DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251210005
引用格式: 胡凌雯, 宋丹, 阚莹, 等. 营养素标准物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 167–177.
HU LW, SONG D, KAN Y, *et al*. Research progress of nutrient reference materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 167–177. (in Chinese with English abstract).

营养素标准物质研究进展

胡凌雯[1,2], 宋　丹[1,2], 阚　莹[1,2], 李先江[1,2], 李红梅[3*], 王　晟[1,2*]

(1. 中国计量科学研究院化学计量与分析科学研究所, 北京　100029; 2. 国家市场监督管理总局营养与健康化学计量及应用重点实验室, 北京　100029; 3. 北京化工大学生命科学与技术学院, 北京　100029)

摘　要: 营养素标准物质作为食品营养成分检测和质量控制的物质基础, 是保障食品营养标签的科学性与合规性、推动精准营养研究的重要工具。本文系统梳理了国内外食品营养素标准物质的研发进展。研究表明, 我国已建成全球数量最多的营养素标准物质库, 现有标准物质 700 余种, 涵盖蛋白质类、脂类、糖类、维生素和元素等多类重要成分, 逐渐形成从纯度标准物质到复杂食品基体标准物质的多层体系。然而, 与国际先进水平相比, 我国在营养素类别均衡性和基体分布多样性、多营养素特性量标准物质研制及复杂结构营养素表征等方面仍存在不足。基于全球营养健康领域的发展趋势和我国营养健康产业对计量支撑的迫切需求, 本文旨在为建立更加完善、科学和具有国际影响力的营养素标准物质体系提供理论依据和实践参考。

关键词: 营养素; 标准物质; 食品基体; 精准营养

Research progress of nutrient reference materials

HU Ling-Wen[1,2], SONG Dan[1,2], KAN Ying[1,2], LI Xian-Jiang[1,2], LI Hong-Mei[3*], WANG Sheng[1,2*]

(1. *Division of Chemical Metrology and Analytical Science*, *National Institute of Metrology*, *Beijing* 100029, *China*; 2. *Key Laboratory of Nutrition and Health Chemical Metrology and Application*, *State Administration for Market Regulation*, *Beijing* 100029, *China*; 3. *College of Life Science and Technology*, *Beijing University of Chemical Technology*, *Beijing* 100029, *China*)

ABSTRACT: Nutrient reference materials serve as fundamental substances for the determination and quality control of food nutritional components. They are essential tools for ensuring the scientific validity and regulatory compliance of food nutrition labeling, as well as advancing precision nutrition research. This paper systematically reviewed the development progress of nutrient reference materials both China and internationally. Existing studies indicate that China has established the world's largest repository of nutrient reference materials, currently comprising more than 700 reference materials that cover major nutrient components such as proteins, lipids, carbohydrates, vitamins and elements. This had gradually formed a comprehensive system spanning from high purity reference materials to

收稿日期: 2025-12-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2101502); 国家自然科学青年基金项目(32202167); 中国计量科学研究院基本科研业务费项目(AKYZZ2536)
第一作者: 胡凌雯(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全分析与计量。E-mail: hulingwen23@mails.ucas.ac.cn
***通信作者:** 李红梅(1965—), 女, 教授, 主要研究方向为生命科学精准测量技术与标准物质。E-mail: lihm@buct.edu.cn
王晟(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全分析与计量。E-mail: wangsh@nim.ac.cn

complex food-matrix reference materials. However, compared with internationally advanced standard, China still faced shortcomings in the balance of nutrient categories and diversity of matrix distributions, the development of reference materials with multi-nutrient characteristic quantities, and the characterization of structurally complex nutrients. Based on global trends in nutrition and health research and the urgent need for metrological support within China's nutrition and health industry, this review aimed to provide theoretical guidance and practical insights for building a more comprehensive, scientifically robust and internationally influential nutrient reference material system.

KEY WORDS: nutrient; reference materials; food matrix; precision nutrition

0 引 言

营养素是指通过食物摄取、维持人体正常生理功能及代谢需求的必需物质, 根据人体内的含量和需求量, 营养素一般可分为宏量营养素、微量营养素和其他类别[1–3]。宏量营养素包括蛋白质、脂肪和碳水化合物, 它们分别由氨基酸、脂肪酸和单糖等基本单位组成, 是提供能量和构建身体组织的主要物质[4]; 微量营养素包括维生素和矿物质, 尽管需求量较少, 但在代谢调节、免疫功能维护以及酶促反应中扮演着不可替代的作用[5]。水与膳食纤维作为维持生命活动和肠道健康的核心成分, 也被归入必需营养素范畴[6]。随着现代营养学发展, 传统分类体系逐步扩展, 部分具有生物活性的功能性成分虽未被定义为必需营养素, 但其抗氧化、免疫调节等潜在健康作用正成为研究热点[7–8]。

食品中营养素的科学测定是食品科学、营养学和公共卫生领域的重要基础工作, 其结果不仅关系到食品营养价值的客观评价, 也直接影响营养标签的合规性、居民膳食结构的合理性以及营养干预和公共健康政策的实施效果[9–10]。随着精准营养和个性化营养理念的提出, 人们对于营养素检测结果的准确性和可比性提出了更高要求。国际计量委员会(International Committee for Weights and Measures, CIPM)发布的《CIPM 2030+战略: 应对新兴计量需求》中, 明确了 7 大方向的计量挑战与需求。其中, 健康与生命科学、食品安全、数字化转型以及"新"计量这 4 大主题与营养健康计量密切相关, 明确要求加快健康产业领域的计量技术与标准物质研制。在国内层面, 《国民营养计划(2017—2030 年)》《"健康中国 2030"规划纲要》以及中共中央《关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》国家战略均对营养健康产业高质量发展作出了重要部署。在这一背景下, 如何保证食品中营养素分析结果能够真实反映营养水平, 并在不同实验室之间实现可比与可溯源, 已经成为全球营养计量科学关注的核心问题[11–13]。

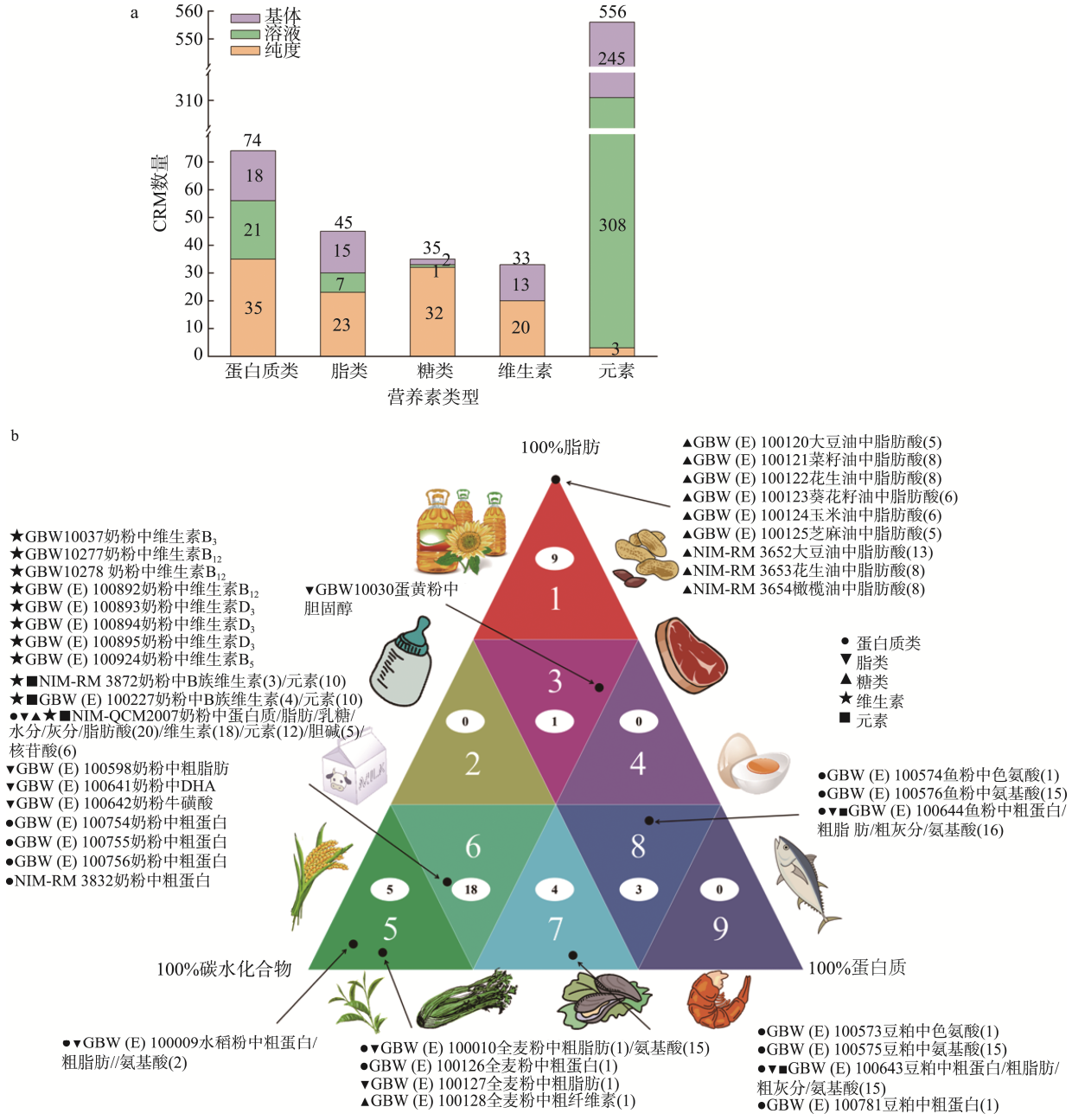
标准物质(reference material, RM)在确保营养素分析的准确性和可靠性方面起着核心作用。它们被用于校准分析仪器, 验证分析方法的准确性, 评估实验室间的测量一致性, 并为测量结果提供溯源性。有证标准物质(certified reference material, CRM)则采用计量有效程序测定一个或多个指定特性值, 并附有证书, 提供特性值、不确定度和计量溯源声明。按照 JJF 1507—2015《标准物质的选择与应用》, 食品营养素检测中常用的 RM 依据其存在形式主要分为以下 3 类: (1)纯度, 其化学纯度和/或杂质组成等与纯度相关的特性已得到表征或定值。(2)溶液, 常由纯度 RM 通过称量法或容量法制备得到, 其特性值可溯源至纯度 RM; (3)基体, 可由包含待测特性量的基体物质或合成混合物制备得到, 并对特定的特性量(如某种化学成分的含量)进行表征或定值。当被测样品基体较为复杂或存在明显基体效应时, 仅采用纯度型或溶液 RM, 可能无法充分反映测量过程中样品前处理、分离及检测环节对测量结果的影响。因此, 在实际食品营养素检测中, 通常需要根据测量目的, 将纯度/溶液 RM 与基体 RM 结合使用, 保证测量结果的准确性、可靠性及不同实验室之间结果的可比性[14–16]。本文结合目前国内外营养素分析用标准物质的现状, 整体介绍我国各类营养素 CRM 的研制成果、特点以及存在的问题, 以期为食品营养素标准物质的研制及发展提供一定的参考。

1 我国营养素标准物质现状

我国食品 CRM 研发历经 3 个阶段战略转型: 21 世纪初以无机元素检测为核心, 成功研制大米、小麦等基体 CRM, 重点监控重金属等有害成分; 2006 年《农产品质量安全法》与 2009 年《食品安全法》的实施推动 CRM 研发进入体系化建设阶段; 至 2011 年 GB 7718—2011《食品安全国家标准 预包装食品标签通则》及 GB 28050—2011《食品安全国家标准 营养标签通则》颁布(已发布新版 GB 7718—2025《食品安全国家标准 预包装食品标签通则》和 GB 28050—2025《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》), 特别是 2017 年《国民营养计划(2017—2030 年)》启动后, 研发重心全面转向营养素多元化检测需求[13–17]。

经过 20 余年发展, 我国已建成全球数量最多的食品 CRM 库。截至 2025 年, 国家标准物质资源库(https://www.ncrm.org.cn/Web/Home/Index)可以检索营养

素 CRM 达到 750 种, 其中按照 CRM 证书等级包括 204 种一级标准物质(GBW)编号、507 种二级标准物质[GBW (E)]编号和由中国计量科学研究院(National Institute of Metrology China, NIM)研制的 39 种 RM-NIM 编号的 RM。我国现有营养素 CRM 按形态类型分类包括纯度 119 种、溶液 347 种和基体 284 种(图 1a)。其中, 对于基体营养素, 可根据美国官方分析化学家协会(Association of Official Analytical Chemists, AOAC)开发的食品营养三角模型将食品基体进一步按照蛋白质、脂肪和碳水化合物划分 9 个区域[17−18], 由于每个区域的食品具有相似的特性, 针对不同区域开发相应的食品基体 CRM, 可实现对食品营养成分的全面测量能力。整体而言, 我国现有有机营养素基体 CRM 已覆盖包含谷物及其制品、乳制品与婴幼儿配方粉、植物油类、动物源食品以及部分果蔬制品在内的 8 大区域(图 1b)。从营养素类别来看, 我国现有营养素 CRM 主要基于单一营养素类型进行研制, 根据营养素类型可系统划分为宏量营养素(蛋白质类、脂类和碳水化合物类)、微量营养素(维生素和无机元素)以及其他非必需营养素(图 1a)。



注: a. CRM 类型分布; b. 基体 CRM 在 AOAC 营养三角模型中的分布。

图 1　我国营养素标准物质

Fig.1　Nutrient CRM in China

1.1 蛋白质类标准物质

蛋白质作为生命活动的核心载体，不仅构成了机体的结构基础，更在调控酶活性、免疫应答及代谢稳态中发挥关键作用[19–20]。目前，我国主要由 NIM、中国农业科学院和上海市计量测试技术研究院等机构牵头，研制了主要以粗蛋白和氨基酸为特性量的 74 种相关 CRM，涵盖 35 种纯度、21 种溶液及 18 种基体 CRM(表 1)。

纯度 CRM 主要涵盖常见必需与非必需氨基酸(如亮氨酸、缬氨酸、赖氨酸、甘氨酸、谷氨酸等)，以及部分功能性氨基酸及其衍生物(如牛磺酸、羟脯氨酸等)；溶液 CRM 则包括单一氨基酸溶液(如天冬氨酸、谷氨酸溶液)和多组分氨基酸混合溶液，用以满足不同氨基酸的定量和方法验证需求。以粗蛋白为特性量的 CR 全部为基体 CRM，涵盖了奶粉、全麦粉、豆粕以及鱼粉等典型基体。如 NIM 针对奶粉中粗蛋白的定量，集成杜马斯燃烧法、AOAC 967.12 染料结合法和凯氏定氮法，实现了不同原理方法在检测效率与成本上的互补，开发了 GBW (E) 100754、GBW (E) 100755 和 NIM-RM 3832 系列 CRM。在氨基酸方面，上海市计量测试技术研究院于 2000 年率先发布了 2 个基体 CRM。其中，GBW (E) 100009 用于测定水稻粉中总氨基酸含量和天门冬氨酸含量，GBW (E) 100010 用于测定小麦粉中 15 种氨基酸含量，不确定度范围为 4.2%~17.6%。这类 CRM 定值主要采用液相色谱法，并通过多家实验室联合定值的方式确定有证值。2019 年，中国农业科学院进一步拓展基体类型，发布了豆粕和鱼粉中 15 种氨基酸的 CRM，该 CRM 使用酸水解结合全自动氨基酸分析仪，并通过单点外标与多实验室联合定值，有效提升了准确性，不确定度范围为 3.1%~7.4%。目前我国已有的氨基酸类 CRM 覆盖了所有 9 种必需氨基酸和几乎全部非必需氨基酸，还包括了 11 种食品基体 CRM(水稻粉、小麦粉、乳粉、豆粕和鱼粉等)。

总体来看，我国在蛋白质及氨基酸分析用 CRM 方面，已建立较为完善的纯度和溶液 CRM 体系，为仪器校准、定量溯源提供了可靠支撑。然而，与之相比，基体 CRM 仍显不足，仅覆盖了区域 5、7、8 的少量食品种类。在实际检测中，氨基酸定量结果不仅受仪器分析性能影响，还高度依赖于样品前处理过程，包括蛋白质水解完全性、部分氨基酸在强酸条件下的降解或转化，以及基体共存组分对分离和检测过程的干扰。当缺乏与真实样品基体匹配的基体 CRM 时，难以全面评估上述因素对测量结果的综合影响。此外，针对乳清蛋白、酪蛋白等特征蛋白及功能肽等更高结构层级的分析需求，其 CRM 的研制同样非常有限甚至空白。在缺乏组成明确、量值可靠的纯度/溶液 CRM 作为定值和溯源基础的前提下，更缺少基体 CRM 以实现复杂蛋白质组分和加工食品等的准确赋值与营养功能评价。因此，未来蛋白质类 CRM 的完善，应遵循由单一组分到复杂基体、由纯度和溶液 CRM 向基体 CRM 逐步拓展的发展路线，在夯实基础溯源能力的同时，逐步提升对复杂食品体系中蛋白质营养功能的表征水平。

1.2 脂类标准物质

脂质是一类重要的宏量营养素，不仅是人体能量供应的主要来源之一，还在细胞结构、激素合成、维生素吸收等方面发挥关键作用[21–22]。目前国内从事脂类 CRM 的研究单位主要包括国家粮食局科学研究院、NIM 等。我国已有 45 种脂类 CRM，其中包括 23 种纯度 CRM、7 种溶液 CRM 和 15 种基体 CRM。如表 2 所示，脂肪酸类 CRM 占主体，包括饱和脂肪酸(如十二酸、十六酸)、不饱和脂肪酸(如亚油酸、α-亚麻酸)及其甲酯衍生物，且这些脂肪酸 CRM 大多以纯度和植物油基体(如大豆油、菜籽油、花生油、玉米油等)的形式存在，集中分布在区域 1。该类 CRM 对食用植物油中脂肪酸组成的定量具有良好的针对性。然而，除此之外，仅 GBW (E) 100641 乳粉中二十二碳六烯酸成分分析标准物质在食品营养三角中分布于区域 6，对其他区域的高脂肪含量基体的研究相对较少。除脂肪酸类 CRM 外，我国现有的脂类标准物质在数量和类型上相对

表 1 我国蛋白质相关 CRM 概况

Table 1 Overview of protein related CRM in China

类型	主要特性量	代表性 CRM	关键定值技术	主要优势	缺口与挑战
纯度	常见的必需与非必需氨基酸	GBW (E) 100050–100084	基于酸碱滴定、离子交换色谱和柱前衍生液相色谱等技术的质量平衡法、定量核磁共振法	氨基酸种类覆盖全面；技术路线成熟	功能蛋白 CRM 缺口
	功能性氨基酸及衍生物	GBW (E) 100594–100595			
溶液	单一氨基酸溶液	GBW (E) 100659–100672			
	氨基酸混合溶液	GBW (E) 100062			
基体	谷物(区域 5)及乳粉(区域 6)中粗蛋白	GBW (E) 100009–100010; 100126	凯氏定氮法、杜马斯燃烧法	已实现对谷物、乳粉等常见食品中粗蛋白含量和部分氨基酸含量的覆盖	缺乏其他类型食品基体；特性量大多局限于粗蛋白含量
	豆粕(区域 7)、鱼粉(区域 8)中粗蛋白、氨基酸	GBW (E) 100533; 100573–100576; 100643–100644			
	乳粉(区域 6)中粗蛋白、氨基酸	GBW (E) 100642; 100754–100756; NIM-RM 3832			

表 2　我国脂质相关 CRM 概况
Table 2　Overview of fat related CRM in China

类型(数量)	主要特性量	代表性 CRM	关键定值技术	主要优势	缺口与挑战
纯度(23)	饱和脂肪酸	GBW (E) 100142–100143; NIM-RM 3613; NIM-RM 3641–3643	基于气相色谱和电位滴定等技术的质量平衡法	已覆盖各类脂肪酸及其异构体	甘油酯、磷脂、固醇等其他脂质的纯度和溶液 CRM 数量较少
	顺/反式不饱和脂肪酸	NIM-RM 3614; NIM-RM 3656–3665			
	多不饱和脂肪酸	NIM-RM 3670; NIM-RM 3671			
	甘油三酯及磷脂类	GBW (E) 100996–100999			
溶液(7)	脂肪酸甲酯混合溶液	NIM-RM 3655			
	环糊精体系中胆固醇/甘油溶液	GBW09823–09828			
基体(15)	食用植物油(区域 1)中脂肪酸	GBW (E) 100120–100125; NIM-RM 3652–3654	气相色谱法、液相色谱-同位素稀释质谱法	已有丰富的油脂类食品中脂肪酸组成的 CRM	高脂肪食品中复杂脂质体系覆盖不足
	蛋黄粉(区域 3)胆固醇	GBW10030			
	乳粉(区域 6)中粗脂肪、脂肪酸	GBW (E) 100598; GBW (E) 100641			
	豆粕(区域 7)、鱼粉(区域 8)基体中粗脂肪	GBW (E) 100643–100644			

有限, 仅有 15 种涉及粗脂肪、甘油酯、磷脂和胆固醇的 CRM。与单一脂肪酸检测相比, 乳制品、肉制品及加工食品等高脂肪食品中, 脂质往往以甘油三酯、磷脂、固醇酯等多种形式共存, 并伴随蛋白质、糖类和水分等复杂基体成分。在此条件下, 现有的脂肪酸 CRM 难以全面评估复杂基体条件下的全面脂类分析。

定量方面, 气相色谱技术仍是核心分析技术, 有 22 种脂肪酸 CRM 均采用了气相色谱或与其他方式结合的方法进行定值[23–24]。NIM 基于气相色谱-同位素稀释质谱分别实现了 NIM-RM 3652、NIM-RM 3653 和 NIM-RM 3654 植物油中常见脂肪酸的定量测定, 不确定度(0.03%~0.10%)更低。电位滴定法因其良好的计量溯源性, 可明确溯源到电量的基本单位库仑, 被广泛应用于各类脂质纯度 CRM 的定值过程。NIM 采用电位滴定和气相色谱法研制了 NIM-RM 3643 二十二酸纯度标准物质等 16 种 CRM。

当前, 尽管脂肪酸类 CRM 的覆盖范围已较为广泛, 但基体类型仍以食用植物油为主, 对于脂肪酸组成明确、基体相对简单的油脂样品具有良好支撑作用。然而, 在其他高脂食品中, 脂质通常以多种结合形式存在并与非脂质组分共存, 仅依赖植物油基体 CRM 难以满足复杂基体条件下的检测需求。未来脂类 CRM 的发展需在保持脂肪酸类优势的基础上, 逐步拓展至甘油酯、磷脂、固醇类以及其他衍生脂质等关键类别, 并在基体选择上覆盖至不同类型高脂食品基体。

1.3　糖类标准物质

糖类作为生命体的基础能量物质和结构组分, 在生物体内广泛存在并参与能量代谢、细胞识别及信号传导等核心生理过程[25–26]。目前, 国内糖类 CRM 的研究主要由 NIM、自然资源部第三海洋研究所等机构主导, 已累计研制 36 种糖类 CRM(表 3)。从类型分布看, 纯度 CRM 占据主导地位, 共 32 种, 涵盖葡萄糖、果糖、半乳糖等基础单糖, 蔗糖、乳糖等双糖, 岩藻糖基乳糖、透明质酸钠等功能性聚糖等。相比之下, 溶液和基体 CRM 的数量相对较少: 仅有 1 种低聚果糖混合溶液 CRM; 2 种基体 CRM 涉及全麦粉粗纤维素和水稻粉粗淀粉检测。目前, 针对果蔬、婴幼儿配方食品等复杂基体中的糖类 CRM 仍属空白。

在定值技术方面, 高效液相色谱法及其联用技术覆盖超过 60%的糖类 CRM 检测。针对糖类分子缺乏紫外吸收的特性, 高效液相色谱法联合示差折光检测器与蒸发光散射检测器成为主流检测方案。NIM 应用这些检测技术成功研制了葡萄糖纯度标准物质(GBW10062)等系列产品, 不确定度控制在 0.5%~0.8%范围内。值得关注的是定量核磁共振技术的创新应用, NIM 通过定量核磁共振法与质量平衡法联用策略, 将 2'-岩藻糖基乳糖纯度标准物质(NIM-RM 5072)的不确定度优化至 0.4%。

当前糖类 CRM 研发的典型问题包括糖类物质的高吸湿性、高纯样品获取与复杂异构体的分离鉴定等[27–28]。未来应着重于以上方面的技术突破, 重点加强食品基体 CRM 的研发, 以满足糖类检测和精准营养研究的需求。

1.4　维生素类标准物质

我国作为全球维生素产业的领军者, 2023 年总产量攀升至 43.4 万吨, 占据全球 84.4%的市场份额[29–30]。依据国家标准物质资源共享平台数据, 我国主要的维生素 CRM 的研制机构包括 NIM 和浙江省疾病预防与控制中心等 4 家机构。目前已发布 33 种维生素 CRM, 涵盖 20 种纯度 CRM 和 13 种基体 CRM(表 4)。涉及的维生素种类主要为水溶性

表 3 我国碳水化合物类相关 CRM 概况
Table 3 Overview of carbohydrate related CRM in China

类型(数量)	主要特性量	代表性 CRM	关键定值技术	主要优势	缺口与挑战
纯度(32)	单糖与糖醇	GBW10062–10067; GBW (E) 100229–100234; GBW (E) 100678; GBW (E) 100681	基于高效液相色谱-示差折光检测器和蒸发光散射检测器等技术的质量平衡法、定量核磁共振法	涵盖单糖、双糖、低聚糖等多种糖类	对高聚度、多异构体或复杂结构糖类的特性量覆盖仍有限
	功能性/修饰单糖	GBW (E) 100593; GBW (E) 100679–100680			
	双糖与寡糖	GBW10065; GBW10067; GBW (E) 100992–100994			
	人乳寡糖及衍生物	GBW (E) 100879; NIM-RM 5072–5073			
	多糖及重复结构单元	GBW (E) 091150; NIM-RM 3676–3677; GBW (E) 091261; GBW (E) 091327–091328; NIM-RM 5400			
溶液(1)	寡糖混合溶液	GBW (E) 100995			
基体(2)	谷物(区域 5)中粗纤维、粗淀粉	GBW (E) 100009; GBW (E) 100128	范氏洗涤分析法	可满足谷物中基础糖类检测	基体类型数量和糖类特性量空白

表 4 我国维生素相关 CRM 概况
Table 4 Overview of vitamin related CRM in China

类型(数量)	主要特性量	代表性 CRM	关键定值技术	主要优势	缺口与挑战
纯度(20)	水溶性维生素	GBW10038; GBW10053; GBW10126; GBW (E) 100183–100184; GBW (E) 100265; GBW (E) 100268–100272; GBW (E) 100333–100338; NIM-RM 3600–3603	基于液相色谱/高效毛细管电泳等技术的质量平衡法、定量核磁共振法	B 族维生素和维生素 D 的定值技术较为成熟，相应 CRM 覆盖全面	维生素 D 以外的脂溶性维生素 CRM 仍为空白
	脂溶性维生素	GBW (E) 100266–100267			
基体(13)	乳粉(区域 6)、蛋黄粉(区域 3)中的单一维生素	GBW10037; GBW10277–10278; GBW (E) 100893–100895; GBW (E) 100924	液相色谱-同位素稀释质谱法	基本满足乳粉等常见食品和膳食补充剂中的维生素检测需求	其他食品类别如谷物、果蔬及高加工食品中维生素相关基体覆盖不足
	乳粉(区域 6)和维生素片中的多种维生素(及部分无机元素)	GBW (E) 100227–100228; GBW (E) 100273; GBW (E) 100892; NIM-RM 3872			

维生素中 B 族(如 B_3、B_6、B_{12})和脂溶性维生素 D 族(如 D_2、D_3)。现有基体 CRM 主要集中于婴幼儿配方奶粉(占比约 80%)，其余基体类型则包括复合维生素片和蛋黄粉，主要分布在食品营养三角区域 6。

GBW10037 是 NIM 研制的一种婴幼儿配方奶粉中维生素 B_3(烟酰胺)的 CRM[31]。该材料采用液相色谱-同位素稀释质谱法测定奶粉中烟酰胺的有证值。GBW10037 的维生素 B_3 作为国际比对样品，测定值为 107 mg/kg，其与国际中位值(106.4 mg/kg)的高度吻合及最小扩展不确定度(2.1 mg/kg)彰显了技术优势。在此基础上，NIM 进一步采用液相色谱-同位素稀释质谱法、液相色谱-串联质谱法和液相色谱-紫外检测器联用法拓展测定了 GBW (E) 100227 婴幼儿配方奶粉中和 GBW (E) 100228 复合维生素片中维生素 B_1、B_2、B_3 和 B_6 的含量。复合维生素标准物质 GBW (E) 100273 采用液相色谱-紫外吸收法同样实现了上述 4 种维生素的准确定值。

当前维生素 CRM 研发面临受光、热、湿度及氧化还原条件影响的稳定性难题，以及复杂基体中非游离态维生素的精准定量问题[29–30]。未来，维生素 CRM 的研制应聚焦于提高 CRM 在各种环境条件下的稳定性；进一步拓展 B 族和 D 族以外的维生素种类，以及推进除营养三角区域 6 以外的新型基体 CRM 研制，这些技术突破将有力提升维生素分析方法在不同食品基体中的适用性和检测结果的可比性，推动我国维生素检测能力的升级。

1.5　无机元素类标准物质

食品中的常量元素和微量元素对人体的健康具有重要影响。根据 GB 28050—2011 规定，预包装食品营养标签必须标识钠含量，可选择标识铁、钙、锌等元素含量，同时对硒等微量元素的含量声称设定了明确标准[32]。我国在元素类 CRM 数量在各类营养素 CRM 中占比最高，目前已有 NIM、北京化工大学、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所等 10 余家机构累计研制 556 种元素相关 CRM，包括 3 种纯度 CRM、308 种溶液 CRM 和 284 种基体 CRM。如图 2 所示，基体 CRM 种类丰富，涵盖谷物、蔬菜、乳制品等百余种食品基体，食品营养三角中主要分布在区域 5 和区域 6。浓度范围广泛，涵盖了钙、磷、镁、钾、钠、硫、氯等常量元素及铁、锌、硒、碘、铜等微量元素，形成了较为完整的量值体系。其中，溶液 CRM 主要用于仪器校准和量值传递，而基体 CRM 则用于评估复杂食品基体对元素消解、回收及测量信号稳定性的综合影响。

在定值技术方面，主要采用滴定法、分光光度法、原子吸收光谱法、电化学分析法以及电感耦合等离子体质谱法等检测方法[32–35]。其中电感耦合等离子体质谱法及其联用技术是我国元素类 CRM 的主要定值手段。近年来，具有高准确度特征的同位素稀释质谱法在痕量元素检测中应用广泛，NIM 联合多家单位采用电感耦合等离子体质谱法与同位素稀释质谱联用技术，成功对脱脂大豆粉、全脂大豆粉、木耳、牡蛎、乳粉等复杂基体中的多种元素进行定值，测量不确定度控制在 0.16%~0.83%区间[36]。

需要关注的是，当前元素类 CRM 研发存在较明显的同质化现象。以钙元素为例，其单元素 CRM 多达 22 种，而大米和小麦成分分析 CRM 分别达到 29 种和 17 种。与此同时，针对食品三角中区域 5、6 以外的高脂肪和高蛋白类食品基体，例如坚果及其制品、畜禽肉及制品等，现有 CRM 覆盖仍显不足。此类基体中油脂和蛋白质会抑制元素提取效率，且有机-无机成分间的相互作用易引发基体效应，导致检测信号稳定性降低。此外，硒代氨基酸、金属有机络合物等形态化 CRM 在储存过程中易发生化学转化或降解，影响量值溯源的可靠性。尽管已发布硒代蛋氨酸、硒酸盐等溶液形态 CRM，但能满足复杂基体形态分析需求的基体 CRM 仍较为匮乏。在上述情形下，单纯依赖溶液型或单元素 CRM 难以全面反映复杂食品体系中元素的真实存在状态和分析行为，进一步凸显了针对特定食品基体和元素形态研制基体 CRM 的必要性。

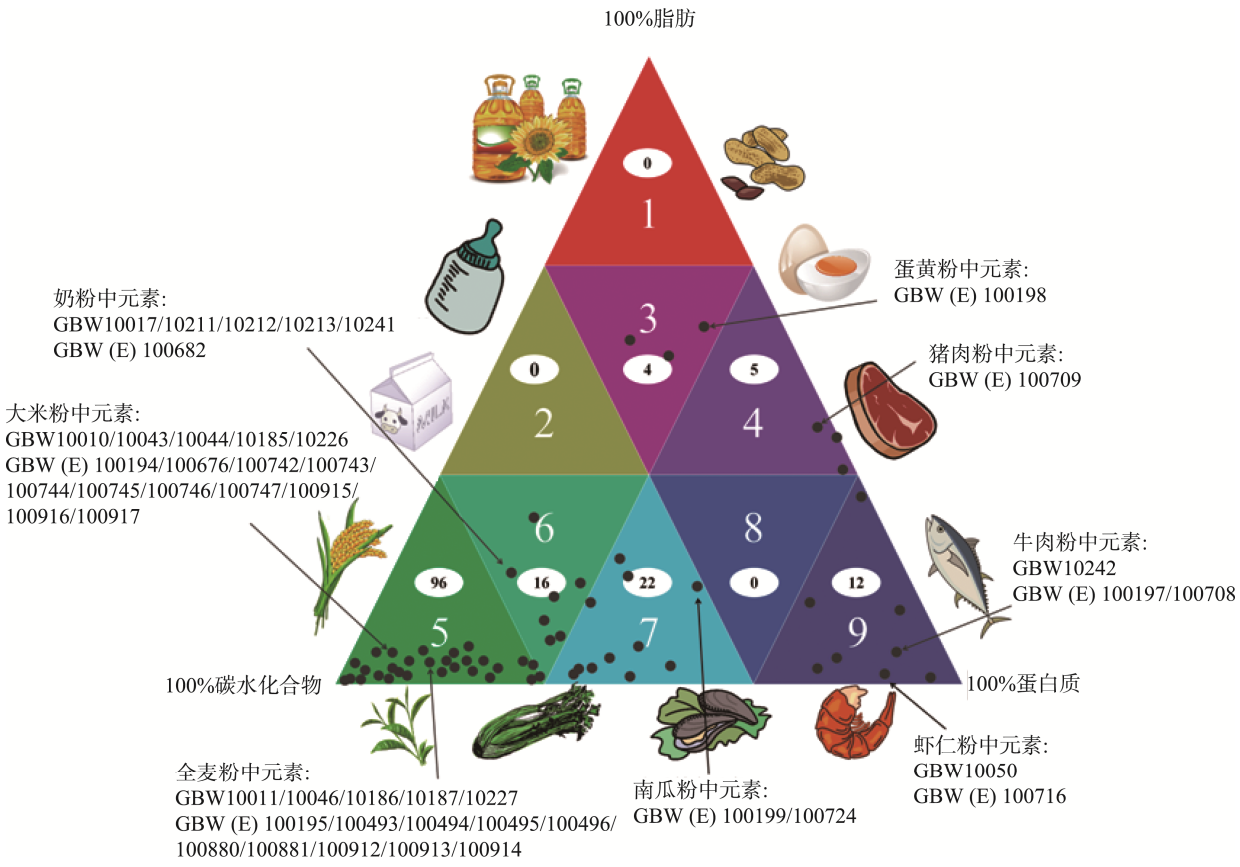


图 2　我国元素分析用基体标准物质在食品营养三角的分布

Fig.2　Distribution of matrix reference materials for elemental analysis in China in the food nutrition triangle

1.6 其 他

除基础营养素外，部分具有潜在健康效益的植物活性成分的标准化研究也取得进展。虽然这些成分目前主要应用于药用领域，但相关 CRM 的研发经验为未来膳食补充剂标准体系的建设提供了技术储备[37]。目前累计发布的 200 余种 CRM 基本覆盖了植物源活性物质的主要类别：包括黄酮类(涵盖槲皮素、山奈素等黄酮醇类，柚皮素等二氢黄酮类，以及芦丁等黄酮苷类)、异黄酮类(以染料木素、大豆苷为代表的苷元及其糖苷形式)、简单酚类(如丹皮酚、阿魏酸等)、生物碱类(咖啡因、茶碱等)以及糖类衍生物(人参皂苷、葛根素等)。这些 CRM 的建立为功能性食品和膳食补充剂的研发提供了重要的质量控制基础和技术支撑。

2 国外营养素标准物质现状

国际上，以美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)、欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)及韩国标准科学研究院(Korea research institute of standards and science, KRISS)为代表的计量机构，依据各自的法规监管需求与产业特征，构建了各具特色的食品营养素 CRMs 体系[38–40]。目前，NIST 已发布 68 种以标准参考物质(standard reference material, SRM)为编号的食品基体 CRM，包括婴儿配方奶粉、肉类、菠菜及植物油等。其产品具有几大明显特征[38,41–45]：(1)以法规需求为导向，NIST 的营养素 CRM 建设直接服务于美国《婴儿配方奶粉法案》《营养标签与教育法案》及《膳食补充剂健康与教育法案》等监管体系，核心目标是保障营养标签准确性、提升行业质量控制能力。因此其产品体系紧密贴合美国居民饮食结构与市场主流食品类别。(2)基体覆盖全面，NIST 以 AOAC 食品营养三角为框架规划有机营养素 CRM，当前已覆盖除区域 8 之外的所有区域，具有目前基体覆盖面最广的营养素 CRM 体系。(3)多组分协同定值，如 SRM 1869 婴儿配方奶粉涵盖了维生素、脂肪酸、氨基酸等 117 种营养素指标，约 76.5%的 SRM 含有两种以上营养素特性值。(4)高准确度定值技术的开发应用，NIST 率先开发了基于液相色谱-同位素稀释质谱法的水溶性维生素同步检测方法，实现了在单一流程中对 B 族维生素多种形式的精准定量，并在积极攻关维生素 D 等脂溶性成分的液相色谱-串联质谱测定技术。

除了 NIST 食品营养素分析用 CRM 研制和生产方面形成了较大规模外，JRC 目前共有 39 种食品营养素 CRM，其中 37 种为基体 CRM，涵盖奶粉、肉类及谷物等，营养素方面仍以元素分析为主[11,46–48]。KRISS 以婴幼儿配方奶粉为起点，为不同营养素开发独立的同位素稀释质谱方法，实现了对维生素[48–53](含维生素 K_1 异构体)、脂肪酸[54–55]、氨基酸及矿物质等多种营养素的精准定值，并拓展至其他食品基体[11]，以此策略开发了累计 21 种多营养素以 KRISS 为编号基体 CRM。

3 我国营养素标准物质存在的问题与展望

我国营养素 CRM 经过多年发展，已在数量上取得有效进展，形成了以单一营养素 CRM 为主导，多营养素 CRM 为补充的食品营养素 CRM 格局。然而，面对食品工业转型升级和精准营养检测的时代需求，现行 CRM 体系在基体覆盖度、多指标协同及功能结构表征等维度仍存在不足。未来我国营养素 CRM 的发展可考虑以下几个维度：

首先，结构分布有待优化。一方面，不同营养素类别的 CRM 分布不均衡，例如元素类 CRM 占比较高(约 74%)，且部分类型存在一定的同质化倾向(如钙单元素 CRM 达 22 种)。另一方面，在基体覆盖上，现有食品基体 CRM 已初步覆盖 AOAC 营养三角的 6 个区域，但各区域代表性基体的数量尚显有限(如区域 5 仅包括水稻和小麦，区域 6 仅含婴幼儿配方奶粉)，完整的基体谱系仍需进一步完善(图 1b)。此外，其他营养素类型的基体 CRM 也存在覆盖面和多样性不足的问题。

其次，多营养素特性量 CRM 的研制需要加强。目前，我国仅有 10 种(占比 3.3%)食品基体 CRM 能够提供两种或两种以上营养素的特性量，涵盖的营养素有证值在 3 至 18 项之间。这些 CRM 涉及的基体类型相对单一，仅包括水稻粉、小麦粉、豆粕、鱼粉 4 种常见食品，以及婴幼儿配方奶粉、多维元素片 2 种特殊食品。推动多指标协同检测技术及多特性量 CRM 的研发，对于提升核心测量能力和避免重复性工作具有重要意义。

最后，在适应新兴检测技术需求方面尚存提升空间。现有 CRM 较多集中于粗脂肪、总蛋白等宏观指标的表征，对于乳铁蛋白、甘油酯等结构复杂、具有特定功能的精细化营养素的精确测量能力尚不完善，而这些成分在产业质量提升方面的需求日益增长。

通过多维度的协同发展，我国营养素 CRM 体系将实现从“数量领先”到“质量引领”的跨越，为我国食品产业升级与精准营养干预提供坚实的计量支撑。

4 结束语

营养素 CRM 是支撑食品营养检测量值准确性与结果可比性的重要计量工具，其体系建设水平直接影响营养标签监管、质量控制及相关科研工作的可靠性。本文从营养素类别、CRM 形态及定值技术等多个维度，对国内外营养素 CRM 的发展现状进行了系统梳理与分析。综合现有研

究可以看出, 营养素 CRM 已由早期以单一营养素、单一基体为主, 逐步发展为覆盖多营养素类别、不同基体并服务于多种检测场景的综合体系。国际主要计量机构在 CRM 体系规划中, 注重CRM与实际分析需求之间的匹配性, 通过多营养素特性量协同定值和高准确度测量方法的应用, 不断提升对复杂基体和复杂结构营养素的测量能力。相比之下, 我国营养素 CRM 在数量规模和基础覆盖方面已取得有效进展, 但在体系结构的协调性以及高层次计量能力等方面, 仍有进一步提升空间。随着食品营养检测由单指标评价向多指标联合测定、由宏观营养成分向结构与功能层面拓展, 营养素 CRM 的建设目标也需要相应调整。未来相关研究应在保障量值溯源性和实际分析需求的前提下, 加强对多营养素协同定值策略、高准确度测量方法适用范围以及精细化营养素测量能力的研究, 以提升 CRM 对复杂检测任务的整体支撑能力。通过持续完善营养素 CRM 体系结构和技术路线, 可进一步夯实食品营养检测的计量基础, 为食品安全监管、营养标签实施及我国营养健康产业发展提供更加稳定和可靠的保障。

参考文献

[1] RAYNER M. Nutrient profiling for regulatory purposes [J]. Proceedings of the nutrition society, 2017, 76(3): 230–236.

[2] MDNOH MF, GUNASEGAVAN RDN, MUSTAFA KN, *et al*. Recent techniques in nutrient analysis for food composition database [J]. Molecules, 2020, 25(19): 4567.

[3] VARZAKAS T, SMAOUI S. Global food security and sustainability issues: The road to 2030 from nutrition and sustainable healthy diets to food systems change [J]. Foods, 2024, 13(2): 306.

[4] CREAN AJ, SENIOR AM, FREIRE T, *et al*. Paternal dietary macronutrient balance and energy intake drive metabolic and behavioral differences among offspring [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2982.

[5] PASSARELLI S, FREE CM, SHEPON A, *et al*. Global estimation of dietary micronutrient inadequacies: A modelling analysis [J]. The Lancet Global Health, 2024, 12(10): e1590–e1599.

[6] BENBROOK C, MESNAGE R. Enhanced labeling to promote consumption of nutrient dense foods and healthier diets [J]. Foods, 2024, 13(21): 3377.

[7] KUSZAK AJ, HOSBAS-COSKUN S, WISE SA. A new database to guide reference material selection for dietary supplement and nutrition science [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417(12): 2379–2386.

[8] WISE SA, HOSBAS CS, HAYES HV, *et al*. Development of reference materials for dietary supplements-analytical challenges, use, limitations, and future needs [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417(12): 2439–2471.

[9] 王晶. 化学计量在食品标签中的作用[J]. 中国计量, 2005(1): 70–71.
WANG J. The role of chemical metrology in food labeling [J]. China Metrology, 2005(1): 70–71.

[10] 杜俊杰, 徐锦川, 陈雅芝, 等. 烹饪方式对中式菜肴营养成分影响的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 251–259.
DU JJ, XU JC, CHEN YZ, *et al*. Research progress on the effect of cooking methods on the nutritional content of Chinese dishes [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 251–259.

[11] WAGSTAFFE PJ, BELLIARDO JJ. The BCR programme and measurements for food and agriculture [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1990, 338(4): 469–472.

[12] LEE J, KIM B, LEE SY, *et al*. Development of an infant formula certified reference material for the analysis of organic nutrients [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125088.

[13] 程涛, 田玉平. 食品类标准物质的发展[J]. 中国计量, 2012(8): 80–81.
CHENG T, TIAN YP. Development of food reference materials [J]. China Metrology, 2012(8): 80–81.

[14] 刘素丽, 王宏伟, 赵梅, 等. 食品中基体标准物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 8–13.
LIU SL, WANG HW, ZHAO M, *et al.* Progress in research on matrix reference materials in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(1): 8–13.

[15] 郭玲玲, 徐慧, 匡华. 食品安全检测基体标准物质研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(7): 71–83.
GUO LL, XU H, KUANG H. Research progress on matrix reference materials for food safety analysis [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(7): 71–83.

[16] 李红梅, 马联弟, 徐锐锋. 建立我国食品安全计量溯源体系实现食品检测数据的有效与可比[J]. 中国计量, 2009(9): 32–34.
LI HM, MA LD, XU RF. Establishing a traceability system for food safety metrology in China to ensure the validity and comparability of analytical data [J]. China Metrology, 2009(9): 32–34.

[17] 卢晓华, 薄梦, 吴雪, 等. 标准物质领域发展现状及趋势[J]. 化学试剂, 2022, 44(10): 1403–1410.
LU XH, BO M, WU X, *et al.* Current status and trends in the development of reference materials [J]. Chemical Reagents, 2022, 44(10): 1403–1410.

[18] SHARPLESS KE, GREENBERG RR, SCHANTZ MM, *et al*. Filling the AOAC triangle with food-matrix standard reference materials [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2004, 378(5): 1161–1167.

[19] WOLF WR, ANDREWS KW. A system for defining reference materials applicable to all food matrices [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1995, 352(1): 73–76.

[20] AJOMIWE N, BOLAND M, PHONGTHAI S, *et al*. Protein nutrition:

Understanding structure, digestibility, and bioavailability for optimal health [J]. Foods, 2024, 13(11): 1771.

[21] ADHIKARI S, SCHOP M, BOER-IJM D, *et al.* Protein quality in perspective: A review of protein quality metrics and their applications [J]. Nutrients, 2022, 14(5): 947.

[22] XU E, CHEN C, FU J, *et al*. Dietary fatty acids in gut health: Absorption, metabolism and function [J]. Animal Nutrition, 2021, 7(4): 1337–1344.

[23] CUSTERS, EMMA EM, KILIAAN, *et al*. Dietary lipids from body to brain [J]. Progress in Lipid Research, 2022, 85: 101144.

[24] 周明慧, 伍燕湘, 李丽, 等. 粮油基体标准物质的研制、应用及展望[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 188–196.
ZHOU MH, WU YX, LI L, *et al.* Development, application and prospects of grain and oil matrix reference materials [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 188–196.

[25] 韩璐, 盛灵慧, 高运华, 等. 脂肪酸标准物质的研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(5): 9–15.
HAN L, SHENG LH, GAO YH, *et al.* Research progress on fatty acid reference materials [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(5): 9–15.

[26] SEAL CJ, COURTIN CM, VENEMA K, *et al*. Health benefits of whole grain: Effects on dietary carbohydrate quality, the gut microbiome, and consequences of processing [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 2742–2768.

[27] CUMMINGS JH, STEPHEN AM. Carbohydrate terminology and classification [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2007, 61(1): S5–S18.

[28] WIENBERG F, HÖVELS M, DEPPENMEIER U. High-yield production and purification of prebiotic inulin-type fructooligosaccharides [J]. AMB Express, 2022, 12(1): 144.

[29] LIU Y, HUANG Y, ZHU R, *et al.* Structural elucidation approaches in carbohydrates: A comprehensive review on techniques and future trends [J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134118.

[30] 韩璐, 李春, 高运华, 等. 维生素标准物质的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(15): 3883–3890.
HAN L, LI C, GAO YH, *et al*. Research progress on vitamin reference materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(15): 3883–3890.

[31] HUANG T, ZHANG W, LIU J, *et al*. A new certified reference material (GBW10037) of vitamin B3 in infant formula [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2010, 23(4): 367–372.

[32] 周晶, 吴灵敏, 徐成辰, 等. 基于农产品及食品元素分析使用的标准品现状与管理对策研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(24): 218–222.
ZHOU J, WU LM, XU CC, *et al.* Current status and management strategies of reference standards used for elemental analysis in agricultural products and food [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(24): 218–222.

[33] 唐本玲, 王立秋. ICP-MS 在食品标准物质研制中的应用研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(5): 67–71.
TANG BL, WANG LQ. Application of ICP-MS in the development of food reference materials [J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(5): 67–71.

[34] 林永健, 李雨哲, 徐敦明, 等. 食品安全检测主要标准样品研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3164–3171.
LIN YJ, LI YZ, XU DM, *et al.* Research progress on major standard samples for food safety testing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3164–3171.

[35] CHRISTOPHER SJ, ELLISOR DL, DAVIS WC. Investigating the feasibility of ICP-MS/MS for differentiating NIST salmon reference materials through determination of Sr and S isotope ratios [J]. Talanta, 2021, 231: 122363.

[36] 李潇, 宋盼淑, 逯海, 等. 同位素稀释质谱法测定奶粉中痕量硒的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(15): 3938–3943.
LI X, SONG PS, LU H, *et al.* Uncertainty evaluation of isotope dilution mass spectrometry for trace selenium determination in milk powder [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(15): 3938–3943.

[37] 宁德山, 罗其昌, 陈阳, 等. 生物活性物质微胶囊化应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(14): 193–200.
NING DS, LUO QC, CHEN Y, *et al.* Research progress on microencapsulation applications of bioactive substances [J]. Food Research and Development, 2024, 45(14): 193–200.

[38] WISE SA, PHILLIPS MM. Evolution of reference materials for the determination of organic nutrients in food and dietary supplements-a critical review [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019, 411(1): 97–127.

[39] QUEVAUVILLER P. The BCR framework: 25 years of quality measurements within the European Union [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1999, 18(5): 302–311.

[40] WOLF WR. History of reference materials for food and nutrition metrology: As represented in the series of BERM symposia [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(2): 413–421.

[41] THOMAS JB, YEN JH, SHARPLESS KE. Characterization of NIST food-matrix standard reference materials for their vitamin C content [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(13): 4539–4548.

[42] WISE SA, KUSZAK AJ, CAMARA JE. Evolution and impact of standard reference materials (SRMs) for determining vitamin D metabolites [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2024, 416(9):2335–2358.

[43] ROSELAND JM, PATTERSON KY, ANDREWS KW, *et al.* Interlaboratory trial for measurement of vitamin D and 25-hydroxyvitamin D [25 (OH) D] in foods and a dietary supplement using liquid

chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(16): 3167–3175.

[44] PHILLIPS MM. Liquid chromatography with isotope-dilution mass spectrometry for determination of water-soluble vitamins in foods [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, 407(11): 2965–2974.

[45] WELCH MJ, COLBERT JC, GILL LM, *et al*. The certification of SRM 1546--meat homogenate, a new reference material for nutrients in a high protein, high fat matrix [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(1): 42–47.

[46] SANDSTRÖM B. A framework for food-based dietary guidelines in the European Union [J]. Public Health Nutrition, 2001, 4(2A): 293–305.

[47] OLLILAINEN V, FINGLAS PM, VAN-DEN-BERG H, *et al.* Certification of B-group vitamins (B_1, B_2, B_6, and B_{12}) in four food reference materials [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(1): 315–321.

[48] DABRIO M, MARINI M, RICCI M, *et al*. Certification of the fatty acid profile of soya-maize oil blend BCR-162R [R]. Brussels: Commission of the European Communities, 2007.

[49] HYUNG SW, LEE J. Certification and long-term stability assessments of 5-methyltetrahydrofolate in ppinach and kimchi cabbage certified reference materials using tri-enzyme method and isotope dilution ultra-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry [J]. Chromatographia, 2024, 87(11): 785–794.

[50] LEE J, KIM B, SIM HJ, *et al.* Development of a certified reference material for the analysis of vitamins in multivitamin tablets [J]. Journal of Analytical Science and Technology, 2023, 14(1): 4.

[51] LEE J, JANG ES, KIM B. Development of isotope dilution-liquid chromatography/mass spectrometry combined with standard addition techniques for the accurate determination of tocopherols in infant formula [J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 787: 132–139.

[52] LEE H, LEE J, CHOI K, *et al.* Development of isotope dilution-liquid chromatography/tandem mass spectrometry for the accurate determination of trans-and cis-vitamin K1 isomers in infant formula [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 729–736.

[53] LIM YO, KIM B, AHN S, *et al*. Improvement of accuracy for the determination of vitamin A in infant formula by isotope dilution-liquid chromatography/tandem mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1393–1398.

[54] LEE J, SONG YS, SIM HJ, *et al*. Isotope dilution-liquid chromatography/mass spectrometric method for the determination of riboflavin content in multivitamin tablets and infant formula [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 50: 49–54.

[55] LEE S, LIM DK, BAEK SY, *et al*. Quantitative analyses of essential fatty acids in cereals and green vegetables by isotope dilution-gas chromatography/mass spectrometry [J]. Journal of Analytical Science and Technology, 2020, 11(1): 37.

(责任编辑: 冯东慧 韩晓红)