

纳米硒在反刍动物体内的吸收与转化机制研究进展

谢建明,王铎和

云南博仕奥生物技术有限公司,昆明 652100

摘要 与传统硒源相比,纳米硒(nano-selenium)在反刍动物体内具有更高的稳定性和生物利用度,纳米硒独特的吸收与转化机制对反刍动物的健康与生产性能具有积极的调控作用。本文以“高稳定性—高效吸收—精准转化”为机制框架,阐述纳米硒在反刍动物体内的代谢过程与生理效应。纳米硒在瘤胃中稳定性显著高于无机硒,主要通过小肠跨细胞(网格蛋白/窝蛋白介导内吞)和旁细胞(紧密连接调控)途径高效吸收,随后转化为硒化物并借助硒代半胱氨酸插入序列(SECIS)整合入 GPx 等硒蛋白,从而增强机体的抗氧化与免疫功能,并优化瘤胃发酵模式(如丙酸产量显著提高)。未来研究应着重解析纳米硒与反刍动物肠道微生物的互作机制,建立品种特异性剂量模型,并发展靶向递送技术,以进一步推动纳米硒在畜牧业中的高效安全应用。

关键词 纳米硒;反刍动物;吸收机制;生物转化;生物利用度;硒蛋白

Research progress on the absorption and transformation mechanism of nano-selenium in ruminants

XIE Jianming, WANG Xinhe

Bosar Biotechnology Co., Ltd., Yunnan Province, Kunming 652100, China

Abstract Nano-selenium has higher stability and bio-availability in ruminants compared with traditional sources of selenium. The unique absorption and transformation mechanism of nano-selenium has a positive effect on regulating the health and production performance of ruminants. This article elaborates on the metabolic process and physiological effects of nano-selenium in ruminant animals under the mechanistic framework of high stability-efficient absorption-precise transformation. The stability of nano-selenium in the rumen is significantly higher than that of inorganic selenium. Nano-selenium is efficiently absorbed mainly via transcellular pathways mediated by clathrin/caveolin-dependent endocytosis and paracellular pathways regulated by tight junctions in the small intestine, and then converted into selenides and integrated into seleno-proteins such as GPx with the assistance of the selenocysteine insertion sequence (SECIS), thereby enhancing the antioxidant and immune functions of body, and optimizing the fermentation patterns of rumen such as significantly increasing the production of propionic acid. Studies in the future should focus on analyzing the interaction mechanism between nano-selenium and gut microbiota in ruminants, establishing species-specific dose models, and developing targeted delivery technologies to further promote the efficient and safe utilization of nano-selenium in

收稿日期:2025-09-02

作者简介:谢建明,男,1992年生,硕士,高级工程师。

animal husbandry.

Keywords nano-selenium; ruminants; absorption mechanism; biotransformation; bioavailability; seleno-protein

硒是反刍动物的必需微量元素,缺硒会导致反刍动物对各种疾病的易感性增加及生产繁殖性能下降^[1]。硒缺乏是一个全球性的营养问题,全球有 40 多个国家和地区存在硒缺乏问题^[2],硒缺乏地区的饲料和牧草中硒含量普遍较低,无法满足反刍动物的正常生长需求^[3-4]。在中国约 72% 的地区属于缺硒区,其中 29% 的地区含硒量低于 0.02 mg/kg,属于严重缺硒地区^[5],约 71.6% 的饲料和牧草中硒含量低于 0.05 mg/kg^[3]。在反刍动物的主要放牧区域,如新疆天山北部、青藏高原东北边缘和青海湖布哈河上游地区,土壤硒含量极低,导致牧草和饲料中硒含量不足,严重影响反刍动物的健康和生产性能^[4]。

目前,作为反刍动物的补硒剂主要分为两类,无机矿物硒(亚硒酸钠、硒酸钠)和有机硒(富硒酵母、硒代蛋氨酸)。在国内,动物饲料中使用最多的硒补充剂为亚硒酸钠,而国外使用较多的则是酵母硒与硒代蛋氨酸^[6]。近年来,纳米硒因较高的生物利用度和较低的毒性,在畜牧养殖领域受到广泛关注。与亚硒酸钠、硒代蛋氨酸和甲基硒代半胱氨酸等传统硒补充剂相比,纳米硒不仅在肠道吸收效率方面表现更优,还能显著降低硒过量所导致的毒副作用($P < 0.05$)^[7-9]。多项研究表明,纳米硒可通过改善动物的抗氧化能力、免疫功能和硒储存状态,进一步提升生产性能和机体健康水平^[10-12]。因此,纳米硒作为 1 种高效且安全的硒源,在现代化畜牧生产中具有广阔的应用前景。

基于此,本文以反刍动物纳米硒补硒的核心需求为导向,重点开展 3 个方面研究:一是系统比较纳米硒与无机硒(亚硒酸钠)、有机硒(硒代蛋氨酸)在瘤胃稳定性、小肠吸收效率及相对生物利用度的差异;二是深入解析纳米硒通过跨细胞(网格蛋白/小窝蛋白介导内吞)与旁细胞(紧密连接调控)途径的吸收机制,及吸收后硒离子→硒化物→硒代半胱氨酸→功能性硒蛋白的体内转化路径;三是关联吸收转化机制与生物学效应,阐明纳米硒对瘤胃发酵、抗氧化系统及生产性能的调控规律,旨在填补“纳米硒在反刍动物体内完整作用链条”的理论空白,

为缺硒地区(如新疆天山、青藏高原放牧区)反刍动物精准补硒方案制定、低毒高效硒源饲料研发提供科学依据,助力解决全球缺硒背景下反刍动物健康与生产性能下降的实际问题。

1 纳米硒在反刍动物中的吸收机制

纳米硒(Nano-Se)作为 1 种新型硒源,在反刍动物体内展现出独特的吸收与转化机制,这主要归功于纳米硒纳米级的物理化学特性。纳米硒是 1 种粒径介于 20~60 nm 的红色单质硒颗粒,纳米硒制备基于蛋白质酰胺平面对元素硒的吸附与调控作用,通过蛋白质介导形成以蛋白质为核、元素硒为膜,并以蛋白质为分散剂的稳定纳米结构^[13]。纳米尺度(1×10^{-9} m)赋予材料诸如大比表面积、高表面活性、优异催化效率和吸附能力等特性^[14]。在反刍动物独特的瘤胃环境中,纳米硒表现出更好的稳定性,不易被瘤胃微生物还原为不可吸收的形式,从而保证了其在消化道后段的有效吸收^[15]。吸收后,纳米硒中的硒元素进入体内代谢池,参与合成多种关键的硒蛋白(如谷胱甘肽过氧化物酶 GPx),这些硒蛋白在抗氧化、免疫调节和新陈代谢中发挥核心作用^[16]。纳米硒最终生物效应体现在增强动物的抗氧化状态、提高免疫功能、改善生产性能(如增重、饲料转化率)和繁殖性能(如精子质量、胎儿发育)等方面^[17-19]。

1.1 消化道吸收路径与效率

纳米硒的吸收主要发生在小肠。作为 1 种纳米颗粒,纳米硒穿过肠黏膜的机制可能同时涉及跨细胞途径(transcellular transport)和旁细胞途径(paracellular transport)^[20]。在跨细胞途径中,纳米颗粒可通过 M 细胞的转胞吞作用或肠上皮细胞的主动内吞作用被摄取,随后进入血液和淋巴系统^[20-21]。纳米颗粒的尺寸是影响纳米硒吸收效率的关键因素,通常颗粒越小,纳米硒生物活性和吸收率越高^[20]。研究发现,粒径小于 100 nm 的颗粒比更大尺寸的颗粒吸收率高出 15~250 倍^[21]。此外,纳米硒可以通过形成纳米乳液滴来增加肠道黏膜的通透性,从而进一步提高吸收效率^[19]。

1.2 瘤胃环境中的稳定性与作用

反刍动物的瘤胃是一个复杂的微生物发酵系统,其独特的生理环境(pH 5.5~6.5)对硒的形态和生物利用度有决定性影响。传统的无机硒(如亚硒酸钠)在瘤胃中很容易被微生物还原成不溶性的元素硒(Se)或硒化物,这些形态无法被动物吸收利用,导致无机硒生物利用度大大降低^[16,22-23]。

相比之下,纳米硒表现出更高的瘤胃稳定性。纳米硒核心机制在于纳米尺度效应与表面修饰的协同作用:

1)粒径优化。通过调控制备工艺,纳米硒的最优粒径被控制在20~60 nm,此范围可规避瘤胃微生物的吞噬阈值(通常>100 nm易被识别),同时保证小肠上皮细胞的高效内吞^[20,25]。

2)表面修饰。采用磷脂(如卵磷脂)或壳聚糖进行包覆,形成厚度5~10 nm的保护层,可将瘤胃内蛋白酶对纳米颗粒的降解率降低至<5%($P<0.05$),并在真胃酸性环境(pH<4)中通过质子化作用触发硒离子快速释放^[19,21]。

1.3 不同硒源吸收特性的比较

为了更清晰地展示纳米硒在吸收机制上的优势,表1对比了不同硒源在反刍动物体内的主要吸收特性。无机硒虽然成本低,但在反刍动物瘤胃中稳定性差,易被微生物转化为不可利用的形态,导致无机硒生物利用度偏低。有机硒(如硒酵母)中的硒主要以硒代蛋氨酸的形式存在,通过氨基酸的转运途径被吸收,有机硒生物利用度远高于无机硒。而纳米硒结合了无机硒的成本潜力与有机硒的吸收优势,既凭借纳米结构保持高瘤胃稳定性,又能通过粒径效应与表面修饰高效穿过肠道屏障,最终展现出最高的生物利用度和最低的毒性,被认为是反刍动物营养中极具潜力的硒源^[15,19-25]。核心机制:纳米硒首先凭借其物化惰性在瘤胃中保持稳定,规避了微生物的无效转化^[26];随后,在小肠通过纳米级胞吞作用被高效吸收,直接进入循环系统^[27];最终在体内作为缓释硒库,持续释放活性硒,同时满足功能性硒蛋白合成和组织硒储备的双重需求^[28],实现了高生物利用度与低毒性的协同兼顾。

表1 不同硒源在反刍动物体内的吸收特性比较

硒源	主要化学形式	吸收机制	主要吸收部位	相对生物利用度	瘤胃稳定性	参考文献
无机硒	亚硒酸盐、硒酸盐	被动扩散或主动转运	回肠	较低(通常设定为100%参考基准)	较差,易被还原	[16]
有机硒	硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸	氨基酸转运系统	十二指肠	中高(120%~180%)	相对稳定	[22]
纳米硒	元素硒	跨细胞/旁细胞转运、内吞作用	小肠	高(150%~250%或更高)	高,不易被还原	[23]

在细胞水平,纳米硒的高效转运归功于跨细胞与旁细胞2种途径的协同作用。跨细胞途径是纳米硒核心吸收机制:纳米硒主要通过网格蛋白与小窝蛋白介导的内吞作用被细胞主动摄取;此外,凭借纳米硒纳米尺寸与表面特性,它也能通过被动扩散或借助氨基酸等转运蛋白进入细胞。进入细胞后,纳米硒可在内质网、线粒体等细胞器内被代谢转化为硒代半胱氨酸等活性形式,直接参与硒蛋白合成,这是纳米硒高生物利用度的关键^[29-33]。纳米硒也能通过旁细胞途径辅助转运:它可能通过调控MAPK/ERK等信号通路,影响Claudin、Occludin等紧密连接蛋白的表达与细胞骨架重排,从而暂时性地、可逆地增大细胞间隙,促进自身穿越肠道上皮屏障^[34-36]。这2种途径优势互补,共同决定了纳米硒在体内的高效吸收、精准分布与卓越生物利用度。

2 纳米硒在反刍动物体内的转化路径

纳米硒被吸收进入反刍动物体内后,会经历一系列复杂的生化转化过程,最终被整合进功能性生物分子中,或在特定组织中储存和分布,从而发挥其广泛的生物学效应。

2.1 体内代谢与硒蛋白合成

无论何种来源的硒,在体内发挥生理功能的核心途径是参与合成硒蛋白(selenoproteins)^[16,37]。吸收后的纳米硒颗粒会释放硒离子并进入体内硒代谢池,这些硒离子经过一系列还原反应最终转化为硒化物(selenide),这是合成硒代半胱氨酸(selenocysteine, Sec)的关键前体^[16,22]。硒代半胱氨酸是构成硒蛋白活性中心的关键氨基酸,目前已知的硒蛋白有超过25种,其中包括谷胱甘肽过氧化物酶

(GPx)、硫氧还蛋白还原酶(TrxR)、碘甲状腺原氨酸脱碘酶(DIO)等^[16,22,37]。这些硒蛋白在抗氧化防御、甲状腺激素代谢、免疫调节等关键生理过程中扮演着不可或缺的角色。补充纳米硒能显著提高血液和组织中GPx和TrxR等关键硒酶的活性($P<0.05$)，这是纳米硒发挥抗氧化和免疫增强作用的主要生化基础^[16,22,38]。

2.2 对细胞代谢途径的调节

纳米硒不仅是合成硒蛋白的原料，还能直接或间接地调节宿主的多种细胞代谢途径。

1)对瘤胃发酵的优化。纳米硒能显著改善瘤胃发酵模式($P<0.05$)，提高瘤胃微生物的总量和活性，增加总挥发性脂肪酸(VFA)的浓度，同时降低瘤胃液的pH值和氨氮浓度^[15,22,24]。特别地，纳米硒能使发酵模式向产生更多丙酸的方向转变，即降低乙酸/丙酸比值，这有利于提高能量利用效率^[15,22]。

2)对能量和脂质代谢的影响。研究表明，补充硒可以改变肝脏的能量和脂肪酸代谢^[39]。纳米硒通过强大的抗氧化能力，可以减少脂质过氧化产物(如丙二醛,MDA)的生成，保护细胞膜的完整性，从而维持正常的代谢功能^[16,40-41]。

3)对微生物蛋白合成的促进。纳米硒能够刺激瘤胃微生物的生长，尤其是纤维素分解菌的活性，从而促进饲料中粗蛋白和纤维的降解^[15,22]。瘤胃微生物利用氨氮合成自身蛋白质，纳米硒的补充通过增加微生物量，提高了微生物蛋白的合成效率，这可以通过尿液中嘌呤衍生物排泄量的增加得到证实^[15,22]。

4)组织分布与排泄。吸收后的硒会在全身组织中分布和沉积。肝脏和肾脏是硒代谢和储存的主要器官，通常具有较高的硒浓度^[16,22,38]。肌肉组织也是硒的重要储存库，特别是当以有机硒或纳米硒形式补充时，肌肉中的硒含量会显著增加($P<0.05$)，这不仅改善了动物本身的健康，也提高了肉产品的营养价值^[16,22]。硒的排泄途径在反刍动物和单胃动物之间存在差异。反刍动物主要通过粪便排泄硒，而单胃动物则主要通过尿液^[22]。纳米硒由于其高吸收率，预计其随粪便排出的比例会低于低生物利用度的硒源^[16,40]。

3 影响因素与生物效应

纳米硒在反刍动物体内的吸收、转化及最终的

生物效应受到多种内外因素的调控。深入了解这些因素及其带来的广泛生物学效应，对于优化纳米硒在畜牧业中的应用至关重要。

3.1 主要影响因素

1)纳米颗粒的理化性质。纳米硒的尺寸、形状、表面电荷、晶型和稳定性是决定纳米硒生物活性的首要因素^[25,42]。尺寸越小，比表面积越大，通常反应活性和吸收效率越高^[20]。此外，对纳米硒进行表面修饰，如使用磷脂、壳聚糖等生物相容性材料进行包覆，可以显著提高纳米硒在消化道中的稳定性和分散性($P<0.05$)，防止颗粒聚集，同时降低其潜在的细胞毒性，从而优化生物利用度^[25,42-43]。

2)硒的化学形式与剂量。不同化学形式的硒(无机、有机、纳米)，吸收转化机制各不相同，纳米硒因其高生物利用度和低毒性而被视为最优选择之一^[16,42]。补充剂量同样至关重要，硒的营养需求范围相对较窄，剂量不足无法达到预期效果，而过量则可能引发毒性^[37]。研究表明，在绵羊中，3.0 mg/kg日粮干物质(DM)的纳米硒是改善瘤胃发酵和饲料利用的适宜剂量^[15]。

3)日粮组成与动物状态。日粮中的其他成分(如高硫、高钙)可能会与硒发生拮抗作用，影响吸收^[22]。同时，动物自身的健康状况、年龄、生理阶段(如妊娠期、泌乳期)以及肠道微生物群的构成，都会影响纳米硒的代谢需求和利用效率^[16,41]。

综上所述，纳米硒在反刍动物体内的作用并非单一环节，而是从“瘤胃稳定存活”到“小肠高效吸收”，再到“细胞内精准转化为硒蛋白”的连续过程。这一过程既受颗粒粒径、表面修饰等理化特性调控，也与动物自身生理状态、肠道环境密切相关。为直观呈现这一完整机制链条，清晰展现“吸收—转化—效应”的内在关联，笔者绘制了纳米硒的吸收、转化与生物学效应路径图(图1)。

上述机制图串联了三大核心环节：首先，纳米硒凭借20~60 nm的优化粒径及磷脂/壳聚糖表面修饰，在瘤胃中规避微生物还原失活，保持结构稳定；随后在小肠通过跨细胞(网格蛋白/小窝蛋白介导内吞)与旁细胞(调控紧密连接)双途径被高效吸收，进入血液循环；吸收后经溶酶体降解释放硒离子，进入硒代谢池转化为硒代半胱氨酸，再通过SECIS元件调控整合入GPx、TrxR等功能性硒蛋白；最终通过硒蛋白活性激活、瘤胃微生物代谢调

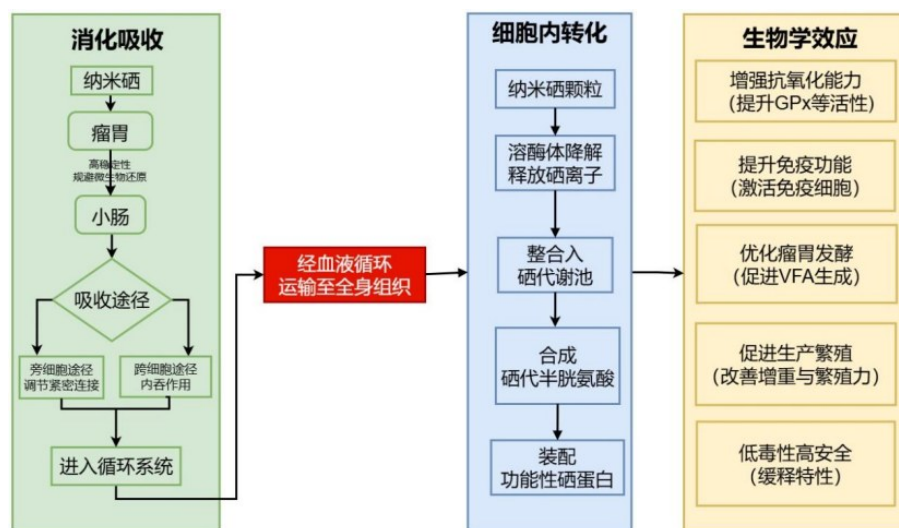


图 1 纳米硒的吸收、转化与生物学效应路径

节等途径,输出抗氧化、免疫增强、生产性能提升等生物学效应,同时依托“缓释硒库”特性降低毒性风险。上述机制也为纳米硒的生物学效应提供了核心支撑。

3.2 广泛的生物学效应

纳米硒的应用对反刍动物的健康和生产性能产生多方面的积极影响,其生物学效应可通过调控反刍动物的瘤胃微生物生态、细胞抗氧化系统、免疫功能及代谢通路多维度体现(图1)。这些效应并非孤立存在,而是纳米硒“高稳定性吸收→精准转化为功能性硒蛋白”的必然结果,且不同效应间存在协同作用(如瘤胃发酵优化可间接提升能量代谢效率,进而促进生产性能),具体效应如表2所示。

由表2可知,纳米硒的生物学效应具有显著的针对性与协同性:

1) 瘤胃功能改善。纳米硒通过提升瘤胃内纤

维素分解菌(如 *Fibrobacter succinogenes*)活性^[15],使总挥发性脂肪酸(VFA)浓度提升12%~18%^[15],同时降低氨氮浓度(减少蛋白质降解损失),这与本文“1.2”中“纳米硒瘤胃稳定性高,避免微生物无效转化”直接相关。

2) 抗氧化能力增强。纳米硒转化为硒代半胱氨酸后,显著提升血液GPx活性(较无机硒高35%~50%, $P < 0.05$)^[16,38],同时降低脂质过氧化产物MDA含量,印证了本文“2.1”中“硒蛋白是抗氧化核心载体”的结论。

3) 免疫与生产性能提升。一方面,通过激活免疫细胞(如中性粒细胞吞噬活性提升20%~25%)^[41],增强抗病能力;另一方面,通过调节IGF-1等代谢激素^[40],使绵羊日增重提升8%~12%、奶牛泌乳量增加5%~8%(不同品种存在差异),实现“健康—生产”的协同提升。

表 2 纳米硒对反刍动物的主要生物学效应

生物效应	具体表现	相关机制
改善瘤胃功能与饲料利用	提高VFA浓度,降低氨氮,优化发酵模式,提高饲料消化率 ^[15,22,24]	刺激瘤胃微生物活性,特别是纤维分解菌,促进营养物质降解和微生物蛋白合成 ^[15,22]
增强抗氧化能力	提高GPx、TrxR、SOD等抗氧化酶活性,降低MDA水平 ^[16,38,41]	参与硒蛋白合成,清除自由基,保护细胞免受氧化损伤 ^[16,37]
提升免疫功能	增强中性粒细胞等免疫细胞的吞噬活性,提高抗体滴度,展现抗病毒、抗菌活性 ^[16,40-41]	调节免疫细胞功能,维持活性氧(ROS)平衡,支持先天性和获得性免疫应答 ^[16,41]
促进生产与繁殖性能	提高增重率、饲料转化率,改善精子质量,促进胎儿生长和毛囊发育 ^[24,40-41]	优化能量代谢,调节繁殖相关激素(如IGF-1) ^[40-41]

综上,纳米硒的生物学效应以“低毒性、高协同性”为显著特征,既规避了无机硒过量的毒性风险,又克服了有机硒瘤胃稳定性不足的缺陷,多维度效

应使纳米硒成为反刍动物(尤其是缺硒地区放牧品种,如新疆细毛羊、青海牦牛)补硒的优选硒源,为解决“缺硒导致的生产性能下降”问题提供了实践

依据。

4 结语与展望

纳米硒通过“瘤胃稳定—小肠高效吸收—硒蛋白精准合成”的独特机制,实现了传统硒源无法比拟的生物利用度与安全性。其核心优势在于:①纳米结构可规避瘤胃微生物转化失活;②双途径吸收提高肠道通过率;③硒代谢池动态调控满足硒蛋白合成需求。

未来研究需重点突破3个方面:

1) 肠道微生物互作机制。解析纳米硒对瘤胃菌群(如 *Fibrobacter succinogenes*、*Prevotella bryantii*)的调控效应,阐明微生物代谢产物(如短链脂肪酸)与硒吸收的协同作用;

2) 品种特异性剂量模型。建立奶牛、绵羊、山羊等不同反刍动物的品种—生理阶段特异性剂量模型,例如泌乳奶牛的推荐添加量较干奶期增加30%~40%;

3) 靶向递送技术研发。开发仿生矿化纳米硒(如乳酸菌包埋制剂),提高其在肠道特定区段的释放效率,降低与高硫日粮的拮抗作用。

参考文献

- [1] EL GHANY HEFNAWY A, TÓRTORA-PÉREZ J L. The importance of selenium and the effects of its deficiency in animal health [J]. Small ruminant research, 2010, 89(2-3): 185-192.
- [2] 刘传铭,张国伟,王连顺,等. 超营养硒在现代农业提质增效中的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(3): 431-441.
- [3] 郭璐,宋晶晶,付石军,等. 有机硒在反刍动物营养中的研究进展[J]. 中国饲料, 2020(19): 68-73.
- [4] 安添午,罗泽,张英帆,等. 硒在反刍动物及其产品方面的作用[J]. 草学, 2021(2): 70-72.
- [5] 白雪,李飞,李发弟,等. 硒在反刍动物中的营养作用和生产应用[J]. 动物营养学报, 2021, 33(4): 1880-1890.
- [6] REGISTER F. Food additives permitted in feed and drinking water: Selenium yeast[J]. Federal register, 2002, 67: 46850-46851.
- [7] XU B H, XU Z R, XIA M S, et al. Effect of Nano red elemental selenium on GPx activity of broiler chick kidney cells in vitro[J]. Wuhan university journal of natural sciences, 2003, 8(4): 1161-1166.
- [8] ZHANG J S, WANG H L, YAN X X, et al. Comparison of short-term toxicity between Nano-Se and selenite in mice[J]. Life sciences, 2005, 76(10): 1099-1109.
- [9] WANG H L, ZHANG J S, YU H Q. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice[J]. Free radical biology and medicine, 2007, 42(10): 1524-1533.
- [10] WANG L S, SHAN A S. Recent advances of nano-selenium in animal nutrition[J]. Chinese journal of animal husbandry and veterinary medicine, 2011, 38(4): 14-21.
- [11] ZAV' YALOV O A. The effect of selenium supplements on selenium metabolism, performance and intestinal microbiome in farm animals (review)[J]. Agrarian scientific journal, 2023(12): 95-100.
- [12] GEBRIEL G M, EL- FIKY A A, SIAM S M S, et al. Effect of dietary nano-selenium on productive, immunological performance, oxidation resistance and selenium deposition in tissue for laying hens[J]. Menoufia journal of animal poultry and fish production, 2020, 4(4): 63-64.
- [13] 高学云,张劲松,张立德. 纳米红色元素硒的急性毒性和生物利用性[J]. 卫生研究, 2000, 29(1): 57-58.
- [14] ZHANG J S, GAO X Y, ZHANG L D, et al. Biological effects of a nano red elemental selenium[J]. BioFactors, 2001, 15(1): 27-38.
- [15] SHI L G, XUN W J, YUE W B, et al. Effect of elemental nano-selenium on feed digestibility, rumen fermentation, and purine derivatives in sheep[J]. Animal feed science and technology, 2011, 163(2/3/4): 136-142.
- [16] ČOBANOVA K, FAIX Š, PLACHÁ I, et al. Effects of different dietary selenium sources on antioxidant status and blood phagocytic activity in sheep[J]. Biological trace element research, 2017, 175(2): 339-346.
- [17] SHI L G, XUN W J, YUE W B, et al. Effect of elemental nano-selenium on feed digestibility, rumen fermentation, and purine derivatives in sheep[J]. Animal feed science and technology, 2011, 163(2/3/4): 136-142.
- [18] MOHAPATRA P, SWAIN R K, MISHRA S K, et al. Effects of dietary nano-selenium on tissue selenium deposition, antioxidant status and immune functions in layer chicks[J]. International journal of pharmacology, 2014, 10(3): 160-167.
- [19] HUANG J H, LIN X, ZHU Y C, et al. Synthesis and stability of phospholipid-encapsulated nano-selenium[J/OL]. Green processing and synthesis, 2023, 12(1): 20228100[2025-09-02]. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-8100>.
- [20] SITARESMI P, HUDAYA M, ATMOKO B, et al. Production and effects of nanomineral selenium (Nano-Se) feed additive on rumen fermentation, productivity, and reproductive performance of ruminants[J]. Journal of advanced veterinary and animal research, 2024, 11(1): 101-112.
- [21] HOSNEĐLOVA B, KEPINSKA M, SKALICKOVA S, et al. Nano-selenium and its nanomedicine applications: a critical review[J]. International journal of nanomedicine, 2018, 13: 2107-2128.
- [22] GRESAKOVA L, COBANOVA K, FAIX S. Selenium retention in lambs fed diets supplemented with selenium from inorganic or organic sources[J]. Small ruminant research, 2013, 111(1/2): 76-82.

- [23] TSEKHMISTRENKO S I, BITYUTSKYY V S, TSEKHMISTRENKO O S, et al. Synthesis of selenium nanoparticles with the use of 'green' technologies[J]. *Tehnologîa virobnic-tva i pererobki produktiv tvarinnictva*, 2022, 170(1): 98-113.
- [24] XUN W J, SHI L G, YUE W B, et al. Effect of high-dose nano-selenium and selenium-yeast on feed digestibility, rumen fermentation, and purine derivatives in sheep[J]. *Biological trace element research*, 2012, 150(1/3): 130-136.
- [25] BIBI S, MUNAWAR A, ISHAQ M W, et al. Controlling the size, shape, and stability of SeNPs by bromelain: improved antioxidant, anti-bacterial and anti-cancer activities[J/OL]. *Journal of molecular structure*, 2023, 1294: 136633[2025-09-02]. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136633>.
- [26] 付瑶,郭江鹏,蒋林树.功能性微量元素硒对反刍动物瘤胃发酵的影响及其与瘤胃微生物的关系[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(11): 4992-4997.
- [27] 张铮.仿生矿化纳米硒乳酸菌的制备及其增强羊三联四防疫苗效果的评价[D].哈尔滨:东北农业大学, 2023.
- [28] 毛开宇,陈安森,彭唯实,等.纳米硒对夏季舍饲雷州山羊生长性能和血液参数的影响[J]. *饲料研究*, 2025, 48(6): 1-6.
- [29] HUANG Y Y, HE L Z, LIU W, et al. Selective cellular uptake and induction of apoptosis of cancer-targeted selenium nanoparticles [J]. *Biomaterials*, 2013, 34(29): 7106-7116.
- [30] ZHANG P, CHEN Z Q, ZHOU L J, et al. Carboxymethyl cellulose and carboxymethyl chitosan-based composite nanogel as a stable delivery vehicle for oyster peptides: characterization, absorption and transport mechanism[J/OL]. *Food chemistry*, 2024, 442: 138464[2025-09-02]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138464>.
- [31] CHEN W J, WANG W Q, XIE Z Z, et al. Size-dependent penetration of nanoparticles in tumor spheroids: a multidimensional and quantitative study of transcellular and paracellular pathways[J/OL]. *Small*, 2023, 20(8): e2207269[2025-09-02]. <https://doi.org/10.1002/sml.202207269>.
- [32] WANG Y B, FU L L. Forms of selenium affect its transport, uptake and glutathione peroxidase activity in the Caco-2 cell model[J]. *Biological trace element research*, 2012, 149(1): 110-116.
- [33] GRACEFFA V. Intracellular protein delivery: New insights into the therapeutic applications and emerging technologies[J]. *Biochimie*, 2023, 213: 82-99.
- [34] TOKUDA S, MIYAZAKI H, NAKAJIMA K I, et al. NaCl flux between apical and basolateral side recruits claudin-1 to tight junction strands and regulates paracellular transport[J]. *Biochemical and biophysical research communications*, 2010, 393(3): 390-396.
- [35] SEKER M, FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ C, MARTÍNEZ-CRUZ L A, et al. Mouse models of human claudin-associated disorders: benefits and limitations[J/OL]. *International journal of molecular sciences*, 2019, 20(21): 5504[2025-09-02]. <https://doi.org/10.3390/ijms20215504>.
- [36] LONG Y M, YANG X Z, YANG Q Q, et al. PM2.5 induces vascular permeability increase through activating MAPK/ERK signaling pathway and ROS generation[J/OL]. *Journal of hazardous materials*, 2020, 386: 121659[2025-09-02]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121659>.
- [37] FAIRWEATHER-TAIT S J, BAO Y P, BROADLEY M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & redox signaling*, 2011, 14(7): 1337-1383.
- [38] EID Y Z, OMARA Y, RAGAB A, et al. Mitigation of imidacloprid toxicity in poultry chicken by selenium nanoparticles: growth performance, lipid peroxidation, and blood traits[J]. *Biological trace element research*, 2023, 201(12): 5796-5808.
- [39] HU X, CHANDLER J D, ORR M L, et al. Selenium supplementation alters hepatic energy and fatty acid metabolism in mice[J]. *The journal of nutrition*, 2018, 148(5): 675-684.
- [40] LUO X Z, RAUAN A, XING J J, et al. Influence of dietary Se supplementation on aquaponic system: focusing on the growth performance, ornamental features and health status of Koi carp (*Cyprinus carpio* var. *Koi*), production of Lettuce (*Lactuca sativa*) and water quality[J]. *Aquaculture research*, 2020, 51(12): 4913-4925.
- [41] LIN Y X, ZHOU C R, LI D, et al. Integrated non-targeted and targeted metabolomics analysis reveals the mechanism of inhibiting lignification and optimizing the quality of pea sprouts by combined application of nano-selenium and lentinans[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2023, 103(9): 4553-4564.
- [42] REED K B, ALPER H S. Expanding beyond canonical metabolism: interfacing alternative elements, synthetic biology, and metabolic engineering[J]. *Synthetic and systems biotechnology*, 2018, 3(1): 20-33.
- [43] JONES O A H, DIAS D A, CALLAHAN D L, et al. The use of metabolomics in the study of metals in biological systems[J]. *Metallomics*, 2015, 7(1): 29-38.

【责任编辑:胡 敏】