

Qin L, Niu B, Lü J Z, *et al.* Traceability of *Carassius auratus* origin based on fatty acid profiling and chemometrics [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(2): 022604. [秦雷, 钮冰, 吕继洲, 等. 基于脂肪酸谱与化学计量学的鲫产地溯源技术研究 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(2): 022604.]

基于脂肪酸谱与化学计量学的鲫产地溯源技术研究

秦 雷^{1*} 钮 冰^{1*} 吕继洲^{2#} 陈 沁^{1#}

(1. 上海大学生命科学学院, 上海 200444; 2. 中国质量检验检疫科学研究院, 北京 100176)

摘要: 水产品地理溯源技术是支撑长江“十年禁渔”政策实施的重要手段。为提升监管部门的执法能力, 本研究以鲫(*Carassius auratus*)为对象, 基于其肌肉组织脂肪酸谱的地域差异, 结合主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)和线性判别分析(LDA)等化学计量学方法, 构建产地溯源判别模型。结果表明, 长江与非长江鲫的产地判别模型总判别准确率达96.4%, 交叉验证准确率为94.0%; 针对长江不同江段构建的区域判别模型准确率更高, 总判别率达100%, 交叉验证准确率为96.7%。研究结果表明, 脂肪酸谱结合多元统计分析可作为鲫产地识别的有效技术路径, 具备良好的实用性与推广潜力, 有望为“十年禁渔”政策实施、水产品市场监管及长江流域生态保护提供科学支撑。

关键词: 脂肪酸检测; 化学计量学; 产地溯源; 鲫

中图分类号: S922.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)02-022604-14

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0236 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0236



长江在我国经济发展、生态保护和社会进步中具有举足轻重的地位。其复杂的地形地貌和水系构成了多样的生态环境, 孕育了丰富的水产资源。然而, 近年来受水利工程建设、过度捕捞及环境污染等多重因素影响, 长江流域生态系统遭到严重破坏, 水产品资源日益枯竭。数据显示, 受威胁的鱼类物种数量占全国受威胁种类的四分之一以上^[1], 为应对这一生态危机, 我国自2020年起正式实施“十年禁渔”政策, 旨在通过全面禁止渔业捕捞, 恢复长江生态环境与生物多样性。禁渔期间的核心管控措施包括全面禁捕、强化执法监督等^[2]。地理溯源技术作为关键支撑手段, 能够精准追溯水产品来源, 有效阻断非法捕捞渔获物的市场流通, 显著降低对长江野生鱼类种群的捕捞压力, 从而保障“十年禁渔”政策的有效实施。该技术还通过增强监管效能、震慑非法捕捞等行为, 助力鱼类自然繁殖、种群恢复及生态系统结构与功能的改善, 有效

保障了水产品合法性及生态修复成效^[3, 4]。

目前, 水产品地理溯源技术主要包括: 元素分析法^[5, 6]、组学分析法^[7]、光谱法^[8, 9]及耳石微化学法^[10]。元素分析法虽然在一定程度上能反映产地差异, 但因仪器成本高、分析周期长, 且对相邻环境差异不敏感, 导致其应用受到限制^[11]; 组学分析法尽管具备较强的分辨能力, 但检测成本昂贵、流程复杂, 不适用于大规模样品筛查^[12]; 光谱法虽然具备分析速度快的优势, 但灵敏度较低, 难以辨析产地间的细微差异^[13, 14]。对于分布广泛, 且多来源于环境特征相近的邻近水体或养殖场的水产品, 上述方法在区分其地理来源细微差异方面均存在一定局限性。耳石微化学法虽能提供个体生长履历及栖息环境信息, 准确性较高, 但对取样技术、实验设备与化学分析条件要求较高, 限制了其在实际监管中的推广^[15]。相比之下, 脂肪酸组成分析法优势显著, 该方法根据生物体脂质代谢、饵料和水域

收稿日期: 2025-07-08; **修订日期:** 2025-10-15

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划专项——长江流域水产品监测技术研究及示范应用(2022YFF0608200)资助 [Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFF0608200)]

作者简介: 秦雷(2000—), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为水产品地理溯源。E-mail: 1716390986@shu.edu.cn 钮冰(1977—), 男, 博士; 主要研究方向为计算生物学。E-mail: bingniu@shu.edu.cn *共同第一作者

通信作者: 吕继洲(1984—), 博士, 研究员; 研究方向为动物检验检疫快检技术。E-mail: Ljzffff@163.com 陈沁(1970—), 博士, 教授; 研究方向为生化与分子生物学。E-mail: chenqincc@shu.edu.cn #共同通信作者

环境的密切关系,可有效捕捉不同地域的环境与食源特征^[16,17]。且其样品前处理简单,检测成本适中,具有高通量应用的潜力。近年来研究表明不同产地水产品由于生存环境、摄食来源及代谢差异,其肌肉组织中脂肪酸组成具有明显的地域特征^[18,19],结合主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)等化学计量学方法对脂肪酸数据进行降维处理,能够有效揭示不同产地样本之间的相似性与差异性^[20],因而脂肪酸分析联合化学计量学已成为一种实用、高效的地理溯源技术。

鲫(*Carassius auratus*)隶属鲤形目,鲤科,鲫属。环境适应能力强,分布范围广,是我国最重要的淡水经济鱼类之一,作为杂食性鱼类,鲫以有机碎屑、水草及摇蚊幼虫等为食,在不同水域的生态系统稳定中起到了重要的作用,鉴于鲫作为长江流域分布广泛的鱼类,其地理溯源技术的研究对禁渔期内的管控措施实施具有重要意义。目前,基于脂肪酸分析的地理溯源技术,已应用于沙丁鱼^[21]、鲤^[22]及大黄鱼^[23]等水产品的地理溯源中。鲫、鲤和大黄鱼等鱼类通过摄食行为积累脂肪酸,其脂肪酸组成能够有效反映栖息环境中的饵料组成与水文特征^[24];鲤作为鲫的同科近缘物种,其生理代谢途径具有一定的相似性^[25];此外,大黄鱼与沙丁鱼的相关研究也表明,脂肪酸溯源技术在海水环境中同样具备适用性与有效性。由于不同产地水产品所处水环境、底栖生物及饵料资源存在差异^[26]。因此,本研究以鲫肌肉组织脂肪酸谱为基础,结合PCA、OPLS-DA与线性判别分析(Linear Discriminant Analysis, LDA),构建长江与非长江鲫及长江流域不同江段鲫的产地判别模型,旨在为“十年禁渔”期间的水产品源头监管提供技术支撑,确保市场中水产品的合法性,助力渔业资源的可持续管理与生态保护。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2024年9—12月,从重庆、荆州、仙桃、武汉、岳阳、安庆、铜陵、芜湖、金寨、南京、泰州、太仓、淮安、盐城、上海、舟山等地采购和采集鲫样品共83尾。其中重庆12尾、荆州6尾、仙桃3尾、武汉3尾、岳阳3尾、安庆6尾、铜陵6尾、芜湖3尾、金寨8尾、南京6尾、泰州3尾、太仓6尾、淮安9尾、盐城3尾、上海3尾、舟山3尾。样品在低温条件下运输至实验室,使用手术刀取自鱼

体头部至尾柄之间的肌肉组织,去除鱼皮、鱼骨及红色肌肉层。处理后的样品经液氮速冻后储存于-80℃超低温冰箱,直至后续分析。

在本研究中,长江鲫与非长江鲫的划分依据:采自长江干流流经城市的鲫样本归类为长江鲫,而非长江干流流经城市的鲫样本则归为非长江鲫。因此,淮安、盐城、舟山和金寨所采集的鲫样品被划分为非长江鲫,其余城市样品均属于长江鲫。

对于长江不同江段鲫的划分,则依据地理沿江顺序自上游至下游进行城市归属划分。重庆江段仅包含重庆市一个产地的样品;荆州—武汉江段包含荆州、仙桃、武汉和岳阳;安庆—铜陵江段包括安庆、芜湖和铜陵;南京—上海江段包含南京、泰州、太仓和上海。各江段的样本均按上述城市范围进行归类。

实验中所用正己烷、甲醇(CNW)、氯仿及氢氧化钾(KOH)均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 实验仪器

实验中使用的主要仪器设备: Milli-Q 纯水系统(Millipore), Precellys 24 Dual 多功能生物样品均质器(Bertin Instruments), N-EVAP 112型氮吹浓缩仪(Organomation), 以及 7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Agilent Technologies)。

1.3 脂肪提取和甲酯化

脂肪提取 采用改进的 Bligh-Dyer法^[27]。称取50 mg鲫肌肉组织样本,加入1 mL CM溶液(甲醇:氯仿=2:1, v/v),使用均质器均质3min后,振荡提取1h,并离心分层。向所得上清液中加入250 μ L 0.9% NaCl溶液,再次震荡混匀并离心,取下层氯仿相,于氮吹仪中吹干并称重,获得总脂肪质量。

脂肪甲酯化 将提取得到的脂肪样品溶解于正己烷,配制浓度为10 mg/mL的溶液;随后加入等体积的0.4 mol/L KOH-甲醇溶液,振荡混匀后置于37℃水浴中反应30min以进行甲酯化。反应结束后加入等体积的去离子水,震荡混匀并静置分层,取上层正己烷相,经过0.22 μ m有机滤膜过滤后转入进样瓶,待气相色谱-质谱分析。

1.4 鲫肌肉组织脂肪酸检测

鲫肌肉组织中脂肪酸的定性与定量分析采用气相色谱-质谱联用技术(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)进行。采用面积归一化法对脂肪酸相对含量进行定量分析。

色谱条件 使用DB-WAX毛细管色谱柱(30 m $\times$ 250 μ m $\times$ 0.25 μ m, Agilent Technologies)。程序升温条件:初始柱温为70℃,保留2min;以20℃/

min升温至200℃;再以1℃/min升至220℃;随后以2℃/min升至232℃;最后以20℃/min升至240℃,保留5 min。进样口温度设为240℃,进样体积1 μL,采用分流进样方式,分流比为10:1。载气为高纯氦气(纯度>99.99%),流速为1.0 mL/min。

质谱条件 采用电子轰击(Electron Impact, EI)电离方式,电子能量为70 eV。离子源温度设为230℃,质量扫描范围为30—550 m/z,采集模式为全扫描(Scan),溶剂延迟时间设为3min。

1.5 数据处理

数据整理与统计分析分别使用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 27软件完成。组间差异显著性检验采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行。多变量统计分析包括主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA),均在 SIMCA 14.1软件平台(Sartorius Stedim Data Analytics AB)上完成。

模型(图 1)性能评估计算公式:

$$\text{准确率(Accuracy, ACC)} = (\text{TP} + \text{TN}) / (\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (1)$$

$$\text{灵敏度(Sensitivity, SN)} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (2)$$

$$\text{特异性(Specificity, SP)} = \text{TN} / (\text{TN} + \text{FP}) \quad (3)$$

式中, TP为真阳性数; TN为真阴性数; FP为假阳性数; FN为假阴性数。

2 结果

2.1 不同产地鲫鱼肌肉组织脂肪酸组成

长江与非长江鲫鱼肌肉组织脂肪酸组成 本研究采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对长江与非长江鲫(*C. auratus*)肌肉组织的脂肪酸组成进行检测,共鉴定出18种脂肪酸。其中,包括5种饱和

脂肪酸(SFA)、5种单不饱和脂肪酸(MUFA)和8种多不饱和脂肪酸(PUFA)(表 1)。从含量分布来看,长江鲫中 PUFA 含量相对较高,而非长江鲫中 SFA 含量较高,两类样本间 MUFA 含量差异不明显。在对具体脂肪酸进行显著性分析时发现,除 C18:2n6c、C18:3n6、C20:1 和 C20:4n6 这4种脂肪酸在两类鲫肌肉组织中含量差异不显著外,其余脂肪酸在长江与非长江样本之间均存在显著性差异($P<0.05$),表明脂肪酸组成在地域间具有较强的区分能力。

长江与非长江鲫脂肪酸成分聚类热图如图 2 所示,除3个非长江地区的鲫样本被误判为长江鲫外,其余样本均被准确区分为两类。造成误判的主要原因在于这3个非长江样本中 C16:1 和 C18:3n3 含量较高,与长江鲫的特征脂肪酸分布相似,因此被聚类算法错误归类。但总体而言,该方法在长江与非长江鲫之间展现出良好的聚类效果,具有较高的地理产地判别能力。

长江不同江段鲫肌肉组织脂肪酸组成 进

表 1 长江与非长江鲫肌肉组织脂肪酸组成(平均值±标准差)
Tab. 1 Fatty acid composition of muscle tissue of Yangtze and non-Yangtze crucian carp (mean±SD)

脂肪酸Fatty acid	长江Yangtze River	非长江Non-Yangtze River
C14:0	1.26±0.44 ^a	0.47±0.16 ^b
C16:0	19.08±2.84 ^a	26.76±5.99 ^b
C16:1	2.83±1.28 ^a	1.65±0.90 ^b
C17:0	0.79±0.57 ^a	0.29±0.06 ^b
C17:1	4.09±5.30 ^a	0.08±0.14 ^b
C18:0	10.83±5.84 ^a	21.12±6.80 ^b
C18:1n9c	12.66±9.53 ^a	18.76±5.83 ^b
C18:1n9t	6.60±5.68 ^a	2.06±0.58 ^b
C18:2n6c	10.85±8.43	14.13±4.82
C18:3n6	0.65±0.31	0.16±0.30
C18:3n3	1.84±0.92 ^a	1.36±0.94 ^b
C20:0	1.36±0.74 ^a	0.28±0.08 ^b
C20:1	3.21±6.34	1.63±0.75
C20:2	1.64±1.19 ^a	0.73±0.30 ^b
C20:3n3	4.43±3.96 ^a	2.13±0.86 ^b
C20:4n6	5.87±3.59	4.47±1.32
C20:5n3	2.55±2.58 ^a	0.48±0.22 ^b
C22:6n3	9.48±5.50 ^a	3.46±1.02 ^b
SFA	33.32±7.42 ^a	48.92±12.35 ^b
MUFA	29.38±10.49 ^a	24.17±7.89 ^b
PUFA	37.30±10.35 ^a	26.84±5.52 ^b

注:表中数据同一行右上角字母不同代表差异显著($P<0.05$);下同

Note: Different letters in the upper right corner indicate statistically significant differences ($P<0.05$); The same applies below

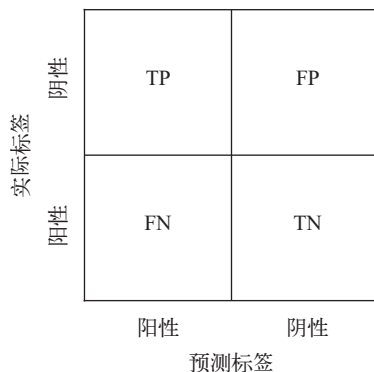


图 1 混淆矩阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the confusion matrix

一步采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对长江不同江段鲫肌肉组织中脂肪酸组成进行比较, 结果显示各江段间脂肪酸含量存在显著差异 (表 2; $P<0.05$)。除C16:1和C18:3n3两种脂肪酸在各江段之间无显著差异外, 其余脂肪酸含量均存在统计学差异, 表明地理位置对鲫脂肪酸组成具有显著影响。

从不同江段的脂肪酸组成特征来看, 南京-上海段与安庆-铜陵段鲫的脂肪酸谱较为相似, 尤其是PUFA含量显著较高, 其中C20:5n3与C22:6n3含量明显高于其余江段。荆州-武汉段鲫以MUFA含量较高为特征, 而重庆段鲫则表现出SFA含量最高、PUFA含量最低的特点, 呈现出独特的脂肪酸组成

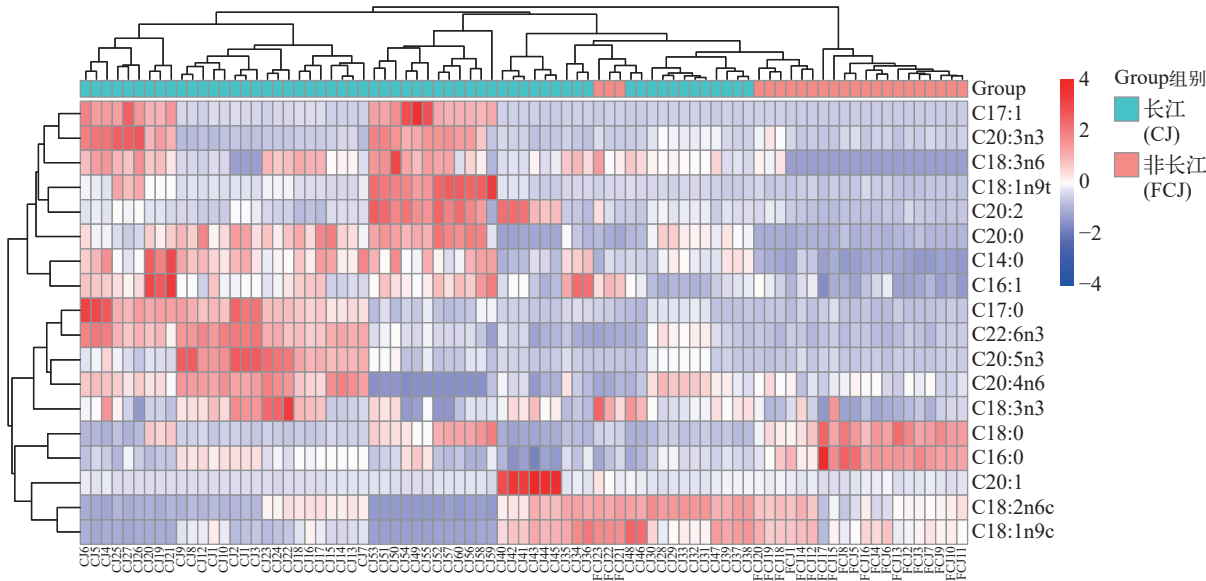


图 2 长江与非长江鲫肌肉组织脂肪酸聚类热图

Fig. 2 Heat map of fatty acid clustering in muscle tissue of Yangtze and non-Yangtze crucian carp

表 2 长江不同江段鲫肌肉组织脂肪酸组成(平均值±标准差)

Tab. 2 Fatty acid composition of muscle tissue of crucian carp in different river sections of the Yangtze River (mean±SD)

脂肪酸Fatty acid	安庆-铜陵Anqing-Tongling	南京-上海Nangjing-Shanghai	荆州-武汉Jingzhou-Wuhan	重庆Chongqing
C14:0	1.49±0.26 ^a	1.29±0.55 ^a	0.95±0.32 ^b	1.34±0.38 ^a
C16:0	21.51±2.01 ^a	19.20±1.48 ^b	16.50±2.63 ^c	19.09±2.96 ^b
C16:1	2.51±0.63	2.95±1.81	2.60±1.30	3.33±0.76
C17:0	1.44±0.56 ^a	0.95±0.34 ^b	0.30±0.09 ^c	0.35±0.15 ^c
C17:1	2.71±4.06 ^b	3.80±4.80 ^b	0.28±0.06 ^b	11.01±4.42 ^a
C18:0	8.88±1.48 ^b	10.10±4.03 ^b	6.24±1.27 ^b	20.09±4.96 ^a
C18:1n9c	9.65±3.66 ^b	10.15±5.18 ^b	26.56±5.32 ^a	2.80±0.58 ^c
C18:1n9t	3.72±0.47 ^b	5.07±2.86 ^b	2.96±0.58 ^c	17.04±2.27 ^a
C18:2n6c	6.77±4.31 ^c	13.81±8.27 ^b	19.23±3.24 ^a	1.02±0.30 ^d
C18:3n6	0.45±0.34 ^c	0.74±0.18 ^{ab}	0.54±0.18 ^b	0.88±0.39 ^a
C18:3n3	2.12±0.80	2.00±1.19	1.89±0.61	1.21±0.72
C20:0	1.58±0.53 ^b	1.36±0.47 ^b	0.49±0.42 ^c	2.15±0.53 ^a
C20:1	1.04±0.32 ^b	0.90±0.21 ^b	9.89±10.27 ^a	1.04±0.23 ^b
C20:2	1.01±0.19 ^b	1.01±0.30 ^b	1.70±1.27 ^b	3.30±1.07 ^a
C20:3n3	3.25±4.08 ^b	5.03±4.31 ^b	1.83±0.57 ^c	8.24±2.48 ^a
C20:4n6	9.68±1.08 ^a	7.75±1.56 ^b	3.93±1.63 ^c	0.69±0.72 ^d
C20:5n3	5.41±2.41 ^a	2.90±2.28 ^b	0.53±0.24 ^c	0.99±0.84 ^c
C22:6n3	16.79±2.06 ^a	10.98±2.17 ^b	3.58±1.72 ^c	5.43±1.88 ^c
SFA	34.90±3.27 ^b	32.90±4.40 ^b	24.48±4.44 ^c	43.02±3.67 ^a
MUFA	19.63±3.62 ^b	22.87±4.85 ^b	42.28±7.27 ^a	35.22±2.54 ^b
PUFA	45.48±2.61 ^a	44.23±6.39 ^a	33.23±3.48 ^b	21.76±5.62 ^c

模式,可能反映了其生境条件的显著差异。

基于鲫鱼肌肉组织脂肪酸谱的聚类分析结果如图3所示:重庆段与荆州-武汉段样本分别聚为独立的类别,呈现出良好的分类效果;而南京-上海段与安庆-铜陵段样本之间存在一定程度的交叉归类,聚为同一簇。该现象可能与地理距离相近、水文环境和摄食结构相似有关,从而导致这两个江段的鲫鱼脂肪酸组成趋于一致。

2.2 不同产地鲫鱼脂肪酸成分主成分分析

长江与非长江鲫鱼脂肪酸成分主成分分析

本研究对长江与非长江鲫鱼肌肉组织脂肪酸组成进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)。结果如图4A所示,尽管长江与非长江鲫鱼样本在得分图中表现出一定的聚类趋势,但整体区分效果有

限,部分样本间存在重叠与交叉,说明仅依靠PCA难以完全实现地理来源区分。进一步通过载荷图(图4B)分析脂肪酸变量对主成分的贡献,发现非长江鲫鱼中C18:1n9c和C18:2n6c含量较高,对其样本聚类具有显著贡献,因而聚类效果相对较好。而长江鲫鱼样本中C17:1、C18:1n9t、C20:3n3、C18:3n3、C20:5n3和C20:4n6等脂肪酸含量较高,这些脂肪酸在不同个体间存在较大变异,导致长江鲫鱼样本在得分图中被分散为4个小簇,从而降低了整体的聚类清晰度。

长江不同江段鲫鱼脂肪酸成分主成分分析 对长江不同江段鲫鱼肌肉组织脂肪酸组成进行主成分分析(PCA),其结果如图5A所示:重庆段、荆州-武汉段和安庆-铜陵段样本在得分图中聚类效果较好,

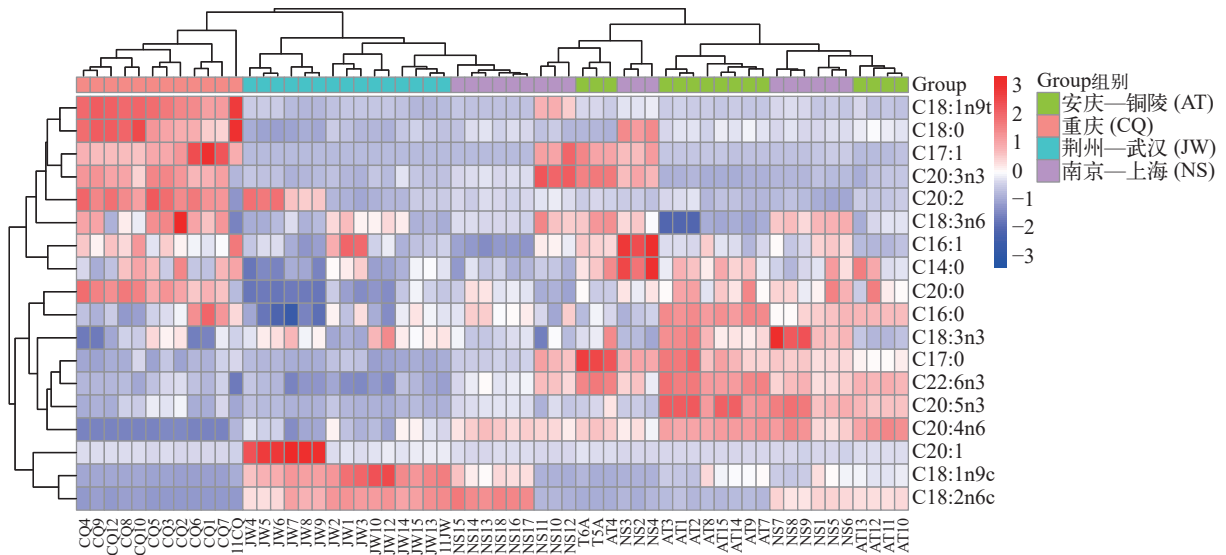


图3 长江不同江段鲫鱼肌肉组织脂肪酸聚类热图

Fig. 3 Heat map of fatty acid clustering in muscle tissue of crucian carp in different sections of the Yangtze River

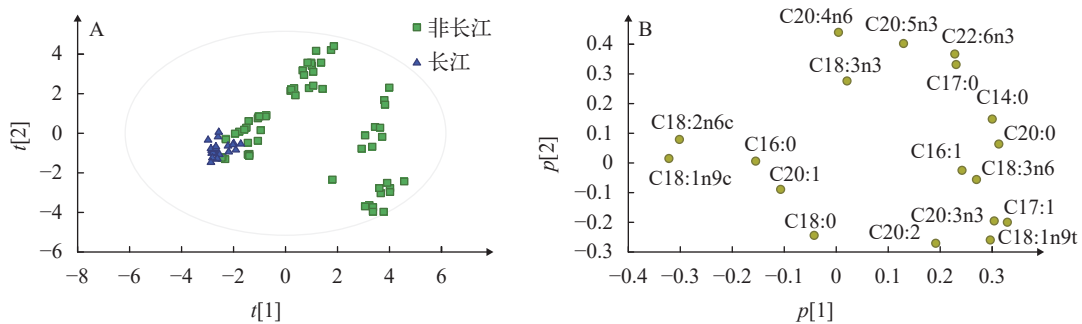


图4 长江与非长江鲫 PCA 得分图(A)、PCA载荷图(B)

Fig. 4 Plot of PCA scores (A) and PCA loadings (B) for Yangtze and non-Yangtze crucian carp

长江与非长江鲫 PCA 得分图(A)中三角形与正方形分别代表长江鲫与非长江鲫; PCA载荷图(B)中圆形代表各脂肪酸变量在第一主成分($p[1]$)与第二主成分($p[2]$)的投影

In the PCA score plot (A) of Yangtze River crucian carp and non-Yangtze River crucian carp, triangles and squares represent the Yangtze River and non-Yangtze River populations, respectively; In the PCA loading plot (B), circles represent the projections of each fatty acid variable onto the first principal component ($p[1]$) and the second principal component ($p[2]$)

实现了不同江段样本的明显分离。而南京-上海段鲫样本则在分布上与荆州-武汉段和安庆-铜陵段部分重叠,表现出较为混杂的聚类趋势,区分效果相对较差。

载荷图分析结果(图 5B)进一步揭示了不同江段样本间脂肪酸组成的差异来源: 安庆-铜陵段鲫中C20:4n6、C20:5n3和C22:6n3等PUFA含量较高,为该地区样本聚类提供主要特征; 荆州-武汉段鲫中C18:2n6c、C18:1n9c和C20:1含量较高,表现出中游区域的脂肪酸特征; 重庆段鲫则以C17:1、C18:0和C18:1n9t等脂肪酸为主,在聚类中展现出独立性。相比之下,南京-上海段鲫脂肪酸组成相对分散、缺乏显著特征,使得其样本在得分图中呈现出较大的变异性,并与其他江段样本发生交叉。

2.3 不同产地鲫正交偏最小二乘判别分析

长江与非长江鲫正交偏最小二乘判别分析

以鲫肌肉组织脂肪酸组成作为输入变量,构建长江与非长江鲫的正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)判别模型。得分图(图 6A)显示两类样本聚类良好,区分效果明显。模型的自变量拟合指数为 $R^2_X=0.864$, 因变量拟合指数 $R^2_Y=0.846$, 模型的预测率 $Q^2=0.813$,三者均大于0.8,说明模型拟合效果优良且具备较强的预测性能。为评估模型的稳健性以及避免过拟合现象出现,进一步进行了200次置换检验(图 6B和6C): 长江与非长江鲫的置换模型 R^2 分别为0.088和0.079; Q^2 分别为-0.267和-0.298; R^2 均 >0 , Q^2 均 <0.05 ,表明模型未出现过拟合现象,具备较好的泛化能力,可用于两类样本的产地识别。

变量重要性投影(Variable Importance in Projec-

tion, VIP)是衡量各变量在OPLS-DA模型中对分类结果贡献度的重要指标。在通常情况下, VIP值 >1 的变量被认为在模型中具有较高的解释力和判别作用。在本研究中,基于长江与非长江鲫脂肪酸组成构建的OPLS-DA模型中,各变量的VIP值如图 7所示。结果表明, C18:0、C16:0、C18:1n9c、C22:6n3、C18:1n9t、C18:2n6c和C17:1的VIP值均 >1 ,说明这些脂肪酸对模型的分类具有显著贡献,可作为区分长江与非长江鲫的关键特征变量。它们在脂肪酸谱中的差异性,可能反映了两地鲫在栖息环境、营养来源及代谢机制上的显著差异,进一步验证了脂肪酸谱在地理产地溯源中的应用潜力。

长江不同江段鲫脂肪酸成分正交偏最小二乘判别分析

本研究进一步利用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)对长江不同江段鲫(重庆、荆州-武汉、安庆-铜陵、南京-上海)进行判别建模。二维得分图(图 8A)与三维得分图(图 8B)均展现出良好的分类效果,能够较清晰地区分不同江段的鲫样本。 $R^2_X=0.956$ 、 $R^2_Y=0.833$ 均 >0.8 ; $Q^2=0.789$,表明模型预测结果较好; 不同江段鲫200次置换检验结果显示: 所有江段鲫样本 Q^2 均 <0.05 (图 8C—8F),表明模型没有过拟合现象,适合用于不同江段鲫的判别分析。

根据OPLS-DA模型中变量重要性投影(VIP)值分析结果(图 9),长江不同江段鲫中共有7种脂肪酸的VIP值大于1,分别为C18:2n6c、C18:1n9c、C22:6n3、C20:1、C18:1n9t、C18:0和C20:4n6。这些脂肪酸在各江段鲫肌肉组织中含量差异显著,可视作判别不同江段样本的重要特征变量,为构建产地溯源模型筛选出了特征脂肪酸。

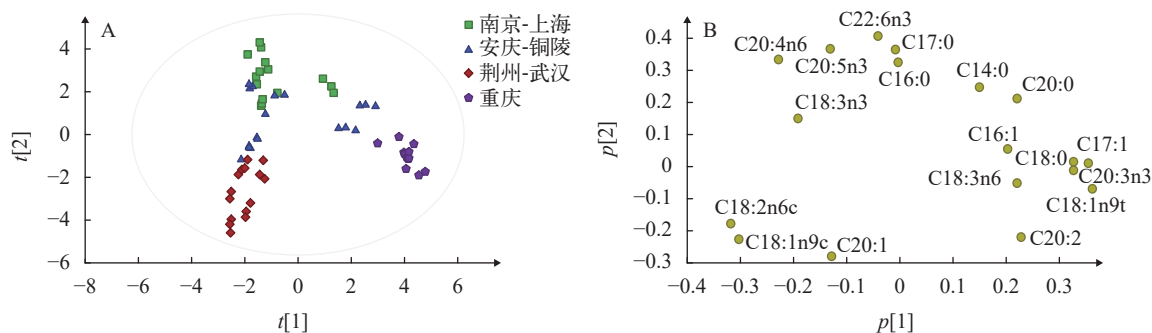


图 5 长江不同江段鲫 PCA 得分图(A)、PCA载荷图(B)

Fig. 5 Plots of PCA scores (A) and PCA loads (B) for crucian carp in different sections of the Yangtze River

长江不同江段鲫 PCA 得分图(A)中正方形、三角形、菱形、五边形分别代表南京-上海江段、安庆-铜陵江段、荆州-武汉江段、重庆江段的鲫样本; PCA载荷图(B)中圆形代表各脂肪酸变量在第一主成分(p[1])与第二主成分(p[2])的投影

In the PCA score plot (A) of crucian carp from different sections of the Yangtze River, triangles, squares, diamonds, and pentagons represent samples from the Nanjing-Shanghai section, Anqing-Tongling section, Jingzhou-Wuhan section, and Chongqing section, respectively. In the PCA loading plot (B), circles represent the projections of each fatty acid variable onto the first principal component (p[1]) and the second principal component (p[2])

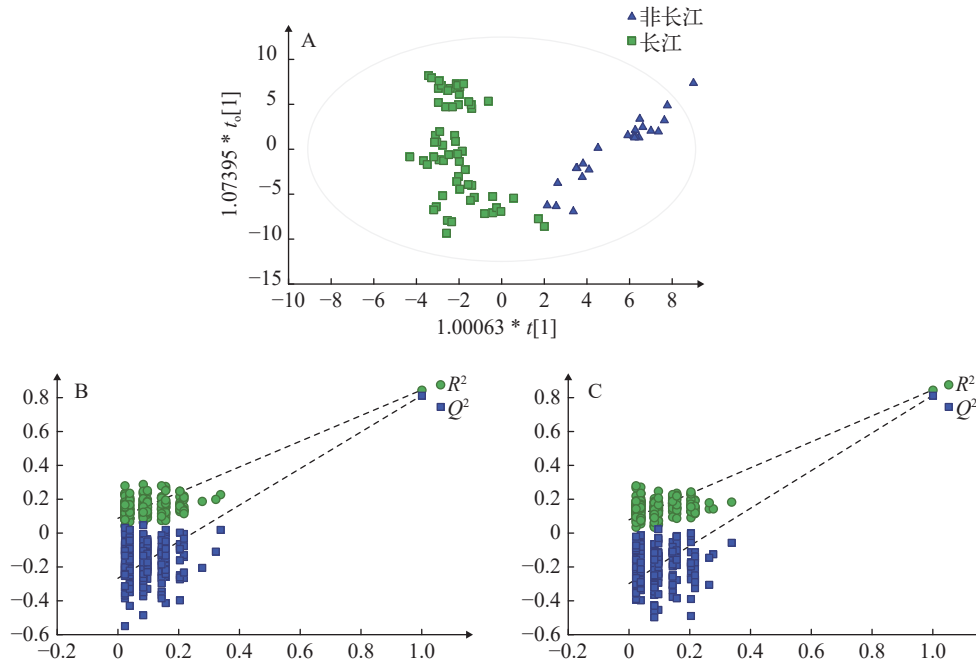


图6 长江与非长江鲫 OPLS-DA 得分图(A)、长江鲫、非长江鲫 OPLS-DA 模型200次置换检验结果图(B、C)

Fig. 6 Plots of OPLS-DA scores for Yangtze and non-Yangtze crucian carp (A), and results of the 200 permutation test of the OPLS-DA model for Yangtze and non-Yangtze crucian carp (B and C)

长江与非长江鲫 OPLS-DA 得分图(A)中三角形和正方形分别表示非长江鲫与长江鲫, 长江鲫、非长江鲫 OPLS-DA 模型200次置换检验结果图(B、C)中圆形与正方形分别代表 R^2 (模型解释率)与 Q^2 (模型预测率)

In the OPLS-DA score plot (A) of Yangtze River and non-Yangtze River crucian carp, triangles and squares represent the Yangtze River and non-Yangtze River populations, respectively. The results of the 200-permutation test for the OPLS-DA model of Yangtze River crucian carp and non-Yangtze River crucian carp are shown in panels (B) and (C), respectively, where circles and squares represent R^2 (model explained variance) and Q^2 (model predictive ability), respectively

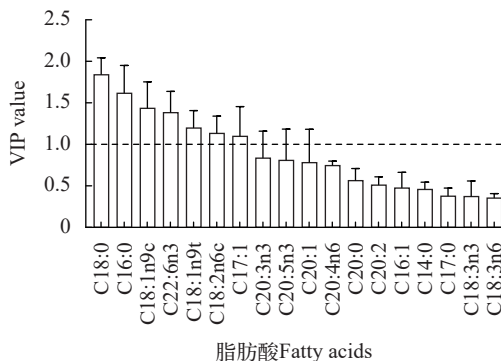


图7 长江与非长江鲫 OPLS-DA模型 VIP 值分布

Fig. 7 Distribution of VIP values in the OPLS-DA model for Yangtze and non-Yangtze crucian carp

2.4 不同产地鲫产地溯源判别模型的构建

长江与非长江鲫产地判别模型的构建 为进一步提升模型的地理溯源判别能力, 本研究基于 OPLS-DA 分析中筛选出的7种特征脂肪酸(图7), 将其作为自变量, 以长江与非长江鲫为因变量, 引入线性判别分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)构建产地判别模型。通过典则判别函数(Canonical Discriminant Function)分析样本的函数值与各组质

心函数值之间的相对位置, 实现对鲫产地的分类预测。

LDA模型生成的两组质心函数值分别为 $Y_{\text{长江}} = -1.074$ 和 $Y_{\text{非长江}} = 2.801$; 判别函数方程:

$$Y_1 = 0.183X_{\text{C18:0}} + 0.077X_{\text{C16:0}} + 0.072X_{\text{C18:1n9c}} - 0.194X_{\text{C22:6n3}} - 0.009X_{\text{C18:1n9t}} - 0.064X_{\text{C18:2n6c}} + 0.07X_{\text{C17:1}} - 3.737 \quad (4)$$

基于此模型对83个鲫样本进行拟合(表3), 结果显示: 总体判别准确率为96.4%, 其中长江鲫样本的判别准确率为100%, 非长江鲫样本的判别准确率为86.9% (SN=95.2%, SP=100.0%, ACC=96.4%)。交叉验证进一步验证了模型的稳健性, 结果显示: 仅有1个长江鲫样本被误判为非长江鲫(判别准确率为98.3%), 非长江鲫样本中有4个被误判为长江鲫(判别准确率为82.6%), 模型总体交叉验证判别准确率为94.0%。模型拟合与交叉验证的混淆矩阵和判别结果(图10和表4)进一步验证, 该模型具有较高的稳定性和可靠性。

长江不同江段鲫产地判别模型的构建 基于 OPLS-DA 模型中筛选出的特征脂肪酸变量, 进一

步构建长江不同江段鲫的线性判别分析(LDA)模型见表5、方程(5)—(7)。典则判别函数分别为 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 , 其中 Y_2 和 Y_3 的特征值方差贡献率分别为63.2%和33.7%, 累计贡献率为96.9%, 远超80%的解释力标准, 表明该模型能较好地反映样本间的分异特征。以 Y_2 与 Y_3 为坐标轴绘制的组质心函数散点图如图11所示。

$$Y_2 = -0.021X_{C18:2n6c} + 0.196X_{C18:1n9c} - 0.314X_{C22:6n3} - 0.118X_{C20:1} + 0.088X_{C18:1n9t} + 0.509X_{C18:0} + 0.191X_{C20:4n6} - 3.982 \quad (5)$$

$$Y_3 = 0.140X_{C18:2n6c} - 0.178X_{C18:1n9c} + 0.102X_{C22:6n3} + 0.193X_{C20:1} - 0.061X_{C18:1n9t} - 0.079X_{C18:0} + 0.191X_{C20:4n6} - 6.111 \quad (6)$$

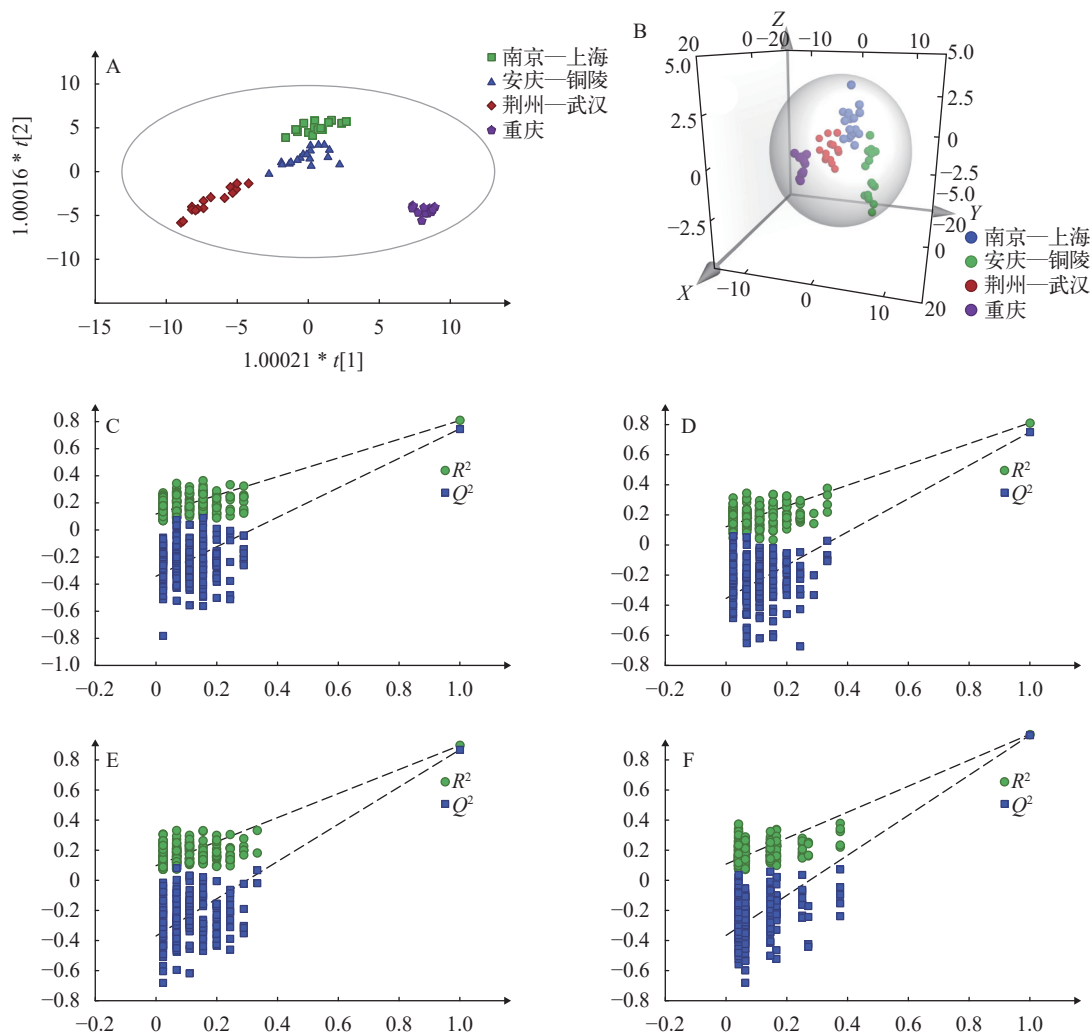


图8 长江不同江段鲫 OPLS-DA 得分图二维(A)、OPLS-DA 得分图三维(B)、安庆—铜陵江段鲫、南京—上海江段鲫、荆州—武汉江段鲫、重庆江段鲫200次置换检验结果(C—F)

Fig. 8 Two-dimensional (A) and three-dimensional (B) OPLS-DA scores of crujian carp in different sections of the Yangtze River, and the results of 200 replacement tests in the Anqing—Tongling, Nanjing—Shanghai, Jingzhou—Wuhan, and Chongqing crujian carp sections of the Yangtze and non-Yangtze River (C—F)

A. 长江不同江段鲫 OPLS-DA 得分图中正方形、三角形、菱形、五边形分别代表南京—上海江段、安庆—铜陵江段、荆州—武汉江段、重庆江段的鲫样本; B. OPLS-DA 得分图三维中X、Y、Z分别表示 $1.00021 * t[1]$ 、 $1.00016 * t[2]$ 、 $1.0078 * t[3]$; C—F. 不同江段鲫 OPLS-DA 模型200次置换检验结果图(C—F)中圆形与正方形分别代表 R^2 (模型解释率)与 Q^2 (模型预测率)

A. In the OPLS-DA score plots of crujian carp from different sections of the Yangtze River, triangles, squares, diamonds, and pentagons represent samples from the Nanjing—Shanghai, Anqing—Tongling, Jingzhou—Wuhan, and Chongqing sections, respectively; B. the three-dimensional OPLS-DA score plot displays the following axes: X: $1.00021 * t[1]$; Y: $1.00016 * t[2]$; Z: $1.0078 * t[3]$; C—F. The results of the 200-permutation test for the OPLS-DA model of crujian carp from different river sections are shown in panels, where circles and squares represent R^2 (model explained variance) and Q^2 (model predictive ability), respectively

$$Y_4 = 0.109X_{C18:2n6c} + 0.271X_{C18:1n9c} + 0.183X_{C22:6n3} - 0.116X_{C20:1} + 0.084X_{C18:1n9t} - 0.181X_{C18:0} + 0.407X_{C20:4n6} - 7.622 \quad (7)$$

从图 11 可见, 重庆江段、荆州-武汉江段与南京-上海段、安庆-铜陵段样本之间区分效果显著, 特别是重庆江段和荆州-武汉江段样本明显独立分布。而南京-上海段与安庆-铜陵段样本存在一定程度交叉, 可能由于两江段地理位置相近、水文环境相似所致。总体上, 该LDA模型表现出良好的分

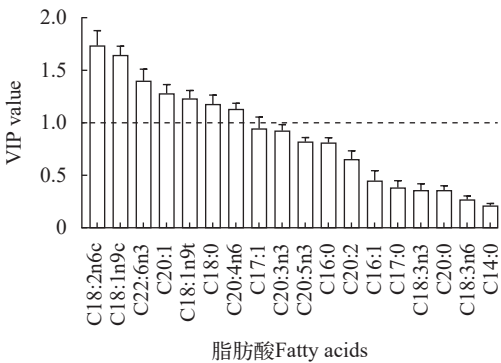


图 9 长江不同江段鲫 OPLS-DA 模型 VIP 值分布

Fig. 9 Distribution of VIP values in the OPLS-DA model for crucian carp in different sections of the Yangtze River

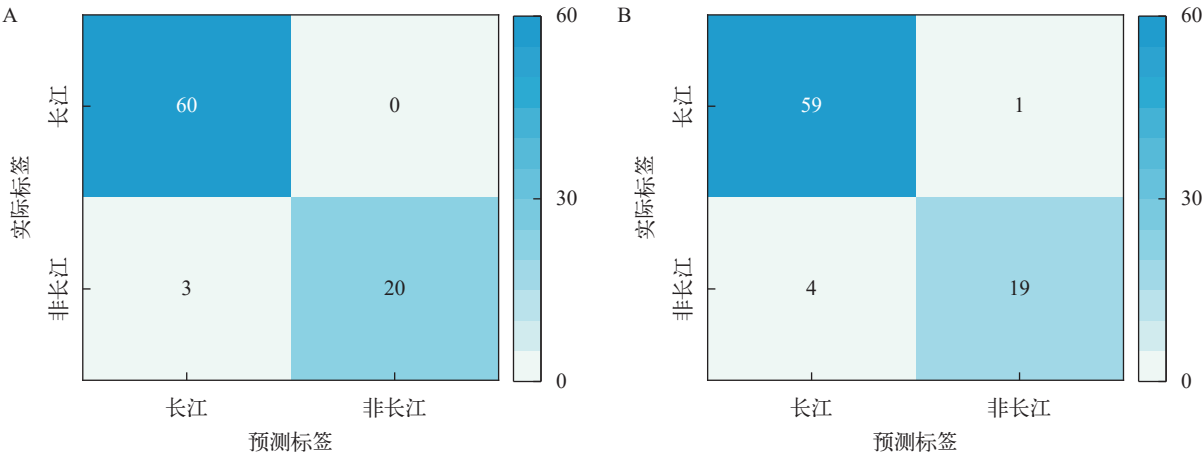


图 10 长江与非长江鲫拟合(A)与交叉验证(B)混淆矩阵

Fig. 10 Confusion matrices for fitting (A) and cross-validation (B) of Yangtze River and non-Yangtze River crucian carp

表 3 长江与非长江鲫判别结果

Tab. 3 Discrimination results between Yangtze River and non-Yangtze River crucian carp

方式 Method	群体 Group	长江与非长江鲫判别结果 Discrimination results between Yangtze River and non-Yangtze River crucian carp		判别准确率 Discrimination accuracy (%)	总判别准确率 Overall discrimination accuracy (%)
		长江	非长江		
		长江	非长江		
拟合 Fitting	长江	60	0	100	96.4
	非长江	3	20	86.9	
交叉验证 Cross validation	长江	59	1	98.3	94.0
	非长江	4	19	82.6	

类性能, 具备较强的产地判别能力。

进一步的分类判别结果显示, 在所分析的60个鲫样本中, 模型判别准确率为100%。交叉验证结果显示, 仅有2个南京-上海段样本分别被误判为荆州-武汉段和安庆-铜陵段, 交叉验证后的总体判别准确率仍高达96.7% (表 6), 各类别的灵敏度(SN)、特异度(SP)及准确率(ACC)均表现良好 (表 7), 充分体现了模型在不同江段鲫判别中具有较高的稳健性和推广性 (图 12)。

3 讨论

3.1 不同产地鲫脂肪酸组成

本研究对长江与非长江鲫肌肉组织脂肪酸组成进行了系统分析, 发现长江与非长江鲫脂肪酸组成差异显著, 长江鲫PUFA含量较高, 而非长江鲫SFA含量较高, 除C18:2n6c、C18:3n6、C20:1和C20:4n6这四种脂肪酸在两类鲫肌肉组织中含量差异不显著外, 其余脂肪酸在长江与非长江样本之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。进而对长江不同江段鲫的脂肪酸组成分析发现, 长江不同江段鲫脂肪酸组成差异同样显著, 除C16:1和C18:3n3两种脂肪酸在各江段之间无显著差异外, 其余脂肪酸含量均存在统计学差异 ($P < 0.05$)。

为进一步评估脂肪酸谱在产地识别中的分类效果,采用聚类分析对不同产地鲫样本进行分类。聚类分析通过对原始脂肪酸数据进行清洗、标准化和降维处理,依据样本间的脂肪酸组成相似性将其分为不同类别。总体上,长江与非长江鲫聚类效果较好(图 2),几乎实现了不同产地样本的完全区分,而在不同江段鲫样本的聚类分析中,南京-上海段与安庆-铜陵段样本则存在一定的交叉分布现象。具体原因为,长江下游的南京-上海段与安庆-铜陵段鲫PUFA含量较高;长江中游荆州-武汉段鲫

MUFA含量突出;而长江上游重庆段鲫则以SFA含量较高为特征。

上述长江与非长江鲫以及长江不同江段鲫之间独特的脂肪酸特征,可能源于各江段生态环境、水温、饵料组成等生态因子的影响^[28, 29],由于长江流域水体流动性强,水温变化明显,可能导致鲫摄取浮游植物以及底栖生物的数量不同,从而影响到其脂肪酸的代谢以及生物合成,进而导致其肌肉组织脂肪酸谱呈现出地域性差异^[30]。长江下游鲫体

表 4 基于拟合与交叉验证的长江与非长江鲫判别结果
Tab. 4 Discrimination results between Yangtze River and non-Yangtze River crucian carp based on fitting and cross-validation

方式 Method	灵敏度 Sensitivity (%)	特异性 Specificity (%)	准确率 Accuracy (%)
拟合Fitting	95.2	100	96.4
交叉验证 Cross validation	93.7	95.0	94.0

表 5 长江不同江段鲫组质心函数
Tab. 5 Heart-of-mass function of the crucian carp group in different sections of the Yangtze River

江段River section	Y_2	Y_3	Y_4
安庆-铜陵Anqing-Tongling	3.983	2.683	1.025
南京-上海Nanjing-Shanghai	0.702	1.509	-1.304
荆州-武汉Jingzhou-Wuhan	1.449	-5.080	0.135
重庆Chongqing	-7.844	0.733	0.507

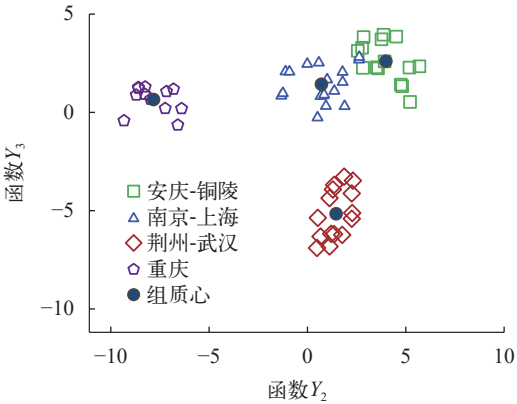


图 11 长江不同江段鲫判别散点图
Fig. 11 Scatter plot of discrimination among crucian carp from different sections of the Yangtze River
函数 Y_2 为方程(5)、函数 Y_3 为方程(6)
Function Y_2 is equation (5), function Y_3 is equation (6)

表 6 长江不同江段鲫判别结果
Tab. 6 Discrimination results among crucian carp from different sections of the Yangtze River

方式 Method	江段 River section	各江段判别结果 Results of river section classification				判别准确率 Discrimination accuracy (%)	总判别准确率 Overall discrimination accuracy (%)
		安庆-铜陵	南京-上海	荆州-武汉	重庆		
拟合Fitting	安庆-铜陵	15	0	0	0	100	100
	南京-上海	0	18	0	0	100	
	荆州-武汉	0	0	15	0	100	
	重庆	0	0	0	12	100	
交叉验证 Cross validation	安庆-铜陵	15	0	0	0	100	96.7
	南京-上海	1	16	1	0	88.9	
	荆州-武汉	0	0	15	0	100	
	重庆	0	0	0	12	100	

表 7 基于拟合与交叉验证的长江不同江段鲫判别结果
Tab. 7 Discrimination results among crucian carp from different sections of the Yangtze River based on fitting and cross-validation

方式 Method	安庆-铜陵 Anqing-Tongling			南京-上海 Nanjing-Shanghai			荆州-武汉 Jingzhou-Wuhan			重庆 Chongqing			总准确率 Overall accuracy rate (%)
	灵敏度 (%)	特异性 (%)	准确率 (%)	灵敏度 (%)	特异性 (%)	准确率 (%)	灵敏度 (%)	特异性 (%)	准确率 (%)	灵敏度 (%)	特异性 (%)	准确率 (%)	
拟合 Fitting	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
交叉验证 Cross validation	93.8	100	98.3	100	95.5	96.7	93.8	100	98.3	100	100	100	96.7

内C22:6n3、C20:5n3和C20:4n6等PUFA含量较高,这可能与该江段江面宽阔、水流缓慢、浮游生物及硅藻资源丰富密切相关^[31,32];长江中游河岸硬化程度较高,导致水深增加、流速加快和岸边植被减少等不利影响^[33],可能改变了鱼类的食物来源与营养状态,该水域有机碎屑和蓝藻等物质相对较多,使得鲫鱼体内MUFA含量显著升高;而长江上游水流湍急、水温较低,急流环境可能影响鲫的摄食行为^[34],为适应高能耗需求,鲫可能倾向于积累更多SFA作为能量储备。长江南京—上海段与安庆—铜陵段之间的脂肪酸谱相似性,进一步支持了地理邻近性对脂肪酸组成趋同的潜在影响,也是两者在聚类分析中归为同一簇的主要原因。

3.2 化学计量学在鲫产地溯源中的应用

主成分分析(PCA)作为一种常用的化学计量学方法,能够在尽可能保留原始数据集中变量信息的基础上,通过识别数据中的主成分变化方向实现降维处理。该方法可将原始的高维数据转化为少数几个主成分,以便更直观地观察样本间的相似性和差异性^[35],结合载荷图与样本脂肪酸谱分析结果可知,不同产地鲫的聚类趋势与其脂肪酸组成高度一致,各产地样本聚类效果主要受到其脂肪酸含量结果的影响,表明在样本差异相对单一的前提下,PCA作为一种无监督的降维方法具有良好的适用性。尽管PCA在区分南京—上海段样本方面存在一定局限,但从图4与图5的得分图可初步观察到长江与非长江鲫,以及重庆、荆州—武汉和安庆—铜陵等不同江段鲫之间均呈现出一定的聚类趋势。这一结果支持了利用鲫肌肉组织脂肪酸组成特征开展产地溯源建模的可行性,为后续构建更具判别能力的监督分类模型奠定了基础。

为进一步提升样本区分能力,本研究引入有监

督模式的正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)进行脂肪酸数据的降维与分类。与无监督方法相比,OPLS-DA能够更有效地挖掘变量与类别标签之间的关系^[36],在建模过程中强化了变量对样本分类的解释力。OPLS-DA作为偏最小二乘判别分析(PLS-DA)的拓展模型,通过引入正交变量以分别解释组间差异与组内变化,从而提升模型的分类精度与泛化能力^[37]。在本研究中,基于鲫肌肉脂肪酸谱建立的OPLS-DA模型,在“长江与非长江”及“长江不同江段”两个层面上均表现出优异的建模性能(R^2_X 与 R^2_Y 均 >0.8 , Q^2 均 >0.75),并在200次置换检验中均通过有效性测试($Q^2 < 0.05$),进一步验证了模型的稳定性与适用性,说明OPLS-DA是构建水产品产地溯源模型的有效手段。

为进一步提升模型的地理溯源能力,本研究通过线性判别分析(LDA)结合OPLS-DA模型中筛选出的VIP值 >1 的特征差异脂肪酸(图7和图9)构建长江与非长江鲫及长江不同江段鲫产地判别模型。作为一种经典的多分类统计分析方法,其能够基于样本间的差异构建线性判别函数,在降低原始数据维度的同时实现多类别样本的有效区分^[38]。本研究通过OPLS-DA筛选具有代表性的脂肪酸变量,并基于LDA构建了针对不同产地鲫的地理溯源模型。在长江与非长江样本、长江不同江段样本的判别分类中,模型均表现出优异的准确率,充分说明鲫肌肉组织中的脂肪酸组成可作为可靠的生物标志物,用于其地理来源的判别。

尽管PCA、OPLS-DA和LDA均能揭示不同产地鲫样本之间的产地信息差异,但三者在建模目标、信息利用方式和应用场景上存在一定区别。PCA作为无监督的分析方法,不依赖样本间的类别信息,适用于探索性数据分析和初步识别样本间的

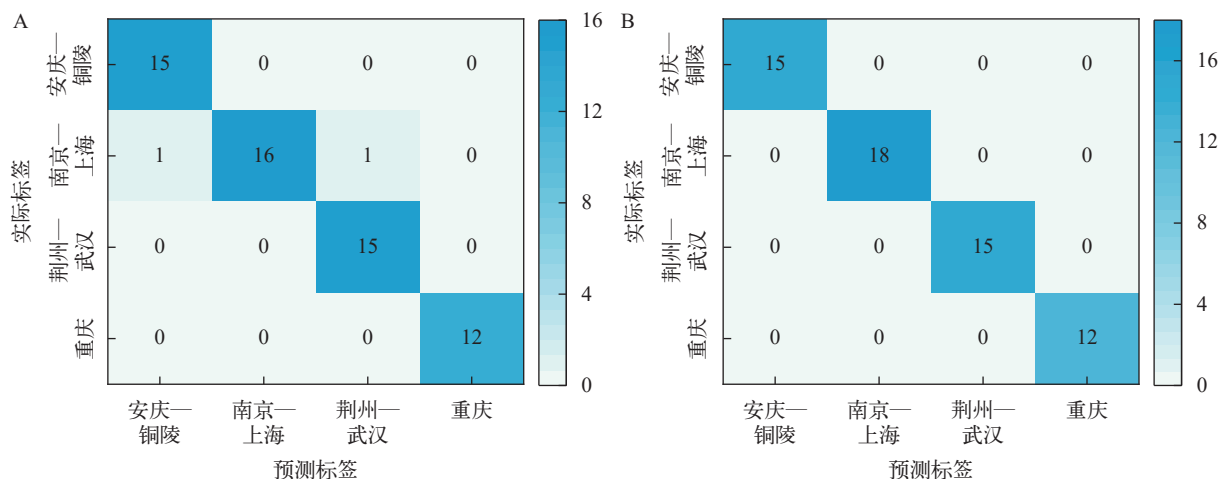


图 12 长江不同江段鲫拟合(A)与交叉验证(B)混淆矩阵

Fig. 12 Confusion matrices for fitting (A) and cross-validation (B) of crucian carp from different sections of the Yangtze River

聚类趋势,但其容易受到噪声与异常值的影响^[39]。OPLS-DA能够引入样本类别标签,通过最大化变量与类别间的关系实现样本区分;并且筛选出组间差异显著的关键生物标志物(VIP值>1),然而需要考虑模型的过拟合风险,需通过 R^2_X 、 R^2_Y 及置换检验对模型的稳定性进行检测^[40]。LDA作为一种经典的监督分类方法,能够通过构建线性判别函数处理已知类别样本的判别问题,但其性能在很大程度上依赖于输入数据的代表性,通常需经过特征选择以排除噪声干扰^[41]。综上所述,在水产品地理溯源的研究中,PCA可用于快速探查样本聚类趋势与异常值;OPLS-DA有助于提高模型可解释性并识别关键差异脂肪酸;最终可基于OPLS-DA筛选出的关键脂肪酸,通过LDA建立判别函数,实现多产地水产品的地理来源鉴别。

虽然本研究在鲫产地溯源方面取得了较高的判别准确率,但仍存在一定的局限性。首先,样本量与采样范围有限,部分产地样本量较少(如仙桃、武汉、岳阳等);非长江鲫采样点覆盖率较低,这可能影响模型的稳定性与适用性。未来研究应进一步增大样本量,并拓宽采样的地域范围。此外,本研究样品采集时间较为集中,未充分考虑季节性的变化对鲫肌肉组织脂肪酸组成的影响,可能影响了模型的泛化能力。因此,增加不同季节样本亦是下一步研究的重点方向。

4 结论

本研究对不同产地鲫肌肉组织的脂肪酸谱进行了系统分析,结果表明,不同产地鲫在脂肪酸组成和含量方面存在显著性差异。基于此,进一步采用化学计量学方法结合LDA中的典则判别函数,构建了鲫的地理产地溯源模型。模型判别结果显示,长江与非长江鲫的拟合准确率为96.4%,交叉验证准确率为94.0%;长江不同江段鲫的拟合准确率达到100%,交叉验证准确率为96.7%。上述结果表明,脂肪酸谱联合化学计量学分析能够有效实现不同产地鲫的识别与分类。该方法在水产品地理溯源方面展现出良好的应用潜力,不仅为鲫的市场监管与产地认证提供了科学依据,也为长江流域生态保护和禁渔期执法监督提供了可行的技术支撑,具有重要的实践价值与推广前景。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Liu F, Lin P C, Li M Z, *et al.* Situations and conservation strategies of fish resources in the Yangtze River basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 144-156. [刘飞, 林鹏程, 黎明政, 等. 长江流域鱼类资源现状与保护对策 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(S1): 144-156.]
- [2] Dong F, Fang D D, Zhang H, *et al.* Protection and development after the ten-year fishing ban in the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 029318. [董芳, 方冬冬, 张辉, 等. 长江十年禁渔后保护与发展 [J]. *水产学报*, 2023, **47**(2): 029318.]
- [3] Hopkins C R, Roberts S I, Caveen A J, *et al.* Improved traceability in seafood supply chains is achievable by minimising vulnerable nodes in processing and distribution networks [J]. *Marine Policy*, 2024(159): 105910.
- [4] Fonseca V F, Duarte I A, Matos A R, *et al.* Fatty acid profiles as natural tracers of provenance and lipid quality indicators in illegally sourced fish and bivalves [J]. *Food Control*, 2022(134): 108735.
- [5] Camin F, Perini M, Bontempo L, *et al.* Stable isotope ratios of H, C, O, N and S for the geographical traceability of Italian rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Food Chemistry*, 2018(267): 288-295.
- [6] Liu Z, Yuan Y, Zhao Y, *et al.* Differentiating wild, lake-farmed and pond-farmed carp using stable isotope and multi-element analysis of fish scales with chemometrics [J]. *Food Chemistry*, 2020(328): 127115.
- [7] Duarte B, Feijão E, Cruz-Silva A, *et al.* Reveal your microbes, and I'll reveal your origins: geographical traceability via *Scomber colias* intestinal tract metagenomics [J]. *Animal Microbiome*, 2025, **7**(1): 43.
- [8] Duarte B, Mamede R, Carreiras J, *et al.* Harnessing the full power of chemometric-based analysis of total reflection X-ray fluorescence spectral data to boost the identification of seafood provenance and fishing areas [J]. *Foods*, 2022, **11**(17): 2699.
- [9] Bodin N, Amiel A, Fouché E, *et al.* NMR-based metabolic profiling and discrimination of wild tropical tunas by species, size category, geographic origin, and on-board storage condition [J]. *Food Chemistry*, 2022(371): 131094.
- [10] Xu Y, Jiang T, Yang J, *et al.* Coexistence of freshwater resident and anadromous *Coilia nasus* in the Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province, China [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(4): 1-14. [许颖, 姜涛, 杨健, 等. 长江安庆江段存在溯河洄游型和淡水定居型刀鲚实证研究 [J]. *渔业科学进展*, 2024, **45**(4): 1-14.]
- [11] Han C, Li L, Dong X, *et al.* Current progress in the authentication of fishery and aquatic products using multi-element and stable isotope analyses combined with chemometrics [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, **14**(4): 2023-2037.
- [12] Rai A, Saito K. Omics data input for metabolic modeling [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016(37): 127-134.

- [13] Kang X, Zhao Y, Shang D, *et al.* Elemental analysis of sea cucumber from five major production sites in China: a chemometric approach [J]. *Food Control*, 2018(94): 361-367.
- [14] Wei X, Zhang M, Chen K, *et al.* Intelligent detection and control of quality deterioration of fresh aquatic products in the supply chain: a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024(218): 108720.
- [15] Fallon S J, McDougall A J, Espinoza T, *et al.* Age structure of the Australian lungfish (*Neoceratodus forsteri*) [J]. *PLoS One*, 2019, **14**(1): e0210168.
- [16] Li C, Lin H, Guo Y, *et al.* Fatty acid analysis reveals the trophic interactions among organisms in the Zhelin Bay Marine Ranch [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023(10): 1132246.
- [17] Ohshimo S, Hiraoka Y, Ando Y. Geographical and species differences of fatty acid components of small pelagic fishes, micronekton, and squids in the northwestern Pacific [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2025, **10**(2): 238-252.
- [18] Guzmán-Rivas F, Quispe-Machaca M, Lazo J, *et al.* Fatty acid profiles of highly migratory resources from the Southeastern Pacific Ocean, Chile: a potential tool for biochemical and nutritional traceability [J]. *PeerJ*, 2025(13): e19101.
- [19] Xia B, Hao Q, Xue S, *et al.* Geographical region traceability of wild topmouth *Culter* (*Culter alburnus*) from Xingkai Lake based on muscle quality and aroma profiles [J]. *Food Chemistry*, 2024(438): 137979.
- [20] Ye H, Yang J, Xiao G, *et al.* A comprehensive overview of emerging techniques and chemometrics for authenticity and traceability of animal-derived food [J]. *Food Chemistry*, 2023(402): 134216.
- [21] Calado R, Palma M, Domingues M R, *et al.* Fatty acids of European sardine (*Sardina pilchardus*) white muscle can discriminate geographic origin along the Iberian Atlantic coast [J]. *Foods*, 2025, **14**(1): 120.
- [22] Wang L, Xiong J, Xu C, *et al.* Comparison of muscle nutritional composition, texture quality, carotenoid metabolites and transcriptome to underling muscle quality difference between wild-caught and pond-cultured Yellow River carp (*Cyprinus carpio* Haematopterus) [J]. *Aquaculture*, 2024(581): 740392.
- [23] Han H, Lin X, Wu Y, *et al.* Lipid fingerprinting and geographical origin identification of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) using UHPLC-QTOF-MS [J]. *Food Research International*, 2024(196): 115048.
- [24] Delavarian R, Aberoumand A, Ziaei-Nejad S, *et al.* Nutritional traits of fatty acid composition of common carp fed with oil sources [J]. *Current Nutrition & Food Science*, 2025, **21**(4): 494-500.
- [25] Yan Y, Wang J, Dong X, *et al.* Quantitative proteomic analysis of hepatic tissue in allotetraploid hybridized from red crucian carp and common carp identified crucial proteins and pathways associated with metabolism and growth rate [J]. *Proteomics*, 2022, **22**(4): 2100115.
- [26] Zhang X, Cheng J, Han D, *et al.* Regional differences in fatty acid composition of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and scallop (*Patinopecten yessoensis*) in the coastal areas of China [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019(31): 100782.
- [27] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, **37**(8): 911-917.
- [28] Zhu T, Yang R, Xiao R, *et al.* Effect of swimming training on the flesh quality in Chinese Perch (*Siniperca chuatsi*) and its relationship with muscle metabolism [J]. *Aquaculture*, 2023(577): 739926.
- [29] Zhao Z M, Wu W X, Zhou D, *et al.* Different sources of dietary chromium on growth, immunity, and glucose and lipid metabolism of *Macrobrachium nipponense* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(9): 130-141. [赵梓名, 吴炜欣, 周东, 等. 饲料中不同来源铬对日本沼虾生长、免疫和糖脂代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(9): 130-141.]
- [30] Péron M, Gonzalez R, Hue S, *et al.* Spatial and ontogenetic modulation of fatty acid composition in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) from two French estuaries [J]. *Marine Environmental Research*, 2024(197): 106456.
- [31] Yu P, You Q, Pang W, *et al.* Development of a periphytic diatom-based comprehensive diatom index for assessing the trophic status of lakes in the lower reaches of the Yangtze River, China [J]. *Water*, 2021, **13**(24): 3570.
- [32] Luo Y, Wang Y, Guo F, *et al.* Sources and fate of omega-3 polyunsaturated fatty acids in a highly eutrophic lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2024(932): 172879.
- [33] Wang Z, Cao J, Cheng F, *et al.* Shoreline hardening affects species composition and condition of larval fishes in the Yangtze River: Implications for conservation and inshore habitat restoration [J]. *Ecohydrology*, 2023, **16**(4): e2528.
- [34] Zhou Y, Wang G, Wu H, *et al.* Changes in flow and sediment transport caused by cascade hydropower in the upper reaches of Yangtze River and their influence on spawning of *Coreius heterodon* [J]. *Catena*, 2024(235): 107622.
- [35] Ringnér M. What is principal component analysis [J]? *Nature Biotechnology*, 2008, **26**(3): 303-304.
- [36] Lopez E, Etxebarria-Elezgarai J, Amigo J M, *et al.* The importance of choosing a proper validation strategy in predictive models. A tutorial with real examples [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023(1275): 341532.
- [37] Kang C, Zhang Y, Zhang M, *et al.* Screening of specific quantitative peptides of beef by LC-MS/MS coupled with

- OPLS-DA [J]. *Food Chemistry*, 2022(387): 132932.
- [38] Xu L, Raitoharju J, Iosifidis A, *et al.* Saliency-based multilabel linear discriminant analysis [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(10): 10200-10213.
- [39] Li H. Advancing principal component analysis: challenges and innovations in big data analysis [J]. *Applied and Computational Engineering*, 2025, **118**(1): 48-54.
- [40] Ma Q, Chen X, Zhang K, *et al.* Chemical fingerprint analysis for discovering markers and identifying *Saussurea involucrata* by HPLC coupled with OPLS-DA [J]. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2020, **2020**(1): 7560710.
- [41] Fabiyi S D, Murray P, Zabalza J, *et al.* Folded LDA: extending the linear discriminant analysis algorithm for feature extraction and data reduction in hyperspectral remote sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021(14): 12312-12331.

TRACEABILITY OF *CARASSIUS AURATUS* ORIGIN BASED ON FATTY ACID PROFILING AND CHEMOMETRICS

QIN Lei¹, NIU Bing¹, LÜ Ji-Zhou² and CHEN Qin¹

(1. School of Life Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing, Beijing 100176, China)

Abstract: Geographic traceability technology for aquatic products serves as a crucial tool for supporting the implementation of the “Ten-Year Fishing Ban” policy in the Yangtze River. To enhance the enforcement capabilities of regulatory authorities, this study utilized crucian carp (*Carassius auratus*) as the subject. Based on regional differences in muscle fatty acid profiles, chemometric techniques including principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), and linear discriminant analysis (LDA) were employed to construct geographic origin discrimination models. The model distinguishing Yangtze River and non-Yangtze River samples achieved an overall classification accuracy of 96.4%, with a cross-validation accuracy of 94.0%. The model further developed for distinguishing samples from different sections of the Yangtze River demonstrated even higher performance, reaching 100% total classification accuracy and 96.7% cross-validation accuracy. These findings indicate that fatty acid profiling combined with multivariate statistical analysis provides an effective approach for geographic origin identification of crucian carp. This method holds strong practical applicability and potential for wider adoption, offering valuable technical support for the implementation of the fishing ban policy, aquatic product market supervision, and ecological conservation in the Yangtze River basin.

Key words: Fatty acid detection; Chemometrics; Origin traceability; *Carassius auratus*