

红外光谱技术在鱼产品质量检测与安全评估中的应用

伍志强¹, 汪星宇¹, 邢圆莹¹, 徐香富¹, 解玉鑫¹, 卞希慧², 施蕊³,
何霞红³, 季超^{1*}, 郑文杰^{1*}

(1. 天津师范大学, 天津市动物多样性保护与利用重点实验室, 天津 300387; 2. 天津工业大学化学与化工学院, 天津 300387; 3. 西南林业大学, 西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 昆明 650224)

摘要: 近年来消费者对鱼产品的掺假问题愈发关注, 从而针对鱼产品的质量评估的相关研究也逐渐增加。传统的鱼类成分分析和质量检测技术方法烦琐、费力、昂贵、费时, 而光谱技术因其具有速度快、使用方便、样品制备最少或不需要样品制备, 及避免样品破坏等优点而受到越来越多的关注。本文综述了以红外光谱技术为主的光谱技术, 包括近红外光谱技术、中红外光谱技术等, 在鱼类及鱼产品的成分和其他质量特性监测中的应用, 并对光谱技术的应用前景和发展方向进行了展望, 以期红外光谱技术在鱼类及鱼产品质量监测体系中推广应用提供指导, 为解决鱼产品及相关行业的质量问题提供了一种新的途径。

关键词: 红外光谱技术; 鱼产品; 质量检测; 溯源

Application of infrared spectroscopy in quality inspection and safety assessment of fish products

WU Zhi-Qiang¹, WANG Xing-Yu¹, XING Yuan-Ying¹, XU Xiang-Fu¹, XIE Yu-Xin¹,
BIAN Xi-Hui², SHI Rui³, HE Xia-Hong³, JI Chao^{1*}, ZHENG Wen-Jie^{1*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Conservation and Utilization of Animal Diversity, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

ABSTRACT: In recent years, consumers pay more and more attention to the adulteration of fish products, so the related research on the quality evaluation of fish products is also increasing. The traditional methods of the composition analysis and quality detection for fish are tedious, laborious, expensive and time-consuming, while spectral technology has attracted more and more attention because of its high speed, easy to use, little or no sample preparation, and avoid sample damage. This paper reviewed the applications of infrared spectroscopy, including near infrared spectroscopy and mid-infrared spectroscopy, in the monitoring of composition and other quality

基金项目: 青海省重大科技专项(2019-NK-A20-05B)

Fund: Supported by the Major Science and Technology Project of Qinghai (2019-NK-A20-05B)

*通信作者: 季超, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品农产品质量安全。E-mail: chaosji@tjnu.edu.cn

郑文杰, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: skyzwj@tjnu.edu.cn

*Corresponding author: JI Chao, Ph.D, Assistant Professor, Tianjin Normal University, No.393, Binshui West Road, Xiqing District, Tianjin 300387, China. E-mail: chaosji@tjnu.edu.cn

ZHENG Wen-Jie, Ph.D, Professor, Tianjin Normal University, No.393, Binshui West Road, Xiqing District, Tianjin 300387, China. E-mail: skyzwj@tjnu.edu.cn

characteristics of whole fish and fish products, and prospected the application prospect and development direction of spectral technology, so as to provide guidance for the popularization and application of infrared spectroscopy in the quality monitoring system of fish and fish products, then provide a new way to solve the quality problems of fish products and related industries.

KEY WORDS: infrared spectroscopy ; fish products; quality inspection; traceability

0 引言

过去 20 年来, 食品供应链的工业化和全球化程度虽有所提高, 但鱼产品安全事件时时有发生, 如干海参掺假^[1]、银鱼甲醛超标^[2]、养殖虾药物残留^[3]等。鱼产品安全事件不仅会导致消费者对鱼产品市场产生信任危机, 影响国际贸易关系, 甚者影响全世界水产业的发展, 因此在鱼产品的养殖、运输及加工全链条产业过程中需使用适当的质量监控和安全评估手段进行鱼产品质量和安全监管。

目前成熟的食品安全分析技术有: 高效液相色谱法、气相色谱-串联质谱法、实时荧光定量聚合酶链反应、酶联免疫吸附试验等; 这些技术在检测鱼肉营养成分^[4]、新鲜度^[5]、兽药或农药残留^[6]以及鱼产品的溯源^[7]等方面已经有广泛应用。然而, 这些技术步骤烦琐, 且需要专业的操作人员, 使其在快速筛查领域和基层实验室的使用受限。

红外光谱的原理是基于样品与红外区电磁辐射的相互作用, 导致样品中分子的振动跃迁, 通过对化学官能团特征峰的分析, 可以识别出含量较高的化合物^[8], 实现快速无损检测。所以红外光谱技术以其检测速度快、操作简单、可同时测定多个参数等优点, 已广泛应用于食品质量和安全监管中^[9]。近几十年来, 红外光谱技术以其简单、快速和准确等特点, 在鱼产品质量评价中也发挥着重要作用^[10]。

通过分析近 20 多年来红外光谱技术在鱼产品质量监控和安全性评估中的应用研究(图 1, 国内外文献共计 147 篇), 发现研究主要集中在鱼产品的成分和化学特性分析(24%)、掺假和分类鉴别(26%)、货架期的监控(20%)及生理变化(10%) 4 个领域, 占到整个研究的 80%。进一步分析红外光谱技术的应用沿革过程(图 2), 发现早期红外光谱技术在鱼产品新鲜度方面的研究比较多, 随着时间的发展, 红外光谱技术在掺假及真伪鉴别方面的研究权重越来越大, 并且在此基础上诞生了更广泛的研究, 例如鱼的生理变化、评估鱼的年龄等。目前前人综述主要是针对单一红外光谱技术在水产品中的应用进行综述, 不够系统全面。本文系统地针对红外光谱技术在鱼产品掺假与分类鉴别、化学成分检测与安全特性分析及货架期等领域中的应用进行综述, 并对其在物种鉴定、实时在线检测等领域的应用进行展望, 以期对鱼产品及相关行业的质量问题的研究提供技术参考。

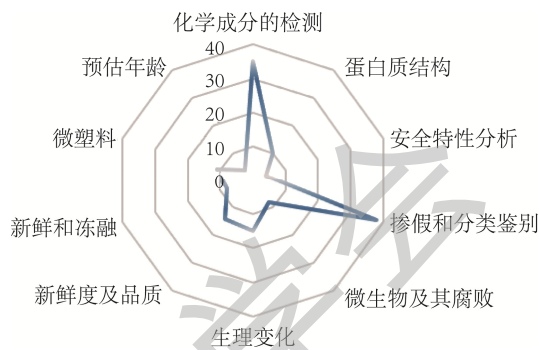


图 1 2000—2022 年红外光谱技术在鱼产品不同应用的文献数量
Fig.1 Number of literatures on infrared spectroscopy in different applications of fish and fish products from 2000 to 2022

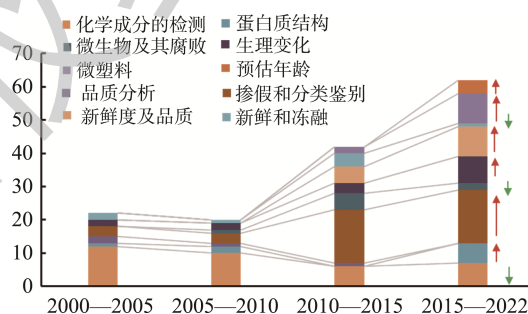


图 2 2000—2022 年红外光谱技术在鱼产品质量监控和安全性评估中的文献发表数
Fig.2 Number of literatures published on infrared spectroscopy in quality control and safety evaluation of fish and fish products from 2000 to 2022

1 红外光谱技术在不同鱼产品鉴定及品质分类研究中的应用

近年来, 光谱分析和化学计量学分析已经在水产品的质量监控研究中得到了广泛应用^[11], 其中在鉴定领域的应用最为成熟, 已经被广泛用于各种中药材^[12]、肉类食品分析^[13]中。物种替代是鱼产品行业最常见的经济掺假形式, 本文根据掺假、鉴定、新鲜度、品质、微生物、冻融、蛋白质、脂肪、水分含量等关键词, 收集了 1987 年至今的文献进行分析发现(图 3), 物种掺假的文献占鱼产品质量安全事件的 46%。其中样品的物理状态主要是鱼块/鱼片(33%)和鱼糜(32%)为主。

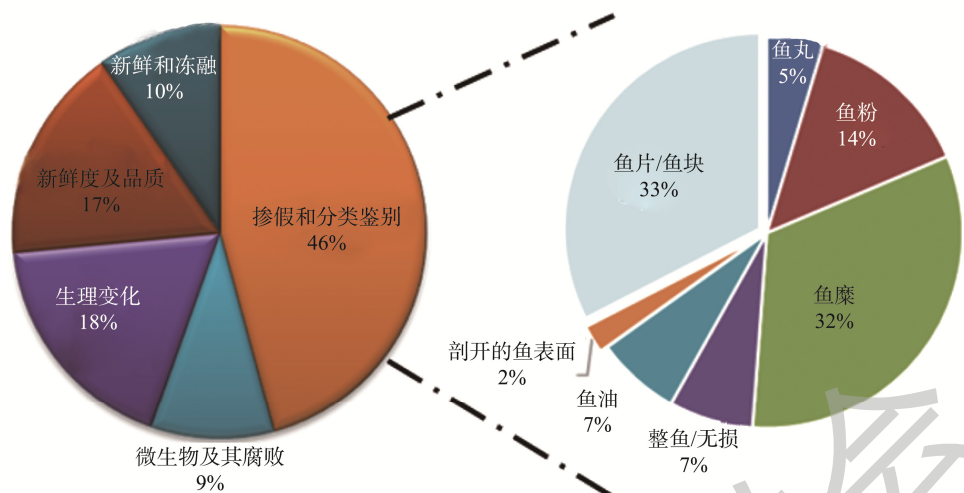


图3 鱼产品质量安全事件文献的比例

Fig.3 Proportion of documents on quality and safety events of fish products

MAJOLINI 等^[14]利用近红外光谱技术对意大利北部(弗留利、威尼托)、中部(托斯卡纳)和南部(普利亚和西西里)11个不同养殖体系(陆上盆地、网箱密集养殖)的鲈鱼分析,通过主成分分析成功区分不同养殖方式的鲈鱼;GHIDINI 等^[15]也做了类似研究,根据生产方法(野生/养殖)、养殖系统(紧凑型/半集约型/广泛型)和地理来源(地中海西部/中部/东部),依据近红外光谱技术对欧洲石斑鱼成功进行了分类。利用近红外光谱技术对食品进行地理溯源的样品不仅可以是新鲜鱼片或鱼糜,还可以是腌制过的鱼产品,例如 VARRÀ 等^[16]在近红外光谱的特定区域中发现了与腌制凤尾鱼的地理起源有关的信息,并能有效区分不同地理来源的成品或半成品的腌制凤尾鱼。

此外,如 ALMEIDA 等^[17]利用傅里叶变换红外光谱技术通过 19 种鱼类的鳞片结构对鱼类物种间的差异及其与系统发育近似性的关系进行了研究,发现 1396 cm^{-1} 处的 O-CH₂ 的峰可作为巴拉那河流域的鱼类的特征峰,即生物标志物,将所研究的 19 种鱼类划分为 4 个类群,表明傅里叶变换红外光谱技术可以作为一种验证环境特征对不同物种代谢影响的方法。此外, LV 等^[18]利用近红外光谱技术鉴别了 7 种淡水鱼。这几项研究表明,红外光谱技术对鱼产品有很强的物种分类能力;更最重要的是,无论样品的状态是鱼块、鱼糜还是鱼鳞,红外光谱技术都表现出了较好的识别能力,这意味着即使在形态不明显的环境下也有可能识别鱼类种类,从而允许在加工产品中进行鱼类鉴定。

2 红外光谱技术在鱼或鱼产品货架期的监控中的应用

鲜鱼是一种极易腐烂的食物,极易氧化和受微生物影响变质^[19]。在储存、加工和配送过程中,蛋白质和脂肪

组分发生变化,导致感官质量和营养价值显著下降。鱼类新鲜度一直被认为是生鱼质量定义的最重要方面之一^[20],因此,需要采取有效的储存策略,以提高其货架期,保证其从捕捞到消费的安全和质量。鱼的货架期取决于几个因素,如储存时间、温度、鱼的种类、捕捞过程中所受的压力以及冰量等。PINK 等^[21]在 1998 年首次报道了一种利用近红外光谱技术预测大西洋冰鳕鱼屠宰后贮藏时间的方法。随后针对监控新鲜和冻融鱼、检测鱼产品的新鲜度及检测微生物及其腐败,寻找特征物质去指征货架期的研究层出不穷。

2.1 红外光谱技术在检测新鲜和冻融鱼中的应用

用冻融鱼代替鲜鱼也是一种欺诈行为,区分新鲜和冻融鱼是防止虚假标签出现在渔业市场的一个重要手段^[22]。为了快速鉴别新鲜鱼和冻融鱼,SONIA 等^[23]发现中红外光谱 $3000\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 和 $1500\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 的光谱区域可以提供有用的特征峰。而 BÖCKER 等^[24]采用傅立叶变换红外显微光谱技术和光学显微镜对原料特性(冷藏前、冷藏后、冷冻/解冻)不同的大西洋三文鱼鱼片进行了研究,表明傅立叶变换红外显微光谱分析技术在鉴别新鲜和冻融鱼肉的试验中灵敏度较高。此外, BØKNÆS^[25]对近红外光谱技术在估算解冻后的海鳕鱼鱼片的冷冻储藏温度、冷冻储存期和冷藏储藏期方面的潜力做了研究,结果证明近红外光谱技术在评估鱼片新鲜度的能力较好。UDDIN 等^[26]的研究发现对鱼产品进行冻融处理后,主要影响冻融后总反射率的总体变化,可能是由于鱼表层的物理结构的变化而引起的光散射的变化。

另外,近红外光谱技术还可以作为一种在工业生产过程中自动评估鱼片新鲜度的方法。SIVERTSEN 等^[27]证明在每秒一片的工业速度(40 cm/s 或每秒一条鱼片)下,解冻的鳕鱼片依然可以使用可见光区的一小部分波长与新鲜

鱼片完全分离,推测是冷藏期间血红蛋白和肌红蛋白的氧化造成冻融鱼肉的差别。而 OTTAVIAN 等^[28]融合便携式可见光/近红外光谱仪、紧凑型数码相机和质谱仪等不同分析技术,有效地提高了红外光谱技术在冻融和新鲜鱼片中的分类精度。

红外光谱技术为冻融鱼片的判定提供了可靠的结果,完善了传统的品质评价方法。然而,也有必要研究样品制备、季节、渔场和鱼体型大小等因素的影响,以及更复杂的光谱预处理,才能更好的将红外光谱技术在冻融鱼片评估中推广应用。其次,冻融食品的质量与冷冻和冻融过程密切相关,解冻期间,食物(如生鱼)会受到理化变化和微生物的破坏。因此,优化解冻工艺对食品工业具有重要意义^[29]。

2.2 红外光谱技术在监测鱼产品新鲜度中的应用

鱼产品新鲜度下降是一个复杂的化学、物理、生化变化及微生物生长代谢的过程^[30]。王磊等^[31]以虾青素作为鲑鱼肉质特色的分类指标,比较主成分分析法和稀疏表示算法 2 种不同的光谱数据降维方法对其进行处理的数据结果,结果表明两种方法均能精确地分辨出鲑鱼肉质特征,稀疏表示算法能取得比传统的光谱降维方法更好的结果,为鲜鲑鱼的肉质分类提供了一种新的有效途径。挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)是反映鱼肉新鲜度的一项重要指标^[32],科学家们通常先用国标法测定鱼肉 TVB-N 含量,再将红外光谱数据与其结合,并通过化学计量学方法建立 TVB-N 预测模型^[33],为实现鱼肉新鲜度的快速判定提供了可能。

鱼类脂肪是反映鱼肉新鲜度的又一重要指标,因其易氧化^[34],且氧化后会产生氧化亚麻籽油等不良气味^[35]。为此,市场上急需一种能快速测量鱼脂氧化的技术。傅里叶变换红外光谱技术(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)可对食用油脂以及它们在氧化条件下的降解进行表征^[36]。已有研究表明^[37],食用鱼油的红外光谱的变化与传统参数如过氧化值和茴香胺值的变化是同步的。这些结果能帮助跟踪鱼脂在整个氧化过程中不同官能团的演变。因此,FTIR 是研究鱼脂氧化稳定性及在氧化条件下监测氧化程度的一种有用技术。

除了 TVB-N、鱼类脂肪外,鱼肉新鲜度指标还有菌落总数、K 值、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)值、高铁肌红蛋白(methemoglobin, MetMb)含量、pH、亮度值(L^*)和红度值(a^*)等^[38-43]。

2.3 红外光谱技术在监控鱼产品中的微生物及其腐败中的应用

FTIR 的中红外区传统上被用作生物化学指纹,用于纯培养物中微生物的鉴定、分类和表征^[44]。ELLIS 等^[45]首次提出使用 FTIR 将鸡胸肉碎的红外光谱与微生物腐败联系起来,发现细菌负荷的变化可以从获得的光谱中估计

出来。随着相关研究的不断深入,FTIR 已成为鉴定细菌、酵母和其他微生物的一种新工具^[46],在全鱼微生物腐败的快速、非侵入性监测中具有广阔的应用前景^[47],同时在检测和预测鱼片细菌载量等领域也具有较强的应用潜力^[48]。

早期 LIN 等^[49]研究了利用可见光和短波近红外光谱仪检测虹鳟鱼腐败和微生物数量预测的可能性,建立了微生物负荷的定量偏最小二乘预测模型,研究还发现鱼皮的模型拟合度比鱼肉更好。而 TITO 等^[50]研究了近红外光谱技术检测和预测大西洋鲑鱼微生物腐败的可能性。进一步表明,使用近红外来预测鱼产品中的细菌数量,从而预测其货架期是可能的。

这项技术适用于在鱼肉的感官变化变得明显之前预测鱼肉的微生物水平,甚至能够无损检测,未来的工作应该聚焦于建立鱼肉腐败的无损预测模型,确定鱼肉组织的具体变化与光谱特征能密切相关。

3 红外光谱技术在鱼产品成分检测和生理特性分析中的应用

3.1 红外光谱技术在化学成分的检测中的应用

脂肪、蛋白质、水分含量等是鱼类最重要的营养成分之一,这些营养成分的含量和分布是鱼类品质评估最重要的指标^[51]。然而,传统的测定脂肪含量的化学分析方法破坏性强,耗时长,需要使用可能对分析人员和环境有害的危险化学品^[52]。红外光谱技术为测定鱼的脂肪、蛋白质、水分和盐含量提供了许多可能性。早期已有不少研究证明红外光谱技术可以快速分析鱼类的脂肪、蛋白质^[53]、水分含量^[54]甚至游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)^[55]。与传统化学方法相比,红外光谱技术重现性更好,同时,红外光谱技术还具有快速、样本量小、对组织样品损害低等优点。

此外,红外光谱技术还能检测鱼产品中氨基酸的含量。丁丽敏等^[56]以高压液相色谱法测得的 50 个鱼粉的氨基酸含量为基准,并用近红外光谱仪收集了样品的光谱数据,通过建立的回归方程可看出,赖氨酸和总的氨基酸的定标效果较好,蛋氨酸、胱氨酸的定标精度有待进一步提高。之后,牛智有等^[57]应用偏最小二乘法,建立了鱼粉中 17 种氨基酸和总氨基酸近红外定标模型,其中能够较准确地检测鱼粉中 14 种氨基酸。

对鱼肉氨基酸、脂肪、蛋白质和水分含量等的无损测定有助于提高养殖效率,红外光谱技术可作为研究和养殖管理中的有价值的工具,例如定制鱼类不同生长阶段所需的营养成分,从而提高鱼产品的质量。

3.2 红外光谱技术在蛋白质结构分析中的应用

不同处理和贮藏条件下蛋白质结构的变化会对鱼的品质产生影响,FTIR 可观测到蛋白质结构的微小变化,定量分析蛋白质的各二级结构,现已逐渐发展成为定量分析

蛋白二级结构常用的手段^[58-60]。如 CARBONARO 等^[61]通过分析中红外区域的酰胺 I 带(1600~1700 cm^{-1}), 显示了 α -螺旋、双折叠片状、转角和非周期构象中肽键的比例。CARTON 等^[62]采用傅立叶变换显微光谱分析(Fourier transform infrared microspectroscopy, FT-MIR)和光学显微镜技术, 研究了鲑鱼肌肉干腌和熏制后肌原纤维和蛋白质显微结构的变化。显微光谱分析表明, 盐渍时间主要影响酰胺 I 区(1700~1600 cm^{-1})的变化, 表明蛋白质的二级结构变化主要受盐渍的影响。酰胺 II 区(1600~1500 cm^{-1})的主要变化是由烟熏引起的。总体而言, 1700 到 1500 cm^{-1} 之间的区域与 C-N 和 N-H 弯曲振动有关。于是, FT-MIR 被认为是分析鱼类化学结构变化的有力工具。WEI 等^[63]重点研究了利用偏最小二乘多元回归模型结合近红外光谱来预测鱼类中的粗蛋白, 证明了近红外光谱技术是研究蛋白质结构反应和蛋白质折叠、展开和错误折叠的分子机制的一种有价值的工具。

蛋白质结构特征对食品的营养和工艺性能至关重要, 红外光谱技术可以深入探究与营养潜力和技术应用相关的食物蛋白质的结构。特别是蛋白质聚集和稳定性的机制, 以及与特定成分的生物利用度和生物活性的关系, 这使得这一技术在新兴的食品蛋白质组学领域变得越来越重要。

3.3 红外光谱技术在鱼类生理变化评估中应用

现有研究表明, 肝脏可以作为鱼类营养和生理状态的指示器官^[64]。FTIR 能够在分子水平上研究鱼类的肝脏组织^[65], 可在光谱上显示养殖系统的差异或者是化学物质影响引起的鱼类生理的显著变化。显示出 FTIR 在监测鱼类生理变化的应用前景广阔。

LU 等^[66]应用 FTIR 对养殖白鲟的血浆进行了鉴别和预测卵巢成熟期。鉴定了性激素(3000 cm^{-1})和卵黄蛋白原(1080 cm^{-1})的光谱特征。用主成分分析对成熟期(卵泡发育前期、卵黄发生期、卵黄发生后和卵泡闭锁)进行了明确的区分。另外, TALBOTT 等^[67]首次使用基于短波近红外的非侵入性方法来检测雌性鲟鱼的闭锁发生, 这为鲟鱼养殖者提供一个强大的监测工具来更密切地跟踪成熟周期。这些结果表明, 红外光谱技术是评估养殖鲟鱼卵巢成熟周期的一个的良好工具, 并将有效减少侵入性卵巢活检等手段的使用。

FTIR 提供了一种简单而直接的方法来检测由于组织病理状态而引起的生理变化, 而不需要任何组织病理学数据或血液参数。因此, FTIR 有可能作为一种分析方法来检测和监测鱼类生理结构和功能的变化。

3.4 红外光谱技术在鱼类生理安全特性分析中的应用

几十年来, 商业鱼种寄生线虫的存在一直是渔业面临的严重质量问题, 目前已经尝试了各种方法来检测寄生

虫^[68], 但到目前为止, 唯一合理的解决方案是人工检查生产线上的每一条鱼片。WOLD 等^[69]研究了如何将多光谱成像与簇类独立软模式法(soft independent modeling of class analogy, SIMCA)相结合用于寄生虫的自动检测。结果表明, 线虫的光谱特征与鱼肉的光谱特征有很大的不同, 该技术能够检测到鱼肌肉深处约 6 mm 处的寄生虫, 检测结果较好, 但还需要进一步的研究来验证其对水产养殖业的可行性。

鱼产品在加工和运输期间容易受到各种伤害, 所以控制鱼制品在加工过程中的擦伤缺陷, 从而提高产品的一致性和品质显得尤为重要。LIN 等^[70]用可见光和短波近红外光谱在 600~1100 nm 的范围内检测了完整的太平洋粉红鲑鱼的瘀伤。这些测量是在漫反射模式下通过皮肤和鳞片进行的非侵入性测量。在对鱼样本进行切片后, 捕捉到了鱼的瘀伤和非瘀伤区域的数字图像。OLSEN 等^[71]探讨宰杀前的活动对鲑鱼肌肉残余血液含量的影响, 并以化学血红素测定为参考, 最终结果表明有可能开发一种光谱方法来测量完整鲑鱼肌肉中的残余血液^[72]。

微塑料是一个重大的全球环境问题^[73], 微塑料摄入及其增加可能会使食物链中有害化学物质浓度增加^[74], 从而对人类的健康产生影响。FTIR 是一种非破坏性技术, 具有完善的聚合物数据库^[75]。DIGKA 等^[76]利用 FTIR 研究发现聚乙烯是贻贝和鱼类中最常见的聚合物类型, 其结果可用于确定评估爱奥尼亚海微塑性污染的基线水平。HUANG 等^[77]采用 FT-MIR 对红树林鱼类的主要聚合物类型进行了鉴定, 发现聚合物的种类主要为聚乙烯, 其他为聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚酰胺和聚氨酯。然而, 红外光谱技术在微塑料快速评估中的应用还需要得到更多研究数据的补充, 同时还应该探索如何提高所开发模型的预测性能。

4 结束语

本综述详细概括了近二十年来以红外光谱技术为基础的分析方法对鱼产品质量的评估和监测的应用, 包括物种鉴定、养殖方法的辨别、加工技术以及损伤或腐败鱼产品的区分, 还有鱼产品的成分检测与生理特性分析, 但仍需对光谱学和化学计量学使用中尚未克服的问题进行深入探讨。

中红外光谱技术的应用主要涵盖鱼肉微生物的检测、鱼肉蛋白质的结构、鱼体某些生理变化, 它比近红外光谱更精确, 能够直接展示基团震动的基频, 基频振动是红外活性振动中吸收最强的振动, 因此, 光谱中的中红外光谱吸收峰是特定类型的有机键所独有的^[78], 但预处理较麻烦, 需要均质的样品; 近红外光谱检测的样品可以均质鱼糜或鱼油也可以是鱼片甚至整鱼, 所以比中红外光谱更方便,

它的应用范围也更广。在汇总的文献中,近红外和中红外光谱技术都有涉及到定性分析,而中近红外光谱技术在定量分析中的应用则更为广泛,可以看出近红外光谱技术也更多地用于生物活性物质和挥发性化合物的测定,然而,许多化合物不具有近红外活性,因此无法检测到。例如,在近红外区没有矿物物种的吸收带;鱼类体内吸附的微塑料只能用中红外光谱检测。

近红外光谱技术也存在一些局限性,主要难点是建立可靠、稳定的定标模型。这需要选择一种合适的方法从大量的光谱数据中挖掘有用的信息。因此,很多工作都集中在化学计量学的研究上,开发用于近红外光谱分析的公认化学计量学技术的新方法,如定标模型的传递,对食品工业进行在线分析尤为重要。

目前红外光谱技术在鱼产品质量检测和安全评估中的新应用主要聚焦于以下方面:

(1) 鉴定动物 DNA 来源

由于红外光谱技术可以从生物组织中提取和分析生化特征,所以这项技术在物种鉴定和分类中的应用日渐成熟,未来红外光谱技术能做一些精度更高的研究。HAN 等^[79]的一系列研究,提出了一种利用高通量扩展辅助傅立叶变换红外光谱(high throughput extension accessory Fourier transform infrared spectroscopy, HT-FTIR)和化学计量学相结合的方法来鉴定动物 DNA 来源的可能性。经多元建模分析发现,光谱鉴别特征与不同样品的碱基含量和碱基序列密切相关。HAN 等^[80]还发现 FTIR 在对 DNA 进行分析时,不受 DNA 的物理状态、样品数量和分子量的影响。然而,脱氧核糖核酸的稳定性和构象完整性可能会影响 DNA 的 FTIR 分析。这些基础研究进一步支持了利用 FTIR 进行 DNA 结构精细化分析的可能性,为动物来源 DNA 的鉴定提供了一种快速、灵敏、可靠的方法。该方法可广泛应用于食品、饲料、法医学和考古学研究。

(2) 预测货架期

FTIR 技术和近红外光谱技术均可以作为一种可靠、准确、快速的方法来预测储存后(在特定条件下)产品上的细菌数量,从而预测货架期,并适用于由完整或切碎的肌肉组织组成的其他鱼产品食物。然而,微生物生长并不是鲜鱼贮藏过程中光谱变化的唯一因素,非微生物的、自溶的变化,包括可能的物理性质的变化,也起到了作用^[81]。未来的工作应该是建立不同的特异模型,以确定在光谱特征中观察到的哪些具体变化与鱼肉分解最密切相关。同时还应该探索潜在地提高所开发模型的预测性能的数据融合策略。

(3) 现场快速分析和工业在线实时分析

随着光谱技术的成熟,测量工具的灵活性近年表现得愈发重要,一种快速的现场实时分析测量工具,将在鱼产品的市场监控中起到重要作用。手持式仪器有着更快速

便捷的优点,虽然精度不如台式光谱仪,但是结合不同的化学计量学技术,也可以做到较高的区分准确率。

综上所述,红外光谱技术正在成为鱼及鱼产品质量监控的有力技术。以化学计量学为动力的现代光谱分析技术已广泛应用于各行各业,特别是现场快速分析和工业在线实时分析^[82]。在定量分析中,基于光谱拟合计算的无定标方法正在引起人们的注意^[83]。红外光谱监测仪器和化学计量学方法的进步已经显示出分析复杂的多光谱信息用于生物系统的识别、分类、量化和识别的潜力^[84]。尽管一些关于化学计量学方法的研究成果仅仅是以学术论文的形式发表,但其发展的动力仍然源于实际应用的要求。开发新的算法从根本上减少模型建立和维护的工作量应该是未来的重要研究内容。

参考文献

- [1] 陶琳,武中臣,张鹏彦,等.近红外光谱法快速鉴定干海参产地[J].农业工程学报,2011,27(5):364-366.
- [2] TAO L, WU ZC, ZHANG PY, *et al.* Rapid identification of dried sea cucumber products from different geographical areas by near-infrared spectroscopy [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2011, 27(5): 364-366.
- [3] 李荣华,安莎,卢旭,等.食品中残留甲醛问题探讨[J].食品安全导刊,2015,(21):161-162.
- [4] LI RH, AN S, LU X, *et al.* Discussion on residual formaldehyde in food [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2015, (21): 161-162.
- [5] 马兵,穆迎春,宋泽,等.各国药物残留限量标准比对分析及对中国水产品出口贸易的影响[J].中国农学通报,2010,26(17):398-402.
- [6] MA B, MU YC, SONG Y, *et al.* Comparative analysis of medicine maximum residue limit (MRL) standard and its relation with aquatic products trade in China [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(17): 398-402.
- [7] 谭丹丹.高效液相色谱法在食品分析中的应用研究[J].粮食流通技术,2021,(2):27.
- [8] TAN DD. Study on the application of high performance liquid chromatography in food analysis [J]. *Mod Food*, 2021, (2): 27.
- [9] KAROU I R, LEFUR B, GRONDIN C, *et al.* Mid-infrared spectroscopy as a new tool for the evaluation of fish freshness [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2007, 42(1): 57-64.
- [10] 刘飞.气相色谱-质谱联用技术在食品分析中的应用探讨[J].现代食品,2020,(11):167-168.
- [11] LIU F. Application of gas chromatography-mass spectrometry in food analysis [J]. *Mod Food*, 2020, (11): 167-168.
- [12] ZHANG XY, HU W, TENG J, *et al.* Rapid recognition of marine fish surimi by one-step discriminant analysis based on near-infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Int J Food Prop*, 2017, 20(12): 2932-2943.
- [13] LU GH, ZHOU Q, SUN SQ, *et al.* Differentiation of Asian ginseng, American ginseng and notoginseng by fourier transform infrared spectroscopy combined with two-dimensional correlation infrared spectroscopy [J]. *J Mol Struct*, 2008, 883-884: 91-98.
- [14] LOHUMI S, LEE S, LEE H, *et al.* A review of vibrational spectroscopic

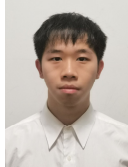
- techniques for the detection of food authenticity and adulteration [J]. Trends Food Sci Technol, 2015, 46(1): 85–98.
- [10] HE HJ, WU D, SUN DW. Nondestructive spectroscopic and imaging techniques for quality evaluation and assessment of fish and fish products [J]. Crit Rev Food Sci, 2015, 55(6): 864–886.
- [11] GHIDINI S, VARRÀ MO, ZANARDI E. Approaching authenticity issues in fish and seafood products by qualitative spectroscopy and chemometrics [J]. Molecules, 2019, 24(9): 1812.
- [12] WANG YY, LI JQ, LIU HG, *et al.* Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) combined with chemometrics methods for the classification of Lingzhi species [J]. Molecules, 2019, 24(12): 2210.
- [13] KAMRUZZAMAN M, SUN DW, ELMASRY G, *et al.* Fast detection and visualization of minced lamb meat adulteration using NIR hyperspectral imaging and multivariate image analysis [J]. Talanta, 2013, 103: 130–136.
- [14] MAJOLINI D, TROCINO A, XICCATO G, *et al.* Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) characterization of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) from different rearing systems [J]. Ital J Anim Sci, 2009, 8(2): 860–862.
- [15] GHIDINI S, VARRÀ MO, DALL'ASTA C, *et al.* Rapid authentication of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) according to production method, farming system, and geographical origin by near infrared spectroscopy coupled with chemometrics [J]. Food Chem, 2019, 280: 321–327.
- [16] VARRÀ MO, GHIDINI S, IANIERI A, *et al.* Near infrared spectral fingerprinting: A tool against origin-related fraud in the sector of processed anchovies [J]. Food Control, 2021, 123: 107778.
- [17] ALMEIDA FS, LIMA SM, ANDRADE LHC, *et al.* Differentiation of neotropical fish species with statistical analysis of Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy data [J]. Appl Spectrosc, 2012, 66(7): 782–785.
- [18] LV H, XU W, YOU J, *et al.* Classification of freshwater fish species by linear discriminant analysis based on near infrared reflectance spectroscopy [J]. J Near Infrared Spec, 2017, 25(1): 54–62.
- [19] PARLAPANI FF, MALLOUCHOS A, HAROUTOUNIAN SA, *et al.* Volatile organic compounds of microbial and non-microbial origin produced on model fish substrate un-inoculated and inoculated with gilt-head sea bream spoilage bacteria [J]. LWT, 2017, 78: 54–62.
- [20] WU D, ZHANG M, CHEN H, *et al.* Freshness monitoring technology of fish products in intelligent packaging [J]. Crit Rev Food Sci, 2021, 61(8): 1279–1292.
- [21] PINK J, NACZK M, PINK D. Evaluation of the quality of frozen minced red hake: Use of Fourier transform infrared spectroscopy [J]. J Agric Food Chem, 1998, 46(9): 3667–3672.
- [22] FRANCESCHELLI L, BERARDINELLI A, DABBOU S, *et al.* Sensing technology for fish freshness and safety: A review [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1373.
- [23] SONIA BN, SARA BC, MTV N, *et al.* Effects of previous frozen storage on chemical, microbiological and sensory changes during chilled storage of Mediterranean Hake (*Merluccius merluccius*) after thawing [J]. Eur Food Res Technol, 2008, 226(1/2): 287–293.
- [24] BÖCKER U, KOHLER A, AURSAND IG, *et al.* Effects of brine salting with regard to raw material variation of Atlantic salmon (*Salmo salar*) muscle investigated by Fourier transform infrared microspectroscopy [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(13): 5129–5137.
- [25] BØKNÆS N. Freshness assessment of thawed and chilled cod fillets packed in modified atmosphere using near-infrared spectroscopy [J]. LWT-Food Sci Technol, 2002, 35(7): 628–634.
- [26] UDDIN M, OKAZAKI E, TURZA S, *et al.* Non-destructive visible/NIR spectroscopy for differentiation of fresh and frozen-thawed fish [J]. J Food Sci, 2005, 70(8): c506–c510.
- [27] SIVERTSEN AH, KIMIYA T, HEIA K. Automatic freshness assessment of cod (*Gadus morhua*) fillets by vis/NIR spectroscopy [J]. J Food Eng, 2011, 103(3): 317–323.
- [28] OTTAVIAN M, FASOLATO L, SERVA L, *et al.* Data fusion for food authentication: Fresh/frozen-thawed discrimination in west african goatfish (*Pseudupeneus prayensis*) fillets [J]. Food Bioprocess Technol, 2014, 7(4): 1025–1036.
- [29] FASOLATO L, BALZAN S, RIOVANTO R, *et al.* Comparison of visible and near-infrared reflectance spectroscopy to authenticate fresh and frozen-thawed swordfish (*Xiphias gladius* L) [J]. J Aquat Food Prod Technol, 2012, 21(5): 493–507.
- [30] 韩剑众, 黄丽娟, 顾振宇, 等. 基于电子舌的鱼肉品质及新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 141–144.
- HAN JZ, HUANG LJ, GU ZY, *et al.* Evaluation of fish quality and freshness based on electronic tongue [J]. Tradit Chin Soc Agric Eng, 2008, 24(12): 141–144.
- [31] 王磊, 殷姝姝, 余心杰. 基于近红外光谱技术的三文鱼肉质分类研究[J]. 计算机与现代化, 2015, (9): 109–112.
- WANG L, YIN JJ, YU XJ. Meat classification of salmon based on near infrared spectroscopy and sparse representation [J]. Comput Mod, 2015, (9): 109–112.
- [32] 刘书成. 水产食品加工学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2011.
- LIU SC. Aquatic food processing [M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2011.
- [33] 刘源, 陈伟华, 侯巧娟, 等. 应用近红外光谱技术评价冰鲜大黄鱼新鲜度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 937–941.
- LIU Y, CHEN WH, HOU QJ, *et al.* Study on freshness evaluation of ice-stored large Yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) using near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(4): 937–941.
- [34] HENRIK JA, GRETE B, ANNE GC, *et al.* Development of rancidity in salmonoid steaks during retail display [J]. Z Lebensm Unters Forsch, 1990, 191(2): 119–122.
- [35] CONNELL JJ. Methods of assessing and selecting for quality [J]. Control Fish Qual, 1990, 2: 122–150.
- [36] MARÍA DG, NEREA C. Fourier transform infrared spectra data versus peroxide and anisidine values to determine oxidative stability of edible oils [J]. Food Chem, 2002, 77(4): 503–510.

- [37] GULLÉN MD, RUIZ A, CABO N. Study of the oxidative degradation of farmed salmon lipids by means of Fourier transform infrared spectroscopy. Influence of salting [J]. *J Sci Food Agric*, 2004, 84(12): 1528–1534.
- [38] NIELS B, KRISTINA NJ, CHARLOTTE MA, *et al.* Freshness assessment of thawed and chilled cod fillets packed in modified atmosphere using near-infrared spectroscopy [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2002, 35(7): 628–634.
- [39] ALESSANDRO G, ANNACHIARA B, LUIGI R, *et al.* Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy [J]. *J Food Eng*, 2008, 89(2): 142–148.
- [40] JIEWEN Z, HAO L, QUANSHENG C, *et al.* Identification of egg's freshness using NIR and support vector data description [J]. *J Food Eng*, 2010, 98(4): 408–414.
- [41] HAO L, JIEWEN Z, LI S, *et al.* Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2011, 12(2): 182–186.
- [42] XIWEI W, MAOCHENG Z, RONGHUA J, *et al.* Visualizing quantitatively the freshness of intact fresh pork using acousto-optical tunable filter-based visible/near-infrared spectral imagery [J]. *Comput Electron Agric*, 2013, 99: 41–53.
- [43] 陶瑞, 史智佳, 贡慧, 等. 傅里叶变换近红外光谱技术快速检测金枪鱼新鲜度[J]. *肉类研究*, 2017, 31(4): 43–49.
- TAO R, SHI ZJ, GONG H, *et al.* Rapid determination of tuna meat freshness based on fourier transform near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Meat Res*, 2017, 31(4): 43–49.
- [44] REBUFFO CA, SCHMITT J, WENNING M, *et al.* Reliable and rapid identification of *Listeria monocytogenes* and *Listeria* species by artificial neural network-based Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Appl Environ Microb*, 2006, 72(2): 994–1000.
- [45] ELLIS DI, BROADHURST D, GOODACRE R. Rapid and quantitative detection of the microbial spoilage of beef by Fourier transform infrared spectroscopy and machine learning [J]. *Anal Chim Acta*, 2004, 514(2): 193–201.
- [46] WORTBERG F, NARDY E, CONTZEN M, *et al.* Identification of *Yersinia ruckeri* from diseased salmonid fish by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *J Fish Dis*, 2012, 35(1): 1–10.
- [47] FENGOU LC, LIANOU A, TSAKANIKAS P, *et al.* Evaluation of Fourier transform infrared spectroscopy and multispectral imaging as means of estimating the microbiological spoilage of farmed sea bream [J]. *Food Microbiol*, 2019, 79: 27–34.
- [48] SARAIVA C, VASCONCELOS H, ALMEIDA JMMM. A chemometrics approach applied to Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for monitoring the spoilage of fresh salmon (*Salmo salar*) stored under modified atmospheres [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 241: 331–339.
- [49] LIN M, MOUSAVI M, AL-HOLY M, *et al.* Rapid near infrared spectroscopic method for the detection of spoilage in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(1): S18–S23.
- [50] TITO NB, RODEMANN T, POWELL SM. Use of near infrared spectroscopy to predict microbial numbers on Atlantic salmon [J]. *Food Microbiol*, 2012, 32(2): 431–436.
- [51] VALDES EV, ATKINSON JL, LEESON S, *et al.* Near infrared reflectance analysis of fat, protein, and gross energy of chicken and rainbow trout carcasses [J]. *Can J Anim Sci*, 1989, 69(4): 1087–1090.
- [52] CEN H, HE Y. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2007, 18(2): 72–83.
- [53] MATHIAS JA, WILLIAMS PC, SOBERING DC. The determination of lipid and protein in freshwater fish using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Aquaculture*, 1987, 61(3–4): 303–311.
- [54] DARWISH GS, VOORT FR, SMITH JP. Proximate analysis of fish tissue by mid-infrared transmission spectroscopy [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1989, 46(4): 644–649.
- [55] ZHANG HZ, LEE TC. Rapid near-infrared spectroscopic method for the determination of free fatty acid in fish and its application in fish quality assessment [J]. *J Agric Food Chem*, 1997, 45(9): 3515–3521.
- [56] 丁丽敏, 计成, 陈怡焯, 等. 近红外光谱分析技术快速测定鱼粉氨基酸含量的研究[J]. *饲料研究*, 1999, (5): 26–28.
- DING LM, JI C, CHEN YH, *et al.* Rapid determination of amino acids in fish meal by near infrared spectroscopy [J]. *Feed Res*, 1999, (5): 26–28.
- [57] 牛智有, 韩鲁佳. 鱼粉中氨基酸近红外光谱定量分析[J]. *农业机械学报*, 2007, (5): 114–117.
- NIU ZY, HAN LJ. Quantitative analysis of amino acid in fishmeal by near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2007, (5): 114–117.
- [58] 李亦易, 邹焯, 李冬敏, 等. 红外光谱法定量分析蛋白二级结构研究中水汽影响的评估[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(6): 608–612.
- LI YY, ZOU H, LI DM, *et al.* Evaluation of water vapor effect on the quantitative analysis of protein secondary structure by FTIR [J]. *J Hebei Univ (Nat Sci Ed)*, 2012, 32(6): 608–612.
- [59] 张秋会, 黄现青, 李苗云, 等. 傅里叶红外光谱法研究肌肉蛋白质的二级结构[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(10): 247–251.
- ZHANG QH, HUAN XQ, LI MY, *et al.* Study on secondary structure of meat protein by FTIR [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(10): 247–251.
- [60] UDDIN M, OKAZAKI E, AHMAD MU, *et al.* NIR spectroscopy: A non-destructive fast technique to verify heat treatment of fish-meat gel [J]. *Food Control*, 2006, 17(8): 660–664.
- [61] CARBONARO M, NUCARA A. Secondary structure of food proteins by Fourier transform spectroscopy in the mid-infrared region [J]. *Amino Acids*, 2010, 38(3): 679–690.
- [62] CARTON I, BÖCKER U, OFSTAD R, *et al.* Monitoring secondary structural changes in salted and smoked salmon muscle myofiber proteins by FT-IR microspectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(9): 3563–3570.
- [63] WEI W, HU W, ZHANG XY, *et al.* Analysis of protein structure changes and quality regulation of surimi during gelation based on infrared spectroscopy and microscopic imaging [J]. *Sci Rep-UK*, 2018, 8(1): 5566.
- [64] SEGNER H, JUARIO JV. Histological observations on the rearing of milkfish, *Chanos, fry* using different diets [J]. *J Appl Ichthyol*, 1986, 2(4):

- 162–172.
- [65] CEYLAN C, TANRIKUL T, ÖZGENER H. Biophysical evaluation of physiological effects of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) farming using FTIR spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 1055–1060.
- [66] LU X, WEBB M, TALBOTT M, *et al.* Distinguishing ovarian maturity of farmed white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) by Fourier transform infrared spectroscopy: A potential tool for caviar production management [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(7): 4056–4064.
- [67] TALBOTT MJ, SERVID SA, CAVINATO AG, *et al.* Confirmation of ovarian homogeneity in post-vitellogenic cultured white sturgeon, *Acipenser transmontanus* [J]. *Fish Physiol Biochem*, 2014, 40(1): 1–7.
- [68] SIVERTSEN AH, HEIA K, HINDBERG K, *et al.* Automatic nematode detection in cod fillets (*Gadus morhua* L.) by hyperspectral imaging [J]. *J Food Eng*, 2012, 111(4): 675–681.
- [69] WOLD JP, WESTAD F, HEIA K. Detection of parasites in cod fillets by using SIMCA classification in multispectral images in the visible and NIR region [J]. *Appl Spectrosc*, 2001, 55(8): 1025–1034.
- [70] LIN M, CAVINATO AG, MAYES DM, *et al.* Bruise detection in Pacific pink salmon (*Oncorhynchus gorboscha*) by visible and short-wavelength near-infrared (SW-NIR) spectroscopy (600–1100 nm) [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(22): 6404–6408.
- [71] OLSEN SH, SØRENSEN NK, LARSEN R, *et al.* Impact of pre-slaughter stress on residual blood in fillet portions of farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*)-measured chemically and by visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1–4): 90–97.
- [72] OLSEN SH, SØRENSEN NK, STORMO SK, *et al.* Effect of slaughter methods on blood spotting and residual blood in fillets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1–4): 462–469.
- [73] HUSSIEN NA, MOHAMMADEIN A, TANTAWY EM, *et al.* Investigating microplastics and potentially toxic elements contamination in canned Tuna, salmon, and sardine fishes from Taif markets, KSA [J]. *Open Life Sci*, 2021, 16(1): 827–837.
- [74] AVIO CG, GORBI S, REGOLI F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea [J]. *Mar Environ Res*, 2015, 111: 18–26.
- [75] OWEN S, CURETON S, SZUHAN M, *et al.* Microplastic adulteration in homogenized fish and seafood-A mid-infrared and machine learning proof of concept [J]. *Spectrochim Acta A*, 2021, 260: 119985.
- [76] DIGKA N, TSANGARIS C, TORRE M, *et al.* Microplastics in mussels and fish from the Northern Ionian Sea [J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 135: 30–40.
- [77] HUANG JS, KOONGOLLA JB, LI HX, *et al.* Microplastic accumulation in fish from Zhanjiang mangrove wetland, South China [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 708: 134839.
- [78] KRISTOFFERSEN KA, LILAND KH, BÖCKER U, *et al.* FTIR-based hierarchical modeling for prediction of average molecular weights of protein hydrolysates [J]. *Talanta*, 2019, 205: 120084.
- [79] HAN Y, JIAN L, YAO Y, *et al.* Insight into rapid DNA-specific identification of animal origin based on FTIR Analysis: A case study [J]. *Molecules*, 2018, 23(11): 2842.
- [80] HAN Y, WANG X, LIU Y, *et al.* A novel FTIR discrimination based on genomic DNA for species-specific analysis of meat and bone meal [J]. *Food Chem*, 2019, 294: 526–532.
- [81] LONE G, PAW D. Fish spoilage bacteria - problems and solutions [J]. *Curr Opin Biotech*, 2002, 13(3): 262–266.
- [82] CHEN Y, GAO S, JONES EJ, *et al.* Prediction of soil clay content and cation exchange capacity using visible near-infrared spectroscopy, portable X-ray fluorescence, and X-ray diffraction techniques [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55(8): 4629–4637.
- [83] TSAKIRIDIS NL, THEOCHARIS JB, SYMEONIDIS AL, *et al.* Improving the predictions of soil properties from VNIR-SWIR spectra in an unlabeled region using semi-supervised and active learning [J]. *Geoderma*, 2021, 387: 114830.
- [84] WANG HP, CHEN P, DAI JW, *et al.* Recent advances of chemometric calibration methods in modern spectroscopy: Algorithms, strategy, and related issues [J]. *TrAC-Trend Anal Chem*, 2022, 153: 116648.

(责任编辑: 黄周梅 韩晓红)

作者简介



伍志强, 硕士研究生, 主要研究方向为高附加值食品真实属性表征。
E-mail: wuzhiqiang314@126.com



季超, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品农产品质量安全。
E-mail: chaosji@tjnu.edu.cn



郑文杰, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: skyzwj@tjnu.edu.cn