

近红外光谱技术在水产品检测中的应用进展

刘 爽, 柴春祥*

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134)

摘 要: 水产品营养丰富、味道鲜美, 深受人们喜爱。由于其组织结构脆弱, 且含有丰富的内源酶和嗜冷细菌, 在储藏和运输过程中容易腐烂变质。随着水产品贸易的日益全球化, 水产品品质现已成为大家关注的核心问题。传统的水产品检测方法具有主观性、侵入性、耗时性, 已不能满足水产品市场的需求, 如何快速、客观地评价水产品品质已成为亟待解决的问题。近红外光谱技术作为一种快速、无损的检测技术已广泛应用于水产品检测, 本文综述了国内外学者采用近红外光谱技术在水产品新鲜度评价、质量评估、重金属含量检测、品种鉴别等方面的研究进展, 并分析了近红外光谱技术在水产品检测中的不足之处及发展前景, 以期为水产品快速检测技术的进一步发展和研究提供参考依据。

关键词: 近红外光谱技术; 水产品; 无损检测技术; 新鲜度评价

Application progress of near infrared spectroscopy in aquatic products detection

LIU Shuang, CHAI Chun-Xiang*

(College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: Aquatic products are rich in nutrition and delicious in taste, which are loved by people. In the process of storage and transportation, aquatic products are easy to rot and deteriorate because of their fragile organizational structure, rich in endogenous enzymes and cold-loving bacteria. With the globalization of aquatic product trade, aquatic product quality has become the core issue of concern. Traditional aquatic product testing methods are subjective, intrusive and time-consuming, which can no longer meet the needs of the aquatic product market. How to evaluate aquatic product quality quickly and objectively has become an urgent problem to be solved. As a rapid and nondestructive detection technology, near infrared spectroscopy has been widely used in aquatic products detection. This paper reviewed the research progress of near infrared spectroscopy in aquatic products freshness evaluation, quality evaluation, heavy metal content detection, variety identification, etc. The shortcomings and development prospects of near infrared spectroscopy technology in aquatic product detection were analyzed in order to provide reference for the further development and research of aquatic product rapid detection technology.

KEY WORDS: near infrared spectroscopy; aquatic products; nondestructive detection technology; freshness evaluation

基金项目: 天津市农业科技成果转化与推广项目(201901090)

Fund: Tianjin Agricultural Science and Technology Achievement Transformation and Promotion Project (201901090)

*通信作者: 柴春祥, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与贮藏。E-mail: ccxiang@tjcu.edu.cn

*Corresponding author: CHAI Chun-Xiang, Ph.D, Professor, School of Biotechnology and Food Science & Tianjin University of Commerce, 409 Guangrong Road, Beichen District, Tianjin 300134, China. E-mail: ccxiang@tjcu.edu.cn

0 引 言

水产品因营养丰富、味道鲜美且脂肪含量较低,一直深受人们的欢迎^[1]。由于水产品中的有机酸、蛋白质和脂肪等都含有含氢基团,在外源微生物和高活性内源酶的作用下极易腐败变质^[2]。同时还会出现冷冻、解冻、腌制等加工因素造成水产品营养损失、新鲜度下降及重金属污染、以次充好等问题^[3]。这些品质问题的出现对消费者的健康构成了严重威胁,而传统的检测方法如感官评价、化学试剂法等操作复杂、精确度差,难以实现批量样品的快速无损检测,已经不能满足当今市场的检测需求^[4]。因此寻找快速、可靠和实用的分析方法用于水产品的品质检测和安全评估具有重要意义。

近红外光谱是介于可见光和中红外光之间的电磁波谱,其波长范围为 780~2526 nm^[5]。近红外光谱技术的原理是基于光发射的电磁辐射与样品成分之间的相互作用对样品进行分析检测^[6]。当有光束通过样品照射时,样品中的分子对特定频带下光选择性地吸收,引起样品分子中的含氢基团如(C-H、O-H、N-H 和 C-O 等)的电磁振动反应,产生吸收或反射光谱,从而反映出与化学基团有关的信息^[7]。通常将近红外光谱技术与主成分分析、偏最小二乘法和人工神经网络等化学计量学工具结合,建立样品的近红外光谱与相应的待测样品的性质或数据之间的模型,实现对样品的定性和定量分析^[8]。与传统分析技术相比,近红外光谱分析技术具有快速、无损、高精度、不消耗化学试剂及无需对样品进行前处理等优点,目前已被广泛应用于水产品的品质检测^[9-13]。本文主要对近红外光谱技术在水产品新鲜度评价、质量评估、货架期预测、品种鉴别、重金属污染、掺伪分析等方面的应用进行总结,并分析其优势与不足之处,对该技术在水产品领域发展趋势进行展望,为水产品品质检测的实际应用提供参考。

1 近红外光谱技术在水产品新鲜度评价中的应用

水产品新鲜度评价指标多以 K 值、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、pH、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)、三甲胺、生物胺等破坏性指标为主^[14]。随着腐败的产生,水产品发生各种生化反应,内部化学成分发生变化,对近红外吸收光谱和吸收强度产生影响^[15]。因此,采用近红外光谱技术结合化学计量法建立水产品的新鲜度评价指标的定量模型,可实现对水产品新鲜度的快速无损检测^[16]。如陈伟华等^[17]通过采集绞碎前后罗非鱼的近红外光谱,结合化学计量法建立了罗非鱼肉 TVB-N 的定量模型,模型充分考虑了样品均一性和各种光谱预处理方法对模型预测效果的影响,结果表明绞碎前的

罗非鱼肉模型更具优势,验证集决定系数为 0.976,该方法适用于罗非鱼新鲜度的快速无损评价;方瑶等^[18]通过采集金鲳鱼 680~2600 nm 的近红外光谱,结合多元散射校正和偏最小二乘法构建了金鲳鱼鱼肉的 TVB-N 含量的预测模型,决定系数为 0.8841,预测结果准确可靠,表明近红外光谱技术可较好地用于金鲳鱼鱼肉新鲜度的快速检测;任瑞娟等^[19]采集了南美白对虾虾糜在 950~1650 nm 的近红外漫反射光谱,结合偏最小二乘法建立虾糜 TVB-N 模型,预测集相关系数为 0.923,预测均方根误差为 2.179;周娇娇等^[20]采集了团头鲂样品在 1000~1799 nm 波长范围内的近红外光谱,并结合偏最小二乘法分别建立了团头鲂样品的 pH、TBA 值、TVB-N、 K 值等指标的定量预测模型,模型的相关系数分别为 0.961、0.881、0.955 和 0.946,预测均方根误差分别为 0.049、1.659、0.047 和 2.558,以上研究均表明应用近红外光谱技术快速测定虾的新鲜度是可行的,为快速检测淡水鱼新鲜度提供了理论依据。

此外,水产品新鲜度也与组胺含量有关,当水产品发生腐败时,其产生的细菌增多导致组胺含量过高,食用组胺含量过高的水产品容易引发食物中毒。PAULINE 等^[21]基于红外光谱技术提出了一种结合向后间隔偏最小二乘、选择性比和花授粉算法的三步混合策略,并采用小波神经网络构建了组胺含量的最优模型,从而实现了快速无损地评估鲭鱼中的组胺水平。

综上,近红外光谱技术结合化学计量法建立水产品的 K 值、TVB-N、pH 等新鲜度指标定量预测模型,能够实现水产品新鲜度的准确预测。相比于传统的水产品新鲜度检测方法如感官评价法、化学试剂法等^[4],近红外光谱技术的引入减少了烦琐的实验操作,提高了水产品新鲜度指标的检测效率。但是采用该技术检测的结果准确性容易受到样品状态及检测指标的变异范围影响,需要进一步开发算法和化学计量学方法,增加光谱信息的利用率,提高新鲜度预测的准确性,促进近红外光谱技术在快速、无损评估水产品新鲜度中的应用,并开发多物种通用的预测模型。此外,如何实现动态环境下的水产品新鲜度的在线检测也是未来的研究热点。

2 近红外光谱技术在水产品质量评估中的应用

水产品中的水分、蛋白质和脂肪含量与水产品品质和风味密切相关。水产品中的水分越多,细菌越容易繁殖,脂类的氧化酸败和蛋白质降解也是导致肌肉食品在储存过程中质量损失的主要变质反应^[22]。近红外光谱技术提供了一种跟踪和评估水产品质量变化的可行性方法。为了快速准确地监测鱼肉中脂类的氧化和水解降解情况,MAGNEA 等^[23]使用近红外光谱法结合偏最小二乘法分别建立了瘦肉型鱼(青鳉和黑鳉)肌肉的脂质含量、游离脂肪酸、硫代巴比妥酸反应性物质的含量校准模型,对应青鳉鱼模型决

定系数分别为 0.96、0.89 和 0.70, 黑鲑鱼模型决定系数为 0.97、0.89 和 0.76, 成功实现鱼肉中脂质含量和组成变化的准确评估; KHALIL 等^[24]采用近红外光谱法结合偏最小二乘回归建立了金枪鱼中的水分、蛋白质、游离脂肪酸和总脂肪含量的校正模型, 相应的模型决定系数分别为 0.98、0.99、0.95 和 0.96, 展示了近红外光谱法快速、准确和无损测定鱼类中营养成分的潜力; UDDIN 等^[25]利用近红外反射光谱在 400~1100 nm 波长范围内, 结合偏最小二乘法分别建立鱼糜水分和蛋白质含量的校正模型, 模型决定系数为 0.98 和 0.97, 表明该方法可用于鱼糜中水分和蛋白质含量的快速检测。同时也有研究表明近红外光谱技术能够快速评估鱼油的质量变化^[26]。由此可见, 近红外光谱技术结合化学计量法已被广泛应用于对水产品中的水分、游离脂肪酸、蛋白质和脂肪含量等营养成分的快速、准确和无损检测, 藉此实现对水产品的质量评估。

由于水产品质量良莠不齐, 往往需要根据产品质量对其进行分类。吴浩等^[27]利用近红外光谱结合主成分分析-马氏距离模式识别方法, 建立了白姑鱼糜冷冻、解冻两种状态下的等级评定模型, 冷冻状态下的模型综合预测正确率为 96.3%, 解冻状态下的模型综合预测正确率为 83.3%; 王磊等^[28]以虾青素作为三文鱼肉质分类指标, 在近红外光谱技术的基础上, 利用稀疏表示结合化学计量法建立了校正模型, 实现了对三文鱼的肉质分类。此外, 因擦伤是水产品降级的主要原因之一, LIN 等^[29]在漫反射模式下通过皮肤和鳞片对鲑鱼进行非侵入性测量, 测试了可见光和短波长近红外光谱检测完整鲑鱼瘀伤的能力, 分别对鱼的擦伤区和非擦伤区进行数字图像采集并建立偏最小二乘判别模型, 84%的非损伤样品和 81%的损伤样品分别被正确分类。以上方法为水产品擦伤检测提供了可能。

综上, 近红外光谱技术可通过检测水产品中的水分、蛋白质、脂肪等成分含量, 监测水产品中的脂类氧化和蛋白质降解情况, 实现对水产品的质量评估。此外, 近红外光谱技术也可用于水产品质量等级分类。但是由于水产品组分的不均匀分布, 可能会影响检测结果准确性, 因此需要大量具有代表性的样本数据用于建立红外光谱模型, 并且需要不断改进和优化检测方法来提高检测结果准确度。同时, 水产品质量等级的评定关系到诸多因素, 单一的评价技术不能实现对水产品的全面综合评价, 今后的研究中可在感官评定的基础上采用多种检测技术相结合的方法对水产品品质进行全面分析, 实现智能化水产品质量分级。

3 近红外光谱技术在水产品货架期预测中的应用

腐败菌生长引起的水产品的品质变化是导致产品货架期短的主要原因之一^[30]。即使在储存初期微生物的生长

不明显, 肉眼无法辨识, 但这足以使样品的特征光谱会发生变化^[31]。因此, 采用近红外光谱技术以快速和非破坏性的方式在线和实时检测微生物腐败, 以确定用于评估水产品货架期的总活菌数(total viable count, TVC), 可为水产品加工和储存提供巨大的商业优势^[32]。TITO 等^[33]采用近红外光谱法结合主成分分析法, 成功将新鲜鲑鱼鱼片与在 4 °C 下储存 9 d 的鲑鱼鱼片区分, 并建立了鲑鱼片总需氧菌数的偏最小二乘回归预测模型, 决定系数为 0.64, 模型预测效果较差, 但模型仍需要进一步完善, 从而实现对鲑鱼片的保质期预测; 段翠等^[34]采用手持近红外光谱仪结合遗传算法和 BP 神经网络系统方法针对三文鱼的菌落总数建立预测和检测模型, 经验证该模型的相关系数为 96%。以上报道均表明, 近红外光谱技术结合化学计量法在水产品菌落总数的快速无损检测中的适用性准确度。目前, 近红外光谱技术在水产品货架期预测方面的研究还比较少, 并且在货架期预测模型的构建方面也不完善, 仍需要进一步探究。

4 近红外光谱技术在重金属含量检测中的应用

水生动物重金属污染是世界各国普遍存在的食品卫生问题, 常见的重金属有汞、砷、铅、铬等。当重金属含量在水产品体内的积累达到一定程度后, 不仅对水产品自身造成危害, 还会通过食物链富集到人体, 从而对人体健康构成威胁^[35]。而近红外光谱技术在快速检测水产品中的重金属污染方面已有相关报道。RAFAEL 等^[36]采用近红外光谱法对红螯虾样品进行光谱扫描, 并结合偏最小二乘法对不同的光谱变换建立无机砷的含量的预测模型, 模型的决定系数为 0.93, 表明采用近红外光谱筛选红小龙虾中无机砷含量是可行的; CHEN 等^[37]基于红外光谱和拉曼光谱数据, 采用偏最小二乘判别分析、最小二乘支持向量机和随机森林 3 种校正方法建立了判别模型, 在鉴别被一种重金属或重金属混合物污染的鱼时, 模型取得了 100%的总体正确率。同时分析不同重金属中毒样品时, 判别准确率保持在 90%以上, 表明近红外光谱法可用于幼鱼样品中重金属(Zn、Cu、Cd)含量的快速无损鉴定; 林冬秀等^[38]在近红外光谱的基础上结合最小二乘支持向量机和随机森林算法建立了分类预测模型, 实现了对重金属(Cd、Cu、Pb、Zn)污染泥蚶和对照泥蚶的分类检测, 平均预测正确率为 95%。综上, 近红外光谱技术可用于检测水产品中镉、铜、铅、锌等重金属的含量。然而, 近红外光谱技术的检测灵敏度较低, 在部分痕量有害物质的检测方面存在局限性, 并且在上述文献中都是对水产品中单一的重金属含量进行分别检测, 要实现水产品中多种重金属污染的同时检测及重金属污染水产品的鉴别等仍需更进一步研究。

5 近红外光谱技术在水产品掺伪分析中的应用

近年来,不法商贩为了追求暴利,导致水产品消费市场“以伪乱真”“以次充好”的现象日渐显著^[39]。最常见的欺诈行为发生在水产品供应链的不同环节,比如用低廉的品种替代昂贵的品种,用冷冻/解冻产品替代新鲜产品等^[40]。这种欺诈行为不仅会损害消费者的利益,还会导致食品安全问题。近红外光谱技术具有较好的定性定量分析能力,可用于检测水产品的掺伪分析,能够快速、方便地识别水产品市场的商业欺诈行为。GRASSI 等^[41]采用手持式近红外光谱(near-infrared spectrometry, NIR)设备实现了对大西洋鳕鱼和黑线鳕鱼的鱼片和肉饼的真实性评估; FINLEY 等^[42]通过可见近红外光谱结合偏最小二乘回归实现了对大西洋蓝蟹肉掺入不同百分比的蓝色游泳蟹肉的检测,误差小于 $\pm 6\%$; 杨慧等^[43]采用近红外光谱技术结合偏最小二乘判别分析法建立了掺伪大鲮粉的定性判别模型,模型判别准确率为 100%; 石吉勇等^[44]采用近红外光谱技术结合 K-最近邻法和最小二乘支持向量机构建识别真伪三文鱼的模型,其模型识别率为 97.50%,可实现对真伪三文鱼的快速无损鉴别。水产品在冻融循环和冰上冷藏过程中血红蛋白和肌红蛋白发生氧化导致可见光谱区的图谱产生大部分变化^[45],从而可采用近红外光谱技术对新鲜/冻融的水产品进行区分。SIVERTSEN 等^[46]使用手持交互探针和成像光谱仪对比鲑鱼片近红外光谱图的变化,成功将冷冻/解冻鲑鱼片与新鲜鱼片完全分开, KIMIVA 等^[47]使用同样的方法对冷冻/解冻的鳕鱼片与新鲜鳕鱼片进行了区分; REIS 等^[48]通过可见-近红外光谱扫描新鲜和冷冻金枪鱼,结合偏最小二乘法,采用重复双交叉验证的方法进行判别分析,预测新鲜样品的正确率为 92%,预测冷冻/解冻样品的正确率为 82%。

综上所述,基于近红外光谱技术实现对水产品的掺伪分析是可行的。尤其在区分冷冻/解冻样品和新鲜样品方面已经取得了较好的效果,但是掺伪分析结果的准确度取决于掺伪的种类和数量,而近红外光谱技术检测灵敏度较低,组分含量检出限一般在 0.1%,对于低浓度掺假物质的检测能力较弱,在实际检测中具有一定的局限性。

6 近红外光谱技术在水产品品种鉴别中的应用

市面上常见的水产品种类繁多,不同种类的水产品在生长习性、品质和价格上存在很大差异。传统的水产品种类鉴别方法是通过观察产品的外观特征进行分类,在没有大量、长期的经验积累的前提下,很难鉴别出性状类似的水产品,对水产品品种判断不准确很可能会在销售和养殖中造成损失,且不利于市场监管^[49]。因此,采用科学手段建立一种水产品品种快速分类鉴别的方法对具有非常重要的意义。

徐文杰等^[50]基于近红外光谱技术的基础上结合 BP 人工神经网络技术构建了淡水鱼品种鉴别模型,该模型对未知样品的鉴别率为 95.5%,可实现淡水鱼品种的快速鉴别;高婧娴等^[51]采集了 3 种鲍鱼的近红外光谱数据,结合分类回归树(classification and regression tree, CART)算法建立了鲍鱼分类模型,经验证所得模型准确率为 90.00%,测试集准确率为 90.32%。表明该方法能够很好地对鲍鱼种类进行区分,从而满足鲍鱼现场快速分类的需求;王幸幸等^[52]采用近红外光谱法结合聚类分析和主成分分析实现了对马苏大麻哈鱼和粉红大麻哈鱼两个品种的鉴别;ALAMPRESE 等^[53]通过近红外光谱技术结合线性判别分析实现了对大西洋鳕鱼和红鲱鱼的品种鉴别,模型鉴别正确率达到了 100%,为鱼品种的快速鉴别提供了依据。

综上所述,近红外光谱技术结合化学计量法能够实现对水产品种类的快速鉴别,并已经成功应用于干海参、淡水鱼、鲍鱼等水产品的品种鉴别。需要注意的是,针对不同的水产品选择合适的光谱采集方法、光谱预处理方法和化学计量法与模型的建立及分析结果的准确性密切相关。

7 近红外光谱技术在水产品其他方面中的应用

近红外光谱技术可以根据鱼体内各种老化结构预测鱼类年龄。PASSEROTTI 等^[54]创建了红笛鲷幼鱼年龄和耳石重量的预测模型,模型决定系数为 0.91,此研究也首次成功探讨了傅里叶近红外光谱技术在预测红笛鲷幼鱼的年龄和耳石重量方面的应用。微塑料污染对生态系统、经济和潜在的人类健康有很大影响,微粒尺寸越小,检测和表征微粒的分析难度也越大。PIARULLI 等^[55]采集了贻贝样品的近红外光谱结合归一化法处理图像分析,结果表明近红外高光谱成像方法能够直接在过滤器上对水生样品中低至 80 μm 的微粒进行化学识别和表征。

8 结论与展望

近年来,近红外光谱技术与计算机技术、化学计量技术等技术的结合解决了复杂数据处理与数学建模问题,同时在硬件系统配备、光谱信号收集处理方面也在不断完善,作为高效快速的检测分析技术已广泛应用于水产品新鲜度评价、质量评估、货架期预测、品种鉴别、重金属污染等,是水产品品质成分定性和定量分析的有效方法之一。今后可在以下几个方面做深入研究,使近红外光谱技术更好地应用于水产品品质检测。

(1)水产品中水分含量较高,而水在近红外光谱区域的吸收较强,减弱了其他成分的信号,导致样品检测结果出现误差,因此解决外界环境和样品本身因素对近红外光谱技术检测精确度的影响至关重要。

(2)由于水产品组分的不均匀分布,导致检测结果精

确度低,因此需要大量具有代表性的样本数据用于建立近红外光谱模型,不断完善改进检测方法,提高检测结果准确度依旧是研究的重点。

(3)近红外光谱技术检测灵敏度较低,组分含量检出限一般在0.1%,不利于痕量与分散性样品检测,在水产品检测中,对于低浓度有害物质或掺假物质的检测能力较弱。目前对水产品掺假的研究大多是基于已知的掺假物质,事实上,水产品市场中掺假品的种类和含量大部分是不确定的,该技术的实际适用性尚需进一步探究。

(4)结合大数据、人工智能等新兴技术,在保持本身分析性能的基础上向小型化、智能化方向发展,如结合光纤技术发展适用于工业生产的在线近红外光谱检测装置,研究开发基于物联网和云计算技术的近红外光谱分析及建模系统等。

参考文献

- [1] 陈宏靖,李鑫.鲜活水产品氨基酸成分分析及营养评价[J].海峡药学,2020,32(1):76-78.
CHEN HJ, LI X. Amino acid analysis and nutritional evaluation of fresh aquatic products [J]. Strait Pharmaceutical J, 2020, 32(1): 76-78.
- [2] 钱韻芳,林婷.水产品中微生物相互作用机制研究进展[J].生物加工过程,2020,18(2):150-157.
QIAN YF, LIN T. Advances in microbial community interactions in aquatic products [J]. Chin J Bioprocess Eng, 2020, 18(2): 150-157.
- [3] 林洪,杜淑媛.我国水产品出口存在的主要质量问题与对策[J].食品科学技术学报,2013,31(2):7-10.
LIN H, DU SY. Problems and countermeasures of quality safety of aquatic products export in China [J]. J Food Sci Technol, 2013, 31(2): 7-10.
- [4] 李鑫星,郭渭,白雪冰,等.光谱技术在水产品品质检测中的应用研究进展[J].光谱学与光谱分析,2021,41(5):1343-1349.
LI XX, GUO W, BAI XB, et al. Review on the application of spectroscopy technology in aquatic product quality detection [J]. Spectrosc Spect Anal, 2021, 41(5): 1343-1349.
- [5] 谢玉荣,李强,王娇.红外光谱技术在食品检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2019,10(22):7773-7778.
XIE YR, LI Q, WANG J. Application of infrared reflectance spectroscopy on food detection [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(22): 7773-7778.
- [6] 陈超,柳琦,李钊,等.红外光谱技术在食品安全检测中的研究与应用[J].食品研究与开发,2019,40(14):219-224.
CHEN C, LIU Q, LI F, et al. Research and application of infrared spectroscopy technology in food safety testing [J]. Food Res Dev, 2019, 40(14): 219-224.
- [7] HE HJ, WU DS, DA W. 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.
- [8] 张进,胡芸,周罗雄,等.近红外光谱分析中的化学计量学算法研究新进展[J].分析测试学报,2020,39(10):1196-1203.
ZHANG J, HU Y, ZHOU LX, et al. Progress of chemometric algorithms in near-infrared spectroscopic analysis [J]. J Instrum Anal, 2020, 39(10): 1196-1203.
- [9] YU WQ. Applications of near infrared spectroscopy for fish and fish products quality: A review [J]. Environ Earth Sci, 2021, 657(1): 1-8.
- [10] HASSOUN A, PRIETO MA, GARCIA O, et al. Application of novel techniques for monitoring quality changes in meat and fish products during traditional processing processes: Reconciling novelty and tradition [J]. Processes, 2020, 8(8): 988-1008.
- [11] PRAMOD K, PRABHAKAR S, VATSA P, et al. A comprehensive review on freshness of fish and assessment: Analytical methods and recent innovations [J]. Food Res Int, 2020, 133: 1-17.
- [12] WU LL, PU HB, SUN DW. Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: A review of recent developments [J]. Trends Food Sci Technol, 2019, 83: 259-273.
- [13] 沈啸,唐修君,樊艳凤,等.近红外光谱技术在肉类品质评价中的应用[J].食品安全质量检测学报,2019,10(21):7260-7264.
SHEN X, TANG XJ, FAN YF, et al. Application of near infrared spectroscopy in meat quality evaluation [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(21): 7260-7264.
- [14] 王亚会,王锡昌,王帅,等.水产品新鲜及腐败程度的评价指标[J].食品与发酵工业,2015,41(10):240-246.
WANG YH, WANG XC, WANG S, et al. Advances in freshness and corruption of aquatic product [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(10): 240-246.
- [15] JUN HC, QIONG D, DA W, et al. Applications of non-destructive spectroscopic techniques for fish quality and safety evaluation and inspection [J]. Trends Food Sci Technol, 2013, 34(1): 18-31.
- [16] 任瑞娟,柴春祥,鲁晓翔.近红外光谱技术在水产品检测中的应用展望[J].食品工业科技,2013,34(2):361-369.
REN RJ, CHAI CX, LU XX. Prospects of applying near infrared spectroscopy in aquatic products [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(2): 361-369.
- [17] 陈伟华,许长华,樊玉霞,等.近红外光谱技术快速无损评价罗非鱼片新鲜度[J].食品科学,2014,35(24):164-168.
CHEN WH, XU CH, FAN YX, et al. Non-destructive freshness evaluation of tilapia (*Oreochromis*) Fillets using near infrared spectroscopy [J]. Food Sci, 2014, 35(24): 164-168.
- [18] 方瑶,谢天铨,郭渭,等.基于近红外光谱的金鲷鱼新鲜度快速检测技术[J].江苏农业学报,2021,37(1):213-218.
FANG Y, XIE TH, GUO W, et al. Rapid detection technology of pomfret freshness based on near infrared spectroscopy [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2021, 37(1): 213-218.
- [19] 任瑞娟,柴春祥,鲁晓翔,等.近红外光谱技术在南美白对虾鲜度判别中的应用[J].食品与发酵工业,2014,40(3):120-124.
REN RJ, CHAI CX, LU XX, et al. Discrimination freshness of *Penaeus vannamei* boone by near infrared spectroscopy [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(3): 120-124.
- [20] 周娇娇,吴潇扬,陈周,等.近红外光谱技术快速预测团头鲂新鲜度[J].华中农业大学学报,2019,38(4):120-126.
ZHOU JJ, WU XY, CHEN Z, et al. Using near-infrared reflectance spectroscopy to quickly predict the freshness of *Megalobrama amblycephala* [J]. J Huazhong Agric Univ, 2019, 38(4): 120-126.
- [21] PAULINE O, CHANG HT, TSAI L, et al. Intelligent assessment of the histamine level in mackerel (*Scomber australasicus*) using near-infrared spectroscopy coupled with a hybrid variable selection strategy [J]. LWT, 2021, 145: 1236-1251.

- [22] 王灵昭, 王善宇, 简冲, 等. 水产品加工与储藏过程中脂质氧化及其对品质影响的研究进展[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(2): 42–49.
- WANG LZ, WANG SY, JIAN C, *et al.* Research progress on lipid oxidation and its influence on quality during processing and storage of aquatic products [J]. J Jiangsu Ocean Univ (Nat Sci Ed), 2021, 30(2): 42–49.
- [23] MAGNEA K, ARASON S, HORDUR G, *et al.* The application of near infrared spectroscopy to study lipid characteristics and deterioration of frozen lean fish muscles [J]. Food Chem, 2014, 159: 420–427.
- [24] KHALIL K, SOPHIA M, OMELETTE S, *et al.* Chemical and near-infrared determination of moisture, fat and protein in tuna fishes [J]. Food Chem, 2006, 102(3): 669–675.
- [25] UDDIN M, OKAZAKI E, TURZA S, *et al.* Nondestructive determination of water and protein in surimi by near-infrared spectroscopy [J]. Food Chem, 2005, 96(3): 491–495.
- [26] COZZOLINO D, MURRAY I, CHREE A, *et al.* Multivariate determination of free fatty acids and moisture in fish oils by partial least-squares regression and near-infrared spectroscopy [J]. LWT-Food Sci Technol, 2004, 38(8): 821–828.
- [27] 吴浩, 陈伟华, 王锡昌, 等. 近红外光谱技术在鱼糜等级评定中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1239–1242.
- WU H, CHEN WH, WANG XC, *et al.* Applied research in grade estimation of surimi by near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2015, 35(5): 1239–1242.
- [28] 王磊, 殷姣姣, 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.
- [29] LIN MS, CAVINATO AG, MAYES D, *et al.* Bruise detection in Pacific pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) by visible and short-wavelength near-infrared spectroscopy [J]. J Agric Food Chem Technol, 2003, 51(22): 6404–6408.
- [30] 周冰谷, 花振新, 杨荣, 等. 近红外光谱技术在食品微生物检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5393–5398.
- ZHOU BG, HUA ZX, YANG R, *et al.* Application of near-infrared spectroscopy in food microorganism detection [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(16): 5393–5398.
- [31] 王红丽, 王锡昌, 施文正, 等. 水产品贮运过程中货架期预测的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 6(4): 1–13.
- WANG HL, WANG XC, SHI WZ, *et al.* Progress on shelf life prediction for aquatic products during storage and transportation [J]. Food Sci, 2021, 6(4): 1–13.
- [32] JUN HC, DA WS. Rapid and non-invasive detection of fish microbial spoilage by visible and near infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 62(2): 1060–1068.
- [33] TITO NB, RODEMANN T, POWELL S. Use of near infrared spectroscopy to predict microbial numbers on Atlantic salmon [J]. Food Microbiol, 2012, 32(2): 431–436.
- [34] 段翠, 陈春光, 刘永志, 等. 基于手持式近红外光谱仪的三文鱼菌落总数检测技术[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 889–893.
- DUAN C, CHEN CG, LIU YZ, *et al.* Detection of total number of salmon colonies by handheld near infrared spectrometer [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(3): 889–893.
- [35] 杨雅茹, 钟瑶, 李帅东, 等. 水产品中重金属对人体的危害研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020, (10): 55–56.
- YANG YR, ZHONG Y, LI SD, *et al.* Research progress on the harm of heavy metals to human body in aquatic products [J]. Agric Technol Equip, 2020, (10): 55–56.
- [36] RAFAEL F, CELESTINO DR, DINORAZ VM, *et al.* Visible and near-infrared spectroscopy as a technique for screening the inorganic arsenic content in the red crayfish (*Procambarus clarkii* Girard) [J]. Anal Chem, 2004, 76(14): 3893–3898.
- [37] CHEN XJ, WU D, GUAN XC, *et al.* Feasibility of infrared and raman spectroscopies for identification of juvenile black seabream (*Sparus macrocephalus*) intoxicated by heavy metals [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(50): 12429–12435.
- [38] 林冬秀, 刘科, 陈孝敬. 基于近红外光谱的重金属污染泥蚶的快速检测[J]. 中国食品学报, 2015, 15(4): 189–195.
- LIN DX, LIU K, CHEN XJ. Rapid detection of heavy metal-contaminated tegillarca granosa using near infrared spectroscopy [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2015, 15(4): 189–195.
- [39] 王之莹, 李婷婷, 张桂兰, 等. 鱼产品掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 277–288.
- WANG ZY, LI TT, ZHANG GL, *et al.* Recent advances in identification techniques for fish adulteration [J]. Food Sci, 2019, 40(11): 277–288.
- [40] 赵峰, 周德庆, 丛楠, 等. 水产品的真伪鉴别与评价技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 111–117.
- ZHAO F, ZHOU DQ, CONG N, *et al.* Research progress on technology for authenticity identification and evaluation of aquatic products [J]. J Agric Sci Technol, 2015, 17(6): 111–117.
- [41] GRASSI S, CASIRAGHI E, ALAMPRESE C. Handheld NIR device: A non-targeted approach to assess authenticity of fish fillets and patties [J]. Food Chem, 2018, 243: 382–388.
- [42] FINLEY J, LIU Y, BETZ JM, *et al.* FT-NIR characterization with chemometric analyses to differentiate goldenseal from common adulterants [J]. Fitoterapia, 2018, 127: 81–88.
- [43] 杨慧, 陈德经, 夏冬辉, 等. 基于近红外光谱的大鲵肉粉掺伪鉴别及纯度检测[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 331–336.
- YANG H, CHEN DJ, XIA DH, *et al.* Adulteration and purity detection of Chinese giant salamander meat powder based on near infrared spectroscopy [J]. Food Sci, 2019, 40(10): 331–336.
- [44] 石吉勇, 李文亭, 邹小波, 等. 基于近红外光谱特征的三文鱼品质多指标快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(7): 2244–2249.
- SHI JY, LI WT, ZHOU XB, *et al.* Multi-index rapid detection of salmon quality based on near-infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2019, 39(7): 2244–2249.
- [45] 陈怡璇, 焦阳. 冻藏及解冻过程对水产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 306–311.
- CHEN YX, JIAO Y. Effects of frozen preservation and thawing on the quality changes of aquatic products [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(2): 306–311.
- [46] SIVERTSEN AH, KIMIYA T, HEIA K. Automatic freshness assessment of cod (*Gadus morhua*) fillets by vis/nir spectroscopy [J]. J Food Eng, 2010, 103(3): 317–323.

- [47] KIMIVA T, SIVERTSEN AH, HEIA K. VIS/NIR spectroscopy for non-destructive freshness assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets [J]. J Food Eng, 2013, 116(3): 758–764.
- [48] REIS M, SAITUA E, OLABARRIETA I, *et al.* Non-invasive differentiation between fresh and frozen/thawed tuna fillets using near infrared spectroscopy [J]. LWT-Food Sci Technol, 2017, 78: 129–137.
- [49] 闵志勇, 高婧娴, 黄扬明, 等. 近红外光谱法判别鲍鱼品种的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(S1): 201–202.
- MIN ZY, GAO JX, HUANG YM, *et al.* Classification of abalone using near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2016, 36(S1): 201–202.
- [50] 徐文杰, 刘茹, 洪响声, 等. 基于近红外光谱技术的淡水鱼品种快速鉴别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 253–261.
- XU WJ, LIU R, HONG XS, *et al.* Discrimination of freshwater fish varieties based on near-infrared [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2014, 30(1): 253–261.
- [51] 高婧娴, 黄扬明, 雷春丽, 等. 机器学习在近红外光谱法判别鲍鱼品种研究中的应用[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 166–170.
- GAO JX, HUANG YM, LEI CL, *et al.* Discrimination of abalone (sub) species basing on near-infrared specyrospectroscopy and machine learning [J]. J China Agric Univ, 2018, 23(9): 166–170.
- [52] 王幸幸, 徐坤, 史岩, 等. 基于近红外光谱技术的大麻哈鱼品种快速鉴别研究[J]. 食品工业, 2012, 33(6): 132–134.
- WANG XX, XU K, SHI Y, *et al.* Study on rapid discrimination of various salmon based on near-infrared spectroscopy [J]. Food Ind, 2012, 33(6): 132–134.
- [53] ALAMPRESE C, CASIRAGHI E. Application of FT-NIR and FT-IR spectroscopy to fish fillet authentication [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 63(1): 720–725.
- [54] PASSEROTTI MS, JONES CM, MSWANSON CE, *et al.* Fourier-transform near infrared spectroscopy (FT-NIRS) rapidly and non-destructively predicts daily age and growth in otoliths of juvenile red snapper *Lutjanus campechanus* (Poey, 1860) [J]. Fish Res, 2020, 223: 10–18.
- [55] PIARULLI S, SCIUTTO G, OLIVERI P, *et al.* Rapid and direct detection of small microplastics in aquatic samples by a new near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) method [J]. Chemosphere, 2020, 260: 123–128.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



刘爽, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与贮藏。

E-mail: liushuang_514@163.com



柴春祥, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与贮藏。

E-mail: ccxiang@tjcu.edu.cn