动物营养学报 2020,32(10):4659-4673
Chinese Journal of Animal Nutrition

doi:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.10.018

单胃动物微量元素营养研究进展

贾　刚[1]　田　刚[1]　方热军[2]　孙铝辉[3]　龙定彪[4]　赵　华[1*]

(1.四川农业大学动物营养研究所,成都 611130;2.湖南农业大学动物科技学院,长沙 410128;
3.华中农业大学动物科技学院,武汉 430070;4.重庆市畜牧科学研究院,重庆 402460)

摘　要: 微量元素在动物生长、代谢、免疫调控、抗应激等方面发挥着重要作用。微量元素的合理利用,可以起到增强动物抗病力、提升动物健康水平和生产性能的作用,同时一些新型微量元素的使用,也可以起到减量增效、减少环境排放和缓解环境压力的作用。本文主要以猪、禽为对象,对近5年中国畜牧业工作者围绕微量元素(铜、铁、锌、硒、锰、碘)与生产性能、畜禽健康、机体抗氧化、畜产品品质以及微量元素减量增效等方面的研究进行综述。

关键词: 研究进展;微量元素;猪;禽;营养

中图分类号:S816　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1006-267X(2020)10-4659-15

微量元素是畜禽必需营养素,在维持动物正常的生长、发育、繁殖、食欲调节、参与机体多种酶促反应等方面发挥着不可或缺的作用,因此被称为“生命元素”。微量元素有助于维持动物机体健康、提高机体抗氧化和抗应激能力、提高畜禽肉品质,同时新型有机微量元素的应用也在减量增效方面发挥着重要作用。饲料原料中存在一定量的微量元素,但含量不能满足畜禽自身需要。因此,畜禽饲粮中需要额外添加微量元素[铜(Cu)、铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)、锰(Mn)、碘(I)],以满足动物对微量元素的需求,从而保证畜禽良好的生产性能、机体健康及生产优质畜产品。近年来,养殖生产过程中排放的过量重金属污染物造成的环境问题,也越来越引起人们的重视。因此,研究如何正确合理地使用微量元素、减少环境污染,对实际的动物生产过程具有重要意义。本文主要阐述了中国学者近5年关于微量元素与畜禽生产性能、抗氧化、抗应激性能、畜产品品质及减量增效的研究进展,以期为微量元素特别是各种有机微量元素在畜禽的应用提供参考。

1　微量元素与单胃动物生产性能的研究进展

Cu与动物机体生长和毛发发育有重要关系,动物机体缺乏Cu会导致机体发育受阻。饲粮中Cu含量过低会降低1~21日龄肉仔鸡的平均日采食量(ADFI)[1]。添加适当剂量的Cu有改善蛋壳质量的作用[2]。体外注射纳米铜可加快鸡胚胎的代谢速度[3]。但饲粮中高剂量的Cu会抑制动物的生长。饲粮添加高Cu会抑制幼年四川白鹅的生长[4],导致Cu在体内蓄积并产生毒性,降低生产性能[5]。适量的Cu可以显著提高产蛋期种鹅的生产性能,但添加过高时影响鹅对蛋白质的利用率[6]。蒙洪娇等[7]发现饲粮中Cu含量过高时,有降低育肥猪生长性能的趋势。因此,在实际生产过程中,需要适当控制畜禽Cu的摄入量以提高动物的生产性能。有机铜与无机铜相比更安全,且更容易被机体吸收。与硫酸铜相比,低剂量的羟基蛋氨酸铜可以提高仔猪的生长性能和眼肌深度[8];蛋氨酸螯合铜可以降低1~38日龄肉鸭的料

收稿日期:2020-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31772643,31272468,31072043)

作者简介:贾　刚(1970—),男,四川汉源人,教授,博士,主要从事饲料资源开发与利用、微量元素营养相关研究。E-mail:jiagang700510@163.com

*通信作者:赵　华,教授,博士生导师,E-mail:zhua666@126.com

重比(F/G)[9]。小肽螯合铜可以替代无机铜,作为仔猪饲粮的 Cu 源[10]。柠檬酸铜优于硫酸铜和碱式氯化铜,饲粮中添加 90 mg/kg 柠檬酸铜可提高仔猪的生长性能,降低腹泻率[11]。微生物能将无机铜转化为有机铜,提高动物机体对 Cu 的利用率[12],黑曲霉铜不影响育肥猪对养分的吸收,但可降低粪便中 Cu 的排放[13]。但也有研究表明,有机铜的添加对肉鸡生长性能无显著影响[14],这可能是不同动物对 Cu 的利用形式和利用效率不同而造成的差异。

Fe 是仔猪生长发育中不可缺少的微量元素之一,新生仔猪适时适量补 Fe 是预防贫血、维持仔猪健康的必要措施[15-16]。仔猪补 Fe 一般通过饲喂和肌肉注射 2 种方式[17]。饲粮中的有机铁更容易被动物吸收。与硫酸亚铁相比,富马酸亚铁可以显著提高断奶仔猪平均日增重(ADG)、红细胞数量和血红蛋白浓度[18]。有机铁与无机铁配合使用可以改善断奶仔猪的生长性能[19]。乳铁蛋白对铁离子有较高的亲和性,母猪妊娠后期添加 200 mg/kg的乳铁蛋白可显著提高仔猪初生窝重和平均初生重,改善母猪的繁殖性能[20]。0.2%的补铁微生态制剂可提高母猪繁殖性能,改善仔猪健康状况[21]。缺 Fe 在家禽生产过程中较少见,但合理添加 Fe 可提高家禽的生产性能。饲粮 Fe 含量会影响种鹅产蛋期平均蛋重、繁殖性能、蛋黄色泽及血液理化指标[22]。饲粮添加 0.04%或 0.08%的小肽螯合铁,可延长夏季产蛋鸡的产蛋高峰期,提高蛋品质[23]。复合氨基酸铁络合物可替代无机铁,提高肉鸡的 ADFI 和 ADG,提高鸡的屠宰性能[24]。添加甘氨酸亚铁能显著降低蛋鸡 ADFI 和料蛋比,提高鸡蛋品质[25]。基础饲粮添加 14 mg/kg的富马酸亚铁可显著提高黄羽肉种鸡的蛋品质[26]。

饲粮中添加改性形式的氧化锌可提高断奶仔猪的生长速率、营养物质利用率和粪便评分,可替代常规氧化锌作为生长促进剂[27]。基础饲粮添加天冬氨酸螯合锌可显著提高生长育肥猪的生长性能,这可能与其提高了养分消化率有关[28]。此外,饲粮添加蛋氨酸锌和硫酸锌对生长育肥猪的生长性能虽无显著影响,但较低剂量(40 mg/kg)蛋氨酸锌可降低 Zn 的使用量,节约饲养成本,提高饲养效率,减少生长育肥期排泄物对环境的压力[29]。在家禽上的研究表明,传统的玉米-豆粕饲粮 Zn 含量不足,为保证北京鸭的最佳生长性能,在基础饲粮中添加 120 mg/kg Zn 可使北京鸭的生长达到最优[30]。此外,有研究表明,基础饲粮同时添加 30 mg/kg的 Zn 和 500 U/kg 的植酸酶可提高北京鸭的生长速率,而与添加 30 mg/kg 的 Zn 组相比时,添加植酸酶并没有改善鸭的生长性能[31]。因此,饲粮添加 Zn 对畜禽生产性能影响的差异是由于不同生长阶段以及饲粮中存在能够结合 Zn 的配体(植酸)差异造成的,植酸能影响 Zn 在体内的吸收,而植酸酶的补充有助于释放与植酸结合的矿物质,进而被动物的肠道所吸收[32]。研究表明,以胴体重为指标,1~35 日龄肉鸭 Zn 需要量为 89.88 mg/kg[33];以产蛋率为指标,21~40 周龄蛋种鸭 Zn 需要量为 65.40 mg/kg[34];20~27 周龄和 58~65 周龄的蛋鸡 Zn 需要量分别为 84.00 和 71.09 mg/kg[35-36]。

Se 是一种与人类和动物健康密切相关的必需微量元素,在机体维持正常生理过程中必不可少。我国现行猪、禽饲养标准中,不同品种猪、禽在不同阶段对 Se 的需要量为 0.15~0.35 mg/kg。饲粮 Se 缺乏(<0.02 mg/kg)可导致肉鸡出现胰腺萎缩和渗出性素质等典型 Se 缺乏症,增加死亡和发病率,降低体重[37]。而饲粮 Se 过量(3.0 mg/kg)可显著降低肉鸡生长性能[38]。正常生理状态下,基础饲粮添加适量的硒代蛋氨酸羟基类似物(HMSeBA,0.2~0.4 mg/kg)可一定程度改善黄羽肉鸡的生长性能[39]。与基础饲粮(不添加 Se)相比,添加不同形式(有机、无机)和剂量 Se 可以改善蛋鸡的生产性能[40-41],应激状态下添加 0.4 mg/kg 酵母硒(SeY)可显著提高肉鸡体重和饲料转化率[42]。但也有研究显示添加 Se 对家禽生长性能无显著影响[43-44],这可能是受到基础饲粮 Se 含量、Se 源和添加量不同以及受试动物生理状态不同等综合因素影响的结果。与亚硒酸钠相比,妊娠母猪饲粮中添加 SeY(0.3 mg/kg)可提高产仔数、产仔体重以及断奶仔猪数量[45]。妊娠母猪饲粮添加 1 mg/kg SeY 提高了仔猪断奶重[46]。断奶仔猪饲粮添加不同水平硒代蛋氨酸(SeMet)[47]或富硒胞外多糖[48]均不同程度改善了仔猪生长性能。饲粮添加 0.3 mg/kg 富硒乳酸菌制剂显著提高了育肥猪的 ADG,提高粗蛋白质和磷的表观消化率并显著降低 F/G[49]。也有研究发现,饲粮添加 HMSeBA(0.1~0.5 mg/kg)对仔猪生长性能无

显著影响,且高剂量(5 mg/kg)HMSeBA 添加对仔猪也没有产生不良影响[50]。氧化应激条件下,饲粮含 0.3 或 0.6 mg/kg HMSeBA 可改善生长育肥猪全期 F/G,而对 ADFI 和 ADG 无显著影响[51]。不同水平甘氨酸纳米硒[52]对育肥猪ADFI、ADG 和 F/G 均无显著影响。研究表明,缺 Se 引起公鸡睾丸抗氧化酶活性和抗凋亡相关蛋白表达量降低,促凋亡蛋白相关蛋白表达量和丙二醛(MDA)含量升高[53]。饲粮中添加适宜剂量 Se 可改善公鸡精液品质,提高血液中睾酮和促黄体激素含量[54];可提高种蛋受精率和孵化率,且可缓解重金属对蛋鸡卵巢的损伤[55]。适宜剂量 Se 的添加能够提高母猪乳汁乳脂率、产仔数、仔猪初生重和断奶仔猪数量并增强仔猪免疫力,还可缓解母猪夏季热应激,改善母猪哺乳期表现[45,56-58]。

大量研究表明,Mn 参与生物体内多种酶与蛋白质的组成,是生物体内多种酶的激活剂,参与体内糖、脂肪和蛋白质的代谢,对生殖机能、大脑代谢、骨骼形成有重要作用。饲粮中添加有机锌和有机锰能提高蛋种母鸡的平均蛋重和产蛋率,降低破蛋率,增加蛋壳强度,提高蛋品质,增加蛋黄中 Mn 的沉积量[59]。蛋鸡饲粮补充有机锰或无机锰可以提高蛋壳腺中蛋白多糖和糖蛋白相关基因的表达,从而提高蛋壳强度和厚度,且有机锰效果更好,这是因为有机锰通过减少蛋壳乳突间距来增加蛋壳的韧性[60-61]。何万领等[62]研究发现,发酵微量元素(Fe、Zn、Mn、Cu)对蛋鸡生产性能、蛋品质、蛋成分均有不同程度的改善效果,其中复合菌发酵优于单一菌发酵。魏茂莲[63]发现不同 Mn 源(甘氨酸锰、复合氨基酸锰、无机硫酸锰)对断奶仔猪生长性能的影响差异不显著,但以肝脏 Mn 和跖骨 Mn 含量为评价指标,甘氨酸锰和复合氨基酸锰的生物学利用率显著高于无机硫酸锰。仔猪饲粮中按照 NRC(1994)标准添加小肽螯合铜、铁、锰、锌、硒饲喂 20 d,有提高 ADG、降低 F/G 的趋势,对 ADFI 无显著影响[10]。Lu 等[64]评估了 22~42 d 肉鸡对 Mn 的需求量,以 20 mg/kg 硫酸锰为梯度,添加 0~140 mg/kg,结果表明饲粮添加 100 mg/kg硫酸锰效果最为理想。

I 是畜禽的必需微量元素,具有多种重要的生物学功能。畜禽 I 的需要量在 0.1~0.3 mg/kg,常以碘化钾(KI)的形式供给。有关微量元素 I 的研究较少。研究发现在 NRC(1994)基础上额外添加适宜水平的 I 可明显改善五龙鹅的生长性能和屠宰性能,饲粮适宜添加水平在 1~4 周龄为 0.40 mg/kg[65],5~16 周龄为 0.30 mg/kg[66]。

2　微量元素与畜禽健康研究进展

Cu 与动物机体的健康息息相关。动物呼吸道定植有一定数量的菌群,呼吸道菌群参与宿主的局部免疫调节,维持呼吸道的健康。饲粮 Cu 含量影响猪呼吸道菌群的数量,适量的 Cu 可以增加呼吸道的菌群数量,但是饲粮 Cu 含量过高会抑制菌群的增殖[67]。Cu 有较好的促生长作用,王希笛等[68]发现添加 0~78 μmol/L 不同 Cu 源(硫酸铜和蛋氨酸铜)均可不同程度地促进鸡小肠上皮细胞的增殖分化。研究发现,Cu 能够促进鸡肠道有益菌的生长[69]。肝脏是动物机体代谢 Cu 的主要部位,高 Cu 饲粮(300 mg/kg)会抑制 Cu 转运因子 *Ctrl*、三磷酸腺苷酶 β 肽(*ATP7B*)mRNA 的表达,造成机体 Cu 代谢紊乱,影响生长猪肝脏的正常生理功能[70]。过量的铜离子会抑制肝细胞内的 ATP 生成,对细胞造成损伤[71]。高浓度的 Cu 可通过调控 *Drp*1 基因和生成大量活性氧(ROS)诱导鸡原代肝细胞的凋亡[72]。高 Cu 引起的鸡肝细胞凋亡可能是由 ROS 介导的[73],高铜通过 ROS 介导激活并调节核因子-κB(*NF-κB*)及相关细胞因子 mRNA 的表达[74],此外高铜能诱导肉鸡肌胃和腺胃发生自噬和凋亡[75]。

氨基酸螯合铁是新型 Fe 源,具有生物学效价高、吸收率高的特点,母猪饲粮中添加有机铁可以提高仔猪成活率[76],提高母猪初乳和常乳中 Fe 的含量,降低仔猪缺铁性贫血的风险[77]。仔猪饲粮中添加 60 mg/kg 的甘氨酸铁络合物可以预防仔猪贫血,提高仔猪的免疫力[78]。刁翠萍等[79]发现,枯草芽孢杆菌与 Fe 同时添加,在促进雏鹅的生长发育和机体健康有协同作用。有机铁可以促进仔猪肠道形态发育,提高生长性能[80]。仔猪对有机铁的耐受性较高,但过量的 Fe 可能会对动物机体造成严重损害,比如提高十二指肠的通透性,引起炎症反应,造成肠道损伤[81]。Fe 过载会诱导细胞内 ROS 的产生并造成细胞氧化应激,长期高水平摄入 Fe 容易诱导仔猪肠道和肝脏氧化应激[82]。GRP78/Bip 蛋白具有保护细胞免受损伤的作用,半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-3(Caspase-3)是细胞凋亡途径的关键酶,Fe 超载会显著上调

*GRP*78/*Bip* 和 *Caspase*-3 表达量,造成蛋雏鸡肝细胞损伤[83]。Fe 的主要吸收部位为十二指肠,二价金属离子转运体 1(DMT1)和膜铁转运蛋白 1(FPN1)介导 Fe 在小肠的吸收和转运[84]。

Zn 参与机体消化吸收、物质代谢、抗氧化、生长发育等多种生理功能,在肠道屏障功能的发挥和肠道健康的维持过程中具有重要作用。肉鸭饲粮中补充适宜水平的 Zn,可显著提高 14 和 35 日龄肉鸭化学屏障相关基因和免疫屏障相关基因的表达,增强肠道屏障完整性,促进肠道健康[30]。研究发现,饲粮添加 80 和 100 mg/kg 的 Zn 对生长性能影响有限,但补充 Zn 可以有效改善肠道完整性,减轻球虫感染对肠道的损伤[85]。高剂量氧化锌可能通过激活仔猪肠道的细胞外信号调节激酶(ERK),抑制 p38 丝裂原激活蛋白激酶和 c-Jun 氨基末端激酶(JNK)的活性,调节具有促进细胞生长和分化功能的肿瘤生长因子-β1(TGF-β1)参与的细胞信号转导,保持仔猪肠道上皮的完整性,促进消化吸收,减少腹泻[86]。

Se 主要通过硒蛋白发挥其抗氧化、抗应激、生物解毒和免疫调控等生物学功能,目前在动物中已经鉴定出 23~25 种硒蛋白,包括猪[87-88]和鸡[37-38]。硒蛋白基因表达受饲粮 Se 水平影响,饲粮 Se 缺乏或过量影响猪[89]、鸡[37-38]组织器官中硒蛋白基因的表达。饲粮 Se 缺乏造成肉鸡胰腺萎缩和糖脂代谢紊乱,并伴随着硒蛋白和胰岛素信号相关基因表达的改变[37],此外,缺 Se 还诱导肉鸡心肌细胞凋亡抑制细胞自噬造成心脏功能紊乱[90],干扰肉鸡骨骼肌中微量元素的分布[91];缺硒导致猪胰腺中 ROS 积累和能量代谢失衡,影响胰岛素分泌[92]。高剂量 Se 添加会引起肉鸡[38]和猪[93]出现高胰岛素血症以及脂质代谢异常,这一过程也与硒蛋白和胰岛素信号通路相关基因的异常表达有关,表明 Se 及硒蛋白在机体糖脂代谢和胰腺功能维持过程中发挥重要作用。此外,饲粮高 Se 含量导致肉鸡生长性能下降,免疫器官硒蛋白基因表达下调,炎性基因表达上调[94]。

在肉鸡饲粮中按照不同微量元素模式[添加量参考农业行业标准和 NRC(1994)]添加 Cu、Fe、Mn、Zn,结果发现不同添加模式对肉鸡肠道形态和肝脏营养代谢相关指标有着影响,这可能是因为肠道形态受到 Cu、Fe、Mn、Zn 共同调控的原因[95]。螯合锰可以提高 *DMT*1 和 *FPN*1 的表达从而促进 Mn 的吸收,其中高强度螯合锰的效果最好[96]。赖氨酸螯合锰的吸收不仅以电离锰离子形式吸收,氨基酸转运蛋白 1/2 与赖氨酸转运系统 b^0 也参与其在鸡小肠上皮细胞的吸收[97]。性激素生物合成的前体是胆固醇,Mn 是胆固醇合成途径重要酶的辅助因子,因此 Mn 可通过影响胆固醇的合成影响动物生殖性能,且有机锰的作用效果与利用效率优于无机锰[98]。Muhamma 等[99]用不同浓度的 Mn(0、3、6 和 12 μg/mL)处理体外受精前的猪卵母细胞,结果发现 Mn 可以通过增加谷胱甘肽(GSH)含量和降低 ROS 水平来提高猪孤雌激活和体细胞核移植胚胎的发育能力。

3 微量元素与畜禽机体抗氧化、抗应激研究进展

Cu 是动物机体内很多酶的重要组成成分,李少华等[100]发现饲粮中添加低剂量的小肽螯合铜锌不会影响育肥猪的抗氧化能力,但可以显著降低粪便中 Cu 和 Zn 的排放量。高水平的 Cu 会引起组织氧化损伤,如高 Cu 可引起肉鸡心肌氧化损伤[101]。红系衍生的核因子 2 相关因子(Nrf2)是调控细胞氧化反应的重要转录因子[102]。研究表明高 Cu 饲粮显著上调 Nrf2 信号通路中的谷氨酸半胱氨酸连接酶(*GCLM*)和血红素氧合酶-1(*HO*-1)mRNA 的表达,从而诱导肉鸡肾脏氧化损伤[103]。此外高 Cu 会影响线粒体自噬相关基因 PTEN 诱导假定激酶 1(*PINK*1)、*Parkin*、微管相关蛋白轻链 3-I(*LC*3-I)、微管相关蛋白轻链 3-Ⅱ(*LC*3-Ⅱ)和 *Nix* 的表达,诱导肉鸡心肌细胞线粒体自噬[104]。

Fe 通过影响动物机体超氧化物酶的活性来影响动物机体的抗氧化能力。仔猪饲粮中添加二肽螯合铁可显著提高仔猪血清超氧化物歧化酶(SOD)的活性,降低血清 MDA 的含量,增强仔猪的抗氧化能力[105]。用富血铁替代硫酸亚铁可提高生长猪的血浆抗氧化酶活性,提高生长猪的抗氧化能力[106]。母猪饲粮补充复合有机铁可提高母猪的繁殖性能,增强母猪的抗氧化能力[107]。

Zn 是铜锌超氧化物歧化酶(CuZn SOD)的辅助因子,该酶在抗氧化系统中具有重要作用,能作为氧化及自由基形成过程中的抑制剂。SOD 分布广泛,可保护器官和组织免受氧化应激。饲粮中添加适当剂量 Zn 可提高畜禽的机体抗氧化性

能[33]。Zn 对动物免疫能力有着重要影响,饲粮补充适宜剂量的 Zn 可提高动物机体的免疫功能。饲喂 1 000 mg/kg 的包被氧化锌可缓解大肠杆菌引起的断奶仔猪腹泻,降低炎症反应,其作用效果与高剂量 2 500 mg/kg 的氧化锌类似[108]。肉仔鸡在正常生理及脂多糖攻毒条件下,补充 Zn 可通过抑制炎性因子的表达,缓解 LPS 诱导的炎症反应,且甘氨酸锌效果优于硫酸锌[109]。热应激条件下,纳米氧化锌可通过提高抗氧化能力和降低脂质过氧化作用缓解热应激对肉鸡的负面影响[110]。此外,Zn 可缓解球虫在肉鸡上引起的炎症反应[111]。

微量元素 Se 主要通过硒蛋白发挥其生物学功能,已知硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成成分,此外很多硒蛋白也是体内重要的抗氧化酶,比如硒蛋白 MsrB1[94,112] 和 SelP[113] 的功能与抗氧化密切相关。饲粮 Se 缺乏会降低动物组织器官中一些硒蛋白基因的表达[37,92],导致氧化应激。Se 与免疫功能密切相关,Se 通过硒蛋白发挥免疫调控作用。在脂多糖诱导的免疫应激条件下,免疫组织或细胞硒蛋白基因的表达普遍下调,饲粮或培养基中的 Se 供给均可通过恢复一些硒蛋白的表达缓解免疫应激[88,114-115]。饲粮缺 Se 会下调肉鸡肌胃中硒蛋白的表达[116],并通过 NF-κB 信号通路影响肉鸡十二指肠黏膜氧化还原和免疫功能[117],通过上调 *MLKL*、*RIPK*1 的表达诱发鸡肝脏细胞坏死性凋亡[118],Se 水平会影响树突状细胞表面抗原递呈因子,影响机体特异性免疫[119]。缺 Se 造成红细胞渗透脆性,可能与红细胞膜表面磷脂酰丝氨酸(PS)和膜内气孔蛋白含量下降有关[120]。

近期研究发现硒蛋白与热应激调控密切相关,热应激影响猪肠道细胞和小鼠成肌细胞中多种硒蛋白的表达,增加 Se 供给可通过调控硒蛋白的表达缓解细胞热应激损伤[121-123]。Se 具有抗氧化、增强免疫和解毒等功能,适宜剂量的 Se 可通过调控硒蛋白表达,提高抗氧化能力和免疫力,改善畜禽健康,缓解重金属、毒素、有害菌和不良饲养环境造成的负面影响,改善畜禽健康状况[124-128]。此外,有研究表明 Se 还可同多种营养素发挥协同作用,增强畜禽的抗应激能力[45,129-130]。

秦世贞等[131]发现中,等络合强度的有机锰能缓解热应激引起的氧化损伤,Mn 是过氧化物歧化酶的组分,可以修饰特定基因和调控靶基因的表达及其相关通路。母鸡饲粮中添加 120 mg/kg 有机锰可有效缓解热应激引起的种母鸡产蛋性能、孵化率、胚胎存活率及子代肉品质下降[132]。在热应激条件下母鸡饲粮中补充 120 mg/kg Mn 通过介导后代胚胎心脏中的 miR-1551 和 miR-34c 表达,激活目标凋亡蛋白-2(*BCL*-2)表达和 NIK 依赖性 NF-κB 通路来保护雏鸡免受母体热应激[133]。高温条件降低了蛋鸡组织中 Mn 的沉积效率,饲粮添加 Mn 可增强蛋鸡心脏的抗氧化能力,抑制乳腺肌肉中热休克蛋白 70(*HSP*70)的表达且有机锰的效果更好[134]。Li 等[135]发现 Mn 诱导的锰超氧化物歧化酶(*MnSOD*)mRNA 和蛋白表达与半胱氨酸无关,丝裂原激活蛋白激酶类通路可能不参与 Mn 诱导的 *MnSOD* mRNA 的表达,蛋白激酶 C 和蛋白质酪氨酸激酶介导了 Mn 诱导的 MnSOD 蛋白的表达。

4　微量元素对畜禽产品品质的影响

适当提高饲粮 Cu 的含量有利于动物的生长,但是会提高畜产品中 Cu 的沉积量,影响人类的健康。Cu 在猪体内的主要沉积部位是肝脏、肾脏、心脏、脾脏和骨骼。张辉等[136]发现 Cu 更容易在猪的肝脏、心脏和肾脏等部位沉积。目前关于 Cu 对动物产品品质的研究较少,有研究发现高剂量的 Cu 可使四川白鹅肉色变浅[4],Cu 大量沉积在鹅的胸肌和皮脂部位[137]。饲粮中添加适量的载铜壳聚糖微粒可降低保育猪的背标厚度和体脂沉积效率,提高眼肌面积和瘦肉率[138]。北京鸭饲粮中添加 150 mg/kg 氨基酸螯合铜可显著改善肉品质,提高鸭肉蛋白质含量,降低肌肉脂肪含量[139]。

Fe 对保持正常的肉色具有重要的作用。饲粮中添加过量的 Fe 会抑制肉仔鸡胫骨的发育,降低胸肌和腿肌肉品质[140]。与无机铁相比,有机铁可改善断奶仔猪的肉色,提高肉品质[141]。在蛋鸡饲粮中添加 50 mg/kg 的有机铁可提高蛋鸡产蛋率,提高蛋品质[142]。饲粮中添加 60 mg/kg 的 Fe 可显著提高种鸡产蛋率和蛋黄中 Fe 的含量[143]。饲粮中添加肉骨粉,并添加 60 mg/kg 的氨基酸螯合铁可使蛋黄中 Fe 的沉积量达到最大值[144]。蛋鸡饲粮中添加 60 mg/kg 的小肽螯合铁可使鸡蛋达到最佳富铁效果[145]。

Zn 对畜产品品质的影响研究较少且研究结果

不一致。Wen 等[33]发现随着饲粮中 Zn 含量的增加,肉鸭胸肌的亮度值、滴水损失和剪切力显著降低。而 Qudsieh 等[146]研究发现,饲粮添加 120 mg/kg Zn 对肉鸡胸肌嫩度和色泽均无显著影响。此外,晏家友等[147]考察了相同剂量(60 mg/kg)的不同 Zn 源(硫酸锌、乳酸锌、蛋氨酸锌和甘氨酸锌)对农凤鸡肉中氨基酸和脂肪酸含量的影响,发现乳酸锌可以提高农凤鸡鸡肉中氨基酸含量,改善鸡肉品质。

Se 是重要的抗氧化剂,不仅能够增强畜禽健康保证畜产品产出,还有助于减少肉产品中脂质过氧化物,从而改善肉产品的风味、颜色、质地和货架时间等。此外,一定剂量有机硒的添加可增加肉、蛋等畜禽产品中 Se 含量,为生产富 Se 食品提供可能。饲粮中 Se 缺乏对肉鸡肉品质造成负面影响,如影响肌纤维形态、滴水损失增加和肉色异常等[148]。适宜剂量 HMSeBA 的添加可改善黄羽肉鸡胸肌肉品质,并提高肌肉抗氧化能力[39],生长育肥猪饲粮中添加 HMSeBA 可有效缓解热应激和氧化饲粮对肉品质的负面影响[51],蛋禽上的研究表明,适宜剂量不同形式 Se 添加[SeY、亚硒酸钠(SS)和纳米硒(nano-Se)等]能改善不同品种蛋鸡的蛋白高度、哈氏单位、蛋壳厚度、蛋壳强度和抗氧化酶活性[149]。Se 源(添加形式)及其添加量影响肉鸡[148]、肉鸭[44]、地方品种鸡[43]和生长猪[49,51-52,93]产品的品质。针对不同品种畜禽,适当提高饲粮 Se 水平可增加畜禽产品中的硒沉积量,且有机硒的沉积效率普遍高于无机硒。

研究表明,饲粮中添加 Mn 可改善动物胴体品质,提高蛋壳品质。张亚男[150]发现,饲粮 Mn 可通过调控蛋壳腺内蛋白的糖基化和聚糖代谢,增加蛋壳乳突密度,改善超微结构从而提高蛋壳品质。王波[151]以无机微量元素 Fe、Cu、Zn、Mn(添加量为 10、100、80、80 mg/kg)作为对照组,用 100%、75%、50%的寡糖络合微量元素替代无机微量元素,结果发现寡糖微量元素络合物可显著提高黄羽肉鸡的半净膛率、全净膛率、胸肌嫩度和腿肌嫩度及胸肌中的粗蛋白质含量,其中 75%替代量效果最佳。

5 微量元素减量增效研究进展

饲粮中添加过量微量元素会增加粪便中微量元素排放量,污染环境[152]。育肥猪饲粮中 Fe、Mn、Zn、Mg 和 Cu 等微量元素的添加可在 NRC(2012)推荐量的基础上减少 30%,而不影响育肥猪后期的生长性能和肉品质[153]。适当降低黄羽肉鸡饲粮中微量元素的添加量对肉鸡生长性能和肝脏与胫骨中微量元素沉积无显著影响[154]。以有机形式添加微量元素可降低使用量,减少排放而不影响生长性能。与添加无机铜、铁、锌、锰相比,育肥猪饲粮中添加有机铜、铁、锌、锰可减少使用量,且能提高育肥猪的生长性能和降低微量元素的排放量[155]。李垚等[10]研究表明,仔猪饲粮中添加小肽螯合铜、铁、锌、锰、硒可以部分替代无机微量元素,降低微量元素的排放量。肉鸡[156]饲粮中添加有机微量元素,可减少微量元素的添加量,且对生长性能、胴体产量和肉质无负面影响,且可以减少粪便微量元素排放量。动物机体微量元素间可能存在某种平衡的关系,添加适宜比例的微量元素,既可以满足动物的生长需要,又能减少微量元素的排放[152]。饲粮中的 Cu、Fe、Zn、Mn 按一定比例添加,既可以满足肉鸡微量元素的需要,又能降低粪便中 4 种元素的排放量[157]。

饲粮中添加 Cu 有助于动物的健康,但过量添加会造成粪便中 Cu 的排放增加,污染环境。因此提高 Cu 的利用率,减少饲粮中 Cu 的添加量,降低 Cu 的排放意义重大。蒙洪娇等[7]以硫酸铜为 Cu 源,在饲粮中分别添加 10、45、135 和 225 mg/kg 的 Cu 饲喂育肥猪,结果表明添加 45 mg/kg 的 Cu 可提高 Cu 的代谢率,降低组织 Cu 沉积率。与硫酸铜相比,黏土铜具有更高的消化率,低剂量的黏土铜可以作为高剂量硫酸铜的替代物,且可降低猪的腹泻率和粪便 Cu 排放量[158]。与硫酸铜相比,虽然碱式氯化铜对生长猪短期的生长性能有所降低,但粪便 Cu 排放量也有所降低[159]。有机铜比无机铜更容易被动物吸收,饲粮中添加有机铜可以减少 Cu 的使用量。以低剂量的小肽螯合铜和小肽螯合锌代替高剂量的硫酸铜,在保证生长猪的正常生长性能条件下,降低了粪便中 Cu 和 Zn 的排放[160]。研究表明,低剂量的螯合铜不影响仔猪的生长,且粪便中 Cu 的排放量可以降低 50%~80%[161]。此外,植酸酶可以促进动物对微量元素的利用[162],提高育肥猪的 Cu 和 Zn 的表观消化率,减少饲粮中 Cu 和 Zn 的使用量,减少粪便中 Cu 和 Zn 的排放[163]。

动物 Fe 摄入量过高时,能够将过量的 Fe 转运

到其他组织储存,但 Fe 的供给超过动物的需要,过量的 Fe 会随粪便排出体外造成浪费和环境污染。维生素 A 可以与 Fe 形成有利于动物吸收的复合物,在蛋鸡常规饲粮中添加低剂量的 Fe 和高剂量的维生素 A 可以保证蛋鸡胫骨 Fe 的沉积[164]。孔敏等[165]发现枯草芽孢杆菌的使用可以降低五龙鹅饲粮中 Fe 的使用量。有机铁可以提高动物对 Fe 的吸收效率,降低 Fe 的排放量[166],低浓度的甘氨酸铁螯合物可以替代硫酸亚铁作为蛋鸡饲粮的 Fe 源,并能提高蛋鸡的生产性能[167]。

Zn 的早期研究主要集中在超高剂量氧化锌的使用降低肠道感染引起的腹泻及寻找抗生素的替代物,但随着饲粮中 Zn 水平的升高,会造成环境污染和细菌耐药性增加。因此人们开始关注新型 Zn 制剂的低剂量应用效果研究。研究发现饲粮中添加低剂量(450 mg/kg)纳米氧化锌效果与常规剂量(3 000 mg/kg)的传统氧化锌效果相当,可降低仔猪体内过量 Zn 的积累,降低 Zn 的排放量,减少环境的污染[168]。因此,低剂量的纳米氧化锌可替代高剂量的传统氧化锌在断奶仔猪饲粮中应用。

为探究富 Se 饲粮中 Se 的添加形式及添加量与畜产品 Se 沉积效率之间的关系,以达到 Se 减量增效的目的。在蛋鸡饲粮中分别添加不同 Se 源,发现硒代蛋氨酸(SeMet)和 SeY 组蛋中 Se 含量显著高于 SS 组[169]。在相同添加水平条件下肉鸡各组织中 Se 沉积量为 SeMet 组>SeY 组>SS 组[170]。饲粮中添加 SeMet 比硒甲基半胱氨酸(MeSeCys)和 SS 更有效地增加生长育肥猪肌肉中的 Se 沉积量[171]。以上研究表明,有机硒的沉积效率均高于无机硒。因此,在动物生产中利用有机硒替代无机硒生产富硒产品将为 Se 的减量增效提供可能。

Zhao 等[172]比较了肉鸡上腐殖酸锰络合物与硫酸锰的利用率,结果发现腐殖酸锰络合物与硫酸锰具有相同的生物学利用效率。以蛋鸡为试验对象,对照组饲粮添加 60 mg/kg 硫酸锰,试验组饲粮分别添加 20、40、60 和 80 mg/kg 的蛋氨酸锰,结果发现饲粮添加蛋氨酸锰可提高蛋壳质量与超微结构,20 mg/kg 的蛋氨酸锰与 60 mg/kg 硫酸锰效果相似[173]。

6　小　结

微量元素是人与动物所必需的营养元素,参与机体碳水化合物、脂肪、蛋白质等多种营养物质的代谢,与动物的生长发育、繁殖性能等密切相关。近 5 年我国科研人员围绕微量元素与猪禽生产性能、机体健康,抗氧化和抗应激以及畜产品品质关系做了大量研究,并对相应分子机制做出大量探讨。随着科技的进步,一些新型微量元素特别是有机微量元素较于无机微量元素具有利用率高、易消化吸收、适口性好、毒性低,还具有提高抗病及抗应激能力、增强免疫力和抗氧化力、提高繁殖性能及减少环境污染的优点。因此微量元素的减量增效是可行的。但是部分微量元素的研究成果并不完全,不同阶段的添加量与效果还是空白,其消化利用机制、抗氧化抗应激机制的研究工作很少。因此,进一步在分子水平上深入研究微量元素在动物体内的代谢机理,研究不同来源微量元素对不同动物及不同生长阶段的影响,研究不同阶段最适添加量等,仍是未来微量元素营养的研究方向。

参考文献:

[1] 陈志勇,廖秀冬,张丽阳,等.饲粮添加铜对 1~21 日龄肉仔鸡生长性能和血清生化指标的影响[J].中国畜牧杂志,2020,56(5):127-132.

[2] 宋景萍.铜对产蛋鸡生产性能及蛋壳品质的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2017(14):193-194.

[3] 郭永清,张小宇,陈玉洁,等.硫酸铜和纳米铜对鸡胚代谢和发育的影响[J].中国饲料,2018(24):30-33.

[4] 欧秀琼,钟正泽,张晓春,等.日粮铜含量对四川白鹅生长性能、胴体性状及肉质性状的影响研究[J].中国家禽,2016,38(6):35-38.

[5] 高阳,杨文艳,车东升,等.高铜日粮抑制猪生长的机制研究进展[J].中国兽医学报,2019,39(11):2266-2271.

[6] 代国滔,王宝维,葛文华,等.饲粮铜添加水平对产蛋期种鹅生产性能、繁殖性能、蛋品质和血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2019,31(5):2136-2143.

[7] 蒙洪娇.日粮铜水平对育肥猪生长性能、养分消化率及组织铜沉积的影响研究[D].硕士学位论文.长春:吉林农业大学,2017.

[8] 李志惠,曹娟,陈利.羟基蛋氨酸螯合铜对断奶仔猪和育肥猪生长性能及组织铜含量的影响[J].中国饲料,2019(6):37-41.

[9] 燕磊,李星晨,王正国,等.日粮添加不同铜源对肉鸭

生长性能、胴体组成和粪便中铜含量的影响[J].中国家禽,2019,41(19):35-38.
[10] 李垚,李玲,苏全,等.小肽螯合铜、铁、锰、锌、硒对仔猪生长性能及代谢影响[J].东北农业大学学报,2016,47(2):46-53.
[11] 晏家友,张纯,李书伟,等.不同铜源对仔猪生长性能、腹泻率及血清免疫和抗氧化功能的影响[J].中国畜牧杂志,2018,54(11):93-95,100.
[12] 鲁陈,胡贺,杜方超,等.有机铜在动物生产中的研究进展[J].饲料博览,2019(5):41-47.
[13] 鲁陈.微生物铜研制及其饲喂肥育猪的效价评定[D].硕士学位论文.合肥:安徽农业大学,2018.
[14] 富超,燕磊,牛自康,等.日粮中添加不同铜源对肉仔鸡生长性能及粪便金属含量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2019(10):128-131.
[15] 薛玉华.新生仔猪快补铁严防出现贫血症[J].江西饲料,2019(1):41-42.
[16] 吕学芳.初生仔猪缺铁性贫血的病因分析及综合防治[J].中国畜牧兽医文摘,2018,34(4):163.
[17] 谭辉,朱中平.仔猪补铁研究进展[J].中国猪业,2016,11(1):47-51.
[18] 邓菲,孙晓蒙,徐帆,等.不同铁源对断奶仔猪生长性能及血液指标的影响[J].中国动物保健,2020,22(1):45-46.
[19] 李妍.不同铁源及添加水平对断奶仔猪铁营养影响的研究[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2016.
[20] 车丽涛,李岑曦,徐娜娜,等.乳铁蛋白对大河乌猪繁殖性能及母猪与仔猪铁营养、血细胞参数、免疫指标和猪β防御素基因表达的影响[J].动物营养学报,2020,32(7):3089-3098.
[21] 辛国芹,徐海燕,汪孟娟,等.母猪日粮中添加补铁微生态制剂对预防仔猪贫血的研究[J].中国饲料,2016(13):14-18.
[22] 隋福良,李文立,王贺飞,等.饲粮铁添加水平对产蛋期种鹅生产性能、繁殖性能、蛋品质及血液生理生化指标的影响[J].动物营养学报,2019,31(6):2634-2641.
[23] 罗玲,曲湘勇,韩奇鹏,等.包膜酸化剂和小肽螯合铁对夏季蛋鸡生产性能、蛋黄中微量元素含量及血清免疫和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2017,29(3):1021-1029.
[24] 甄霆,张响英,张诗怡,等.复合氨基酸铁、锌络合物替代日粮无机铁、锌对藏鸡生长性能和屠宰性能的影响[J].中国家禽,2019(11):51-53.
[25] 耿彦强,李业明,张雄,等.甘氨酸亚铁和维生素A对蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[J].中国畜牧杂志,2018,54(9):72-76.
[26] 苟钟勇,蒋守群,蒋宗勇,等.快大型黄羽肉种鸡父母代种母鸡产蛋期铁需要量研究[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社,2016.
[27] CHO J H,UPADHAYA S D,KIM I H.Effects of dietary supplementation of modified zinc oxide on growth performance,nutrient digestibility,blood profiles,fecal microbial shedding and fecal score in weanling pigs[J].Animal Science Journal,2015,86(6):617-623.
[28] JIAO Y,LI X R,KIM I H.Changes in growth performance,nutrient digestibility,immune blood profiles,fecal microbial and fecal gas emission of growing pigs in response to zinc aspartic acid chelate[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2020,33(4):597-604.
[29] 牛现琇,杨维仁,袁学军,等.不同锌源及水平对生长育肥猪生长性能、血清抗氧化指标及微量元素利用的影响[J].动物营养学报,2018,30(3):1162-1171.
[30] WEN M,ZHAO H,LIU G M,et al.Effect of zinc supplementation on growth performance,intestinal development,and intestinal barrier-related gene expression in pekin ducks[J].Biological Trace Element Research,2018,183(2):351-360.
[31] ATTIA Y A,ADDEO N F,AL-HAMID A,et al.Effects of phytase supplementation to diets with or without zinc addition on growth performance and zinc utilization of white pekin ducks[J].Animals,2019,9(5):280.
[32] GHOSH A,MANDAL G,ROY A,et al.Effects of supplementation of manganese with or without phytase on growth performance,carcass traits,muscle and tibia composition,and immunity in broiler chickens[J].Livestock Science,2016,191:80-85.
[33] WEN M,WU B,ZHAO H,et al.Effects of dietary zinc on carcass traits,meat quality,antioxidant status,and tissue zinc accumulation of pekin ducks[J].Biological Trace Element Research,2019,190(1):187-196.
[34] ZHANG Y N,WANG S,LI K C,et al.Estimation of dietary zinc requirement for laying duck breeders:effects on productive and reproductive performance,egg quality,tibial characteristics,plasma biochemical and antioxidant indices,and zinc deposition[J].Poultry Science,2020,99(1):454-462.

[35] MAYER A N, VIEIRA S L, BERWANGER E, et al. Zinc requirements of broiler breeder hens[J]. Poultry Science, 2019, 98(3): 1288-1301.

[36] LI L, ABOUELEZZ K F M, GOU Z, et al. Optimization of dietary zinc requirement for broiler breeder hens of Chinese yellow-feathered chicken[J]. Animals, 2019, 9(7): 472.

[37] XU J Y, WANG L Q, TANG J Y, et al. Pancreatic atrophy caused by dietary selenium deficiency induces hypoinsulinemic hyperglycemia via global down-regulation of selenoprotein encoding genes in broilers[J]. PLoS One, 2017, 12(8): e0182079.

[38] HUANG X F, TANG J Y, XU J Y, et al. Supranutritional dietary selenium induced hyperinsulinemia and dyslipidemia via affected expression of selenoprotein genes and insulin signal-related genes in broiler[J]. RSC Advances, 2016, 6(88): 84990-84998.

[39] 何珍.不同水平硒代甲硫氨酸羟基类似物对黄羽肉鸡肉品质及硒沉积的影响[D].硕士学位论文.成都:四川农业大学,2019.

[40] WANG Y X, XIAO X, ZHAN X A. Antagonistic effects of different selenium sources on growth inhibition, oxidative damage, and apoptosis induced by fluorine in broilers[J]. Poultry Science, 2018, 97(9): 3207-3217.

[41] LIU H, YU Q F, FANG C K, et al. Effect of selenium source and level on performance, egg quality, egg selenium content, and serum biochemical parameters in laying hens[J]. Foods, 2020, 9(1): 68.

[42] TONG C, LI P, YU L H, et al. Selenium-rich yeast attenuates ochratoxin A-induced small intestinal injury in broiler chickens by activating the Nrf2 pathway and inhibiting NF-κB activation[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 66: 103784.

[43] LI J L, ZHANG L, YANG Z Y, et al. Effects of different selenium sources on growth performance, antioxidant capacity and meat quality of local Chinese *Subei* chickens[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 181(2): 340-346.

[44] 鞠耿越,万晓莉,杨海明,等.不同硒源和硒添加水平对鹅生长性能、屠宰性能、肉品质和胸肌硒含量的影响[J].动物营养学报,2019,31(2):662-668.

[45] CHEN J, HAN J H, GUAN W T, et al. Selenium and vitamin E in sow diets: Ⅰ. Effect on antioxidant status and reproductive performance in multiparous sows[J]. Animal Feed Science and Technology, 2016, 221: 111-123.

[46] ZHANG Y, YU D H, ZHANG J L, et al. The role of necroptosis and apoptosis through the oxidative stress pathway in the liver of selenium-deficient swine[J]. Metallomics, 2020, 12(4): 607-616.

[47] 郭永清,赵宇飞,任宏,等.硒代蛋氨酸对断奶仔猪生长性能、抗氧化及免疫性能的影响[J].中国饲料,2019(4):50-54.

[48] 路则庆,胡喻涵,黄向韵,等.富硒胞外多糖对断奶仔猪生长、抗氧化功能、肠道形态结构和抗菌肽表达的影响[J].动物营养学报,2019,31(8):3755-3762.

[49] 吴贵富.富硒乳酸菌中药制剂对育肥猪生长性能、血清指标及胴体品质的影响[D].硕士学位论文.延吉:延边大学,2019.

[50] 晁娅梅.硒蛋氨酸羟基类似物(HMSeBA)在断奶仔猪饲粮中的有效性和耐受性评价研究[D].硕士学位论文.成都:四川农业大学,2017.

[51] 井金钟.陈化玉米和氧化油脂诱导生长育肥猪氧化应激及硒代甲硫氨酸羟基类似物抗应激效应的研究[D].硕士学位论文.成都:四川农业大学,2019.

[52] ZHENG Y L, DAI W Z, HU X L, et al. Effects of dietary glycine selenium nanoparticles on loin quality, tissue selenium retention, and serum antioxidation in finishing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2020, 260: 114345.

[53] HUANG Y M, LI W Y, XU D N, et al. Effect of dietary selenium deficiency on the cell apoptosis and the level of thyroid hormones in chicken[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 171(2): 445-452.

[54] WANG S, XU Z, YIN H, et al. Alleviation mechanisms of selenium on cadmium-spiked in chicken ovarian tissue: perspectives from autophagy and energy metabolism[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 186(2): 521-528.

[55] 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.

[56] ZHANG S H, WU Z H, HENG J H, et al. Combined yeast culture and organic selenium supplementation during late gestation and lactation improve preweaning piglet performance by enhancing the antioxidant capacity and milk content in nutrient-restricted sows[J]. Animal Nutrition, 2020, 6(2): 160-167.

[57] LI N Y, SUN Z J, ANSARI A R, et al. Impact of maternal selenium supplementation from late gestation and lactation on piglet immune function[J]. Biological Trace Element Research, 2020, 194(1): 159-167.

[58] CHEN J, ZHANG F T, GUAN W T, et al. Increasing selenium supply for heat-stressed or actively cooled sows improves piglet preweaning survival, colostrum and milk composition, as well as maternal selenium, antioxidant status and immunoglobulin transfer[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2019, 52: 89-99.

[59] 郝洋洋, 张修修, 王玉, 等. 有机锌和有机锰对蛋种母鸡生产性能、蛋品质、抗氧化能力和免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 4931-4938.

[60] ZHANG Y N, ZHANG H J, WU S G, et al. Dietary manganese supplementation affects mammillary knobs of eggshell ultrastructure in laying hens[J]. Poultry Science, 2018, 97(4): 1253-1262.

[61] ZHANG Y N, WANG J, ZHANG H J, et al. Effect of dietary supplementation of organic or inorganic manganese on eggshell quality, ultrastructure, and components in laying hens[J]. Poultry Science, 2017, 96(7): 2184-2193.

[62] 何万领, 李晓丽, 张金汉, 等. 微生物发酵铁、锌、锰、铜对蛋鸡生产性能和血清指标的影响[J]. 中国兽医学报, 2018, 38(2): 398-403, 420.

[63] 魏茂莲, 杨维仁, 杨在宾, 等. 断奶仔猪对不同锰源生物学利用率的研究[J]. 中国畜牧兽医, 2016, 43(4): 999-1005.

[64] LU L, CHANG B, LIAO X D, et al. Use of molecular biomarkers to estimate manganese requirements for broiler chickens from 22 to 42 d of age[J]. British Journal of Nutrition, 2016, 116(9): 1512-1518.

[65] 李星晨, 王宝维, 王福香, 等. 碘对 1~4 周龄五龙鹅生长性能、屠宰性能和血清抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(4): 1084-1089.

[66] 徐燕红, 李星晨, 王宝维, 等. 饲粮碘添加水平对五龙鹅生长性能、屠宰性能、养分利用率及氮代谢的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 4947-4953.

[67] 张红伟, 王迪, 王羽, 等. 饲料中不同含量的铜对猪气管中菌群的影响[J]. 中国兽医学报, 2018, 38(4): 746-750.

[68] 王希笛. 日粮铜源及水平对鸡小肠上皮细胞铜转运的影响[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学, 2012.

[69] 刘国辉. 基于高通量测序研究铜、汞和铅对鸡盲肠微生物多样性的影响[D]. 硕士学位论文. 南昌: 江西农业大学, 2017.

[70] 赵春雨. 日粮铜源及其水平对生长猪肝脏铜转运的影响[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学, 2016.

[71] 郭剑英, 万婷, 苏荣胜, 等. 铜对肉鸡原代肝细胞三磷酸腺苷水平的影响[J]. 中国兽医杂志, 2017, 53(11): 33-35.

[72] 吴柳燕, 康振龙, 乔娜, 等. 铜离子在诱导鸡原代肝细胞凋亡方面及其对 *Drp*1 基因表达水平的影响[J]. 中国兽医科学, 2018, 48(7): 918-923.

[73] 廖建昭, 杨帆, 裴若男, 等. 铜通过活性氧诱导鸡肝细胞发生焦亡[J]. 中国兽医学报, 2018, 38(12): 2374-2378.

[74] 郭剑英, 唐兆新, 韩庆月, 等. 高铜对鸡肝细胞 NF-κB 及相关细胞因子 mRNA 表达的影响[J]. 中国兽医科学, 2019, 49(3): 386-392.

[75] 郭剑英, 白雨曼, 廖建昭, 等. 高铜诱导肉鸡肌胃和腺胃发生自噬与凋亡[J]. 中国兽医科学, 2020, 50(7): 930-938.

[76] 单春乔, 刘斯斯, 赵荣, 等. 小肽螯合铁对仔猪补铁效果的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2018(7): 54-56, 60.

[77] 赵冬琴, 王梁, 郝金鹏, 等. 饲喂母猪不同类型和水平的有机铁对仔猪生长和贫血状态的影响[J]. 中国饲料, 2019(5): 58-61.

[78] 袁明贵, 高彪, 陈文露, 等. 甘氨酸铁络合物对杜长大仔猪血常规指标的影响[J]. 广东畜牧兽医科技, 2017, 42(2): 41-44.

[79] 刁翠萍, 王宝维, 葛文华, 等. 不同铁添加水平饲粮中添加枯草芽孢杆菌对雏鹅生长性能、造血功能、铁代谢和肾脏功能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(10): 4151-4160.

[80] 卓钊. 不同铁源对机体铁代谢的影响及其在肠道中的吸收机制研究[D]. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2017.

[81] LI Y H, HANSEN S L, BORST L B, et al. Dietary iron deficiency and oversupplementation increase intestinal permeability, ion transport, and inflammation in pigs[J]. The Journal of Nutrition, 2016, 146(8): 1499-1505.

[82] 方升林. 过量铁对机体损伤效应及其诱导细胞死亡的机制研究[D]. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2018.

[83] 刘志军, 李静, 龙塔. 铁超载对禽肝脏细胞内 *GRP*78/*Bip* 与 *Caspase*-3 分子表达影响的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(9): 62-64.

[84] 李晓菲. 不同形态铁在肉仔鸡小肠中的吸收特点及其机制研究[D]. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[85] DOS SANTOS T S, TENG P Y, YADAV S, et al. Effects of inorganic Zn and Cu supplementation on gut health in broiler chickens challenged with *Eimeria* spp.

[J].Frontiers in Veterinary Science,2020,7:230.

[86] SONG Z H,XIAO K,KE Y L,et al.Zinc oxide influences mitogen-activated protein kinase and TGF-β1 signaling pathways,and enhances intestinal barrier integrity in weaned pigs[J].Innate Immunity,2014,21(4):341-348.

[87] ZHAO H,LI K,TANG J Y,et al.Expressions of selenoprotein genes is affected by obesity of pigs fed a high-fat diet[J].The Journal of Nutrition,2015,145(7):1394-1401.

[88] SUN L H,PI D A,ZHAO L,et al.Response of selenium and selenogenome in immune tissues to LPS-induced inflammatory reactions in pigs[J].Biological Trace Element Research,2017,177(1):90-96.

[89] LU Z,WANG P Z,TENG T,et al.Effects of dietary selenium deficiency or excess on selenoprotein gene expression in the spleen tissue of pig[J].Animals,2019,9(12):1122.

[90] YANG J,ZHANG Y,HAMID S,et al.Interplay between autophagy and apoptosis in selenium deficient cardiomyocytes in chicken[J].Journal of Inorganic Biochemistry,2017,170:17-25.

[91] YAO H D,ZHAO X,FAN R F,et al.Selenium deficiency-induced alterations in ion profiles in chicken muscle[J].PLoS One,2017,12(9):e0184186.

[92] LI S,ZHAO Q Y,ZHANG K,et al.Selenium deficiency-induced pancreatic pathology is associated with oxidative stress and energy metabolism disequilibrium[J].Biological Trace Element Research,2020,doi:10.1007/s12011-020-02140-9.

[93] ZHANG K,HAN Y S,ZHAO Q Y,et al.Targeted metabolomics analysis reveals that dietary supranutritional selenium regulates sugar and acylcarnitine metabolism homeostasis in pig liver[J].The Journal of Nutrition,2020,150(4):704-711.

[94] TANG J Y,HE A H,JIA G,et al.Protective effect of selenoprotein X against oxidative stress-induced cell apoptosis in human hepatocyte (LO2) cells via the p38 pathway[J].Biological Trace Element Research,2017,181(1):44-53.

[95] 濮振宇.肉鸡日粮铜、铁、锌、锰优化供给方案初探[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2016.

[96] LIAO X D,WANG G,LU L,et al.Effect of manganese source on manganese absorption and expression of related transporters in the small intestine of broilers[J].Poultry Science,2019,98(10):4994-5004.

[97] BAI S P,ZHANG K Y,DING X M,et al.Uptake of Manganese from the manganese-lysine complex in primary chicken intestinal epithelial cells[J].Animals,2019,9(8):559.

[98] 解竞静,罗绪刚.饲粮锰调节母禽繁殖性能的内分泌机制[J].动物营养学报,2016,28(2):319-325.

[99] QASIM M,JIN J X,LEE S,et al.Effects of manganese on maturation of porcine oocytes *in vitro* and their subsequent embryo development after parthenogenetic activation and somatic cell nuclear transfer[J].The Journal of Reproduction and Development,2019,65(3):259-265.

[100] 李少华,余思佳,罗振,等.小肽螯合铜、锌对生长育肥猪生长性能、抗氧化能力和粪便铜锌含量的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社,2016.

[101] 马欣艳,乔娜,唐兆新,等.高铜诱导肉鸡心肌氧化损伤和内质网应激[J].中国兽医学报,2020,40(5):1024-1029.

[102] 李慧,杨林.Nrf2 抗氧化的分子调控机制[J].生物信息学,2018,16(1):1-6.

[103] 裴若男,杨帆,廖建昭,等.高铜日粮对肉鸡肾氧化损伤和 Nrf2 信号通路相关基因表达的影响[J].畜牧兽医学报,2019,50(9):1912-1919.

[104] 马飞洋,杨帆,唐兆新,等.高铜对肉鸡心肌细胞线粒体自噬的影响[J]中国兽医科学,2019,49(5):659-664.

[105] 张一鸣,孙效名,万丹,等.二肽螯合铁对仔猪生长性能、血清铁和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(8):2551-2555.

[106] 温晓鹿,胡友军,王胜林,等.饲粮中添加富血铁替代硫酸亚铁对生长猪生长性能和血液、、肠道相关指标的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社,2016.

[107] 石磊,邓仕伟,吴兵,等.复合有机铁对母猪繁殖性能及其抗氧化能力的影响[J].中国饲料,2019(13):58-61.

[108] LEI X J,KIM I H.Evaluation of coated zinc oxide in young pigs challenged with enterotoxigenic *Escherichia coli* K88[J].Animal Feed Science and Technology,2020,262:114339.

[109] 高金鑫,张贝贝,唐大智,等.日粮不同锌源及锌水平对肉鸡免疫调节作用的研究[J].中国畜牧杂志,2019,55(8):70-77.

[110] RAMIAH S K,AWAD E A,MOOKIAH S,et al.Effects of zinc oxide nanoparticles on growth perform-

ance and concentrations of malondialdehyde, zinc in tissues, and corticosterone in broiler chickens under heat stress conditions[J]. Poultry Science, 2019, 98(9): 3828-3838.

[111] HE B, BORTOLUZZI C, KING W D, et al. Zinc source influences the gene expression of zinc transporters in jejunum and cecal tonsils during broiler challenge with *Eimeria maxima* and *Clostridium perfringens*[J]. Poultry Science, 2019, 98(3): 1146-1152.

[112] TANG J Y, CAO L, LI Q, et al. Selenoprotein X gene knockdown aggravated H_2O_2-induced apoptosis in liver LO2 cells[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 173(1): 71-78.

[113] LIU Y, ZHANG W, ZHAO J T, et al. Selenoprotein P as the major transporter for mercury in serum from methylmercury-poisoned rats[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 50: 589-595.

[114] WANG L Q, JING J Z, YAN H, et al. Selenium pretreatment alleviated LPS-induced immunological stress via upregulation of several selenoprotein encoding genes in murine RAW264.7 cells[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 186(2): 505-513.

[115] TANG J Y, WANG L Q, JIA G, et al. The hydroxy-analogue of selenomethionine alleviated lipopolysaccharide-induced inflammatory responses is associated with recover expression of several selenoprotein encoding genes in the spleens of *Kunming* mice[J]. RSC Advances, 2019, 9(69): 40462-40470.

[116] HUANG X D, SUN B, ZHANG J L, et al. Selenium deficiency induced injury in chicken muscular stomach by downregulating selenoproteins[J]. Biological Trace Element Research, 2017, 179(2): 277-283.

[117] LIU Z, QU Y P, WANG J F, et al. Selenium deficiency attenuates chicken duodenal mucosal immunity via activation of the NF-κB signaling pathway[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 172(2): 465-473.

[118] ZHANG J Y, HAO X F, XU S W. Selenium prevents lead-induced necroptosis by restoring antioxidant functions and blocking MAPK/NF-κB pathway in chicken lymphocytes[J]. Biological Trace Element Research, 2020, doi: 10.1007/s12011-020-02094-y.

[119] SUN Z P, LIU C, PAN T R, et al. Selenium accelerates chicken dendritic cells differentiation and affects selenoproteins expression[J]. Developmental & Comparative Immunology, 2017, 77: 30-37.

[120] DUAN S Y, CHEN S J, LIANG W, et al. Dietary selenium deficiency facilitated reduced stomatin and phosphatidylserine externalization, increasing erythrocyte osmotic fragility in mice[J]. Biological Trace Element Research, 2020, doi: 10.1007/s12011-020-02162-3.

[121] CAO L, TANG J Y, LI Q, et al. Expression of selenoprotein genes is affected by heat stress in IPEC-J2 cells[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 172(2): 354-360.

[122] TANG J Y, HE A H, YAN H, et al. Damage to the myogenic differentiation of C2C12 cells by heat stress is associated with up-regulation of several selenoproteins[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 10601.

[123] TANG J Y, CAO L, JIA G, et al. The protective effect of selenium from heat stress-induced porcine small intestinal epithelial cell line (IPEC-J2) injury is associated with regulation expression of selenoproteins[J]. British Journal of Nutrition, 2019, 122(10): 1081-1090.

[124] ZHANG R X, LIU Y H, XING L, et al. The protective role of selenium against cadmium-induced hepatotoxicity in laying hens: expression of *Hsps* and inflammation-related genes and modulation of elements homeostasis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 159: 205-212.

[125] HUANG H, WANG Y, AN Y, et al. Selenium alleviates oxidative stress and autophagy in lead-treated chicken testes[J]. Theriogenology, 2019, 131: 146-152.

[126] ZHENG S F, SONG H Y, GAO H, et al. The Antagonistic effect of selenium on lead-induced inflammatory factors and heat shock protein mRNA level in chicken cartilage tissue[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 173(1): 177-184.

[127] HAO S, HU J F, SONG S Q, et al. Selenium alleviates aflatoxin B_1-induced immune toxicity through improving glutathione peroxidase 1 and selenoprotein S expression in primary porcine splenocytes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(6): 1385-1393.

[128] WANG X M, ZUO Z C, ZHAO C P, et al. Protective role of selenium in the activities of antioxidant enzymes in piglet splenic lymphocytes exposed to deoxynivalenol[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2016, 47: 53-61.

[129] XU D N, LI W Y, LI B M, et al. The effect of selenium and polysaccharide of *Atractylodes macrocephala* Koidz. (PAMK) on endoplasmic reticulum stress and

apoptosis in chicken spleen induced by heat stress[J]. RSC Advances,2017,7(13):7519-7525.

[130] JIANG J,TANG X Y,XUE Y,et al.Dietary linseed oil supplemented with organic selenium improved the fatty acid nutritional profile,muscular selenium deposition,water retention,and tenderness of fresh pork [J].Meat Science,2017,131:99-106.

[131] 秦士贞.锰对原代培养鸡胚心肌细胞的抗热应激效应及其分子机制研究[D].博士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2017.

[132] 朱勇文.饲粮锰、锌对肉鸡的抗热应激效应及其分子机制的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2016.

[133] LIAO X D,ZHU Y W,LU L,et al.Maternal manganese activates anti-apoptotic-related gene expressions via miR-1551 and miR-34c in embryonic hearts from maternal heat stress (Gallus gallus)[J].Journal of Thermal Biology,2019,84:190-199.

[134] ZHU Y W,LU L,LI W X,et al.Effect of dietary manganese on antioxidant status and expressions of heat shock proteins and factors in tissues of laying broiler breeders under normal and high environmental temperatures[J].British Journal of Nutrition,2016,116(11):1851-1860.

[135] LI S F,LU L,LIAO X DL,et al.Manganese elevates manganese superoxide dismutase protein level through protein kinase C and protein tyrosine kinase[J].BioMetals,2016,29(2):265-274.

[136] 张辉,李文凤,赵盈盈,等.高铜、锌饲料对猪肉及内脏铜、锌残留的影响[J].浙江农业科学,2018,59(11):172-173,176.

[137] 张晓春,解华东,李星,等.日粮铜水平对鹅血液和组织中铜含量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2017(4):136-138.

[138] 崔玉美.载铜壳聚糖微粒对保育猪胴体组成的影响[J].养猪,2017(2):69-71.

[139] 李向辉,张立恒,马霞,等.不同铜源及添加水平对北京鸭生长性能和脂代谢的影响[J].中国饲料,2019(18):80-84.

[140] 杨柳.饲粮铁水平对肉仔鸡生长性能、屠宰性能、血浆生化指标及骨骼发育的影响[D].硕士学位论文.秦皇岛:河北科技师范学院,2019.

[141] 卓钊,俞晓楠,冯杰.不同铁源对断奶仔猪生长及铁代谢相关指标的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社,2016.

[142] 向荣,李文斌,刘爱巧,等.不同铁源对京红 1 号商品蛋鸡生产性能及蛋壳品质的影响[J].养殖与饲料,2020(3):21-24.

[143] 杜爱玲.不同铁源日粮对肉种鸡生长性能和鸡蛋铁含量的影响[J].中国饲料,2018(22):52-56.

[144] 李登昌,车业贵,董志俭,等.日粮蛋白及铁来源对种鸡生长性能和蛋中铁含量的影响[J].中国饲料,2018(20):72-76.

[145] 罗玲.包膜酸化剂和小肽螯合铁对蛋鸡生产性能、蛋黄中铁含量及血清生化指标的影响[D].硕士学位论文.长沙:湖南农业大学,2016

[146] QUDSIEH R I,SMITH D P,BRAKE J.Effect of elevated dietary inorganic zinc on live performance,carcass yield,and quality of male and female broilers[J].Poultry Science,2018,97(11):4122-4130.

[147] 晏家友,张纯,唐凌,等.有机锌源对四川农凤鸡肉中氨基酸和脂肪酸含量的影响[J].中国畜牧杂志,2017,53(12):86-88,100.

[148] 黄家强,姜云芸,郭慧媛,等.硒蛋白基因 W 和 N 与鸡肉品质的相关性研究[J].中国食品学报,2016,16(11):83-88.

[149] 吉莹利,林雪,杨婷,等.不同硒源对蛋鸡蛋品质、血清及蛋黄抗氧化指标的影响[J].中国家禽,2019,41(8):20-24.

[150] 张亚男.饲粮锰调控鸡蛋壳品质的作用机制研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2017.

[151] 王波.寡糖络合微量元素对黄羽肉鸡生长性能、饲料养分代谢率及血液生化指标的影响[D].硕士学位论文.南宁:广西大学,2017.

[152] 方热军,谢亮,薛俊敬,等.猪日粮中铜、铁、锰、锌减量使用技术研究进展[J].饲料工业,2019(22):1-5.

[153] 文超越,李勇,邢伟刚,等.饲粮减少矿物元素对育肥猪生长性能、肉品质、血清生化指标以及骨骼肌矿物元素含量的影响[J].动物营养学报,2017,29(2):597-604.

[154] 刘松柏,谭会泽,温志芬,等.饲粮不同微量元素添加量对于黄羽肉鸡生长性能及组织微量元素沉积的影响[J].畜牧与兽医,2019,51(5):24-28.

[155] 谭静,赵月朋,常书梅,等.日粮中添加有机铜、铁、锌、锰对育肥猪生长性能及减排的影响[J].饲料工业,2016,37(7):15-18.

[156] ZHU Z P,LEI Y,HY S D,et al.Effects of the different levels of dietary trace elements from organic or inorganic sources on growth performance,carcass traits,meat quality,and faecal mineral excretion of broilers [J].Archives of Animal Nutrition,2019,73(4):324-337.

[157] 刘雪兰,井庆川,魏祥法,等.肉鸡饲粮铜、铁、锌、锰添加水平对生产性能及免疫功能的影响[J].家禽科学,2017(6):3-7.

[158] 杨琳芬,符金华,李勇,等.低剂量黏土铜替代硫酸铜对小猪和中大猪生长性能和铜排放的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2020(1):102-105.

[159] 宋毅,蒲倍,郑萍,等.不同铜源对猪生长性能及组织和粪便中铜含量的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社,2016.

[160] 李少华,余思佳,罗振,等.小肽螯合铜、锌对生长肥育猪生产性能、生化指标和粪便铜锌含量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2017(6):10-14,19.

[161] 殷晓风,丁瑞志,顾欣,等.不同铜源对仔猪生长发育和粪便铜含量的影响[J].畜牧与兽医,2016,48(7):47-50.

[162] 侯爽,王昕陟.植酸酶对畜禽微量元素利用影响的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2018(1):74-76.

[163] 任善茂,邹艺琛,陶勇.降低铜、锌含量添加植酸酶对育肥猪生长性能、养分表观消化率及血清生化指标的影响[J].中国畜牧兽医,2018,45(11):3095-3103.

[164] 李园,张春善,蔡永强,等.铁和维生素 A 及其互作效应对产蛋鸡胫骨铁、铜、锰、锌含量的影响[J].中国家禽,2016,38(11):30-34.

[165] 孔敏,刁翠萍,王宝维,等.低铁饲粮添加枯草芽孢杆菌对五龙鹅免疫器官发育和抗氧化能力的影响[C]//中国畜牧兽医学会 2018 年学术年会禽病学分会第十九次学术研讨会论文集.南宁:中国畜牧兽医学会,2018:304.

[166] 丁浩轩,李海云,冯杰.有机铁在猪和鸡营养中的研究与应用[J].中国畜牧杂志,2019,55(4):7-11.

[167] XIE C,ELWAN H A M,ELNESR S S,et al.Effects of iron glycine chelate on laying performance,antioxidant activities,serum biochemical indices,iron concentrations and transferrin mRNA expression in laying hens[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2019,103(2):547-554.

[168] PEI X,XIAO Z P,LIU L J,et al.Effects of dietary zinc oxide nanoparticles supplementation on growth performance,zinc status,intestinal morphology,microflora population,and immune response in weaned pigs[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2019,99(3):1366-1374.

[169] 苏晓菲.3 种硒源在蛋鸡饲料中的有效性评价[J].山西农业科学,2018,46(9):1528-1531.

[170] LI K X,WANG J S,YUAN D,et al.Effects of different selenium sources and levels on antioxidant status in broiler breeders[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2018,31(12):1939-1945.

[171] ZHANG K,GUO X Q,ZHAO Q Y,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.

[172] ZHAO F L,HE C,PENG H W,et al.Relative bioavailability of humate-manganese complex for broilers fed a corn-soya bean meal diet[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2019,103(1):108-115.

[173] LI L L,ZHANG N N,GONG Y J,et al.Effects of dietary Mn-methionine supplementation on the egg quality of laying hens[J].Poultry Science,2018,97(1):247-254.

Proceeding of Monogastric Animal Trace Elements Nutrition

JIA Gang[1]　TIAN Gang[1]　FANG Rejun[2]　SUN Lyuhui[3]　LONG Dingbiao[4]　ZHAO Hua[1*]

(1. *Animal Nutrition Institute*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*; 2. *College of Animal Science and Technology*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*; 3. *College of Animal Science and Technology*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*; 4. *Chongqing Academy of Animal Sciences*, *Chongqing* 402460, *China*)

Abstract: Trace elements play important roles in growth, metabolism, immune regulation and anti-stress of animals. Good use of trace elements will improve disease resistance capacity, health and performance of animal. Moreover, the application of new types of trace elements will increase the utilization efficiency and decrease the release of trace elements, thus alleviate the environmental pollution. This review mainly summarizes the nutritional effects of trace elements (cuprum, ferrum, zinc, selenium, manganese and iodine) on growth performance, health, antioxidant capacity and product quality of pigs and poultry in the past five years of China, also proceedings on reducing the usage and enhancing utilization efficiency of trace elements are reviewed. [***Chinese Journal of Animal Nutrition***, **2020**, **32**(**10**):**4659-4673**]

Key words: proceeding; trace elements; pig; poultry; nutrition

* Corresponding author, professor, E-mail: zhua666@126.com

(责任编辑　陈　鑫)