

高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)法测定富硒松辽黑猪肉中硒形态研究

余泽宏¹, 张振都¹, 刘笑笑¹, 戴欣², 王蕾¹, 刘丽宅¹, 张旭^{2*}, 赵云辉^{1*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)/农业农村部农产品及加工品质量检验检测中心(长春)/吉林省肉用草食家畜生产技术国际联合研究中心/农业农村部肉牛遗传育种重点实验室, 长春 130033; 2. 吉林省产品质量监督检验院, 长春 130103)

摘要: 利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)联用技术建立了富硒松辽黑猪肉中硒代胱氨酸(Se-Cys₂)、甲基硒代半胱氨酸(SeMC)、硒代蛋氨酸(SeMet)、亚硒酸[Se(IV)]和硒酸[Se(VI)]5种硒形态的测定方法。添加蛋白酶E 37℃水浴振荡6h提取样品中硒形态, 采用C₁₈反相色谱柱, 10 mmol/L乙酸铵+0.2 mmol/L四丁基氢氧化铵+1%甲醇(pH=5.5)为流动相, 8 min内达到有效分离, 方法线性范围为5~100 ng/mL, 线性相关系数(*r*)均大于0.999, 检出限为1.88、1.58、1.13、1.09、1.05 μg/L, 回收率70.7%~98.4%, 精密度在6%以内。利用建立的方法测定了富硒松辽黑猪肉中硒形态, 其主要为硒代蛋氨酸、硒代胱氨酸和甲基硒代半胱氨酸。

关键词: 松辽黑猪肉; 硒形态; 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法

中图分类号: O657.63; TS251.5 文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)02-00108-07

Determination of Selenium Species in Selenium-Enriched Songliao Black Pork by High-Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

YU Zehong¹, ZHANG Zhendu¹, LIU Xiaoxiao¹, DAI Xin², WANG Lei¹, LIU Lizhai¹, ZHANG Xu^{2*}, ZHAO Yunhui^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China)/Agricultural and Rural Affairs Department of Agricultural Products and Processed Products Quality Inspection and Testing Center (Changchun)/Jilin Provincial International Joint Research Center for Meat Herbivorous Livestock Production Technology/Key Laboratory of Beef Cattle Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033; 2. Jilin Provincial Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Changchun 130103, China)

Abstract: A method for the determination of five selenium species, namely selenocystine(SeCys₂), methylselenocysteine(SeMC), selenomethionine(SeMet), selenite[Se(IV)] and selenate[Se(VI)], in selenium-enriched Songliao black pork was established by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry(HPLC-ICP-MS). Selenium species in the samples were extracted with Pronase E via water bath shaking at 37°C for 6h. Using a C18 reversed-phase chromatographic column, with the mobile phase of 10 mmol/L ammonium acetate + 0.2 mmol/L tetrabutylammonium hydroxide + 1% methanol(pH 5.5), effective separation of the five selenium species was achieved within 8 min. The linear range of the method was 5-100 ng/mL with the linear correlation coefficients(*r*) all greater than 0.999. The detection limits were 1.88 μg/L, 1.58 μg/L, 1.13 μg/L, 1.09 μg/L and 1.05 μg/L, respectively. The recovery rates were in the range of 70.7%-98.4%, and the relative standard deviation(RSD) was less than 6%. This established method was applied to determine the selenium species in

收稿日期: 2025-04-24

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20260206048ZP); 吉林省农业科技创新工程项目(CXGC202303GH, CXGC202401GH)

作者简介: 余泽宏(1989-), 研究实习员, 硕士, 主要从事农业科技管理研究。

通信作者: 张旭, E-mail: zhangxu2011@163.com

赵云辉, E-mail: yunhui0328@126.com

selenium-enriched Songliao black pork, which was found to be mainly composed of SeMet, SeCys₂ and SeMC.

Key words: Songliao black pork; Selenium species; High-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry

硒是人体必需的微量元素,在动植物体内具有多种形态,主要分为无机硒和有机硒,无机硒主要有硒酸盐[Se(VI)]和亚硒酸盐[Se(IV)]等;有机硒主要有硒蛋白、硒核酸、硒多糖等含硒大分子化合物,以及目前研究较多的硒代胱氨酸(Se-Cys₂)、甲基硒代半胱氨酸(SeMC)、硒代蛋氨酸(SeMet)等含硒小分子化合物^[1-2]。研究表明,有机硒具有较高的生物活性和生物利用度,对健康有益^[3-11]。在硒的营养效应受到日益关注的同时,硒形态的分析研究越来越受到重视。松辽黑猪肉具有肉色佳、嫩度好、保水性强、营养价值高和味道鲜美等特点^[12-13],对富硒松辽黑猪肉中硒形态进行分析研究具有重要意义。

硒形态的定性和定量分析的准确性主要取决于样品的基质组成及含有的硒形态,肉中硒形态主要是含硒蛋白类化合物,样品前处理采用蛋白酶水解,反应条件比较温和,可获得较高的提取率和回收率^[14-16]。硒形态分析主要有液相色谱-电感耦合等离子体质谱法(LC-ICP-MS)和液相色谱-原子荧光光谱法(LC-AFS),LC-AFS法样品提取液经色谱分离后与氧化剂进行紫外消解,然后与还原剂反应生成硒化氢进行原子荧光测定,相较 LC-ICP-MS 法繁琐,且 LC-ICP-MS 法灵敏度高、线性范围宽^[17-22]。色谱柱主要使用阴离子交换色谱柱和 C₁₈ 反相色谱柱,而 C₁₈ 色谱柱对硒形态的分离效率更高,稳定性更好^[23-25]。因此,本研究利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)法,以 C₁₈ 反相色谱柱为分析柱,酶解法进行样品提取,对富硒松辽黑猪肉中 SeCys₂、SeMC、SeMet、Se(IV)和 Se(VI)共 5 种硒形态进行分析研究,为富硒强化产品质量与安全提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

供试样品:富硒松辽黑猪肉,取样于吉林省农业科学院畜牧兽医研究所养猪试验场。

标准物质:亚硒酸根离子溶液(GBW10032)、硒酸根离子溶液(GBW10033)、甲基硒代半胱氨酸溶液(GBW10088)、硒代蛋氨酸(GBW10034)、硒代胱氨酸(GBW10087),购于中国计量科学研究院。

主要试剂:乙酸铵(色谱纯,上海麦克林生化

科技股份有限公司),四丁基氢氧化铵(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司),甲醇(色谱纯,赛默飞世尔科技有限公司),链霉菌蛋白酶 E(上海源叶生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Flexar 高效液相色谱-NexION 350X 电感耦合等离子体质谱联用仪(美国 Perkin Elmer 公司);Genie PURIST 超纯水机(上海乐枫生物科技有限公司);KQ-500DB 超声波仪(昆山市超声仪器有限公司);LGJ-10C 真空冷冻干燥机(北京四环起航科技有限公司);TG18 台式高速离心机(长沙安捷仪器仪表有限公司);SHZ-B 水浴振荡器(上海博迅医疗生物仪器股份有限公司)。

1.3 仪器条件

1.3.1 色谱条件

色谱柱 Agilent ZORBAX SB-Aq C₁₈(250 mm×4.6 mm, 5 μm),柱温 25 °C,流动相 10 mmol/L 乙酸铵+0.2 mmol/L 四丁基氢氧化铵+1% 甲醇(pH=5.5),流速 1 mL/min,进样量 10 μL。

1.3.2 质谱条件

RF 入射功率 1 600 W,射频电压 1.80 V, KED 模式,雾化气流速 0.94 L/min,载气流速 3.0 L/min,补偿气流速 3 L/min,采样深度 8.0 mm,泵速 0.3 r/s,检测同位素 ⁷⁸Se。

1.4 前处理方法

先将供试样品(猪背最长肌)切成小碎块,真空冷冻干燥后研磨成均匀粉末。称取粉末试样 0.5 g 于离心管中,加入高纯水 4.5 mL,涡旋 3 min,加 500 μL 蛋白酶 E(200 mg/mL),37 °C 水浴振荡 6 h,然后 10 000 r/min 离心 10 min,上清液过 0.22 μm 滤膜,待测。同时做空白实验。

2 结果与分析

2.1 流动相选择

不同流动相对硒形态的分离影响较大,常用的流动相有磷酸盐、柠檬酸、乙酸铵等,磷酸盐和柠檬酸流动相存在分离效果较差的问题^[26-30],因此,选择乙酸铵作为流动相,同时加入四丁基氢氧化铵和甲醇,改善分离效果和峰型。经过对比不同浓度乙酸铵流动相,15 mmol/L 时 SeMet 和 Se(IV)峰部重叠,不能有效分离;5 mmol/L 时 Se(IV)和 Se(VI)

出峰时间较长。因此,流动相选择 10 mmol/L 乙酸铵+0.2 mmol/L 四丁基氢氧化铵+1% 甲醇(pH=5.5), 8 min 内达到有效分离,保留时间见图 1。

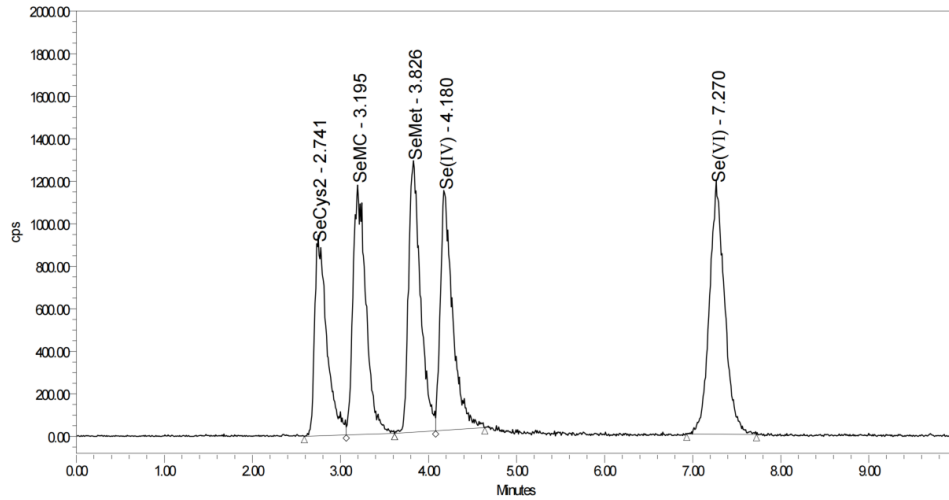


图 1 5 种硒形态的保留时间
Fig.1 Retention time of 5 selenium species

2.2 提取方式的选择

酶解法提取肉中硒形态常采取超声和振荡两种方式,为考察不同方式对提取效果的影响,选择在实际样品中进行基质加标,添加 5 种硒形态浓度均为 50 ng/mL,研究超声(60 min)和水浴振荡(37 °C, 120 min)两种方式的提取效果,以峰面积作

为评价。从表 1 可以看出,两种提取方式对 Se(IV)和 Se(VI)提取效果无差异,主要因为基质样品中未检出 Se(IV)和 Se(VI),均是添加的自由态标液;而水浴振荡方式 SeCys₂、SeMC 和 SeMet 的响应峰面积较高,因此提取方式选择水浴振荡。

表 1 提取方式对 5 种硒形态提取效果的影响

Table 1 Effects of extraction methods on the extraction efficiency of 5 selenium species

提取方式 Extraction method	硒代胱氨酸峰面积 Peak area of SeCys ₂	甲基硒代半胱氨酸峰面积 Peak area of SeMC	硒代蛋氨酸峰面积 Peak area of SeMet	亚硒酸盐峰面积 Peak area of Se(IV)	硒酸盐峰面积 Peak area of Se(VI)
超声	3 505	4 743	4 822	4 857	5 364
水浴振荡	3 743	4 869	5 002	4 826	5 371

2.3 提取时间的选择

为保证样品完全提取,对提取时间进行考察,样品基质中添加浓度为 50 ng/mL 的 5 种硒形态标液,37 °C 水浴分别振荡 2、4、6、8、10、12 h,以峰面

积作为评价。从表 2 可以看出,SeCys₂、SeMC 和 SeMet 提取时间 2 h 和 4 h 时响应峰面积较小,而 6 h 后差异不大;Se(IV)在提取时间 8 h 后峰面积减小,提取时间越长效率越低,因此提取时间选择 6 h。

表 2 提取时间对 5 种硒形态提取效果的影响

Table 2 Effects of extraction time on the extraction efficiency of 5 selenium species

提取时间/h Extraction time/h	硒代胱氨酸峰面积 Peak area of SeCys ₂	甲基硒代半胱氨酸峰面积 Peak area of SeMC	硒代蛋氨酸峰面积 Peak area of SeMet	亚硒酸盐峰面积 Peak area of Se(IV)	硒酸盐峰面积 Peak area of Se(VI)
2	3 743	4 869	5 002	4 826	5 371
4	4 115	5 082	5 573	4 835	5 287
6	4 243	5 269	6 502	4 796	5 331
8	4 204	5 217	6 490	4 651	5 384
10	4 250	5 176	6 539	4 430	5 404
12	4 238	5 185	6 487	4 209	5 392

2.4 蛋白酶用量的优化

蛋白酶的用量影响样品的提取效果,样品基质中添加浓度为 50 ng/mL 的 5 种硒形态标液,分别加入 100、250、500、750 μL 蛋白酶 E,考察对 5 种硒形态的提取效果,以峰面积作为评价,从表 3

可以看出,随着蛋白酶 E 用量的增加,Se(IV)和 Se(VI)的响应峰面积变化不大,SeCys₂、SeMC 和 SeMet 的响应峰面积逐渐增大,但当加入 500 μL 和 750 μL 的蛋白酶 E 时 5 种硒形态的峰面积变化不大,因此蛋白酶 E 加入量选择 500 μL 。

表 3 蛋白酶加入量对 5 种硒形态提取效果的影响

Table 3 Effects of proteinase addition on the extraction efficiency of 5 selenium species

蛋白酶加入量/ μL Amount of protease added	硒代胱氨酸峰面积 Peak area of SeCys ₂	甲基硒代半胱氨酸峰面积 Peak area of SeMC	硒代蛋氨酸峰面积 Peak area of SeMet	亚硒酸盐峰面积 Peak area of Se(IV)	硒酸盐峰面积 Peak area of Se(VI)
100	3 557	4 776	5 529	4 708	5 352
250	3 898	4 962	5 994	4 765	5 278
500	4 243	5 269	6 502	4 796	5 331
750	4 251	5 190	6 523	4 771	5 409

2.5 方法线性和检出限

采用外标定量法,分别配制浓度为 5、10、20、40、100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的混合标准溶液,建立校准曲线,5 种硒形态的线性相关系数良好,均大于 0.999。以信噪比 S/N=3 时对应的浓度计算检出限,SeCys₂、

SeMC、SeMet、Se(IV)和 Se(VI)的检出限分别为 1.88、1.58、1.13、1.09、1.05 $\mu\text{g}/\text{L}$,结果见表 4。

2.6 方法回收率和精密度

采用基质加标方法考察回收率和精密度,添加低浓度 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 和高浓度 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ 两个浓度水平,

表 4 5 种硒形态的线性关系和检出限

Table 4 Linear relationships and detection limits of 5 selenium species

硒形态 Selenium species	线性方程 Linear equation	相关系数 r Correlation coefficient(r)	检出限/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Detection limits
硒代胱氨酸	$y=80.506x-51.739$	0.999 2	1.88
甲基硒代半胱氨酸	$y=101.360x+31.497$	0.999 4	1.58
硒代蛋氨酸	$y=108.310x-21.949$	0.999 6	1.13
亚硒酸盐	$y=90.812x+233.160$	0.999 7	1.09
硒酸盐	$y=102.850x+315.900$	0.999 1	1.05

表 5 回收率和精密度结果

Table 5 Recovery rate and precision results

硒形态 Selenium species	加入浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Added concentration	回收率/% Recovery rate	RSD/%
硒代胱氨酸(SeCys ₂)	5	73.4、75.2、70.7、74.1、78.4、76.5	3.55
	50	85.2、90.9、89.1、89.7、92.6、91.0	2.82
甲基硒代半胱氨酸(SeMC)	5	85.8、80.3、79.6、81.5、75.7、72.2	5.96
	50	98.4、89.1、92.2、90.5、93.7、94.7	3.55
硒代蛋氨酸(SeMet)	5	88.6、82.0、81.1、85.8、82.7、79.4	4.03
	50	93.3、95.2、96.3、90.7、88.4、90.2	3.34
亚硒酸盐[Se(IV)]	5	71.5、74.7、78.3、73.8、83.6、77.5	5.55
	50	83.7、87.5、89.4、88.7、84.8、82.1	3.41
硒酸盐[Se(VI)]	5	83.7、87.9、78.3、80.5、81.6、89.9	5.34
	50	94.9、88.2、89.7、90.7、88.6、83.1	4.30

进行6次平行测定,分别计算回收率及相对标准偏差(RSD),5种硒形态的加标回收率在70.7%~98.4%,RSD值小于6%,回收率和精密度良好,结果见表5。

2.7 样品分析

利用所建立的方法对富硒松辽黑猪肉中硒形

态进行7次平行测定,结果见表6,富硒松辽黑猪肉中Se(IV)和Se(VI)未检出,SeCys₂、SeMC、SeMet含量分别为0.053 8、0.026 5、0.122 0 mg/kg,占比分别为26.7%、13.2%、60.1%,推测经富硒强化后,硒在松辽黑猪体内富集,转化为不同形态的有机硒,主要为硒代蛋氨酸。

表6 富硒猪肉中5种硒形态含量

Table 6 Contents of 5 selenium species in selenium-enriched pork

含量 Content	硒代胱氨酸 SeCys ₂	甲基硒代半胱氨酸 SeMC	硒代蛋氨酸 SeMet	亚硒酸盐 Se(IV)	硒酸盐 Se(VI)
富硒猪肉/mg·kg ⁻¹	0.051 3	0.025 3	0.122	ND	ND
	0.051 5	0.026 5	0.128	ND	ND
	0.054 5	0.028 1	0.127	ND	ND
	0.057 0	0.023 8	0.115	ND	ND
	0.050 0	0.025 9	0.114	ND	ND
	0.056 8	0.028 4	0.120	ND	ND
	0.055 7	0.027 2	0.118	ND	ND
平均值/mg·kg ⁻¹	0.053 8	0.026 5	0.121	ND	ND
RSD/%	5.33	6.11	4.54		

注:ND为未检出。

Note: ND means not detected.

3 结 论

本实验经过提取条件的选择和优化,建立了高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术测定富硒松辽黑猪肉中硒代胱氨酸、甲基硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸、亚硒酸和硒酸的方法,添加蛋白酶E 500 μL,37℃水浴振荡6h,猪肉中硒代胱氨酸、甲基硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸、亚硒酸和硒酸的提取效果最优;10 mmol/L乙酸铵+0.2 mmol/L四丁基氢氧化铵+1%甲醇(pH=5.5)作为流动相,8 min内达到有效分离,检出限为1.88、1.58、1.13、1.09、1.05 μg/L,回收率在70.7%~98.4%,精密度小于6%,该方法可为富硒产业的高质量发展提供有效支撑。利用建立的方法测定富硒松辽黑猪肉中硒形态,主要为硒代蛋氨酸、硒代胱氨酸和甲基硒代半胱氨酸,其占比分别为60.1%、26.7%、13.2%。

参考文献:

- [1] 魏宁果,何冲,范芳芳.食品中硒形态的研究进展[J].农产品加工,2018(11):71-76.
WEI N G, HE C, FAN F F. Research progress of selenium speciation in foods[J]. Agricultural Products Processing, 2018(11): 71-76. (in Chinese)
- [2] 王志宏,赵志刚,韩成云.植物中硒的形态分析方法研究进

展[J].宜春学院学报,2020,42(9):90-96.

WANG Z H, ZHAO Z G, HAN C Y. Advances on analysis methods for selenium in plants[J]. Journal of Yichun University, 2020, 42(9): 90-96. (in Chinese)

- [3] 耿雅雯.富硒食品中硒形态分析及其主要形态体外生物利用率研究[D].武汉:武汉轻工大学,2024.
- [4] 余侃,肖秋水,黄思思,等.生物有机硒对不同水稻品种主要性状、重金属含量及硒吸收的影响[J].南方农业学报,2021,46(12):8-14.
YU K, XIAO Q S, HUANG S S, et al. Effects of bioorganic selenium on main characters, heavy metal content and selenium absorption of different rice varieties[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 46(12): 8-14. (in Chinese)
- [5] 朱帅,沈亚婷,贾静,等.液相色谱-高分辨质谱法在中国东北地区农作物有机硒形态分析中的应用[J].岩矿测试,2021,40(2):262-272.
ZHU S, SHEN Y T, JIA J, et al. Determination of organic selenium compounds in crops by liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field Orbitrap high-resolution mass spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(2): 262-272. (in Chinese)
- [6] 何涛,董依博,王长平,等.有机硒与无机硒对蛋鸡生产性能及蛋硒含量的Meta分析[J].动物营养学报,2022,34(4):2654-2666.
HE T, DONG Y B, WANG C P, et al. Meta-analysis of organic selenium and inorganic selenium on performance of laying hens and selenium content in eggs[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(4): 2654-2666. (in Chinese)
- [7] 李浩男,谢晓宇,王立平.硒营养与人体健康[J].食品工业,

- 2022, 43(3): 325-330.
- LI H N, XIE X Y, WANG L P. Selenium nutrition and human health[J]. The Food Industry, 2022, 43(3): 325-330. (in Chinese)
- [8] 雷红量,丛文字,蔡照磊,等.植物根系与叶片吸收硒的关键过程及影响因素[J].植物营养与肥料学报,2021,27(8): 1456-1467.
- LEI H L, CONG W Y, CAI Z L, et al. Main process and factors affecting selenium absorption by plant roots and leaves[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(8): 1456-1467. (in Chinese)
- [9] 李瑜,马俊,高海娜,等.硒在莖叶碎米芥中的赋存形态及分布规律[J].中国食物与营养,2020,26(7): 26-28.
- LI Y, MA J, GAO H N, et al. The distribution and combined forms of element selenium in cardamine violifolia[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(7): 26-28. (in Chinese)
- [10] 赵谋明,郑泽洋,刘小玲.食品中硒的总量及化学形态分析研究进展[J].南方农业学报,2019,50(12): 2787-2796.
- ZHAO M M, ZHENG Z Y, LIU X L. Total content determination and chemical speciation analysis of selenium in food: a review [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(12): 2787-2796. (in Chinese)
- [11] 杜小平,刘乔斐,夏曾润,等.叶面施硒对黑豆硒吸收转运特征及籽粒硒形态的影响[J].核农学报,2022,36(11): 2266-2274.
- DU X P, LIU Q F, XIA Z R, et al. Effects of selenium foliar spray on selenium uptake and translocation characteristics and seed selenium speciation in black beans[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2266-2274. (in Chinese)
- [12] 刘洪亮,鲍菊,刘庆雨,等.发酵中草药副产物对松辽黑猪屠宰性能和肉质及经济效益的影响[J].饲料工业,2023,44(22): 47-53.
- LIU H L, BAO J, LIU Q Y, et al. Effects of fermented chinese herbal by-products on slaughter performance, meat quality and economic benefits of Songliao black pig[J]. Feed Industry, 2023, 44(22): 47-53. (in Chinese)
- [13] 李娜,张琪,刘洪亮,等.松辽黑猪与引入猪种肉质性状的综合对比分析[J].黑龙江畜牧兽医,2022(16): 55-59, 65.
- LI N, ZHANG Q, LIU H L, et al. Comprehensive comparative analysis of meat quality traits between Songliao black pigs and introduced pig breeds[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary, 2022(16): 55-59, 65. (in Chinese)
- [14] 何川川,杨忠俊,李菁.高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用法分析新疆巴旦木中硒形态[J].食品安全质量检测学报,2021,12(23): 9050-9055.
- HE C C, YANG Z J, LI J. Analysis of selenium species in Xinjiang *Amygdalus communis* L. by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(23): 9050-9055. (in Chinese)
- [15] 李洁,祝振洲,程水源,等.硒形态检测方法在富硒食品标准中的应用与进展[J].食品科技,2021,46(12): 8-14.
- LI J, ZHU Z Z, CHENG S Y, et al. Recent insights on application of selenium forms detection in selenium enriched food standards[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(12): 8-14. (in Chinese)
- [16] 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 X X, JIN Q, ZHANG Z D, et al. Determination of selenium speciation in Se-enriched auricularia auricula by atomic fluorescence spectroscopy with ultrasonic-assisted enzymatic extraction [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12 (1): 163-170. (in Chinese)
- [17] 万梓琳,许春雪,安子怡,等.生物样品中硒形态及分析测试技术的研究进展[J].中国无机分析化学,2025,15(8): 1156-1169.
- WAN Z L, XU C X, AN Z Y, et al. A review of selenium forms and analysis techniques in biological samples[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(8): 1156-1169. (in Chinese)
- [18] 刘文政,周贻兵,林野,等.高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术测定富硒鸡蛋中5种硒形态[J].微量元素与健康研究,2022,39(4): 49-51.
- LIU W Z, ZHOU Y B, LIN Y, et al. Determination of five selenium species in selenium-enriched eggs by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2022, 39(4): 49-51. (in Chinese)
- [19] 刘晓杰,杨霄,郭玉斐,等.富硒农产品中有机硒形态分析研究进展[J].现代食品,2024,30(13): 75-77, 87.
- LIU X J, YANG X, GUO Y F, et al. Research progress on the analysis of organic selenium speciation in selenium-enriched agricultural products[J]. Modern Food, 2024, 30(13): 75-77, 87. (in Chinese)
- [20] 张蜀,张珂,高舸.高效液相色谱-电感耦合等离子体串联质谱法测定水样中6种硒形态[J].化学分析计量,2021,30(5): 17-21.
- ZHANG S, ZHANG K, GAO G, et al. Determination of six selenium speciations in water samples by high performance liquid chromatography inductively coupled plasma tandem mass spectrometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2021, 30(5): 17-21. (in Chinese)
- [21] 孟莉,许亚丽,夏曾润,等.高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定谷类食品中的4种硒形态[J].分析科学学报,2021,37(6): 843-846.
- MENG L, XU Y L, XIA Z R, et al. Determination of selenium species in cereals by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2021, 37(6): 843-846. (in Chinese)
- [22] 李乾玉,刘丽萍,陈绍占,等.应用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术分析研究畜肉中硒形态[J].中国食品卫生杂志,2024,36(3): 284-291.
- LI Q Y, LIU L P, CHEN S Z, et al. Determination of selenium species in livestock meat using HPLC-ICP/MS[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(3): 284-291. (in Chinese)
- [23] 王铁良,周晓华,刘进玺,等.高效液相色谱-氢化物发生-原子荧光光谱联用技术测定高脂作物中的硒形态[J].中国粮油学报,2022,37(10): 264-270.
- WANG T L, ZHOU X H, LIU J X, et al. Determination of selenium species in Se-enriched high-fat crops by high perfor-

- mance liquid chromatography-hydrate generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 264-270. (in Chinese)
- [24] 王贤波, 聂晶, 翁丽萍, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定大豆中的6种硒形态[J]. 农产品质量与安全, 2023(3): 36-41.
- WANG X B, NIE J, WENG L P, et al. Determination of six selenium species in soybean by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2023(3): 36-41. (in Chinese)
- [25] 胡银川, 谭欣, 钟洋, 等. 食品中硒形态的HPLC-ICP/MS测定方法[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 293-296.
- HU Y C, TAN X, ZHONG Y, et al. The determination method of selenium speciation in food by HPLC-ICP/MS[J]. The Food Industry, 2023, 44(9): 293-296. (in Chinese)
- [26] 曹赵云, 李洪艳, 柴爽爽, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用测定稻米中5种硒形态[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 20-27.
- CAO Z Y, LI H Y, CHAI S S, et al. Determination of five selenium species in rice by high performance liquid chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 20-27. (in Chinese)
- [27] 邵鹏威, 路国慧, 郑宇, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱测定大米粉中的硒形态[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1434-1441.
- SHAO P W, LU G H, ZHENG Y, et al. Determination of selenium species in rice flour using high performance liquid chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(5): 1434-1441. (in Chinese)
- [28] 林樾, 陈尚卫, 虞锐鹏, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定富硒碎米芥中的硒形态[J]. 分析科学学报, 2021, 37(5): 637-642.
- LIN Y, CHEN S W, YU R P, et al. Determination of selenium speciations in selenium-enriched cardamine violifolia by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2021, 37(5): 637-642. (in Chinese)
- [29] 李爱民, 范俊楠, 贺小敏, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱法测定土壤中4种有效硒形态[J]. 分析科学学报, 2021, 37(3): 403-407.
- LI A M, FAN J N, HE X M, et al. Determination of four available selenium species in soils by high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2021, 37(3): 403-407. (in Chinese)
- [30] 魏益华, 黄青青, 张金艳, 等. 离子对反相液相色谱-原子荧光光谱法测定畜禽肉中5种硒形态含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(12): 3822-3827.
- WEI Y H, HUANG Q Q, ZHANG J Y, et al. Determination of 5 kinds of selenium species in livestock and poultry meat with ion pair reversed phase liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(12): 3822-3827. (in Chinese)
- (责任编辑: 朴红梅)
-
- (上接第107页) Systematics and Ecology, 2017, 71: 137-146.
- [20] DE LEY P, BLAXTER M L. A new system for Nematoda: combining morphological characters with molecular trees, and translating clades into ranks and taxa[C]//Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology. Tenerife: Brill, 2004: 633-653.
- [21] CLARY D O, WOLSTENHOLME D R. The mitochondrial DNA molecule of *Drosophila yakuba*: nucleotide sequence, gene organization, and genetic code[J]. Journal of Molecular Evolution, 1985, 22(3): 252-271.
- [22] CHEN C, BAI D, ZHANG Z, et al. Describe the morphology and mitochondrial genome of *Mecidea indica* Dallas, 1851 (Hemiptera: Pentatomidae), with its phylogenetic position[J]. PLoS ONE, 2024, 19(3): e0304524.
- [23] SANTOS M P D, MOTA A P Z, TOGAWA R C, et al. The complete mitochondrial genome of *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) and phylogenetic relationships within the Yponomeutoidea superfamily[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 4567.
- [24] NARDI F, CARAPELLI A, DALLAI R, et al. The mitochondrial genome of the olive fly *Bactrocera oleae*: two haplotypes from distant geographical locations[J]. Insect Molecular Biology, 2003, 12(6): 557-568.
- [25] 钟健, 刘增虎, 杨伟克, 等. 琥珀蚕线粒体全基因组测序及序列分析[J]. 昆虫学报, 2017, 60(8): 936-949.
- ZHONG J, LIU Z H, YANG W K, et al. Sequencing and analysis of the complete mitochondrial genome of the amber silkworm, *Antheraea assamensis* (Lepidoptera: Saturniidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2017, 60(8): 936-949. (in Chinese)
- [26] 夏靖, 胡静, 朱国萍, 等. 大卫绢蝶线粒体基因组全序列测定和分析[J]. 昆虫学报, 2011, 54(5): 555-565.
- XIA J, HU J, ZHU G P, et al. Determination and analysis of the complete mitochondrial genome of *Davidius lunatus* (Odonata: Davidiidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2011, 54(5): 555-565. (in Chinese)
- [27] 邓黎, 王刚, 卢聪聪, 等. 高桥仁蚱线粒体全基因组测序与分析[J]. 昆虫学报, 2022, 65(4): 451-459.
- DENG J, WANG G, LU C C, et al. Sequencing and analysis of the complete mitochondrial genome of *Nipponaclerda biwakoensis* (Hemiptera: Acleridae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2022, 65(4): 451-459. (in Chinese)
- [28] 赵亚男, 李朝品. 甜果螨全线粒体基因组测序与分析[J]. 昆虫学报, 2020, 63(3): 354-364.
- ZHAO Y N, LI C P. Sequencing and analysis of the complete mitochondrial genome of the dried fruit mite, *Carpoglyphus lactis* (Acari: Carpoglyphidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2020, 63(3): 354-364. (in Chinese)
- (责任编辑: 朴红梅)