DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251118005
引用格式: 姜华军, 朱子龙, 魏敏, 等. DNA 条形码技术在海产品物种鉴定中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 3–10.
JIANG HJ, ZHU ZL, WEI M, *et al*. Research progress on the application of DNA barcoding in species identification of seafood [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 3–10. (in Chinese with English abstract).

DNA 条形码技术在海产品物种鉴定中的应用研究进展

姜华军*, 朱子龙, 魏　敏, 刘书畅, 王文玫

(威海市食品药品检验检测研究院, 威海市食品药品质量评价与技术研究重点实验室, 威海　264210)

摘　要: 随着全球海产品供应和消费量逐年增加, 以次充好、掺假造假、标签错标等欺诈行为时有发生, 这不仅侵害消费者利益, 还可能带来食品安全问题。海产品物种鉴定逐渐成为人们关注的热点问题, 也是保障海产品质量安全、维护消费者利益的重要环节。DNA 条形码技术作为一种生物分类学研究工具, 为海产品物种鉴定提供了有效的技术手段, 已在全世界范围内被广泛应用。本文主要介绍了 DNA 条形码技术的发展现状, 并综述了 DNA 条形码技术在鱼类、甲壳类等多种海产品物种鉴定中的应用研究进展, 尤其是与下一代测序(next-generation sequencing, NGS)、高分辨率溶解曲线分析(high resolution melting analysis, HRM)等最新技术手段的结合, 在深加工海产品等复杂样品的鉴定中有着广阔的应用前景, 为 DNA 条形码技术在海产品质量安全监管中的应用提供技术参考。

关键词: DNA 条形码; 海产品; 物种鉴定

Research progress on the application of DNA barcoding in species identification of seafood

JIANG Hua-Jun*, ZHU Zi-Long, WEI Min, LIU Shu-Chang, WANG Wen-Mei

(*Weihai Institute for Food and Drug Control*, *Weihai Key Laboratory for Food and Drug Quality Assessment and Technology Research*, *Weihai* 264210, *China*)

ABSTRACT: With the global supply and consumption of seafood increasing year by year, fraudulent behaviors such as passing off inferior products as quality ones, adulteration and mislabeling occur from time to time. This not only infringes on consumers' interests but may also pose food safety risks. The species identification of seafood has gradually become a hot topic of concern and an important step in ensuring the safety of seafood and safeguarding consumers' interests. DNA barcoding, as a tool for taxonomy, provides an effective technical means for the species identification of seafood and has been widely applied worldwide. This review mainly introduced the current development of DNA barcoding and summarized the research progress on the application in species identification of various seafood such as fish and crustaceans. Especially when combined with the latest technologies such as

收稿日期: 2025-11-18
基金项目: 山东省市场监督管理局科研计划项目(sdscjgj2024sp04)
第一作者/*通信作者: 姜华军(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品微生物及分子生物学检测。E-mail: huajun_jiang@126.com

next-generation sequencing (NGS) and high resolution melting analysis (HRM), DNA barcoding has broad application prospects in the identification of complex samples like deep-processed seafood. This review will provide technical references for the application of DNA barcoding in the supervision of seafood safety.

KEY WORDS: DNA barcoding; seafood; species identification

0 引 言

海产品营养价值高, 富含优质蛋白质、维生素、矿物质、Omega-3 多不饱和脂肪酸等多种营养成分, 可供食用的海产品涵盖鱼类、甲壳类、贝类、头足类、棘皮类等多个类别。现有研究表明, 合理摄入海产品对人体健康具有积极作用。例如, 海产品中富含的维生素 D 能够促进人体对钙的吸收, 对骨骼的生长发育至关重要; 锌元素参与人体多种酶的活性调节, 具有促进细胞分裂、维持免疫系统正常等功能; Omega-3 脂肪酸有助于降低血液中甘油三酯和胆固醇水平, 辅助预防心脑血管疾病[1]。近几年来, 全球水产品捕捞和养殖产量稳步提升, 联合国粮农组织最新发布的《粮食展望》报告显示, 2025 年全球水产品总产量预计达到 1.97 亿吨, 同比增长 1.7%, 其中野生捕捞产量预计增长 0.7%, 养殖产量预计增长 2.7%。同时, 全球水产品消费量也逐年增加, 联合国粮农组织于 2024 年发布的《世界渔业和水产养殖状况》报告显示, 1961 年至 2022 年, 全球水产品人均年消费量由 9.1 kg 增长至 20.7 kg。《2025 中国海洋发展指数报告》显示, 我国海洋水产品产量连续多年居全球首位。我国也是全球最大的海产品消费国, 年均消费量约占全球消费总量的 45%。

随着全球海产品消费量的增加, 掺假、造假现象时有发生, 最常见的掺假形式就是以低值品种冒充高值品种, 以获取非法的经济利益, 比如以低价的巴沙鱼冒充高价的龙利鱼、以养殖的虹鳟鱼冒充三文鱼等。还有加工制品成分的掺假, 比如在虾糜制品中掺入了鱼肉或其他低值肉类成分。海产品掺假造假不仅侵害消费者的利益, 还可能会给人体健康带来风险, 比如病原微生物污染、化学物质残留、生物毒素危害以及过敏反应等。

传统的物种鉴定主要基于大小、形状、颜色、质地等形态学特征, 但是形态学鉴定往往需要专业的培训和丰富的经验, 而且部分海产品经过加工后会导致形态特征被破坏, 从而增加了鉴定难度。基于 DNA 的分子生物学检测方法为海产品鉴定提供了强大的工具, 尤其是 DNA 条形码技术, 已在全世界多个国家和地区应用于海产品的物种鉴定和虚假标签的鉴别[2−6]。本文主要综述了 DNA 条形码技术的起源与发展, 及其在多种海产品物种鉴定中的应用研究进展, 为 DNA 条形码技术在海产品质量控制以及食品安全监管中的应用提供参考。

1 DNA 条形码技术简介

DNA 条形码技术是利用一段标准的短 DNA 序列, 结合测序和序列比对进行物种鉴定的一项技术。2003 年, HEBERT 等[7−9]首次提出了 DNA 条形码的概念, 发现线粒体细胞色素 c 氧化酶 I (cytochrome c oxidase subunit I, *COI*)基因序列可作为 DNA 条形码来进行物种鉴定, 并将 DNA 条形码技术成功用于 260 种鸟类的鉴定, 为 DNA 条形码技术在物种鉴定和分类中的应用奠定了基础。2004 年, 生命条形码联盟(consortium for the barcode of life, CBOL)成立, 旨在推动 DNA 条形码技术在生物物种鉴定中的应用, 并于 2007 年建立了生命条形码数据系统(barcode of life data systems, BOLD), 截至 2025 年 12 月已收录了 2513.6 万条 DNA 条形码序列, 涉及的物种涵盖 27.9 万种动物、10.1 万种植物、2.7 万种真菌及其他物种(https://boldsystems.org/), 使 BOLD 成为全球最权威的 DNA 条形码研究与应用平台。

与传统的形态学分类方法相比, DNA 条形码技术具有以下优势[10]: (1)可利用部分组织进行鉴定, 不受样本形态完整性的影响; (2)可鉴定形态相似度较高的物种; (3)可鉴定不同发育阶段形态差异较大的物种; (4)可鉴定形态可塑性较强的物种, 比如外部形态易受环境影响而改变的物种; (5)鉴定未知物种; (6)发现隐存种。

大量研究表明 *COI* 基因是动物物种鉴定的首选 DNA 条形码, 在几乎所有动物物种 *COI* 基因的 5′端都能找到通用序列作为扩增引物, 且一般情况下 *COI* 基因序列的种间遗传变异大于种内遗传变异, 种间和种内遗传变异之间存在的间隔区称为条形码间隔, 这是评价 DNA 条形码是否理想的重要指标[11−12]。另外, 细胞色素 b (cytochrome b, *Cytb*)、12S 核糖体 RNA (12S ribosomal RNA, *12S rRNA*)、16S 核糖体 RNA (16S ribosomal RNA, *16S rRNA*)等线粒体基因也是动物物种鉴定常用的 DNA 条形码。*Cytb* 与 *COI* 两种 DNA 条形码的物种鉴定水平相似, 但是 FERNANDES 等[13]研究称, 在采用高分辨率溶解曲线分析(high resolution melting analysis, HRM)进行鳕科鱼类的鉴定方面 *Cytb* 比 *COI* 更有效。另外, *Cytb* 和 *COI* 基因在区分亲缘关系密切的物种方面缺乏足够的多态性, 而 *12S rRNA* 和 *16S rRNA* 基因成为合适的替代, 它们在物种间存在高度保守的序列, 而在这些序列中又散布着物种特异性的短可变序列[14]。

DNA 条形码基因序列应具备以下特征[15–16]: (1)应有足够地变异, 可以区分不同的物种; (2)具有一定的保守性, 便于设计通用引物进行扩增; (3)必须是一段标准 DNA 片段, 通常为 200~800 bp, 能够尽可能地鉴别不同分类群; (4)包含足够多的系统进化信息, 以精准定位物种在分类系统中的位置; (5)目标片段应足够短, 能够满足部分受损 DNA 样本的扩增。线粒体基因因没有内含子, 且多为母系遗传, 重组现象较少, 更适合作为通用 DNA 条形码[17]。

随着测序技术的发展, DNA 条形码技术的检测速度和准确性也不断提升。目前常用的测序技术除了 Sanger 测序, 还包括下一代测序(next-generation sequencing, NGS)以及以 PacBio 和 ONT 为代表的第 3 代测序[18]。NGS 又称为高通量测序, 与 Sanger 测序相比, NGS 速度快、通量高且成本更低。DNA 条形码技术与 NGS 相结合, 即为 DNA 宏条形码技术, 可以一次性检测多个条形码序列, 从而实现复杂样本中多物种的同时鉴定。目前, DNA 宏条形码技术在海产品物种鉴定中也有广泛应用[19–22]。

2　DNA 条形码在海产品物种鉴定中的应用

可食用海产品种类繁多, 其中鱼类是最庞大的类别, 常见的可食用海鱼如三文鱼、鳕鱼、黄鱼等, 虾、蟹等甲壳类和贻贝、牡蛎等贝类也是常见的海产品类别。DNA 条形码为海产品的物种鉴定提供了快速、准确、灵敏的技术手段, 近年来, 随着序列分析技术的不断发展, DNA 条形码技术在各种海产品物种鉴定中的应用越来越广泛。

2.1　在鱼类物种鉴定中的应用

在鱼类的物种鉴定中, *COI* 基因是最常用的 DNA 条形码。黄曼虹等[23]以 *COI* 基因为目标基因, 采用 DNA 条形码技术对江苏市场 127 份 42 种常见鱼肉样品进行鉴定, 在种和属水平总的鉴定成功率为 90.48%, 表明 DNA 条形码技术对我国市场常见鱼肉样品的物种鉴定具有可行性。LIU 等[24]以 *COI* 基因为靶标, 用 DNA 条形码技术对广州超市和寿司店中不同种类的 139 份鱼类产品进行鉴定, 结果有 30 份样本(21.58%)标签错误。罗纯等[25]分析了中日沿海 40 种鱼类的 *COI* 基因序列, 结果支持将花鲈分类为中国花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 和日本花鲈 (*Lateolabrax japonicus*), 中日两国的白姑鱼(*Pennahia argentata*)为两个亚种或独立种。王楠等[26]以 *COI* 基因为靶标、*16S rRNA* 基因为辅助靶标, 对 17 种市售鲑科鱼类样品进行了鉴定。王紫晔等[27]对大西洋鲑(*Salmo salar*)等 29 种鲑科鱼类的 *COI* 基因序列进行分析, 结果表明基于 *COI* 基因的 DNA 条形码技术可有效用于三文鱼的真伪鉴别。CHEN 等[28]以 *COI* 基因为 DNA 条形码, 对黄鱼属(*Larimichthys* spp.)及其形态相似的鱼种进行鉴定, 结果发现有 37.03% (10/27)的产品存在标签错误。CHEN 等[29]还结合了 DNA 条形码技术与 HRM, 建立了黄鳍东方鲀(*Takifugu xanthopterus*)、暗纹东方鲀 (*Takifugu fasciatus*) 、菊黄东方鲀 (*Takifugu flavidus*)、红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)等 4 种河鲀的鉴定方法。以上研究表明, 基于 *COI* 基因的 DNA 条形码技术可用于多种鱼类的物种鉴定以及系统进化分析。但是在市售产品的鉴定方面, 加工方式对鉴定结果有较大影响, 比如在 LIU 等[24]和王楠等[26]的研究中, 均有罐头类样品的 *COI* 基因测序失败, 原因可能是罐头加工过程中的高温高压工艺会导致 DNA 降解断裂, 从而难以有效扩增出完整的靶基因序列。而王楠等[26]采用的 *16S rRNA* 微型条形码在罐头类样品中能够成功扩增并测序, 可作为 *COI* 条形码的补充。另外, 对于多物种混合样品的鉴定, 基于 Sanger 测序的 DNA 条形码技术还存在一定的局限性。比如在王楠等[26]的研究中有 5 份样品经 Sanger 测序出现多峰, 无法完成序列的拼接; 在 CHEN 等[29]的研究中, 部分样品是包含猪肉及河鲀的混合样品, 但是 Sanger 测序只能检测到猪肉成分, 可能是由于其中河鲀成分含量较少或者通用引物对猪肉基因的扩增效率更高, CHEN 等[29]采用了特异性更好、灵敏度更高的 HRM 技术, 实现了对混合样品中河鲀成分的鉴定。

微型 DNA 条形码技术是采用一段更短(<350 bp)的标准 DNA 序列进行物种鉴定, 能够解决食品加工后 DNA 降解或片段化而导致聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)扩增效率低的问题, 因此微型 DNA 条形码更适用于深加工产品的鉴定[30–31]。SHOKRALLA 等[32]基于 *COI* 基因, 筛选了 6 条微型 DNA 条形码, 用于 44 种加工鱼类产品的鉴定, 结果有 41 种(93.2%)能在种或属水平上鉴定出来, 微型 DNA 条形码扩增的最大成功率为 88.6%, 远高于全长 DNA 条形码的 20.5%。ZHAO 等[33]分别采用全长 DNA 条形码和微型 DNA 条形码对我国市场的 305 种加工鱼类产品进行鉴定, 发现全长 DNA 条形码的扩增率仅为 19.3%, 而微型 DNA 条形码的扩增率达 90.2%, 且发现 111 份(36.4%)的样品鉴定结果与标签不符。姚丽锋等[34]和潘影俊男等[35]分别以 *COI* 基因为靶标, 筛选得到微型 DNA 条形码, 建立了鱼胶物种鉴定的 DNA 条形码方法。陈文炳等[36]选取了 *16S rRNA* 基因中长度为 243 bp 的序列作为微型 DNA 条形码, 建立了美洲鳗(*Anguilla rostrata*)、欧洲鳗(*Anguilla anguilla*)和日本鳗(*Anguilla japonica*)的物种鉴定方法。FERNANDES 等[13]基于 *Cytb* 基因, 采用微型 DNA 条形码技术与 HRM 相结合, 用于大西洋鳕(*Gadus morhua*)等 4 种鳕科鱼类的鉴定。在 DNA 宏条形码的应用方面, WANG 等[37]结合 *16S rRNA* 微型条形码与 Illumina HiSeq2500 高通量测序平台, 实现了对大西洋鲑(*Salmo salar*)等 8 个鲑鱼物种的准确鉴定, 通过对 32 份样品进行鉴定, 发现有 16 份(50%)存在标签错误。LEE 等[38]采用宏条形码技术, 分析了我国台湾市场 120 份不同品牌和类型

的鱼糜制品样品, 鉴定出了至少 37 种软骨鱼类, 其中包括 26 种濒危物种。

以上研究表明, 微型 DNA 条形码技术是深加工鱼类产品物种鉴定的有效工具, 其对目标基因序列的扩增成功率远高于全长 DNA 条形码, 能够解决加工工艺导致的 DNA 降解断裂问题, 从而弥补传统 DNA 条形码技术对深加工样品鉴定准确率低的不足。微型 DNA 条形码与 HRM 技术结合, 可以提高混合样品中目标成分鉴定的灵敏度。微型 DNA 条形码与 NGS 结合的 DNA 宏条形码技术大大提高了深加工、复杂样品鉴定的成功率, 而且可用于样品中多种未知成分的全面鉴定。

2.2 在甲壳类物种鉴定中的应用

DNA 条形码技术在甲壳类物种鉴定中的应用研究也较多, *COI* 基因也被证明是甲壳类理想的 DNA 条形码, *Cytb*、*16S rRNA*、*12S rRNA* 等其他线粒体基因也有应用。HAYE 等[39]将 *COI* 条形码用于鉴定智利市场 7 种商业化的蟹肉产品, 发现一种产品存在标签错误, 鉴定结果中出现频率最高的为爱德华氏后蟹(*Metacarcinus edwardsii*)。VARTAK 等[40]以 *COI* 基因为 DNA 条形码鉴定了远海梭子蟹(*Portunus pelagicus*)等 11 种可食用蟹类, 并用于印度餐馆中 50 个蟹类样品的检测, 结果发现全部存在标签错误、以次充好的行为。王娜泠等[41]采用 *COI* 基因为 DNA 条形码, 成功鉴定了浙江沿海的红星梭子蟹(*Portunus sanguinolentus*)等 6 种常见蟹类。王娜泠等[42]还基于 *Cytb* 基因对 5 种蟹类进行了系统发育分析, 与相应蟹类的形态学分类结果相一致。易啸等[43]分析了周氏新对虾(*Metapenaeus joyneri*)等 32 种对虾的 *COI* 基因, 证实了基于 *COI* 基因的 DNA 条形码技术可用于对虾科的物种鉴定。HU 等[44]基于 *16S rRNA* 和 *12S rRNA* 双基因, 采用宏条形码技术对中国电商平台销售的 24 种虾糜制品进行鉴定, 结果发现有 21 种样品存在标签错误, 其中以斑节对虾(*Penaeus monodon*)、日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)等其他虾类被南美白对虾(*Penaeus vannamei*)替代的情况尤为值得注意。DNA 条形码与 HRM 的结合在甲壳类物种鉴定中也有广泛应用, FERNANDES 等[45]以 *COI* 微型条形码为靶标, 基于 HRM 分析建立了一种可特异性鉴别斑节对虾(*Penaeus monodon*)等 5 种亲缘关系相近的对虾的新方法。

以上研究表明, 基于 *COI* 等线粒体基因的 DNA 条形码可有效地用于虾、蟹等甲壳类物种的鉴定和系统发育分析。在 HAYE 等[39]的研究中, 用于鉴定的 333 份样品中仅有 114 份能够成功测序, 其中罐头产品的测序成功率最低, 证明了罐头加工过程可能会导致 DNA 降解, 从而影响 DNA 序列质量。在 HU 等[44]的研究中, 采用了 *16S rRNA* 和 *12S rRNA* 双基因作为 DNA 条形码, 可提高鉴定的成功率和准确度。FERNANDES 等[45]的研究证实了, HRM 技术因具有更高的特异性和灵敏度, 更适宜于亲缘关系相近的物种鉴定。

2.3 在贝类物种鉴定中的应用

刘君等[46]采用基于 *COI* 序列的 DNA 条形码技术对中国沿海的紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)等 11 种贻贝科种类进行研究, 证实了 *COI* 基因作为条形码用于贻贝科物种鉴定的可行性。王航俊等[47]利用 DNA 条形码技术, 基于 *COI* 基因和 28S 核糖体 RNA (*28S ribosomal RNA*, *28S rRNA*)基因对浙江沿海海域采集的 232 个牡蛎样品进行鉴定, 共检测出 3 属 10 种牡蛎, 其中优势物种为熊本牡蛎(*Crassostrea sikamea*)和福建牡蛎(*Crassostrea angulata*)。HENG 等[48]以 *COI* 基因和 *28S rRNA* 基因序列为 DNA 条形码, 对海南岛天然分布的牡蛎科贝类进行鉴定, 共发现 14 种牡蛎, 优势物种为马拉邦牡蛎(*Saccostrea malabonensis*)。GENSE 等[49]以 150 bp 的线粒体 *16S rDNA* 片段为靶标, 基于 Illumina 高通量测序平台, 开发了一种鉴定食品中贻贝、扇贝和牡蛎等双壳类物种的 DNA 宏条形码方法, 并证实了该方法适用于多种复杂且深加工食品中双壳类物种的鉴定。

王航俊等[47]和 HENG 等[48]的研究中均采用了 *COI*、*28S rRNA* 两种基因作为 DNA 条形码, 进行牡蛎的物种鉴定, 结果均发现, *28S rRNA* 基因物种间的遗传距离明显小于 *COI* 基因, 在物种间的分辨率不足, 只可初步用于牡蛎属阶元的分类鉴定。*28S rRNA* 作为核基因, 进化速率较慢, 序列保守性高, 种内变异程度低, 因此, 其作为 DNA 条形码用于物种鉴定的适用性不强。

2.4 在其他海产品物种鉴定中的应用

DNA 条形码技术在海参、乌贼等其他海产品物种鉴定中的应用也有报道。律迎春等[50]对仿刺参(*Apostichopus japonicus*)等 7 种海参 43 个个体的 *COI* 基因序列进行了分析, 证实了 *COI* 基因作为 DNA 条形码进行海参品种鉴定具有一定的可行性。胡冉冉等[51]以 *COI* 基因和 *16S rRNA* 基因为靶基因建立 DNA 条形码方法, 对 24 份市售海参样品进行鉴别, 结果发现 6 份样品与标签名称不符。DAI 等[52]采用 *COI* 和 *16S rRNA* 两个基因为 DNA 条形码对中国海域的金乌贼(*Sepia esculenta*)、砂蛸(*Amphioctopus aegina*)等 34 种蛸亚纲物种进行鉴定, 证实了 DNA 条形码技术在中国蛸亚纲物种鉴定方面的有效性。王萍亚等[53]经过筛选得到适用于乌贼鉴定的 *12S rRNA* 基因 DNA 条形码, 提高了乌贼鉴定的准确度。

在胡冉冉等[51]和 DAI 等[52]的研究中, 均采用了 *COI* 和 *16S rRNA* 两个基因作为 DNA 条形码, 成功用于海参和蛸亚纲的物种鉴定, 对于亲缘关系较近、序列差异较小的物种而言, 单一靶标的 DNA 条形码有时无法准确鉴定, 而多基因 DNA 条形码可以弥补单一靶标的局限性, 使鉴定结果

更为准确。王萍亚等[53]采用文献报道的多组 *COI*、*12S rRNA* 和 *16S rRNA* 通用引物, 均不能有效扩增出所有乌贼样品的靶基因, 这表明 DNA 条形码通用引物在部分物种的鉴定中存在一定的局限性, 而针对乌贼 *12S rRNA* 基因序列设计的特异性引物, 扩增和鉴定成功率达到 100%, 可作为乌贼 DNA 条形码鉴定研究的有效补充(表 1)。

表 1　DNA 条形码技术在海产品物种鉴定中的应用研究

Table 1　Research on the application of DNA barcoding in species identification of seafood

鉴定物种	样品类型	物种数	样品数	条形码基因	序列分析技术	鉴定结果	参考文献
鱼类	新鲜、冷冻	42	127	*COI*	委托公司测序	种和属水平鉴定成功率分别为 40.48%和 50.00%	[23]
鱼类	冷冻、干制、寿司等	/	139	*COI*	委托公司测序	30 份样品标签错误, 11 份样品标签信息不足无法确定, 4 份样品测序失败	[24]
鱼类	新鲜	40	184	*COI*	委托公司测序	构建了 40 种鱼类的系统树, 探讨了部分鱼类物种的分类地位	[25]
鲑科鱼类	冰鲜、罐头、鱼松等	5	17	*COI*、*16S rRNA*	Sanger 测序	12 份样品鉴定成功, 5 份样品无法完成序列拼接	[26]
鲑科鱼类	冷冻	29	85	*COI*	委托公司测序	构建了 29 种鲑科鱼类的系统进化树	[27]
黄鱼等鱼类	新鲜	7	91	*COI*	委托公司测序	27 份明示为黄鱼的产品中有 10 份标签错误	[28]
河鲀	水饺、刺身、罐头等	4	57	*COI*	HRM	57 份样品(含 24 份无标签样品)均鉴定成功	[29]
鱼类	肌肉组织、罐头等	88	140	*COI*	Sanger 测序	44 份深加工产品中有 41 份鉴定成功	[32]
鱼类	冷冻、烟熏、干制、烤制等	/	305	*COI*	Sanger 测序	111 份样品鉴定结果与标签不符	[33]
鱼类	鱼胶	15	44	*COI*	Sanger 测序	44 份样品均鉴定成功	[34]
鱼类	鱼胶	13	16	*COI*	Sanger 测序	16 份样品均鉴定成功, 7 份与标注物种不一致	[35]
鳗鱼	蒲烧	3	6	*16S rRNA*	委托公司测序	3 种鳗鱼均鉴定成功	[36]
鳕科鱼类	含鱼及其他成分的加工食品	4	34	*Cytb*	HRM	含鱼成分的 30 份样品中 30%鉴定结果与标签不符	[13]
鲑鱼	新鲜、冷冻、烟熏、腌制等	8	32	*16S rRNA*	NGS	16 份(50%)样品存在标签错误	[37]
鱼类	鱼糜制品	145	120	*12S rRNA*	NGS	成功鉴定了所有鱼糜制品中未知的物种成分	[38]
蟹类	冷冻、罐头等	7	333	*COI*	Sanger 测序	一种声称为黄道蟹的蟹糜产品标签错误	[39]
蟹类	熟制	11	50	*COI*	委托公司测序	全部存在标签错误	[40]
蟹类	冷冻	6	34	*COI*	委托公司测序	成功鉴定 6 种蟹类	[41]
蟹类	冷冻	5	28	*Cytb*	委托公司测序	成功鉴定 5 种蟹类	[42]
对虾	冷冻	32	68	*COI*	Sanger 测序	成功鉴定 32 种对虾	[43]
虾类	虾糜制品	/	24	*16S rRNA*、*12S rRNA*	NGS	21 种样品存在标签错误	[44]
对虾	加工产品	5	58	*COI*	HRM	4 份样品存在掺假	[45]
贻贝科	鲜活	11	52	*COI*	委托公司测序	成功鉴定 10 种贻贝科物种	[46]
牡蛎	鲜活	10	232	*COI*、*28S rRNA*	委托公司测序	成功鉴定 10 种牡蛎	[47]
牡蛎	鲜活	14	298	*COI*、*28S rRNA*	Sanger 测序	成功鉴定 14 种牡蛎	[48]
贻贝、扇贝和牡蛎	新鲜、冷冻或加工	11	86	*16S rDNA*	NGS	成功鉴定出多种加工样品中的双壳类物种	[49]
海参	干海参	7	43	*COI*	委托公司测序	成功鉴定 7 种海参	[50]
海参	干海参	16	24	*COI*、*16S rRNA*	Sanger 测序	24 份样品均鉴定成功, 6 份与标签名称不符	[51]
蛸亚纲	冷冻	34	132	*COI*、*16S rRNA*	Sanger 测序	33 个物种能够成功鉴定	[52]
乌贼	肌肉组织、加工食品	5	20	*12S rRNA*	委托公司测序	所有样品鉴定结果均与标注物种匹配	[53]

注: /表示所鉴定物种数在文献中未提及。

3 结束语

海产品的物种鉴定和标签真伪鉴别一直是全世界关注的热点问题，海产品从海洋到餐桌的供应链长且复杂，整个过程中都可能存在掺假、替代等欺诈行为，这不仅影响海产品市场的公平竞争，还会侵害消费者的利益，甚至影响身体健康。DNA 条形码技术被证明是海产品物种鉴定的一种有效工具，本文主要介绍了 DNA 条形码技术的发展及其在鱼类、甲壳类等海产品物种鉴定中的应用研究进展。对于大多数物种而言，*COI* 基因可作为 DNA 条形码的首选靶标，此外，其他线粒体基因(如 *Cytb* 基因、*16S rRNA* 基因、*12S rRNA* 基因)也可用作海产品物种鉴定的 DNA 条形码，王楠等[26]、胡冉冉等[51]、DAI 等[52]的研究都证实了 *16S rRNA* 可作为有效的辅助靶标，提高物种鉴定的成功率和准确率。对于罐头等深加工食品而言，加工工艺可能会导致 DNA 的断裂和降解，从而影响 DNA 条形码基因扩增和物种鉴定的成功率，而片段更小的微型 DNA 条形码展现出了更多优势，SHOKRALLA 等[32]、ZHAO 等[33]的研究都证实了微型 DNA 条形码更适用于加工产品的物种鉴定。但是微型 DNA 条形码因其 DNA 片段较短，包含的遗传信息有限，在鉴定的准确度方面与全长 DNA 条形码相比存在一定差距。Sanger 测序目前仍是 DNA 条形码鉴定最常用的测序技术，但是检测速度慢且无法分析混合样本是其主要缺点。随着新一代测序技术的发展，DNA 条形码技术变得更加准确、灵敏、快速，尤其是与 NGS 相结合的 DNA 宏条形码技术，可对混合样本中的多个物种同步鉴定，在深加工海产品鉴定中有广阔的应用前景，大量研究都表明，*16S rRNA* 和 *12S rRNA* 基因序列因兼具保守性和可变性，是 DNA 宏条形码检测有效的靶基因[37–38,44,49]。另外，HRM 结合 DNA 条形码也为海产品物种鉴定提供了一种简单方便、成本低且高通量的方法，FERNANDES 等[13,45]基于 HRM 技术，建立了鳕鱼和对虾的鉴定方法，对于 HRM 在 DNA 条形码检测中的应用研究具有指导意义。展望未来，DNA 条形码技术与新一代序列分析技术的结合，将在保障海产品质量安全、维护市场秩序等方面发挥更为重要的作用，有力促进海产品行业的可持续健康发展。

参考文献

[1] LARSEN R, EILERTSEN KE, ELVEVOLL EO. Health benefits of marine foods and ingredients [J]. Biotechnology Advances, 2011, 29(5): 508–518.

[2] JIANG CP, QIN J, LIU FM, *et al*. DNA barcoding reveals low-level species substitution, threatened species and cross-border sales in South China seafood products [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107157.

[3] KHAKSAR R, CARLSON T, SCHAFFNER DW, *et al*. Unmasking seafood mislabeling in U.S. markets: DNA barcoding as a unique technology for food authentication and quality control [J]. Food Control, 2015, 56: 71–76.

[4] PARDO MA, JIMENEZ E, VIDARSSON JR, *et al*. DNA barcoding revealing mislabeling of seafood in European mass caterings [J]. Food Control, 2018, 92: 7–16.

[5] PANPROMMIN D, MANOSRI R. DNA barcoding as an approach for species traceability and labeling accuracy of fish fillet products in Thailand [J]. Food Control, 2022: 136: 108895.

[6] KHALIL AM, GAINSFORD A, VAN HL. DNA barcoding of fresh seafood in Australian markets reveals misleading labelling and sale of endangered species [J]. Journal of Fish Biology, 2023, 102(3): 727–733.

[7] HEBERT PDN, CYWINSKA A, BALL SL, *et al*. Biological identification through DNA barcodes [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2003, 270(1512): 313–321.

[8] HEBERT PDN, RATNASINGHAM S, DEWAARD JR. Barcoding animal life: Cytochrome C oxidase subunit 1 divergences among closely related species [J]. Proceedings Biological Sciences, 2003, 270(Suppl 1): S96–S99.

[9] HEBERT PDN, STOECKLE MY, ZEMLAK TS, *et al*. Identification of birds through DNA barcodes [J]. PLoS Biology, 2004, 2(10): 1657–1663.

[10] 李琪, 冉轲, 孔令锋. DNA 条形码技术及其在海洋贝类种质资源保护中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 18–23.
LI Q, RAN K, KONG LF. DNA barcoding and its application in marine shellfish germplasm resources conservition [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(5): 18–23.

[11] 余海军, 王茜. DNA 条形码在水生动物物种鉴定中的应用[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(16): 1–3, 6.
YU HJ, WANG Q. Application of DNA barcoding for species identification in aquatic animal [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(16): 1–3, 6.

[12] ANTIL S, ABRAHAM JS, SRIPOORNA S, *et al*. DNA barcoding, an effective tool for species identification: A review [J]. Molecular Biology Reports, 2023, 50(1): 761–775.

[13] FERNANDES TJR, COSTA J, OLIVEIRA MBPP, *et al*. DNA barcoding coupled to HRM analysis as a new and simple tool for the authentication of Gadidae fish species [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 49–57.

[14] STAATS M, ARULANDHU AJ, GRAVENDEEL B, *et al*. Advances in DNA metabarcoding for food and wildlife forensic species identification [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2016, 408: 4615–4630.

[15] 王娜泠, 胡则辉, 卞光明, 等. DNA 条形码技术及其在水生动物中的应用[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 432–438.
WANG NL, HU ZH, BIAN GM, *et al*. DNA barcoding and its application in aquatic animals [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2017, 36(5): 432–438.

[16] 刘溪宁, 陈睿, 孙双祥, 等. DNA 条形码技术及其在海洋贝类分类中研究进展[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1244–1247.
LIU XN, CHEN R, SUN SX, *et al*. DNA barcoding technology and its research progress in marine mollusk taxonomy [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(7): 1244–1247.

[17] 李琪, 邹山梅, 郑小东, 等. DNA 条形码及其在海洋生物中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(8): 43–47.
LI Q, ZOU SM, ZHENG XD, *et al*. DNA barcoding and its application in marine organisms [J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8): 43–47.

[18] 夏浩天, 张婕, 刘倩, 等. DNA 条形码技术在物种识别与产品鉴定中的应用[J]. 中国生物工程杂志, 2025, 45(4): 78–92.
XIA HT, ZHANG J, LIU Q, *et al*. Application of DNA barcoding technology in species identification and product authentication [J]. China Biotechnology, 2025, 45(4): 78–92.

[19] KAPPEL K, HAASE I, KAPPEL C, *et al*. Species identification in mixed tuna samples with next-generation sequencing targeting two short cytochrome b gene fragments [J]. Food Chemistry, 2017, 234: 212–219.

[20] MOTTOLA A, PIREDDA R, CATANESE G, *et al*. DNA metabarcoding for identification of species used in fish burgers [J]. Italian Journal of Food Safety, 2022, 11(3): 10412.

[21] LORUSSO L, SHUM P, PIREDDA R, *et al*. Mismanagement and poor transparency in the European processed seafood supply revealed by DNA metabarcoding [J]. Food Research International, 2024, 194: 114901.

[22] ANDRONACHE J, CICHNA-MARKL M, DOBROVOLNY S, *et al*. Development of a DNA metabarcoding method for the identification of Crustaceans (*Malacostraca*) and Cephalopods (*Coleoidea*) in processed foods [J]. Foods, 2025, 14(9): 1549.

[23] 黄曼虹, 熊雄, 袁方颖, 等. DNA 条形码在我国常见鱼肉样品鉴定中的应用[J]. 生物加工过程, 2021, 19(2): 207–213.
HUANG MH, XIONG X, YUAN FY, *et al*. Species identification of Chinese commercial fish products by DNA barcoding [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2021, 19(2): 207–213.

[24] LIU B, YANG JW, LIU BS, *et al*. Detection and identification of marine fish mislabeling in Guangzhou's supermarkets and sushi restaurants using DNA barcoding [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(6): 2440–2449.

[25] 罗纯, 章群, 黄志基, 等. 中日沿海部分鱼类 DNA 条形码研究[J]. 海洋渔业, 2021, 43(1): 1–11.
LUO C, ZHANG Q, HUANG ZJ, *et al*. Study on DNA barcodes of some coastal fish species in China and Japan [J]. Marine Fisheries, 2021, 43(1): 1–11.

[26] 王楠, 邢冉冉, 马聪聪, 等. DNA 条形码技术在鲑科鱼类真伪鉴别中的应用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 232–240.
WANG N, XING RR, MA CC, *et al*. Application of DNA barcoding technology in species authentication of salmonidae [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 232–240.

[27] 王紫晔, 王正亮, 黄珏, 等. 基于 DNA 条形码和矿物元素指纹的三文鱼物种鉴定和产地溯源技术[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 251–258.
WANG ZY, WANG ZL, HUANG J, *et al*. Salmon species identification and origin tracing technology based on DNA barcoding and mineral element fingerprinting [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 251–258.

[28] CHEN CT, DING YF, JIANG ZH, *et al*. DNA barcoding of yellow croakers (*Larimichthys* spp.) and morphologically similar fish species for authentication [J]. Food Control, 2021, 127: 108087.

[29] CHEN CT, DING YF, WANG Y, *et al*. High-resolution melting analysis of *COI* sequences distinguishes pufferfish species (*Takifugu* spp.) in China [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(2): 794–804.

[30] FERNANDES TJR, AMARAL JS, MAFRA I. DNA barcode markers applied to seafood authentication: An updated review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(22): 3904–3935.

[31] XING RR, HU RR, HAN JX, *et al*. DNA barcoding and mini-barcoding in authenticating processed animal-derived food: A case study involving the Chinese market [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125653.

[32] SHOKRALLA S, HELLBERG RS, HANDY SM, *et al*. A DNA mini-barcoding system for authentication of processed fish products [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15894.

[33] ZHAO S, ZHANG H, ZHAO ZY, *et al*. Integrated DNA barcoding methods to identify species in the processed fish products from Chinese market [J]. Food Research International, 2024, 182: 114140.

[34] 姚丽锋, 张娟, 黎财慧, 等. 鱼胶品种的 DNA 条形码鉴定方法研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 232–239.
YAO LF, ZHANG J, LI CH, *et al*. Study of the molecular identification for isinglass on DNA [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 232–239.

[35] 潘影俊男, 苗雅倩, 陈凤明, 等. 微型 DNA 条形码技术鉴定鱼胶物种[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 298–305.
PAN YJN, MIAO YQ, CHEN FM, *et al*. Species identification of fish maw by mini-DNA barcoding technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 298–305.

[36] 陈文炳, 缪婷玉, 彭娟, 等. 基于 16SrRNA 基因 DNA 条形码鉴定美洲鳗、欧洲鳗、日本鳗[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 283–289.
CHEN WB, MIAO TY, PENG J, *et al*. Identification of *Anguilla rostrata*, *Anguilla anguilla* and *Anguilla japonica* using DNA barcoding based on *16S rRNA* gene [J]. Food Science, 2017, 38(4): 283–289.

[37] WANG N, XING RR, ZHOU MY, *et al*. Application of DNA barcoding and metabarcoding for species identification in salmon products [J]. Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2021, 38(5): 754–768.

[38] LEE HT, LIAO CH, HSU TH. DNA metabarcoding unveils the hidden species composition in fish surimi: Implications for the management of unlabeled and mixed seafood products [J]. Heliyon, 2024, 10(16): e36287.

[39] HAYE PA, SEGOVIA NI, VERA R, *et al*. Authentication of commercialized crab-meat in Chile using DNA barcoding [J]. Food Control, 2012, 25(1): 239–244.

[40] VARTAK VR, NARASIMMALU R, ANNAM PK, *et al*. DNA barcoding detected improper labelling and supersession of crab food served by restaurants in India [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(2): 359–366.

[41] 王娜泠, 胡则辉, 卞光明, 等. 6 种蟹类 DNA 条形码鉴定技术研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 131–132, 135.
WANG NL, HU ZH, BIAN GM, *et al*. Identification technology research on DNA barcode of six crabs species [J]. Journal of Anhui Agricultural

Sciences, 2017, 45(26): 131–132, 135.

[42] 王娜泠, 胡则辉, 卞光明, 等. 5 种蟹类线粒体 *Cyt b* 基因序列分析及其系统发育[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 315–319.
WANG NL, HU ZH, BIAN GM, *et al*. Molecular phylogeny and sequence analysis of mitochondrial *Cyt b* gene in five species of crabs [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2017, 36(4): 315–319.

[43] 易啸, 王攀攀, 王军, 等. 基于线粒体 COI 的 DNA 条形码在对虾科种类鉴定中的研究[J]. 水产学报, 2018, 42(1): 1–9.
YI X, WANG PP, WANG J, *et al*. Research on the species identification of Penaeidae based on mitochondrial COI DNA barcoding [J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(1): 1–9.

[44] HU JJ, GIUSTI A, ZHANG JX, *et al*. A double-gene metabarcoding approach for the authentication of shrimp surimi-based products [J]. Genes (Basel), 2025, 16(2): 144.

[45] FERNANDES TJR, SILVA CR, COSTA J, *et al*. High resolution melting analysis of a COI mini-barcode as a new approach for *Penaeidae shrimp* species discrimination [J]. Forest Policy and Economics, 2017, 82: 8–17.

[46] 刘君, 李琪, 孔令锋, 等. 基于线粒体 *COI*的 DNA 条形码技术在贻贝科种类鉴定中的应用[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 874–881.
LIU J, LI Q, KONG LF, *et al*. *COI*-based DNA barcoding in *Mytilidae species* (Mollusca: Bivalvia) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 874–881.

[47] 王航俊, 吕宝强, 黄丹, 等. 基于 DNA 条形码研究浙江沿海牡蛎的种类多样性及其分布特征[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(3): 365–372.
WANG HJ, LV BQ, HUANG D, *et al*. Study on the species diversity and distribution characteristics of oysters along the coast of Zhejiang based on DNA barcoding [J]. Journal of Applied Oceanography, 2011, 35(5): 874–881.

[48] HENG X, LI FP, XIE DS, *et al*. Species diversity of oysters (Mollusca, Bivalvia) in the intertidal zone of Hainan Island revealed by DNA barcoding analysis [J]. Zookeys. 2025, 1241: 247–260.

[49] GENSE K, PETERSEIL V, LICINA A, *et al*. Development of a DNA metabarcoding method for the identification of bivalve species in seafood products [J]. Foods, 2021, 10(11): 2618.

[50] 律迎春, 左涛, 唐庆娟, 等. 海参 DNA 条形码的构建及应用[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 782–789.
LV YC, ZUO T, TANG QJ, *et al*. Construction and application of DNA barcodes for sea cucumbers [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 782–789.

[51] 胡冉冉, 邢冉冉, 王楠, 等. 基于 DNA 条形码技术的海参物种鉴定[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 145–151, 157.
HU RR, XING RR, WANG N, *et al*. Species identification of sea cucumber products based on DNA barcoding [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(10): 145–151, 157.

[52] DAI LN, ZHENG XD, KONG LF, *et al*. DNA barcoding analysis of Coleoidea (Mollusca: Cephalopoda) from Chinese waters [J]. Molecular Ecology Resources, 2012, 12(3): 437–447.

[53] 王萍亚, 金雨婷, 黄朱梁, 等. 乌贼 DNA 条形码的筛选与验证[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(17): 5809–5815.
WANG PY, JIN YT, HUANG ZL, *et al*. Selection and verification of DNA barcoding for cuttlefish [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(17): 5809–5815.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)