

海藻多糖的生物学功能及在奶山羊生产中的应用与展望

王旭淦，徐小龙，安小鹏*

（西北农林科技大学动物科技学院，陕西咸阳，712100）

摘要：在饲料端全面“禁抗”与畜牧业“低碳”转型的双重战略驱动下，开发天然、绿色、高效的饲用替抗添加剂已成为养殖业可持续发展的迫切需求。海藻多糖作为源自海洋藻类的天然活性大分子物质，凭借其独特的结构特征与多维度的生物学功能，成为当前饲用添加剂领域的研究热点之一。本文系统梳理褐藻、红藻、绿藻及微藻多糖的分类、结构特征与核心生物学功能；综述其在单胃动物与反刍动物生产中的应用研究进展，重点剖析海藻多糖在奶山羊瘤胃发酵调控、免疫机能增强、泌乳性能改善及肠道健康维护等方面的应用潜力与机制；明确了当前研究与产业化应用中存在的关键问题，并提出针对性的未来研究方向与产业化应用建议，旨在为海藻多糖在奶山羊绿色健康养殖中的科学应用提供系统的理论参考。

关键词：海藻多糖；奶山羊；替抗；绿色饲料添加剂；生产性能；肠道健康

文章编号：1671-4393(2026)06-0021-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.03

Biological Functions of Algal Polysaccharides and their Application and Prospects in Dairy Goat Production

WANG Xugan, XU Xiaolong, AN Xiaopeng*

（College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling Demonstration Zone, Xianyang Shaanxi 712100）

Abstract: Driven by the dual strategies of the comprehensive "antibiotic ban" in feed and the "low-carbon" transformation of animal husbandry developing natural, green and efficient antibiotic-substitute feed additives has become an urgent demand for the sustainable development of the breeding industry. As natural active

基金项目：陕西省重点研发计划（2024NC-ZDCYL-03-01，2024NC-YBXM-082，2024NC-GJHX-22，2025CY-JJQ-201）；陕西省中央引导地方科技发展专项资金（2024ZY-CGZY-20，2024ZY-CGZY-22）；陕西省农业关键核心技术（2025NYGG004）；2025年东西部协作财政援助资金县级科技计划（QY-HS-2025A-01）

作者简介：王旭淦（2002-），男，甘肃武威人，在读硕士，研究方向为动物遗传育种与繁殖；
徐小龙（1996-），男，甘肃武威人，在读博士，研究方向为动物遗传育种与繁殖。

***通信作者：**安小鹏（1984-），男，陕西周至人，博士，研究员，博士生导师，研究方向为动物生物技术与动物生殖生理调控。

macromolecules derived from marine algae, algal polysaccharides have become one of the research hotspots in the field of feed additives due to their unique structural characteristics and multi-dimensional biological functions. This paper systematically reviewed the classification, structural characteristics and core biological functions of brown algae, red algae, green algae and microalgae polysaccharides. This paper reviewed the research progress of their application in monogastric animal and ruminant production, focusing on their application potential and mechanisms in regulating rumen fermentation, enhancing immune function, improving lactation performance and maintaining intestinal health in dairy goats. This paper identified the key problems existing in current research and industrial application, and proposed targeted future research directions and industrial application suggestions, aiming to provide a systematic theoretical reference for the scientific application of algal polysaccharides in the green and healthy breeding of dairy goats.

Keywords: algal polysaccharides; dairy goat; antibiotic replacement; green feed additive; production performance; intestinal health

随着全球人口增长与居民生活水平的提升,消费者对畜禽产品的品质与安全要求日益提高,畜牧业养殖模式向绿色、健康、“低碳”方向转型已成为必然趋势。抗生素在饲料中的长期滥用不仅会导致畜禽产品药物残留、肠道菌群失衡,还易诱导耐药菌株产生,严重威胁公共卫生安全。我国自2020年起全面实施饲料端“禁抗”政策,“替抗”产品的研发与应用成为行业发展的核心课题^[1]。目前,中草药、酸化剂、植物提取物、抗菌肽等天然替抗产品已在养殖生产中逐步推广,其中海藻多糖作为海洋植物提取物的重要成员,因来源广泛、结构多样、生物活性丰富且无残留、无污染的特性,成为替抗添加剂的优质候选材料^[2]。

海藻多糖是从海洋褐藻、红藻、绿藻及微藻中提取的一类水溶性天然大分子物质,其单糖组成、糖苷键连接方式及硫酸酯化程度的差异使其具有免疫调节、抗氧化、肠道菌群调控、瘤胃发酵优化等多维度生物学功能。近年来,海藻多糖在猪、鸡等单胃动物及水产养殖中的应用效果已得到广泛证实^[2, 3],可有效缓解动物应激、改善肠道健康、提升生产性能;在反刍动物领域,相关研究也表明海藻多糖能通过调控瘤胃微生物区系、增强宿主免疫屏障、缓解氧化应激等途径,改善肉牛、肉羊、犊牛

的生长性能与健康水平^[4, 5]。但现有研究多集中于上述畜种,针对奶山羊这一特色乳用反刍动物的系统性研究极为匮乏,相关研究存在场景碎片化、作用机制阐述不清、精准剂量体系缺失等问题,严重制约了其在奶山羊生产中的科学应用。

奶山羊产业是我国特色畜牧业的重要组成部分,在优化国民膳食结构、促进乡村振兴与区域经济发展中发挥着重要作用。当前我国奶山羊存栏量与羊奶产量持续增长,但产业发展仍面临诸多瓶颈:断奶羔羊应激性腹泻发生率高、成活率低;泌乳期奶山羊乳房炎频发、泌乳性能不稳定;瘤胃甲烷排放量大、饲料利用率低等问题日益凸显^[6]。同时,《饲料添加剂安全使用规范》等法规的严格执行,对奶山羊养殖中饲用添加剂的安全性与高效性提出了更高要求^[7]。因此,挖掘海藻多糖在奶山羊生产中的应用潜力,解析其作用机制,构建精准应用体系,对推动奶山羊产业绿色健康发展具有重要意义。

基于上述背景,本文在系统梳理海藻多糖分类、结构特性与生物学功能的基础上,综述了其在单胃动物和反刍动物生产中的应用研究进展,重点围绕海藻多糖在奶山羊瘤胃发酵调控、免疫增强、泌乳性能改善及肠道健康维护等方面的应用潜力与

作用机制进行剖析，同时分析了当前研究与产业化应用中面临的关键问题，并针对性地提出了未来研究方向与产业化应用建议，以期海藻多糖在奶山羊养殖中的科学应用提供理论参考。

1 海藻多糖的分类和结构

根据来源不同，海藻多糖主要分为褐藻多糖、红藻多糖、绿藻多糖和微藻多糖四大类，各类多糖的单糖组成、糖苷键连接方式、硫酸酯化程度等结构特征存在显著差异，而这些结构差异正是其物理化学性质与生物学功能特异性的核心决定因素（表1）^[8-10]。

褐藻多糖是研究最深入的海藻多糖之一，其中岩藻多糖的核心结构为L-岩藻糖通过 α -1, 3或 α -1, 4糖苷键连接形成的主链，且分子中含有大量硫酸酯基，部分还含有甘露糖、葡萄糖等杂糖，复杂的支链结构与高硫酸酯化程度是其生物活性的重要结构基础。红藻多糖中的卡拉胶为线性半乳糖，其特有的 α -1, 3和 β -1, 4糖苷键交替连接方式使其形成稳定的螺旋结构，可通过分子间的氢键作用形成凝胶，为其肠道黏膜保护功能提供结构支撑。绿藻多糖以浒苔多糖为代表，其分子中同时含有硫酸酯基与糖醛酸，兼具亲水性与带电性，水溶性优异，易被肠道微生物利用，是优良的益生元前体。微藻多糖与其他三类多糖不同，常以糖蛋白、糖脂的复合物形式存在，且富集多种微量元素，可同时实现活性调控与营养补充的双重效果。

2 海藻多糖在畜禽生产中的应用研究进展

2022年，欧盟食品安全局（EFSA）饲料添加剂和产品专家组通过检测证实，褐藻来源的海藻酸钠不属于典型海藻多糖代表，其在瘤胃中作用方式与硫酸化多糖差异较大，作为饲料添加剂使用安全性需限定适用场景，且在畜禽肉品中无残留，这一结论为海藻多糖在畜禽养殖中的规模化应用奠定了重要的法规基础。目前，海藻多糖在单胃动物与反刍动物生产中的应用研究已取得诸多进展，替抗潜力与生产性能改善效果得到初步验证，为其在奶山羊生产中的应用提供重要的跨物种参考。

2.1 在单胃动物生产中的应用

海藻多糖在猪、鸡等单胃动物生产中的应用研究较系统，核心应用效果集中于缓解断奶、热应激等不良应激，改善肠道健康，提升机体免疫与抗氧化能力，进而提高生产性能。在养猪生产中，日粮添加600 mg/kg海藻多糖可显著缓解断奶仔猪应激性腹泻。刘永童^[18]研究证实，该剂量可有效提升仔猪血清抗氧化酶活性，降低腹泻发生率；林海川^[19]研究表明，相近剂量海藻多糖能够改善仔猪肠道屏障功能，优化盲肠微生物群落结构；杨晋^[20]进一步明确，600 mg/kg为海藻多糖替代饲用抗生素的适宜添加剂量；曲元凯等^[21]采用海带酶解多糖（等效添加量接近600 mg/kg）证实其可显著优化仔猪肠道形态，促进肠道有益菌群增殖，降低料重比。对于育肥猪，海藻多糖可显著提高日增重，改善屠宰性能

表 1 海藻多糖结构特征及核心功能

Table 1 Structural Characteristics and Core Functions of Algal Polysaccharides

来源	类别	代表多糖	主要单糖组成与结构特点	核心功能
褐藻	褐藻多糖	岩藻多糖 海藻酸	以L-岩藻糖为主链，含大量硫酸酯基，结构复杂多样	抗肿瘤、抗氧化、抗炎、抗病毒和免疫调节 ^[11, 12] ，侧重肠道屏障与免疫激活。
红藻	红藻多糖	卡拉胶 琼胶	由D-半乳糖和3, 6-内醚-D-半乳糖通过交替的 α -1, 3和 β -1, 4糖苷键连接，形成刚性的螺旋结构	抗凝血、抗病毒、降血脂、肠道黏膜保护 ^[13, 14] ，侧重黏膜屏障与抑菌
绿藻	绿藻多糖	浒苔多糖 石莼聚糖	富含鼠李糖、葡萄糖醛酸、木糖等，含有硫酸酯基和糖醛酸，水溶性好 ^[15] 。	免疫调节、抗氧化、调节肠道菌群、促生长 ^[16] ，侧重益生元与代谢调节。
微藻	微藻多糖	螺旋藻多糖 小球藻多糖	结构复杂，常与蛋白质、脂类结合，富含微量元素（如硒）	强效抗氧化、增强免疫、微量元素载体 ^[17] ，侧重抗氧化与营养整合。

与肉品质，还能促进肝脏对铜、铁、锌等微量元素的沉积，提升肉品营养价值^[22]。

在养鸡生产中，海藻多糖的应用重点集中于应激缓解与免疫增强。Liu等^[23]发现，日粮添加藻源性多糖可有效改善热应激肉鸡的肠道黏膜损伤，提高肠道抗氧化能力与免疫应答水平；浒苔多糖还能减轻黄曲霉毒素诱导的肉鸡肝毒性，展现出一定的解毒与抗病毒作用^[24]。迟玉华等^[25]研究表明，海藻多糖可提高肉鸡饲料转化率与日增重，降低群体发病率；孙文悦^[26]虽发现海藻多糖对 SPF 鸡群的生长促进作用不显著，但能显著促进免疫器官发育，增强机体免疫功能，且无任何毒害副作用。此外，海藻硫酸多糖还可有效缓解雏鸡断喙应激引发的脾脏炎症反应，降低应激损伤^[27]。

2.2 在反刍动物生产中的应用

海藻多糖在反刍动物生产中的应用研究聚焦于瘤胃微生态调控、断奶应激缓解、生产性能提升等，相关研究成果为其在奶山羊生产中的应用提供直接参考。在绵羊养殖中，代乳粉中添加0.3%海藻多糖可显著促进断奶羔羊的日增重，提升免疫器官指数，增强机体抗氧化与体液免疫功能，同时有效缓解断奶应激性腹泻^[28]。李连涛^[29]发现，海带酶解液可改善绵羊的采食效果，对瘤胃发酵参数与菌群结构具有一定的调控作用；李秀芝^[30]将海藻多糖与其他活性物质对比研究发现，海藻多糖可显著提高湖羊干物质采食量，降低料重比，提升胴体重与屠宰率，其效果虽较其他活性物质无显著优势，但较对照组仍有明显提升。

在肉牛养殖生产中，海藻多糖的应用展现出多元化的潜力。Mahdi等^[31]发现，在水牛冷冻精液稀释液中添加海藻酸钠，可显著提升精子的长期冷冻保存质量，且能有效抑制细菌滋生，抗菌效果显著，有望替代传统精液保存中的抗生素。Zhao等^[32]通过微生物组学与代谢组学分析发现，日粮添加海藻多糖可显著降低断奶前荷斯坦犊牛的腹泻率，促进生长性能，提升日增重，同时能调节肠道菌群结构，促进有益菌丰度提升，降低致病菌比例，增强机体

抗氧化与免疫水平。

3 海藻多糖在奶山羊生产中的应用潜力与作用机制

奶山羊作为特有的乳用反刍动物，其瘤胃发酵特性、乳腺代谢规律、生理阶段特点与肉牛、绵羊等反刍动物存在显著差异。结合海藻多糖的生物学功能及反刍动物应用研究成果，海藻多糖在奶山羊生产中具备多维度的应用潜力，可通过调控瘤胃发酵、增强免疫机能、改善泌乳性能、维护肠道健康等途径，解决奶山羊生产养殖中的核心生产问题，且作用效果受多糖来源、添加剂量、奶山羊生理阶段及基础日粮的综合调控^[33]。

3.1 调控瘤胃发酵模式，实现甲烷减排与饲料利用率提升

瘤胃发酵效率是决定奶山羊生产性能与养殖环境效益的核心因素，而海藻多糖中褐藻与红藻来源的硫酸化多糖，可通过重塑瘤胃微生物群落结构，优化瘤胃发酵模式，实现甲烷减排与饲料利用率的双重提升。研究表明，在断奶羔羊日粮中添加0.3%岩藻多糖，可显著改变瘤胃细菌组成，提高瘤胃液中乙酸的比例，同时降低单位干物质采食量对应的甲烷产量^[34]；体外发酵实验证实^[35]，红藻*Kappaphycus alvarezii*提取物可有效抑制瘤胃产甲烷古菌的活性，减少甲烷生成，同时调节挥发性脂肪酸的产出比例，提升瘤胃发酵效率。针对西农萨能奶山羊的研究^[36]也发现，日粮中添加海藻粉可显著影响瘤胃发酵参数，为生产性能的改善奠定基础。

海藻多糖调控瘤胃发酵与甲烷减排的机制主要与瘤胃微生物区系的重塑相关：一方面，硫酸化多糖可直接抑制瘤胃中产甲烷古菌的生长与代谢，减少甲烷合成；另一方面，其可促进纤维分解菌、产酸菌等有益菌的增殖，提高饲料中粗纤维的降解效率，增加乙酸、丙酸等短链脂肪酸的产量，提升饲料能量利用率^[37, 38]。该特性不仅能改善奶山羊的生产性能，还能降低反刍动物养殖过程中的甲

烷排放,契合畜牧业“低碳”转型的发展需求。但目前相关研究仍存在物种与剂量依赖性,针对不同泌乳阶段、不同品种奶山羊的精准添加方案仍需深入探索。

3.2 多靶点调控免疫系统,增强机体疾病抵抗力

奶山羊在断奶、转群、泌乳高峰等关键生理阶段易受应激影响,导致免疫屏障功能下降,乳房炎、肠道疾病等发病率升高。海藻多糖可通过多靶点、多通路调控宿主免疫系统,增强机体非特异性与特异性免疫能力,其免疫活性与多糖分子中硫酸酯基的含量、分布及分子量大小密切相关。Bahramzadeh等^[39]发现,从褐藻*Cystoseira indica*中提取的硫酸化多糖可显著激活小鼠巨噬细胞RAW264.7(小鼠巨噬细胞系),提高其吞噬活性,促进促炎细胞因子IL-1 β 、TNF- α 分泌,且该效应与多糖的硫酸化程度呈显著正相关。Jayawardena等^[40]证实,马尾藻来源的岩藻多糖可通过抑制TLR介导的MyD88、IKK复合物,剂量依赖性下调iNOS、COX-2及TNF- α 、IL-6等炎症因子表达,阻碍NF- κ B和MAPK信号通路的激活,从而发挥显著的抗炎作用。

红藻来源的 κ -卡拉胶可通过物理与分子调控双重途径巩固黏膜免疫防线:其特有的凝胶特性可在肠道内形成物理屏障,减少病原体对肠黏膜的侵袭;同时可与肠上皮细胞表面蛋白相互作用,增强ZO-1、Occludin等紧密连接蛋白的表达,提升肠道黏膜屏障完整性^[41]。此外,卡拉胶还具有直接的抗菌与抗病毒活性^[42],为预防奶山羊乳房炎等细菌性疾病提供新的思路。

已有在奶山羊羊群中的研究证实,日粮添加400 mg/kg岩藻多糖可剂量依赖性降低断奶羔羊腹泻发生率,提高平均日增重^[43];其作用机制与机体免疫和抗氧化功能的增强密切相关,该添加方案可显著提升血清中超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶的活性,同时降低丙二醛及IL-1 β 、TNF- α 等炎症因子的含量^[44]。在分子层面,褐藻*Saccharina japonica*来源的岩藻多糖可被巨噬细胞表面的清道夫

受体识别,进而调控免疫应答,实现免疫功能的精准调节^[45]。这些研究表明,海藻多糖可有效缓解奶山羊应激性免疫抑制,增强机体疾病抵抗力,降低养殖过程中的抗生素使用量,契合绿色养殖的发展要求。

3.3 缓解氧化应激,改善泌乳性能与乳品质

泌乳性能是奶山羊养殖经济效益的核心,而高产泌乳易导致奶山羊机体处于氧化应激状态,乳腺细胞损伤加剧,进而影响泌乳量与乳品质。海藻多糖凭借丰富的还原性官能团(羟基、硫酸酯基等)及对机体内源性抗氧化防御系统的激活能力,成为缓解奶山羊泌乳应激、改善泌乳性能的优质添加剂^[46, 47]。罗光宏等^[48]发现,采用微波辅助低共熔溶剂法提取的螺旋藻多糖,其DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)自由基清除率较传统热水提取法提升约70%,抗氧化活性显著增强。在机制层面,褐藻多糖可在应激状态下激活Nrf2信号通路,启动Nrf2介导的抗氧化防御系统,减轻细胞氧化损伤^[49];Fan等^[50]研究证实,马尾藻来源的褐藻糖胶低聚糖可通过解离Keap1-Nrf2复合体,激活Keap1-Nrf2/ARE信号通路,促进下游抗氧化基因的表达,发挥抗氧化应激功能。此外,Kapahi等^[51]优化的超声波-微波顺序辅助提取工艺,可显著提高卡拉胶的提取率与凝胶强度,同时提升其抗氧化活性,为高品质海藻多糖的提取提供技术支撑。

海藻多糖改善奶山羊泌乳性能与乳品质的机制主要体现在三个方面:一是通过优化瘤胃发酵,提高乙酸等短链脂肪酸的产量,而乙酸是乳脂合成乳脂的关键前体,为乳脂合成提供充足的物质基础^[52];但需注意,饲喂未经处理的“生藻”会显著降低反刍动物乳脂含量^[53],与纯化海藻多糖的作用效果存在明显区别。二是通过激活Keap1-Nrf2/ARE内源性抗氧化防御通路,缓解乳腺细胞的氧化应激损伤,保护乳腺泌乳功能。研究表明^[54]岩藻多糖可显著提高泌乳期奶山羊血清总抗氧化能力,有效缓解泌乳应激引发的氧化损伤。三是作为微量元素的优良生物载体,其分子结构中的活性基团可

与锌、硒等微量元素形成稳定的络合物，显著提高这些元素在肠道中的吸收与存留率，如岩藻多糖-锌复合物在羔羊体内的锌存留率远高于无机锌^[55, 56]，该特性不仅能满足泌乳期奶山羊对微量元素的高需求，还为开发富锌、富硒等功能性羊奶产品提供可行的技术路径，有效提升羊奶产品的附加值。

3.4 促进肠道发育，增强肠道屏障功能

肠道健康是奶山羊生长发育与生产性能发挥的基础，尤其是断奶期羔羊，肠道形态与功能尚未发育完善，断奶应激易导致肠道黏膜损伤、屏障功能破坏、菌群失衡，进而引发腹泻。海藻多糖可通过促进肠道形态发育、增强肠道物理屏障、重塑肠道菌群稳态等途径，维护奶山羊肠道健康，其益生元特性与黏膜保护功能是核心作用机制。

研究表明，在断奶羔羊日粮中添加 0.3% 岩藻多糖，可显著提高空肠绒毛高度与隐窝深度的比值（V/C），提升蔗糖酶、麦芽糖酶等消化酶的活性，增强肠道对营养物质的消化吸收能力^[57]。Huang 等人^[58]发现，海藻酸钠可通过上调紧密连接蛋白的表达，逆转肠黏膜损伤，同时显著增加肠道内乳杆菌、罗斯氏菌等有益菌的丰度，降低幽门螺杆菌、消化球菌等致病菌的比例，重塑肠道菌群稳态。此外，添加岩藻多糖可提高羔羊肠道中拟杆菌门、瘤胃球菌科等有益菌群的丰度，降低变形菌门等潜在致病菌比例，构建健康的肠道微生态^[59]。海藻多糖对肠道形态、肠道消化吸收能力与菌群结构的协同调控作用，可有效缓解断奶应激对奶山羊羔羊肠道的损伤，提高群体成活率，为后续生长发育与泌乳性能的发挥奠定坚实基础。

3.5 不同来源海藻多糖的作用差异

不同来源海藻多糖因结构、硫酸酯化程度与单

糖组成不同，在奶山羊体内的作用靶点与效果存在明显分化：褐藻来源的岩藻多糖侧重免疫调节、肠道屏障保护与瘤胃甲烷调控；红藻卡拉胶侧重黏膜保护、抗菌与肠道稳态维持；绿藻浒苔多糖侧重益生元效应与生长促进；微藻多糖侧重抗氧化与微量元素载体功能。实际应用中需根据奶山羊生理阶段与生产目标选择适宜多糖类型（表2）。

4 挑战与展望

尽管前期研究显示海藻多糖在奶山羊生产中具调控瘤胃发酵、增强免疫、改善泌乳及缓解断奶羔羊应激性腹泻等良好前景，但从实验室研究走向产业化应用仍面临多重瓶颈。

目前基础研究针对性不足，成果多集中于断奶羔羊，泌乳期等核心阶段研究匮乏，海藻多糖免疫调控机制未在奶山羊体内验证，其对乳脂、乳蛋白、乳糖等乳品质指标的调控规律仍存在争议，海藻与纯化多糖的作用效果差异亦不明确。产业化技术层面，传统提取成本高，深共熔溶剂提取、微胶囊包埋等绿色技术^[60, 61]尚未规模化应用。安全保障方面，海藻易富集污染物，长期饲喂有重金属累积的潜在危险，当前海藻原料的污染物限量标准尚不完善，羊奶中相关检测方法也亟待建立。

针对上述问题，未来可依托多组学解析代谢与调控通路，明确多糖“结构-功能”关联，针对不同阶段进行研究，强化海藻多糖在奶山羊中的基础研究；推动绿色提取与稳定化技术产业化，提升应用可行性；依据《GB 2762—2025 食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[62]建立海藻原料重金属、微生物毒素等污染物限量标准，完善羊奶污染物检测与限量标准，构建全链条质量监控，保障养殖与

表 2 不同来源海藻多糖在奶山羊不同生理阶段的应用建议

Table 2 Application Recommendations of Algal Polysaccharides from Different Sources at Different Physiological Stages of Dairy Goats			
生理阶段	添加剂种类	推荐添加剂量	核心作用效果
断奶羔羊	岩藻多糖	0.3% ^[28, 44, 57] ；400 mg/kg ^[43]	降低应激性腹泻发生率、提高日增重、改善肠道形态、增强免疫
泌乳期奶山羊	海藻粉 ^[36]	未明确	影响瘤胃发酵参数、改变乳脂脂肪酸组成

注：干奶期奶山羊应用海藻多糖的研究尚属空白，需进一步探索

产品安全。

5 结论

海藻多糖作为结构多样、功能广泛的海洋天然活性物质，在促进奶山羊健康养殖、提升生产性能与实现环境友好方面蕴含巨大潜力。其可通过多途径协同作用，有效缓解断奶羔羊应激性腹泻、增强机体免疫与抗氧化能力、调控瘤胃发酵并降低甲烷排放、改善泌乳性能与乳品质，同时为开发富锌、富硒等功能性羊奶产品提供可行技术路径，是契合“替抗”与“低碳”转型需求的优质天然饲料添加剂。

但目前针对奶山羊的系统性研究仍处于起步阶段，存在基础研究针对性不足、产业化技术瓶颈突出、安全评估体系不健全等核心问题，严重制约其科学应用。未来需通过强化奶山羊特异性基础研究、突破产业化技术瓶颈、构建全链条安全评估体系，推动海藻多糖成为奶山羊绿色健康养殖与提质增效的重要技术抓手，为我国奶山羊产业的可持续发展注入新的科技动力。

参考文献

[1] 马新燕, 李大刚, 余苗, 等. 饲用抗生素替代品在畜禽生产中应用研究进展[J]. 动物营养学报, 2024, 36 (12): 7502-7512.

[2] 孙福昱, 南雪梅, 唐志文, 等. 海藻在畜牧生产中应用研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46 (1): 157-165.

[3] Hindu S V, Chandrasekaran N, Mukherjee A, et al. A review on the impact of seaweed polysaccharide on the growth of probiotic bacteria and its application in aquaculture[J]. Aquaculture International, 2019, 27: 227-238.

[4] 赵鹏, 李承环, 代悦, 等. 饲料中添加海藻在反刍动物甲烷排放和生产应用中的研究进展[J]. 中国饲料, 2024 (19): 20-25, 32.

[5] 张燕, 史健. 海藻多糖对育肥肉羊生长性能、肉品质和肌肉脂肪酸组成的影响[J]. 中国饲料, 2025 (14): 61-64.

[6] 杨恬, 王明明, 郑继康, 等. 减少反刍动物甲烷排放: 从饲料调整到放牧优化[J]. 畜牧兽医学报, 2026, 57 (2): 624-637.

[7] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业部公告第2625号: 关于修订《饲料添加剂安全使用规范》的公告[J]. 广东

畜牧兽医科技, 2018, 43 (1): 1.

[8] 冀莎莎, 巩鑫, 聂慧, 等. 海藻多糖的分子组成及免疫调节活性研究进展[J]. 中国食物与营养, 2025, 31 (12): 82-87.

[9] 李伟豪, 尚秀国, 朱晓萍, 等. 岩藻多糖的生理功能及在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2025, 56 (2): 568-578.

[10] 王鹏, 陈心怡, 耿怡雯, 等. 浒苔多糖的生物学功能及其在动物生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60 (9): 66-70.

[11] Jia H F, Li Y Y, Zheng Y P, et al. Recent advances in fucoidan-based improved delivery systems: Structure, carrier types and biomedical applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 352: 123183.

[12] Udayakumar S, Girigoswami A, Girigoswami K. Biological activities of carrageenan from red algae: A mini review[J]. Current Pharmacology Reports, 2024, 10: 12-26.

[13] Souza R B, Frota A F, Silva J, et al. In vitro activities of kappa-carrageenan isolated from red marine alga Hypnea musciformis: Antimicrobial, anticancer and neuroprotective potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 1248-1256.

[14] Ray B. Polysaccharides from Enteromorpha compressa: Isolation, purification and structural features[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 66 (3): 408-416.

[15] Wassie T, Niu K, Xie C, et al. Extraction techniques, biological activities and health benefits of marine algae Enteromorpha prolifera polysaccharide[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 747928.

[16] Qian Y M, Ma Y Y, Li W, et al. Screening of a readily selenium-enriched Spirulina polysaccharide and characterization of its structure and bioactivity[J]. Algal Research, 2024, 79: 103682.

[17] Afzal O, Gupta G, Kazmi I, et al. The potential, challenges, and prospects of the genus Spirulina polysaccharides as future multipurpose biomacromolecules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268 (2): 131717.

[18] 刘永童. 日粮添加海藻多糖对断奶仔猪生长性能、血清生化指标和免疫功能的影响[J]. 中国饲料, 2023 (24): 42-45.

[19] 林海川. 海藻寡糖对仔猪生产性能、免疫功能和盲肠微生物的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.

[20] 杨晋. 海藻多糖替代抗生素对断奶仔猪生长性能和肠道屏障功能的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.

[21] 曲元凯, 李明潭, 臧建军. 海带酶解液对断奶仔猪生长性能、肠道形态和微生物组成的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36 (9): 5566-5580.

[22] 王立男. 海藻多糖对育肥猪生长性能、屠宰性能和组织微量

- 元素含量的影响[J].中国饲料, 2025 (4): 33-36.
- [23] Liu W C, Zhu Y R, Zhao Z H, et al. Effects of dietary supplementation of algae-derived polysaccharides on morphology, tight junctions, antioxidant capacity and immune response of duodenum in broilers under heat stress[J]. Animals, 2021, 11 (8): 2279.
- [24] Liu W C, Yang Y Y, Pushparaj K, et al. Evaluation of hepatic detoxification effects of *Enteromorpha prolifera* polysaccharides against aflatoxin B1 in broiler chickens[J]. Antioxidants, 2022, 11 (9): 1757.
- [25] 迟玉华, 金凤英, 李晓英, 等.海藻多糖海藻粉饲料添加剂对肉鸡生长及免疫功能影响的研究[J].畜牧兽医学(电子版), 2022 (2): 5-6.
- [26] 孙文悦.海藻多糖对SPF鸡免疫功能及ALV-K复制作用研究[D].泰安: 山东农业大学, 2021.
- [27] 丁梦霞.海藻硫酸多糖对应激诱导的鸡脾脏炎症反应的影响[D].郑州: 河南农业大学, 2023.
- [28] 郭广振, 杨伟光, 刘娟, 等.岩藻多糖对断奶羔羊生长性能、器官指数及血清生化、抗氧化和免疫指标的影响[J].动物营养学报, 2022, 34 (5): 3122-3131.
- [29] 李连海.海带水解物对绵羊采食与消化的影响及其机理研究[D].泰安: 山东农业大学, 2022.
- [30] 李秀芝.不同生物活性物质对湖羊生长性能、瘤胃微生态及屠宰性能的影响[D].南宁: 广西大学, 2023.
- [31] Mahdi Z A. Effect of sodium alginate on the quality of frozen buffalo semen[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1262: 072085.
- [32] Zhao J, Tian H, Kong X, et al. Microbiomic and metabolomic insights into the mechanisms of alfalfa polysaccharides and seaweed polysaccharides in alleviating diarrhea in pre-weaning Holstein calves[J]. Animals, 2025, 15 (4): 485.
- [33] 李银姝, 林茜, 龚乃霞, 等.海藻多糖结构、生物活性和提取技术研究进展[J].化学试剂, 2025, 47 (5): 56-65.
- [34] 王胜男, 杨伟光, 尹福泉.岩藻多糖对断奶羔羊瘤胃微生物区系及代谢组学的影响[J].动物营养学报, 2023, 35 (3): 1827-1840.
- [35] 郭善军.红藻提取物对体外瘤胃发酵特性、产甲烷和微生物生长的影响[J].中国饲料, 2020 (6): 54-57.
- [36] 潘坛, 史怀平, 罗军.日粮中添加海藻粉对西农萨能奶山羊生产性能、乳脂脂肪酸组成、血液代谢指标及瘤胃发酵的影响[C]//中国畜牧兽医学会养羊学分会.2018年全国养羊生产与学术研讨会论文集.2018: 144.
- [37] Liu Y L, Zhou M, Diao Q Y, et al. Seaweed as a feed additive to mitigate enteric methane emissions in ruminants: Opportunities and challenges[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24 (4): 1327-1341.
- [38] Wanapat M, Prachumchai R, Dagaew G, et al. Potential use of seaweed as a dietary supplement to mitigate enteric methane emission in ruminants[J]. Science of the Total Environment, 2024, 931: 173015.
- [39] Bahramzadeh S, Tabarsa M, You S G, et al. Purification, structural analysis and mechanism of murine macrophage cell activation by sulfated polysaccharides from *Cystoseira indica*[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 205: 261-270.
- [40] Jayawardena T U, Sanjeewa K K A, Nagahawatta D P, et al. Anti-inflammatory effects of sulfated polysaccharide from *Sargassum swartzii* in macrophages via blocking TLR/NF- κ B signal transduction[J]. Marine Drugs, 2020, 18 (12): 601.
- [41] Yan W, Luo J, Yu Z, et al. A critical review on intestinal mucosal barrier protection effects of dietary polysaccharides[J]. Food & Function, 2024, 15 (2): 481-492.
- [42] Boulho R, Marty C, Freile-Pelegrín Y, et al. Antiherpetic (HSV-1) activity of carrageenans from the red seaweed *Solieria chordalis* (Rhodophyta, Gigartinales) extracted by microwave-assisted extraction (MAE) [J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29: 2219-2228.
- [43] 车小蛟, 雷宏东, 高军军.不同水平岩藻多糖对羔羊生长性能、免疫力及抗氧化功能的影响[J].饲料研究, 2022, 45 (17): 13-16.
- [44] 郭广振, 陈佳怡, 彭苏, 等.岩藻多糖对断奶羔羊小肠组织形态、消化酶活性和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报, 2022, 34 (8): 5206-5218.
- [45] Cui M Y, Li X H, Geng L H, et al. Comparative study of the immunomodulatory effects of different fucoidans from *Saccharina japonica* mediated by scavenger receptors on RAW 264.7 macrophages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 215: 253-261.
- [46] 李盛楠, 王晶, 于玮洁, 等.几种褐藻多糖硫酸酯的提取、成分分析及抗氧化活性研究[J].海洋科学, 2023, 47 (3): 106-115.
- [47] Lekshmi V S, Arun A R, Kurup G M. Sulfated polysaccharides from the edible marine algae *Padina tetrastromatica* attenuates isoproterenol-induced oxidative damage via activation of PI3K/Akt/Nrf2 signaling pathway[J]. Chemico-Biological Interactions, 2019, 308: 258-268.
- [48] 罗光宏, 王海蓉, 崔晶, 等.微波辅助低共熔溶剂提取、部分纯化螺旋藻多糖及其体外生物学活性研究[J].食品与发酵工业, 2022, 48 (11): 107-113.
- [49] Lu X X, Qin L, Guo M, et al. A novel alginate from *Sargassum seaweed* promotes diabetic wound healing by regulating oxidative stress and angiogenesis[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 289: 119437.
- [50] Fan S Y, Xu Y, Wang L, et al. *Sargassum horneri* fucoidan oligosaccharide: Purification, characterization, and antioxidant

- effects targeting the MAPK and KEAP1-NRF2 signaling pathways[J]. *Algal Research*, 2024, 84: 103756.
- [51] Kapahi A, Sankar A A, Gokhale J S. Optimization of sequential ultrasound-microwave assisted extraction of polysaccharide from red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2024, 36: 3675-3687.
- [52] Qi Y G, Zheng T H, Liu X H, et al. Sodium acetate regulates milk fat synthesis through the activation of GPR41/GPR43 signaling pathway[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1098715.
- [53] Harahap M A, Widodo S, Handayani U F, et al. Examining performance, milk, and meat in ruminants fed with macroalgae and microalgae: A meta-analysis perspective[J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2024, 56: 243.
- [54] Mi J, Jing X, Ma C, et al. A metagenomic catalogue of the ruminant gut archaeome[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 9609.
- [55] 王志, 李彦卿, 庄伟, 等. 多糖微量元素络合物的饲料化应用研究进展[J]. *化工学报*, 2021, 72 (7): 3478-3487.
- [56] Zhou Z X, Ding Y, Cai R, et al. Preparation and activity evaluation of zinc ion delivery system based on fucoidan-zinc complex[J]. *Biointerphases*, 2024, 19 (5): 051007.
- [57] 王嘉麟, 吴鹏鑫, 王胜男, 等. 饲料中添加岩藻多糖对羔羊生长性能、肠道消化酶活性和微生物区系的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35 (4): 2417-2430.
- [58] Huang J, Huang J L, Li Y, et al. Sodium alginate modulates immunity, intestinal mucosal barrier function, and gut microbiota in cyclophosphamide-induced immunosuppressed BALB/c mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69 (25): 7064-7073.
- [59] Wijesekara T, Huang R, Wong I, et al. Insights into immunoregulatory effects of bioactive polysaccharides derived from seaweeds through gut microbiota[J]. *Food Bioscience*, 2024, 58: 103800.
- [60] Zhou B F, Jiang J M, Huo Y, et al. Extraction of *Chlorella* polysaccharide using natural deep eutectic solvent[J]. *Algal Research*, 2025, 90: 104260.
- [61] Shang X C, Chu D P, Zhang J X, et al. Microwave-assisted extraction, partial purification and biological activity in vitro of polysaccharides from bladder-wrack (*Fucus vesiculosus*) by using deep eutectic solvents[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259: 118169.
- [62] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2025[S].