李政璇, 苏文, 冉业成, 等. 食品中硒含量检测方法及功能活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 503−511. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060117

LI Zhengxuan, SU Wen, RAN Yecheng, et al. Research Progress on Detection Methods and Functions of Selenium in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 503−511. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060117

· 专题综述 ·

食品中硒含量检测方法及功能活性研究进展

李政璇[1,2,3,4], 苏　文[1,2,3,4,*], 冉业成[1,2,3,4], 周金凤[1], 金文刚[1,2,3,4], 代惠萍[1,2,3,4], 马　杭[1]

（1.陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723001;
2.陕西理工大学秦巴生物资源与生态环境省部共建培育国家重点实验室, 陕西汉中 723001;
3.陕西省资源生物重点实验室, 陕西汉中 723001;
4.陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心, 陕西汉中 723001）

摘　要: 硒摄入水平在维持机体稳态中具有决定性作用，其剂量依赖性特征影响硒蛋白合成效率及生物学功能表达，硒含量检测对其剂量的确定至关重要。本文综述了光谱法、电化学法、色谱法及毛细管区带电泳法等硒检测方法；同时，深入分析了硒作为谷胱甘肽过氧化物酶的核心成分直接清除自由基、通过硒蛋白阻断致癌信号通路、增强 T 细胞活性等机制发挥抗氧化、抗癌及免疫调节作用。本文分析了各检测方法的优缺点，例如，紫外分光光度法具有高灵敏度和较低的检测限，适用于常规食品样品检测；傅里叶变换红外光谱法则因其无损检测和多形态区分能力而具有优势，但其灵敏度和定量精度受到样品复杂度和前处理的影响。电化学法在批量检测方面具有成本低和操作简单的特点，但抗干扰性较弱；色谱法虽然提供了高精度的硒形态分离和定量，但仪器设备和操作要求较高。本文旨在为建立高效精准的硒含量检测体系提供理论依据和技术参考，同时为硒的深入研究和富硒食品开发奠定基础。未来的研究应聚焦于提高检测方法的自动化水平和灵敏度，解决复杂样品中的基体干扰问题，并推动新型便携式检测技术的发展。此外，随着硒在功能性食品中的应用日益增多，发展更加精准的硒检测体系及强化硒的生物效应研究将成为未来的重点。

关键词: 硒含量, 检测方法, 傅里叶变换红外光谱法, 功能活性, 抗氧化活性
中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0503−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060117　　本文网刊:

Research Progress on Detection Methods and Functions of Selenium in Food

LI Zhengxuan[1,2,3,4], SU Wen[1,2,3,4,*], RAN Yecheng[1,2,3,4], ZHOU Jinfeng[1], JIN Wengang[1,2,3,4], DAI Huiping[1,2,3,4], MA Hang[1]

（1.College of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;
2.Qinba State Key Laboratory of Biological Resources and Ecological Environment of Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;
3.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Resources and Biology, Hanzhong 723001, China;
4.Collaborative Innovation Center for Comprehensive Development of Biological Resources in Qinba Mountain Area, Hanzhong 723001, China）

Abstract: Selenium intake is crucial for maintaining body homeostasis, and its dose-dependent characteristics influence the efficiency of selenoprotein synthesis and expression of biological functions. Consequently, precise selenium detection is vital for determining the optimal dosage. This review covers various selenium detection methods, including spectroscopy,

收稿日期: 2025−06−11
基金项目: 国家自然科学基金（31801563）; 陕西理工大学“市校共建”科研专项（SXZC202308）; 陕西理工大学人才启动专项项目（SLGRC202405, SLGRCQD011）。
作者简介: 李政璇（2002−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 515970558@qq.com。
*** 通信作者:** 苏文（1990−）, 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1026262363@qq.com。

electrochemistry, chromatography, and capillary zone electrophoresis. This review provides an in-depth analysis of the role of selenium as a key component of glutathione peroxidase, which directly scavenges free radicals, blocks carcinogenic signaling pathways through selenoproteins, and enhances T-cell activity to exert antioxidant, anticancer, and immunomodulatory effects. The strengths and limitations of various detection methods have been carefully evaluated. For instance, ultraviolet-visible spectrophotometry is known for its high sensitivity and low detection limit, making it ideal for routine analysis of food samples. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) is particularly beneficial due to its non-destructive nature and its ability to distinguish between different forms of selenium. However, its sensitivity and accuracy in quantification can be influenced by sample complexity and preprocessing steps. Electrochemical methods are cost-effective and straightforward to use, making them suitable for high-throughput analysis, though they are more susceptible to interference. Chromatography, while offering high precision in selenium speciation and quantification, requires sophisticated equipment and more complex operational procedures. This review aims to provide a theoretical foundation and technical reference for developing an efficient and accurate selenium detection system and to promote further research and development of selenium-enriched foods. Future research should focus on improving the automation and sensitivity of detection methods, overcoming matrix interference in complex samples, and advancing the development of novel portable detection technologies. Furthermore, as the use of selenium in functional foods continues to rise, developing more precise selenium detection systems and deepening research into its biological effects will be crucial areas of focus.

Key words: selenium content; detection methods; Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR); functional activity; antioxidant activity

硒作为人体必需的微量元素，具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节及抗炎症等多元化生理功能[1]。根据现有研究，免疫能力低下、癌症、克山病都已被证实与硒元素缺乏存在关联[2]。硒的生物学功能与其含量密切相关，适当的硒摄入有助于维持机体稳态，而过量或不足的硒摄入均可能引发一系列健康问题。硒在食物中的存在形式主要包括无机硒和有机硒，其中有机硒在人体内的生物利用度较高，因此被认为是膳食补充硒的有效形式[3]。通常情况下，人所能接受有效和有害硒含量的范围有限，人体的推荐适宜膳食摄入量为 40 μg/d，摄入量超过 800 μg/d 可能引发毒性反应[4]。当摄入硒的量超出安全剂量范围，硒即会从发挥必需生理功能的微量元素转变为具有神经毒性的物质，其剂量依赖性决定了暴露均可能带来显著的健康风险。因此构建痕量级检测分析方法对硒中毒防控体系具有双维度管控价值：既能规避硒缺乏引发的健康风险，又能精准控制硒含量以防止中毒事件发生。

近年来，硒的检测方法和其功能的研究得到了广泛关注[5]。关于食品中硒的检测方法，已有多种技术被提出并得到应用，如光谱法、电化学法、色谱法和毛细管区带电泳法等。随着对食品安全和营养强化需求的增加，硒的精准检测技术不断更新换代，其中紫外-可见分光光度法、原子荧光光谱法以及高效液相色谱-质谱联用技术等方法凭借其高灵敏度和高准确性，成为了主要的检测手段。此外，硒的多重功能研究也逐渐成为重点，硒的抗氧化、抗癌、免疫调节等生物活性机制得到了深入探讨，尤其是在通过纳米技术增强硒的生物效应方面，研究取得了显著进展[6]。

目前国内外建立了多种硒检测方法，以及对硒功能进行研究，但对于硒的检测方法和功能系统性综述鲜见报道，因此本文综述了硒含量检测方法原理以及硒的功能及其作用机制，旨在为开发新检测方法以及硒在食品中的应用奠定基础。

1 硒的检测方法

1.1 光谱法

1.1.1 紫外分光光度法 紫外分光光度法（Ultraviolet-Visible Spectrophotometry, UV）的理论基础在于四价硒离子在酸碱介质中可与邻苯二胺、3,3'-二氨基联苯胺等显色配体发生特异性配位反应，生成具有特征吸收波长的显色配合物。可根据颜色深浅程度判定样品中硒含量，使用紫外分光光度计进行检测[7]。Shishov 等[8] 首次建立了疏水低共熔溶剂液相微萃取-UV 测定鸡蛋和鸡组织中硒的方法，测得线性范围为 7~150 μg/kg（0.14~3 μg/L），检测限和定量限分别为 2 μg/kg（0.04 μg/L）和 7 μg/kg（0.14 μg/L）。该法精准度有待提高，高澜文等[9] 在分析海南澄迈硒富集甘薯时，创新性地将邻苯二胺作为双功能试剂，结合 UV-Vis 分光光度法构建了硒元素的精准检测体系。实验表明特征吸收峰位于 337 nm 处时，硒系列标准品在 0~1.0 μg/mL 梯度浓度范围内呈现理想线性响应，其数学关系式表达为 A=0.3225C+0.0383（γ=0.9999），决定系数 R^2=0.9998，验证该技术具有高准确度定量分析性能。前两者对于硒含量检测主要应用于动物、植物等，Mörschbächer 等[10] 建立了一种分光光度法用于测定乳酸菌生物质中的硒含量，线性范围 0.025~0.250 mg/L，线性方程斜率为 1.0678，截距 0.0197 mg/L，R^2=0.9991；方法验证显示回收率>96%，RSD<3%，实际样品的硒含量为 0.01~20 mg/g。综上，紫外分光光度法因其显色反应特异性强、重复性好、可满足常规含量检测需求，已在畜禽产品（鸡蛋、鸡肉）、农产品（富硒甘薯）及发酵食品（乳酸菌制品）等食品基质中得到广泛应用。随着检测方法在萃取方式、配体选择和信号放大等方面不

断优化，UV-Vis 分光光度法在食品中硒检测中的应用前景更加广阔。

1.1.2　傅里叶变换红外光谱法　傅里叶红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectroscopy，FTIR）分析技术是依据分子内部原子间相对运动及能级跃迁机制建立的结构表征方法。通过检测样品受红外辐射时化学键对特定频率光的特征吸收（基频振动），利用这些具有强特征性的吸收峰实现化合物的鉴别和定量测定。不同种类化合物具有不同的分子结构和振动模式，因此它们在红外光谱图上呈现出不同的吸收峰，这些特征光谱信号能够支撑目标物质的结构确证与含量测定[11]。Li 等[12] 基于 FTIR 定量测定富硒开菲尔粒中总硒和有机硒，预测集总硒的相关系数和相对预测偏差分别为 0.97 和 4.36，有机硒则对应 0.95和 6.44。相关系数较低，有学者则进行优化，Chen等[13] 采用 ATR-FTIR 法快速测定米粉中硒代甲硫氨酸，经一阶导数预处理后建立的留一法模型性能最优：校正集 R_C^2>0.997（RMSEC=1.76~1.9，因子数 6），预测集 R_P^2=0.9868（RMSEP=3.27，RPD=8.61），预测值偏差≤20% 和≤10% 的样本占比分别为 92.91% 和 82.27%，由此说明该法环保可靠且快速。

FTIR 技术具有许多优点，包括快速、无损的分析能力，适用于液体、固体和气体样品。它能够提供高灵敏度和分辨率的分子结构信息，广泛应用于化学成分的定性和定量分析，尤其在分子骨架和官能团的表征上具有显著优势。然而，FTIR 也有一些局限性。例如，它对含水样品和挥发性物质的测量存在干扰，且在复杂基质或多组分体系中，定量分析的准确性可能受到影响。尤其是在样品复杂或干扰物质较多时，FTIR 需要与其他分析方法联用才能获得更准确的结果。未来，FTIR 在数据处理和定量分析方面仍需优化，特别是如何提高分析速度、减少干扰、优化模型效能，及其在复杂样品中的应用范围。这些问题的解决将是 FTIR 技术进一步发展的关键。

1.1.3　原子荧光光谱法　原子荧光光谱法（Atomic Fluorescence Spectrometry，AFS）检测原理是在特定波长光辐射激发下，蒸气相基态原子捕获入射光量子能量引发电子能级转换生成亚稳态激发态，经由去激发过程（含光致发光与热弛豫能量耗散）回归低能级态时发射特征谱线荧光，依据荧光辐射通量与待测组分浓度的正比例函数关系完成超痕量物质的浓度反演[14]。Wang 等[15] 建立了富硒高脂作物中硒形态的优化提取方法。样品采用高效液相色谱-氢化物发生-AFS 测定，外标法定量。该方法能在 10 min 内实现 5 种硒形态的基线分离，线性良好。各形态硒的线性相关系数 r 均大于 0.9992。方法的检出限为 1.0~3.0 μg/L，回收率为 89.8%~100.6%。该法检测速度相对较快，但精密度有待进一步提高。薛炜骏[16] 使用原子荧光光度法检测水中的硒，检测限为 0.23 μg/L，精密度为 1.25%，加标回收率在 100.9%~103.4% 之间。样品前处理影响检测准确性及精密度，上述方法多采用干法消解，尚翠等[17] 采用湿法消解-AFS 测定农产品硒含量，标准物质测定值均符合参考范围，方法检出限为 0.057 μg/L，RSD 为 0.89%~2.7%，加标回收率 93.7%~101%，研究对比发现样品前处理也影响检测方法精度，操江飞等[18] 系统评估三种前处理技术对富硒基质（稻米及茶叶）的适用性，其中密闭微波消解体系标准物添加回收效率达 95.0%~100.5%，检测重复性变异系数稳定控制于 3.0% 阈值内，相较传统热板消解与石墨炉消解法呈现显著方法学优势。

总体来看，AFS 以其高灵敏度、良好线性和快速检测能力，已成为食品中硒检测的重要手段。在植物性食品（如稻米、茶叶、甘薯等）中，AFS 可实现硒含量及其形态的准确测定，尤其在不同前处理方法对结果精度的影响上已有系统研究。与其他传统方法相比，湿法消解与密闭微波消解结合 AFS 更能保证检测结果的准确性与稳定性。虽然部分研究仍存在精密度不足的问题，但通过优化样品前处理和检测体系，AFS 在食品硒检测中的应用前景十分广阔。

1.1.4　其他检测方法　除原子荧光光谱法和紫外分光光度法外，研究者还探索了其他光谱学技术在食品中硒检测的应用。分子荧光光谱法（Molecular Fluorescence Spectrometry，MFS）基于待测物在特定波长光激发后产生紫外-可见光区特征荧光辐射，通过解析荧光谱图的信号特征实现定性定量分析。罗建民等[19] 利用 MFS 对不同地区大米中的硒含量进行测定，方法检出限低至 6.5×10^{-4} μg/mL，相对标准偏差为 1.9%~2.8%，加标回收率在 87.8%~107%，表明该法具有较高灵敏度和可靠性。与此同时，X 射线荧光光谱法（X-ray Fluorescence Spectroscopy，XRF）则通过高能 X 射线激发样品原子内层电子跃迁释放特征荧光信号，从而实现元素的定性与定量。李迎春等[20] 将压片制样-波谱能谱联用 XRF 技术应用于富硒土壤中硒的测定，检测限为 0.45~0.91 μg/g。卢丽娟等[21] 进一步将 XRF 应用于食品中硒含量的分析，优化条件为 0.2 g 样品经 PP 膜压片检测 90 s，定量下限为 0.01 mg/kg，仪器 RSD 控制在 5% 以内，与传统粉碎法结果差异处于-10.37%~8.05% 之间。通过解析光谱的谱图特性和信号强度，实现物质的组成判定与含量测定。

结合以上研究，MFS 与 XRF 作为补充检测技术，在食品中硒含量分析中各具优势（表 1）：MFS 以其超低检出限和良好精密度，适合对大米等粮食作物中硒的高灵敏检测；XRF 具有前处理简便、检测快速和较好重复性的特点，适合在土壤与食品样品中进行硒的常规筛查。两种方法的应用进一步丰富了食品中硒检测的技术手段，为不同检测需求提供了多样化选择。

表 1 硒检测光谱法的优点和缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of selenium detection spectrometry

光谱法	优点	缺点	适用食品原料
UV	分析速度快; 操作简单, 无需复杂前处理; 无损检测, 适合在线分析	无法直接用单一吸收峰定量, 需化学计量学辅助; 灵敏度较低	富硒甘薯、谷物、蔬菜等农产品
FTIR	快速无损分析; 多形态区分能力	对无机硒灵敏度不足; 定量精度受限; 样品制备要求严苛	粮食、坚果、乳制品及复合食品
AFS	操作简单; 稳定性强; 适用于水中微量硒检测(检测限低)	前处理复杂(需样品消解); 基体干扰显著(需掩蔽剂或分离步骤)	稻米、茶叶、富硒蔬菜及饮用水
MFS	准确度高; 灵敏度高; 可区分部分硒形态	对前处理条件要求严格	大米、小麦、豆类及富硒粮食作物
XRF	前处理简单; 快速高通量; 非破坏性分析	检出限受限; 样品制备要求高; 仪器成本较高	土壤、谷物、茶叶及部分坚果类食品

1.2 电化学法

电化学传感技术的核心机制在于借助 Se(IV)的电子迁移特性或界面催化效应, 实现复杂基质中 Se(IV)的浓度分布定量解析。常规分析技术一般以溶出伏安法(SV)作为代表性方法[22]。SV 依据质子化介质中硒形态在液汞微探针界面发生电化学沉积-解离的动力学特性实施痕量测定, 负向扫描模式借助电极表面选择性富集策略构建动态传质界面, 通过界面活化效应实现检测限数量级优化, 与分光光度法相比相对误差为 7.2%。Merino 等[23] 采用阴极 SV 测定 Se(IV), 检出限为 0.065 μg/L, 定量限为 0.21 μg/L, 线性范围为 4.0 μg/L, 15 次重复测定(1.0 μg/L 浓度下)的 RSD 为 1.6%。该研究提出的 CSV 结合 Cu(II)和 ADDTP 的体系是一种灵敏、选择性强且应用广泛的痕量硒检测方法。与传统方法相比, 它在痕量检测方面表现出更高的灵敏度, 同时对复杂样品中的干扰具有更好的耐受性, 为环境监测和生物分析提供了可靠手段。

1.3 色谱法

1.3.1 离子色谱-电感耦合等离子体质谱法 离子色谱-电感耦合等离子体质谱法(Ion Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, IC-ICP-MS)检测机理与离子色谱法原理相近。检测端通过质谱(如四极杆)筛选母离子并利用碰撞诱导解离生成碎片离子, 依据碎片特征实现硒的定性与定量检测[24]。赵彤等[25] 建立了 IC-ICP-MS 联用技术对香菇中 Se-Met、MeSeCys 及 SeCys2 的定量分析方法, 检测限分别为 1.20、0.80、0.50 μg/L, 加标回收率 81.8%~94.6%, 相对标准偏差 2.6%~7.1%。为了提高检测限, Xiao 等[26] 开发了基于 IC-ICP-MS 的硒形态分离检测体系, 各形态检测限为 0.21~0.56 μg·kg^{-1}, 定量限为 0.69~1.87 μg·kg^{-1}。该方法具有灵敏度优异、自动化程度高、重复性稳定等技术优势, 但存在以下局限性: 需配置 ICP-MS 等精密仪器及高纯氩气供应系统, 前期投入与维护成本较高; 实际检测中需通过柱后衍生或二维色谱优化硒形态(如 Se-Met/SeCys2 与 Se^{4+})分离效果, 前处理复杂耗时; 复杂基质可能导致 Se(IV)等低丰度形态检测灵敏度衰减, 常需固相萃取等预富集步骤, 易引入交叉污染风险, 制约方法适用范围。

1.3.2 高效液相色谱 高效液相色谱(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)原理是通过氧化还原反应将样品中不同硒形态统一转化为 Se(IV), 与 3,3'-二氨基联苯胺(DAB)衍生化生成 Se-DAB 复合物, 利用 HPLC 结合氨基柱对衍生物进行分离定量, 实现硒形态的高选择性检测。He 等[27] 基于 DAB 衍生化建立 HPLC 法检测富硒茶硒含量, 检出限为 0.01 mg/kg, 定量限为 0.03 mg/kg, 加标回收率为 81.2%~96.7%, RSD 为 0.72%~4.23%, 方法灵敏度与重现性良好。该方法适用于富硒植物样品(如茶叶), 基于 Se-DAB 衍生物稳定性高、样品处理高效的特点, 具备低定量限(0.03 mg/kg)、良好重复性(RSD≤4.23%)及低成本优势, 适合大规模植物性样品的硒含量分析。

然而, 该方法在应用上仍存在一定局限性: 首先, 检测过程高度依赖衍生化步骤, 复杂基质可能导致副反应或干扰信号, 从而影响定量精度; 其次, 该方法主要应用于植物性样品(如茶叶、谷物), 对动物源性及复合食品的适用性尚显不足; 最后, 衍生试剂 DAB 具有一定毒性, 实验安全性与环保性问题限制了其在更大范围内的推广应用。

1.3.3 高效液相色谱串联质谱法 高效液相色谱串联质谱法(High Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry, HPLC-MS)采用高能输液泵输送洗脱液载样通过逆相分离介质, 依据溶质分配比梯度完成溶质区带离散。分离后组分经电喷雾电离生成离子, 按质荷比在质谱仪中分离检测, 最终通过质谱图完成定性与定量分析[28]。严美婷等[29] 采用 HPLC-MS/MS 检测蛹虫草硒多肽片中 3 种硒代氨基酸, 线性范围为 0.5~100 ng/mL, 平均回收率为 93.8%~94.2%(RSD 为 2.13%~3.42%), 方法准确度与精密度良好。Kong 等[30] 建立 HPLC-MS 同步检测补充剂中三种硒氨基酸, 线性优异(R^2≥0.9993), 灵敏度(检出限为 2.49~2.92 fmol)及精密度(日内/日间 RSD 为 2.87%~13.54%)良好。该检测方法具有抗干扰性强、重现性佳、准确度和灵敏度高的优势,

无需复杂衍生化前处理，可快速批量检测且避免共存离子干扰，但存在仪器成本高、维护难度大、前处理步骤繁琐及方法开发耗时等局限性。

1.3.4　高效液相-电感耦合等离子体质谱法　高效液相-电感耦合等离子体质谱法（High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry，HPLC-ICP-MS）联用系统借助色谱柱保留特性差异实现组分分馏，分馏产物经等离子体源电离导入质谱检测器，依据质荷比（m/z）参数完成定性与定量分析[31]。冯灏等[32]利用 HPLC-ICP-MS 测定富硒大米，Se（Ⅵ）、Se（Ⅳ）、SeCys 2、MeSeCys 和 SeMet 的检出限分别为 0.15、0.15、0.18、0.12、0.15 μg/L。加标回收率范围为 76.0%~104.2%，相对标准偏差为 1.1%~8.5%。卢鑫等[33]则检测其他类物质，以富硒小麦为原料，采用 HPLC-ICP/MS 检测 5 种硒代氨基酸，线性范围为 1.0~200 μg/L，检出限为 0.11~0.29 μg/L；除硒代胱氨酸（$SeCys_2$）因不稳定致回收率偏低外，其余 4 种加标回收率为 92.3%~102%，RSD 为 1.6%~4.2%（n=7）。黄波等[34]则扩大检测原材料的范围，选用 5 种植物（堇叶碎米荠、甘蓝等）为原材料，检测五类硒化合物（$SeCys_2$、MeSeCys、Se（IV）、SeMet、Se（VI）），检测在 18 min 周期内完成基线分辨分离，线性范围为 0~200 μg/L（r>0.999），检出限为 0.005~0.025 mg/kg，RSD 为 1.6%~3.3%，回收率为 79.3%~103.5%。该方法具有检出限低、线性良好、操作简便、准确灵敏等优势。加标回收率与精密度均符合要求，适用于富硒食品中硒形态的精准定量[35]，但存在仪器维护成本高、运行条件严格等不足。

1.4　毛细管区带电泳法

毛细管区带电泳法基于高压电场驱动下，带电粒子在毛细管电解质溶液中因迁移速率差异（电荷、质量、形状等）实现分离；同时，毛细管壁硅羟基与溶液离子形成双电层，施加电压后产生电渗流驱动整体溶液迁移，进一步提升分离效率，适用于硒形态的高分辨、快速分析[36]。Al-qudaimi 等[37]建立毛细管区带电泳法，通过优化缓冲液（85 mmol/L NaHPO-0.5 mmol/L CTAB，pH9.37）及电泳条件（−5 kV，进样 1.0 psi×30 s），7.9 min 内实现亚硒酸盐检测，线性范围为 5~300 mg/L（r=0.99998），回收率为 102.4%，适用于酵母总硒的间接定量分析。毛细管区带电泳法测定硒的优势是高效快速、样本需求微量、成本低；缺点是灵敏度受光程限制较低，复杂基质易干扰分离重现性，电渗流波动影响稳定性。

1.5　检测方法与标准符合性分析

为进一步完善硒含量检测体系，有必要结合现行的国家标准 GH/T 1135-2024《富硒农产品》对现有检测方法进行分析。该标准对不同类别富硒农产品（谷物、蔬菜、蛋禽类等）的硒含量范围提出了明确要求。例如，标准规定谷物及其制品、畜禽类产品中的总硒含量应在 0.15~0.50 mg/kg 之间，同时要求硒氨基酸类化合物在总硒含量中占比达到一定比例（≥65% 或≥80%）。这意味着检测方法不仅需具备对总硒的精准测定能力，还应能够区分和定量硒的有机态与无机态形式。常用方法中，光谱法能满足总硒检测但难以区分形态；色谱联用技术可精准分离定量不同硒形态，完全符合标准但成本高、操作复杂；电化学法与毛细管电泳适合快速检测，却在精确度和适用性上不足[38]。现有检测方法在总硒含量测定上基本满足 GH/T 1135-2024 要求，但在硒形态定量和有机硒比例方面，只有 HPLC-ICP-MS 等高端技术完全胜任，常规方法仍有不足。表 2 总结了不同硒检测方法的优点和缺点。未来应注重方法整合，构建从常规光谱快速筛查到高端色谱联用形态分析的分级体系；同时建立统一的标准化方法库，保证不同实验室间的可比性；并推动便携化与高通量技术的研发，以满足产业化检测和快速监管需求。综上，现有方法能较好完成总硒检测，但形态学检测仍不足。未来需发展更标准化、集成化和高效化的技术，以支撑富硒产品的质量控制与功能评价。

2　硒的功能及其作用机制

2.1　抗氧化活性

表 3 总结了近年来硒的生物活性。硒是谷胱甘肽过氧化物酶的关键组分，能够消除活性氧，防止细胞氧化损伤，发挥抗氧化功能。Huang 等[39]研究显示纳米硒制剂处理显著影响小麦抗氧化系统指标。叶片组织检测结果显示，SOD 活性显著提高，POD 活性也有明显上升，同时脂质过氧化标志物 MDA 含量显著降低，GSH 积累量显著增加。基因型间的差异达到统计学显著性，揭示了遗传特异性抗氧化调控网络的作用机制。类似的研究表明，Li 等[40]研究了有机硒抗氧化活性及作用机制，胚胎期注射硒代葡萄糖可以剂量依赖性地改善雏鸡肝脏的抗氧化指标：硒代葡萄糖干预显著激活了内源性抗氧化酶系

表 2　不同硒检测方法的优点和缺点

Table 2　Comparative analysis of merits and limitations across selenium quantification techniques

方法	优点	缺点
光谱法	测限优异、抗干扰性强、多元素同步分析能力	样品前处理复杂、基体干扰
电化学法	成本低、快速检测	抗干扰差、检测限较高、样品要求严苛
色谱法	特异性强、测定精准	仪器复杂、耗时较长
毛细管区带电泳法	分离效能优异、微量进样、分析迅速	检测限不足、重复性欠佳、存在基质效应

表 3 硒的生物活性

Table 3 Biological activities of selenium

硒形式	生物学活性	作用机理	参考文献
纳米硒	抗氧化	调控抗氧化酶系统、促进非酶抗氧化物质(如谷胱甘肽)合成并抑制脂质过氧化产物生成	[39]
有机硒	抗氧化	靶向清除ROS机制显著抑制脂质过氧化终末产物丙二醛(MDA)生物合成路径	[40]
有机硒	抗氧化	增强糖苷键氢原子活性,显著提升自由基清除效率并催化H_2O_2分解以减少ROS积累	[41]
无机硒	抗氧化	促进非酶抗氧化物质积累、提高GSH和AsA活性以清除ROS,并激活苯丙烷代谢途径的PAL和CHS酶促进多酚/类黄酮合成	[42]
纳米硒	抗肿瘤	促进肿瘤细胞程序性死亡、阻碍新生血管形成并抑制细胞分裂与转移	[43]
有机硒	抗肿瘤	靶向调控信号通路、调控肿瘤相关基因、协同抗肿瘤	[44]
有机硒	抗肿瘤	药物改良	[45]
有机硒	免疫调节	抗氧化保护,促进免疫球蛋白生成,维护肠道屏障	[46]
纳米硒	免疫调节	激活巨噬细胞、增强固有免疫	[47]
纳米硒	免疫调节	调控免疫相关通路、保护免疫器官	[48]
无机硒	免疫调节	增强细胞免疫、协同抗氧化防御	[49]
有机硒	抗衰老	激活内源性抗氧化系统,阻遏膜脂质过氧化进程	[50]
有机硒	抗炎	优化内源性抗氧化酶调控阈值、强化抗体介导的免疫防御网络、多靶点阻断炎性级联通路	[51]
纳米硒	抗菌	瓦解质膜结构稳定性、触发胞内自由基稳态失衡,驱动氧化损伤级联反应	[52]

统(如 GSH-Px 和 T-SOD),并使其活性显著提高。此外,干预还有效降低了 MDA 水平,增强了超氧阴离子清除效率,证明其通过激活抗氧化酶和抑制脂质过氧化双重机制实现了抗氧化保护作用。Jiang 等[41]研究表明,硒化白术多糖的体外抗氧化活性显著优于原始多糖,主要通过硒修饰激活氢原子并增强自由基清除能力。但具体影响代谢通路作用尚不明确,Gorni 等[42]进一步研究证实外源硒通过激活玉米抗氧化代谢通路缓解干旱胁迫诱发的氧化损伤。干旱处理下,硒诱导类胡萝卜素、酚类物质及黄酮类化合物的非酶促抗氧化体系富集,同步上调 GSH 与抗坏血酸等酶促抗氧化系统活性,有效淬灭过量 ROS,阻遏其介导的膜结构及生物高分子氧化性损害。此外,硒介导苯丙烷代谢通路,上调 PAL 与CHS 等关键酶表达,驱动酚类与类黄酮生物合成,协同增强抗氧化防御网络。

硒通过激活抗氧化酶系统、清除活性氧和抑制脂质过氧化发挥抗氧化作用。研究表明,纳米硒显著提升植物抗氧化活性,硒代葡萄糖能在雏鸡肝脏中激活抗氧化酶系统并降低 MDA 水平,提供双重保护。此外,硒化白术多糖在体外的抗氧化活性优于原始多糖,主要通过增强自由基清除。外源硒也能激活植物抗氧化代谢通路,缓解干旱引起的氧化损伤,进一步增强抗氧化防御。

2.2 抗肿瘤活性

硒元素的抗肿瘤活性来源于其内源性调控机制,硒通过抗氧化与促凋亡机制抑制肿瘤细胞增殖,辅助防癌。Wang 等[43]制备了基于芍药多糖的硒纳米颗粒,研究其抗肿瘤活性,斑马鱼模式生物实验揭示 PLP-SeNPs(0.5 μg/mL)可显著抑制肿瘤细胞增殖(抑制率 83.6%)和迁移(抑制率 46.0%),并通过阻断血管生成(抑制率 19.4%)发挥抗肿瘤作用。抗肿瘤作用影响信号通路有待明确,Guo 等[44]研究了鱼油联合硒酵母来源的硒在三阴性乳腺癌模型中的抗肿瘤作用,结果表明补充硒显著上调肿瘤组织中 Sel-H、Sel-W 和 GPx4 的表达,抑制 GPR-40 受体和 EGFR/FGFR 信号通路,并增强多柔比星对 PI3K/AKT/mTOR、MAPK/ERK 和 JAK2/STAT3 通路的抑制作用;同时激活 PTEN、TSC1/TSC2 和 p53 肿瘤抑制因子,减少 c-Myc、NF-κB 和 HIF-1α 的表达,调节 PD-1/PD-L1 等免疫检查点分子,抑制 Ki-67 和癌症干细胞标志物 CD24/CD29,且呈剂量依赖性(P<0.05)。Fu 等[45]通过合成硒取代的 axitinib(Se-axitinib),研究其抗肾细胞癌活性及作用机制。结果表明 Se-axitinib 在保持原药抑制 VEGFR-2 活性(P<0.05)的同时,通过硒的抗氧化特性显著降低药物性高血压(收缩压降低约 30 mmHg)和肝功能损伤(ALT 水平降低 41.2%)。

硒的抗肿瘤活性通过抗氧化和促凋亡机制抑制肿瘤细胞增殖。研究显示,硒纳米颗粒能显著抑制肿瘤细胞的增殖、迁移和血管生成。硒还通过调节多个信号通路,如增强 GPx4 表达和抑制 EGFR/FGFR 通路,来抑制肿瘤生长。此外,硒取代的药物 Se-axitinib 在抗肾细胞癌中展现出良好效果,减少药物引起的副作用。这些发现表明,硒在抗肿瘤治疗中具有潜力。

2.3 免疫调节活性

硒具有显著的免疫调控功能,其作用机制主要通过提升相关抗氧化酶活性来使得细胞发挥其生物活性功能。Xu 等[46]研究显示,枸叶硒多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制雏鸡的胸腺指数(较模型组提升 107.1%)和法氏囊指数(提升 258.9%)的提升,协同增强体液免疫效应分子(IgA/IgG/IgM)的外周血浓度。Zeng 等[47]构建的卵清蛋白肽-硒纳米复合物(OP-SeNPs)能有效刺激 RAW264.7 巨噬细胞,在一定浓度下使吞噬活性提高 31.75%、一氧化氮分泌量增加 83.00%(P<0.05),OP-SeNPs 通过增加 NO 分泌和增强胞饮活性来激活 RAW264.7 巨噬细胞,表

明它们能够增强免疫调节作用。OP-SeNPs 为零价无定形，粒径为 82.23±1.77 nm，SeNPs 表现出与 OP 的-OH、C-O、C-N 和 N-H 基团的正相互作用。其无定形纳米结构显著强化免疫调节效能。Xia 等[48] 研究表明，壳聚糖包覆硒纳米颗粒通过触发补体级联反应与急性期蛋白通路，使斑马鱼溶菌酶活性达对照组 2.1 倍、PMA 诱导呼吸爆发活性提高 1.8 倍、T 细胞增殖率优于 Trolox 组 1.3 倍（P<0.05）。分子机制研究表明 SeNPs 通过下调脂肪酸代谢关键基因 *acaca*（1.44 倍）及 PPAR 信号通路，实现免疫代谢双向调控。Fahmy 等[49] 发现硒与硝唑尼特联用使隐孢子虫卵囊排泄抑制率从 63% 增至 71%，与伊维菌素联用则从 82% 提升至 84%（P<0.05），其中 IVC+Se 组肠道 CD4+T 细胞数量达 22.8±1.69，CD4/CD8 比值恢复程度最优，证实硒通过改善糖尿病宿主的 T 细胞免疫应答增强抗寄生虫治疗效果。

综上，硒通过免疫器官发育促进、免疫效应分子增强、巨噬细胞活化、T 细胞应答调控以及免疫-代谢耦合等多维机制发挥显著的免疫调节功能。特别是基于纳米技术的硒载体在细胞免疫激活和代谢通路调节方面表现出独特优势，为硒在免疫营养与疾病防治中的应用提供了新的思路和证据。

2.4　其他功能活性

硒具备多维度生物活性，包括延缓衰老进程、炎症调控及病原微生物抑制效应。Zeng 等[50] 实验表明，喂养一定量的硒蛋白对 D-半乳糖诱导的衰老模型小鼠的肝细胞和生化特征有积极的影响。研究数据显示，实验组小鼠血清 T-AOC 呈现成倍增长，其肝脏 GSH-Px 活性由 72.80 U·mg^{-1} 提升至 148.01 U·mg^{-1}，有较大幅度的提升。SOD 活性提升了将近两倍，且血清 MDA 水平下降 32.3%。硒蛋白通过激活氧化防御酶效能，介导延缓细胞老化进程。Akindoyeni 等[51] 研究发现，硒生物强化黄麻叶可以调节免疫系统的一些关键蛋白质对免疫原性的反应至关重要。实验结果表明大鼠喂食生物强化蔬菜（5% 硒肥施用过）的膳食内含物 30 d 后，大鼠血清的免疫球蛋白 IgG（480.2±5.23 mg·d·L^{-1}）和 IgM（280.9±7.19 mg·d·L^{-1}）得到显著提高并且促炎因子 IL-6（19.62±26.1 pg·mg^{-1}）水平相较于空白组也有明显提升。由于特定免疫球蛋白含量与细胞因子水平的提高，使得硒元素高表达抗炎效应。Salah 等[52] 实验证实，SeNPs 对革兰氏阳性菌与阴性菌均呈现广谱抗菌活性，其中革兰氏阴性菌的抑菌效能尤为突出，最低抑菌浓度测得值为 0.313 μg·mL^{-1}，最大抑制圈径扩展至 36.33±3.05 mm。扫描电镜显微成像显示实验组菌体呈现细胞壁结构发生显著性形变。该研究系统验证了硒纳米颗粒的微生物抑制机制。

3　结论与展望

本文综述了硒的检测方法及其功能：主要采用光谱法、电化学法和色谱法。光谱法操作简便、成本较低，应用广泛；电化学法仪器简单，适合批量检测，但易受电极覆盖影响；色谱法尤其是 HPLC 及其联用技术灵敏度和准确性更高，适合复杂基质分析。随着技术进步，这些方法在灵敏度和自动化水平上不断提升，更好地满足了科研和食品安全检测需求。

硒具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、抗衰老、抗炎以及抗菌等功能。在多个领域均展现出多维度生物活性，其功能机制涵盖分子调控、代谢干预和免疫稳态等多个层面。硒检测方法的研究将朝着更加灵敏、准确、快速、简便以及多功能化的方向发展，不断满足日益增长的科研、生产和生活等各方面对硒检测的需求，为硒相关领域的研究和发展提供强有力的技术支撑。当前研究主要聚焦于硒的生物学效应表征，对其作用机制特别是抗肿瘤分子通路的调控规律仍缺乏系统解析。面对机体微环境复杂性，硒化合物的生物安全性（如剂量依赖性毒性）、对免疫细胞-神经-内分泌网络的交互调控机制仍需深入探索。随着多组学技术及纳米技术的交叉应用，硒在病原体防控、氧化损伤干预、肿瘤靶向治疗及药物递送系统等领域的应用潜力将得到更充分发掘。目前对于硒的构效关系及其在体内的吸收利用形式有待进一步深入探究。硒在食品营养强化领域应用仍存在亟待突破的关键问题：需解决生物利用度与毒理学参数的稳态维持技术、建立精准分析方法学、完善功效评价体系及构建标准化质控体系。综上，硒基营养强化剂虽展现出显著应用潜力且产业化进程持续推进，但其核心制备技术、代谢调控机制等关键科学问题仍存在技术瓶颈，跨领域联合研究亟待突破。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] XIN T Z, FU Y, WANG X S, et al. Research progress of selenium-enriched edible fungi[J]. Horticulturae, 2025, 11(5): 531.

[2] LIU L, BAI L, WU Y, et al. Exploring the role of gut microbiota in the pathogenesis of Kashin-Beck disease: A focus on selenium deficiency and T-2 toxin exposure[J]. Medical Hypotheses, 2025, 197: 111606.

[3] HADRUP N, RAVNHAREN G. Absorption, distribution, metabolism and excretion (ADME) of oral selenium from organic and inorganic sources: A review[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2021, 67: 126801.

[4] CHANG C, YIN R, WANG X, et al. Selenium translocation in the soil-rice system in the Enshi seleniferous area, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 669: 83−90.

[5] ZHAO C X, GAO J, FU Z B, et al. Research progress on the detection methods of total selenium in food[J]. Journal of Food Safety and Quality Detection, 2021, 12(5): 1653−1661.

[6] FERRO C, FLORINDO H F, SANTOS H A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: From development and characterization to therapeutics[J]. Advanced Healthcare Materials, 2021, 10(16): 2100598.

[7] 张天宇, 朱圳铭, 王甫, 等. 可溶性铝的检测方法及其在气溶胶研究中的应用[J]. 化学进展, 2024, 36(9): 1401−1411. [ZHANG T Y, ZHU Z M, WANG F, et al. Dissolved aluminum measurement methods and their application in atmospheric aerosol research[J]. Progress in Chemistry, 2024, 36(9): 1401−1411.]
[8] SHISHOV A, KREKHOVA F, BULATOV A. Deep eutectic solvent based on thymol and menthol for microextraction and sensitive UV-Vis determination of total selenium in eggs and chicken tissue[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 126: 105875.
[9] 高澜文, 霍天祺, 陈波, 等. 海南澄迈富硒地瓜中硒的提取及含量测定[J]. 科技创新导报, 2021, 18(15): 67−69,74. [GAO L W, HUO T Q, CHEN B, et al. Extraction and determination of selenium content in selenium-enriched sweet potato in Chengmai, Hainan[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2021, 18(15): 67−69,74.]
[10] MÖRSCHBÄCHER A P, DULLIUS A, DULLIUS C H, et al. Validation of an analytical method for the quantitative determination of selenium in bacterial biomass by ultraviolet–visible spectrophotometry[J]. Food Chemistry, 2018, 255: 182−186.
[11] 郑志明, 周婉仪, 谭淑铧. 农产品中农药残留的高效检测与分析技术研究进展[J]. 大众标准化, 2024(22): 154−156. [ZHENG Z M, ZHOU W Y, TAN S H. Research progress on efficient detection and analysis technology of pesticide residues in agricultural products[J]. Popular Standardization, 2024(22): 154−156.]
[12] LI M H, SHI D, CHENG Y F, et al. Green and rapid quantitative detection of selenium in selenium-enriched kefir grain based on fourier transform infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2024, 465(1): 142056.
[13] CHEN M L, DU F N, CHEN Y, et al. Determination of selenium methionine in rice flour by attenuated total reflectance ffourier transform infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2019, 40(6): 338−343.
[14] 何广昌. 食品理化检验质量控制与微量元素检验方法分析[J]. 食品安全导刊, 2024(32): 44−47. [HE G C. Analysis of food physical and chemical testing quality control and trace element testing methods[J]. China Food Safety Magazine, 2024(32): 44−47.]
[15] WANG T L, ZHOU X H, LIU J X, et al. Determination of selenium species in se-enriched high-fat crops by high performance liquid chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 264−270.
[16] 薛炜骏. 原子荧光光度法进行水中硒检测时的精密度偏性试验及质量控制[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2023, 23(4): 20−24,40. [XUE W J. Precision bias testing and quality control in the detection of selenium in water using atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, 2023, 23(4): 20−24,40.]
[17] 尚翠, 杨远, 罗兰芳, 等. 湿法消解-原子荧光光谱法测定农产品中的硒[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(1): 146−149. [SHANG C, YANG Y, LUO L F, et al. Determination of selenium in agricultural products by wet digestion-atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(1): 146−149.]
[18] 操江飞, 袁新年, 陈持, 等. 三种消解方法比较原子荧光光谱法检测富硒米和茶中硒含量[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 312−316. [CAO J F, YUAN X N, CHEN C, et al. Comparison of three digestion methods for detection of selenium content in selenium-enriched rice and tea using atomic fluorescence spectrometry[J]. China Food Additives, 2024, 35(5): 312−316.]
[19] 罗建民, 彭翠红, 杨智威. 分子荧光光谱法测定富硒大米中的痕量硒[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(2): 81−85. [LUO J M, PENG C H, YANG Z W. Determination of trace selenium in selenium-enriched rice by molecular fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(2): 81−85.]
[20] 李迎春, 张磊, 尚文郁. 粉末压片-X 射线荧光光谱法分析富硒土壤样品中的硒及主次量元素[J]. 岩矿测试, 2022, 41(1): 145−152. [LI Y C, ZHANG L, SHANG W Y. Determination of selenium, major and minor elements in selenium-rich soil samples by X-ray fluorescence spectrometry with powder pellet preparation[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(1): 145−152.]
[21] 卢丽娟, 孙萌, 寇笑然, 等. 高通量研磨-X 射线荧光光谱法测定不同植源性食品中硒含量[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(5): 86−91. [LU L J, SUN M, KOU X R, et al. Determination of selenium content in different plant foods by high-throughput lapping -X-ray fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(5): 86−91.]
[22] 何彩梅, 吴桂容, 陈春岚, 等. 食品中硒与硒形态分析方法研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(9): 218−222. [HE C M, WU G R, CHEN C L, et al. Research progress in determination method and speciation analysis of selenium in food[J]. The Food Industry, 2017, 38(9): 218−222.]
[23] MERINO I E, STEGMANN E, ALIAGA M E, et al. Determination of Se(IV) concentration via cathodic stripping voltammetry in the presence of Cu(II) ions and ammonium diethyl dithiophosphate.[J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1048: 22−30.
[24] 宋正规, 沈坚, 张爱芝, 等. 高氯酸盐毒性及其检测方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 341−347,351. [SONG Z G, SHEN J, ZHANG A Z, et al. Research progress in toxicological effects of perchlorate and its detection methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 341−347,351.]
[25] 赵彤, 周慧敏, 江洁. 离子色谱-电感耦合等离子体质谱法测定香菇中 5 种硒形态[J]. 理化检验-化学分册, 2020, 56(10): 1113−1117. [ZHAO T, ZHOU H M, JIANG J. IC-ICP-MS Determination of 5 selenium species in mushrooms[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2020, 56(10): 1113−1117.]
[26] XIAO Z M, WANG J T, GUO J P, et al. Quantitative selenium speciation in feed by enzymatic probe sonication and ion chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(2): 268−279.
[27] HE X W, HUANG K F, ZHAO J, et al. An efficient and low-cost method for the determination of selenium in selenium-enriched tea by high-performance liquid chromatography coupled with 3, 3′-diaminobenzidine derivatization[J]. Talanta, 2024, 268(1): 125335.
[28] 何嘉明. 食品中维生素 B12 的检测方法分析[J]. 现代食品, 2019(5): 162−164. [HE J M. Progress in determination of vitamin B12 in foods[J]. Modern Food, 2019(5): 162−164.]
[29] 严美婷, 刘春兰, 邓珊, 等. 高效液相色谱串联质谱法检测富硒药食用蕈菌产品中有机硒含量[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 32−36. [YAN M T, LIU C L, DENG S, et al. Determination of organic selenium content in selenium rich medicines and edible mushroom products by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 32−36.]
[30] KONG X X, ZHANG L L, CAI L, et al. A novel UHPLC-

MS/MS method for the determination of three selenoamino acids in organic selenium supplements and dynamic monitoring in human urine after consumption[J]. European Food Research and Technology, 2025, 251(2): 299−310.
[31] 钮冰, 钟海林, 赵超敏, 等. 水产品中重金属检测方法研究进展[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 307−315. [NIU B, ZHONG H L, ZHAO C M, et al. Research progress on detection methods of heavy metals in aquatic products[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 307−315.]
[32] 冯灏, 苏莹, 耿雅雯, 等. HPLC-ICP-MS 同时测定富硒食品中砷形态和硒形态[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 43−52. [FENG H, SU Y, GENG Y W, et al. Study on simultaneous determination of arsenic speciation and selenium speciation in selenium-rich foods by HPLG-ICP-MS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 43−52.]
[33] 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 X, ZHANG L, WANG T L, 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.]
[34] 黄波, 廖美林, 薛华, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定十字花科植物中 5 种不同形态硒的含量[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 309−315. [HUANG B, LIAO M L, XUE H, et al. Determination of different selenium speciation in 5 kinds of cruciferous plants by HPLC-ICP-MS[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 309−315.]
[35] 彭稳, 李霞, 黄兰蕙. LC-AFS 测定湖南 14 个地级市大米的 4 种形态砷[J]. 微量元素与健康研究, 2024, 41(3): 66−68. [PENG W, LI X, HUANG L H. Determination of four forms of arsenic in rice from 14 prefecture level cities in Hunan by LC-AFS[J]. Trace Elements and Health Research, 2024, 41(3): 66−68.]
[36] 蒋海英. 食品农药残留检测中的化学分析技术[J]. 食品安全导刊, 2024(8): 182−185. [JIANG H Y. Chemical analysis technology in food pesticide residue detection[J]. China Food Safety Magazine, 2024(8): 182−185.]
[37] AL-QUDAIMI P, ZHENG Q Q, TAILULU A, et al. A capillary zone electrophoresis method for selenite detection in culture media for total selenium determination in yeast cells[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2023, 78(2): 247−255.
[38] 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.]
[39] HUANG S S, HAN Y L, SONG R L, et al. Effects of bio-nano-selenium on wheat grain morphology, selenium transport enrichment and antioxidant enzyme activities[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1516005.
[40] LI J H, SHI Q, XUE Y, et al. The effects of in ovo feeding of selenized glucose on liver selenium concentration and antioxidant capacity in neonatal broilers[J]. Chinese Chemical Letters, 2024, 35(6): 338−341.
[41] JIANG G H, KONG H Y, WANG Y W, et al. Antioxidant and hepatic fibrosis-alleviating effects of selenium-modified Bletilla striata polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 301: 140234.
[42] GORNI P H, RODRIGUES C, SPERA K D, et al. Selenium fertilization enhances carotenoid and antioxidant metabolism to scavenge ROS and increase yield of maize plants under drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 221: 109675.
[43] WANG X L, LIU W H, LI Y L, et al. Preparation and anti-tumor activity of selenium nanoparticles based on a polysaccharide from *Paeonia lactiflora*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 232: 123261.
[44] GUO C H, SHIH M Y, CHUNG C H, et al. Fish oil and selenium with doxorubicin modulates expression of fatty acid receptors and selenoproteins, and targets multiple anti-cancer signaling in triple-negative breast cancer tumors[J]. International Journal of Medical Sciences, 2022, 19(14): 2044−2057.
[45] FU Y, SAXU R, RIDWAN K A, et al. Selenium substituted axitinib reduces axitinib side effects and maintains its anti-renal tumor activity[J]. RSC Advances, 2022, 12(34): 21821−21826.
[46] XU B C, ZHANG L F, LI J, et al. Selenium Broussonetia papyrifera polysaccharide alleviated cyclophosphamide-induced immune suppression, growth inhibition, intestinal damage, and gut microbiota disorder in yellow-feather broilers[J]. Poultry Science, 2025, 104(4): 104907.
[47] ZENG Y G, LYU S W, YANG Q, et al. Preparation, physicochemical characterization, and immunomodulatory activity of ovalbumin peptide-selenium nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142852.
[48] XIA I F, KONG H K, WU M M H, et al. Selenium nanoparticles (SeNPs) immunomodulation is more than redox improvement: Serum proteomics and transcriptomic analyses[J]. Antioxidants, 2022, 11(964): 964.
[49] FAHMY M A, ABDELAAL A A, HASSAN S I, et al. Antiparasitic and immunomodulating effects of nitazoxanide, ivermectin and selenium on Cryptosporidium infection in diabetic mice. [J]. Revista Brasileira de Parasitologia Veterinaria, 2021, 30(4): e012121.
[50] ZENG R, FAROOQ M U, ZHANG G, et al. Dissecting the potential of selenoproteins extracted from selenium-enriched rice on physiological, biochemical and anti-ageing effects *in vivo*[J]. Biological trace Element Research, 2020, 196(1): 119−130.
[51] AKINDOYENI I A, OGUNSUYI O B, ADEFEGHA S A, et al. Selenium biofortified jute leaves exhibited increased phenolic content and enhances anti-inflammatory cytokines and immunogloblin levels in Wistar rats[J]. South African Journal of Botany, 2024, 166: 603−611.
[52] SALAH M, ELKABBANY N A S, PARTILA A M. Evaluation of the cytotoxicity and antibacterial activity of nano-selenium prepared via gamma irradiation against cancer cell lines and bacterial species[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 20523.