

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2024.11.017

不同种类含硒补充剂饲喂三黄鸡中 硒和硒形态分布

李乾玉^{1,2} 刘丽萍^{1,2*} 刘玉兰³ 丛欣^{4,5} 刘洋¹ 陈绍占¹ 张晶¹

(1. 北京市疾病预防控制中心 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013;

2. 首都医科大学 公共卫生学院, 北京 100069;

3. 武汉轻工大学 动物营养与饲料科学湖北省重点实验室, 武汉 430023;

4. 恩施德源硒材料工程科技有限公司, 湖北 恩施 445000;

5. 武汉轻工大学 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 武汉 430023)

摘要 通过分析三种不同剂量含硒补充剂饲喂的三黄鸡体内总硒及硒形态含量, 研究硒在其体内的富集和分布情况, 为发展富硒禽肉等功能农产品提供数据参考。采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定经亚硒酸钠、富硒藜叶碎米茅和富硒酵母饲喂的三黄鸡组织中总硒含量; 经 55 °C 水浴超声辅助酶解提取, ZORBAX SB-Aq C18 色谱柱分离, 以 10 mmol/L 柠檬酸钠+5 mmol/L 己烷磺酸钠(含1%甲醇, pH=4.0)为流动相, 高效液相色谱与 ICP-MS 联用技术(HPLC-ICP/MS)测定其肌肉和肝脏中硒酸根[Se(VI)]、硒代半胱氨酸(SeCys)、甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)和硒代蛋氨酸(SeMet) 4 种硒形态。分析结果显示, 饲喂富硒酵母组的三黄鸡中肌肉和各组织器官中硒含量最高; 鸡胸肉和鸡腿肉中主要硒形态为 SeMet, 肝脏主要硒形态为 SeCys, 饲喂富硒酵母组肌肉和肝脏中 SeMet 含量显著高于其他含硒补充剂组。研究结果表明, 添加含硒补充剂的种类对三黄鸡组织中硒的富集有影响, 饲喂富硒酵母能显著增加禽类组织中硒含量, 特别是 SeMet 的含量, 可为富硒禽肉的饲养提供参考。

关键词 含硒补充剂; 鸡; 硒; 硒形态

中图分类号: O657.63 文献标志码: A 文章编号: 2095-1035(2024)11-1595-08

Effects of Different Types of Selenium Supplements on Selenium and Selenium Species Distribution in Sanhuang Chicken

LI Qianyu^{1,2}, LIU Liping^{1,2*}, LIU Yulan³, CONG Xin^{4,5}, LIU Yang¹,
CHEN Shaozhan¹, ZHANG Jing¹

(1. Beijing Key Laboratory of Food Poison Diagnosis and Traceability Technology, Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China;

2. School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China;

3. Hubei Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China;

4. Enshi Se-Run Material Engineering Technology Co., Ltd, Enshi, Hubei 445000, China;

5. National R & D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

收稿日期: 2024-01-22 修回日期: 2024-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1105300)

作者简介: 李乾玉, 女, 硕士研究生, 主要从事与营养相关的元素分析研究。E-mail: liqianyu0429@163.com

* 通信作者: 刘丽萍, 女, 教授, 主要从事与健康相关的有害物质及营养成分分析研究。E-mail: llp9312@163.com

引用格式: 李乾玉, 刘丽萍, 刘玉兰, 等. 不同种类含硒补充剂饲喂三黄鸡中硒和硒形态分布[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(11): 1595-1602.

LI Qianyu, LIU Liping, LIU Yulan, et al. Effects of Different Types of Selenium Supplements on Selenium and Selenium Species Distribution in Sanhuang Chicken[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(11): 1595-1602.

Abstract The experiment aimed to study the enrichment and distribution of selenium in Sanhuang Chicken supplemented with different types and doses of selenium-containing supplements to provide a reference for the development of selenium-enriched meat. Determination of total selenium in the tissues of Sanhuang Chickens by inductively coupled plasma mass spectrometry with microwave digestion, which was fed with sodium selenite, selenium-enriched cardamine violifolia, and selenium-enriched yeast. After ultrasound assisted enzymatic extraction in a 55 °C water bath, ZORBAX SB Aq C18 chromatography column was used for separation. Four selenium species in muscle and liver, selenate Se(VI) , selenocysteine (SeCys), methylselenocysteine (MeSeCys), and selenomethionine (SeMet), were analyzed and quantified by inductively coupled plasma mass spectrometry coupled with high-performance liquid chromatography (HPLC-ICP/MS) with 10 mmol/L sodium citrate+5 mmol/L sodium hexane sulfonate (containing 1% methanol, pH=4.0) used as mobile phase. The analysis results showed that the selenium content in the muscles and organs of the three groups was highest in the selenium-enriched yeast group. In chicken breast and thigh muscles, the main selenium species was SeMet, while in the liver, SeCys was the primary selenium form. Furthermore, tissues from the group fed with selenium-enriched yeast exhibited a significantly higher content of SeMet compared to the other groups. The research findings indicate that the type of selenium supplement added has an impact on the selenium enrichment in Sanhuang Chicken tissues. Feeding with selenium-enriched yeast significantly increases the selenium content in livers and muscles, particularly the content of SeMet. This information can serve as a reference for the feeding of selenium-enriched broilers.

Keywords selenium containing supplements; chicken; selenium; selenium form

硒是人体必需的微量元素,对维持人体健康具有重要作用^[1]。缺硒会引起免疫力下降,长期缺硒会导致克山病、大骨节等疾病^[2],由于硒的安全阈值较窄,摄入过量也会引起头发和指甲脱落、瘫痪甚至死亡^[3]。中国营养学会推荐正常人体的硒摄入量为 50~250 $\mu\text{g/d}$,根据我国 13 省份普查结果显示,超过 7 亿人均存在硒摄入不足的情况^[4]。食物是居民摄入硒的重要来源,开发富硒食品有助于提高居民硒的摄入量,如富硒鸡蛋^[5]、富硒小麦^[6]、富硒香菇^[7]、富硒木耳^[8]、富硒肉^[9]等均是受欢迎的富硒食品。肉类是我国居民膳食的重要组成部分之一,也是富集硒的优势载体,在饲喂动物过程中添加含硒补充剂,既可以保障动物机体健康,又能提高可食用组织中硒含量,进而提高居民膳食硒摄入水平。因此开发富硒食品,通过日常膳食提高硒摄入量,对改善缺硒地区居民健康水平有重要意义。

目前作为饲料添加的含硒补充剂主要为无机硒和有机硒,无机硒饲料添加剂包含硒酸盐和亚硒酸盐,有机硒饲料添加剂包含纳米硒、富硒酵母、硒肽和富硒碎米茅等复合形式,也包含甲基硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸等单一形式^[4,10-11]。亚硒酸钠成本低易获得,但有一定的毒性,且动物对其的吸收利用水平低于有机硒。富硒酵母是以酵母菌作为载体富

集硒的高品质有机硒^[12,4],其中硒代蛋氨酸(SeMet)占比在 60%~70%^[13]。莖叶碎米茅是在湖北省恩施发现的一种具有超强富硒能力的十字花科植物^[14],主要以硒代半胱氨酸、硒代胱氨酸、甲基硒代半胱氨酸和硒代蛋氨酸等有机形式存在^[15-16]。ZHANG 等^[17]应用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术(HPLC-ICP/MS)对经不同含硒补充剂[亚硒酸盐 Se(IV)]、甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)、硒代蛋氨酸(SeMet)饲喂的公猪肌肉中的硒含量和硒形态进行分析,在猪肌肉中主要检测到 SeMet、硒代胱氨酸(SeCys_2)和 MeSeCys。SeMet 作为含硒补充剂比 MeSeCys 和 Se(IV) 能更有效地提高肌肉总硒含量。JUNIPER 等^[18]对经含富硒酵母(SY)或亚硒酸钠(SS)强化的饲料饲喂后的野鸡组织中总硒含量及 SeMet 和硒代半胱氨酸(SeCys)占总硒中的比例进行研究,结果显示,肝脏和肾脏中以 SeCys 为主,占总硒的 75%,不同处理组间没有差异。由于莖叶碎米茅聚硒能力强,便于获得,目前越来越受到人们的关注,但目前以富硒莖叶碎米茅为含硒补充剂的研究较少。本研究通过对亚硒酸钠、富硒莖叶碎米茅和富硒酵母三种不同含硒补充剂饲喂三黄鸡后不同组织器官中硒含量及硒形态的分布进行研究,为富硒动物肉类的生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品来源

三黄鸡由合作单位武汉轻工大学动物营养与饲料科学湖北省重点实验室进行饲喂。选取 24 只体重为 1 kg 左右的三黄鸡小母鸡,随机分为 3 组,每组 8 只。三个组分别为亚硒酸钠组,饲喂商品预混料(以硒计 0.3 mg/kg, SS-0.3);实验一组,亚硒酸钠 0.3 mg/kg+富硒茎叶碎米茅 0.5 mg/kg(以硒计 0.8 mg/kg, SS+CV-0.8);实验二组,亚硒酸钠 0.3 mg/kg+富硒酵母 0.3 mg/kg+富硒茎叶碎米茅 0.2 mg/kg(以硒计 0.8 mg/kg, SS+CV+SY-0.8),分别记为 SS-0.3、SS+CV-0.8 组和 SS+SY+CV-0.8 组,4 d 适应期后饲喂 28 d。饲喂结束,给水不给料,禁食 12 h,称量鸡体重。各实验组随机选取 6 只三黄鸡,进行采血,检测全血硒含量;屠宰取肝脏、肾脏、胸肌和腿肌(大约 40 g 左右)、胃、胰腺、小肠、心脏样品于-20℃保存。

1.2 仪器与试剂

1260 型高效液相色谱仪及 7700x 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司)、安捷伦 ZORBAX SB-Aq C18(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 美国 Agilent 公司)、Milliplex IQ7015 超纯水处理系统(美国 Millipore 公司)、微波消解仪(上海屹尧公司)、电子天平(梅特勒-托利多公司)、超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司)、超速离心机(美国 Beckman 公司)。

超纯水(电阻率 18.2 MΩ·cm, 由超纯水处理系统制备),硝酸(HNO₃, 德国 Merk 公司)为优级纯,过氧化氢(H₂O₂)溶液(国药集团化学试剂有限公司),调谐液(美国 Aglient 公司)浓度为 1 ng/mL,内标液(美国 Aglient 公司)浓度为 1 μg/mL,硒标准溶液(中国计量科学研究院),NIST-SRM 1577c(美国标准局),柠檬酸(优级纯,国药集团化学试剂有限公司),己烷磺酸钠(优级纯,国药集团化学试剂有限公司),甲醇(HPLC 级,美国 Sigma 公司),氨水(优级纯,国药集团化学试剂有限公司),蛋白酶 XIV(美国 Sigma 公司),胰脂肪酶(美国 Sigma 公司),亚硒酸根离子溶液(GBW10032)、硒酸根离子溶液(GBW10033)、甲基硒代半胱氨酸(GBW10088)、硒代蛋氨酸(GBW10034)购于中国计量科学研究院,硒代半胱氨酸(≥95%, 中国麦克林公司)。

1.3 样品前处理

1.3.1 总硒

称取 0.5~2 g 组织样品(精确至 0.001 g)于微

波消解罐中,加入 6 mL 硝酸和 1 mL 过氧化氢,旋紧外盖置于微波消解仪中,按优化好的微波消解程序进行消解。样品消解完全后,用超纯水定容至 25 mL,混匀待测,同时做空白对照实验。

准确称取 1~1.5 g(精确至 0.001 g)混匀的全血样品于微波消解罐中,加入 3 mL 硝酸,旋紧外盖置于微波消解仪中,按照优化好的微波消解程序进行消解。消解完全后,用超纯水定容至 10 mL,混匀待测,同时做空白实验。

1.3.2 硒形态

称取 1.5 g 组织匀浆(精确至 0.001 g),加入 0.2 g 散装吸附剂 Bondesil-PSA(PSA)粉末、60 mg 蛋白酶 XIV、40 mg 胰脂肪酶和 10 mL 超纯水,涡旋混匀后于 55℃超声提取 3 h,提取结束后在 4℃下 10 000 r/min 离心 10 min,取上清液过 0.22 μm 水系滤膜待测,同时做空白实验。

1.4 仪器条件

参考 GB 5009.93—2017^[19] 中电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定总硒,选择碰撞反应池模式去除干扰,选择¹⁰³Rh 作为内标元素,优化质谱条件,采用外标法进行定量分析。仪器工作条件:RF 功率为 1 550 W,载气为高纯氩气,载气流速为 0.65 L/min,稀释气流速为 0.45 L/min,冷却气流速为 15 L/min,采样锥、截取锥为镍锥,射频电压为 1.80 V,采样深度为 8.0 mm,泵为 0.1 r/s,检测同位素为⁷⁸Se。

应用 HPLC-ICP/MS 法测定硒形态。以安捷伦 ZORBAX SB-Aq C18(250 mm×4.6 mm, 5 μm)为分析柱,以 10 mmol/L 柠檬酸及 5 mmol/L 己烷磺酸钠(含 1% 甲醇, pH=4.0)为流动相,等度洗脱,流速为 0.8 mL/min,进样量为 20 μL。质谱条件为:泵速 0.3 r/s、氦气流速 9.0 mL/min,其余参数同总硒检测。

测定过程中以空白、有证标准物质、平行样品进行质量控制。

1.5 统计分析方法

采用 Excel、Origin 和 SPSS 27.0 进行数据的录入及分析,对于服从正态分布的数据采用平均数和标准差进行描述,饲喂不同剂量和类型硒补充剂后生物样品中各组之间硒含量采用单因素方差分析进行比较分析,如存在差异进一步采用 Bonferroin 进行两两比较;对于不服从正态分布的数据采用中位数和四分位数间距进行描述,采用非参数检验进行比较分析。以 $P<0.05$ 视为差异显著,以 $P<0.01$ 视为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 方法学指标及质量控制

总硒测定的线性范围为 0~300 $\mu\text{g/L}$, 四种硒形态测定的线性范围为 0~100 $\mu\text{g/L}$, 相关系数均大于 0.999, 线性良好。当组织样品称样量为 1.0 g, 定容体积为 25 mL, 总硒的检出限 0.005 mg/kg, 定量限为 0.015 mg/kg; 当组织样品称样量为 1.5 g, 加入提取试剂为 10 mL 时, 四种硒形态测定检出限为 0.33~1.67 $\mu\text{g/kg}$ 。

采用加标回收实验考察硒形态测定方法的准确性, 精密度考察方法的重复性。在鸡肉、鸡肝样品中添加了低、中、高 3 个浓度水平的硒形态混合标准溶液, 4 种硒形态的加标回收率为 80.3%~108%, 相对标准偏差(RSD) < 5%。

采用有证标准物质考察测定的准确性, 有证标准物质 NIST 1577c 牛肝中总硒含量测定值为 (2.034 ± 0.007) mg/kg, 与标准值 (2.031 ± 0.045) mg/kg 基本一致, RSD 小于 5%, 满足要求。

欧盟有证标准物质小麦粉[ERM © BC210a, SeMet 标准值为 (11.03 ± 1.05) mg/kg], SeMet 的测定值为 (10.67 ± 0.19) mg/kg, 测定值在标准值范围内, 符合测定要求。

2.2 饲喂不同含硒补充剂的鸡组织器官中硒含量

2.2.1 鸡组织中硒含量的分布

饲喂不同剂量和类型含硒补充剂的鸡组织中硒含量均服从正态分布, 采用平均数±标准差描述其平均水平, 结果见表 1。富硒肉的含量为 0.110~0.238 mg/kg, 实验二组的鸡腿肉和鸡胸肉满足《中华人民共和国供销合作行业标准 富硒农产品》(GH/T 1135—2017)^[20]中规定的富硒畜禽肉硒含量要求(0.15~0.50 mg/kg)。

大部分内脏中总硒含量均在 0.313 mg/kg 以上, 内脏的硒富集能力大于肌肉, 由大至小依次为肝、肾、脾、胰腺, 这之前研究者对富硒羊、富硒仔猪与肉鸡的研究具有一致性^[21-23]。内脏硒含量高于肌肉, 究其原因可能有以下几点: 1) 肝脏作为代谢器官, 体内的非营养物质和代谢废物经肝脏排出体外^[21]; 2) 硒代蛋氨酸中硒取代了蛋氨酸中的硫, 与其他组织相比, 肝脏中的转硫途径更为活跃, 是硒代蛋氨酸中硒进入特定硒池的主要器官^[24]; 3) 肾脏作为代谢器官, 部分代谢产物经尿液排出体外, 因此肝肾的含量高于肌肉。

虽然内脏器官中硒含量高于肌肉, 但含富硒酵母组中肝脏和肾脏等脏器中硒含量较另两组分别增加 56.6%~49.4%、15.2%~19.1%, 低于肌肉中 122.7%、75.0%~78.9% 的幅度, 这与 JUNIPER 等^[25]研究结果一致。说明内脏对不同含硒补充剂富集能力的差异不如肌肉表现明显。

如表 1 所示, 除肾脏和脾脏外, 三组之间其他器官均存在显著差异($P < 0.05$), 经 Bonferroin 进行两两比较发现 SS+SY+CV-0.8 组与其他两组间存在显著差异($P < 0.05$), SS-0.3 组与 SS+CV-0.8 组间不存在显著差异($P > 0.05$)。硒在鸡体内的富集受含硒补充剂种类的影响, 三组中各器官中硒含量均以 SS+SY+CV-0.8 组最高。饲料中含硒补充剂种类对鸡各组织器官中硒含量有显著影响, 在同等添加量的情况下, 富硒酵母提高鸡体内组织器官中硒含量的效果更佳, 这与 JUNIPER 等^[18, 25-26]结果一致。与富硒酵母相比, 富硒茎叶碎米茅提高组织中硒含量的能力虽不明显, 但以富硒茎叶碎米茅为含硒补充剂可改善肉鸡对运输应急导致的体质量减少、抗氧化能力及改善肉质^[11], 可改善仔猪肠道健康等作用^[27]。

表 1 饲喂不同硒补充剂的三黄鸡组织器官中的硒含量分布

Table 1 Distribution of selenium content in tissues and organs of

Sanhuang fed different selenium supplements($n=6$)

/(mg · kg⁻¹)

Tissue	SS-0.3	SS+CV-0.8	SS+SY+CV-0.8	F	P
Breast	0.110±0.02 ^b	0.110±0.01 ^b	0.245±0.04 ^a	74.667	<0.001
Leg	0.133±0.02 ^b	0.136±0.02 ^b	0.238±0.03 ^a	52.987	<0.001
Kidney	0.635±0.07	0.664±0.07	0.765±0.15	2.697	0.10
Liver	0.584±0.11 ^b	0.575±0.07 ^b	0.876±0.07 ^a	25.567	<0.001
Heart	0.376±0.03 ^b	0.354±0.04 ^b	0.523±0.07 ^a	19.021	<0.001
Spleen	0.677±0.06	0.636±0.05	0.752±0.13	2.676	0.10
Pancreas	0.297±0.04 ^b	0.370±0.03 ^b	0.707±0.13 ^a	43.942	<0.001
Gastroenterology	0.313±0.03 ^b	0.338±0.02 ^b	0.462±0.05 ^a	36.407	<0.001
Adenogastric	0.335±0.03 ^b	0.392±0.03 ^b	0.537±0.01 ^a	84.835	<0.001
Intestine	0.519±0.06 ^b	0.487±0.07 ^b	0.673±0.13 ^a	7.035	0.007
Whole blood	0.263±0.03	0.245±0.04	0.293±0.04	2.712	0.101

Note: $P < 0.05$ indicated significant difference, different letter marks on the same line indicate significant differences between the two groups.

2.2.2 鸡全血与各组织器官的相关性分析

为了解硒含量在全血与其他组织器官相关性,应用 SPSS27.0 进行 Pearson 相关分析,具体数据见表 2。从分析结果显示全血与鸡腿肉、肝脏呈极显著相关($P<0.01$),全血与鸡腿肉、心脏、胰腺、脾脏、肌胃存在显著相关($P<0.05$)。这一结

果与张磊等^[28]研究相似,张磊等发现山羊血清硒含量与心脏、脾脏、肾脏和毛发硒含量呈显著或极显著相关关系。说明在饲喂过程中对动物全血中硒含量进行监测,可在一定范围内推测各组织中硒含量,为获得一定浓度的富硒肉制品提供较便捷的方式。

表 2 饲喂不同硒补充剂的鸡全血与其他 10 个组织器官相关性分析结果
Table 2 Results of correlation analysis between whole blood of chickens fed different selenium supplements and 10 other tissues and organs

Tissue	Breast	Leg	Kidney	Liver	Heart	Pancreatic	Spleen	Intestine	Adenogastric	Gastroenterology
Whole blood	0.636**	0.408*	0.370	0.574**	0.519*	0.613*	0.768*	0.322	0.468	0.546*

Note:**indicated very significant correlation ($P<0.01$), * indicated significant correlation ($P<0.05$).

2.3 饲喂不同含硒补充剂的鸡组织器官中硒形态

2.3.1 鸡胸肉和鸡腿肉硒形态

有机硒和无机硒在人体的生物利用不同,无机硒易溶于水,同时具有一定的毒性,需严格限制其使用量^[29]。与无机硒相比,有机硒生物利用度高,在人体内主要以硒蛋白的形式发挥作用,以硒代蛋氨酸形式存在的有机硒能更有效发挥硒的营养效应^[30]。因此对于富硒产品除关注硒含量外还需要关注硒形态^[31],期望有机硒含量高。

采用建立的硒形态分析方法对三组鸡胸和鸡腿的硒酸根[Se(VI)]、SeCys、MeSeCys 和 SeMet 四种硒形态进行分析检测。结果显示,鸡胸和鸡腿肉中硒形态主要 SeMet,不同饲喂组的肌肉中 SeMet 含量不同,SS-0.3 组鸡胸和鸡腿肉 SeMet 的含量分别为(0.027±0.001) mg/kg 和(0.027±0.004) mg/kg,SS+CV-0.8 组为(0.032±0.005) mg/kg 和(0.030±0.002) mg/kg,SS+SY+CV-0.8 组为(0.107±0.007) mg/kg 和(0.125±0.015) mg/kg,富硒酵母组的 SeMet 含量是显著高于另外两组($P<0.05$),较前两组增加 234%~296%、316%~362%。肌肉中还含有 SeCys 和少量 MeSeCys,未检出无机硒。

图 1 显示了经不同种类含硒补充剂饲喂后鸡肉中硒形态的分布情况。经不同种类含硒补充剂饲喂后,鸡胸肉和鸡腿肉中存在的硒形态主要为 SeMet,其中饲喂富硒酵母组的 SeMet 含量是另外两组的 234%以上,占比达 66%,高于其他组的 30%,这与 ZHAO 等^[32]在添加富硒酵母处理后鸡肉中得到的结果一致。富硒酵母中主要硒形态为 SeMet,SeMet 可非特异性的取代蛋氨酸进入肌肉蛋白中储存^[17],这可能是富硒酵母组,肌肉中 SeMet 含量明显高于其他组的原因。肌肉中除 SeMet 外,还含有 SeCys 和少量的 MeSeCys,这与 ZHANG 等^[17]结果

一致。

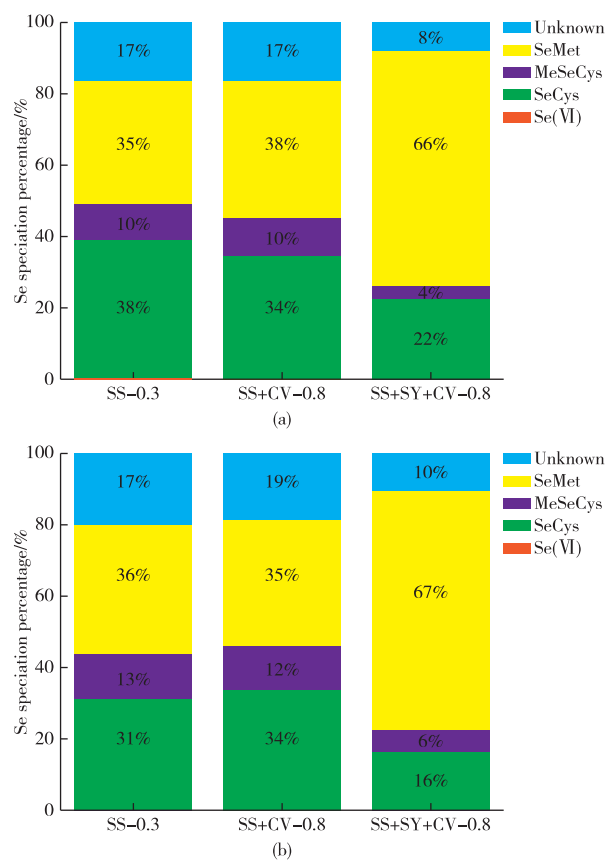


图 1 三组鸡胸肉和鸡腿肉各硒形态占比(a. 鸡胸肉; b. 鸡腿肉;Unknown 代表未知硒形态之和)

Figure 1 Percentage of each selenium form in the three groups of chicken breasts and legs(a. Chicken breasts; b. Chicken legs;Unknown represents the sum of unknown selenium forms).

2.3.2 肝脏中硒形态

采用课题组研究的硒形态提取方法对三组含硒补充剂饲喂的三黄鸡肝脏中硒形态进行分析研究,结果显示鸡肝脏中硒形态主要 SeCys,且含有 SeMet 和

少量 MeSeCys, 其中富硒酵母饲喂组的 SeMet 含量显著高于另外两组。SS-0.3 组鸡肝中 SeCys 的含量为 (0.112 ± 0.013) mg/kg, SS+CV-0.8 组为 (0.101 ± 0.011) mg/kg, SS+SY+CV-0.8 组为 (0.112 ± 0.013) mg/kg, 占比依次为 53%、51%、34%, 具体结果见图 2。SS+SY+CV-0.8 饲喂组鸡肝中 SeMet 的含量为 (0.116 ± 0.014) mg/kg, 占比为 35%, 显著高于其他两组, 说明以富硒酵母为含硒补充剂增加肌肉中 SeMet 的同时也增加了鸡肝 SeMet。

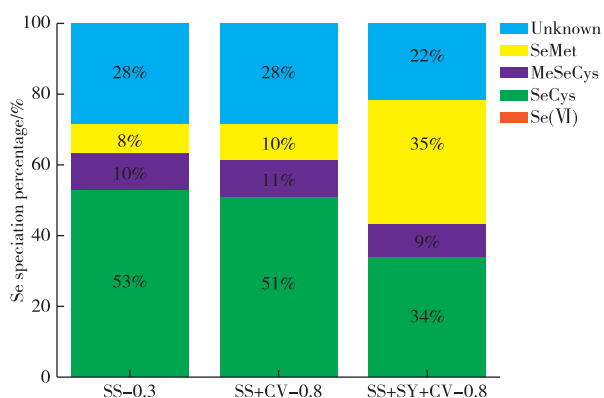


图 2 三组鸡肝脏各硒形态占比

(Unknown 代表未知硒形态之和)

Figure 2 Percentage of each selenium form in the three groups of chicken liver (Unknown represents the sum of unknown selenium forms).

3 结论

采用 ICP-MS 和 HPLC-ICP/MS 技术对经含硒补充剂饲喂的三黄鸡中 11 个组织器官中总硒含量和鸡胸肉、鸡腿肉和鸡肝中硒形态进行分析研究。研究结果显示, 添加不同剂量的亚硒酸钠、富硒酵母和富硒茎叶碎米茅会对鸡肉以及内脏中硒富集情况产生影响; 以富硒酵母为含硒补充剂饲喂的三黄鸡组织中硒含量增加显著。全血中硒含量在一定程度上可以反映组织器官中硒的富集情况, 可通过监测全血中硒含量, 推测适宜的饲喂剂量和饲喂时间, 保证富硒鸡肉中硒含量在适宜的水平。在经硒强化的鸡肉和肝脏中检出了 SeMet、SeCys 和少量 MeSeCys, 其中 SeMet 水平受含硒补充剂种类影响最大, 饲喂富硒酵母组的肌肉中 SeMet 含量显著大于其他饲喂组, 因此以富硒酵母和富硒茎叶碎米茅联合作为含硒补充剂, 既可提高禽肉中硒及 SeMet 的含量, 又可改善肉的品质和肉鸡生产效率, 对发展富硒肉制品生产, 改善缺硒地区居民硒摄入不足的现状, 提高人们的营养健康水平提供有效支持。

参考文献

- [1] KIELISZEK M, BŁAŻEJAK S. Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: a review[J]. *Molecules*, 2016, 21(5): 609. DOI: 10.3390/molecules21050609.
- [2] SHI Z M, PAN P J, FENG Y, et al. Environmental water chemistry and possible correlation with Kaschin-Beck Disease (KBD) in northwestern Sichuan, China[J]. *Environment International*, 2017, 99: 282-292.
- [3] ZHANG Z H, SONG G L. Roles of selenoproteins in brain function and the potential mechanism of selenium in Alzheimer's disease[J]. *Front Neuroscience*, 2021, 15: 646518. DOI: 10.3389/fnins.2021.646518.
- [4] 何妍萍. 硒的生理学功能与畜牧养殖中的应用[J]. *畜牧兽医杂志*, 2023, 42(2): 19-20, 23.
HE Yanping. The physiological function of selenium and its application in animal husbandry[J]. *Journal of animal Science and Veterinary Medical*, 2023, 42(2): 19-20, 23.
- [5] 周晓华, 王铁良, 魏亮亮, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱联用技术测定富硒鸡蛋中的硒形态[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(12): 1451-1458.
ZHAO Xiaohua, WANG Tieliang, WEI Liangliang, et al. Determination of selenium species in Se-enriched eggs by high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(12): 1451-1458.
- [6] 卢鑫, 张琳, 王铁良, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)联用测定富硒小麦中硒代氨基酸[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(12): 1466-1472.
LU Xin, ZHANG Lin, WANG Tieliang, et al. Determination of seleno-amino acids in selenium-rich wheat by HPLC-ICP-MS[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(12): 1466-1472.
- [7] 王铁良, 周晓华, 王炯, 等. 富硒香菇规模化栽培实验及其富硒规律研究[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(5): 505-512.
WANG Tieliang, ZHOU Xiaohua, WANG Tong, et al. Study on large-scale cultivation of selenium-enriched lentinus edodes and its selenium-enriched rules[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(5): 505-512.
- [8] 刘笑笑, 金秋, 张振都, 等. 超声辅助酶法提取-液相色谱-原子荧光光谱法测定富硒黑木耳中硒形态[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(1): 163-170.
LIU Xiaoxiao, JIN Qiu, ZHANG Zhendou, et al. Determination of selenium speciation in se-enriched

- auricula by atomic fluorescence spectroscopy with ultrasonic-assisted enzymatic extraction [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12 (1): 163-170.
- [9] OLIVEIRA A F, LANDERO J, KUBACHKA K, et al. Development and application of a selenium speciation method in cattle feed and beef samples using HPLC-ICP-MS; evaluating the selenium metabolic process in cattle[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2016, 31(4): 1034-1040.
- [10] SHEIHA A M, ABDELNOUR S A, ABD EL-HACK M E, et al. Effects of dietary biological or chemical-synthesized nano-selenium supplementation on growing rabbits exposed to thermal stress[J]. Animals, 2020, 10(3): 430. DOI:10.3390/ani10030430.
- [11] XU X, ZHU Y F, WEI Y, et al. Dietary Se-enriched cardamine ensiensis supplementation alleviates transport-stress-induced body weight loss, anti-oxidative capacity and meat quality impairments of broilers[J]. Animals, 2022, 12(22): 3193. DOI:10.3390/ani12223193.
- [12] 于振, 李建科, 李梦颖, 等. 食品中微量硒测定方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(18): 371-377.
- YU Zhen, LI Jianke, LI Mengying, et al. Research progress in determination of trace selenium in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(18): 371-377.
- [13] BODNAR M, SZCZYGLOWSKA M, KONIECKA P, et al. Methods of selenium supplementation; bioavailability and determination of selenium compounds [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(1): 36-55.
- [14] YUAN L X, ZHU Y Y, LIN Z Q, et al. A novel selenocystine-accumulating plant in selenium-mine drainage area in Enshi, China[J]. PloS one, 2013, 8(6): e65615. DOI:10.1371/journal.pone.0065615.
- [15] BOTH E B, SHAO S X, XIANG J Q, et al. Selenolanthionine is the major water-soluble selenium compound in the selenium tolerant plant Cardamine violifolia[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2018, 1862(11): 2354-2362.
- [16] 叶梅, 虞锐鹏, 丛欣, 等. 富硒堇叶碎米荠中硒化合物的形态分析与鉴定[J]. 分析测试学报, 2022, 41(1): 100-107.
- YE Mei, YU Ruipeng, CONG Xin, et al. Detection and identification of selenium compounds in selenium-enriched Cardamine violifolia [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2022, 41(1): 100-107.
- [17] 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(C). DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125371.
- [18] JUNIPER D T, BERTIN G. Effects of dietary selenium supplementation on tissue selenium distribution and glutathione peroxidase activity in Chinese Ring necked Pheasants[J]. Animal, 2013, 7(4): 562-70.
- [19] 国家食品药品监督管理总局. 食品中硒的测定: GB 5009.93—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- State Administration of Market Supervision. Determination of selenium in food: GB 5009.93—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [20] 中华全国供销合作总社. 富硒农产品 行业标准: GH/T 1135—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives (ACFMC). Selenium-enriched agricultural products industry standard: GH/T 1135—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [21] 李聚才, 施安, 丁伟, 等. 饲料不同含硒水平对滩湖 F₂ 代羊肉及内脏硒富集量的影响[J]. 饲料研究, 2018(2): 10-14.
- LI Jucai, SHI An, DING Wei, et al. Effects of different levels of selenium content in rations on selenium enrichment in meat and offal of F₂ generation sheep from Beach Lake[J]. Feed Research, 2018(2): 10-14.
- [22] 高建忠, 黄克和, 秦顺义. 不同硒源对仔猪组织硒沉积和抗氧化能力的影响[J]. 南京农业大学学报, 2006(1): 85-88.
- GAO Jianzhong, HUANG Kehe, QIN Shunyi. Effects of different selenium sources on tissue selenium retention and anti-oxidatives in weaned piglets [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2006(1): 85-88.
- [23] 袁纛, 郝智慧, 郭东新. 两种来源硒对肉仔鸡体内硒沉积和谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2002(4): 21-22.
- YUAN Ying, HAO Zhihui, GUO Dongxin. Effects of two sources of selenium on selenium deposition and glutathione peroxidase activity in broilers[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2002(4): 21-22.
- [24] 余涵婧. 肉牛不同形态硒及适宜添加水平的研究[D]. 江西: 江西农业大学, 2021.
- YU Hanjing. Study on different forms of selenium and appropriate supplemental levels of beef cattle [D]. Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [25] JUNIPER D T, PHIPPS R H, RAMOS-MORALS E, et al. Effect of dietary supplementation with selenium-enriched yeast or sodium selenite on selenium tissue

- distribution and meat quality in beef cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 86(11):3100-3109.
- [26] JUNIPER D T, PHIPPS R H, BERTIN G. Effect of dietary supplementation with selenium-enriched yeast or sodium selenite on selenium tissue distribution and meat quality in commercial-line turkeys[J]. *Animal*, 2011, 5(11):1751-60.
- [27] WANG D, ZHANG Y, CHEN Q L, et al. Selenium-enriched *Cardamine violifolia* improves growth performance with potential regulation of intestinal health and antioxidant function in weaned pigs[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2022, 9:964766. DOI:10.3389/fvets.2022.964766.
- [28] 张磊, 周占琴, 秦海峰, 等. 紫阳县陕南山羊肌肉组织、血液和毛发硒含量分析研究[J]. *中国草食动物科学*, 2014(增刊 1):234-237.
- ZHANG Lei, ZHOU Zhanqin, QIN Haifeng, et al. Analysis of selenium content in muscle tissue, blood and hair of white goats in Ziyang county[J]. *China Herbivore Science*, 2014(Suppl. 1):234-237.
- [29] MEHDI Y, HORNICK J, ISTASSE L, et al. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions[J]. *Molecules*, 2013, 18(3):3292-3311.
- [30] THIRY C, RUTTENS A, TEMMERMAN D L, et al. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food[J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(4):767-784.
- [31] ROHN I, MARSCHALL T A, KROEPFL N, et al. Selenium species-dependent toxicity, bioavailability and metabolic transformations in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Metallomics*. 2018, 10(6):818-827.
- [32] ZHAO L, SUN L H, HUANG J Q, et al. A novel organic selenium compound exerts unique regulation of selenium speciation, selenogenome, and selenoproteins in broiler chicks[J]. *The Journal of Nutrition: Official Organ of the American Institute of Nutrition*, 2017, 147(5):789-797.