

硒的生理功能及其对畜禽动物性能和肉质的影响研究进展

余青¹, 秦乐蓉¹, 丽蕊¹, 王海滨^{1,2,*}, 胡依黎^{1,2}, 廖鄂^{1,2}, 陈季旺^{1,2}, 程水源^{2,3}
(1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023; 2.国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北 武汉 430023; 3.武汉轻工大学生物与制药工程学院, 湖北 武汉 430023)

摘要: 微量元素硒不仅是人体必需营养元素之一, 也是动物生长发育必不可少的元素, 与动物许多重要的生理学功能密切相关。肉类作为人体摄入硒的主要途径, 其硒含量普遍较低。通过向动物饲料中添加硒补充剂, 可以有效增加可食组织中硒的沉积, 这是改善人类饮食中硒摄入的一种有效方法, 同时硒对动物体的影响也引起国内外学者的广泛关注。本文综述硒的生理功能和作用, 分析国内外开展硒对畜禽动物性能及肉质影响的研究现状, 包括途径、可能的机理以及存在的问题, 以期在动物营养、肉质改善及富硒肉制品的生产开发中的应用提供参考。

关键词: 硒; 畜禽动物; 性能; 肉品品质

Recent Advances in Understanding the Physiological Functions of Selenium and Its Effects on Animal Performance and Meat Quality

YU Qing¹, QIN Lerong¹, LI Rui¹, WANG Haibin^{1,2,*}, HU Yili^{1,2}, LIAO E^{1,2}, CHEN Jiwang^{1,2}, CHENG Shuiyuan^{2,3}
(1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2.National R&D Center for Se-Rich Agricultural Products Processing Technology, Wuhan 430023, China;
3.School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The trace element selenium is not only one of the essential nutrients for the human body, but also an indispensable element for animal growth and development that is closely related to many important physiological functions of animals. Meat is the major route of selenium intake in humans, while the level of its selenium content is generally not high. Dietary selenium supplementation of animals can effectively increase the deposition of selenium in edible tissues, thereby providing an effective method to improve selenium intake in the human diet. Meanwhile, the effect of selenium in the animal body has also caused widespread concern among researchers worldwide. This paper reviews the physiological functions and effects of selenium, and analyzes the current status of studies on the impact of selenium on the performance and meat quality of livestock and poultry, including pathways, possible mechanisms and existing problems. This review is expected to provide a reference for the development and application of Se-rich meat products.

Keywords: selenium; livestock and poultry animal; performance; meat quality

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191231-317

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2020) 03-0094-06

引文格式:

余青, 秦乐蓉, 丽蕊, 等. 硒的生理功能及其对畜禽动物性能和肉质的影响研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 94-99.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191231-317. <http://www.rlyj.net.cn>

YU Qing, QIN Lerong, LI Rui, et al. Recent advances in understanding the physiological functions of selenium and its effects on animal performance and meat quality[J]. Meat Research, 2020, 34(3): 94-99. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191231-317. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2019-12-31

基金项目: 2019年恩施州科技计划项目 (D20190022)

第一作者简介: 余青 (1993—) (ORCID: 0000-0002-3757-3991), 女, 硕士研究生, 研究方向为富硒动物产品精深加工与高效利用。E-mail: yuqing1223@foxmail.com

*通信作者简介: 王海滨 (1964—) (ORCID: 0000-0001-6385-4706), 男, 教授, 博士, 研究方向为富硒动物产品精深加工与高效利用。E-mail: whb6412@163.com

自1817年瑞典化学家Berzelius发现元素硒后的几十年时间里,人们一直将硒认定为一种有毒元素^[1-2]。直到1973年,才发现硒具有良好的抗氧化作用,这是由于硒是谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)的重要组成成分,能在体内特异性催化还原谷胱甘肽与过氧化物的氧化还原反应^[1,3];同年,世界卫生组织宣布将硒列为人类和动物体所必需的微量元素之一。1988年,中国营养学会也宣布硒被列为人体所必需的膳食营养元素。2017年,国家卫生健康委员会发布最新版的人体必需营养素微量元素硒的参考摄入量。研究表明,人体摄入硒的理想范围应为50~200 μg/d,体内缺硒可能会引发诸如大骨节病、克山病、心血管疾病等多种疾病^[4],但硒摄入量过高也会使得机体产生神经系统紊乱、皮屑和毛发脱落、指甲脱落等症状^[5]。因此,如何控制硒摄入量且合理、健康和安全的才是机体科学补硒的关键。目前,市面上补硒类产品以富硒食品类最为广泛,而通过人工转化的富硒食品则是最常见的补硒类食品。其中富硒肉品作为一种方便、快捷的人工转化补硒类食品深受人们喜爱,目前富硒畜禽肉制品的开发集中在对家禽日粮人为添加硒源,从而实现硒在动物肌肉组织中的沉积,因此硒对畜禽动物生长性能的影响也逐渐成为研究热点。本文综述国内外学者对于微量元素硒的生理功能和作用以及畜禽动物补硒提升其性能和肉品质等的研究现状和发展趋势,以期富硒肉品生产技术的研究和产品开发提供参考。

1 硒的生理功能和作用

1.1 抗氧化

机体内,硒以硒代半胱氨酸的形式参与构成GSH-Px,而GSH-Px的主要功能是催化还原型谷胱甘肽为氧化型谷胱甘肽,是机体内重要的抗过氧化物酶,能氧化还原有毒的过氧化物变为无毒的羟基化物,同时促进过氧化氢分解,防止脂蛋白、DNA生物大分子等发生氧化应激反应,从而达到阻止过氧化物对细胞膜的结构及功能产生损害或干扰的效果;同样地,该酶体系可能会通过减缓过氧化氢和脂质过氧化,对畜禽肉屠宰后肌肉的抗氧化起到重要作用^[6]。

1.2 增强免疫机能

硒能通过刺激免疫球蛋白并促进淋巴细胞分泌淋巴因子,从而增强机体免疫力^[7]。张琴等^[8]研究证实,在刺参饲料中添加600 mg/kg硒酵母可提高刺参的免疫功能;于东^[9]研究发现,细胞因子白细胞介素-1β(interleukin-1β, IL-1β)、IL-6、IL-12β、IL-17、肿瘤坏死因子-α mRNA等的表达能通过硒蛋白W进行调节和控制,进而对机体的免疫机能产生影响。此外硒还能显著增强

机体的细胞吞噬能力并提高吞噬细胞的存活率,高水平的硒还能达到控制细胞增殖的目的,因此可将其作为肿瘤抑制剂来抑制机体内肿瘤的生长和增殖,同时硒还能阻止多种致癌物产生致突变性^[10]。

1.3 抗癌

硒被誉为“抗癌之王”,据相关资料显示,癌症的发病率与当地土壤中的硒含量呈明显负相关;健康人头发中硒含量显著高于肿瘤患者,这些调查研究均表明,硒与癌症有直接联系^[11-12]。

1.4 解除重金属毒害

硒是一种天然的重金属解毒剂,它与重金属表面有一定的亲和力,能在机体内与重金属结合形成金属硒蛋白络合物,从而使重金属能够从机体中排出,达到解毒的作用^[13]。

1.5 保护心血管与心肌

硒元素能够提高红细胞的携氧能力,降低心血管病的发病率。与缺硒关联最大的克山病主要症状就是心肌坏死。在中国低硒地区,克山病的发病率曾高达50%以上^[14]。

1.6 提高基础代谢

硒能提高从细胞内到细胞膜上的葡萄糖转运蛋白的移位活性,使得体内葡萄糖的运输速率加快,进而可达到降低血糖的效果,即硒具有拟胰岛素作用。硒与机体内甲状腺素的调节密切相关。甲状腺分泌三碘甲状腺原氨酸(triiodothyronine, T3)和四碘甲状腺原氨酸(tetraiodothyronine, T4)2种甲状腺素,其中T4含量占绝大部分,T3含量则极低,但T3的生物活性却是T4的5~8倍,其可参与生长激素(growth hormone, GH)的合成,T4经I型脱碘酶作用可脱碘生成T3;硒与I、II、III型脱碘酶的活性也密切相关,因此硒能通过影响脱碘酶的生物活性来调节甲状腺的激素分泌,提高机体的基础代谢能力,进而维持机体正常生理功能^[10]。

1.7 提高繁殖能力

研究证实,硒能通过影响机体生殖器官的发育,调节动物的发情和排卵时间,改善公畜的精液质量及精子活力,保证母畜的受胎及胚胎发育等,提高动物的繁殖能力^[15]。只有通过控制合适的硒添加量来达到合适的机体硒水平才能保证动物正常的生殖功能。对于公畜来说,精液内的硒主要依附存在于精细胞内的线粒体膜上,通过参与GSH-Px的抗氧化作用来保护精细胞原生质膜维持还原态;而缺硒会导致精细胞原生质膜氧化,释放谷草转氨酶(glutamic oxaloacetic transaminase, GOT),使精子活力下降,从而影响动物体的受精能力和胚胎发育^[16]。对于母畜而言,缺硒则会导致母体动物表现出不规律的发情或不能发情,从而使其受胎率降低,因此适量的硒添加水平可以降低妊娠母畜流产率,降低胚胎死亡率,提高受胎率,进而提高母畜的繁殖能力。

2 硒对畜禽动物性能的影响

2.1 硒对畜禽动物生长性能的影响

硒被视为畜禽动物饲料中一种必需营养元素。硒与动物生长性能的关系主要源自于含硒的脱碘酶对甲状腺素的调控作用^[17-19]。甲状腺素是一种含硒氨基酸,对动物体的生理代谢起到良好的促进作用,增加机体基础代谢,并促进体内蛋白质、脂质、糖和盐的代谢,进而促进动物体的生长发育^[20]。合适的硒摄入量将对畜禽动物生长性能的提升有积极影响,对其健康生长状态也有良好作用。Suganthi等^[21]对20只5月龄的羊羔进行为期3个月的有机硒补充实验,发现饮食补充有机硒显著提升了羊羔血液中反刍动物病毒抗体含量和肝脏抗氧化能力,GSH-Px基因表达水平显著提升;4.5 mg/kg的硒补充量显著上调了脱碘酶3 mRNA的表达水平,这一剂量没有表现出对羊羔机体的毒性,对增加羊肉的氧化稳定性效果也不显著。He等^[22]研究报道,硒缺乏会抑制肝脏5-脱碘酶活性,降低血浆T3水平,并抑制肉鸡生长。Shili等^[23]将有机硒Sel-Plex 600添加到仔猪的基础日粮中进行混合饲喂,研究发现,饲喂7~21 d时,仔猪生长性能没有显著差异,饲喂21~36 d时,饲喂添加Sel-Plex 600基础日粮的仔猪平均日增体质量(average daily gain, ADG)和平均饲料日摄入量(average daily feed intake, ADFI)得到显著改善($P<0.02$),这表明添加硒在一定程度上可以节约饲料,降低生产成本。刘孟洲等^[24]研究发现,在日粮中添加富硒饲料,育肥猪日增体质量比添加低硒饲料组高111 g,饲养23 d后富硒饲料组较低硒饲料组每头猪均增总体质量2.56 kg,均增总质料比0.17 kg/kg。曲湘勇等^[25]在饲料中分别添加有机硒和无机硒进行蛋鸡饲养,实验证实,与无机硒组相比,有机硒组蛋鸡产蛋率显著提高,而料蛋比显著下降。Bakhshalinejad等^[26]对肉鸡日粮中添加2种水平有机硒和无机硒进行饲养,发现与添加无机硒组相比,添加有机硒源的膳食补充剂能显著提高肉鸡的ADG($P<0.05$),此外,随着硒补充水平的增加,ADG也呈上升趋势。张艳艳等^[27]研究发现,在日粮中添加0.15%和0.30%硒能显著提高肉兔ADG,显著降低ADFI,同时对肉兔肝脏、血清和肌肉中GSH-Px活性也产生明显影响。由此,大量研究表明,在畜禽动物日粮中添加不同硒源或不同水平的硒均能一定程度上提高其ADG同时降低ADFI,这不仅提升了畜禽动物的生长性能,还可节约饲料,降低生产成本。但也有诸多研究认为,在日粮中添加不同硒源和不同水平的硒均未对动物的生长性能产生显著影响,例如,Bakhshalinejad等^[28]在研究硒源和硒添加水平对肉鸡生产性能、胴体产量的影响时发现,亚硒酸钠、富硒酵母、DL-硒代蛋氨酸和纳米硒及膳食补充0.1、0.3 mg/kg硒不会显著影响

ADG、ADFI、饲料系数、死亡率和胴体产量等指标。Anna等^[29]也发现,硒对公牛的采食量、生长性能和胴体分级均无影响。Chantiratikul等^[30]比较水培生产的富硒羽衣甘蓝芽、亚硒酸钠和富硒酵母对蛋鸡的影响,结果表明,添加硒对蛋鸡生产率和鸡蛋品质影响不显著。这可能是由实验的养殖环境、动物品种、基础日粮硒水平、动物喂养周期和阶段等因素的差异而导致的。

2.2 硒对畜禽动物繁殖性能的影响

硒是动物生殖细胞中重要的微量元素之一,缺硒会阻碍动物性器官的发育,导致繁殖周期紊乱、流产甚至死胎等。适量的硒能提高动物体内前列腺激素的合成,使精子活力增强,母畜的受胎率和繁殖率、禽类的产蛋率和孵化率也均显著提高,证明硒对畜禽动物的生产繁殖性能有良好改善作用。梁明振等^[31]研究表明,硒摄入不足会使精细胞受损,释放GOT,使得精子活力下降,进而影响母体的受精率和繁殖率。蒋传珠等^[32]在奶牛肌肉中注射亚硒酸钠-VE预混剂,结果表明,亚硒酸钠-VE能够大大缩短奶牛产犊后首次发情的平均时间,降低产后不发情率和总淘汰率,从而提高奶牛受胎率。这主要是由于亚硒酸钠能够帮助奶牛产犊后子宫快速恢复,加快发情期,提高受胎率,同时能促进奶牛乳房腺囊的扩张,加速乳房血液微循环,加快血液流动,从而增加产奶量。很多研究者认为,母牛体内硒的缺失会提高母牛胎衣不下等发病率^[33]。张海棠等^[34]研究发现,在母牛日粮中添加亚硒酸钠可显著降低其胎衣不下发生率。Dalto等^[35]研究证实,母猪摄入含0.3 mg/kg硒的日粮能显著提高排卵率。Fortier等^[36]从母猪第1次发情期开始,在饲料中分别添加相同含量的无机硒和有机硒,结果表明,添加有机硒组母猪的胚胎平均质量、长度、蛋白质、DNA含量比添加无机硒组均有所提高,这可能是由于有机硒促进了胚胎细胞增殖。朱冠宇等^[37]在公鸡饲料中添加硒代蛋氨酸,结果表明,与普通饲料饲养的公鸡相比,饲料中添加硒代蛋氨酸组公鸡的精子密度、精液质量、精液分泌量、精子存活率均有显著提高,并能使种蛋受精率及孵化存活率提高,当公鸡摄入1 mg/kg硒时,其血液中生殖激素水平和繁殖性能得到良好的调节。高新华等^[38]通过实验证实,处于妊娠初期的母山羊摄入一定量的蛋氨酸硒会提高血清中促卵泡生成素水平,且不同水平的硒添加量对母山羊血清中孕酮和雌二醇的含量也有显著影响。Mahmound等^[39]报道,在公羊体内注射硒可以显著增加精子水平和射精量,提高其繁殖性能。Surai等^[40]发现,在猪日粮中添加新型有机硒源HMSeBA不仅增加了猪肌肉中硒含量,而且公猪睾丸和精液中硒含量也得到提升,精子活力增强,并能提高母体受精率,最终通过胎盘转移给后代,显著提高公猪的繁殖性能。大量研究证实硒能提高畜禽动物的生产繁殖



性能,很大程度上都是基于硒的抗氧化作用。硒通过参与构成GSH-Px等硒蛋白来保护细胞免受氧化破坏,且能通过母体传递、沉积到子代的甲状腺等器官中,对母体的生理代谢能力产生影响,进而提升母畜的繁殖性能;此外,缺硒会降低公畜的精液质量和精液分泌量,导致受精率降低,这也是影响畜禽动物繁殖性能的一个重要原因。然而,硒在小卵泡的细胞增殖和促性腺激素分泌过程中的具体调控机制还尚未明确,有待进一步研究。

2.3 硒对畜禽动物屠宰性能的影响

邓亚军等^[41]研究发现,采用添加酵母硒的日粮饲料喂养的育肥猪与基础日粮饲料喂养育肥猪相比,其瘦肉比、屠宰率和眼肌面积均显著提高,背膘厚度略有下降但不显著。Wolter等^[42]的研究也证实,日粮中添加有机硒能显著降低育肥猪的背膘厚度,增加眼肌面积。黄燕等^[43]在乌蒙乌鸡的基础饲料中添加不同水平的硒,发现添加含硒日粮的实验组乌蒙乌鸡屠宰率与基础日粮对照组差异显著($P<0.05$),不同硒添加水平的实验组乌蒙乌鸡半净膛率与对照组均差异显著($P<0.05$),3个实验组中,硒添加水平0.2 mg/kg组与0.8 mg/kg组间差异不显著,实验组乌蒙乌鸡全净膛率与对照组均差异显著($P<0.05$),3个实验组间差异不显著,表明在基础饲料中添加不同水平的硒均能显著提高乌蒙乌鸡的屠宰性能,且0.4 mg/kg添加剂量的效果明显优于0.2、0.8 mg/kg。王福香等^[44]同样也证实在基础饲料中添加纳米硒能显著提高肉鸡的屠宰率、半净膛率、全净膛率等屠宰性能。唐敏等^[45]在烟台黑猪日粮中添加酵母硒实验中发现,酵母硒的添加使黑猪肌肉的硒沉积量显著提高,但对黑猪的屠宰率等屠宰性能无显著影响。大量文献表明,硒对畜禽动物屠宰性能是否有改善作用的研究结果不尽相同,但关于结果对比原因的探讨却鲜有研究,这也为之后硒对畜禽动物屠宰性能影响的研究提供了一个新的思路 and 方向。

2.4 硒对畜禽动物肉品质影响

肉品质是关系到鲜肉或加工肉质构特性及营养特性的一系列理化性质。衡量肉品质的指标很多,主要包括肉色、pH值、系水力、嫩度、风味、蛋白质及脂肪含量等,它们反映了肉的新鲜度、营养品质、质地及风味特征。硒作为重要的抗氧化剂,对保持肉中营养成分、防止肉氧化变质有重要作用。Chen Jun等^[46]研究饮食中适当减少能量和蛋白质并添加不同含量硒对肥育猪抗氧化状态的影响,结果表明,硒添加量0.5 mg/kg组比0.2 mg/kg组具有较高的总抗氧化能力、超氧化物歧化酶活性、谷胱甘肽过氧化物酶活性和谷胱甘肽含量,而丙二醛含量相对较低。Falk等^[47]比较不同饮食硒源(亚硒酸钠、富硒酵母或L-硒代蛋氨酸)和硒含量较低的对照饮食,结果表明,与其他组相比,饲喂有机硒的猪肌肉纤维较不

易受到氧化应激的影响,饮食中适当的硒含量可以支持猪体内的抗氧化系统。Markovic等^[48]评估补充硒酵母对肉鸡谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响时发现,对照组的血浆谷胱甘肽过氧化物酶活性极显著低于补充硒组($P<0.01$)。Mateo等^[49]比较相同添加量的亚硒酸钠与硒酵母对猪生长性能的影响,结果表明,2组无显著差异,但是与阴性对照组相比,硒补充组猪肉的滴水损失显著降低。Calvo等^[50-51]发现,补充硒不仅会降低猪肉滴水损失,同时也会增加猪肉pH值,而补硒引起的滴水损失变化与猪肉中蛋白的水解作用存在潜在关联。与补充甲基硒代半胱氨酸和亚硒酸盐相比,补充硒代蛋氨酸对猪肉中硒的沉积效果更为明显;沉积在猪肉中的硒,70%以上以硒代蛋氨酸形态存在,硒代半胱氨酸约占11%^[52]。这一研究结果提示,硒代蛋氨酸可以作为生产富硒猪肉的良好硒补充剂使用。张增源^[53]研究发现,与无机硒相比,酵母硒添加到饲料中可显著提高鸡肉硬度和黏性,降低其滴水损失。蒋宗勇等^[54]以育肥猪为研究对象,发现添加硒代蛋氨酸的实验组育肥猪屠宰后肉色亮度值显著降低,pH值的下降也较对照组延缓,说明添加硒可通过影响肉色和肉pH值改善猪肉品质。Ripoll等^[6]研究表明,补充饲喂硒可以增加羔羊肉的亮度。Silva等^[55]研究补充不同水平硒代蛋氨酸对肉鸡肉质影响时发现,补充0.5 mg/kg有机硒可降低鸡胸肉的滴水损失和蒸煮损失。何宏超等^[56]研究发现,与在生长育肥猪日粮中添加0.3 mg/kg亚硒酸钠相比,添加同水平的酵母硒不仅对肉品质有所改善,而且肉样粗蛋白、粗脂肪和水分等营养成分含量也均有所改善。王燕燕等^[57]研究表明,在去势羔羊肌肉中注射亚硒酸钠-VE预混液可显著提高山羊肌肉中的硒沉积,硒注射剂量为每只0.92 mg/d时,羊肉的蛋白质含量与系水力得到较好改善。Baltic等^[58]研究日粮中补充有机硒对鸭胴体和肉品质的影响时发现,添加4种不同水平硒酵母的雏鸭(樱桃谷杂种)肉蛋白质和脂质含量存在差异,与日粮中硒含量0.0、0.2 mg/kg的鸭胸肉相比,日粮中硒含量最高(0.6 mg/kg)的鸭胸肉蛋白质含量更高($P<0.01$),随着硒补充水平的增加,大腿肌肉组织的脂肪含量也随之增加。肉品质下降的主要原因是由于脂质氧化,而在肉类工业中通常采用延迟氧化变质来延长肉类产品的货架期。硒作为一种天然抗氧化剂可减少脂质氧化、滴水损失,并能够维持肉色稳定性,因此,在动物日粮中添加具有抗氧化作用的硒成为改善肉品质、提高肉类货架期的一个重要途径。

3 结 语

近年来,硒已广泛应用于畜禽动物饲养中,通过畜禽动物进行硒的转化,对其生长性能、繁殖性能、屠

宰性能和肉品品质都具有显著改善作用。硒对畜禽动物的影响不但关系到肉品行业的经济利益,还与人类的日常食物需求密切相关。通过在日粮中添加富硒制剂,富硒肉品的研发有了一条新的途径,且大量研究表明,有机硒作为富硒动物产品的硒源,其作用效果显著优于无机硒,由于畜禽动物源富硒肉品中的硒已经在动物体内经过安全的代谢,而不是过量富集,食用更加安全、可靠。随着人们的生活水平提高,对营养的要求越来越高,富硒畜禽肉品有很大的市场空间^[1]。但是,硒在饲料中的强化方式(包括硒源类型)及添加量、硒在肉品中不同部位的沉积形态、含量及其功效机理、“含硒或富硒”肉品的标准以及稳定富硒技术等问题仍需要继续加大力度开展科技攻关研究,特别是要加大畜禽动物源富硒肉品深加工的研发力度。如何在保证畜禽动物肉品质的同时提高肉品的营养价值,为消费者提供营养、安全、健康和美味的富硒肉制品,将是从事肉品行业及营养学相关的科研工作者们继续努力的方向。

参考文献:

- [1] 程水源. 硒学导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 11-23.
- [2] 华晶忠, 刘笑笑, 魏春雁, 等. 硒的功用及富硒动物产品研发进展[J]. 吉林畜牧兽医, 2016, 37(1): 19-21. DOI:10.3969/j.issn.1672-2078.2016.01.010.
- [3] ROTRUCK J K, POPE A L, GANTHER H E, et al. Selenium biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 1973, 179: 588-590. DOI:10.1126/science.179.4073.588.
- [4] FAIRWEATHER-TAIT S J, BAO Y, BROADLEY M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. Antioxid Redox Signal, 2011, 14(7): 1337-1383. DOI:10.1089/ars.2011.3275.
- [5] 吴思源. 陕西紫阳典型高硒土壤吸附/解吸硒的LCD模型拟合[D]. 北京: 中国地质大学, 2015: 3-17.
- [6] RIPOLL G, JOY M, MUNOZ F. Use of dietary vitamin E and selenium (Se) to increase the shelf life of modified atmosphere packaged light lamb meat[J]. Meat Science, 2010, 87: 88-93. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.09.008.
- [7] 王秋梅, 陈立华. 硒的生物学功能及其在鸡生产中的应用研究进展[J]. 湖北畜牧兽医, 2014, 35(6): 77-78. DOI:10.3969/j.issn.1007-273X.2014.06.057.
- [8] 张琴, 麦康森, 张文兵, 等. 饲料中添加硒酵母和维生素E对刺参生长、免疫力及抗病力的影响[J]. 动物营养学报, 2011, 23(10): 1745-1755. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2011.10.014.
- [9] 于东. 硒蛋白W对鸡免疫机能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 7-10.
- [10] 罗佳捷, 张彬, 陈登科, 等. 硒在动物生产中的应用研究进展[J]. 饲料博览, 2011(6): 26-29. DOI:10.3969/j.issn.1001-0084.2011.06.009.
- [11] MARKUS S, ANNA-KLARA R F, ERIC O, et al. Selenium and the selenoprotein thioredoxin reductase in the prevention, treatment and diagnostics of cancer[J]. Antioxidants and Redox Signaling, 2010, 12(7): 867-880. DOI:10.1089/ars.2009.2884.
- [12] 荀黎红, 吴丛雅. 硒与癌症关系的研究现状[J]. 国外医学: 医学地理分册, 2006, 27(3): 100-102. DOI:10.3969/j.issn.1001-8883.2006.03.002.
- [13] 姜培珍. 硒: 重金属的天然解毒剂[J]. 中老年保健, 2010(3): 53.
- [14] 李改平, 王梦亮, 吉广庆. 硒蛋白对心血管疾病辅助治疗的临床评价[J]. 山西医药杂志, 2002, 31(1): 17-18. DOI:10.3969/j.issn.0253-9926.2002.01.006.
- [15] 危克周, 潘志雄, 吴宗万, 等. 添加适量有机硒对种公牛精子活力的影响[J]. 山地农业生物报, 2004, 23(6): 539-540. DOI:10.3969/j.issn.1008-0457.2004.06.017.
- [16] HANSEN J C, DEGUCHI Y. Selenium and fertility in animals and man: a review[J]. Acta Veterinaria Scandinavica, 1996, 37(1): 19-30.
- [17] 倪银星. 硒蛋白、硒与内分泌激素的关系研究进展[J]. 国外医学: 卫生学分册, 2002, 29(1): 38-42.
- [18] 陈忠法, 俞信光, 韩泽建. 不同硒源对肉仔鸡生长性能和肉质的影响[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(4): 250-254. DOI:10.3969/j.issn.1004-1524.2003.04.010.
- [19] 高凤仙, 贺建华, 田科雄, 等. 甲状腺激素对乌鸡生长和蛋白质能量沉积的影响[J]. 动物营养学报, 2002, 14(4): 31-34. DOI:10.3321/j.issn.1007-1032.2002.04.016.
- [20] 沈同, 王镜岩. 生物化学(上册)[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 78.
- [21] SUGANTHI R U, GHOSH J, MALIK P K, et al. Effect of dietary organic selenium (Se) on immune response, hepatic antioxidant status, selenoprotein gene expression and meat oxidative stability in lambs[J]. Journal of Animal and Feed Sciences, 2019, 28: 138-148. DOI:10.22358/jafs/109283/201.
- [22] HE J H, OHTSUKA A, HAYASHI K. Selenium influences growth via thyroid hormone status in broiler chickens[J]. British Journal of Nutrition, 2000, 84: 1-7. DOI:10.1017/S0007114500002087.
- [23] SHILI C, CARTER S D, SCHAAF S, et al. Effects of dietary vitamin E and selenium on growth performance and immune response of nursery pigs following an immune challenge[J]. Journal of Animal Science, 2018, 96: 115-116. DOI:10.1093/jas/sky073.214.
- [24] 刘孟洲, 权群学, 王玉安, 等. 富硒饲料对肥育猪生长和胴体肉质影响的研究[J]. 养猪, 2016(5): 46-48. DOI:10.3969/j.issn.1002-1957.2016.05.021.
- [25] 曲湘勇, 彭灿阳, 蔡超, 等. 有机微量元素对蛋鸡生产性能、血清抗氧化指标、蛋黄中微量元素含量及微量元素减排效果的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(7): 2431-2439. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2017.07.027.
- [26] BAKHSHALINEJAD R, KAKHKI R A M, ZOIDIS E. Effects of different dietary sources and levels of selenium supplements on growth performance, antioxidant status and immune parameters in Ross 308 broiler chickens[J]. British Poultry Science, 2018, 59(1): 81-91. DOI:10.1080/00071668.2017.1380296.
- [27] 张艳艳, 李福昌. 日粮不同硒水平对2~3月龄肉兔生长性能、抗氧化指标和肉质的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(1): 82-87. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2010.01.013.
- [28] BAKHSHALINEJAD R, HASSANABADI A, SWICK R A. Dietary sources and levels of selenium supplements affect growth performance, carcass yield, meat quality and tissue selenium deposition in broilers[J]. Animal Nutrition, 2019(3): 256-263. DOI:10.1016/j.aninu.2019.03.003.
- [29] ANNA H, GREGERSEN V S, JAN B, et al. Feeding potentially health promoting nutrients to finishing bulls changes meat composition and allow for product health claims[J]. Meat Science, 2018, 145: 461-468. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.07.015.
- [30] CHANTIRATIKUL A, CHINRASRI O, CHANTIRATIKUL P. Effect of selenium from selenium-enriched kale sprout versus other selenium sources on productivity and selenium concentrations in egg and tissue of laying hens[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 182(1): 105-110. DOI:10.1007/s12011-017-1069-0.



- [31] 梁明振, 嵒新跃, 黄钦华, 等. 微量元素硒对动物繁殖性能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2003, 30(3): 14-16. DOI:10.3969/j.issn.1671-7236.2003.03.004.
- [32] 蒋传珠, 黄光红. 亚硒酸钠维生素E对奶牛繁殖和生产性能的影响[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2014(1): 42-43; 45. DOI:10.3969/j.issn.1000-7725.2014.01.017.
- [33] 吴孝伟. 牛硒紊乱症的病因、症状与诊断[J]. 现代畜牧科技, 2015(2): 125. DOI:10.3969/j.issn.1673-1921.2015.02.123.
- [34] 张海棠, 王自良. 硒的营养机理及其在肉用畜禽生产中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 1999(10): 34-36. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.1999.10.017.
- [35] DALTOD B, AUDEI I, LAPOINTE J, et al. The importance of pyridoxine for the impact of the dietary selenium sources on redox balance, embryo development, and reproductive performance in gilts[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2016, 34(3): 79-89. DOI:10.1016/j.jtemb.2016.01.001.
- [36] FORTIER M E, AUDET I, GIGUÈRE A, et al. Effect of dietary organic and inorganic selenium on antioxidant status, embryo development, and reproductive performance in hyperovulatory first-parity gilts[J]. Journal of Animal Science, 2012, 90(1): 231-240. DOI:10.2527/jas.2010-3340.
- [37] 朱冠宇, 李征, 张立昌, 等. 硒代蛋氨酸对蛋用种公鸡繁殖性能及血液生殖激素的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(21): 1-4. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2017.1961.
- [38] 高新中, 白元生, 杨子森, 等. 微量元素硒对妊娠前期绒山羊母羊生殖激素分泌的影响[J]. 中国草食动物科学, 2013, 33(5): 19-22. DOI:10.3969/j.issn.2095-3887.2013.05.005.
- [39] MAHMOUD G B, SHERIEF M, ABDEL-RAHEEM H, et al. Effect of combination of vitamin E and selenium injections on reproductive performance and blood parameters of Ossimi rams[J]. Small Ruminant Research, 2013, 113(1): 103-108. DOI:10.1016/j.smallrumres.2012.12.006.
- [40] SURAI P F, FISININ V I. Selenium in pig nutrition and reproduction: boars and semen quality: a review[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2015, 28(5): 730-746. DOI:10.5713/ajas.14.0593.
- [41] 邓亚军, 王桂芹, 胡佩红, 等. 不同硒源对育肥猪胴体性状、肌肉品质和组织硒沉积的影响[J]. 饲料广角, 2016(12): 45-47. DOI:10.3969/j.issn.1002-8358.2016.12.020.
- [42] WOLTER B, ELLIS M, MCKEITH F K, et al. Influence of dietary selenium source on growth performance and carcass and meat quality characteristics in pigs[J]. Canadian Journal of Animal Science, 1999, 79(1): 119-121. DOI:10.4141/A98-028.
- [43] 黄燕, 何劲, 雷邦星. 日粮中添加不同水平硒对乌蒙乌鸡生长性能、屠宰性能及黑色素含量的影响[J]. 饲料研究, 2016(7): 13-15; 26. DOI:10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2016.07.004.
- [44] 王福香, 朱风华, 姜建阳, 等. 纳米硒对肉鸡生长、屠宰性能和养分消化率的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2009, 26(2): 119-123. DOI:10.3969/j.issn.1674-148X.2009.02.008.
- [45] 唐敏, 宋俊霖, 李少宁, 等. 营养水平和酵母硒对烟台黑猪屠宰性能及肉品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2018, 54(5): 84-90. DOI:10.19556/j.0258-7033.2018-05-084.
- [46] CHEN Jun, TIAN Min, GUAN Wutai, et al. Increasing selenium supplementation to a moderately-reduced energy and protein diet improves antioxidant status and meat quality without affecting growth performance in finishing pigs[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2019, 56: 38-45. DOI:10.1016/j.jtemb.2019.07.004.
- [47] FALK M, BERNHOFT A, FRAMSTAD T, et al. Effects of dietary sodium selenite and organic selenium sources on immune and inflammatory responses and selenium deposition in growing pigs[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 50: 527-536. DOI:10.1016/j.jtemb.2018.03.003.
- [48] MARKOVIC R, CIRIC J, DRILIACIC A. The effects of dietary selenium-yeast level on glutathione peroxidase activity, tissue selenium content, growth performance, and carcass and meat quality of broilers[J]. Poultry Science, 2018, 97(8): 2861-2870. DOI:10.3382/ps/pey117.
- [49] MATEO R D, SPALLHOLZ J E, ELDER R, et al. Efficacy of dietary selenium sources on growth and carcass characteristics of growing-finishing pigs fed diets containing high endogenous selenium[J]. Journal of Animal Science, 2007, 85(5): 1177-1183. DOI:10.2527/jas.2006-067.
- [50] CALVO L, TOLDRA F, RODRIGUEZ A I, et al. Effect of dietary selenium source (organic vs. mineral) and muscle pH on meat quality characteristics of pigs[J]. Food Science and Nutrition, 2016, 5(1): 94-102. DOI:10.1002/fsn3.368.
- [51] CALVO L, TOLDRA F, ARISTOY M C, et al. Effect of dietary organic selenium on muscle proteolytic activity and water-holding capacity in pork[J]. Meat Science, 2016, 121: 1-11. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.05.006.
- [52] ZHANG Kai, GUO Xiaoqing, ZHAO Qingyu, et al. Development and application of a HPLC-ICP-MS method to determine selenium speciation in muscle of pigs treated with different selenium supplements[J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125371-125378. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125371.
- [53] 张增源. 酵母硒对鸡生长性能、抗氧化和肉品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 27-35.
- [54] 蒋宗勇, 王燕, 林映才, 等. 硒代蛋氨酸对肥育猪生产性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(2): 293-300. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2010.02.009.
- [55] SILVA V A, CLEMENTE A H S, NOGUEIRA B R F, et al. Supplementation of selenomethionine at different ages and levels on meat quality, tissue deposition, and selenium retention in broiler chickens[J]. Poultry Science, 2019, 98(5): 2150-2159. DOI:10.3382/ps/pey569.
- [56] 何宏超, 李彪. 不同硒源对肥育猪生长性能及肉品质的影响[J]. 饲料研究, 2010(12): 27-28. DOI:10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2010.12.011.
- [57] 王燕燕, 吴森, 陈福财, 等. 补硒对肉羊血硒水平、产肉性能和肉品质的影响[J]. 家畜生态学报, 2013, 34(6): 21-25. DOI:10.3969/j.issn.1673-1182.2013.06.006.
- [58] BALTIC M Z, STARCEVIC M D, BASIC M, et al. Effects of selenium yeast level in diet on carcass and meat quality, tissue selenium distribution and glutathione peroxidase activity in ducks[J]. Animal Feed Science and Technology, 2015, 210: 225-233. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2015.10.009.