

稀土壳糖胺螯合盐的生物学活性及其在畜禽生产中的应用

吴长熹¹, 曾兴有², 赵明荣³

¹浙江凯迈生物科技有限公司, 浙江 衢州

²福建省华龙集团饲料有限公司, 福建 福州

³上海牧迈饲料有限公司, 上海

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年5月23日

摘要

稀土壳糖胺螯合盐(Rare earth-chitosan chelate, RECC)是由稀土离子和壳糖胺分子经过氨基(-NH₂)和羟基(-OH)的配位螯合效应构成的一种新型饲料添加剂, 兼具稀土和壳糖胺的生物学活性。RECC具有抑菌、免疫调节、抗氧化、调节肠道功能等多种生物学活性。本文综述了RECC的生物学活性及其在畜禽生产中的应用的研究进展。

关键词

稀土壳糖胺螯合盐, 生物学活性, 畜禽生产

Biological Activity of Rare Earth-Chitosan Chelate and Its Application in Livestock and Poultry Production

Changxi Wu¹, Xingyou Zeng², Mingrong Zhao³

¹Zhejiang Kaimai Biotechnology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

²Fujian Province Hualong Group Feed Co., Ltd., Fuzhou Fujian

³Shanghai Mumai Feed Co., Ltd., Shanghai

Received: Apr. 14th, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

Rare earth-chitosan chelate (RECC) is a novel feed additive composed of rare earth ions and chitosan

文章引用: 吴长熹, 曾兴有, 赵明荣. 稀土壳糖胺螯合盐的生物学活性及其在畜禽生产中的应用[J]. 农业科学, 2025, 15(5): 602-608. DOI: 10.12677/hjas.2025.155074

molecules that undergo coordination chelation effects through amino (-NH₂) and hydroxyl (-OH) groups. RECC combines the biological activities of rare earth and chitosan. RECC has various biological activities, such as antibacterial, immune regulation, antioxidant, and regulation of intestinal function. This article reviews the biological activity of RECC and its research progress in the application of livestock and poultry production.

Keywords

Rare Earth-Chitosan Chelate, Biological Activity, Livestock and Poultry Production

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

稀土壳糖胺螯合盐(Rare earth-chitosan chelate, RECC)是由稀土离子和壳糖胺分子经过氨基(-NH₂)和羟基(-OH)的配位螯合效应构成的一种新型饲料添加剂,为浅黄色粉末状物质,在空气中极稳定,不溶于水、乙醇、乙醚和甲醇;可溶于N-二甲基酰胺、二甲基亚砷(杨自芳等,2009) [1]。RECC兼具稀土和壳糖胺的生物学活性。大量研究表明,RECC在畜禽生产中应用,能够抑制有害菌的生长、繁殖,调节动物免疫功能,增强机体抗氧化、抗应激能力,调节肠道微生态平衡,改善肠道形态和结构,从而促进营养物质的消化、吸收和利用,提高畜禽生产性能和产品质量。本文综述了RECC的生物学活性及其在畜禽生产中的应用的研究进展,旨在为RECC在畜禽无抗健康养殖中的广泛应用提供科学依据。

2. 稀土壳糖胺螯合盐的生物学活性

2.1. 抑菌活性

稀土有抑菌、抗炎功能,可与其他具有相同抗菌活性的配体结合构成配合物,取得更强的抗菌作用。杨军等(2009) [2]用抑菌圈法研究了14种稀土离子对细菌和真菌的抑菌作用,发现稀土离子的浓度增大时,其抑菌能力增强,且具有选择性抑菌作用。壳聚糖具有与抗生素类似的功能,能够抑制大多数有害菌的生长。朱立贤等(2003) [3]的研究表明,壳聚糖可以有效降低大肠杆菌引起的肉仔鸡死亡。杨自芳等(2009) [1]采用培养基扩散法和营养肉汤稀释法对稀土壳聚糖配合物的抑菌活性的研究表明,稀土壳聚糖能够有效抑制金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*)的活性,最小抑菌浓度为20~300 µg/mL,且抑菌效果比单独使用壳聚糖和稀土硝酸盐更好。李方方等(2016) [4]的研究发现,RECC可以抑制仔猪肠道中大肠杆菌的生长。付豪等(2021) [5]的体外抑菌实验表明,壳聚糖镓配合物对大肠杆菌(*E. coli*)与金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的最低抑菌浓度分别为0.18 mg/ml和0.16 mg/ml,其机制为金属离子Ga³⁺的离子半径,电离势和电子亲和力与Fe³⁺很相似,可以代替Fe³⁺与铁转运蛋白形成复合物并将其传递到细胞中,这使得镓可以通过铁载体进入细菌细胞来抑制细菌生长(Rzhapishevska等,2011) [6]。李小芳等(2010) [7]报道,壳聚糖与稀土离子La³⁺、Nd³⁺的配合物对大肠杆菌(*E. coli*)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和黑曲霉(*A. niger*)具有显著的抑制作用,抑菌性能优于单一的壳聚糖。吴锦绣等(2012) [8]的研究发现,水溶性壳聚糖的5种稀土配合物(La、Nd、Sm、Eu和Dy)对大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)均有很好的抑制作用,其最小抑菌浓度为120~500 µg/mL,且抑菌效果明显优于单独的壳聚糖和稀土硝酸盐。

2.2. 免疫调节活性

RECC 的降解产物壳糖胺, 能够提高碱性磷酸酶 A2 的活性, 影响花生四烯酸在不同免疫细胞中的合成与释放, 使机体产生特异性免疫(Bianco 等, 2000) [9]。元立峰等(2003) [10]认为, 壳聚糖可以激活机体内的补体系统, 增强体内非特异性免疫系统的功能。程雨辰等(2021) [11]用 1 日龄爱拔益加肉仔鸡研究表明, 日粮中添加 150~200 mg/kg RECC 可提高肉仔鸡脾脏的抗炎因子和免疫球蛋白含量, 降低促炎因子含量。Cheng 等(2022) [12]还报道, 在 AA 肉鸡日粮中添加 RECC, 可提高 42 日龄血清和空肠中白细胞介素 2 (IL-2)、IL-4 的浓度。通过降低 Toll 样受体 4/核因子 κ B (TLR4/NF- κ B)途径中的相关基因表达, 提高 21 日龄空肠中 IgM 及 42 日龄空肠中分泌型免疫球蛋白 A(sIgA)、IgG 的浓度。

2.3. 抗氧化活性

RECC 存在活性基团, 其可与活性氧发生反应, 进而保护机体减少氧化损伤。尹学琼等(2002) [13]的研究发现, 低聚壳聚糖及其铜配合物对 O_2^- 均有较强的清除作用, 配合物较壳聚糖抗 O_2^- 能力强, 在浓度 0.5×10^{-2} 时, 配合物与壳聚糖的清除率分别为 98.2%、80.3%。刘静娜等(2010) [14]给高脂血症大鼠饲喂壳糖胺, 发现壳糖胺能够显著降低大鼠血清游离脂肪酸浓度上升的比例, 降低丙二醛含量, 提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性, 表明壳聚糖可以调节抗氧化酶的活性, 在体内发挥抗氧化作用。卢美鸾等(2008) [15]报道, 壳糖胺可以调节与抗氧化等防御系统相关的酶系活性, 从而降低机体脂质中过氧化物的水平, 使机体免受脂质过氧化的伤害。赵启龙(2015) [16]发现, 蛋鸡日粮中添加适量壳糖胺, 可以提高蛋鸡的抗氧化性能。程雨辰(2022) [17]用 1 日龄 AA 肉仔鸡研究发现, RECC 通过激活 Nrf2 信号通路上相关因子表达水平、增强抗氧化酶活性来调节机体抗氧化功能。

2.4. 肠道功能调节活性

研究表明, RECC 能够调节肠道微生态平衡, 改善肠道形态和结构, 从而促进营养物质的消化、吸收和利用。据刘含威(2021) [18]报道, RECC 可以显著提高生长猪粪便中双歧杆菌、乳酸杆菌等有益微生物的数量, 降低大肠杆菌的数量。Osho 等(2019) [19]的研究表明, 在 1 日龄 Cobb 500 肉鸡日粮中添加 1.0 g/kg 壳寡糖, 改善了空肠绒毛高度和绒毛高度与隐窝深度比。刘禹辰等(2018) [20]在蛋鸡中的研究发现, 复合稀土制剂极显著改善了小肠黏膜结构。另外, 有研究表明, RECC 能够有效调节犊牛(李浩等, 2023 [21])、肉牛(Xu 等, 2020 [22])、羔羊(张菊等, 2024 [23])瘤胃微生物菌群结构。

3. 稀土壳糖胺螯合盐在畜禽生产中的应用

3.1. 稀土壳糖胺螯合盐在猪生产中的应用

研究表明, RECC 能够调节仔猪肠道微生物平衡、免疫功能, 提高营养物质的消化吸收, 促进仔猪生长和改善育肥猪屠宰性能。李方方等(2016) [4]用 28 日龄断奶仔猪研究显示, 饲料中添加 0.02%和 0.03% RECC, 显著提高断奶仔猪平均日增重和平均日采食量($P < 0.05$), 显著降低料重比($P < 0.05$)、腹泻率($P < 0.05$); 显著提高血清生长激素和 IgG 浓度($P < 0.05$); 显著提高干物质、粗蛋白、粗脂肪、钙和磷的消化率($P < 0.05$); 并有降低大肠杆菌数的趋势。在 70 日龄 DLY 仔猪中的研究表明, 日粮中添加 RECC 能够有效提升和调节仔猪的生长激素水平($P < 0.05$) [24], 降低血清中血糖、甘油三酯和尿素含量($P < 0.05$) [25], 提高仔猪对饲料干物质、粗蛋白和粗脂肪的消化率($P < 0.05$) [18], 提高仔猪日增重($P < 0.05$) [26]。许甲平等(2013) [27]报道, 育肥猪日粮中添加蛋氨酸铬和稀土(铜、铈)壳糖胺螯合盐, 能够显著提高肥育猪的日增重、饲料转化率和屠宰率($P < 0.05$); 显著降低肥育猪胴体的滴水损失($P < 0.05$)。另外, 熊奕等(2020)

[28]在怀孕 90 d 的妊娠母猪日粮中添加 200 g/t RECC, 可以显著提高母猪繁殖性能, 缩短母猪产程, 减少母猪失重, 降低哺乳仔猪腹泻率, 提高日增重($P < 0.05$)。

3.2. 稀土壳糖胺螯合盐在鸡生产中的应用

肉鸡

在肉鸡生产中应用 RECC, 能够提高肉鸡免疫功能, 改善肠道健康, 提高饲料利用效率和生产性能, 改善肉鸡胴体品质。Zhang 等(2008) [29]用 1 日龄四川乌骨鸡试验表明, 日粮中添加 0.10% RECC 显著提高四川乌骨鸡的增重($P < 0.05$); 改善血清钙含量, 降低血清胆固醇和碱性磷酸酶浓度($P < 0.05$)。王菊花(2019) [30]的研究发现, 在热应激黄羽肉鸡日粮中添加 0.03% RECC, 可改善热应激对肉鸡日增重的影响, 提高饲料利用率, 缓解热应激对肌肉持水力的损害, 改善肉品质($P < 0.05$); 而且, RECC 组的各项指标均优于稀土的效果。彭梦玲等(2020) [31]的试验发现, RECC 可通过减小脂肪细胞直径和促进三磷酸结合盒转运体 G1 (ATP-binding cassette G1, ABCG1) mRNA 的表达($P < 0.05$), 抑制热应激黄羽肉鸡体内脂肪沉积($P < 0.05$)。程雨辰(2022) [17]用 1 日龄 AA 肉仔鸡研究表明, 日粮中添加 150~200 mg/kg RECC, 可提高肉鸡免疫功能, 增强抗氧化酶活性, 抑制 TLR4/NF- κ B 信号通路, 激活 TLR3 和 Nrf2 通路, 提高抗氧化因子 GPx-7 的表达水平, 且与 RECC 添加量存在剂量依赖关系。Cheng 等(2022) [12]报道, 在 AA 肉鸡日粮中添加 175~200 mg/kg RECC, 对肉鸡生长性能、免疫功能和抗氧化能力产生有益影响。谢祎(2022) [32]的研究发现, 在 AA 肉鸡日粮中添加 RECC 可以提高肠道消化酶活力, 改善肠道形态, 调节微生物菌群结构, 从而促进营养物质的消化吸收, 提高生长性能, 减少粪便中有害气体的释放量, 并在一定程度上改善了肌肉品质。

蛋鸡

在蛋鸡生产中应用 RECC, 能够提高蛋鸡抗氧化、抗应激能力, 增强免疫功能, 改善肠道健康, 提高营养物质的利用率和产蛋性能。据王长青等(2005) [33]报道, 在 310 日龄“花凤”蛋鸡日粮中添加 0.1% SQA 活力素(RECC), 显著提高了产蛋量, 降低了料蛋比($P < 0.01$)。叶姝菡等(2005) [34]的研究发现, 在高温环境下, 给产蛋率下降的蛋鸡群饲喂活力素, 提高了产蛋量和蛋重, 降低了料蛋比。肖凯等(2007) [35]的研究表明, 在尼克珊瑚粉蛋鸡玉米—豆粕型日粮中添加 0.1% RECC, 产蛋量显著提高($P < 0.05$), 料蛋比显著低于($P < 0.05$)。万辉(2008) [36]报道, 在尼克珊瑚粉蛋鸡日粮添加 RECC, 能显著提高蛋鸡对饲料中干物质、粗蛋白、钙和磷的利用率($P < 0.05$); 小肠胰蛋白酶及淀粉酶活性均有提高($P > 0.05$)。刘禹辰(2018) [20]选用 414 日龄“农大 3 号”商品蛋鸡, 日粮中添加 2500 mg/kg 复合稀土制剂, 极显著提高蛋鸡产蛋后期生产性能($P < 0.01$)。Lu (2023) [37]报道, 56 周龄的大午京凤蛋鸡日粮添加 100~200 mg/kg RECC, 显著提高了抗氧化能力、抗炎作用、体液免疫和肠道消化酶活性, 进而提高了老年蛋鸡的产蛋性能和鸡蛋质量($P < 0.05$)。

3.3. 稀土壳糖胺螯合盐在反刍动物生产中的应用

肉牛肉羊

在肉牛肉羊生产中应用 RECC, 能够调节瘤胃菌群, 提高饲料转化效率和生长性能, 改善屠宰性能和肉品质。李浩等(2023) [21]在 100 日龄断奶水牛公犊牛日粮中添加 0.06% RECC, 结果表明: RECC 提高了干物质表观消化率、生长性能并能够调节瘤胃菌群结构($P < 0.05$)。Xu 等(2020) [22]报道, 在 18 月龄体重约 375 kg 晋江公牛日粮中添加 400 mg/kg DMI 稀土元素, 能够有效调节瘤胃微生物群, 促进瘤胃纤维消化, 提高饲料转化率, 抑制脂质沉积, 最终提高了牛肉产量和肉质($P < 0.05$)。于静等(2010) [38]用体重约 55 kg 的小尾寒羊母羊试验表明, 在日粮中添加 216.5 mg/kg 稀土, 可以提高采食量、前胃营养物质

的消化量,增加小肠营养物质特别是氨基酸的消化吸收量($P < 0.05$),改善机体的营养状况。康晓冬等(2011) [39]的研究表明,在宁夏滩羊日粮中按每千克滩羊体质量添加 15 mg 饲用硝酸稀土,每只羊平均每天比对照组多增重 40 g,并可改善血液生化指标。Pereira 等(2020) [40]的试验发现,在体重约 21.65 kg 的公羔羊日粮中添加 2 g/kg DM 的壳聚糖,提高了羔羊日增重、干物质采食量和饲料转化率($P < 0.05$);改善了屠宰率和背最长肌面积($P < 0.05$)以及肌肉中脂肪酸组成($P < 0.05$)。研究表明,在断奶湖羊羔羊饲料中添加 RECC,提高了羔羊采食量、日增重,降低了料重比($P > 0.05$),并改善了瘤胃微生物菌群结构(张菊等, 2024 [23]; 杨菊凤等, 2023 [41])。

奶牛

户如霞(2014) [42]在泌乳日龄(129 ± 5) d、产奶量(33.2 ± 5.1) kg/d 的荷斯坦奶牛饲料中添加 0.15% RECC,能够改善奶牛血液基础代谢水平,促进脂类代谢。而据尹召华等(2019) [43]报道,在荷斯坦奶牛日粮中添加 RECC 150 g/t、300 g/t,对奶牛产奶量、乳脂肪、乳蛋白、非脂乳固体、密度、体细胞数、菌落总数等指标无显著影响($P > 0.05$);但添加 300 g/t 活力素组血清乳酸脱氢酶和 α -羟丁酸脱氢酶显著低于对照组($P < 0.05$),说明对奶牛免疫性能有积极意义。

4. 结语

ECC 具有抑菌、免疫调节、抗氧化、调节肠道功能等多种生物学活性。在畜禽上的研究表明,RECC 能够有效抑制有害菌的生长和繁殖,调节免疫功能,增强机体抗氧化、抗应激能力,调节肠道微生态平衡,改善肠道形态和结构,促进营养物质的消化、吸收和利用,进而提高畜禽生产性能。但是,为了 RECC 在畜禽无抗健康养殖中更有效的推广应用,尚需要在以下方面进一步加强研究:① RECC 改善畜禽生产性能的确切机制;② RECC 在不同畜禽不同生理阶段日粮中的适宜添加量;③ RECC 对畜禽产品质量的影响;④ RECC 在畜禽生产中应用的经济效益分析。

参考文献

- [1] 杨自芳,何其庄,许东芳,等. 稀土壳聚糖配合物的制备、表征和抑菌性能研究[J]. 稀土, 2009, 30(6): 50-54.
- [2] 杨军,张赫,王甲辰,等. 稀土抑菌作用研究[J]. 稀土, 2009, 30(1): 35-39.
- [3] 朱立贤,宋志刚,林海,等. 壳聚糖对肉仔鸡生长与免疫功能的影响研究[J]. 中国饲料, 2003(4): 15-17.
- [4] 李方方,周晶,朱宇旌,等. 稀土壳糖胺螯合盐对断奶仔猪生长性能、血清生化指标、营养物质消化率及粪中微生物菌群的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(2): 498-506.
- [5] 付豪,万强,赵明源,等. 壳聚糖螯合物的制备及抗菌性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(11): 11177-11182.
- [6] Rzhapishevska, O., Ekstrand-Hammarström, B., Popp, M., Björn, E., Bucht, A., Sjöstedt, A., et al. (2011) The Antibacterial Activity of Ga^{3+} Is Influenced by Ligand Complexation as Well as the Bacterial Carbon Source. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, **55**, 5568-5580. <https://doi.org/10.1128/aac.00386-11>
- [7] 李小芳,冯小强,杨声,等. 壳聚糖稀土配合物的制备和抑菌性能及与牛血清白蛋白的相互作用[J]. 功能高分子学报, 2010, 23(2): 197-201.
- [8] 吴锦绣,李梅,柳召刚,等. 水溶性壳聚糖稀土配合物的合成、表征及其抑菌性研究[J]. 过程工程学报, 2012, 12(6): 1038-1042.
- [9] Bianco, I.D., Balsinde, J., Beltramo, D.M., Castagna, L.F., Landa, C.A. and Dennis, E.A. (2000) Chitosan-Induced Phospholipase A_2 Activation and Arachidonic Acid Mobilization in P388d₁ Macrophages. *FEBS Letters*, **466**, 292-294. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(00\)01089-9](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(00)01089-9)
- [10] 亓立峰,许梓荣. 壳聚糖及其在饲料工业中的应用前景[J]. 粮食与饲料工业, 2003(7): 27-28.
- [11] 程雨辰,谢祎,石璐璐,等. 稀土壳糖胺螯合盐对肉仔鸡脾脏免疫和抗氧化功能的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 36-41.
- [12] Cheng, Y., Xie, Y., Shi, L., Xing, Y., Guo, S., Gao, Y., et al. (2022) Effects of Rare Earth-Chitosan Chelate on Growth Performance, Antioxidative and Immune Function in Broilers. *Italian Journal of Animal Science*, **21**, 303-313.

<https://doi.org/10.1080/1828051x.2022.2028589>

- [13] 尹学琼, 张岐, 林强, 等. 低聚壳聚糖及其稀土($\text{LaCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)配合物的抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2002(2): 27-30.
- [14] 刘静娜, 张家骊, 夏文水. 壳聚糖降低脂质过氧化作用的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(6): 836-841.
- [15] 卢美鸾, 邱晓燕, 郑森林, 等. 壳聚糖对肉鸡抗氧化能力及生产性能的作用[J]. 生态学杂志, 2008(10): 1749-1752.
- [16] 赵启龙. 壳聚糖对蛋鸡产蛋性能、免疫和抗氧化功能及相关血清生化指标的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [17] 程雨辰. 稀土壳糖胺螯合盐对肉仔鸡免疫和抗氧化功能的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [18] 刘含威. 饲料中添加稀土壳糖胺螯合盐对猪消化性能的影响[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(8): 34-36.
- [19] Osho, S.O. and Adeola, O. (2019) Impact of Dietary Chitosan Oligosaccharide and Its Effects on Coccidia Challenge in Broiler Chickens. *British Poultry Science*, **60**, 766-776. <https://doi.org/10.1080/00071668.2019.1662887>
- [20] 刘禹辰, 宋风格, 盖伯舜, 等. 饲料添加复合稀土制剂对产蛋后期蛋鸡生产性能、表观消化率以及小肠黏膜形态的影响[J]. 中国家禽, 2018, 40(19): 28-31.
- [21] 李浩, 吴宇航, 张洁, 等. 稀土壳糖胺螯合盐对水牛犊牛生长性能、养分表观消化率和瘤胃细菌菌群结构的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(5): 3119-3129.
- [22] Xu, L., Wen, L., Ge, Y., Wan, G., Qu, M. and Xue, F. (2020) Metagenomic Insights into the Effects of Rare-Earth Elements Supplementation on Rumen Digestibility and Meat Quality of Beef Cattle. *Frontiers in Microbiology*, **11**, Article 1933. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01933>
- [23] 张菊, 何孟莲, 田慧丽, 等. 稀土壳糖胺螯合盐对湖羊生长性能、血液生理生化指标和瘤胃细菌群落结构的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(7): 4462-4472.
- [24] 刘含威. 稀土壳糖胺螯合盐对生猪激素水平的影响[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(5): 23-24.
- [25] 刘含威. 饲料中添加稀土壳糖胺螯合盐对猪血清学的影响[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(7): 15-16.
- [26] 刘含威, 赵炜. 饲料中添加稀土壳糖胺螯合盐对猪生长性能的影响[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(4): 20-21.
- [27] 许甲平, 鲍宏云, 邓志刚, 等. 蛋氨酸铬与稀土(镧、铈)壳糖胺螯合盐协同作用对肥育猪生长性能和肉品质的影响[J]. 饲料工业, 2013, 34(4): 55-57.
- [28] 熊奕, 张博, 沈康, 等. 不同蛋白质水平日粮中添加稀土螯合物对母猪及其哺乳仔猪的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2020, 47(9): 2841-2848.
- [29] Zhang, Y., Zhou, D.G., Chen, S.Y., et al. (2008) The Effects of Rare Earth-Chitosan on Growth Performances and Serum Components in Sichuan Bone-Black Chicken. *Research Journal of Poultry Sciences*, **2**, 44-48.
- [30] 王菊花, 刘琦, 董静, 等. 稀土壳糖胺螯合盐对热应激肉鸡生长性能和肉品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 104-111.
- [31] 彭梦玲, 董静, 刘琦, 等. 稀土壳糖胺螯合盐对热应激黄羽肉鸡脂肪组织学和 ABCG1 表达的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 52-59.
- [32] 谢祎. 稀土壳糖胺螯合盐对肉仔鸡生长性能、肠道指标及肉品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [33] 王长青, 王洪民, 蒋维银, 等. SQA 活力素对蛋鸡生产性能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2005, 32(4): 19-19.
- [34] 叶姝菡, 祝捷, 张稚莹. 饲料中添加 SQA 活力素改善产蛋鸡旺期不旺的效果[J]. 中国禽业导刊, 2005, 22(6): 27.
- [35] 肖凯, 赵胜军, 郑中朝, 等. 添加稀土壳糖胺螯合盐条件下不同蛋白质水平对蛋鸡生产性能的影响[J]. 中国饲料, 2007(4): 25-26, 29.
- [36] 万辉, 赵胜军, 任莹, 等. 稀土壳糖胺螯合盐对蛋鸡代谢率和肠道消化酶活性的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(6): 177-180.
- [37] Lu, X., Chang, X., Zhang, H., Wang, J., Qiu, K. and Wu, S. (2023) Effects of Dietary Rare Earth Chitosan Chelate on Performance, Egg Quality, Immune and Antioxidant Capacity, and Intestinal Digestive Enzyme Activity of Laying Hens. *Polymers*, **15**, Article 1600. <https://doi.org/10.3390/polym15071600>
- [38] 于静, 雒秋江, 古丽尼沙, 等. 添喂稀土对绵羊消化代谢的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(4): 281-288.
- [39] 康晓冬, 王川, 马青, 等. 稀土添加剂饲喂滩羊的试验[J]. 饲料研究, 2011(2): 63-64, 67.
- [40] Pereira, T.L., Fernandes, A.R.M., Oliveira, E.R., Cônsolo, N.R.B., Marques, O.F.C., Maciel, T.P., et al. (2020) Serum Metabolomic Fingerprints of Lambs Fed Chitosan and Its Association with Performance and Meat Quality Traits. *Animal*, **14**, 1987-1998. <https://doi.org/10.1017/s1751731120000749>

- [41] 杨菊凤, 于安乐, 李秀丽, 等. 饲料中添加活力素(稀土壳糖胺螯合盐)对湖羊生长性能的影响[J]. 当代畜牧, 2023(5): 35-36.
- [42] 户如霞, 周凌云, 登攀, 等. 稀土壳糖胺对泌乳奶牛血液生理生化指标及脂类代谢的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(2): 29-34.
- [43] 尹召华, 茆建昱, 张宜辉, 等. 活力素对荷斯坦牛泌乳性能和血液生化指标的影响[J]. 中国奶牛, 2019(2): 5-8.