

硒和维生素 E 对绒山羊次级毛囊发生发育的影响

阿旺措吉¹, 念扎², 尼玛穷达², 西热多吉²,
旦增曲珍¹, 德吉¹, 陈鑫艳¹, 达瓦¹, 索朗达¹

(1. 西藏自治区农牧科学院畜牧兽医研究所, 西藏 拉萨 850000; 2. 阿里地区日土县白绒山羊原种场, 西藏 阿里 859700)

摘要: 系统综述了硒和维生素 E 对绒山羊次级毛囊发生发育的影响及其作用机制。绒山羊的次级毛囊决定羊绒产量和品质, 其发育过程受营养、遗传和环境多重因素调控。硒(Se)作为谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成部分, 与具有强抗氧化性的维生素 E 协同作用, 通过调节内分泌激素水平、抗氧化防御系统、细胞凋亡及相关信号通路(Wnt/ β -catenin 和 BMP 等), 显著影响次级毛囊的形态发生、发育周期及毛囊干细胞行为。研究表明, 适当添加硒和维生素 E 能改善毛囊发育、提高产绒性能、增强繁殖能力, 并为绒山羊分子育种提供理论依据。

关键词: 绒山羊; 硒; 维生素 E; 次级毛囊

中图分类号: S827

文献标识码: A

Effects of Selenium and Vitamin E on the Development of Secondary Hair Follicles in Cashmere Goats

Awangcuoji¹, Nianzha², Nimaqionгда², Xireduoji², Danzengquzhen¹, Deji¹, Chenxinyan¹, Dawa¹, Suolangda¹

(1. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa Xizang 850000, China; 2. Breeding Farm of White Cashmere Goat, Rutog County, Ngari Xizang, China)

Abstract: This paper systematically reviews the effects of selenium and vitamin E on the occurrence and development of secondary hair follicles in cashmere goats and their mechanisms. Secondary hair follicles of cashmere goats determine cashmere yield and quality, and their development is regulated by nutrition, heredity, environment and other factors. As an important component of glutathione peroxidase, selenium (Se) synergizes with vitamin E with strong antioxidant activity to significantly affect the morphogenesis, development cycle and hair follicle stem cell behavior of secondary hair follicles by regulating endocrine hormone levels, antioxidant defense system, cell apoptosis and related signaling pathways (Wnt/ β -catenin, BMP, etc.). Studies show that appropriate supplementation of selenium and vitamin E can improve hair follicle development, enhance cashmere production performance and reproductive capacity, and provide a theoretical basis for molecular breeding of cashmere goats. Future research directions and application prospects are also prospected.

Key words: cashmere goat; selenium; vitamin E; secondary hair follicle

我国是全球最大的绒山羊养殖大国, 山羊绒是绒山羊生产中最具经济价值的产品^[1-2]。山羊绒作为世界上最细的动物纤维, 享有“纤维宝石”和“软黄金”之称, 是高档的纺织原料^[3]。随着人

们对高品质羊绒制品需求的增加, 纺织市场对羊绒品质的筛选更加严格, 尤其在细度方面^[4-5], 国际市场对细型山羊绒的需求也不断增加, 其价格也越来越高^[6]。

收稿日期: 2025-08-29

基金项目: 西藏自治区科技厅自然科学基金项目——硒和维生素 E 对藏西北白绒山羊羔羊次级毛囊发生发育的影响 (XZ202201ZR0011G); 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-39-32)。

作者简介: 阿旺措吉 (1996—), 女, 硕士, 主要从事藏羊健康生态养殖研究, E-mail: acuo219@163.com。

通信作者: 达瓦 (1983—), 男, 研究实习员, 主要从事藏羊遗传与健康养殖研究, E-mail: 363587300@qq.com。

索朗达 (1978—), 男, 副研究员, 主要从事藏羊遗传及健康养殖研究, E-mail: 295973915@qq.com。

绒山羊的皮肤毛囊(Hair follicle, HF)分为初级毛囊(Primary hair follicle, PHF)和次级毛囊(Secondary hair follicle, SHF),初级毛囊生长为粗毛,次级毛囊生长为羊绒^[7]。绒山羊皮肤初级毛囊起始于胎儿期,在出生时已经发育完全^[8],而次级毛囊的形态发生也起始于胎儿期,直至出生后 3—6 月龄才能完全发育成熟^[9]。次级毛囊的数量、活性及毛囊周期的更替直接决定了羊绒的产量和质量^[10],因此,深入了解次级毛囊发生发育的调控机制,对于提高绒山羊生产性能具有重要意义。

次级毛囊的发生和发育是一个复杂的生物学过程,涉及多个信号通路和关键基因的精准调控^[11-12]。大量研究表明,绒山羊在成年以后很难达到出生时的皮肤 S:P 比值,表明胎儿期形成的衍生次级毛囊有一个显著的消退,母源营养不足和生理应激反应包括高温和孕期母体供氧不足都会对次级毛囊的发生造成不利影响^[13]。母体妊娠期营养水平和哺乳期营养水平对胎儿和出生后羔羊毛囊发育有关,只有比较严重的营养限制才会抑制毛囊发生发育^[14]。绒山羊用于绒毛生长的营养需求量不高,因此可以通过其他途径如抗氧化剂来促进毛囊发生发育,从而提高羊绒产量,其中,硒和维生素 E 作为动物体内重要的抗氧化剂,近年来被发现在调节毛囊发育方面具有重要作用^[15-16]。

硒是动物必需的微量元素,是谷胱甘肽过氧

化物酶(GSH-Px)的重要组成部分,通过消除体内过氧化物,保护细胞膜结构的完整性,在抗氧化、免疫调节和激素代谢中发挥关键作用^[17-18]。维生素 E 是一种脂溶性维生素,具有很强的抗氧化性能,能够保护细胞膜免受过氧化损伤,同时还参与生殖功能的调节^[19]。硒和维生素 E 在动物体内具有协同增效作用,共同构成动物体的抗氧化防御系统,减轻氧化应激对皮肤的损伤,从而促进绒毛生长^[20]。

近年来研究发现,硒和维生素 E 可能直接或间接地参与调控次级毛囊的发育过程^[21-24]。因此,本文旨在综述硒和维生素 E 在绒山羊次级毛囊发生发育中的作用及其机制,为绒山羊的营养调控和遗传改良提供理论依据。

1 绒山羊次级毛囊的生物学特征

1.1 次级毛囊的结构与功能

次级毛囊的结构包括内根鞘、外根鞘和毛球等,其中毛乳头细胞(DP 细胞)是调控毛囊周期和毛囊生长的关键细胞群^[25-26]。次级毛囊与初级毛囊在形态和结构上存在明显差异(见表 1),初级毛囊一般单独存在,伴有皮脂腺和汗腺,而次级毛囊通常以 3~4 个为一簇,围绕在一个初级毛囊周围,形成毛囊群(follicle group),次级毛囊没有汗腺附着^[27-29],这种结构特征使次级毛囊对外界环境因素和体内营养状况的变化更为敏感。

表 1 绒山羊初级毛囊和次级毛囊的特征比较

特征	初级毛囊	次级毛囊
数量	较少(约占毛囊总数的 20%~30%)	较多(约占毛囊总数的 70%~80%)
结构	伴有皮脂腺和汗腺	只有皮脂腺,无汗腺附着
排列方式	单独存在	成簇排列,通常 3~4 个为一簇
毛纤维类型	产生粗毛	产生细绒
发育时间	胎儿期 60 d 左右开始发生	胎儿期 80~87 d 开始发生
敏感性	对营养变化敏感性较低	对营养变化敏感性较高

1.2 次级毛囊的发育过程

绒山羊次级毛囊的发育是一个连续而复杂的生理过程,绒山羊大部分次级毛囊于出生后 90~180 日龄期间逐步发育至成熟^[30]。毛囊发育完备后,其形态结构趋于稳定,羊绒纤维数量固定,随后进入周期性再生循环,依次经历退行期、休止期和生长期^[31-32]。

绒山羊次级毛囊在发育和周期性生长过程

中,都有特定的基因和信号通路参与调控。例如,在鄂尔多斯细毛羊次级毛囊诱导期(胎龄 87 d),真皮谱系细胞由成纤维细胞分化至真皮聚凝物,表皮谱系细胞处于基质和毛囊间表皮细胞增殖分化阶段^[33]。次级毛囊的发育受到多个信号通路的调控,包括 Wnt/ β -catenin、BMP、SHH 等信号通路,这些通路通过网络式的交互作用,精确调控毛囊形态发生和周期性生

长^[12,34]。研究发现,在次级毛囊形态发生过程中,有1975个差异表达基因(DEGs)主要聚集在4条表达轨迹上,且可能与毛囊发育有关,这些基因显著富集在细胞位置、分子功能和生物过程等,其中55.5%的DEGs参与了218条信号通路,主要是癌症通路和ECM-受体相互作用信号通路^[35]。

前期团队通过开展藏西北白绒山羊饲喂褪黑素试验,发现抗氧化物质可以促进次级毛囊生长,致成熟次级毛囊数量增加,羊绒产量就提高^[36]。

2 硒对绒山羊次级毛囊发育的影响与机制

2.1 硒缺乏对绒山羊的影响

硒是动物体必需的微量元素,遍布于动物全身的细胞中^[36]。在动物体内,硒主要通过肠道吸收,主要以硒蛋白的形式存在并参与多种生物学过程^[37]。

硒缺乏会对绒山羊产生多方面的不良影响,缺硒会引起肝坏死、心肌变性和胰脏萎缩等,使幼羊出现营养性肌肉萎缩发生白肌病,以羔羊最常见也最严重^[38]。对成年绒山羊,缺硒则表现为生殖机能紊乱,繁殖力降低,体重严重下降等^[21,39]。研究发现,硒缺乏还会直接影响绒毛生长和品质^[40],这可能与硒缺乏导致的抗氧化能力下降和细胞膜损伤有关,进而影响毛囊细胞的正常功能和绒毛生长。

2.2 硒影响次级毛囊发育的作用机制

1)抗氧化系统调节。硒通过构成GSH-Px在抗氧化防御中发挥核心作用。GSH-Px能够减少活性氧(ROS)和自由基对毛囊细胞的损伤,保护毛囊细胞的膜结构和功能完整性^[41]。武晓英等^[42]发现添加纳米硒可显著提高羔羊睾丸组织中GSH-Px的抗氧化活性,显著提高超氧化物歧化酶(SOD)的活性,降低丙二醛(MDA)的浓度。在毛囊发育过程中,氧化应激是一个重要的限制因素,过多的ROS会破坏毛囊干细胞微环境,影响毛囊细胞的增殖和分化^[43-44]。

2)细胞凋亡调控。硒能够调节细胞凋亡相关基因的表达,影响毛囊细胞的存活和死亡平衡。研究发现,添加纳米硒可使羔羊睾丸组织细胞凋亡显著降低,促凋亡基因(Bax)的表达极显

著降低^[42]。类似机制也可能存在于皮肤毛囊中,通过调控凋亡相关基因表达,影响毛囊细胞的存活和毛囊周期^[45],适当水平的硒可能通过抑制过度凋亡,延长毛囊生长期,从而提高产绒量^[46]。

3)信号2atenin等与毛囊发育相关的信号通路间接调控毛囊生长发育。研究表明,VDR基因(维生素D受体基因)的缺失会抑制Wnt、Bmp和IGF-1信号通路,进而影响毛囊的发育,而硒可能与VDR基因之间存在交互作用,共同调节这些信号通路^[47]。硒还可能通过影响转录因子活性调节毛囊发育相关基因的表达^[48]。

3 维生素E对绒山羊次级毛囊发育的影响

维生素E是动物机体必需的抗氧化剂,在保护细胞膜完整性、维持繁殖功能和免疫调节中发挥重要作用。维生素E主要包括 α -、 β -、 γ -、 δ -生育酚4种形式,其中 α -生育酚的生物活性最高,它的主要功能是抗氧化作用,通过中断脂质过氧化链式反应,保护细胞膜中的多不饱和脂肪酸免受氧化损伤,此外,它还能促进性激素分泌^[49-50]。

维生素E缺乏会对动物产生多方面的影响,包括肌肉、抗氧化功能、繁殖和生长发育等方面。有研究表明,维生素E缺乏可能导致肌肉组织的线粒体和肌原纤维蛋白受损,影响肌肉的正常功能^[51];也会导致血浆中 α -生育酚浓度下降,影响抗氧化功能,导致血液中脂质过氧化产物(如丙二醛)增加,影响血液的抗氧化功能^[52];还能导致羔羊白肌病(一种代谢病,也称为硒和维生素E缺乏症),表现为肌肉萎缩、运动障碍和生长迟缓^[53]等。

此外,维生素E的化学性效应主要体现在抗氧化作用方面,它能抑制和减缓多不饱和脂肪酸的氧化和过氧化作用,消除过氧化物,保护细胞器脂质膜结构的稳定性和完整性,从而维持机体正常的防御机制,减轻氧自由基的压力^[54]。大量调查结果显示,维生素E的添加量对提高母畜的繁殖性能及降低幼畜的发病和死亡率都有明显的作用^[55]。乳品质一定程度上受到维生素E的影响,乳脂率的降低可以通过日粮中添加维生素E来防止^[56]。

4 硒与维生素E的协同作用

硒和维生素E在动物体内具有显著的协同

效应,共同构成动物体的抗氧化防御系统,这种协同作用主要表现在以下几个方面:

1)抗氧化功能的协同。维生素 E 主要通过防止细胞膜上脂质的过氧化来发挥其抗氧化作用,而硒则通过 GSH-Px 清除细胞内的过氧化物,两者在抗氧化功能上具有互补性和协同性^[57]。研究表明,同时添加硒和维生素 E 比单独添加任何一种都能更有效地提高动物的抗氧化能力。例如:在山羊日粮添加硒和维生素 E 能极显著地增加精浆 GSH-Px 活性和总抗氧化能力(T-AOC)^[58],同时,补饲硒和维生素 E 能显著增加精浆 GSH-Px 活性和 T-AOC ($p < 0.01$)^[59]。金海峰等^[60]则指出,添加硒和维生素 E 可促进 GPX 基因的表达,进一步支持了抗氧化能力提升的观点。

2)营养吸收和利用的协同。硒和维生素 E 在吸收和利用过程中存在相互作用,维生素 E 可以促进硒的吸收和利用,而硒也可能影响维生素 E 的代谢和功能。研究发现硒和维生素 E 的联合添加对饲料消化率的提高有促进作用。例如,同时添加硒和维生素 E 显著降低了绒山羊粪中干物质及粗脂肪含量,表明两者协同促进了营养物质的消化吸收^[61],这种促进效应可能与抗氧化功能改善、肠道细胞完整性维护有关。

3)补充量。总的来说,硒与维生素 E 的协同补充确实有益,但关键在于“适量”。有研究表明,在应激条件下,联合补充维生素 E(180 mg/kg 日粮)和硒(0.3 mg/kg 日粮)能改善动物的生长和抗氧化状态^[62]。

5 结论

硒与维生素 E 是关键性抗氧化营养组分,对绒山羊次级毛囊的发生及发育进程产生显著作用,二者借助抗氧化防御体系构建、激素水平调节、细胞增殖与分化过程调控、对 Wnt/ β -catenin 和 BMP 等关键信号通路的精准调节,协同促进次级毛囊的发育与功能稳定。合理补充硒与维生素 E,可提升绒山羊繁殖效能,加速羔羊生长,强化免疫机能,优化精液质量,增强机体抗氧化防御能力,并通过调控 GPX 基因表达,维持机体抗氧化平衡,二者协同效应显著优于单一营养素补充。

未来研究需深入解析其调控毛囊发育的分

子机制,确定最佳补充剂量与配比,开发精准补充策略,为绒山羊高效养殖及遗传改良提供科学依据。同时,结合分子育种技术,培育毛囊特性优良的新品种,以全面提升绒山羊生产效益。

参考文献:

- [1] 程广燕.论我国山羊绒产业发展的思路与对策[J].中国畜牧杂志,2011,47(16):22-25.
- [2] 王宇翔.我国绒山羊产业发展历程、现状及展望[J].现代畜牧兽医,2019(7):47-50.
- [3] 雨田.绒山羊、羊绒及其优势发展战略[J].当代畜禽养殖业,2007,27(3):3.
- [4] 冯建伟.羊绒定价:微米之间的竞争[N].农民日报,2022-12-05(8).
- [5] 张明新,王春昕,马惠海,等.吉林省超细毛羊选育与羊毛分级拍卖[C]//中国畜牧兽医学会养羊学分会.全国养羊生产与学术研讨会议论文集(2007-2008).2008.
- [6] 田可川,郑文新,肖海峰,等.2021年绒毛用羊生产与贸易、产业技术发展概况[J].中国畜牧杂志,2022,58(3):264-269.
- [7] 杨坤,张燕军,韩文静,等.绒山羊毛囊的生长发育及其分子调控研究进展[J].家畜生态学报,2016,37(7):1-6,29.
- [8] 陈洋,陈辉,常青,等.辽宁绒山羊胎儿期皮肤毛囊发生发育的研究[J].中国畜牧杂志,2013,49(11):18-20.
- [9] 杨春合.褪黑素对绒山羊皮肤毛囊活性的作用及影响毛囊发育的机制[D].北京:中国农业大学,2019.
- [10] 王善禾.Wnt/ β -catenin 信号通路和 DNA 甲基化调控绒山羊毛囊发生发育的分子机制[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [11] FUCHS E, NOWAK J A. Building epithelial tissues from skin stem cells [J]. Cold Spring Harb Symp Quant Biol, 2008, 73: 333-350.
- [12] LIN X Y, ZHU L, HE J. Morphogenesis, growth cycle and molecular regulation of hair follicles [J]. Front Cell Dev Biol, 2022, 10: 899095.
- [13] HUTCHISON G, MELLOR D J. Effects of maternal nutrition on the initiation of secondary wool follicles in foetal sheep [J]. Journal of Comparative Pathology, 1983, 93(4): 577-583.
- [14] ZA J, PC R. Control of follicular development, corpus luteum function, the maternal recognition of pregnancy, and the neuroendocrine regulation of the menstrual cycle in higher primates [M]//Knobil and Neill's physiology of reproduction. Academic Press, 2006: 2449-2510.

- [15] 王健. 硒、维生素 E 在抗氧化功能上的协同作用[J]. 中国畜禽种业, 2014, 10(10): 32.
- [16] LIU Y H, ZHOU X H, HE L Q, et al. Recent advances in the effects and mechanism of selenium on the quality of domestic animal products [J]. *Scientia sinica vitae*, 2020, 50(1): 25-32.
- [17] FASIANGOVÁ M, BORILOVÁ G, HULÁNKOVÁ R. The effect of dietary Se supplementation on the Se status and physico-chemical properties of eggs—a review [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2017, 35(4): 275-284.
- [18] KOENIG K M, RODE L M, COHEN R D, et al. Effects of diet and chemical form of selenium on selenium metabolism in sheep [J]. *Journal of Animal Science*, 1997, 75(3): 817-827.
- [19] ABDELQADER A, OBEIDAT M D, AL-RAWASHDEH M S, et al. The role of vitamin E as an antioxidant and preventing damage caused by free radicals [J]. *Journal of Life Science and Applied Research*, 2023, 4(2): 88-95.
- [20] NOAMAN E, ZAHARAN A M, KAMAL A M. Vitamin E and selenium administration as a modulator of antioxidant defense system: biochemical assessment and modification [J]. *Biological Trace Element Research*, 2002, 86(1): 55-64.
- [21] 杨茹洁, 施力光, 岳文斌, 等. 纳米硒对性成熟前雄性波尔山羊生殖机能发育的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2923-2929.
- [22] 李燕, 牟天铭, 苗洒洒, 等. 微量矿物元素硒对畜禽生产性能和产品质量影响的研究进展 [J]. *动物营养学报*, 2023, 35(7): 4191-4199.
- [23] 何仁颖, 何威, 张斌. 甲状腺激素及促甲状腺激素与皮肤的关系 [J]. *医学综述*, 2020, 26(3): 448-452.
- [24] MAGOLSKI J D, LUTHER J S, NEVILLE T L, et al. Maternal nutrition during pregnancy influences offspring wool production and wool follicle development [J]. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(11): 3819-3823.
- [25] 孙丽敏, 姜怀志, 李景玉, 等. 常年长绒型辽宁绒山羊兴盛期皮肤次级毛囊结构分析 [J]. *家畜生态学报*, 2015, 36(6): 15-18.
- [26] KIANI M, HIGGINS C A, ALMQUIST B D. The hair follicle: An underutilized source of cells and materials for regenerative medicine [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2018, 4(4): 1193-1207.
- [27] 卢光, 郁枫, 任志丹. 牦牛胚胎皮肤及其附属物形态发生规律 [J]. *西北农业学报*, 2011, 20(2): 21-26.
- [28] 王康, 栾元金, 蔡玉梅, 等. 狐狸不同部位皮下毛囊组织结构观察 [J]. *山东畜牧兽医*, 2015, 36(8): 7-8.
- [29] 张春兰, 李金泉, 尹俊. 内蒙古阿尔巴斯白绒山羊皮肤毛囊的发生发育规律 [J]. *畜牧与兽医*, 2008, 40(11): 43-44.
- [30] 王乐乐, 张燕军, 杨坤, 等. Wnt 通路中部分基因在绒山羊胚胎皮肤毛囊中的表达 [J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2016, 32(1): 7.
- [31] 杨旭. 外源褪黑激素对绒山羊绒毛和皮肤毛囊周期性变化的影响 [D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2018.
- [32] 张嘉会, 于政权, 邓学梅. 绒羊毛囊生长规律及调控机制的研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(10): 35-40.
- [33] 赫雪. 基于单细胞转录组测序对鄂尔多斯细毛羊次级毛囊形态发生的研究 [D]. 兰州: 西北民族大学, 2023.
- [34] 冯自强, 孙永峰, 宋玉朴, 等. Wnt/ β -catenin 信号通路参与毛囊发育及周期循环调控的研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(6): 88-95.
- [35] 高晔. 陕北白绒山羊皮肤毛囊发育早期的转录组学分析及 VDR 基因的功能研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [36] 旦巴, 巴贵, 阿旺措吉, 等. 藏西北绒山羊羔羊埋植褪黑激素对其周岁产绒性能和毛囊发育的影响 [J]. *中国草食动物科学*, 2021, 41(5): 79-82.
- [37] 杨明凡, 崔保安. 微量元素硒与动物营养 [J]. *畜牧兽医杂志*, 2003, 22(1): 20-21.
- [38] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health [J]. *Metallomics*, 2014, 6(1): 25-54.
- [39] 佚名. 羊易缺乏的几种微量元素 [J]. *四川畜牧兽医*, 2018, 45(11): 41.
- [40] 施力光, 杨茹洁, 岳文斌, 等. 纳米硒对波尔山羊睾丸发育的影响 [J]. *黑龙江动物繁殖*, 2008, 16(6): 4-6.
- [41] 秦枫, 朱晓萍, 张微, 等. 日粮不同碘、硒水平对绒山羊绒毛生长相关激素及酶的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 110-115.
- [42] ZHAO Y X, ZHANG X, LUAN J, et al. Shenxian-shengmai oral liquid reduces myocardial oxidative stress and protects myocardium from ischemia-reperfusion injury [J]. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 2018, 48(6): 2503-2516.
- [43] 武晓英, 刘地, 曹贵东, 等. 母源纳米硒对岢岚绒山羊后代睾丸发育的影响 [J]. *畜牧与兽医*, 2020, 52(6): 15-20.
- [44] DU F P, LI J J, ZHANG S Q, et al. Oxidative stress in hair follicle development and hair growth: signalling pathways, intervening mechanisms and potential of natural antioxidants [J]. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 2024, 28(12): e18486.
- [45] LIU M S, LIU X M, WANG Y, et al. Intrinsic ROS drive hair follicle cycle progression by modulating

- DNA damage and repair and subsequently hair follicle apoptosis and macrophage polarization[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 8279269.
- [46] WANG W J, WANG H L, LONG Y L, et al. Controlling hair loss by regulating apoptosis in hair follicles: A comprehensive overview [J]. *Biomolecules*, 2024, 14(1):20.
- [47] TORTELLY COSTA V, MELO D, MATSUNAGA A. The relevance of selenium to alopecias[J]. *Int J Trichology*, 2018, 10(2):92-93.
- [48] CIANFEROTTI L, COX M, SKORIJA K, et al. Vitamin D receptor is essential for normal keratinocyte stem cell function[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(22):9428-9433.
- [49] NARAYAN V, RAVINDRA K C, LIAO C, et al. Epigenetic regulation of inflammatory gene expression in macrophages by selenium[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2015, 26(2):138-145.
- [50] 曲扬华, 刘策, 高月锋, 等. 维生素 E 对湖羊公羔生殖器官发育和血液生殖激素水平的影响[J]. *现代畜牧兽医*, 2017(9):21-25.
- [51] 孙岳丞, 张婧, 宋文涛, 等. 维生素 E 对动物机体损伤的保护作用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(1):44-49.
- [52] FRY J M, SMITH G M, MCGRATH M C, et al. Plasma and tissue concentrations of alpha-tocopherol during vitamin E depletion in sheep[J]. *British Journal of Nutrition*, 1993, 69(1):225-232.
- [53] ZAYED Z, ESTUTY N, ABDELATTI S. Effects of dietary vitamin E supplementation on haematological parameters, serum vitamin E and lipid oxidation of mahali goats in libya[J]. *Assiut Veterinary Medical Journal*, 2021, 67(170):51-58.
- [54] 高武成, 魏美清. 羔羊白肌病的诊断与治疗[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2022, 52(5):34-36.
- [55] 武江利, 王安, 张养东. 维生素 E 对育成金定鸭生长及免疫和抗氧化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2008, 20(6):686-691.
- [56] PONTES G C S, MONTEIRO P L J, PRATA A B, et al. Effect of injectable vitamin E on incidence of retained fetal membranes and reproductive performance of dairy cows[J]. *J Dairy Science*, 2015, 98(4):2437-2449.
- [57] 王芳, 董国忠, 贾亚伟, 等. 日粮中添加硒和维生素 E 对奶牛产奶性能及牛乳和血浆中硒和维生素 E 含量的影响[J]. *中国饲料*, 2010(23):18-21.
- [58] 余禄明. 维生素 E 与硒的抗氧化机理及应用现状[J]. *山东畜牧兽医*, 2011, 32(9):75-76.
- [59] 金海峰, 孙晓蛟, 鲁承. 日粮添加硒与维生素 E 对羔羊精液品质及抗氧化酶活性的影响[J]. *饲料工业*, 2018, 39(19):30-34.
- [60] 施力光, 周雄, 荀文娟, 等. 补饲硒和维生素 E 对高温季节山羊精液品质、抗氧化酶活性及热休克蛋白表达的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2016, 43(1):101-107.
- [61] 金海峰, 孙晓蛟, 鲁承. 日粮添加硒与维生素 E 对公山羊组织中 GPX 基因 mRNA 表达量的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2019(24):106-111.
- [62] UZOCHUKWU I E, ALI L C, AMAEFULE B C, et al. Impact of vitamin E and selenium supplementation on growth, reproductive performance, and oxidative stress in dexamethasone-stressed Japanese quail cocks: Vitamin E & selenium in stressed quail cocks[J]. *Poultry Science*, 2025, 104(3):104888.