张泓麟, 陈婉婷, 王晓燕, 等. 水产品中氨基脲的产生、代谢及控制方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 525−537. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070246

ZHANG Honglin, CHEN Wanting, WANG Xiaoyan, et al. Research Progress on the Generation, Metabolism and Control Methods of Semicarbazide in Aquatic Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 525−537. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070246

· 专题综述 ·

水产品中氨基脲的产生、代谢及控制方法研究进展

张泓麟[1], 陈婉婷[1], 王晓燕[1], 苏永昌[2,*], 陈晓婷[2], 陈艺晖[1], 刘智禹[2,3,*], 何跃建[4]

（1.福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;
2.福建省水产研究所, 福建省海洋生物增养殖与高值化利用重点实验室, 福建厦门 361013;
3.泉州师范学院海洋与食品学院, 福建泉州 362000;
4.葛兰瑞克（厦门）食品科技有限公司, 福建厦门 361013）

摘　要: 氨基脲（Semicarbazide，SEM）常作为硝基呋喃类药物呋喃西林（Nitrofurazone，NFZ）的代谢产物被检测。近年来，水产品中 SEM 残留超标现象频发，严重影响我国水产品的出口贸易和水产养殖业的可持续发展。研究表明，SEM 不仅来源于外源性因素（如非法用药、水体、饲料及藻类污染、加工过程中的化学反应等），还可能通过内源性代谢途径（如氨基酸代谢、尿素循环、甲壳素代谢等）产生。本文综述了水产品中氨基脲的来源、产生机理及代谢规律，探讨了基于代谢组学、转录组学和高效液相色谱等技术的研究方法，并从养殖环境控制、加工过程优化、关键代谢物质调控等方面提出了针对性的控制措施，旨在为我国水产品中 SEM 污染的有效防控提供理论依据。

关键词: 水产品, 呋喃西林, 氨基脲, 产生机理, 检测方法

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0525−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070246　　本文网刊:

Research Progress on the Generation, Metabolism and Control Methods of Semicarbazide in Aquatic Products

ZHANG Honglin[1], CHEN Wanting[1], WANG Xiaoyan[1], SU Yongchang[2,*], CHEN Xiaoting[2], CHEN Yihui[1], LIU Zhiyu[2,3,*], HE Yuejian[4]

（1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2.Fujian Key Laboratory of Marine Biological Aquaculture and High-value Utilization, Fujian Fisheries Research Institute, Xiamen 361013, China;
3.College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;
4.Gelan Ruike (Xiamen) Food Technology Co., Ltd., Xiamen 361013, China）

Abstract: Semicarbazide (SEM) is widely monitored as a metabolite of the nitrofuran antibiotic nitrofurazone (NFZ). In recent years, frequent occurrences of excessive SEM residues in aquatic products have seriously hindered the export trade and sustainable development of the Chinese aquaculture industry. Studies have shown that SEM derives from both exogenous and endogenous sources. Exogenous sources include illegal drug use, contamination from water, feed, and algae, and chemical reactions during processing. Endogenous formation, conversely, occurs through pathways such as amino acid

收稿日期: 2025−07−21

基金项目: 福建省自然科学基金（2023J011326）; 福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项（FJHYF-L-2023-13）; 福建省种业创新与产业化工程（2021FJSC2Y03）; 海洋与渔业综合服务专项资金项目（FYZF-KTYJ-2025-12）。

作者简介: 张泓麟（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: 13850415648@163.com。

*** 通信作者:** 苏永昌（1982−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用研究, E-mail: suyongchang5@126.com。

刘智禹（1972−）, 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 水产品加工与综合利用研究, E-mail: 13906008638@163.com。

metabolism, the urea cycle, and chitin metabolism. This review systematically examines the sources, formation mechanisms, and metabolic behavior of SEM in aquatic products with a focus on advanced detection methods, including metabolomics, transcriptomics, and high performance liquid chromatography. Furthermore, targeted control strategies are proposed, encompassing aquaculture environmental management, optimization of processing procedures, and regulation of key metabolites. This review aims to provide a scientific foundation for the effective prevention and control of SEM contamination in aquatic products in China.

Key words: aquatic products; nitrofurazone; semicarbazide; generation mechanism; detection technology

氨基脲(Semicarbazide, SEM), 又名氨基甲酰肼, 分子式为 CH_5N_3O, 分子量为 75.1, 极易溶于水, 水中溶解度为 100.0 g/L(20 ℃), 不溶于乙醚及乙醇[1−2]。呋喃西林(Nitrofurazone, NFZ)是硝基呋喃类(Nitrofurans, NFs)药物的一类, 在水产养殖中常用于预防和治疗水产细菌性疾病, 一直以来, SEM 被认为是 NFZ 的代谢产物[3], 常作为监测水产品中非法使用 NFZ 的标志物。NFZ 在动物体内代谢迅速, 半衰期仅为 2~5 h[4], 而 SEM 在动物体内可与蛋白质结合并可在动物体内长期稳定存在[5−6], 且具有一定的蓄积性。研究显示, 动物源性食品中残留的 SEM 可通过食物链传递给人类, 长期摄入会对人体有致癌、致畸等不良影响[7]。在《关于开展 2016 年国家产地水产品质量安全监督抽查工作的通知》中, 将 SEM 的残留限量值定为 1.0 μg/kg。2002 年, 我国农业部发布《食品动物禁用兽药及其他化合物清单》, 明确禁止在所有食品动物中使用 NFZ[8], 但我国出口的水产品中却时常检测出 SEM, 这表明水产品中的 SEM 残留不仅仅是由于 NFZ 的代谢产生。因此, 明确水产品中 SEM 的来源并采取有效的控制措施既能促进我国水产品养殖和进出口贸易的发展又能保障水产品的食用安全性。

目前关于水产品中 SEM 的超标问题备受关注, 近年来我国甲壳类水产品药物残留中 SEM 的检出超标率高达 50%[9]; 泰国、文莱、巴西等国家报道了多起虾中 SEM 残留超标事件[10]。研究表明水产品中 SEM 的残留除了具有致癌、致畸性外, 还可能导致神经毒效应, 并对内分泌系统的功能产生影响[11]。Lu 等[12] 利用蛋白质组学和代谢组学技术探究海参在 SEM 胁迫下的生长特性, 结果表明 SEM 抑制了海参的生长并伴有严重的氧化应激和炎症反应。根据水产品中 SEM 的来源途径可分为内源性 SEM 和外源性 SEM, 由于其来源途径多样[3], 如: 水产品中的氨基酸和甲壳素代谢产生、热加工过程产生、水产品所处水体环境及藻类的污染导致的 SEM 积累以及消毒处理及非法用药等的影响, 使得 SEM 的检测和控制具有一定的难度。本文主要从水产品中 SEM 的来源途径、产生机理与代谢规律、检测方法与控制措施等方面进行综述, 以期为有效控制水产品中的 SEM 提供理论依据。

1 水产品中 SEM 的来源

水产品中的 SEM 既可通过氨基酸代谢和尿素循环过程产生, 也可由外界环境污染以及加工过程中的添加剂分解迁移产生, 其来源多样, 使得水产品中 SEM 的检测和控制具有一定难度, 严重影响了我国水产品养殖、加工与进出口贸易的发展。图 1 展示了水产品中 SEM 的主要来源, 按来源途径可分为内源性 SEM 和外源性 SEM。

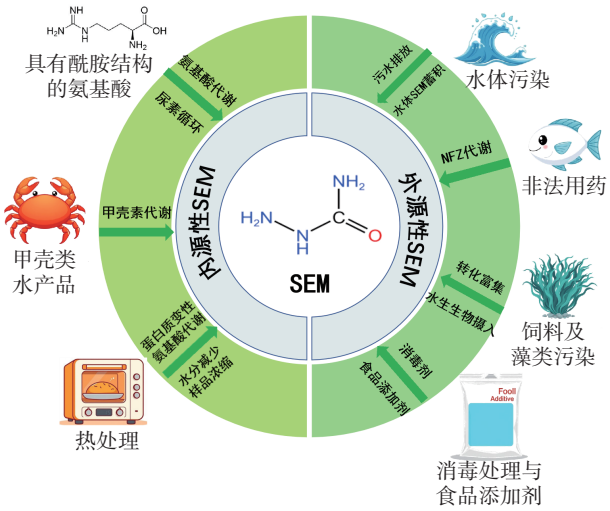


图 1 水产品中 SEM 的主要来源

Fig.1 Primary sources of SEM in aquatic products

1.1 内源性 SEM 来源

尽管目前 NFZ 在水产品养殖过程中已经被禁止使用, 但仍有检测出水产品中 SEM 含量超标[13], 特别是甲壳类水产品。舒秀君等[14] 探究了养殖日本沼虾体内 SEM 变化规律及存在特征, 尽管养殖过程中无人为使用 NFZ, 池塘水体和所用饲料经检测均不含 SEM 成分, 但在养殖的不同时期均有检出 SEM, 且含量均超过我国限量要求(<1.0 μg/kg)。朱盼盼[11] 分别对养殖和野生日本沼虾中 SEM 含量进行检测以及统计分析, 发现尽管日本沼虾在养殖过程中没有使用 NFZ 等药物, 但其不同组织中的 SEM 含量均高于野生日本沼虾。杨慧荣等[15] 对牛蛙中 4 种 NFs 药物的代谢物含量进行测定, 在不使用任何药物养殖的前提下, 从封闭养殖的牛蛙中检出 SEM, 检出值为 0.58 μg/kg, 并指出牛蛙中 SEM 的生成和代谢可能与肝脏有关。这也进一步证实了水产品除了受到外源药物的影响产生 SEM, 也可能通过一系列代谢过程产生内源性 SEM(图 2)。

1.1.1 氨基酸代谢与尿素循环过程产生 研究表明 NFZ 的代谢降解并不是水产品中 SEM 残留的唯一

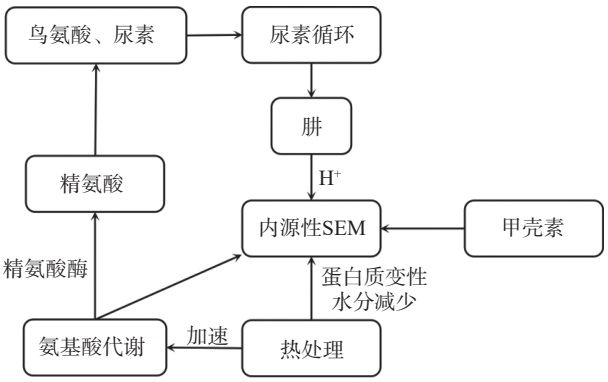


图 2　水产品中内源性 SEM 的来源

Fig.2　Sources of endogenous SEM in aquatic products

来源[16]。2004 年 Saari 等[17] 首次提出内源性 SEM 的存在，Hoenicke 等[18] 推测 SEM 是由具有酰胺基或脲基残基的含氮物质降解形成的。近年来的研究认为 SEM 前体包括尿素、肼、精氨酸、组氨酸、瓜氨酸、赖氨酸和谷氨酰胺等[19−20]，结构分析表明，SEM 和氨基酸都是高含氮物质，因此猜测 SEM 可能是通过降解氨基酸或其他含氮化合物形成的[21]。Zhang 等[20] 使用 21 种不同的氨基酸，通过模拟氨基酸代谢途径探讨了虾体内源性 SEM 的转化机制，结果发现具有酰胺结构的氨基酸以及在代谢过程中能够转化为酰胺结构的氨基酸可能是形成 SEM 的关键中间体。

Abernethy 等[1] 研究表明，肼是尿素循环中的关键中间产物，能够与酸根离子发生反应生成 SEM，因此在酸性条件下，一些高氨氮含量的食品中可能会产生 SEM。由于尿素和 SEM 在结构上有一定的相似性，因此推测尿素循环的过程与 SEM 的产生有潜在关系。精氨酸是甲壳类水产品中含量最高的氨基酸，可被精氨酸酶水解为鸟氨酸和尿素进入尿素循环[21]，Zhang 等[20] 在精氨酸、瓜氨酸、赖氨酸和谷氨酰胺中加入尿素，发现这些氨基酸代谢产生 SEM 的含量有所增加，因此证明了内源性 SEM 产生的途径可能与氨基酸和尿素有关。有研究发现水环境中盐度和氨氮含量的增加促使虾体内尿素循环加快，尿素循环相关物质飙升。Yu 等[22] 对南美白对虾各组织的 SEM 含量进行了检测，发现鳃中的 SEM 含量高于其他组织，而虾鳃中的精氨酸酶活性最高，这也间接证实了 SEM 与精氨酸的分解有一定的关系，结合尿素循环中主要物质的变化分析，鉴于精氨酸酶是参与尿素循环的重要物质，因此推测 SEM 的产生可能与尿素循环有关。

1.1.2　甲壳素等天然物质代谢产生　甲壳类水产品的壳质由 30%~40% 的蛋白质、30%~50% 的碳酸钙、磷酸盐以及 20%~30% 的甲壳素组成[23]。由于 SEM 主要集中在甲壳类水产品中，对比罗氏沼虾虾壳和虾肉中的 SEM 含量，发现虾壳中的 SEM 含量（>25 μg/kg）远高于虾肉（<0.5 μg/kg），由于甲壳素是虾壳的主要结构成分之一，因此推测 SEM 可能是甲壳素等天然组分代谢生成[10]。研究发现甲壳素和氨基酸在前处理过程中能产生 SEM，这一途径可能是导致中华绒螯蟹中内源性 SEM 残留的原因[24]，将甲壳素与 17 种氨基酸混合物经前处理后，SEM 检出值为 10.28 μg/kg，与蟹壳中 SEM 检出浓度较为接近，由此推断蟹壳中 SEM 检出可能是甲壳素和氨基酸在 SEM 测定前处理过程中发生化学反应，从而导致中华绒螯蟹中存在内源性 SEM。彭婕等[25] 分析发现在中华绒螯蟹的肌肉、性腺和鳃中几乎没有检出 SEM，而蟹壳中检出率为 100%，但其认为壳中的 SEM 并非源自甲壳素，可能与甲壳中结合蛋白水解氨基酸变化有关。关于甲壳类水产品的内源性 SEM 是否由甲壳素代谢生成仍需进一步的研究验证。

1.1.3　热处理过程中产生　水产品食用前通常经过一系列高温烹调处理，在此过程中发生美拉德反应以及脂质氧化等一系列反应，赋予其特殊的风味。以江浙地区最具代表的虾干为例，经过热风干燥处理后的虾干，不仅保留了虾的营养成分，还使虾肉中游离氨基酸和呈味核苷酸含量相对增加，赋予其鲜美的滋味和富有嚼劲的口感[26]。但与此同时，水产品中的水分流失，蛋白质发生高温变性，氨基酸代谢加速，可能在一定程度上导致水产品中的 SEM 含量上升。

Zhang 等[27] 调查了浙江代表性对虾、蟹等各种水生甲壳类水产品的 SEM 来源，测试了热处理对 SEM 含量的影响，结果表明对虾和螃蟹中的 SEM 在热处理后均大幅增加，并且首次指出 SEM 含量与热处理温度的关系是呈高斯分布，而非线性关系。Yu 等[16] 运用了油炸、清蒸、烘焙等方式对虾进行加工后发现虾中的 SEM 含量均显著升高，且温度、水分等因素都会影响 SEM 的形成，这很可能是由于氨基酸等成分在高温下代谢分解产生。曹爱玲等[28] 将南美白对虾和中华鳖分别在 70、100 和 130 ℃ 条件下烘干 48 h，随着温度梯度升高，壳中的蛋白含量在逐渐减少，SEM 检出量明显增加，说明蛋白质受热而逐渐分解产生 SEM，并且在烘干过程中水分逐渐减少，样品逐渐浓缩，也会在一定程度上导致 SEM 浓度增加。

1.2　外源性 SEM 来源

除了内源性 SEM 外，水产品所处水体环境的污染，以及养殖过程中的非法用药，饲料、藻类中的 SEM 残留及消毒处理等均可能导致水产品中外源性 SEM 残留（图 3）。

1.2.1　水体污染　水生环境中的 SEM 主要来自农田废水、日常用水和工业废水，且 SEM 具有高亲水性，难以通过沉降作用与颗粒结合，容易被雨水冲刷到海中。由于所处环境受到污染，SEM 逐渐在体内积蓄，导致了水产品中的 SEM 含量超标。2010 年首次报告了在水生环境中检测到 SEM，我国某些沿海 SEM 的平均浓度为 14.4 μg/L，水生生物（贝类和鱼类）中的 SEM 水平介于 0.82 ng/g 和 6.46 ng/g 之间[29]，这

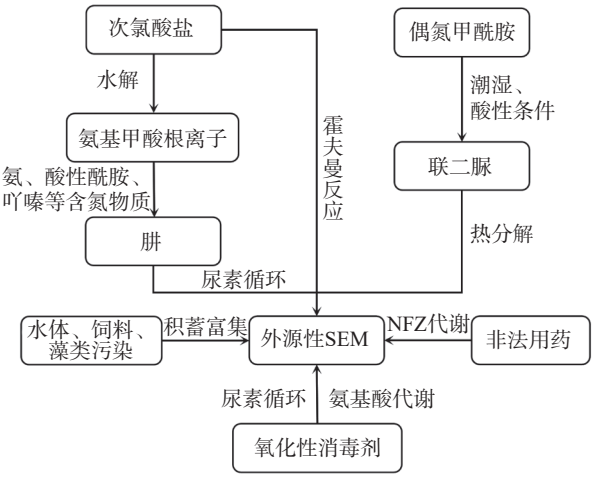


图 3 水产品中外源性 SEM 的来源

Fig.3 Sources of exogenous SEM in aquatic products

不仅影响了水产品的质量和安全,对人类健康也造成了威胁。

Zhang 等[27] 采集了水样进行检测,结果表明淡水样品中 SEM 含量高达 0.162±0.044 ng/mL,远高于海水样品 0.0086±0.0015 ng/mL,且淡水甲壳类水产品中的 SEM 也远高于海水甲壳类水产品。Tian 等[30] 监测了山东莱州湾西部海水、沉积物和生物中 SEM 的分布和含量,他们发现 SEM 在甲壳类水产品中的残留量在 0.32~0.46 μg/kg,且随海水中 SEM 浓度的增加而增加。徐英江等[29] 对山东潮河河口区水体、沉积物和贝类中的 SEM 状况进行了研究,发现调查区域贝类中 SEM 的含量在 0.82~6.46 μg/kg,而水体中 SEM 含量为 0.18~70.6 μg/L、沉积物中 SEM 含量为 0.26~18.9 μg/kg,两种介质中 SEM 的浓度都呈辐射形向外逐渐降低,这说明潮河污水排放是污染的重要来源。Xing 等[31] 将扇贝暴露在含有浓度分别为 10、100 和 1000 μg/L SEM 的海水中(10 ℃, 30 d),探究扇贝组织中 SEM 的积累、分布,发现扇贝中的 SEM 残留与海水中 SEM 浓度呈正相关(P<0.01)。Mccracken 等[32] 测定了不同水域中罗氏沼虾体内 SEM 含量,发现不同生长环境下的罗氏沼虾体内所含 SEM 含量具有一定的差异,肌肉和壳中检测到的 SEM 浓度分别为 0.10~0.12 ng/g 和 3.91~8.88 ng/g。由此可见 SEM 的来源多种多样,当其排放到环境中时会造成水体污染,并在水生生物中积累,造成水产品中 SEM 的污染和残留。

1.2.2 非法用药 NFZ 是一种人工化学合成的广谱抗生素,对大多数真菌和病毒具有较好的杀灭作用,具有广谱抗菌、不易产生抗药性且低成本的特点而被广泛用于水产养殖中[33]。由于 NFZ 的“三致”风险,在美国、欧盟、日本及中国先后规定禁止在畜禽和水产养殖中使用 NFZ,但是由于其价格低廉,仍有发现在养殖过程中非法使用 NFZ 的情况。

赵飞越[34] 通过 NFZ 暴露模拟药物滥用过程,结果表明 NFZ 会造成克氏原螯虾 SEM 含量的显著超标(16.20~73.34 μg/kg),且产生的 SEM 主要富集在克氏原螯虾肌肉中。Van 等[10] 用含有一定浓度 NFZ(50 mg/L)的海水浸泡虾,检测发现虾壳中的结合态 SEM 浓度达到 50 ng/g,显著高于对照组虾壳中的 SEM 浓度(27.2 ng/g),这表明滥用 NFZ 会导致虾体内 SEM 超标,但 Phansawat 等[35] 用添加了 NFZ 的饲料喂养虾却未发现虾壳中的 SEM 超标,这些两种实验结果相互矛盾的原因可能与不同的实验条件及不同给药途径有关。例如,虾养殖期间口服 NFZ 药物后,代谢物 SEM 可能从血淋巴液分布到肌肉,而很难到达外壳;而在虾的养殖水体中使用 NFZ 后,NFZ 可直接与虾壳接触,并且代谢产物 SEM 积聚在虾壳中,从而出现了不同的实验结果,但导致这种差异存在的原因仍需要进一步的实验加以证实。截至目前已有诸多研究结果表明滥用 NFZ 会造成水产品中 SEM 含量超标,且 SEM 会与蛋白质结合从而在水产品机体中稳定存在,并且会通过食物链被人体摄入,造成食用风险,因此有关部门应进一步完善监督管理措施,严厉打击水产养殖过程中 NFZ 等药物的违法使用。

1.2.3 饲料及藻类污染 尽管养殖日本沼虾中 SEM 含量普遍高于野生日本沼虾,证明水产品中内源性 SEM 的存在,但由于饲养条件复杂,无法完全排除养殖环境以及饲料、底泥等外在条件的影响。氮源是影响藻类生长和蛋白质含量的关键因素之一,有研究表明,氮水平对类藻生长及其代谢产物有重要影响[36],渔民在水产品的养殖过程中也会在养殖池塘里面泼洒尿素以促进池塘底部的水草等植物的生长。田秀惠[37] 对山东省金城湾、四十里湾和莱州湾西部进行调查发现 SEM 在藻类中有很强的富集能力,富集系数在 145.3~200.0 之间。由于对虾的养殖过程中会在饲料里添加微藻以促进幼虾的生长[38],因此可能通过转化和富集藻类或其他生物体中的氨基酸来积累 SEM[32]。丁军伟等[39] 发现水生动物摄入含有 NFZ 的饲料后,无法实现完全代谢,且代谢物 SEM 会长期残留,最终对人体产生毒副作用。更有调查表明在许多养虾场的沉积物和水样中发现了高水平的 SEM 残留物,这可能是由于养殖使用的饲料沉积以及养殖场周围污染水体的引入造成[40]。因此在水产品的养殖过程中应杜绝使用含有 NFZ 的饲料,防止 SEM 在水体中残留而被藻类富集,并注意合理添加氮肥,避免水体中的尿素含量过高导致水产品在养殖过程中产生 SEM。

1.2.4 消毒处理与食品添加剂的影响 由于水产品在贮藏、运输过程中易受外源微生物和空气氧化等因素影响而发生腐败变质,不仅造成产品货架期缩短与经济损失,还可能对消费者身体健康产生威胁,因此许多商家会对水产品进行消毒杀菌或保鲜处理,以保持水产品的品质,延长货架期[41]。研究表明 SEM 可以在加工后的不同食品中形成[42−43],且一些食品添

加剂在加工过程中代谢分解或迁移也可能导致水产品中 SEM 含量升高[44]。

1.2.4.1　次氯酸钠消毒处理产生　次氯酸钠主要通过其极强的氧化性使细菌蛋白质变性, 从而达到杀菌的目的[45], 因而在水产品加工过程中得到广泛的应用, 但次氯酸钠处理过后的样品在高 pH 条件下可以通过霍夫曼反应产生 SEM[46]。次氯酸钠溶液中的氨基甲酸根离子可能与水产品中的氨或酸性酰胺反应生成肼, 肼再与尿素和其他化合物通过尿素循环反应形成 SEM[1]。此外, 次氯酸钠消毒剂的使用和残留与克氏原螯虾中的含氮物质反应也会造成克氏原螯虾组织中 SEM 的产生, 且容易在肝胰腺中形成富集[34], 因此在实际养殖和消毒中要严格按照配比配置消毒液, 并做好养殖用具的清洗工作, 防止残留的次氯酸钠导致的 SEM 的残留。

除了水产品外, 冰鲜鸡肉在加工、运输及贮藏过程中也容易被微生物污染致使其货架期缩短, 因此目前肉鸡行业主要通过向预冷池中连续添加次氯酸钠对宰后鸡胴体进行消毒, 以减少表面初始微生物数量[47]。早前美国发现鸡肉在冷冻过程中 SEM 含量不断增加[48], 原因是使用了氧化性的抗菌剂[49]。Xing 等[50] 在使用了次氯酸钠加工后的即食燕窝样品中检测到了 SEM。还有研究指出在角叉菜聚糖中也检测到了 SEM, 这是因为其生产过程中通常需要加入含有 0.050%~0.10% 活性氯的次氯酸盐溶液对海藻进行漂白处理[51]。沈金灿等[52] 探究了不同条件对次氯酸钠消毒剂处理后的鸡爪中 SEM 产生量的影响, 结果显示浸泡温度和有效氯质量浓度、浸泡液 pH 越高, 鸡爪中产生 SEM 的量也显著升高, 且随处理时间的延长而逐渐增大, 在 8 h 后趋于稳定。次氯酸钠作为食品消毒剂具有“双刃剑”效应, 在有效杀菌的同时, 其本身的残留以及引发的一系列化学反应也是导致水产品中 SEM 产生的原因之一, 因此在水产品加工中应注意合理使用次氯酸钠, 严格控制其使用条件, 避免 SEM 的产生。

1.2.4.2　酸性电解水消毒处理产生　酸性电解水的制备过程会产生大量的有效氯和活性氧, 具有良好的杀菌能力, 因此常用于水产品的保鲜中[53], 由于具有与次氯酸钠相似的有效氯成分(次氯酸根、次氯酸等)[54], 因此用酸性电解水处理水产品的过程中也可能会产生 SEM, 但其中的有效氯具有时效性且极不稳定, 导致 SEM 的生成量没有明显的规律性。Yu 等[55] 采用不同浓度的酸性电解水处理氨基酸和尿素等含氮物质, 结果显示, 经浓度为 110 mg/L 的酸性电解水处理的精氨酸中产生少量的 SEM, 当有效氯浓度≥100 mg/L 时, 尿素基团会被氧化形成 SEM。马姗[56] 探究了酸性电解水对凡纳对虾 SEM 生成量的影响, 结果发现使用有效率浓度分别为 35 和 110 mg/L 的酸性电解水处理后, 虾壳 SEM 含量分别在 36 和 12 h 达到最大值 2.72 和 2.54 μg/kg, 但由于酸性电解水中的有效氯具有时效性, 随着浸泡时间的延长其中的有效氯浓度呈下降趋势, 虾中 SEM 的产生量降低。未来应深入研究酸性电解水与水产品中 SEM 产生量的关系, 采取合适的处理条件对水产品进行杀菌和保鲜。

1.2.4.3　其他氧化性消毒剂的影响　除了次氯酸钠和酸性电解水外, 其他具有氧化性的化学消毒剂, 如: 双氧水、臭氧等, 也可能对水产品中的 SEM 含量产生影响。有研究指出 SEM 可通过吖嗪中间体从天然食品化合物中生成, 与食品中的过氧化氢、次氯酸盐或氧气发生反应生成肼, 在含有尿素类化合物的情况下生成 SEM[1]。魏云计等[57] 在宠物食品生产过程中对每道工序产生的半成品进行了检测分析, 在添加双氧水工序中的半成品中检测到了 SEM, 其原因可能是因为双氧水会使原料中的动物组织释放出游离氨基酸, 其分解可能会产生 SEM, 且氨基酸代谢过程中会产生尿素和氨, 与双氧水在特定条件下可以发生反应, 进而生成 SEM。马姗[56] 用 3 mg/L 和 5 mg/L 的臭氧水对凡纳对虾进行处理, 两种不同浓度的臭氧水处理均有 SEM 生成, 处理 10 min 后 SEM 的生成量分别为 4.30 μg/kg 和 0.80 μg/kg, 之所以出现浓度越高的臭氧水处理后 SEM 的产生量更少的现象, 可能是因为高浓度臭氧水的强氧化性使虾体内发生了其他化学反应所导致。由此可见, 具有氧化性的化学消毒剂是导致水产品在加工过程中产生 SEM 的主要原因, 这些消毒剂的氧化作用引起水产品中的氨基酸、吖嗪中间体等反应, 与尿素结合生成 SEM, 未来在水产品的生产过程中应严格控制氧化性消毒剂的使用。

1.2.4.4　偶氮二甲酰胺分解产生　偶氮二甲酰胺(Azodicarbonamide, ADC)在食品加工中作为食品添加剂添加入面粉中, 以改善面粉的强度和柔韧性[58], 市面上常见的面包虾等经过加工出售的水产品中使用了含有 ADC 的面粉也是导致 SEM 超标的原因之一。ADC 可以在潮湿和酸性条件下转化为联二脲(Biurea, BIU), BIU 通过热分解生成 SEM[59]。郭思言等[60] 将 BIU 作为判别 SEM 是否由 ADC 降解产生的标志性物质, 结果表明用含有 ADC 的面粉处理后的炸虾肉中的 SEM 一部分来源于 NFZ 代谢, 另一部分来源于面粉中 ADC 的降解产生。近年来, 在虾加工过程中常出现原料虾中未检出药物残留, 但加工后的产品却发现 SEM 含量超标, 尤其在面包虾产品中常有出现, 且 ADC 添加量、加水量、加热温度和加热时间等条件对产生的 SEM 含量也有影响[58]。黄晓姗[61] 探究了温度对 ADC 转化为 SEM 的影响, 结果表明随着烘烤温度的增加, SEM 的生成量明显上升, 当烘烤温度达到 200 ℃ 时, SEM 的生成率最高(0.094%), 但当温度继续升高后, 可能由于过高的温度会使得生成的 SEM 进一步分解, 从而导致 SEM 的生成率急剧下降。由此可见, 使用含有 ADC

的面粉制作面包虾等，会导致加工后的产品中产生 SEM。

2 水产品中 SEM 的产生机理及代谢规律

2.1 水产品中 SEM 的产生机理

代谢组学是近年来发展起来的新兴技术，通过全谱代谢轮廓差异分析，研究组间样品小分子代谢产物（分子量<1500 Da）的差异[12]。代谢组学技术以内源性的所有小分子代谢物为分析对象，采集经由不同药物干扰或不同暴露程度的生物样本（组织、内脏、血液、尿液等），与阴性样本比较代谢指纹图谱差异[62]，更为全面系统追踪整体代谢变化，最大限度地挖掘样品信息，结合化学计量学，发现新的代谢标志物，建立新的残留表征技术和分析方法[63]。由于水产品中的 SEM 有多种来源途径，其产生机理也复杂多样，研究起来具有一定难度，随着代谢组学技术的进一步发展，目前已有诸多研究人员运用代谢组学对水产品中 SEM 的产生机理进行研究，为今后水产品中 SEM 的控制和消除奠定了基础，在一定程度上促进我国水产品养殖业和进出口贸易的健康发展。

高芳芳[64] 通过对罗氏沼虾进行不同浓度的精氨酸饲喂实验和尿素胁迫实验证明精氨酸和尿素能够显著增加罗氏沼虾中 SEM 的检出含量，通过非靶向代谢组学研究表明，精氨酸和尿素是罗氏沼虾 SEM 产生的关键前体物质，通路归属分析表明尿素胁迫显著改变了罗氏沼虾中氨基酸和核苷酸的代谢和合成，进而影响了罗氏沼虾中鸟氨酸循环的关键物质，从而产生 SEM。Li 等[65] 采用代谢组学和转录组学相结合的方法，系统研究了尿素胁迫下罗氏沼虾 SEM 的内源产生机制，揭示了尿素胁迫显著破坏了罗氏沼虾体内甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢和 α-酮戊二酸代谢关键途径，从而突出了氨基酸代谢在 SEM 形成中的作用。陈霞霞等[66] 采用超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱代谢组学技术分析 SEM 的代谢组学特征，并通过体外模拟验证实验检验相关通路物质产生 SEM 的可能情况，研究结果发现 NFZ 胁迫影响克氏原螯虾体内牛磺酸及次牛磺酸代谢、精氨酸生物合成、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢及 D-谷氨酰胺和 D-谷氨酸代谢相关的通路，并通过体外模拟氨基酸代谢途径验证了精氨酸、丙氨酸、牛磺酸、次牛磺酸、天冬氨酸及 D-谷氨酰胺在尿素结合下氧化后能够产生 SEM。综上所述，水产品中 SEM 的产生机理主要是由尿素、NFZ 以及其他外界条件的胁迫影响氨基酸代谢和尿素循环的关键物质及相关代谢通路，进而产生 SEM（图 4）。

2.2 水产品中 SEM 的代谢规律

研究表明，NFZ 在肌肉中的消除半衰期较短[66-67]，而 SEM 在肌肉中的消除半衰期比 NFZ 长得多，约为 7~15 d[68]。除了不同物种之间代谢速率不同的影响外，温度对于代谢时间也有一定的影响[69]，机体的温度越高，代谢速率越快，药物消除的速度也就越快[70]，虾和鱼等水生动物是变温动物，体温与周围的水相似，因此体内的 SEM 的代谢速度较慢[71]。汤水粉等[33] 在菊黄东方鲀养殖过程中以剂量为 0.05 g/m^3 的 NFZ 对养殖池进行全池泼洒，定期随机采集菊黄东方鲀肌肉样品测定肌肉中的 SEM 质量浓度，结果发现菊黄东方鲀体内 SEM 消除速率呈现先上升后下降的趋势，并在较长时间内维持一定的浓度范围，直至实验结束（77 d）时仍检出约 2.50 μg/kg 的 SEM 残留量。Xing 等[31] 研究发现当扇贝体内 SEM 积累到平衡点时，生物富集因子（BCF）与所处环境中 SEM 浓度存在显著的负相关（P<0.01），扇贝的 BCF 随着所处环境 SEM 浓度的增加而降低，这很可能与代谢功能有关，由于水生动物可以显著提高其抗氧化酶活性，以减少污染物及其代谢物造成的损害[72]，暴露于高浓度 SEM 环境中会导致排泄时间延长，因此扇贝通过自我调节做出反应以减少机体的损伤。李东利等[73] 以 30 mg/kg 体重剂量投喂对虾 NFZ 药饵（5 d）后，检测对虾各组织中 SEM 浓度和

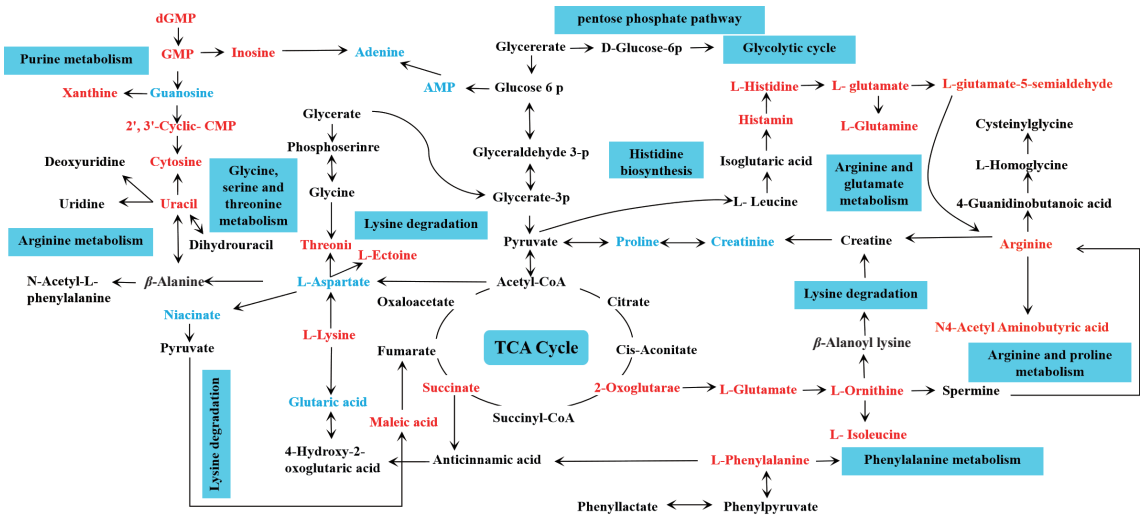


图 4 水产品中 SEM 的产生机理

Fig.4 Formation mechanism of SEM in aquatic products

肝胰腺中的药物代谢酶活性，结果表明，SEM 在对虾体内消除半衰期较长，并对乙氧基香豆素-O-脱乙基酶（ECOD）、氨基比林-N-脱甲基酶（APND）酶活性可能有“抑制后效应”，高浓度 SEM 抑制 ECOD 和 APND 的活性，当 SEM 降低到一定浓度时 ECOD 和 APND 酶活性又开始升高，因此推测 ECOD、APND 可能参与 NFZ 在对虾体内的代谢消除。

3　水产品中 SEM 检测方法

大多数 SEM 以蛋白质结合的形式存在于生物组织中，在酸性条件下水解以从样品中释放，然后经衍生化反应后提取、纯化和测定。目前常用的 SEM 检测方法包括高效液相色谱法（HPLC）[74]、高效液相色谱-串联质谱法（HPLC-MS）[75]、免疫测定法（ELISA）[76] 和电化学检测法[77]（表 1~表 2）。

3.1　HPLC 及其联用技术

高效液相色谱-串联质谱（HPLC-MS/MS）分析方法具有良好的分离能力和优越的定性定量分析性能，广泛应用于 NFZ 代谢物及其他水产养殖常用药物代谢物的检测分析[78]。Leitner 等[79] 首先通过优化前处理、色谱条件和质谱建立了 HPLC-MS/MS 检测 SEM 的方法。Yu 等[80] 建立了一种简单灵敏的高效液相色谱-荧光检测法（HPLC-FLD），用于检测虾样品中的代谢物，检测限在 0.20~0.30 μg/kg 之间。Du 等[81] 采用 HPLC-FLD 同时检测到虾体内的 4 种 NFZ 代谢物，检测限为 0.20~0.26 μg/kg。由于甲壳类水产品中的 SEM 具有游离态和结合态两种存在形态，一般检测方法难以区分，徐磊等[82] 用 66.7% 甲醇水溶液对游离态 SEM 进行洗脱，再运用 HPLC-MS/MS 检测出了日本沼虾不同组织中总 SEM 和结合态 SEM 含量，为后续进一步研究日本沼虾中 SEM 本底特征、存在形态及分布特征奠定了一定的科学基础。

由于 SEM 分子结构小，缺乏可检测的 UV 和荧光发色团，且其高水溶性和在反相色谱中较差的保留性能，使其在质谱仪上直接检测时易受共存小分子的干扰，检测时灵敏度较低。在新发布的标准（GB 31656.13-2021）中，使用 2-硝基苯甲醛作为衍生剂，需要在 37 ℃ 摇床上振摇 16 h。尽管衍生化反应增加了衍生化 SEM 的疏水性，使它在有机溶剂中比在水基溶液中更可溶，可用于从水性杂质中提取和分离水溶性目标分子，提高色谱保留性能和检测灵敏度，但在实际工作中，水解衍生反应时间的延长严重影响了检测效率。为了解决这一问题，许多研究报道了辅助水解和衍生化技术来缩短反应时间。例如：采用微波衍生、自动固相萃取和 LC-MS/MS 技术相结合的方法，可在 6 h 内测定水产品中的 NFZ 代谢物[83]，该方法的准确度高，相对标准偏差≤8.3%。

3.2　免疫分析方法

免疫分析方法具有反应灵敏、特异性高、技术要求相对较低、时间短等优点，广泛用于食品安全、环境和临床检测，但由于可能会产生假阳性或假阴性的

表 1　水产品 SEM 检测方法优缺点及应用范围比较

Table 1　Comparison of advantages, disadvantages, and application scope of SEM detection methods in aquatic products

检测方法	优缺点	应用范围
HPLC	检测灵敏度高，标准性、可靠性好；但衍生化反应时间长，检测效率低	适用于NFZ代谢物及其他水产养殖常用药物代谢物的检测分析
HPLC-MS	高灵敏度、选择性，具备良好分离能力和分析性能；但仪器昂贵，维护成本高，实验操作复杂	适用于水产品中SEM的严格定性、定量及微量分析
ELISA	反应灵敏、特异性高、检测时间短；但制备困难，易产生假阳性或假阴性结果	适用于大批量水产品快速分析及样本初筛
电化学检测	准确性、灵敏度和重现性高；但抗干扰能力较差，方法多处于实验室阶段	适用于水产品快速分析和检测，开发便携式检测设备

表 2　水产品 SEM 检测技术

Table 2　SEM detection technology in aquatic products

方法	检测样品	检出限	回收率(%)	参考文献
HPLC-FLD	面包	0.20~0.30 μg/kg	93.6~94.0	[80]
	虾		94.5~98.0	
	对虾		92.5~97.5	
HPLC-FLD	虾	0.20~0.26 μg/kg	84.7~94.7	[81]
HPLC-MS/MS	日本沼虾	0.25~0.5 μg/kg	83.4~112.5	[82]
LC-MS/MS	虾	0.043 ng/g	96.1~100.0	[83]
	鲇鱼	0.013 ng/g	96.6~104.0	
酶联免疫吸附测定法	鱼肉	0.236 μg/kg	75~120	[85]
	虾	0.229 μg/kg		
背景荧光猝灭免疫层析测定法	鱼肉	0.12 μg/kg	73.5~109.2	[76]
	虾肉	0.15 μg/kg		
电化学检测	虾肉	0.025 μg/kg	83.16~93.4	[87]
GC-C-IRMS	虾	0.21 μg/kg	74~95	
	毛蟹	0.54 μg/kg	71~92	

错误结果[84], 通常需要 HPLC-MS/MS 进行验证, 因此制备稳定的信号标记对于提高免疫测定的准确性和灵敏度是十分必要的。徐冬梅等[85] 建立动物源性食品中 NFZ 代谢物酶联免疫吸附测定方法, 检测灵敏度为 0.03 mg/kg, 在 0.03~2.43 mg/L 范围内呈线性, 鱼肉组织样本、虾肉组织样本的检测限分别为 0.236 μg/kg 和 0.229 μg/kg, 回收率均在 75%~120% 之间。Wu 等[76] 构建了一种背景荧光猝灭免疫层析测定法(bFQICA), 运用金纳米粒子(AuNPs)猝灭背景荧光基板的荧光, 使用便携式荧光免疫定量分析仪和内置标准曲线的二维码可以直接显示 SEM 的定量结果, 使得检测过程更加高效便捷, 该技术对鱼肉和虾肉中 SEM 的检测限分别为 0.12 和 0.15 μg/kg, 线性范围为 0.08~0.41 μg/L, 回收率在 73.5% 至 109.2% 之间, 变异系数小于 15%, 整个检测过程仅需 13 min。为了满足更高的检测要求, 未来还需要不断开发超灵敏、高准确性、具有多种检测能力的免疫分析技术, 利用高质量的抗体和新的特异性识别元件提升检测性能[86]。此外, 制备稳定的信号标记、提高免疫测定的准确性和灵敏度、发展多重检测技术也是今后免疫分析发展的必然趋势。

3.3 其他检测技术

电化学检测技术是一种快速而直接的方法, 依赖于界面反应和信号识别传感, 具有高准确度、灵敏度和重现性, 目前已广泛用于食品安全快速分析和检测。Yu 等[87] 使用由分子印迹聚合物、羧基化单壁碳纳米管和壳聚糖组成的复合材料作为电化学传感界面来检测 SEM, 检测限为 0.025 μg/kg。He 等[88] 通过用纳米金/石墨烯复合材料修饰薄膜金电极开发了一种用于检测 NFZ 和 SEM 的电化学传感器, NFZ 的检出限为 0.13 μmol/L, SEM 的检出限为 0.0047 μmol/L。

除了电化学检测技术之外, 还有许多快速、便携的 SEM 检测技术。Wang 等[89] 基于吡咯并吡咯花菁荧光探针(PPCy-1)固定化试纸构建了一个智能手机辅助便携式测试平台并带有彩色扫描 APP, 用于实时和现场检测 SEM, 10 min 即可完成检测, 检出限为 0.18 μmol/L, 为可视化 SEM 检测提供了低成本、方便、快速的分析方法, 在食品安全监测中具有潜在的应用价值。Yin 等[90] 使用优异的光热 TA/MoS2 制造了一种具有双读数(光热/比色)的新型比色免疫层析分析技术, 用于蜂蜜样品中的 SEM 检测, 这种双信号读出模式可以显著提高免疫测定的准确性和多功能性, 显著降低了检测成本和周期时间。Cheng 等[91] 制备出一种新的多模态信号示踪剂, 成功应用于开发检测 NFZ 代谢物的多模态测流免疫层析测定(LFIA)平台。Wu 等[13] 开发了化合物特异性气相色谱-燃烧-同位素比质谱(GC-C-IRMS)分析结合两步柱前衍生化法测定虾蟹中 SEM 的氮稳定比, 通过氮稳定同位素比值分析(NSIRA)追踪水产品中的内源性 SEM 和外源性 SEM。SEM 分子(CH_5N_3O)含有三个氮原子, 氮的质量百分比高达 56%, 作为 NFZ 的降解产物, 外源性 SEM 分子中的三个氮原子完全来自其前体, 与之相比的内源性 SEM 由生物含氮氨基酸或组织蛋白代谢的氮稳定同位素比值显著升高, 这两种 SEM 分子之间氮稳定同位素比值的变化可能是体内 SEM 来源判定的特定指标, 这为克服内源性 SEM 对于相关食品安全法律判决的干扰提供新思路和新方法。

4 SEM 的控制方法

鉴于我国水产品中 SEM 残留超标现象时有发生, 已严重影响我国水产品的出口贸易, 并对我国水产养殖业造成了较大冲击。以下针对水产品中 SEM 的几种典型来源途径, 提出相应的控制措施, 旨在从源头有效控制 SEM 污染, 为我国水产养殖业及进出口贸易的可持续发展提供参考建议。

4.1 养殖环境与加工过程的控制

ADC 是塑料虾筐、泡沫、橡胶制品等中常用的发泡剂, 在食品行业中还可作为面粉改良剂添加到面粉等小麦制品中[92], 因此, 为了防止 ADC 污染导致的 SEM 超标, 应尽可能选用未添加 ADC 的运输容器, 加工过程中应避免使用添加了 ADC 的面粉, 有关部门应修改完善 ADC 的限量标准或研究开发其他更安全可靠的食品添加剂。

此外, 由于食品加工行业中动物制品、豆制品以及水产品加工过程中所形成的废水; 制药生产过程中使用的原料、溶剂、催化剂; 以及化工行业合成氨、尿素等所产生的废水等都具有较高的氨氮含量, 这些高氨氮废水的排放对水生环境具有较大的危害, 因此有关企业及单位应将加强对高氨氮废水的整治工作, 如: 添加硝化促进剂, 遵循共代谢原理及污水处理原理, 结合微生物、营养学、生理学等多个不同学科配制硝化促进剂[93]。合理有效地控制废水的排放, 对养殖水体中尿素含量、亚硝酸盐和 pH 等进行严格控制, 防止水产品受所处水生环境中 SEM 的污染。

4.2 加强管理, 优化检测方法

由于甲壳类水产品中会产生内源性 SEM, 且热处理过程导致甲壳类水产品中的 SEM 含量显著增加, 无法准确判断其中的 SEM 是否是由于滥用药物导致, 根据《农业农村部关于印发〈2022 年国家产地水产品兽药残留监控计划〉〈2022 年国家水生动物疫病监测计划〉的通知》(农渔发〔2022〕7 号), 对虾、蟹中 NFZ 代谢物 SEM 残留不作判定[94], 许多养殖者趁此钻了空子, 仍然在养殖过程中非法使用 NFZ。近年来, 研究人员提出了其他潜在的 NFZ 代谢物作为检测非法使用 NFZ 的标志物[46,95], 这些代谢物包括 5-硝基-2-糠醛(5-NF)、5-硝基-2-糠醛-2,4-二硝基苯肼以及谷胱甘肽和 NFZ 代谢物形成的复合物。其中, 5-NF 是最常提及的潜在代谢物, 但由于其光敏性和空气敏感性, 检测该物质具有一定的难度。Wang

等[67]在用 NFZ 饲喂鲶鱼后观察到氰化物代谢物在肌肉中的半衰期为 81 h，残留期超过 14 d，证明其作为确定水产品中非法使用 NFZ 的新标志物的可行性。Zhang 等[96]提出采用 5-NF 作为标记代谢物，用 2,4-二硝基苯肼（DNPH）进行柱前衍生以区分内源性 SEM 和 NFZ 衍生的 SEM。未来相关单位应加强 SEM 风险监测与监督抽查的数据积累，严格执法，加大违法处理力度，对养殖场所实施注册登记或备案管理，保证监管的有效性。此外还应强化对 NFZ 药物的管理，同时开发替代 NFZ 的新型抗菌药物。

4.3　关键物质与代谢途径的调控

根据目前研究表明，水产品中的内源性 SEM 可能由氨基酸代谢与尿素循环过程产生，尿素、肼、精氨酸、组氨酸、瓜氨酸、赖氨酸和谷氨酰胺等可能是 SEM 产生的主要前体物质[20]，内源性 SEM 的形成与精氨酸的酰胺基及瓜氨酸和尿素的酰胺结构密切相关[22]。但目前关于从水产品代谢过程中采取方法控制 SEM 的研究鲜有报道，未来可进一步深入研究代谢过程中相关物质的变化，通过减少或去除某些关键前体物质，从而达到控制或减少 SEM 产生的目的。

5　总结与展望

水产品中 SEM 的来源复杂多样，非法使用 NFZ 药物、所处环境污染、加工过程中的化学反应以及自身的氨基酸代谢、尿素循环过程中均可能导致水产品中 SEM 产生和积累。近年来，代谢组学、转录组学和高效液相色谱等技术的发展为研究 SEM 的产生机理以及水产品中 SEM 的检测技术提供了有力支持，但在实际应用中仍面临检测效率低、内源性与外源性 SEM 难以区分等问题，且由于各种快速检测技术尚未普及，加之成本和技术方面的限制，在实际运用方面仍存在一定局限性。此外，关于 SEM 的产生机理的研究相对较少，SEM 的控制措施也仅限于从外源性 SEM 来源途径进行干预，目前未见有研究报道从水产品自身代谢过程对 SEM 进行控制。深入分析研究水产品中 SEM 的产生机理及消除方法对于保障我国水产养殖业健康发展具有重大意义，未来应进一步明确内源性 SEM 的产生途径和关键前体物质，优化检测技术，开发高灵敏度、高特异性的快速检测方法，尤其是能够区分内源性和外源性 SEM 的检测手段，以满足实际监管需求，完善相关法律法规，加大对非法使用 NFZ 药物的打击力度，保障水产品的质量安全和国际贸易的健康发展。

© 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] ABERNETHY G A. Generation of semicarbazide from natural azine development in foods, followed by reaction with urea compounds[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2015, 32(9): 1416−143.

[2] 田秀慧, 郑伟云, 徐英江, 等. 不同来源氨基脲在刺参体内的富集和消除规律研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 29−37. [TIAN X H, ZHENG W Y, XU Y J, et al. Rules of accumulation and elimination of semicarbazide residue from different sources in *Apostichopus japonicus*[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(1): 29−37.]

[3] LEITNER A, ZÖLLNER P, LINDNER W. Determination of the metabolites of nitrofuran antibiotics in animal tissue by high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2001, 939(1−2): 49−58.

[4] COOPER K M, MULDER P P J, VAN RHIJN J A, et al. Depletion of four nitrofuran antibiotics and their tissue-bound metabolites in porcine tissues and determination using LC-MS/MS and HPLC-UV[J]. Food Additives and Contaminants, 2005, 22(5): 406−414.

[5] JOHNSTON L, CROFT M, MURBY J, et al. Preparation and characterisation of certified reference materials for furazolidone and nitrofurazone metabolites in prawn[J]. Accreditation and Quality Assurance, 2015, 20(5): 401−410.

[6] TITTLEMIER S A, VAN DE RIET J, BURNS G, et al. Analysis of veterinary drug residues in fish and shrimp composites collected during the Canadian Total Diet Study, 1993−2004[J]. Food Additives and Contaminants, 2007, 24(1): 14−20.

[7] VASS M, DIBLIKOVA I, CERNOCH I, et al. ELISA for semicarbazide and its application for screening in food contamination[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 608(1): 86−94.

[8] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业部公告第235号[EB/OL]. (2002-12-24)[2023-11-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201006/t20100606_1535491.htm. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Announcement No. 235 of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China [EB/OL]. (2002-12-24) [2023-11-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201006/t20100606_1535491.htm.]

[9] 于慧娟, 李冰, 蔡友琼, 等. 液相色谱−串联质谱法测定甲壳类水产品中氨基脲的含量[J]. 分析化学, 2012, 40(10): 1530−1535. [YU H J, LI B, CAI Y L, et al. Determination of semicarbazide content in crustaceans by liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012, 40(10): 1530−1535.]

[10] VAN POUCKE C, DETAVERNIER C L, WILLE M, et al. Investigation into the possible natural occurence of semicarbazide in macrobrachium rosenbergii prawns[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(5): 2107−2112.

[11] 朱盼盼. 虾中内源性和外源性氨基脲的存在形态及分布特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2022. [ZHU P P. Morphology and distribution characteristics of endogenous and exogenous semicarbazide in shrimp[D]. Qingdao: Qingdao University, 2022.]

[12] LU L X, REN L H, JIANG L S, et al. Integrative proteomics and metabolomics reveal the stress response of semicarbazide in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 992753.

[13] WU H Z, LIU Z, ZHANG H, et al. Identification of endogenous and exogenous semicarbazide (SEM) in crustacea aquatic products using compound-specific nitrogen stable isotope ratio analysis (NSIRA)[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 119: 105257.

[14] 舒秀君, 程波, 徐娟娟, 等. 日本沼虾养殖过程中氨基脲存在特征研究[J]. 淡水渔业, 2020, 50(3): 11−16. [SHU X J, CHENG

B, XU J J, et al. Study on the characteristics of semicarbazide (SEM) in *Macrobrachium nipponense* during the culture period[J]. Freshwater Fish, 2020, 50(3): 11−16.]
[15] 杨慧荣, 谢海平, 胡鲲, 等. 牛蛙水产品中呋喃西林代谢物氨基脲的内源性分析[J]. 农产品质量与安全, 2024(5): 33−37. [YANG H R, XIE H P, HU K, et al. Endogenous analysis of nitrofurazone metabolite semicarbazide in bullfrog aquatic products[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2024(5): 33−37.]
[16] YU W L, LIU W H, TIAN W R, et al. Semicarbazide universality study and its speculated formation pathway[J]. Journal of Food Safety, 2018, 39(1): 1−8.
[17] SAARI L, PELTONEN K. Novel source of semicarbazide: Levels of semicarbazide in cooked crayfish samples determined by LC/MS/MS[J]. Food Additives and Contaminants, 2004, 21(9): 825−832.
[18] HOENICKE K, GATERMANN R, HARTIG L, et al. Formation of semicarbazide (SEM) in food by hypochlorite treatment: Is SEMa specific marker for nitrofurazone abuse?[J]. Food Additives and Contaminants, 2004, 21(6): 526−537.
[19] LI B, YU H J, YANG Y L. Determination and investigation the nitrofurazone's metabolite semicarbazide in macrobrachium nipponese prawns[J]. Science Discovery, 2015, 3(2): 10−16.
[20] ZHANG Y, CHEN X X, YU H X, et al. Investigation of the conversion mechanism of endogenous semicarbazide in shrimp on the amino acid level[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 249: 114393.
[21] STADLER R H, VERZEGNASSI L, SEEFELDER W, et al. Why semicarbazide (SEM) is not an appropriate marker for the usage of nitrofurazone on agricultural animals?[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2015, 32(11): 1842−1850.
[22] YU W L, LIU W H, SANG Y X, et al. Analysis of endogenous semicarbazide during the whole growth cycle of litopenaeus vannamei and its possible biosynthetic pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(29): 8235−8242.
[23] 袁媛. 微波优化法南极磷虾甲壳素的制备及壳聚糖的性质研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [YUAN Y. Preparation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) chitin by microwave optimization and properties of chitosan[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
[24] 彭婕, 吕磊, 喻亚丽, 等. 中华绒螯蟹中内源性氨基脲的产生途径研究[J]. 淡水渔业, 2019, 49(3): 108−112. [PENG J, LÜ L, YU Y L. Study on the formation approach of endogenous semicarbazide in *Eriocheir sinensis*[J]. Freshwater Fisheries, 2019, 49(3): 108−112.]
[25] 彭婕, 甘金华, 陈建武, 等. 中华绒螯蟹中氨基脲的分布及产生机理分析[J]. 淡水渔业, 2015, 45(4): 108−112. [PENG J, GAN J H, CHEN J W. Distribution and formation mechanism of semicarbazide in *Ericocheir sinensis*[J]. Freshwater Fisheries, 2015, 45(4): 108−112.]
[26] 胡梦月, 王善宇, 薛勇, 等. 即食虾干加工过程风味变化[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(6): 10−16. [HU M Y, WANG S Y, XUE Y. Changes in flavor characteristics of dried shrimps during processing[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2020, 10(6): 10−16.]
[27] ZHANG X J, CHEN S, XU H X, et al. Identification and occurrence of endogenous semicarbazide in prawns and crabs from Zhejiang Province, China[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2016, 1−7.
[28] 曹爱玲, 陈怡琳, 蔡路昀, 等. 不同烘干温度对甲壳类水产品中氨基脲检出量的影响[J]. 中国动物检疫, 2020, 37(1): 94−99. [CAO A L, CHEN Y L, CAI L Y. The effects of different drying temperatures on the detectable amount of semicarbazide in crustacean aquatic products[J]. Chinese Journal of Animal Quarantine, 2020, 37(1): 94−99.]
[29] 徐英江, 孙玉增, 宋秀凯, 等. 潮河口邻近海域氨基脲污染现状调查研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(4): 538−542. [XU Y J, SUN Y Z, SONG X K, et al. Survey of semicarbazide contamination in coastal waters adjacent to the chaohe river estuary[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2010, 41(4): 1−5.]
[30] TIAN X H, XU Y J, SONG X K, et al. Temporal and spatial distribution of semicarbazide in western Laizhou Bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 112(1−2): 393−398.
[31] XING L H, SUN W H, SUN X J, et al. Semicarbazide accumulation, distribution and chemical forms in scallop (*Chlamys farreri*) after seawater exposure[J]. Animals, 2021, 11(6): 1500.
[32] MCCRACKEN R, HANNA B, ENNIS D, et al. The occurrence of semicarbazide in the meat and shell of Bangladeshi freshwater shrimp[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3−4): 1562−1567.
[33] 汤水粉, 钱卓真, 李雷斌, 等. 呋喃西林代谢物氨基脲在菊黄东方鲀肌肉中的残留消除规律研究[J]. 渔业研究, 2023, 45(5): 490−495. [TANG S F, QIAN Z Z, LI L B, et al. Study on the residue and elimination of furacillin metabolites (semicarbazide) in the muscle of *Takifugu flavidus*[J]. Journal of Fisheries Research, 2023, 45(5): 490−495.]
[34] 赵飞越. 长江中下游克氏原螯虾氨基脲暴露水平及产生途径研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022. [ZHAO F Y. Exposure levels and production pathways of semicarbazide in *Procambarus clarkii* from the middle-lower reaches of the Yangtze River[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.]
[35] PHANSAWAT P, CHUCHIRD N, KEETANON A, et al. Depletion kinetics of semicarbazide in giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) following nitrofurazone oral administration and its occurrence in an aquaculture farm[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2024, 107: 104389.
[36] 张子军, 王俊, 吴桃, 等. 不同氮源对钝顶螺旋藻生长的影响[J]. 农畜产品加工学报, 2024, 44(6): 14−16. [ZHANG Z J, WANG J, WU T. The influence of different nitrogen sources on the growth of *Spirulina platensis*[J]. Journal of Agricultural and Livestock Products Processing, 2024, 44(6): 14−16.]
[37] 田秀慧. 山东北部三个典型养殖海湾氨基脲的时空分布及对刺参的生物毒性效应研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018. [TIAN X H. Temporal and spatial distribution in three typical mariculture bays of northern Shandong province and biological toxicity in *Apostichopus japonicas* of semicarbazide[D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), 2018.]
[38] 刘蕾. 戊糖乳杆菌和钝顶螺旋藻联用对凡纳滨对虾生长、消化、免疫、肠道菌群和抗病力的影响[D]. 海口: 海南大学, 2022. [LIU L. Effects of *Lactobacillus pentosus* combined with *Arthrospira platensis* on the growthperformance, digestive ability, immunity, intestinal microbiotaand disease resistance of *Litopenaeus vannamei*[D]. Haikou: Hainan University, 2022.]
[39] 丁军伟, 邓建朝, 杨贤庆, 等. 4 种硝基呋喃类代谢物在青石斑鱼肌肉中的富集与消除规律[J]. 南方水产科学, 2018, 14(1): 60−67. [DING J W, DENG J C, YANG X Q, et al. Accumulation and elimination of four nitrofuran metabolites in muscle of grouper (*Epinephelus awoara*)[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14

(1)：60−67.］
［40］ JUSTINO C I L, DUARTE K R, FREITAS A C, et al. Contaminants in aquaculture: Overview of analytical techniques for their determination[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2016, 80: 293−310.
［41］ 崔姗, 刘凯, 孙美君, 等. 水产品劣变机制及其保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2024, 38(12): 55−62.［CUI S, LIU K, SUN M J, et al. Research progress on the deterioration mechanism and preservation technologies for aquatic products[J]. Meat Research, 2024, 38(12): 55−62.］
［42］ ČAVLOVIĆ K, VILLAR-LARA J S, REICHEL M, et al. Semicarbazide is a non-reliable marker in spray-dried red blood cells for nitrofurazone abuse[J]. Food Control, 2023, 148: 109650.
［43］ PEREIRA A S, DONATO J L, DE NUCCI G. Implications of the use of semicarbazide as a metabolic target of nitrofurazone contamination in coated products[J]. Food Additives and Contaminants, 2004, 21(1): 63−69.
［44］ 闵宇航, 张文平, 李科, 等. 食品中内源性食品添加剂和化学污染物的本底研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(10): 74−81.［MIN Y H, ZHANG W P, LI K, et al. Background study of endogenous food additives and chemical contaminants in food[J]. China Food Additives, 2024, 35(10): 74−81.］
［45］ ZHANG B Z, KIM J M, PARK J M. Bactericidal effects and quality impact of peroxyacetic acid and sodium hypochlorite on chicken carcasses[J]. Foods, 2024, 13(8): 1204.
［46］ BENDALL J G. Semicarbazide is non-specific as a marker metabolite to reveal nitrofurazone abuse as it can form under Hofmann conditions[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2009, 26(1): 47−56.
［47］ KALIA V C, SHIM W Y, PATEL S K S, et al. Recent developments in antimicrobial growth promoters in chicken health: Opportunities and challenges[J]. Science of The Total Environment, 2022, 834: 155300.
［48］ MTCHELL T R, BERRANG M E, GOLD S E, et al. Survey of meat collected from commercial broiler processing plants suggests low levels of semicarbazide can be created during immersion chilling[J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(5): 798−802.
［49］ JOHNSTON J, DUVERNA R, WILLIAMS M, et al. Investigating the suitability of semicarbazide as an indicator of preharvest nitrofurazone use in raw chicken[J]. Journal of Food Protection, 2020, 83(8): 1368−1373.
［50］ XING Y N, NI H G, CHEN Z Y. Semicarbazide in selected bird's nest products[J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(9): 1654−1659.
［51］ ANTONOPOULOS A, FAVETTA P, HELBERT W, et al. Isolation of *κ-Carrageenan oligosaccharides* using ion-pair liquid chromatography—characterisation by electrospray ionisation mass spectrometry in positive-ion mode[J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(7): 1301−1309.
［52］ 沈金灿, 谢冬冬, 康海宁, 等. 次氯酸钠消毒处理条件对鸡爪中氨基脲残留的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 1−5.［SHEN J C, XIE D D, KANG H N, et al. Influence of disinfection conditions with sodium hypochlorite on semicarbazide residue in chicken claw[J]. Food Science, 2015, 36(10): 1−5.］
［53］ HUANG X L, ZHU S M, ZHOU X M, et al. Preservative effects of the combined treatment of slightly acidic electrolyzed water and ice on pomfret[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 230−236.
［54］ YUAN X, LI Y, MO Q, et al. Antibacterial activity and mechanism of slightly acidic electrolyzed water combined with ultraviolet light against *Salmonella enteritidis*[J]. Food Control, 2023, 148: 109681.
［55］ YU W L, ZHANG C Y, LIU W H, et al. Effect of different preservation treatments on the formation of semicarbazide in *Litopenaeus vannamei* and the potential molecular mechanisms[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105664.
［56］ 马姗. 不同减菌处理对凡纳对虾中氨基脲生成影响及品质研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.［MA S. Study on the effects of different bacteria reduction treatments on semicarbazide production and quality in *Penaeus vannamei*[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.］
［57］ 魏云计, 冯民, 朱臻怡, 等. 宠物食品中氨基脲的测定和来源分析[J]. 饲料研究, 2015(6): 65−67.［WEI Y J, FENG M, ZHU Z Y, et al. Determination and source analysis of aminourea in pet food[J]. Feed Research, 2015(6): 65−67.］
［58］ 蒋志红, 吴晓萍, 王明兴, 等. 偶氮甲酰胺与氨基脲在面粉及面包虾中的形成关系[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 91−95.［JIANG Z H, WU X P, WANG M X, et al. Relationship of added azodicarbonamide with the formation of semicarbazide in heated flour and deep-fried breaded shrimp[J]. Food Science, 2014, 35(19): 91−95.］
［59］ BECALSKI A, LAU B P Y, LEWIS D, et al. Semicarbazide in Canadian bakery products[J]. Food Additives and Contaminants, 2006, 23(2): 107−109.
［60］ 郭思言, 王俊苏, 郝存显, 等. 动物源性面制品中氨基脲来源分析[J]. 食品安全导刊, 2022(28): 65−69,73.［GUO S Y, WANG J S, XI C X, et al. Analysis of semicarbazlde source in animal derived flour products[J]. China Food Safety Magazine, 2022(28): 65−69,73.］
［61］ 黄晓姗. 面粉及其制品中偶氮甲酰胺的检测、降解规律及锑检测方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.［HUANG X S. Study on the determination method and degradation of azodicarbonamide and the determination method of antimony in flour and flour products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.］
［62］ 李晓芹, 方志娟, 张玲, 等. 基于高分辨质谱的分析技术在食品检测中的应用[J]. 食品工业, 2023, 44(11): 154−159.［LI X Q, FANG Z J, ZHANG L, et al. Application of analytical technology based on high resolution mass spectrometer in food detection[J]. The Food Industry, 2023, 44(11): 154−159.］
［63］ 沈央红, 方金玉, 朱军莉, 等. 代谢组学在食品质量安全领域的应用进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 282−289.［SHEN Y H, FANG J Y, ZHU J L, et al. Advance in the application of metabonomics in the field of food safety and quality[J]. Food Science, 2023, 44(5): 282−289.］
［64］ 高芳芳. 结合 HPLC-MS/MS 非靶向代谢组学解析罗氏沼虾中氨基脲(SEM)的体内生成机制[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.［GAO F F. Combining non-targeted metabolomics to resolve the formation mechanism of semicarbazide (SEM) in *Macrobrachium rosenbergii*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.］
［65］ LI J, WANG D, CHEN S J, et al. Integrated metabolomic and transcriptomic analysis reveal the production mechanism of semicarbazide in *Macrobrachium rosenbergii* under urea conditions[J]. Foods, 2024, 13(23): 3817.
［66］ 陈霞霞, 张祎, 项德胜, 等. 基于非靶向代谢组学研究呋喃西林胁迫下克氏原螯虾体内氨基脲的代谢[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 235−242.［CHEN X X, ZHANG Y, XIANG D S, et al.

Untargeted metabolomics analysis of semicarbazide metabolism in *Procambarus clarkii* under nitrofurazone stress[J]. Food Science, 2023, 44(22): 235−242.]

[67] WANG Y S, JESTER E L E, ElSAID K R, et al. Cyano metabolite as a biomarker of nitrofurazone in channel catfish[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 58(1): 313−316.

[68] ZHAO D H, LI Z G, LI L D, et al. Assessment of nitrofurazone and furazolidone residues in shrimp seedling[J]. South China Fisheries Science, 2012, 8(3): 54−58.

[69] COOPER K M, MCCRACKEN R J, BUURMAN M, et al. Residues of nitrofuran antibiotic parent compounds and metabolites in eyes of broiler chickens[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2008, 25(5): 548−556.

[70] KILLEN S S, ATKINSON D, GLAZIER D S. The intraspecific scaling of metabolic rate with body mass in fishes depends on lifestyle and temperature[J]. Ecology Letters, 2010, 13(2): 184−193.

[71] AMUTHA C, SUBRAMANIAN P. Effect of temperature, salinity, pH and naphthalene on ethoxyresorufin-O-deethylase activity of *Oreochromis mossambicus*[J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 2010, 92(1): 127−135.

[72] PAN L Q, REN J Y, LIU J. Responses of antioxidant systems and LPO level to benzo[a]pyrene and benzo[k]fluoranthene in the haemolymph of the scallop *Chlamys ferrari*[J]. Environmental Pollution, 2006, 141(3): 443−451.

[73] 李东利, 李健, 常志强, 等. 呋喃西林代谢产物在中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)体内的消除规律及其对代谢酶活性的影响[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(5): 87−94. [LI D L, LI J, CHANG Z Q, et al. The elimination rules of nitrofurazone metabolites and its effects on activities of metabolic enzymes in *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(5): 87−94.]

[74] KONG X J, SUN Z W, LIU S C, et al. Determination of semicarbazide in foodstuffs by HPLC with fluorescence detection using 2-formylphenylboronic acid as derivatization reagent[J]. Chromatographia, 2019, 82(7): 1051−1058.

[75] GONG X M, LI K, XU W J, et al. Determination of nitrofuran metabolites in complex food matrices using a rough, cheap, easy-made wooden-tip-based solid-phase microextraction probe and LC-MS/MS[J]. Journal of Chemistry, 2022, 2022: 1−12.

[76] WU Y P, WANG J, ZHOU Y, et al. Quantitative determination of nitrofurazone metabolites in animal-derived foods based on a background fluorescence quenching immunochromatographic assay [J]. Foods, 2021, 10(7): 1668.

[77] MULIK B B, MUNDE A V, DIGHOLE R P, et al. Electrochemical determination of semicarbazide on cobalt oxide nanoparticles: Implication towards environmental monitoring[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 93: 259−266.

[78] 汤水粉, 钱卓真, 位绍红, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定水产品中硝基咪唑类药物残留量[J]. 渔业研究, 2022, 44(1): 60−68. [TANG S F, QIAN Z Z, WEI S H, et al. Determination of nitroimidazole drug residues in aquatic products by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Fisheries Research, 2022, 44(1): 60−68.]

[79] LEITNER A, ZÖLLNER P, LINDNER W. Determination of the metabolites of nitrofuran antibiotics in animal tissue by high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2001, 939(1−2): 49−58.

[80] YU Y X, LI N, JIN Q Q, et al. Novel fluorescence labeling reagent 4-(carbazole-9-yl)-benzyl chloroformate and its application in the determination of nitrofuran metabolites compounds in foodstuffs by high performance liquid chromatography with fluorescence detection[J]. Microchemical Journal, 2019, 145: 9−17.

[81] DU N N, CHEN M M, SHENG L Q, et al. Determination of nitrofuran metabolites in shrimp by high performance liquid chromatography with fluorescence detection and liquid chromatography–tandem mass spectrometry using a new derivatization reagent[J]. Journal of Chromatography A, 2014, 1327: 90−96.

[82] 徐磊, 孙博怿, 王俊, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法定量检测日本沼虾不同组织中氨基脲含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 83−92. [XU L, SUN B Y, WANG J, et al. Quantitative determination of semicarbazide content in different tissues of *Macrobrachium nipponense* based on ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(2): 83−92.]

[83] VEACH B T, BAKER C A, KIBBEY J H, et al. Quantitation of chloramphenicol and nitrofuran metabolites in aquaculture products using microwave-assisted derivatization, automated spe, and LC-MS/MS[J]. Journal of AOAC International, 2015, 98(3): 588−594.

[84] 叶江雷, 林功师, 林楠, 等. 水产品中孔雀石绿、硝基呋喃、氯霉素残留免疫胶体金前处理过程的探讨[J]. 渔业研究, 2021, 43(1): 73−79. [YE J L, LIN G S, LIN N, et al. Discussion on the pretreatment of residuals of malachite green, nitrofuran and chloramphenicol in aquatic products by quick inspect of immune colloidal gold technique[J]. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(1): 73−79.]

[85] 徐冬梅, 李亚英, 李玉静. 呋喃西林代谢物酶联免疫吸附测定方法的建立及性能测定[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 164−168. [XU D M, LI Y Y, LI Y J. Establishment of enzyme-linked immunosorbent assay for determination of furacillin metabolites and its properties[J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 164−168.]

[86] LEI H T, WANG Z H, EREMIN S A, et al. Application of antibody and immunoassay for food safety[J]. Foods, 2022, 11(6): 826.

[87] YU W L, TANG Y W, SANG Y X, et al. Preparation of a carboxylated single-walled carbon-nanotube-chitosan functional layer and its application to a molecularly imprinted electrochemical sensor to quantify semicarbazide[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127524.

[88] HE B S, LIU H. Electrochemical determination of nitrofuran residues at gold nanoparticles/graphene modified thin film gold electrode[J]. Microchemical Journal, 2019, 150: 104108.

[89] WANG L Y, LAI B H, RAN X G, et al. A portable smartphone platform utilizing dual-sensing signals for visual determination of semicarbazide in food samples[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2024, 12: 3469.

[90] YIN X C, TIAN Y L, CHEN Y Q, et al. Accurate immunochromatography with colorimetric/photothermal dual-readout to detect nitrofurazone metabolites[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 380: 133323.

[91] CHENG Y Y, YIN X C, LI Y C, et al. Multiple-readout lateral flow immunoassay for the sensitive detection of nitrofurazone metabolites through ultrabright AIE-MOF coupled in-situ growth strategy[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 262: 116556.

[92] 冯凯, 张辰辰, 付彤, 等. 小麦粉及其制品中偶氮甲酰胺、氨基脲质量控制研究[J]. 中国标准化, 2024(24): 239−243. [FENG K, ZHANG C C, FU T, et al. Research on quality control of azodi-

carbonamide and semicarbazide in wheat flour and its products[J]. China Standardization, 2024(24): 239−243.]
[93] 甘冠雄, 陈家伟, 赵娴, 等. 市政污水处理中高氨氮污水的处理工艺分析[J]. 热固性树脂, 2025, 40(1): 82−83. [GAN G X, CHEN J W, ZHAO X, et al. Analysis of treatment processes for high ammonia nitrogen wastewater in municipal sewage treatment[J]. Thermosetting Resin, 2025, 40(1): 82−83.]
[94] 徐磊, 王俊, 王雨辰, 等. 下渚湖养殖青虾氨基脲含量本底调查[J]. 现代农业科技, 2024(14): 152−157. [XU L, WANG J, WANG Y C, et al. Background investigation on semicarbazide content in cultured macrobrachium nipponense in Xiazhu lake[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(14): 152−157.]
[95] SAMSONOVA J V, DOUGLAS A J, COOPER K M, et al. The identification of potential alternative biomarkers of nitrofurazone abuse in animal derived food products[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(5): 1548−1554.
[96] ZHANG S, GUO Y M, YAN Z Y, et al. A selective biomarker for confirming nitrofurazone residues in crab and shrimp using ultra-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, 407(30): 8971−8977.