

靳伟星,张自群,郭芳芳,等.地黄多糖在畜禽养殖中的应用研究进展[J].山西农业科学,2025,53(6):39-46.

JIN W X, ZHANG Z Q, GUO F F, et al. Research progress on the application of *Rehmannia glutinosa* polysaccharides in livestock and poultry production[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 39-46.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.06.05

## 地黄多糖在畜禽养殖中的应用研究进展

靳伟星<sup>1</sup>,张自群<sup>2</sup>,郭芳芳<sup>2</sup>,黄淑成<sup>2</sup>

(1.豫北医学院医学检验学院,河南新乡 453003;2.河南农业大学动物医学院,河南郑州 450046)

**摘要:**地黄多糖是从中药地黄新鲜或干燥块根中提取的一类具有生物活性的天然多糖化合物,根据地黄加工工艺的不同,地黄多糖可分为生地黄多糖和熟地黄多糖,其功能活性存在一定差异。为了发展绿色健康养殖业,在当前减抗禁抗的养殖背景下,作为抗生素替代型饲料添加剂,地黄多糖凭借其多靶点、多途径的作用特点和良好的安全性,应用前景广阔。文章综述了目前地黄多糖具有免疫调节、抗炎、抗氧化、肠道健康保护和抗骨质疏松等多种生物学功能以及地黄多糖兼具绿色安全、无药物残留的显著优势,地黄多糖在生猪、家禽和水产动物养殖中的应用,并对地黄多糖未来的研究方向进行了展望。

**关键词:**地黄多糖;畜禽养殖;饲料添加剂;替抗;生物学功能

中图分类号:S816.7 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2025)06-0039-08

### Research Progress on the Application of *Rehmannia glutinosa* Polysaccharides in Livestock and Poultry Production

JIN Weixing<sup>1</sup>, ZHANG Ziqun<sup>2</sup>, GUO Fangfang<sup>2</sup>, HUANG Shucheng<sup>2</sup>

(1.College of Medical Laboratory, North Henan Medical University, Xinxiang 453003, China;

2.College of Veterinary Medicine, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** *Rehmannia glutinosa* polysaccharides(RGP) are a class of biologically active natural polysaccharides extracted from the fresh or dried tuberous roots of the traditional Chinese medicine *Rehmannia glutinosa*. Depending on its processing methods, RGP can be categorized into raw and processed RGP, with certain differences in their functional activities. In order to develop a green and healthy animal husbandry industry, under the current background of “antibiotic reduction and prohibition” in animal husbandry, as antibiotic-alternative feed additives, RGP have broad prospects owing to their function characteristics of multi-target, multi-pathway and excellent safety profile. In this paper, the biological functions of RGP such as immunomodulation, anti-inflammatory effects, antioxidant activity, gut health promotion, and anti-osteoporotic properties, the significant advantages of RGP such as green safety and free from drug residues, and the application of RGP in pig, poultry and aquatic animal breeding were reviewed. Also, the research direction of RGP in the future was prospected.

**Keywords:** *Rehmannia glutinosa* polysaccharides; livestock and poultry breeding; feed additives; antibiotic alternative; biological functions

地黄多糖是从玄参科植物地黄(*Rehmannia glutinosa* Libosch.)的块根中提取得到的生物活性成分,这种多糖物质具有多种药理作用。地黄作为河南省道地中药材,属于“四大怀药”之一,在我国临床应用历史悠久<sup>[1]</sup>。研究表明,地黄多糖是其

重要的药用成分之一,展现出多方面的生物活性<sup>[2]</sup>。根据加工工艺的差异,地黄可分为生地黄和熟地黄2种炮制品,其成分、药理活性及临床应用存在一定差异。基于此,地黄多糖亦可依据来源区分为生地黄多糖与熟地黄多糖<sup>[3]</sup>。生地黄药性

收稿日期:2025-08-09

基金项目:河南省高校科技创新人才支持计划(25HASTIT045)

作者简介:靳伟星,讲师,硕士,主要从事实验动物学研究,E-mail:17111067@sqmc.edu.cn

通信作者:黄淑成,副教授,主要从事动物营养代谢病与中毒病研究,E-mail:huang.sc@henau.edu.cn

偏寒,主要功效为清热凉血、滋阴生津;经酒制加工后称为熟地黄,其药性由寒转温,味由苦转甘,功效也从清热转为滋补,具有补血滋阴、益精填髓等作用<sup>[3-5]</sup>。地黄的传统应用以配伍煎煮为主,其汤剂中的药效成分多为大极性水溶性物质,地黄多糖作为其中最主要的活性成分之一,具有重要的开发价值和临床应用意义<sup>[5-6]</sup>。现代药理学研究发现,地黄多糖展现出广泛的生物活性,包括抗氧化、抗炎、延缓衰老、调节血糖、改善心脑血管功能以及促进骨骼健康、保护神经及调节免疫等作用<sup>[7-10]</sup>。

随着减抗禁抗政策的推进和绿色养殖理念的普及,地黄及其提取物(如地黄多糖、地黄低聚糖等)因其天然、安全、无残留的特点,在畜禽养殖中的应用逐渐增多,应用形式日趋多元化。其良好的生物相容性还拓展了跨领域应用价值。例如,作为疫苗佐剂时,地黄多糖与疫苗联用不仅表现出较低的细胞毒性,还能够诱导树突状细胞和 T 细胞活化,增强抗原特异性免疫反应<sup>[11-12]</sup>。WAN 等<sup>[13]</sup>通过体内和体外试验,证实熟地黄多糖能增强免疫抑制小鼠的肠道免疫功能,其机制涉及调控特定菌群,如通过增加毛螺菌科(Lachnospiraceae)和丹毒丝菌科(Erysipelotrichaceae)的丰度,同时减少乳杆菌科(Lactobacillaceae)的丰度,从而有效缓解肠道菌群失调。地黄多糖兼具促生长和免疫调节双重功能,是一种极具潜力的抗生素替代型饲料添加剂,可应用于功能性食品或药物开发。笔者综合分析了地黄多糖的生物活性及其在畜牧生产中的应用现状,着重探讨其替代抗生素作为新型饲料添加剂的可行性,旨在为健康养殖提供科学支持。

## 1 地黄多糖的生物学功能

中药多糖在畜牧生产中的应用研究显示,其具有多重生物效应,包括促生长、抗氧化及调节肠道微生态等作用。其在禽类、猪及反刍动物养殖中应用效果显著,可改善其生产性能与肉质,增强机体的免疫力,并对某些疾病具有防治作用<sup>[14-16]</sup>。地黄多糖作为地黄的主要活性成分,其化学结构研究已取得重要进展。现有文献表明,已从地黄中成功分离出 7 种不同分子质量的多糖组分,分子质量范围在  $10^3 \sim 10^5$  u。这些多糖由多种单糖单元构成,包括鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、甘露糖、木糖

和阿拉伯糖等<sup>[17-18]</sup>。研究表明,地黄多糖在畜禽生产中表现出多方面的生物效应,主要包括调节机体免疫功能、抗炎、抗氧化、改善肠道菌群和抗骨质疏松,这些特性使其在动物健康养殖领域展现出良好的应用前景<sup>[1,19-20]</sup>。笔者基于地黄多糖现有研究进展,综述其四大核心功能。

### 1.1 免疫调节功能

地黄多糖可通过促进免疫器官发育、刺激淋巴细胞增殖与分化、增强巨噬细胞吞噬活性以及调控细胞因子分泌等多种途径参与免疫系统调节,从而影响机体的免疫应答过程<sup>[17,21]</sup>。赵素容等<sup>[22]</sup>通过体外试验表明,  $10 \sim 200 \mu\text{g/mL}$  的地黄多糖可显著促进刀豆素 A 诱导的 T 淋巴细胞增殖;动物体内试验表明,每日  $200 \text{ mg/kg}$  剂量的地黄多糖能有效提升小鼠外周血  $\text{CD8}^+$  T 细胞水平。这些结果均证实,地黄多糖可以增强动物体内细胞免疫作用。同样, KWAK 等<sup>[12]</sup>研究也发现,经鼻腔注射的地黄多糖能够有效激活小鼠的树突状细胞和 T 细胞,诱导辅助性 T 细胞 1(T helper cell 1, Th1)和细胞毒性 T 细胞(Cytotoxic T cell 1, Tc1)免疫反应,且细胞毒性较低。

研究表明,地黄多糖可有效改善环磷酰胺(CTX)所诱导的免疫抑制状态,其作用机制涉及修复受损免疫器官功能、促进造血干细胞增殖以及调控 B 细胞和 T 细胞的分化成熟过程<sup>[23-25]</sup>。生地黄多糖可显著改善 CTX 诱导的免疫抑制,通过调控 T 细胞亚群平衡,降低  $\text{CD3}^+\text{CD8}^+$  表达水平,提高  $\text{CD3}^+\text{CD4}^+/\text{CD8}^+$  值,激活淋巴细胞免疫功能,抑制小鼠体内肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )、白细胞介素-17(IL-17)表达,促进干扰素- $\gamma$ (IFN- $\gamma$ )、IL-4 和 IL-10 表达,增强单核细胞吞噬功能,发挥免疫增强作用<sup>[24]</sup>。熟地黄多糖能显著改善 CTX 诱导的小鼠免疫抑制,具体表现为减轻脾脏损伤、提升 IFN- $\gamma$  分泌和 Th1 细胞免疫反应、提高脾淋巴细胞增殖活性和胸腺指数<sup>[25]</sup>。综上,地黄多糖可以作为新型饲料添加剂,通过特异性免疫调节显著提升畜禽抗病力,在实际养殖中具有突出的应用前景。

### 1.2 抗炎、抗氧化功能

生地黄具有清热凉血、养阴生津之功效,与现代炎症治疗理念高度契合,且相较于化学抗炎药物,更具天然、绿色、低毒副作用的独特优势。研究表明,地黄多糖可显著提高长期肢体固定大鼠

骨骼肌中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)的活性,同时降低丙二醛(MDA)含量,表明其具有缓解氧化应激的作用<sup>[26]</sup>。此外,地黄多糖对脂多糖(LPS)诱导的炎症反应具有显著抑制作用,主要通过调控TLR4/NF- $\kappa$ B通路实现。试验数据显示,地黄多糖能明显抑制TNF- $\alpha$ 和IL-6等炎症因子的产生,同时降低NF- $\kappa$ B基因表达水平,展现出良好的抗炎和抗氧化活性<sup>[27]</sup>。众多研究表明,生地黄多糖和熟地黄多糖均可以通过调节机体炎症因子水平来发挥抗炎、抗氧化的功能。王小兰等<sup>[24]</sup>研究发现,生地黄多糖干预能够显著调节免疫抑制小鼠的细胞因子平衡,降低TNF- $\alpha$ 和IL-17表达水平,促进IFN- $\gamma$ 、IL-4和IL-10表达。吕弯弯等<sup>[28]</sup>研究证实,生、熟地黄多糖可以缓解结肠炎小鼠肠道组织损伤,且熟地黄多糖治疗效果较好。ZHOU等<sup>[29]</sup>经过分离纯化得到2种地黄多糖SDH-WA和SDH-0.2A,证实二者均能够下调LPS诱导下RAW264.7细胞的溶菌酶(LZM)、TNF- $\alpha$ 、IL-6、IL-1 $\beta$ 和一氧化氮(NO)分泌。以上研究结果均揭示,地黄多糖具有突出的抗炎与抗氧化特性,通过调节相关炎症通路和促炎因子来发挥作用,为其作为药物活性成分的开发提供了理论依据,并展现出良好的临床转化前景。

### 1.3 肠道健康保护功能

肠道菌群对动物机体维持正常的物质消化、营养吸收、能量代谢及整体生理功能具有关键作用<sup>[30]</sup>。保障肠道菌群稳定是肠道健康的基础,对改善畜禽整体健康和提升生产性能具有重要意义。研究表明,地黄多糖可显著改善免疫抑制小鼠的肠道免疫功能,促进肠道IgA分泌、激活肠道相关淋巴组织中T和B淋巴细胞并增强黏膜屏障完整性,同时通过调节菌群组成和促进短链脂肪酸(SCFAs)生成,协同改善肠道代谢稳态<sup>[23,31]</sup>。ZHANG等<sup>[32]</sup>研究表明,腹腔注射50 mg/kg的地黄多糖显著恢复了LPS诱导的免疫超激活小鼠模型中失衡的肠道菌群,肠道菌群分析显示其能增加有益菌丰度并提升SCFAs水平。同样,YU等<sup>[31]</sup>研究也发现,地黄多糖通过显著增加拟杆菌门(Bacteroidetes)乳杆菌属(*Lactobacillus*)和阿克曼菌属(*Akkermansia*)的相对丰度,同步提升盲肠SCFAs水平,从而改善肠道菌群多样性;进一步粪菌移植试验证实,这种菌群结构的改变可直接调节宿主的肠道免疫功能。LÜ等<sup>[19]</sup>使用地黄多糖预处理菌

聚糖硫酸钠(DSS)诱导的结肠炎小鼠,结果表明,其不仅使乳杆菌属、另枝菌属(*Alistipes*)和毛螺菌科NK4A136菌群(*Lachnospiraceae\_NK4A136*)的相对丰度恢复至正常水平,还提高了SCFAs浓度,并降低了致病菌丰度。上述研究证实,地黄多糖可通过调控肠道微生物群组成、促进SCFAs生成来维持微生物稳态,并增强肠道屏障功能来保护肠道健康,是一种具有潜力的肠道健康调节剂。

### 1.4 抗骨质疏松功能

熟地黄具有滋阴补血、益精填髓之功效,其传统补肾填髓理论与骨代谢调控密切相关。传统中药地黄用于防治骨质疏松已有近千年历史,现代研究表明,地黄多糖可能是其关键活性成分之一。近年来,大量研究聚焦于地黄多糖在抗骨质疏松及骨修复中的作用机制,为开发新型骨病治疗策略提供了重要科学依据<sup>[33]</sup>。中药多糖凭借其独特的生物活性和安全性优势,在健康养殖领域应用日益广泛,尤其在骨骼健康维护方面展现出重要价值<sup>[34]</sup>。中医认为,地黄通过调节肾和肝的功能以及改善血液循环来发挥抗骨质疏松作用<sup>[33]</sup>。研究表明,熟地黄可以通过增加成骨细胞分化和骨形态发生蛋白(BMP)的表达,来预防糖尿病性骨质疏松<sup>[35]</sup>。研究发现,地黄多糖能够有效刺激成骨细胞生长,增强碱性磷酸酶(ALP)活性,同时促进骨形成相关基因(Runx2)表达和骨保护素(OPG)蛋白分泌,抑制破骨细胞分化及其骨吸收活性<sup>[26,36]</sup>。在卵巢切除诱导的大鼠骨质疏松模型中,地黄多糖缓解了骨小梁密度的下降,并增加了皮质骨厚度和骨小梁形成,表现出显著的抗骨质疏松作用,具有潜在的临床应用价值。这些发现为骨质疏松等骨代谢疾病的防治提供了新的潜在治疗策略。

鉴于地黄多糖在促进骨骼修复方面具有较好的功效,ZHANG等<sup>[37]</sup>将牛冻干骨支架(FDB)与地黄多糖联合使用制备一种新型骨修复材料。这种支架材料能有效促进骨缺损修复,与地黄多糖联合使用可进一步增强骨再生效果。结果发现,其修复松质骨和皮质骨缺损效果显著优于单独使用FDB,这种协同增效促骨生成作用可能通过激活BMP-9/GSK3 $\beta$ 信号通路实现。综上所述,地黄多糖可开发为骨骼健康饲料添加剂应用于畜禽养殖,其促进骨形成和抑制骨吸收的双重功效也使其在骨修复材料领域展现出良好的开发前景,应用前景广阔。

## 2 地黄多糖在动物养殖生产中的应用

畜牧业中抗生素被广泛用于动物细菌感染性疾病的治疗及预防,滥用导致畜禽肠道滋生耐药菌,携带的抗性基因随粪便排除宿主体外,成为环境耐药性主要来源<sup>[38]</sup>。细菌产生耐药性不仅会直接危害人类健康,还会通过环境中的耐药基因扩散造成生态污染。在减抗禁抗的养殖背景下,采用中草药、生物制品等环保型替代药物,可显著降低对环境和动物健康的潜在风险并减少抗生素使用<sup>[39]</sup>。中药多糖作为来源广泛、安全无毒的天然活性成分,凭借其多功能特性,已成为饲料端抗生素替代策略的重要选择<sup>[15,40-41]</sup>。地黄多糖作为地黄主要的生物活性成分,具有广泛的药理活性及低毒、低残留优势,已被广泛应用于畜禽和水产养殖,并展现出良好的应用效果。

### 2.1 在猪生产中的应用

**2.1.1 地黄多糖对猪生产性能的提升** 近年来,抗生素滥用引发的细菌耐药性问题已严重威胁猪群健康,导致其生产性能下降、氧化应激及免疫抑制。与其他畜禽相比,养猪生产中使用抗生素较多,且我国又是世界第一养猪大国,养猪业抗生素使用问题十分严峻<sup>[42]</sup>。目前,养猪业亟需推广绿色添加剂(如植物多糖)以替代抗生素。研究表明,饲料中添加 100 mg/kg 地黄多糖 5 个月可显著提高育肥猪日增质量并降低料肉比,其作用机制可能是通过减少小肠组织氧化损伤和炎症反应,促进肠道饲料分解与营养物质消化吸收,从而改善生长性能<sup>[43]</sup>。此外,地黄多糖通过提升母猪抗氧化防御能力和免疫调节功能,有效改善其繁殖性能,最终显著提高断奶后发情率、配种成功率和分娩率<sup>[43]</sup>。以上研究表明,地黄多糖在生猪养殖中可作为促生长型饲料添加剂,提升育肥猪生长性能和母猪繁殖性能。

杜金凤等<sup>[44]</sup>在低温保存猪精液中添加 0.2 mg/mL 地黄多糖作为抗氧化添加剂持续 6 d,结果表明,能够提高猪精液中 SOD、CAT 活性,降低 MDA 含量,从而有效增强精液的抗氧化能力。这种保护作用能够减轻精子在低温环境下的氧化损伤,从而延长精子的有效保存时间。此外,有报道指出,每天服用 1 剂中成药六味地黄散(含地黄成分的复方制剂)可显著改善种公猪性欲下降症状,增强肾脏功能,提高性欲和精子质量,进而提升配种受孕

率<sup>[45]</sup>。这些结果表明,地黄多糖在体外能保护精液质量,而地黄复方制剂可在体内改善公猪繁殖性能,为地黄多糖及地黄在生猪健康养殖中的开发应用提供了理论支撑。

**2.1.2 地黄多糖的疫苗佐剂效应与抗病毒作用** 猪圆环病毒 2 型(PCV-2)是造成当前养猪业经济损失最严重的疫病之一。鉴于地黄多糖具有显著的免疫调节作用,HUANG 等<sup>[46]</sup>系统评估了其作为 PCV-2 疫苗佐剂的潜力,结果表明,地黄多糖脂质体可高效稳定地包裹 PCV-2 抗原,形成有效的抗原递送系统。该颗粒佐剂能诱导与油佐剂相当的特异性 IgG 抗体水平,且注射部位炎症反应更轻,地黄多糖通过平衡体液与细胞免疫应答,有效促进 Th1 和 Th2 细胞因子分泌,同时保护抗原稳定性、增强巨噬细胞吞噬能力并上调 IFN- $\gamma$ 、IL-6 和 IL-12 表达。因此,包裹 PCV-2 的地黄多糖脂质体有潜力发展成为更安全有效的佐剂,用于改进现有油基疫苗佐剂和研制新疫苗。此外,地黄多糖可有效抑制伪狂犬病毒 XJ5 株(PRV XJ5)感染,通过阻断病毒吸附与入侵、抑制病毒复制,并降低病毒诱导的活性氧(ROS)生成和脂质过氧化,同时提升猪肾细胞系 PK-15 细胞 SOD 活性来调控氧化应激,进而发挥抗病毒作用<sup>[47]</sup>。地黄多糖的疫苗佐剂效应与抗病毒作用在养猪生产中展现出重要的应用价值,不仅可作为功能性饲料添加剂提升猪群基础免疫力,还能作为高效疫苗佐剂增强特异性免疫应答,为发展绿色健康养殖提供了新策略。

### 2.2 在家禽生产中的应用

中药多糖因其广泛的生物活性已成为家禽养殖领域的研究热点,其中,黄芪多糖<sup>[48]</sup>和酵母多糖<sup>[49]</sup>等被应用于肉鸡养殖,可显著提高肉鸡日增质量并降低料肉比。地黄多糖同样具有广泛的生物活性,在肉鸡养殖中应用效果显著。研究显示,在鸡饲料中分别添加 600、900 mg/kg 地黄多糖,可显著提高肉鸡日增质量并降低饲料转化率,而对 35 日龄肉鸡肉质性状没有显著影响<sup>[10]</sup>。在该研究中,地黄多糖通过提升血清 ALP、Ca 和 K 水平来增强矿物质吸收,进而促进骨骼矿化,胫骨灰分含量增加,表明地黄多糖具有调节矿物质代谢和保护肉鸡骨骼健康的作用。刘培培等<sup>[50]</sup>研究发现,3.0 g/kg 的地黄多糖作为蛋鸡饲料添加剂饲喂 63 d,对蛋品质具有显著改善作用,能有效增加鸡

蛋质量,提升蛋黄色泽和蛋白品质(以哈夫单位衡量),同时呈现剂量依赖性地增强蛋壳的机械强度,这些改善效果可能与地黄多糖的抗氧化特性和营养调控作用密切相关。因此,饲料中添加地黄多糖可显著提升肉鸡生长性能和蛋鸡的蛋品质,证实其作为功能性饲料添加剂在家禽生产中的应用潜力。

### 2.3 在水产养殖中的应用

中草药具有提高水产动物免疫力、促进消化吸收、改善肌肉品质和防治疾病等功效,同时资源丰富、来源广泛,对水体环境无污染<sup>[51]</sup>。我国中药资源丰富,中药作为渔用免疫增强剂的开发具备显著优势,目前已成为渔用药物开发的重要发展方向<sup>[52]</sup>。中药有效成分及其药理活性是防治动物疾病的物质基础,其中多糖类物质作为中药的主要免疫活性成分,在鱼类养殖中展现出多重生理功能。中药多糖类饲料添加剂不仅能够促进鱼类生长、增强抗氧化能力,还可有效调节免疫应答、提升抗病力和抗应激能力,具有广阔的应用前景<sup>[53]</sup>。目前,已有多种中药多糖被用于水产养殖,包括地黄多糖、黄芪多糖、人参多糖、牛膝多糖等<sup>[54-57]</sup>。

研究表明,地黄多糖不仅能促进鲤鱼头肾细胞增殖和吞噬功能,诱导细胞因子与NO的释放,还能在连续灌胃7 d后显著提高鲤鱼体内的抗氧化物质水平以及LZM和ALP活性。此外,在病原菌感染过程中,地黄多糖还展现出体内抗嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)的作用<sup>[57]</sup>。WU等<sup>[58]</sup>在大鳞鲃(*Luciobarbuscapito*,俗称淡水银鲃)日粮中添加0.2%熟地黄多糖60 d,研究结果表明,添加0.2%熟地黄多糖能显著提升大鳞鲃的生长性能,增强先天免疫应答,并通过上调免疫相关基因IL-1 $\beta$ 、IL-8、TNF- $\alpha$ 、IFN- $\gamma$ 和生长相关基因生长激素(GH)、胰岛素样生长因子1(IGF-1)、IGF-2的表达,从而增强对嗜水气单胞菌的抗病力。此外,研究显示,在鲤鱼饲料中添加地黄类制剂可显著促进生长、增强免疫机能并预防病原感染<sup>[59]</sup>。上述结果表明,地黄多糖在细胞和宿主水平均具有显著的免疫调节作用,地黄多糖及地黄制剂可作为鱼类养殖中新型免疫增强剂的开发来源。

## 3 展望

地黄多糖作为中药地黄主要活性组分展现出

多种生物学效应,在动物营养领域具有重要应用价值。该活性成分作为新型饲料补充剂,不仅能有效促进畜禽及水产动物生长,还可提升其免疫防御能力,同时具备环境友好、无公害等特点,在畜禽以及水产养殖领域应用前景广阔。然而,现有研究多集中于地黄多糖的提取纯化、结构鉴定及生物活性检测层面,且不同炮制方法所得多糖的结构与功能存在差异,目前缺乏对其精确结构特征及具体作用机制的深入研究。另外,地黄多糖缺乏标准化的提取工艺和临床给药方案,并且稳定性与靶向性不足也导致其临床应用存在局限性。鉴于多糖结构的复杂性,地黄多糖可通过化学改性或金属元素螯合等方式进行结构优化<sup>[60]</sup>。总之,地黄多糖的化学修饰在药物研发领域展现出巨大潜力。

随着现代中药药理学和分离提纯技术的进步,中药多糖已成为当前中药研究的热点方向。随着地黄多糖在畜禽养殖领域的深入应用,其多重功效将得到进一步验证和开发,有望成为推动绿色养殖发展的关键性功能添加剂,为养殖业提质增效提供新的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 王清泉,宋景,李亚男,等.地黄多糖的提取纯化及药理作用研究进展[J].中草药,2023,54(11):3734-3744.  
WANG Q Q, SONG J, LI Y N, et al. Research progress on extraction, purification and pharmacological action of *Rehmannia glutinosa* polysaccharides[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(11): 3734-3744.
- [2] 郑惠文,沈晓杰,黄艳青,等.基于文献计量学生地黄药理作用的研究[J].中医临床研究,2024,16(6):1-8.  
ZHENG H W, SHEN X J, HUANG Y Q, et al. A study on pharmacological action of Shengdihuang based on bibliometrics [J]. Clinical Journal of Chinese Medicine, 2024, 16(6): 1-8.
- [3] 崔瑛,房晓娜,王会霞,等.地黄不同炮制品补血作用研究[J].时珍国医国药,2009,20(1):20-22.  
CUI Y, FANG X N, WANG H X, et al. Study on the blood enrichment of three different processed products of *Radix rehmanniae*[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2009, 20(1): 20-22.
- [4] 李雪丽,雷根平,陆娴,等.生地黄药理作用研究进展[J].辽宁中医药大学学报,2024,26(12):135-139.  
LI X L, LEI G P, LU X, et al. Progress on the pharmacological effects of shengdihuang (*rehmanniae Radix*) [J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2024, 26(12): 135-139.
- [5] 陈金鹏,张克霞,刘毅,等.地黄化学成分和药理作用的研究进展[J].中草药,2021,52(6):1772-1784.  
CHEN J P, ZHANG K X, LIU Y, et al. Research progress on

- chemical constituents and pharmacological actions of *Rehmannia glutinosa*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(6):1772-1784.
- [6] 李国辉, 刘佳, 刘建伟, 等. 地黄提取物对小鼠免疫功能的影响[J]. 中国兽医学报, 2018, 38(4):765-769.  
LI G H, LIU J, LIU J W, et al. Effects of *Rehmannia glutinosa* extract on immune function of mice[J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2018, 38(4):765-769.
- [7] 李红伟, 孟祥乐. 地黄化学成分及其药理作用研究进展[J]. 药物评价研究, 2015, 38(2):218-228.  
LI H W, MENG X L. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Rehmannia glutinosa*[J]. Drug Evaluation Research, 2015, 38(2):218-228.
- [8] JIA J H, CHEN J F, WANG G L, et al. Progress of research into the pharmacological effect and clinical application of the traditional Chinese medicine *Rehmanniae Radix*[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 168: 115809.
- [9] 赵婧含, 李雪, 吴文轩, 等. 生地黄提取物及其有效成分的药理作用研究进展[J]. 药物评价研究, 2024, 47(10):2443-2448.  
ZHAO J H, LI X, WU W X, et al. Research progress on pharmacological effects of *Rehmannia glutinosa* extract and its effective components[J]. Drug Evaluation Research, 2024, 47(10):2443-2448.
- [10] YANG B, LI X F, BADRAN A M M, et al. Effects of dietary incorporation of *Radix rehmanniae praeparata* polysaccharide on growth performance, digestive physiology, blood metabolites, meat quality, and *Tibia* characteristics in broiler chickens [J]. Poultry Science, 2023, 102(12):103150.
- [11] JIA Y H, ZHANG Z Q, ZHANG S M, et al. Effects of polysaccharide from hot-compressed steamed *Rehmannia glutinosa* on the immune system and gut microbiota in an immunosuppressed mice model[J]. International Immunopharmacology, 2024, 142:113202.
- [12] KWAK M, YU K, LEE P C, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharide functions as a mucosal adjuvant to induce dendritic cell activation in mediastinal lymph node[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120 (Pt B) : 1618-1623.
- [13] WAN X H, YIN Y M, ZHOU C Z, et al. Polysaccharides derived from Chinese medicinal herbs: a promising choice of vaccine adjuvants[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 276:118739.
- [14] 薛沾枚, 张备, 张艳, 等. 中药多糖对鸡生产性能影响的研究进展[J]. 现代畜牧科技, 2021(11):30-32.  
XUE Z M, ZHANG B, ZHANG Y, et al. Research progress on the effect of traditional Chinese medicine polysaccharide on chicken performance[J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2021(11):30-32.
- [15] 赵岩, 李莉, 徐婷婷, 等. 中药多糖的提取及其在畜禽养殖应用研究进展[J]. 福建畜牧兽医, 2024, 46(4):60-62.  
ZHAO Y, LI L, XU T T, et al. Research progress on the extraction of polysaccharides from traditional Chinese medicine and their application in animal husbandry[J]. Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine Fujian, 2024, 46(4):60-62.
- [16] 朱伟杰, 刘建伟. 中草药及其多糖在畜禽养殖中应用的研究进展[J]. 畜禽业, 2011(2):38-40.  
ZHU W J, LIU J W. Research of Chinese herbal medicine and amylose to apply in animal[J]. Livestock and Poultry Industry, 2011(2):38-40.
- [17] 王志江, 魏国栋, 马思缙. 地黄多糖的化学和药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(16):231-234.  
WANG Z J, WEI G D, MA S T. Chemical and pharmacological effects of *rehmanniae Radix* polysaccharides[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2015, 21(16):231-234.
- [18] 唐婷. 地黄多糖提取纯化、结构表征及生物活性研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.  
TANG T. Extraction, purification, structural characterization and bioactivity of polysaccharides from *Rehmannia glutinosa* libosch[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2023.
- [19] LÜ H, JIA H P, CAI W J, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharides attenuates colitis *via* reshaping gut microbiota and short-chain fatty acid production[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(8):3926-3938.
- [20] 董发亮, 李翠娟, 史永超, 等. 熟地黄的药理作用研究进展[J]. 环球中医药, 2025, 18(5):1065-1070.  
DONG F L, LI C J, SHI Y C, et al. Research progress on pharmacological effects of *Rehmanniae Radix Praeparata*[J]. Global Traditional Chinese Medicine, 2025, 18(5):1065-1070.
- [21] BIAN Z Y, ZHANG R, ZHANG X, et al. Extraction, structure and bioactivities of polysaccharides from *Rehmannia glutinosa*: a review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 305:116132.
- [22] 赵素容, 卢克伟, 袁丽珍, 等. 地黄多糖对小鼠免疫功能的影响[J]. 军事医学科学院院刊, 2006, 30(3):217-219.  
ZHAO S R, LU Y W, YUAN L Z, et al. Effects of *Rehmannia glutinosa* polysaccharide on immune function of mice[J]. Bulletin of the Academy of Military Medical Sciences, 2006, 30(3):217-219.
- [23] YU L, SHI X F, LU X Q, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharides alleviate cyclophosphamide-induced immunosuppression by enhancing immunity and restoring intestinal homeostasis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311(Pt 1):143692.
- [24] 王小兰, 段鹏飞, 杨梦, 等. 生地黄多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠的免疫调节作用研究[J]. 上海中医药大学学报, 2021, 35(1):55-60.  
WANG X L, DUAN P F, YANG M, et al. Study on immunomodulatory effects of *Radix Rehmanniae recens* polysaccharide on cyclophosphamide-induced immunosuppression in mice [J]. Academic Journal of Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 35(1):55-60.
- [25] 徐倩倩, 杨万群, 王玉波, 等. 熟地黄多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠的免疫调节作用研究[J]. 中国畜牧兽医, 2023, 50(2):693-703.  
XU Q Q, YANG W Q, WANG Y B, et al. Study on immunomodulatory effect of prepared *Radix rehmanniae* polysaccharide on cyclophosphamide-induced immunosuppression in mice [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2023,

- 50(2):693-703.
- [26] OU L, KANG W Q, ZHANG J H, et al. Effects of *Rehmannia glutinosa* polysaccharides on bone tissue structure and skeletal muscle atrophy in rats with disuse[J]. Acta Cirurgica Brasileira, 2021, 36(4):e360403.
- [27] QIAO H Z, REN H, LIU Q Y, et al. Anti-inflammatory effects of *Rehmannia glutinosa* polysaccharide on LPS-induced acute liver injury in mice and related underlying mechanisms [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 351:120099.
- [28] 吕弯弯, 赵茂娇, 李科, 等. 地黄多糖对DSS诱导的小鼠溃疡性结肠炎的治疗作用[J]. 山西医科大学学报, 2024, 55(7):863-871.
- LÜ W W, ZHAO M J, LI K, et al. Therapeutic effect of *Rehmannia glutinosa* polysaccharide on DSS-induced ulcerative colitis in mice[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2024, 55(7):863-871.
- [29] ZHOU Y, WANG S C, FENG W S, et al. Structural characterization and immunomodulatory activities of two polysaccharides from *Rehmanniae Radix Praeparata*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186:385-395.
- [30] 何彦锋, 徐婷婷, 陈盼, 等. 肠道菌群对骨代谢影响的研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(4):33-38.
- HE Y F, XU T T, CHEN P, et al. Research progress of the effects of gut flora on bone metabolism[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2022, 43(4):33-38.
- [31] YU L, LIN F Z, YU Y M, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharides enhance intestinal immunity of mice through regulating the microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283:137878.
- [32] ZHANG W S, CUI N, SU F Z, et al. Effects of *Rehmanniae Radix Praeparata* polysaccharides on LPS-induced immune activation in mice based on gut microbiota, metabolomics and transcriptomics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311(Pt 3):143981.
- [33] LIU C Y, MA R F, WANG L L, et al. *Rehmanniae Radix* in osteoporosis: a review of traditional Chinese medicinal uses, phytochemistry, pharmacokinetics and pharmacology[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2017, 198:351-362.
- [34] 岳涛静, 路亚男, 丁文丽, 等. 中药多糖对动物骨骼健康保护机制的研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(6):899-907.
- YUE T J, LU Y N, DING W L, et al. Research progress on protective mechanism of Chinese herbal polysaccharide on animal bone health[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024, 58(6):899-907.
- [35] GONG W, ZHANG N D, CHENG G, et al. *Rehmannia glutinosa* libosch extracts prevent bone loss and architectural deterioration and enhance osteoblastic bone formation by regulating the IGF-1/PI3K/mTOR pathway in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(16):3964.
- [36] OK O, WON K, YEO K, et al. Effect of *Rehmannia glutinosa* Libosch extracts on bone metabolism[J]. Clinica Chimica Acta; International Journal of Clinical Chemistry, 2003, 334(1/2):185-195.
- [37] ZHANG W H, GUO R Z, HU X T, et al. Enhanced osteoinduction and osteogenesis promotion by bovine freeze-dried bone combined with *Rehmannia glutinosa* libosch polysaccharide on bone defect and fracture repair in rats[J]. ACS Omega, 2025, 10(9):9583-9592.
- [38] 杨鑫, 王绍宇, 童畅, 等. 畜禽粪污源抗生素抗性基因的水平转移研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2025, 56(9):4279-4293.
- YANG X, WANG S Y, TONG C, et al. Research progress on the horizontal gene transfer of antibiotic resistance genes from livestock and poultry manure[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2025, 56(9):4279-4293.
- [39] 全贵阳, 刘茜. 畜禽养殖兽药使用中存在的问题及对策建议[J]. 现代畜牧科技, 2025(2):140-143.
- QUAN G Y, LIU Q. Problems and countermeasures in veterinary drug use in poultry and livestock farming[J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2025(2):140-143.
- [40] XU B W, LI S S, DING W L, et al. From structure to function: a comprehensive overview of polysaccharide roles and applications[J]. Food Frontiers, 2024, 6(1):15-39.
- [41] 杨植, 王煜轩, 龚诗淼, 等. 扶正类中药多糖调控畜禽免疫功能的研究进展[J]. 中国兽医杂志, 2024, 60(4):111-119.
- YANG Z, WANG Y X, GONG S M, et al. Research progress on the regulation of immune function of livestock and poultry by fuzheng Chinese medicinal polysaccharides[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2024, 60(4):111-119.
- [42] 王慧敏, 李少宁, 李静, 等. 兽用抗菌药替代在养猪生产中的应用研究进展[J]. 山东畜牧兽医, 2024, 45(11):91-92.
- WANG H M, LI S N, LI J, et al. Research progress on the application of veterinary antibacterial drug substitution in pig production[J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2024, 45(11):91-92.
- [43] 张汉宇, 兰干球, 梁晶. 饲料中添加地黄多糖对母猪繁殖性能和育肥猪生长性能的影响[J]. 中国猪业, 2025, 20(2):93-100.
- ZHANG H N, LAN G Q, LIANG J. Effects of *Rehmannia* polysaccharides on the reproductive performance of sows and the growth performance of fattening pigs[J]. China Swine Industry, 2025, 20(2):93-100.
- [44] 杜金凤, 范丁, 谢文伟, 等. 熟地黄多糖对猪精液低温保存效果的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(8):353-357.
- DU J F, FAN D, XIE W W, et al. Effect of *Radix rehmanniae* preparata polysaccharide on cryopreservation of pig semen [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(8):353-357.
- [45] 严梓贤. 几例种公猪性欲下降病例的治疗体会[J]. 猪业科学, 2016, 33(12):132-133.
- YAN Z X. Treatment experience of several cases of decreased libido in boars[J]. Swine Industry Science, 2016, 33(12):132-133.
- [46] HUANG Y E, LIU Z G, BO R N, et al. The enhanced immune response of PCV-2 vaccine using *Rehmannia glutinosa* polysaccharide liposome as an adjuvant[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86:929-936.
- [47] HUAN C C, YAO J T, WANG X T, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharide exerts antiviral activity against pseudorabies virus and antioxidant activity[J]. International Journal of

- Biological Macromolecules, 2024, 274(Pt 2):133455.
- [48] 赵桂玲,李慧,张瑞强,等. 黄芪多糖在畜禽养殖中的应用研究进展[J]. 饲料工业, 2022, 43(15):7-11.  
ZHAO G L, LI H, ZHANG R Q, et al. Research progress in application of *Astragalus* polysaccharide in livestock and poultry breeding[J]. Feed Industry, 2022, 43(15):7-11.
- [49] 王明武,梁晓晓,王全亮,等. 酵母多糖对肉鸡的生长性能和屠宰性能的影响[J]. 现代牧业, 2020, 4(2):34-36.  
WANG M W, LIANG X X, WANG Q L, et al. Effects of yeast polysaccharide on the growth and carcass traits in broilers[J]. Modern Animal Husbandry, 2020, 4(2):34-36.
- [50] 刘培培,臧素敏,王娟,等. 螺旋藻粉、地黄多糖和益母草提取物对蛋鸡蛋品质和部分生化指标的影响[J]. 中国家禽, 2016, 38(12):25-30.  
LIU P P, ZANG S M, WANG J, et al. Effect of *Spirulina* powder, *Rehmannia glutinosa* polysaccharides and motherwort extract on eggs quality and serum biochemical indexes of laying hens[J]. China Poultry, 2016, 38(12):25-30.
- [51] 张静静,王杰,徐杰. 中草药在水产养殖中应用的现状及展望[J]. 黑龙江水产, 2025, 44(2):194-198.  
ZHANG J J, WANG J, XU J. Current situation and prospect of Chinese herbal medicine in aquaculture[J]. Heilongjiang Fisheries, 2025, 44(2):194-198.
- [52] 陈昌福,冯东岳,陈辉,等. 渔用中药的研制和使用应该改变思路[J]. 当代水产, 2016, 41(6):72-73.  
CHEN C F, FENG D Y, CHEN H, et al. The development and use of fishery traditional Chinese medicine should change the way of thinking[J]. Current Fisheries, 2016, 41(6):72-73.
- [53] 秦俊杰,梁化亮,黄东宇,等. 多糖类饲料添加剂在鱼类饲料中应用的研究进展[J]. 饲料工业, 2025, 46(5):25-32.  
QIN J J, LIANG H L, HUANG D Y, et al. Research progress of application of polysaccharide feed additives in fish feed[J]. Feed Industry, 2025, 46(5):25-32.
- [54] 刘家桃,司永国,汪云,等. 黄芪多糖、人参多糖和辣木粉对凡纳滨对虾及其后代免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(6):3888-3901.  
LIU J T, SI Y G, WANG Y, et al. Effects of *Astragalus* polysaccharides, ginseng polysaccharides and *Moringa oleifera* powder on immune function and antioxidant capacity of *Litopenaeus vannamei* and its offspring[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(6):3888-3901.
- [55] 王煜恒,陈军,闫洪凯,等. 黄芪多糖在水产养殖中的应用[J]. 饲料研究, 2016, 39(24):38-44.  
WANG Y H, CHEN J, YAN H K, et al. Application of *Astragalus* polysaccharides in aquaculture[J]. Feed Research, 2016, 39(24):38-44.
- [56] 王红权,唐德约,赵玉蓉,等. 牛膝多糖对草鱼免疫和抗氧化功能的影响[J]. 水生生物学报, 2013(2):351-357.  
WANG H Q, TANG D Y, ZHAO Y R, et al. Effects of dietary *Achyranthes bidentata* polysaccharide on immunity and antioxidant function of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013(2):351-357.
- [57] FENG J C, CAI Z L, ZHANG X P, et al. The effects of oral *Rehmannia glutinosa* polysaccharide administration on immune responses, antioxidant activity and resistance against *Aeromonas hydrophila* in the common carp, *Cyprinus carpio* L.[J]. Frontiers in Immunology, 2020, 11:904.
- [58] WU C, SHAN J F, FENG J C, et al. Effects of dietary *Radix Rehmanniae Preparata* polysaccharides on the growth performance, immune response and disease resistance of *Luciobarbus Capito*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 89:641-646.
- [59] WANG J L, MENG X L, LU R H, et al. Effects of *Rehmannia glutinosa* on growth performance, immunological parameters and disease resistance to *Aeromonas hydrophila* in common carp (*Cyprinus carpio* L.) [J]. Aquaculture, 2015, 435:293-300.
- [60] HUANG L, ZHANG H B, XIA W R, et al. Structural characteristics, biological activities and market applications of *Rehmannia radix* polysaccharides: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(Pt1):136554.