超低本底液体闪烁计数器测量海产品中锶-90 的活度

周秀锦[1]，丁颢[1]，晁铎源[1]，毛壬熠[2]，祝泽龙[2]，廖思扬[2]，侯建波[2*]

（1.舟山海关综合技术服务中心，浙江舟山 316000）（2.杭州海关技术中心，浙江杭州 310020）

摘要：锶-90（Strontium-90，^{90}Sr）是核裂变产生的长寿命放射性核素，可经海洋食物链富集，长期摄入损伤人体骨骼和造血系统。受核废水排海、核试验残留等因素影响，海洋 ^{90}Sr 污染风险持续潜在存在，为建立海产品中 ^{90}Sr 的快速、高灵敏检测方法，本文采用一次性完成 50 g 样品的干燥、碳化、灰化处理，硝酸浸取，SrResin（Strontium Resin，SrResin）柱净化与浓缩，超低本底液体闪烁计数器（Ultra-low Background Liquid Scintillation Counter，LSC）测定 ^{90}Sr 含量。通过优化大容量样品放射性微波灰化一体化系统、SrResin 净化及 LSC 计数条件，评估方法的加标回收率、精密度等参数，并基于实测淬灭曲线对不同基质下的探测效率进行校正。结果表明：在最优条件下，经淬灭曲线校正后，^{90}Sr 的探测效率在 80.0%以上；在金枪鱼、鱿鱼、虾和贻贝的加标回收率为 82.31%~91.69%，相对标准偏差（Relative Standard Deviations，RSD，n=5）为 2.14%~4.78%；探测限为 0.69 Bq ⋅kg^{-1}，低于我国规定的限量值（10 Bq ⋅kg^{-1}）。该方法操作简便、净化效果良好、灵敏度高，适用于海产品中 ^{90}Sr 的快速准确测定，可为海产品放射性污染的高效筛查及风险评估提供可靠的技术支撑。

关键词：超低本底液体闪烁计数器；SrResin；微波灰化；海产品；锶-90

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.9.1111

Activity Measurement of ^{90}Sr in Seafood by Ultra-Low Background Liquid Scintillation Counter

ZHOU Xiujin[1], DING Yong[1], CHAO Duoyuan[1], MAO Renyi[2], ZHU Zelong[2], LIAO Siyang[2], HOU Jianbo[2*]

(1.Zhoushan Customs Comprehensive Technical Service Center, Zhoushan 316000, China)

(2.Hangzhou Customs Technical Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Strontium-90 (^{90}Sr) is a long-lived radionuclide produced by nuclear fission, which can be biomagnified through the marine food chain and cause damage to the human skeletal system and hematopoietic system upon long-term intake. Affected by marine discharge of nuclear wastewater and residual radioactive substances from nuclear tests, the pollution risk of ^{90}Sr in marine environments persists.To develop a rapid and highly sensitive analytical method for the determination of ^{90}Sr in seafood, a one-step procedure for drying, carbonization, and ashing of 50 g samples was adopted. After nitric acid leaching, sample solutions were purified and concentrated using SrResin solid-phase extraction cartridges, followed by ^{90}Sr quantification with an ultra-low background liquid scintillation counter (LSC). By optimizing the microwave ashing conditions of a large-capacity sample radioactive microwave ashing integrated system, SrResin purification and LSC counting were optimized by single-factor experiments. The Method was comprehensively validated in terms of spike recovery, precision, and counting efficiencies for various sample matrices were corrected by the experimentally established quenching curve. The results demonstrated that the corrected counting efficiency for ^{90}Sr exceeded 80.0% under optimized conditions. The spike recoveries of the four seafood matrices ranged from 82.31% to 91.69%, with relative standard deviations (RSD, n=5) of 2.14%~4.78%. The method detection limit was 0.69 Bq ⋅kg^{-1}, far below the statutory limit of 10 Bq ⋅kg^{-1} stipulated by Chinese national standard. Featuring easy operation, satisfactory purification efficiency and high sensitivity, the proposed method is suitable for rapid and accurate determination of ^{90}Sr in seafood, and it can provide reliable technical support for efficient screening and risk assessment of radioactive contamination in seafood.

Key words: ultra-low background liquid scintillation counter; SrResin; microwave ashing; seafood; ^{90}Sr

收稿日期：2026-07-26；修回日期：2026-09-20；接受日期：2026-09-21

基金项目：海关总署科研项目（2024HK102）；海关总署科研项目（2023B172）

作者简介：周秀锦（1974-），女，硕士研究生，正高级工程师，研究方向：食品检验与质量控制，E-mail：68261222@qq.com

通讯作者：侯建波（1983-），男，博士，正高级工程师，研究方向：食品检验与质量控制，E-mail：houjb@zaiq.org.cn

锶-90（^{90}Sr）是铀、钚热中子裂变过程中的主要产物之一，半衰期 28.79 年，衰变时释放 β 射线（最大能量 0.546 MeV）[1,2]。其化学性质与钙相似，通过食物链在生物体内富集，主要沉积于骨骼和骨髓，长期暴露可诱发骨癌、白血病等严重疾病[3]。海产品在我国进出口贸易中占据重要地位，也是居民优质蛋白质的关键来源，其安全性直接关系到公共健康与贸易安全。随着核能发展、核试验遗留影响以及核事故潜在风险，海产品中放射性核素污染日益引起关注，亟需建立高灵敏度、高选择性的 ^{90}Sr 检测方法[4-6]。特别是 2011 年福岛核事故和核废水排海以来，大量放射性核素释放至太平洋，^{90}Sr 作为长寿命裂变产物在海洋环境中的分布、迁移及生物富集问题持续受到关注[7-11]。近年来，相关研究已从海洋水体扩展至海产品、酒类及淡水等多个领域[8,12,13]。Kintsu 等[14]证实了放射性锶在福岛沿海海洋生物钙化组织中的持续富集现象，急需加强监测。

液体闪烁计数法因操作简便、检测速度快、灵敏度相对较高而被广泛应用于检测 ^{90}Sr[1,2]。Ouchi 等[15]提出了一种将 ^{90}Sr 转化为动力学稳定配合物后，结合毛细管电泳-液闪计数测定高放水样中 ^{90}Sr 的新方法。近年来，液闪计数结合萃取色谱分离技术已成为食品及环境样品中 ^{90}Sr 检测的研究热点，相关研究已涉及牛奶、水体、底泥、饲料及藻类等基质。Giménez 等[16]提出了基于塑料闪烁树脂（Plastic scintillation resins，PSresin）的新方法，在 ^{210}Pb 共存条件下实现对 ^{90}Sr 的分析。锶特效树脂（Strontium Resin，SrResin）萃取色谱技术作为一种高效的分离净化手段，其核心成分是负载有冠醚类萃取剂二-(叔丁基环己基)-18-冠-6，能够在酸性介质中选择性吸附锶，有效去除 Ca^{2+}、K^{+}、Pb^{2+}等干扰离子，显著提高检测准确性[3,17-19]。Zheng 等[17]采用 SrResin 分离植物源性食品中的 ^{90}Sr 和 ^{210}Pb，其中 ^{90}Sr 的化学回收率在 72%~83%之间。Tayeb 等[20]建立了海水中 ^{89}Sr 与 ^{90}Sr 的快速同时测定方法；Guérin 等[21]对牛奶中 ^{90}Sr 的快速测定方法进行了改进；Hurtado-Bermudez 等[22]报道了食品样品中 ^{90}Sr 与 ^{210}Po 的连续测定方法，但针对海产品基质的研究相对有限。

传统样品前处理多采用干法灰化，存在处理量小、耗时长、锶易挥发等问题[18,23]。曹艺耀等[24]系统比较了传统灰化法与微波灰化法，微波灰化法预处理时间缩短一半以上，且回收率均高于 75%；Xu 等[25]系统综述了锶-钇分离材料的研究进展，为本文提供了理论参考。本文采用大容量微波灰化仪，实现 50 g 样品一次性完成干燥、碳化、灰化的一体化处理，结合 SrResin 净化浓缩与超低本底 LSC 检测，优化各项检测条件，建立适用于海产品中 ^{90}Sr 的快速检测方法，为海产品安全监管、食品卫生监督及环境污染物监测提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验样品

金枪鱼、鱿鱼、虾、贻贝均购自当地大型水产品市场，选取鲜活个体，去除内脏、外壳后，取可食用部分，用高速组织捣碎机匀浆，于-20 ℃冷冻保存备用。每种样品平行制备 3 份，确保样品代表性。

1.1.2 试剂与标准

硝酸、盐酸、草酸（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；SrResin 萃取色谱柱（6 mL，50~100 mesh），Triskem International 公司；^{90}Sr 标准溶液（6.81×10 ^{3}Bq·mL^{-1}，编号：R902310149），上海计量院；稳定锶标准溶液（100 μg·mL^{-1}，GBW（E）080242），国家计量科学研究院；闪烁液（Ultima Gold XR），Perkin Elmer 公司；实验用水为超纯水（18.2 MΩ·cm），Milli-Q 系统制备。所有试剂均经空白验证，无放射性污染。

1.1.3 主要仪器设备

Quantulus 6220 型超低本底液体闪烁计数器，瑞孚迪生物医学（上海）有限公司；HX-L12 型大容量样品放射性微波灰化一体化系统，青岛核先电子科技有限公司；1260-7900 型电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS），美国安捷伦公司；ME204E 型电子天平（精度 0.1 mg），梅特勒-托利多仪器有限公司；CNW24 位真空固相萃取装置，上海安谱实验科技股份有限公司；GM300 型研磨仪，德国莱驰公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品前处理

称取 50.0 g 匀浆后的海产品样品，置于专用微波灰化坩埚中，放入大容量微波灰化仪中，一次性完成干燥、碳化、灰化全过程。微波灰化程序：350 ℃、120 min→450 ℃、120 min→600 ℃、180 min。灰化完成后冷却至室

温，向灰分中加入 25 mL 8 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液，静置 30 min 后取上清液备用。每批样品同时做 2 个空白试验（不加样品，其余操作相同），以扣除试剂本底。

1.2.2 SrResin 净化浓缩

样品净化浓缩按活化、上样、淋洗和洗脱 4 个步骤进行，全程控制流速≤1 mL·min^{-1}。具体如下：向 SrResin 固相萃取柱中加入 8 mol Ł$^{-1}$ 硝酸 20 mL，激活树脂活性位点、去除柱内残留杂质；然后将全部样品上清液过 SrResin 树脂柱，再依次用 8 mol Ł$^{-1}$ 硝酸 20 mL、8 mol Ł$^{-1}$ 硝酸-0.05 mol Ł$^{-1}$ 草酸混合液 20 mL 淋洗，去除柱内残留的 Ca^{2+}、K^{+}等干扰离子；最后用 0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸 20 mL 匀速淋洗，洗脱并富集柱上吸附的 ^{90}Sr，收集洗脱液，混匀后待测，操作过程中注意避免净化柱柱体干涸。

1.2.3 ICP-MS 测定锶化学回收率

取 0.5 mL 的 10 μg·mL^{-1} 稳定锶标准溶液加入金枪鱼空白样品中，按 1.2.1 和 1.2.2 方法样品前处理，洗脱液经 ICP-MS 测定溶液中锶的质量浓度。并用锶标准溶液配制系列标准工作液，建立 ICP-MS 锶标准曲线，按照外标法计算锶经 SrResin 净化浓缩后的化学回收率。样品平行测定 3 次，取平均值作为最终回收率。

1.2.4 计数测定

取 8 mL 洗脱液，加入 12 mL 闪烁液 Ultima Gold XR，涡旋摇匀后置于 20 mL 聚乙烯闪烁瓶中，避光静置 10 min，放入超低本底液体闪烁计数器中测定。计数条件：常规计数模式，能量窗口设置（能谱范围 0~546 keV），计数时间 100 min，每个样品平行测定 3 次，同时做空白试验。空白试验与样品测定同步进行，用于扣除环境本底和试剂干扰。

1.2.5 淬灭曲线测定与效率校正

为考察检测体系中硝酸（淬灭剂）对 ^{90}Sr 计数效率的影响，建立不同淬灭水平下的效率校正方法，进行淬灭曲线测定。选用 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液作为淬灭剂，设置 8 个淬灭剂添加体积梯度，精确移取 1 mL 活度浓度为 2.48 Bq mL^{-1} 的 ^{90}Sr 标准溶液，分别加入不同体积的 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸淬灭剂（0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.0、4.0、5.0 mL），再分别加入 0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸（6.9、6.8、6.6、6.2、5.4、4.0、3.0、2.0 mL）和 12 mL Ultima Gold XR 闪烁液，涡旋摇匀后避光静置 10 min，按照 1.2.4 中的计数条件进行测定，每个梯度平行测定 3 次，计算平均计数效率。该方法参考了 Giménez 等[16]和 Hurtado-Bermudez 等[22]在环境样品中使用的淬灭校正思路。

1.3 数据分析

采用 Origin 软件进行数据统计与分析，绘制淬灭曲线并拟合校正函数，计算探测效率、加标回收率、相对标准偏差及探测限。样品中 ^{90}Sr 活度浓度按式（1）计算：

$$A_s = \frac{(N_s - N_0) \times V_1}{60 \times V_2 \times m \times \varepsilon(Q) \times R} \quad \text{……（1）}$$

式中：

A_s——样品中 ^{90}Sr 活度浓度，Bq kg^{-1}；

N_s——样品计数率，cpm；

N_0——本底计数率，cpm；

V_1——洗脱液的体积，mL；

60——cpm 的转换系数；

V_2——上机测量的洗脱液体积，mL；

m——样品的质量，kg；

$E(Q)$——经淬灭曲线校正后的探测效率；

R——锶的化学回收率。

2 结果与分析

2.1 检测条件优化结果

2.1.1 前处理条件优化

针对大容量微波灰化仪的操作特点，考察 3 个运行程序对样品处理效果及锶回收率的影响。不同微波灰化程序的条件、灰化效果及锶回收率对比具体程序和结果见表 1。试验结果显示：运行程序 3 时样品灰化彻底，无炭化残留，锶回收率达 88.94%，重复性良好；运行程序 2 时，锶挥发损失较大，回收率降至 82.21%；运行程序 1 时，样品灰化不彻底，仍有痕量的碳化物质，回收率为 75.41%。因此，本文采取程序 3 作为样品前处理条件，与传统干法灰化相比，微波灰化可显著缩短前处理时间，减少锶挥发损失。

表 1 不同微波灰化程序的条件、灰化效果及锶回收率对比

Table 1 Comparison of conditions, ashing effects, and strontium recovery among different microwave ashing programs

Program	Temperature–time program	Ashing effect	Strontium recovery	Evaluation and selection
程序 1	250 ℃、120 min→350 ℃、120 min→600 ℃、180 min	样品灰化不彻底，仍有痕量碳化物质	75.41%	灰化不完全，回收率低，不采用
程序 2	300 ℃、120 min→400 ℃、120 min→650 ℃、180 min	锶挥发损失较大	82.21%	回收率降低，不采用
程序 3	350 ℃、120 min→450 ℃、120 min→600 ℃、180 min	样品灰化彻底，无炭化残留	88.94%	灰化彻底，无炭化残留，锶回收率最高，采用为样品前处理条件

2.1.2 净化条件优化

取一定量的稳定锶标准溶液过 SrResin 萃取柱净化浓缩，洗脱液经电感耦合等离子体质谱仪检测，考察洗脱液浓度（0.05、0.10 mol Ł$^{-1}$ 硝酸）及洗脱体积（15、20、25 mL）对锶回收率的影响（适配 6 mL 规格 SrResin 柱）。试验结果表明：洗脱液浓度 0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸时，锶洗脱效果最佳，回收率 88.70%；浓度 0.10 mol Ł$^{-1}$ 时引入杂质干扰，回收率降至 80.13%。0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸洗脱体积 20 mL 时，锶可完全洗脱，回收率 89.03%；体积 15 mL 时洗脱不完全，回收率 82.52%；25 mL 时回收率无明显变化，但增加后续处理时间和降低洗脱液中锶的浓度。因此，最优净化条件为洗脱液 0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸，洗脱体积 20 mL。

2.1.3 化学回收率

以稳定锶标准溶液建立标准曲线，在 0~5 μg·mL^{-1} 范围内，曲线方程为 y=20.52x+3.71E^{-3}，线性相关系数 R^2=0.998，线性关系良好，满足痕量锶精准定量要求。经 1.2.3 步骤处理的金枪鱼样品通过 ICP-MS 实测，样液中锶的浓度结果为 0.19 μg·mL^{-1}、0.20 μg·mL^{-1} 和 0.21 μg·mL^{-1}，化学回收率分别是在 77.33%、80.12%和 83.84%，相对标准偏差 RSD 为 4.06%，平均回收率为 80.43%，准确度和精密度满足方法学的要求。

2.1.4 计数条件优化

Blain 等[2]指出，液闪计数时间的合理选择需在精密度和检测效率之间取得平衡，为考察计数时间（60、100、120 min）对检测精密度和探测限的影响，空白样品和标准溶液每个计数时间平行测定 6 次。结果显示：计数时间 60 min 时，精密度为 15.81%，探测限为 2.58 Bq kg^{-1}；计数时间 100 min 时，精密度为 3.82%，探测限为 0.69 Bq kg^{-1}；计数时间 120 min 时探测限进一步降低，但精密度为 3.74%，没有明显降低。因此，虽然三种计数时间的探测限均能满足检测需求，为了达到最优化，将计数时间定为 100 min。此外，考察了洗脱液与闪烁液体积比（7:13、8:12、9:11）的影响，确定 8:12 为最优配比，此时计数效率稳定，淬灭效应低。^{90}Sr 标准溶液液闪计数谱图见图 1。

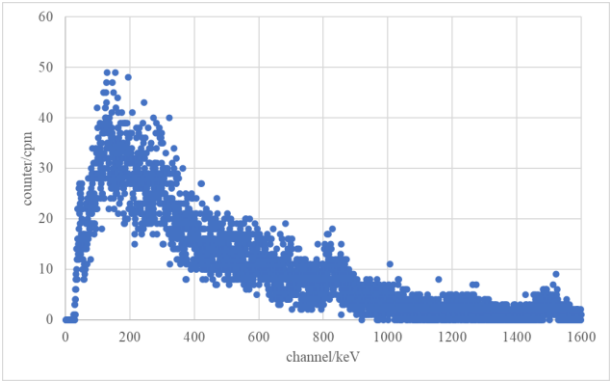


图 1 ^{90}Sr 标准溶液液闪计数谱图

Fig.1 Liquid scintillation counting spectrum of ^{90}Sr standard solution

2.2 淬灭曲线与探测效率校正

淬灭曲线试验旨在建立硝酸淬灭剂添加量与 ^{90}Sr 计数效率之间的关系，用于样品测定时的效率校正。本文采用^{90}Sr 标准溶液加入量 1 mL（2.48 Bq mL^{-1}），闪烁液 12 mL，数据为 3 次平行测定平均值。不同淬灭剂添加体积下的探测效率测定结果见表 2。以表征样品体系的淬灭程度的淬灭指示参数 tSIE 为横坐标（x），以表示液闪计数器实际记录到的净计数率与样品放射性衰变率之比的探测效率（即计数效率，%）为纵坐标（y），绘制淬灭曲线并进行拟合（图 2）。在实际样品测定中，通过检测样品的 tSIE 值，代入淬灭曲线校正函数获得实际探测效率 $\varepsilon(Q)$，再按公式（1）计算活度浓度。tSIE 值由超低本底液体闪烁计数器在样品测量过程中自动测定并直接输出，无需人工额外操作。其原理是：仪器内置外标准源对样品瓶发射 γ 射线，γ 射线与闪烁液及样品瓶壁发生康普顿效应，产生的康普顿电子在闪烁液中形成外标准谱；仪器通过比较有、无外标准源照射时的能谱差异，自动计算样品对光信号的衰减程度，并以 tSIE 参数形式输出。该参数与样品计数率一同显示在测量结果中，可直接用于淬灭校正。不同海产品基质中可能残留微量硝酸等淬灭物质，导致探测效率波动，本文通过实测淬灭曲线进行个体化校正，校正探测效率在 80%以上，提高了定量准确性。本方法探测效率高于 Gačnik 等[23]报道的约 75%，得益于样品前处理方法、优化的闪烁液配比（8:12）和计数窗口（0~546 keV）。

表 2 淬灭剂添加不同体积对应的探测效率测定结果

Table 2 Detection efficiency at different quencher volumes

Volume of quencher added/mL	tSIE	Standard solution counting/cpm	Detection efficiency/%
0.1	305	150.32	99.48%
0.2	300	148.11	97.99%
0.4	295	147.89	97.85%
0.8	292	145.06	95.94%
1.6	283	139.92	92.48%
3	279	137.36	90.76%
4	272	130.3	86.01%
5	269	127.89	84.38%

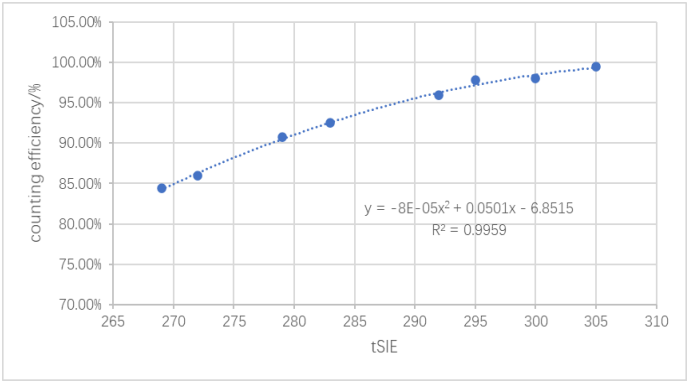


图 2 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液淬灭曲线

Fig.2 Quenching curve obtained with 0.5 mol Ł$^{-1}$ nitric acid solution

2.3 回收率与精密度

食品基质复杂，富含钙、钾、脂肪、蛋白质等成分，容易对 ^{90}Sr 检测造成干扰，因此样品前处理与净化浓缩尤为关键[3,17,21,26]。不同海产品基质复杂度存在差异，从而造成锶回收率有所区别：金枪鱼、贻贝脂肪含量偏高，^{90}Sr 回收率通常低于鱿鱼和虾[3,17]。相较于传统干法灰化，微波灰化可有效缩小该回收率差异，使金枪鱼、贻贝的回收率较传统干法灰化提升了 3%~5%。本试验采用大容量微波灰化仪，实现了 50 g 样品的一次性处理，相比传统干法灰化 10 g 的单次处理量提升 5 倍，同时有效降低锶在高温过程中的挥发损失。SrResin 柱对锶具有特异性吸附能力，搭配梯度淋洗方式，可实现干扰离子的去除率达到 99%以上[1,17,21]。本试验进一步优化了 SrResin 柱的

上样流速、洗脱液浓度和体积，最终锶的 SrResin 柱净化回收率稳定在 89.0%，符合放射性核素分析的要求。

试验选取金枪鱼、鱿鱼、虾、贻贝 4 种海产品，分别添加低、中、高 3 个水平的 ^{90}Sr 标准溶液（加标水平分别是 9.90、24.76、49.52 Bq kg^{-1}），按优化方法测定，每个水平设 5 个平行样品。结果见表 3，加标回收率为 82.31%~91.69%，RSD 为 2.14%~4.78%，表明方法精密度良好，测定结果准确可靠。

表 3 4 种海产品中 ^{90}Sr 加标回收率及精密度

Table 3 Recoveries and relative standard deviations (RSD) of ^{90}Sr spiked in four seafood matrices (*n*=5)

Sample Types	Spiked level/(Bq kg^{-1})	Average recovery rate/%	RSD/%
金枪鱼	9.90	82.31	4.78
	24.76	88.64	3.22
	49.52	90.82	2.53
鱿鱼	9.90	83.58	4.49
	24.76	89.23	3.03
	49.52	91.69	2.28
虾	9.90	84.18	4.23
	24.76	87.94	3.47
	49.52	90.29	2.44
贻贝	9.90	83.11	4.57
	24.76	88.37	3.28
	49.52	90.19	2.14

2.4 探测限

Maderich 等[27]模拟了西北太平洋 ^{90}Sr 的扩散与归趋、Tan 等[28]剂量评估了东南沿海生物区系中放射性核素的营养转移、Brown 等[29]系统梳理了放射性核素生态系统迁移特征，多项研究均指出，快速、灵敏的检测手段是海洋放射性长期监测工作的关键支撑。超低本底液体闪烁计数器可有效降低环境本底干扰，本试验通过连续测定 6 次空白样品（8 mL 洗脱液），空白计数率分别为 2.51、2.47、2.49、2.53、2.55、2.51 cpm，平均值为 2.51 cpm，标准偏差为 0.03 cpm，tSIE 为 286，校正后的探测效率为 92.94%，本底计数谱图见图 3。依据 Currie 公式（2）计算方法探测限（MDA）。

$$MDA=\frac{\left[2.71+4.65\sqrt{C_bT_b}\right]\times V}{\varepsilon\times V_t\times T_s\times 60\times m} \quad \text{……（2）}$$

式中:

MDA——最小可探测活度浓度，Bq kg^{-1};

C_b——本底计数率，cpm;

T_b——本底测量时间，min;

ε——探测效率;

V——样品体积，L;

V_t——样品测量体积，L;

T_s——样品测量时间，min;

60——时间转换系数，将分钟转换为秒;

m——样品质量，g。

通过计算本方法探测限为 0.69 Bq kg^{-1}。该值低于国家标准限量值 10 Bq kg^{-1}[30]，满足监测要求。本方法的检出限高于 Blain 等[2]（0.035 Bq kg^{-1}）和 Ouchi 等[15]（0.042 Bq kg^{-1}），主要原因是本底计数率较高（2.51 cpm），探测时间相对较短，但由于样品量较大（50 g），该方法依然可以满足限量需求。

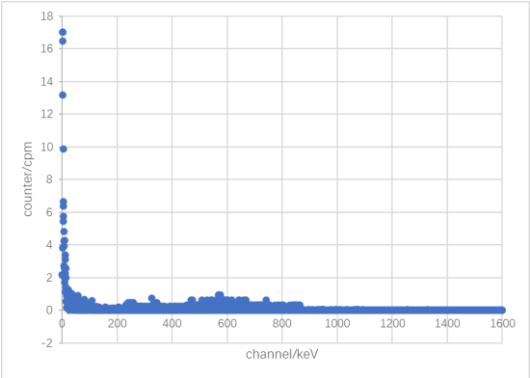


图 3 空白样品本底计数谱图

Fig.3 Background spectrum of a blank sample

2.5 实际样品检测

采用本方法对浙江省市售金枪鱼、鱿鱼、虾、贻贝各 5 份样品进行检测，所有样品中 ^{90}Sr 活度浓度均低于方法探测限（0.69 Bq kg^{-1}），表明所检样品未受到 ^{90}Sr 明显的污染，符合国家标准要求。

3 结论

本研究建立了基于超低本底液体闪烁计数器结合 SrResin 净化浓缩技术的海产品中 ^{90}Sr 检测方法，优化后的条件为：微波灰化程序（350 ℃/120 min→450 ℃/120 min→600 ℃/180 min），处理 50 g 样品；SrResin 柱（6 mL）净化，上样流速≤1 mL·min^{-1}，洗脱液为 0.05 mol Ł$^{-1}$ 硝酸 20 mL；LSC 计数时间 100 min，洗脱液与闪烁液体积比为 8:12。探测效率由淬灭曲线校正，方法加标回收率为 82.31%~91.69%，RSD 为 2.14%~4.78%，探测限为 0.69 Bq kg^{-1}，低于国家标准的限量值（10 Bq kg^{-1}），能够有效去除常见干扰离子。该方法处理量大、快速、灵敏，适用于金枪鱼、鱿鱼、虾、贻贝等海产品中 ^{90}Sr 的快速检测，满足海产品监管和环境监测需求。

参考文献

[1] FANG M, YAO L, ZHANG J, et al. Determination of low-level ^{90}sr in large volumes of seawater [J]. Analytica Chimica Acta, 2025, 1352: 343936.

[2] BLAIN E, NISHIKAWA K, FAYE S A, et al. Detection capability of ^{89}sr and ^{90}sr using liquid scintillation counting [J]. Health Physics, 2023, 125(2): 123-136.

[3] IAMMARINO M, MIEDICO O, PETRELLA A, et al. Radiostrontium accumulation in animal bones: development of a radiochemical method by ultra low-level liquid scintillation counting for its quantification [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 484-494.

[4] KONG X, DANG L, SHAO X, et al. Rapid method for determination of (90)sr in biological samples by liquid scintillation counting after separation on synthesized column [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 193-194: 15-19.

[5] UESUGI M, WATANABE R, SAKAI H, et al. Rapid method for determination of (90)sr in seawater by liquid scintillation counting with an extractive scintillator [J]. Talanta, 2018, 178: 339-347.

[6] KIM H, KANG Y G, LEE Y J, et al. Automated extraction chromatographic radionuclide separation system for analysis of ^{90}sr in seawater [J]. Talanta, 2020, 217: 121055.

[7] INOMATA Y, HIROSE K, TSUMUNE D. Spatiotemporal variations of ^{137}cs and ^{90}sr in the japan sea: enhanced vertical diffusion and downwelling of radionuclides [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2026, 298: 108095.

[8] COUPANNEC M, JOHNSON T E, NANBA K, et al. Radiological analysis of ^{137}cs and ^{90}sr in wine and cider from the fukushima prefecture [J]. Health Physics, 2026, 131(6): 566-573.

[9] POVINEC P P, HIROSE K, HONG G H, et al. Marine radionuclides in climate change studies: pacific ocean and marginal seas [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2026, 298: 108022.

[10] TAZOE H, YAMAGATA T, TSUJITA K, et al. Observation of dispersion in the japanese coastal area of released ^{90}sr, ^{134}cs, and ^{137}cs from the fukushima daiichi nuclear power plant to the sea in 2013 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(21): 4094.

[11] HIROSE K, POVINEC P P. ^{137}cs and ^{90}sr in surface waters of the sea of japan: variations and the fukushima dai-ichi nuclear power plant accident impact [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 645-652.

[12] POPOVA M, RIABOV V, POPOVA N, et al. The role of phytoplankton and sediment microbial community on sr, u, pu, and am behavior in freshwater lake dryazlo [J]. Biology, 2026, 15(9): 724.

[13] PANITSKIY A V, BAIGAZINOV Z, BAIGAZY S A, et al. Assessment of ^{137}cs, ^{90}sr, ^{241}am, $^{239+240}$pu, ^{3}h (hto, obt) in the fish from lakes, rivers, and nuclear shell craters of the semipalatinsk test site [J]. Scientific Reports, 2025, 16(1): 1802.

[14] KINTSU H, KODAMA K, HORIGUCHI T. The uptake and persistence of radioactive strontium in the calcified tissues of marine organisms of the fukushima coastal region [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2026, 296: 107979.

[15] OUCHI K, HARAGA T, HIROSE K, et al. Determination of ^{90}sr in highly radioactive aqueous samples via conversion to a kinetically stable 1,4,7,10-tetraazacyclododecane-1,4,7,10-tetraacetic acid complex followed by concentration-separation-fractionation based on capillary electrophoresis-liquid scintillation [J]. Analytica Chimica Acta, 2024, 1298: 342399.

[16] GIMÉNEZ J, ROTGER E, APELLÁNIZ H, et al. A new method based on selective fluorescent polymers (psresin) for the analysis of ^{90}sr in presence of ^{210}pb in environmental samples [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 199: 110879.

[17] ZHENG Q, SHI C, XIE Y, et al. Determination of ^{90}sr and ^{210}pb in food samples by liquid scintillation counting after sequential separation with an extraction chromatographic column [J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139266.

[18] HERRANZ M, IDOETA R, ROZAS S, et al. Analysis of the use of the iaea rapid method of ^{89}sr and ^{90}sr in milk for environmental monitoring [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 177: 48-57.

[19] COHA I, DULANSKÁ S, TUCAKOVIĆ I, et al. Synergy of flow injection system and molecular recognition technology products for rapid determination of ^{89},^{90}sr and ^{210}pb [J]. Talanta, 2021, 225: 121959.

[20] TAYEB M, DAI X, SDRAULIG S. Rapid and simultaneous determination of strontium-89 and strontium-90 in seawater [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 153: 214-221.

[21] GUÉRIN N, RIOPEL R, RAO R, et al. An improved method for the rapid determination of ^{90}sr in cow's milk [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 175-176: 115-119.

[22] HURTADO-BERMUDEZ S, MAS J L, VILLA-ALFAGEME M. A sequential determination of ^{90}sr and ^{210}po in food samples [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 159-164.

[23] GAČNIK J, SARAP N B, MAZEJ D, et al. Liquid scintillation counter calibration approach for ^{90}sr detection and testing performance of tk100 resin [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019, 151: 111-115.

[24] 曹艺耀,俞顺飞,宣志强,等.食品放射性监测的快速微波灰化预处理方法研究[J].中华放射医学与防护杂志,2018,38(1):43-47.

[25] XU M, WANG Z, ZHANG T, et al. Advances in materials for strontium-yttrium separation: a comprehensive review [J]. Materials, 2026, 19(13): 2887.

[26] ÖZÇAYAN G. Determination of ^{90}sr activity concentration in black tea powder used as proficiency test sample by the modified liquid scintillation counting method [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2020, 211: 106079.

[27] MADERICH V, JUNG K T, BEZHENAR R, et al. Dispersion and fate of ^{90}sr in the northwestern pacific and adjacent seas: global fallout and the fukushima dai-ichi accident [J]. Science of The Total Environment, 2014, 494-495: 261-271.

[28] TAN K, DENG F, LIN L, et al. Trophic transfer and radiation dose assessment of radionuclides in biota from southeastern coastal china [J]. Journal of Hazardous Materials, 2026, 501: 140814.

[29] BROWN J, TEIEN H C, THØRRING H, et al. Transfer of radionuclides through ecological systems: lessons learned from 10 years of research within cerad coe [J]. Science of The Total Environment, 2024, 940: 173503.

[30] GB 14882-1994.食品中放射性物质限制浓度标准[S].