

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250409007

引用格式: 严欢, 杨佳欣, 郭一帆. 基于近红外光谱构建虹鳟鱼营养成分快速检测模型[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(13): 47–53.

YAN H, YANG JX, GUO YF. Construction of a rapid detection model for nutrient components of *Oncorhynchus mykiss* based near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(13): 47–53. (in Chinese with English abstract).

基于近红外光谱构建虹鳟鱼营养成分快速检测模型

严欢^{1*}, 杨佳欣¹, 郭一帆²

(1. 新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心, 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆农业大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: **目的** 基于近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIR)技术构建虹鳟鱼营养成分快速检测模型。**方法** 先采集 200 条虹鳟鱼 NIR 数据, 再用国标方法测定每条虹鳟鱼 3 种营养成分(水分、脂肪和蛋白质)的含量, 将 NIR 数据与营养成分数据一一对应, 利用 NIR 结合偏最小二乘法(partial least squares, PLS)建立近红外快速检测模型, 并筛选出最佳检测模型。**结果** 水分含量检测模型的预处理方法为多元散射校正(multiple scatter correction, MSC), 波段为 4000~10000 cm^{-1} 时, 模型最优; 脂肪含量检测模型预处理方法为标准正态变量变换(standard normal variable transformation, SNV), 波段为 5000~7144 cm^{-1} , 7404~10000 cm^{-1} 时模型最优; 蛋白质含量检测模型的预处理方法为二阶导数(ds2)+SNV+Savitzky-Golay 平滑(sg9), 波段为 4100~5100 cm^{-1} , 5400~9000 cm^{-1} 时模型最优, 最优模型的 Q 值、校正模型相关系数、交互验证集相关系数均较大, 校正集标准差和预测集标准误差互相接近, 满足最佳建模原则。**结论** 使用未参与建模的预测集对最佳模型进行验证, 得出结果为预测值与真实值(国标方法测定值)的绝对偏差均不超过 5.7%, 说明该模型可用于虹鳟鱼 3 种营养成分的检测, 可实现虹鳟鱼营养成分的无损、快速检测, 节约检测成本, 缩短检测周期。

关键词: 近红外光谱技术; 虹鳟鱼; 营养成分; 快速检测

Construction of a rapid detection model for nutrient components of *Oncorhynchus mykiss* based near-infrared spectroscopy

YAN Huan^{1*}, YANG Jia-Xin¹, GUO Yi-Fan²

(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Resources Sharing Service Centre, Xinjiang Key Laboratory of Featured Functional Food Nutrition and Safety Testing, Urumqi 830011, China;
2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

ABSTRACT: Objective To establish a rapid detection model for the nutritional components of *Oncorhynchus*

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 青年拔尖人才项目(2023TSYCCX066); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B02006-3); 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目(KY2024159)

第一作者/*通信作者: 严欢(1981—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为天然产物活性和营养与食品卫生学研究。E-mail: 19835500@qq.com

mykiss based on near-infrared spectroscopy (NIR). **Methods** Firstly, near-infrared spectral data of 200 *Oncorhynchus mykiss* were collected. Then, the content of 3 kinds of nutritional components (moisture, fat and protein) of each *Oncorhynchus mykiss* were determined by national standard methods. The near-infrared spectral data and nutritional component data were matched one by one. The near-infrared rapid detection model was established by combining NIR with partial least squares (PLS), and the best detection model was screened out. **Results** The pretreatment method of the moisture content detection model was multiple scattering correction (MSC), and the optimal model was obtained when the wavelength range was 4000–10000 cm^{-1} . The pretreatment method of the fat content detection model was standard normal variable (SNV), and the optimal model was obtained when the wavelength range was 5000–7144 cm^{-1} and 7404–10000 cm^{-1} . The pretreatment method of the protein detection model was second derivative (ds2)+SNV+Savitzky-Golay smoothing (sg9), and the optimal model was obtained when the wavelength range was 4100–5100 cm^{-1} and 5400–9000 cm^{-1} . The Q value, the correlation coefficient of the correlation coefficients, and the correlation coefficient of prediction of the optimal model were all relatively large, and the standard deviation of square error corrected and standard error of cross validation were close to each other, which met the best modeling principle. **Conclusion** The best model is verified by the prediction set that do not participate in the modeling. The absolute deviation between the predicted value and the true value (determined by the national standard method) is no more than 5.7%. This indicates that the model can be used for the detection of three nutritional components of *Oncorhynchus mykiss*, and can achieve non-destructive and rapid detection of the nutritional components of *Oncorhynchus mykiss*, saving detection costs and shortening the detection cycle.

KEY WORDS: near-infrared spectroscopy; *Oncorhynchus mykiss*; nutritional components; rapid detection

0 引言

虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)属于太平洋鲑冷水性鱼类,因其鱼体两侧有紫红色的彩带故名虹鳟^[1],其肉质鲜美、营养价值丰富且与三文鱼相似,因此被称为“淡水三文鱼”^[2]。其原产自北美洲和太平洋,上世纪中叶传入中国,经过几十年的繁育,现已成为我国主要淡水养殖鱼类^[3–7]。虹鳟鱼还是联合国粮农组织向世界推广的品质优良的 4 大淡水鱼种之一^[8–10],其肉质鲜美,无小骨刺,蛋白含量较高,且含有丰富的氨基酸、矿物质、维生素、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)和二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)等^[11–17],现已成为人们生活中补充蛋白质不可或缺的一种食品。

近几年,对于虹鳟鱼的研究多集中在生物信息学、遗传育种、保鲜贮藏和品质评价等领域^[18–22]。目前,虹鳟鱼的品质评价方法多采用传统方法检测其营养成分,存在实验过程烦琐、周期较长等劣势^[23–26]。因此,研究快速、准确且操作简单的虹鳟鱼营养成分测定方法是十分有必要的。随着交叉学科的兴起,近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIR)定量分析技术已广泛应用于食品领域^[27–29]。王若楠等^[30]采用 NIR 技术,建立了谷子淀粉多样性预测模型;赵培栋等^[31]采用 NIR 分析仪 WINISI 软件系统,构建出的油菜未成熟种子含水量近红外模型得出的预测值与真实值拟合度高,预测性较好;潘发明等^[32]利用 NIR 技术结合数学和化学计

量学构建出全株玉米青贮营养成分含量近红外预测模型;LIU 等^[33]采用 NIR 结合化学计量学,建立了大米中淀粉、蛋白质等营养成分的快速无损检测模型。

本研究以 200 批次虹鳟鱼为样品,利用 NIR 技术结合偏最小二乘法(partial least squares, PLS),建立虹鳟鱼中水分、脂肪、蛋白质 3 种营养成分的快速检测模型,并通过改变建模条件筛选最佳模型,为实现高效、无损测定虹鳟鱼营养成分提供了理论基础和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

虹鳟鱼样品:由新疆天蕴有机农业有限公司养殖,新疆贵鲜食科技有限公司负责加工,共 200 批次样品。

石油醚、无水乙醇(分析纯,天津市鑫铂特化工有限公司);硫酸、盐酸(分析纯,成都市科隆化学品有限公司)。

1.2 仪器与设备

NIR Master 近红外光谱仪(配有温控 InGaAs 检测器、钨卤灯及 NIRCal 5.6.6000 数据处理软件,步琦实验室设备贸易有限公司);8420 全自动凯氏定氮仪(丹麦福斯公司);AL204-IC 电子天平(万分位,瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司);B811 全自动索氏提取仪(瑞士步琦有限公司);101-3EBS 电热鼓风干燥箱(中国永光明医疗仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品采集及制样

虹鳟鱼由企业工作人员去皮、剔骨, 切去头尾, 只留鱼中段, 真空包装, 冷链运输至实验室。打开真空包装后, 为保证实验结果的准确性, 先用纸巾擦干鱼肉表面水分等杂质, 避免对实验结果造成影响。

虹鳟鱼肉经 NIR 采集后, 切成 3×3 cm 小方块, 放入洗净、擦干的辅食机中粉碎成质地均匀的鱼糜, 放入自封袋中待测。

1.3.2 虹鳟鱼中 3 种营养成分测定

精密称取制备好的虹鳟鱼样品, 按照国标方法分别测定 3 种营养成分的含量。蛋白质参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法 凯氏定氮法; 脂肪参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法 索氏抽提法; 水分参照 GB/T 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法 直接干燥法。

1.3.3 样品集的划分

根据虹鳟鱼样品 3 种品质含量测定数据分布情况, 按照各参数含量测定值均匀分布原则, 将 200 批次样品分成校正集和验证集, 其中校正集样品与验证集样品共 150 份, 二者之比为 2:1, 预测集样品为 50 份。校正集和验证集样品用于定量预测模型的建立, 预测集不参与模型建立, 只用于外部验证定量预测模型的实用性和稳健性。

1.3.4 近红外光谱采集

为保证仪器的稳定性, 开机后预热 40 min, 将虹鳟鱼样品置于 NIR 仪采集系统样品盘里, 以仪器内置背景(白板)为参比, 采集 4000~10000 cm⁻¹ 波长范围内的样品 NIR。分辨率为 8 cm⁻¹。扫描过程中实验室温度保持在室温。为避免样品放置引起的误差, 每个样品重复扫描 4 次, 求出 4 次扫描光谱的平均光谱为该样品最终光谱数据, 供建模使用。

1.3.5 定量预测模型的建立及评价

实验采用 NIR 仪自带的 NIRCal 5.6.6000 软件, 首先将每个虹鳟鱼样品的平均光谱数据与每个样品的 3 种营养成分测定值一一对应, 采用系统自带的数据处理软件进行自动建模, 系统自动对选中的光谱进行标准化处理和微分计算, 从而建立最佳的定量预测模型。分别建立虹鳟鱼 3 种营养成分(蛋白质、脂肪、水分)含量的同时定量预测的最佳定量预测模型集, 该模型可以用于虹鳟鱼中 3 种营养成分的同时定量预测分析。定量预测模型的优劣由 *Q* 值模型评价参数进行综合评价。一般认为, 当所建模型的 *Q* 值越高, 说明所建立校正模型的预测性能和稳健性越好, 精度越高。

1.3.6 定量预测最佳模型的外部验证

将虹鳟鱼 3 种营养成分含量已知的预测样品集(未参与

建模)NIR 扫描数据带入到已建立的虹鳟鱼最佳定量预测模型集中, 同时对预测集样品的 3 种成分含量进行快速定量预测, 根据预测集样品 3 种品质含量测定值与定量预测模型预测值的偏差判断模型的稳健性和适应性。

1.4 数据处理

实验数据均平行测定 3 次, 以平均值为最终结果, 通过 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行整理与统计; 使用 NIRCal5.6.6000 软件进行近红外建模及相关性作图。

2 结果与分析

2.1 虹鳟鱼 3 种品质含量的测定结果

虹鳟鱼建模样品集由校正样品集和验证样品集组成。化学值测定值的统计结果见表 1。由表 1 可知, 虹鳟鱼水分含量在 62.27~84.97 g/100 g, 平均值 68.90 g/100 g; 脂肪含量在 1.07~15.76 g/100 g, 平均值为 5.32 g/100 g; 蛋白质含量在 19.58~24.14 g/100 g, 平均值 21.32 g/100 g。实验样本具有普适性, 满足虹鳟鱼中 3 种营养成分含量快速检测近红外模型的建立条件要求。

表 1 参与建模的虹鳟鱼营养成分含量测定值统计结果(g/100 g)
Table 1 Statistical results of nutrient content determination of *Oncorhynchus mykiss* involved in modeling (g/100 g)

序号	营养成分	样品数量	最小值	最大值	平均值	方差	极差
1	水分	150	62.27	84.97	68.90	29.85	22.70
2	脂肪	150	1.07	15.76	5.32	6.76	14.69
3	蛋白质	150	19.58	24.14	21.32	2.14	4.56

2.2 虹鳟鱼近红外光谱

用 NIR Master NIR 仪对 200 批次虹鳟鱼样品进行扫描。200 批次虹鳟鱼样品在 4000~10000 cm⁻¹ 波长范围内扫描获得的平均光谱原始图见图 1。图 1 中纵坐标为 NIR 吸光度值(A), 横坐标为波长(cm⁻¹)。

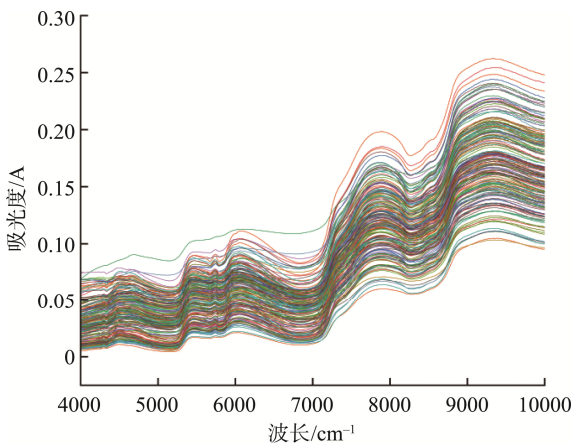


图 1 虹鳟鱼原始 NIR 图

Fig.1 Original NIR of *Oncorhynchus mykiss*

由图 1 可知, 200 批次虹鳟鱼样品在 4000~10000 cm^{-1} 范围内近红外光谱吸收峰峰位基本相同, 但每个样品的吸光度值大小有所不同, 由此说明, 虽然 200 批次样品所含化学成份基本相同, 但是每个样品中化学成分所含有含量有所差异。由图 1 可知, 虹鳟鱼样品分别在 4400~4600, 5800~6200, 7600~8200 cm^{-1} 等多处出现明显的 NIR 吸收峰, 这些特征吸收峰为虹鳟鱼营养成分的快速定量分析数学模型的建立提供了最有利的光谱信息。利用这些特征吸收光谱信息结合多种建模方法, 将光谱特征吸收信息与虹鳟鱼样品中 3 种营养成分含量之间建立一对应函数关系, 从而建立 3 种品质含量同时定量预测的近红外预测模型。

2.3 虹鳟鱼定量预测模型的建立及优化

2.3.1 建模样品集的划分

根据 200 批次虹鳟鱼样品 3 种营养成分国家标准方法含量测定结果, 按照每种品质含量均匀分布的原则, 将 200 批次样品分成校正集、验证集和预测集 3 组, 其中校正集数量大约占全部样品的 50%, 内部交叉验证集和预测集样品数量均占样品总数的 25%。校正集和验证集用于建立虹鳟鱼 3 种营养成分含量定量预测模型的建立, 预测集用来检验定量预测模型的外部验证。建模集样品中 3 种营养成分含量的分布结果见表 2。

表 2 建模样品集各营养成分化学测定值统计结果(g/100 g)
Table 2 Statistical results of chemical determination values of each nutrient component in modeling sample set (g/100 g)

品质名称	样品集	最小值	最大值	平均值	标准偏差	极差
水分	校正集	65.62	76.29	68.86	1.90	10.67
	验证集	65.77	72.74	68.93	1.72	6.97
脂肪	校正集	1.07	15.76	5.23	2.67	14.69
	验证集	1.89	13.34	5.52	2.51	11.45
蛋白质	校正集	19.58	24.14	21.28	0.95	4.56
	验证集	19.84	24.08	21.31	0.93	4.24

由表 2 可知, 校正集的水分含量在 65.62~76.29 g/100 g, 平均值 68.86 g/100 g; 脂肪含量在 1.07~15.76 g/100 g, 平均值 5.23 g/100 g; 蛋白质含量在 19.58~24.14 g/100 g, 平均值为 21.28 g/100 g; 验证集水分含量在 65.77~72.74 g/100 g, 平均值 68.93 g/100 g; 脂肪含量在 1.89~13.34 g/100 g, 平均值 5.52 g/100 g; 蛋白质含量在 19.84~24.08 g/100 g, 平均值为 21.31 g/100 g; 建模样品集的 3 种营养成分含量值基本覆盖了虹鳟鱼 3 种营养成分含量的分布范围, 具有较好的代表性。

2.3.2 光谱预处理方法及建模波长对预测模型的影响

在 NIRcal 里导入采集的虹鳟鱼样品光谱, 采用仪器自带的数据处理软件进行自动建模, 建立相应的数学模型。根据数据处理软件提供的综合评价指标 Q 值来筛选最优模型, 数据分析处理结果见表 3。

表 3 虹鳟鱼中 3 种营养成分的最佳定量预测模型参数
Table 3 Statistical results of parameter values of the optimal quantitative prediction model for 3 kinds of nutrients in *Oncorhynchus mykiss*

营养成分	预处理方法	建模波段/ cm^{-1}	Q 值	SEC	SEP	RC	RP
水分	MSC	4000~10000	0.5836	1.0974	1.0880	0.8164	0.7792
脂肪	SNV	5000~7144, 7404~10000	0.4497	2.1183	2.1060	0.6072	0.5562
蛋白质	ds2, SNV, sg9	4100~5100, 5400~9000	0.5071	0.7086	0.7370	0.6665	0.6167

由表 3 数据可知, 选用 5 种预处理方法对虹鳟鱼 NIR 进行预处理, 得出 3 种营养成分的最佳建模条件如下: 水分含量预测模型的最佳光谱预处理方法为 4000~10000 cm^{-1} 光谱范围内进行 MSC 处理, 此时水分含量预测模型的 Q 值、RC、RP 分别为 0.5836、0.8164、0.7792, 校正集标准差(SEC)、验证标准差(SEP)分别为 1.0974、1.0880; 脂肪含量预测模型的最佳光谱预处理方法为 5000~7144 cm^{-1} , 7404~10000 cm^{-1} 光谱范围内进行 SNV 处理, 此时脂肪含量模型的 Q 值、RC、RP 分别为 0.4497、0.6072、0.5562, SEC、SEP 分别为 2.1183、2.1060; 蛋白质含量预测模型的最佳光谱预处理方法为 4100~5100 cm^{-1} , 5400~9000 cm^{-1} 光谱范围内进行 ds2, SNV, sa9 处理, 此时蛋白质含量预测模型的 Q 值、RC、RP 分别为 0.5071、0.6665、0.6167, SEC、SEP 分别为 0.7086、0.7370。以上预处理后的预测模型的 Q 值更接近于 1, 说明建立的模型聚类效果越好, 分离度高, 且

SEC、SEP 最为接近, 符合最佳模型要求。所建最佳模型的预测效果见图 2~图 4, 最佳模型评价参数统计结果见表 4。

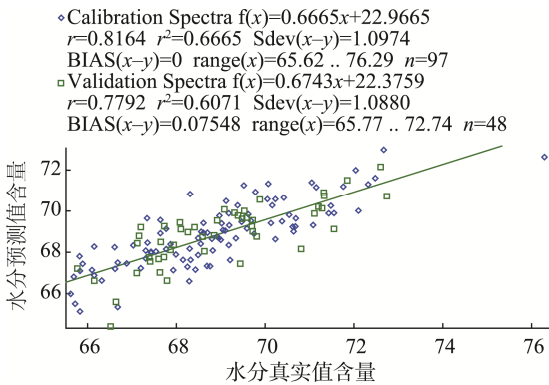


图 2 虹鳟鱼水分测定值与预测值相关图
Fig.2 Correlation diagram of measured and predicted moisture content of *Oncorhynchus mykiss*

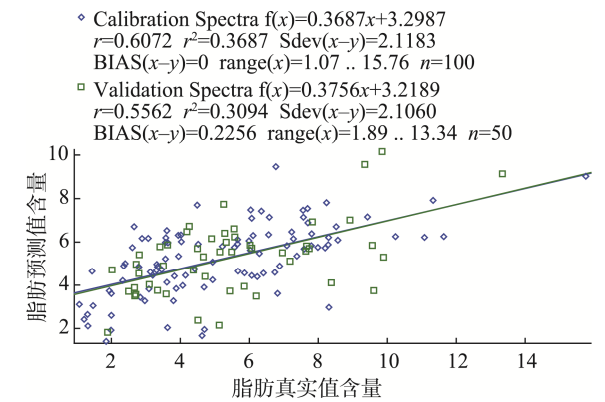


图 3 虹鳉鱼脂肪测定值与预测值相关图
Fig.3 Correlation diagram of measured and predicted fat content of *Oncorhynchus mykiss*

由图 2~4 和表 4 的数据可知, 所建立的虹鳉鱼 3 种营养成分含量同时快速定量测模型的评价参数满足最优模型的评价条件: 模型的 Q 值、RC、RP 均较高, 而且模型预测误差均在虹鳉鱼 3 种营养成分定量分析允许误差的范围之内, 该模型可以用于未知虹鳉鱼样品水分、蛋白质、脂肪含量的同时定量分析。

2.3.3 最佳模型的外部验证与评价

为验证虹鳉鱼中 3 种营养成分含量同时定量预测最佳模型的实际使用效果, 利用 3 种营养成分含量已知的但未参与建模的 50 份预测集样品的 NIR 带入到已建好的虹鳉鱼最佳定量预测模型中对模型的预测性能和可靠性进行检验, 预测集样品中各成分含量的定量预测结果见表 5。

由表 5 可知, 虹鳉鱼 3 种营养成分含量的真值(用国家标准方法测定值)与模型预测值之间的最大偏差均不超过 5.7%, 说明该模型可用于虹鳉鱼 3 种营养成分无损快速检测。

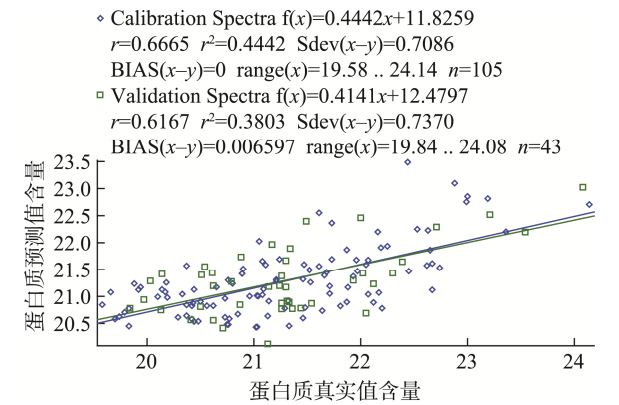


图 4 虹鳉鱼蛋白质测定值与预测值相关图
Fig.4 Correlation diagram of measured and predicted protien content of *Oncorhynchus mykiss*

表 4 最佳定量预测模型统计表
Table 4 Statistical table of the best quantitative forecasting models

序号	性质名称	Q 值	SEC	SEP	RC	RP
1	水分	0.5836	1.0974	1.0880	0.8164	0.7792
2	脂肪	0.4497	2.1183	2.1060	0.6072	0.5562
3	蛋白质	0.5071	0.7086	0.7370	0.6665	0.6167

表 5 虹鳉鱼预测集样品 3 种营养成分预测结果(g/100 g)
Table 5 Prediction results of 3 kinds of nutritional components of *Oncorhynchus mykiss* (g/100 g)

编号	水分			脂肪			蛋白质		
	真值	预测值	偏差	真值	预测值	偏差	真值	预测值	偏差
1	71.53	69.15	2.38	2.43	3.76	-1.33	21.41	21.52	-0.11
2	72.19	68.88	3.31	1.18	3.72	-2.54	22.47	21.71	0.76
3	72.01	66.31	5.70	5.52	7.46	-1.94	23.11	21.13	1.98
4	67.07	67.17	-0.10	8.22	6.70	1.52	21.10	21.77	-0.67
5	65.29	67.53	-2.24	7.91	6.68	1.23	21.26	20.96	0.30
6	71.99	69.00	2.99	5.03	3.86	1.17	22.41	21.85	0.56
7	69.63	67.75	1.88	5.48	5.55	-0.07	21.64	21.88	-0.24
8	70.45	65.02	5.43	5.43	7.82	-2.39	22.93	22.11	0.82
9	71.54	69.11	2.43	1.70	3.93	-2.23	22.58	21.35	1.23
10	71.93	69.36	2.57	8.07	4.39	3.68	22.25	21.23	1.02
11	68.46	69.89	-1.43	6.26	4.41	1.85	22.71	21.85	0.86
12	69.08	70.09	-1.01	2.20	5.00	-2.8	24.02	21.73	2.29
13	72.01	70.29	1.72	5.55	3.73	1.82	23.73	22.30	1.43
14	71.58	69.27	2.31	5.73	4.14	1.59	23.24	22.34	0.90
15	69.21	70.82	-1.61	3.52	4.04	-0.52	21.52	22.73	-1.21
16	70.38	71.31	-0.93	6.65	2.79	3.86	21.92	21.96	-0.04
17	69.82	68.97	0.85	2.40	4.73	-2.33	22.93	21.68	1.25
18	74.23	69.96	4.27	3.36	2.39	0.97	20.40	22.29	-1.89
19	70.77	68.53	2.24	2.03	5.93	-3.90	22.68	21.21	1.47
20	71.50	70.08	1.42	6.03	3.45	2.58	24.22	21.30	2.92
21	68.25	68.52	-0.27	3.05	5.05	-2.00	21.70	21.34	0.36

表 6(续)

编号	水分			脂肪			蛋白质		
	真值	预测值	偏差	真值	预测值	偏差	真值	预测值	偏差
22	67.52	68.54	-1.02	4.82	5.32	-0.50	22.36	21.32	1.04
23	67.37	68.15	-0.78	4.96	5.66	-0.70	21.95	20.83	1.12
24	70.97	70.31	0.66	5.90	4.63	1.27	22.79	21.96	0.83
25	71.71	0.27	1.44	5.37	4.17	1.20	23.31	21.57	1.74
26	68.71	67.97	0.74	6.79	6.83	-0.04	22.77	21.25	1.52
27	71.55	69.97	1.58	5.83	4.06	1.77	22.68	21.30	1.38
28	71.67	69.85	1.82	5.68	5.77	-0.09	21.79	21.58	0.21
29	72.55	70.46	2.09	6.86	4.52	2.34	23.35	21.18	2.17
30	70.78	70.91	-0.13	6.43	3.73	2.70	22.69	21.31	1.38
31	71.02	69.81	1.21	6.68	4.23	2.45	20.91	21.47	-0.56
32	60.30	71.10	-10.80	5.37	2.16	3.21	21.19	23.04	-1.85
33	73.51	70.76	2.75	6.44	2.25	4.19	20.99	23.48	-2.49
34	70.11	69.28	0.83	3.52	4.27	-0.75	21.23	21.89	-0.66
35	70.16	69.31	0.85	2.57	4.75	-2.18	22.48	20.71	1.77
36	69.51	69.59	-0.08	6.62	5.43	1.19	22.35	21.40	0.95
37	68.25	68.45	-0.20	4.52	5.32	-0.80	21.02	21.15	-0.13
38	68.66	67.49	1.17	3.11	6.98	-3.87	21.21	21.33	-0.12
39	70.18	67.08	3.10	5.28	6.75	-1.47	20.66	20.77	-0.11
40	68.97	65.24	3.73	4.81	7.87	-3.06	21.29	21.88	-0.59
41	70.80	68.94	1.86	7.31	6.28	1.03	21.40	21.26	0.14
42	70.24	70.93	-0.69	6.69	3.35	3.34	22.29	21.93	0.36
43	69.00	66.72	2.28	7.51	6.47	1.04	21.41	22.25	-0.84
44	71.09	69.29	1.80	5.16	3.96	1.20	20.27	22.33	-2.06
45	70.87	69.45	1.42	6.83	4.89	1.94	22.56	21.46	1.10
46	70.83	70.15	0.68	2.90	4.02	-1.12	21.98	21.25	0.73
47	70.83	70.97	-0.14	2.09	3.51	-1.42	22.59	21.47	1.12
48	70.85	71.61	-0.76	5.41	2.44	2.97	22.85	22.09	0.76
49	72.42	71.68	0.74	2.64	2.24	0.40	21.24	22.05	-0.81
50	68.88	67.38	1.50	4.81	7.33	-2.52	21.65	21.57	0.08

3 讨论与结论

本研究以虹鳟鱼样品为研究对象，利用 NIR 技术实现了虹鳟鱼 3 种营养成分快速、无损定量检测。结合 PLS 分析，以所建模型的 Q 值、RC 和 RP 越大，SEC 和 SEP 越接近为评价标准，筛选出每个成分最适宜的建模波段、预处理方法，建立每个成分的最佳定量模型，成功预测虹鳟鱼水分、脂肪、蛋白质 3 种营养成分的含量。该模型普适性较好，可用于所有虹鳟鱼水分、脂肪、蛋白质含量测定，且该方法克服了传统检测方法步骤烦琐、实验周期长、实时性差等缺陷，具有无损、易操作、成本低、效率高等优势，提升检测效率的同时降低了检测难度和成本。虹鳟鱼营养成分近红外快速检测模型的建立，为 NIR 技术在食品检测领域的应用提供了理论基础，本课题组计划以后将该检测方法向企业推广，让科研成果服务企业，降低企业检测成本，缩短检测周期，实现动态调整养殖方案，提高产品品质的同时提升国民饮食质量。

参考文献

[1] 陈晓楠. 海鲢鱼低温贮藏过程中肌肉品质特性变化及其发生规律[D].

舟山: 浙江海洋大学, 2022.
CHEN XN. Changes and regularity of muscle quality characteristics of sea eel during cryogenic storage [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
[2] KAJBAF K, OVERTURF K, CLEVELAND B, *et al.* Regulation of the ω -3 fatty acid biosynthetic pathway and fatty acids bioconversion capacity in selected rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using alternative dietary oils [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2025, 320: 116219.
[3] LIU X, HUANG L, LI Y, *et al.* Effects of light intensity on the behavioural response and physiological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquacultural Engineering*, 2025, 109: 102510–102510.
[4] 普畅畅, 张春暖, 齐茜, 等. 虹鳟高效养殖技术概述[J]. *河南水产*, 2024(6): 1–3, 6.
PU CC, ZHANG CY, QI Q, *et al.* Overview of efficient breeding technology of rainbow trout [J]. *Henan Aquatic Products*, 2024(6): 1–3, 6.
[5] 熊俊杰, 李金林, 钟比真, 等. 草鱼低温保鲜技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(5): 466–474.
XIONG JJ, LI JL, ZHONG BZ, *et al.* Research progress of low temperature preservation technology of aquatic grass carp in Henan Province [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(5): 466–474.
[6] SUN J, HAN Y, LI J, *et al.* Comprehensive analysis of lncRNA and mRNA expression in triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) liver in response to chronic hypoxia [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part D, Genomics & Proteomics*, 2025, 54101442. DOI: 10.1016/j.cbd.2025.101442

- [7] 吴永俊. 虹鳟鱼肉风味影响因素研究及鱼骨新产品开发[D]. 喀什: 喀什大学, 2020.
WU YJ. Research on influencing factors of rainbow trout fish flavor and development of new fish bone products [D]. Kashgar: Kashgar University, 2020.
- [8] GHADERZADEH M, MIANJI RG, JAVAREMO NA, *et al.* Transcriptomic and biometric parameters analysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) challenged with viral hemorrhagic septicemia virus (VHSV) [J]. BMC Genomics, 2025, 26(1): 204.
- [9] VILLASANTE A, FIGUEROA E, GODOY K, *et al.* Impact of plant-based diets on hepatosomatic index, circulating globulins and growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Fishes, 2025, 10(3): 110.
- [10] MORENO MC, ABAD QS, CORNS TW, *et al.* Assessment of dietary selenium and its role in mercury fate in cultured fish rainbow trout with two sustainable aquafeeds [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138865.
- [11] NAGHDI S, REZAEI M, TABARSA M, *et al.* Structure, functionality and bioactivity of sulfated polysaccharide extracted from rainbow trout byproducts: pH-shift method vs enzymatic hydrolysis [J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143665.
- [12] AVILA WB, FETHERMAN RE, WINKELMAN LD, *et al.* Genetics of wild, whirling disease resistant rainbow trout populations in Colorado [J]. Freshwater Science, 2025, 3: 1500903.
- [13] CAPPUCINELLI R, FIOREDELMONDO E, MAGI EG, *et al.* Fish protein hydrolysates from rainbow trout processing in replacement of feed protein sources: Effects on growth performances, liver status and body composition of gilthead sea bream, *Sparus aurata* L., juveniles [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2025, 56(1): e13100.
- [14] KOTSONI E, DAUKŠAS E, AAS HG, *et al.* Antioxidant activity and DPP-IV inhibitory effect of fish protein hydrolysates obtained from high-pressure pretreated mixture of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and atlantic salmon (*Salmo salar*) rest raw material [J]. Marine Drugs, 2024, 22(12): 568–568.
- [15] MORENO MC, ABAD QS, CORNS TW, *et al.* Assessment of dietary selenium and its role in mercury fate in cultured fish rainbow trout with two sustainable aquafeeds [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138865–138865.
- [16] XIAOYU H, JOHANN D, SA L, *et al.* Influence of dietary phosphorus on orthophosphate accumulation in recirculating aquaculture systems with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquacultural Engineering, 2023, 103. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2023.102363
- [17] 范蕊, 魏思佳, 杨佳欣, 等. 2 种虹鳟致病菌检测方法的比较[J]. 水产养殖, 2024, 45(12): 27–31.
FAN R, WEI SJ, YANG JX, *et al.* Comparison of two detection methods of pathogenic bacteria in rainbow trout [J]. Aquaculture, 2024, 45(12): 27–31.
- [18] 李杰, 张涛. 虹鳟鱼传染性造血器官坏死病毒蛋白生物信息学分析[J]. 甘肃畜牧兽医, 2024, 54(4): 132–136.
LI J, ZHANG T. Bioinformatics analysis of infectious hematopoietic necrosis virus protein in rainbow trout [J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary Science, 2024, 54(4): 132–136.
- [19] 刘小锋, 武国兆. 虹鳟鱼品种选育中的遗传育种与分子标记技术应用[J]. 河南水产, 2024(3): 1–3.
LIU XF, WU GZ. Genetic breeding and application of molecular marker technology in rainbow trout breeding [J]. Henan Fisheries, 2024(3): 1–3.
- [20] 苏礼君, 赵文竹, 霍仕彤, 等. 虹鳟鱼鲜味肽的虚拟筛选、分子对接与鉴定[C]. 西安: 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集, 2020.
SU LJ, ZHAO WZ, HUO ST, *et al.* Virtual screening, molecular docking and identification of rainbow trout umami peptides [C]. Xi'an: Chinese Society of Food Science and Technology 17th Annual Meeting Abstract Collection, 2020.
- [21] 苏正明. 水库底层水养殖虹鳟鱼的五大要素[J]. 当代水产, 2024, 49(6): 73–76.
SU ZM. Five factors for breeding rainbow trout in reservoir bottom water [J]. Contemporary Aquatic Products, 2024, 49(6): 73–76.
- [22] 秦延斌, 阿依乔丽帕尼·阿地里, 刘宝林. 冰温贮藏结合生物保鲜剂对虹鳟鱼肉品质特性影响的研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(3): 160–166.
QIN YB, AYIQAOLIPANI ADL, LIU BL. Effect of ice temperature storage combined with biological fresh-keeping agent on fish quality characteristics of rainbow trout [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(3): 160–166.
- [23] 陈俊杰, 陈季旺, 谭玲, 等. 富硒虹鳟鱼冷藏过程中食用和营养品质的变化[J]. 武汉轻工大学学报, 2021, 40(3): 1–9.
CHEN JJ, CHEN JW, TAN L, *et al.* Changes of dietary and nutritional quality of selenium-enriched rainbow trout during cold storage [J]. Journal of Wuhan University of Light Industry, 2021, 40(3): 1–9.
- [24] 高沛, 葛鹏飞, 姜启兴, 等. 虹鳟鱼各组织营养成分分析及评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5578–5585.
GAO P, GE PF, JIANG QX, *et al.* Analysis and evaluation of nutrients in rainbow trout [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(17): 5578–5585.
- [25] 孟玉琼. 鲑鳟鱼品质评价体系的建立[D]. 西宁: 青海大学, 2021.
MENG YQ. Establishment of quality evaluation system for salmon and trout [D]. Xining: Qinghai University, 2021.
- [26] 赵林同, 张倩, 白建军, 等. 不同鱼龄虹鳟肌肉中微量元素及重金属测定[J]. 现代食品, 2020(18): 173–175, 180.
ZHAO LT, ZHANG Q, BAI JJ, *et al.* Determination of trace elements and heavy metals in muscle of rainbow trout of different ages [J]. Modern Food, 2020(18): 173–175, 180.
- [27] BHOYAR SS, CHAUDHARI UA, DESAI AM, *et al.* Wheat bran as an efficient agro-process waste for enhanced yellow laccase production by *Lentinus tigrinus* SSB_W2 and its application in anthraquinone dye degradation [J]. 3 Biotech, 2024, 14(1): 33.
- [28] YABUTA T, RONDÓN OE. The value of near-infrared spectroscopy: using nutritional information of soybean meals by country of origin in feed formulation [J]. Journal of Applied Poultry Research, 2024, 33(3): 100443.
- [29] NASCIMENTO FLA, MEDEIROS-DJ GA, NEVES OCA, *et al.* Near-infrared spectroscopy and multivariate analysis as effective, fast, and cost-effective methods to discriminate *Candida auris* from *Candida haemulonii* [J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 121: 412288–1412288.
- [30] 王若楠, 张颖星, 于筱茜, 等. 基于近红外快速检测技术的谷子淀粉多样性分析及模型构建[J]. 作物学报, 2024(4): 1–13.
WANG RN, ZHANG YX, YU XH, *et al.* Analysis and model construction of millet starch diversity based on near infrared rapid detection technology [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025(4): 1–13.
- [31] 赵培栋, 舒添, 刘沛, 等. 油菜未成熟种子含水量近红外快速测定方法[J]. 作物研究, 2025(1): 81–87.
ZHAO PD, SHU T, LIU P, *et al.* Rapid determination of water content in immature seeds of rapeseed by near infrared method [J]. Crop Research, 2025(1): 81–87.
- [32] 潘发明, 郭涛, 李飞, 等. 全株玉米青贮营养成分含量近红外光谱预测模型的建立[J]. 中国草食动物科学, 2025(4): 1–11.
PAN FM, GUO T, LI F, *et al.* Establishment of near infrared spectrum prediction model for nutrient content of whole maize silage [J]. Chinese herbivore science, 2025(4): 1–11.
- [33] LIU JM, LUO X, ZHANG DJ, *et al.* Rapid determination of rice protein content using near-infrared spectroscopy coupled with feature wavelength selection [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 135: 104969.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)