned rats [J/OL]. Chin J Anim Nutr: 1-9. [2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5461.s.20201215.0857.014.html>
- [6] LIAO LY, LI J, LI J, *et al.* Effects of *Astragalus* polysaccharides on intestinal morphology and intestinal immune cells of Muscovy ducklings infected with Muscovy duck reovirus [J]. Poul Sci, 2021, 100(1): 64-72.
- [7] 于小磊, 孟鑫, 丁楠, 等. 玉米花丝多糖的提取制备与抑菌作用研究[J]. 中国饲料, 2021(3): 32-36.
- YU XL, MENG X, DING N, *et al.* Study on the extraction, preparation and bacteriostasis of corn silk polysaccharide [J]. China Feed, 2021, (3): 32-36.
- [8] 陈融, 刘博, 陈凯, 等. 不同浓度的葛根多糖对小鼠肠道菌群的影响[J/OL]. 中国畜牧杂志: 1-13. [2021-02-09]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20200629-01>
- CHEN R, LIU B, CHEN K, *et al.* The effect of different concentrations of pueraria lobata polysaccharides on the intestinal flora of mice [J/OL]. Chin J Anim Husband: 1-13. [2021-02-09]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20200629-01>
- [9] 时菲菲, 王姐姐, 曹金花, 等. 双连续型党参多糖纳米乳对免疫抑制小鼠的免疫调节作用[J]. 动物营养学报, 2020, 32(12): 5925-5931.
- SHI FF, WANG DD, CAO JH, *et al.* Immunomodulatory effect of W/O/W *Codonopsis pilosula* polysaccharide nanoemulsion on immunosuppressed mice [J]. Chin J Anim Nutr, 2020, 32(12): 5925-5931.
- [10] WANG KL, ZHANG HR, HAN QJ, *et al.* Effects of astragalus and ginseng polysaccharides on growth performance, immune function and intestinal barrier in weaned piglets challenged with lipopolysaccharide [J]. J Anim Physiol Anim Nutr, 2020, 104(4): 1096-1105.
- [11] 陈广勇, 韩乾杰, 张玲玲, 等. 黄芪多糖对脂多糖刺激小鼠巨噬细胞形态及免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(9): 4358-4365.
- CHEN GY, HAN GJ, ZHANG LL, *et al.* Effect of astragalus polysaccharide on morphology and immune function of lipopolysaccharide-stimulated macrophages in mice [J]. Chin J Anim Nutr, 2020, 32(9): 4358-4365.
- [12] 康文锦, 徐兴军, 刘佳人, 等. 蒲公英多糖对小鼠体内抗氧化酶活性及相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(12): 5910-5915.
- KANG WJ, XU XJ, LIU JR, *et al.* Effects of dandelion polysaccharide on antioxidant enzyme activity and related gene expression in mice [J]. Chin J Anim Nutr, 2020, 32(12): 5910-5915.
- [13] 肖传刚, 于红梅. 淫羊藿、刺五加多糖对肉鸡血清抗氧化调节作用比较[J]. 中国畜禽种业, 2020, 16(9): 178-179.
- XIAO CG, YU HM. Comparison of epimedium and acanthopanax senticosus polysaccharides on the anti-oxidation regulation of broiler serum [J]. Chin Livest Poul Breed, 2020, 16(9): 178-179.
- [14] CHEN SJ, LI JY, ZHANG JM. Extraction of yellow pear residue polysaccharides and effects on immune function and antioxidant activity of immunosuppressed mice [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 126: 1273-1281.
- [15] 张志宏, 邢娜, 彭东辉, 等. 黄瓜子多糖的分离、纯化和体外抗氧化活性研究[J]. 中国药房, 2021, 32(4): 432-438.
- ZHANG ZH, XING N, PENG DH, *et al.* Study on isolation, purification and *in vitro* antioxidant activity of the polysaccharides from *Cucumis sativus* [J]. Chin Pharm, 2021, 32(4): 432-438.
- [16] 于忠芳. 自噬在硫酸化银杏叶多糖体外诱导肝癌细胞凋亡中的作用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- YU ZF. The role of autophagy in the induction of hepatocellular carcinoma cell apoptosis by sulfated ginkgo biloba leaves polysaccharide *in vitro* [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [17] LI JY, YU J, DU XS, *et al.* Safflower polysaccharide induces NSCLC cell apoptosis by inhibition of the akt pathway [J]. Oncol Rep, 2016, 36(1): 147-154.
- [18] 柴军红, 何婷婷, 赵楠, 等. 五叶地锦果实多糖、花色苷抗氧化、抗肿瘤活性研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(15): 97-101, 138.
- CHAI JH, HE TT, ZHAO N, *et al.* Study on antioxidant and antitumor activity of polysaccharide and anthocyanin from *Parthenocissus quinquefolia* fruit [J]. Hubei Agric Sci, 2019, 58(15): 97-101, 138.
- [19] 李孝平, 李伟, 高芳芳, 等. 山楂多糖提取物上调 miR-146a-5p 抑制 wnt/ β -catenin 信号通路影响胃癌细胞增殖和凋亡[J]. 安徽医药, 2021, 25(2): 326-330.
- LI XP, LI W, GAO FF, *et al.* Up-regulation of miR-146a-5p by hawthorn polysaccharide extract inhibits wnt/ β -catenin signaling pathway to affect proliferation and apoptosis of gastric cancer cells [J]. Anhui Med, 2021, 25(2): 326-330.
- [20] 杨佳, 付业佩, 杜宝香, 等. 细辛多糖对流感病毒 H1N1 型感染的保护作用及对炎症因子表达水平的影响[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(2): 412-419.
- YANG J, FU YP, DU BX, *et al.* Protective effect of asarum polysaccharide on H1N1 influenza virus [J]. China J Chin Mater Med, 2021, 46(2): 412-419.
- [21] 蒙明瑜, 黄仁彬, 梁红. 剑叶耳草多糖对乙型肝炎病毒的抑制作用及其机制研究[J]. 中药药理与临床, 2019, 35(4): 38-43.
- MENG MY, HUANG RB, LIANG H. The inhibitory effects of polysaccharides from *Hedyotis caudatifolia* on hepatitis B virus [J]. Pharmacol Clin Chin Mater Med, 2019, 35(4): 38-43.
- [22] KOMATSU T, KIDO N, SUGIYAMA T, *et al.* Antiviral activity of acidic polysaccharides from *Coccomyxa gloeobotrydiformis*, a green alga, against an *in vitro* human influenza A virus infection [J]. Immunopharm Immunot, 2013, 35(1): 1-7.

- [23] 于超, 杜恒裔, 谭子超, 等. 4种苣荬多糖的体外抗禽流感病毒活性研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020, (1): 106–109, 113.
YU C, DU HY, TAN ZC, *et al.* Study on anti-avian influenza virus activity of four brassica polysaccharides *in vitro* [J]. Heilongjiang Anim Sci Vet Med, 2020, (1): 106–109, 113.
- [24] 崔敬爱, 王思霖, 刘畅, 等. 桦褐孔菌多糖对高脂饮食诱导的高脂血症大鼠血脂和肝脏的保护作用及机制[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 185–190.
CUI JQ, WANG SJ, LIU C, *et al.* Protective effect and mechanism of *Inonotus obliquus* polysaccharide on blood lipids and liver in hyperlipidemia rats induced by high-fat diet [J]. Food Sci, 2020, 41(19): 185–190.
- [25] 李晓, 卢学春, 李雨鑫, 等. 姬松茸多糖提取物对高脂血症大鼠降脂作用研究[J/OL]. 食品科学技术学报: 1–10. [2021-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1151.TS.20210105.1426.002.html>
LI X, LU XC, LI YX, *et al.* Protective effect of agaricus blazei polysaccharide extract on lipid lowering hyperlipidemia rats [J/OL]. J Food Sci Technol: 1–10. [2021-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1151.TS.20210105.1426.002.html>
- [26] 曾红亮. 金柑多糖结构表征及降血脂机理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
ZENG HL. Structural characterization and hypolipidemic mechanism of polysaccharides from *Fortunella margarita* (Lour.) Swingle [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [27] 韩杰, 张一然, 张飞, 等. 刺五加多糖对免疫应激断奶仔猪血浆D-乳酸水平和腹泻状况的影响[J]. 现代畜牧兽医, 2016, (1): 18–22.
HAN J, ZHANG YR, ZHANG F, *et al.* Effects of dietary *Acanthopanax senticosus* polysaccharide on diarrhea and D-lactate in plasma of challenged weanling pig [J]. Mod Anim Husb Vet Med, 2016, (1): 18–22.
- [28] 王雄, 李孟伟, 马杰, 等. 牛膝多糖对仔猪肠上皮细胞免疫应激的调控及其作用机制[J]. 动物营养学报, 2017, 29(11): 4116–4122.
WANG X, LI MW, MA J, *et al.* *Achyranthes bidentata* polysaccharides: Regulation on immunological stress in piglet intestinal epithelial cells and its action mechanism [J]. J Anim Nutr, 2017, 29(11): 4116–4122.
- [29] 刘磊, 苏满春, 雷耀庚, 等. 黄芪多糖对肉鸡免疫应激状态下蛋白质重分配的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(12): 3799–3805.
LIU L, SU MC, LEI YG, *et al.* Effects of *Astragalus* polysaccharide on protein reallocation of broilers exposed to immune stress [J]. Chin J Anim Nutr, 2014, 26(12): 3799–3805.
- [30] 韩乾杰. 植物多糖对仔猪生长性能、免疫功能和肠道健康的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
HAN GJ. Effect of plant polysaccharides on growth performance, immune function and intestinal health in weaned piglets [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2019.
- [31] 李宗军. 瘤胃丙酸发酵的增强策略及其对碳水化合物代谢的动态影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
LI ZJ. The ruminal manipulation strategies for enhancing propionate fermentation and their dynamic effects on carbohydrate metabolism [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2018.
- [32] 包雨洪. 沙葱多糖对绵羊瘤胃发酵、纤维素降解及血液生化指标的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
BAO YH. The influence of *Allium Mongolicum* polysaccharide on the rumen fermentation, rumen cellulose degradation and blood biochemical indexes in sheep [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [33] ZHONG RZ, YU M, LIU HW, *et al.* Effects of dietary *Astragalus* polysaccharide and astragalus membranaceus root supplementation on growth performance, rumen fermentation, immune responses, and antioxidant status of lambs [J]. Anim Feed Sci Technol, 2012, 174(1–2): 0–67.
- [34] 吴和龙. 茵草灵芝菌糠多糖对瘤胃微生物发酵及菌群的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
WU HL. *Ganoderma lucidum* polysaccharides JUNCAO WMLE impact on rumen microbial fermentation and flora [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [35] 徐晓静, 李敏, 孙博, 等. 黄芪多糖粉对绵羊口蹄疫疫苗免疫效果的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018, (6): 167–170.
XU XJ, LI M, SUN B, *et al.* The effect of astragalus polysaccharide powder on the immune effect of sheep foot-and-mouth disease vaccine [J]. Heilongjiang Anim Sci Vet Med, 2018, (6): 167–170.
- [36] 杜继红, 韩志帅, 王海良, 等. 黄芪多糖粉对奶牛口蹄疫疫苗免疫效果的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(24): 64–66.
DU JH, HAN ZS, WANG HL, *et al.* The effect of *Astragalus* polysaccharide powder on the immune effect of cow foot-and-mouth disease vaccine [J]. Chin J Anim Husb, 2013, 49(24): 64–66.
- [37] 李任军, 马艳粉, 卢一松, 等. 口服黄芪多糖增强肠道黏膜免疫及其对口蹄疫疫苗免疫的影响[J]. 中国兽医学报, 2017, 37(3): 491–496.
LI RJ, MA YF, LU YS, *et al.* Enhancement of the gut mucosal immunity and immune response to the foot-and-mouth disease vaccine by oral administration of *Astragalus* polysaccharide [J]. Chin J Vet Sci, 2017, 37(3): 491–496.
- [38] 邢玉娟, 朱浩, 秦俊杰, 等. 黄芪多糖粉对绵羊口蹄疫疫苗免疫效果的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017, (18): 174–175.
XING YJ, ZHU H, QIN JJ, *et al.* The effect of *Astragalus* polysaccharide powder on the immune effect of sheep foot-and-mouth disease vaccine [J]. Heilongjiang Anim Husb Vet Med, 2017, (18): 174–175.
- [39] 冯士彬, 程连平, 舒迎霜, 等. 黄芪多糖对湖羊羔羊生长性能、血清指标、消化功能和直肠菌群的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 122–129.
FENG SB, CHENG LP, SHU YS, *et al.* Effect of astragalus polysaccharide on growth performance, serum indices, digestive function and rectum flora of Hu lambs [J]. Jiangsu J Agric, 2019, 35(1): 122–129.
- [40] 蔺婷娟. 沙葱多糖对肉羊血液生化指标和肠道黏膜免疫影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
LIN TJ. The study on effect of polysaccharide from *Allium mongolicum* regel on blood biochemical parameters and intestinal mucosal immune in meat sheep [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [41] 潘双子. 食用菌多糖对人工瘤胃发酵及甲烷产量的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
PAN SZ. Effect of edible fungus polysaccharide on rumen methanogens in goats and its mechanism [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [42] 金鹿, 李胜利, 桑丹, 等. 沙蒿多糖组合制剂对滩羊羔羊瘤胃菌群多样性的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1): 317–329.
JIN L, LI SL, SANG D, *et al.* Effects of *Artemisia* polysaccharide combination preparation on rumen microflora diversity of *Tan* lamb [J].

- Chin J Anim Nutr, 2021, 33(1): 317–329.
- [43] 李胜利. 淬灭酶及沙蒿多糖对绵羊瘤胃微生态和营养代谢及免疫影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- LI SL. The effects of AHL-lactonase and *Artemisia* seed polysaccharides on rumen microflora and nutrient metabolism and immune effect in sheep [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [44] 张俊丽, 金鹿, 施安, 等. 沙蒿多糖不同组合添加剂对滩羊羔羊生产性能及肉品质的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(6): 18–21.
- ZHANG JL, JIN L, SHI AN, *et al.* Effect of different combined preparations of *Artemisia* seed polysaccharides on production performance and meat quality of Tan lambs [J]. Feed Res, 2020, 43(6): 18–21.
- [45] 胡宇超, 王园, 孟子琪, 等. 发酵麸皮多糖对肉羊肉品质、肌肉氨基酸组成及肌肉抗氧化酶和肌纤维类型相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(2): 932–940.
- HU YC, WANG Y, MENG ZQ, *et al.* Effects of fermented wheat bran polysaccharides on meat quality, muscle amino acid composition and expression of antioxidant enzymes and muscle fiber type-related genes in muscle of mutton sheep [J]. J Anim Nutr, 2020, 32(2): 932–940.
- [46] 郭贝贝, 胡亦清, 杨明睿, 等. 日粮中添加益生菌和植物多糖对圈养山羊血清抗氧化指标及肉品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(2): 291–297.
- GUO BB, HU YQ, YANG MR, *et al.* Effects of dietary probiotics and plant polysaccharides on serum antioxidant indexes and meat quality in captive goats [J]. J Jiangxi Agric Univ, 2020, 42(2): 291–297.
- [47] 胡亦清, 郭贝贝, 杨明睿, 等. 植物多糖和葛根素对舍饲山羊生产性能、血清生化指标和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(12): 5788–5794.
- HU YQ, GUO BB, YANG MR, *et al.* Effects of plant polysaccharides and puerarin on growth performance, serum biochemical indexes and meat quality of captive goats [J]. Chin J Anim Nutr, 2020, 32(12): 5788–5794.
- [48] 李方舟, 王艳华, 温飞, 等. 海带多糖和枸杞多糖对山羊精液冷冻保存效果的影响[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(3): 48–52.
- LI FZ, WANG YH, WEN F, *et al.* Effect of *Laminaria japonica* polysaccharide and *Lycium barbarum* polysaccharide on goat semen cryopreservation [J]. J Domest Anim Ecol, 2018, 39(3): 48–52.
- [49] 陈晓英, 赵丽, 孙锋博, 等. 红景天多糖对娟珊牛改良西藏黄牛 F₃ 代精液 4 °C 保存效果的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2017, 38(2): 22–25.
- CEHN XY, ZHAO L, SUN FB, *et al.* Influence of *Rhodiola rosea* polysaccharide on semen preservation at 4 °C of F₃ hybrids of jersey cattle and tibet yellow cattle [J]. Anim Husb Feed Sci, 2017, 38(2): 22–25.
- [50] 陈帅. 香菇多糖对奶牛精液冷冻保存效果的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- CHEN S. Effects of *Lentinan* polysaccharide on dairy bull semen after cryopreservation [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019.
- [51] 李宇. 淫羊藿多糖对山羊精液冷冻保存效果的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- LI Y. The Effects of *Epimedium* polysaccharide on goat semen cryopreservation [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019.

(责任编辑: 张晓寒 郑丽)

作者简介

李海源, 硕士研究生, 主要研究方向为饲料及畜产品安全。

E-mail: haiyuan7928@163.com

柏雪, 博士, 副研究员, 主要研究方向为饲料及畜产品安全。

E-mail: baixue@swun.edu.cn