DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251124002
引用格式: 罗振玲, 程文聪, 吴冰韵, 等. 不同产区缢蛏品质差异分析与产地判别模型构建[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 21–32.
LUO ZL, CHENG WC, WU BY, *et al*. Quality variation analysis and origin discrimination model construction of *Sinonovacula constricta* from different regions [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 21–32. (in Chinese with English abstract).

不同产区缢蛏品质差异分析与产地判别模型构建

罗振玲, 程文聪, 吴冰韵, 夏慧丽*

(台州市食品药品检验研究院, 台州市特色农产品质量安全与品质提升重点实验室, 台州 318000)

摘 要: 目的 利用缢蛏肉营养成分和蛏壳矿物元素组成信息, 构建能够有效判别不同产地及养殖模式的缢蛏产地判别模型。**方法** 以浙江临海、三门、宁海(围塘养殖)和象山(滩涂养殖)4 个主产区的缢蛏为研究对象, 系统分析了其外观性状、营养成分、氨基酸组成、脂肪酸组成及矿物元素含量等品质指标, 通过主成分分析(principal component analysis, PCA)、偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)和变量重要性投影(variable importance in the projection, VIP)筛选出影响缢蛏产地判别分析的关键特征参数, 构建不同产地缢蛏判别模型。**结果** 品质分析表明, 不同产区及养殖模式的缢蛏特征具有明显差异: 三门(围塘)缢蛏的氨基酸含量(49.88 g/100 g)、多不饱和脂肪酸比例(41.46%)最高; 宁海(围塘)缢蛏的微量元素含量相对较高; 象山(滩涂)缢蛏多项营养指标含量相对较低。PCA、PLS-DA 和 VIP 筛选出 19 个关键特征参数, 分别为缢蛏软组织中铁、锰、铜、钙、锌等 5 种矿物质, 二十碳五烯酸、二十二碳六烯酸等 8 种脂肪酸, 丙氨酸; 蛏壳中钠、锰、硒、镁、钙等 5 种矿物质。所构建的 PLS-DA 模型拟合优度良好。围塘养殖与滩涂养殖的样本在潜变量空间分布上存在明显区分; 同时, 3 个围塘养殖的毗邻产区样本亦呈现各自独立的聚类趋势, 表明模型能有效捕捉由产地和养殖模式共同塑造的化学指纹差异。**结论** 本研究筛选出 19 个缢蛏产地判别关键特征参数, 构建的判别模型, 能有效区分浙江省内不同产地及养殖模式(围塘和滩涂)的缢蛏。该模型不仅克服了养殖模式差异带来的干扰, 成功实现了对象山(滩涂)产区的准确判别, 同时对 3 个围塘养殖的毗邻产区(临海、三门、和宁海)也展现出良好的区分能力, 为复杂养殖背景下的缢蛏产地溯源提供了可靠的技术手段。

关键词: 缢蛏; 品质差异; 产地判别; 主成分分析; 偏最小二乘判别分析

Quality variation analysis and origin discrimination model construction of *Sinonovacula constricta* from different regions

LUO Zhen-Ling, CHENG Wen-Cong, WU Bing-Yun, XIA Hui-Li*

(*Taizhou Institute for Food and Drug Control*, *Taizhou Key Laboratory for Safety and Quality Enhancement of Characteristic Agricultural Products*, *Taizhou* 318000, *China*)

收稿日期: 2025-11-24
基金项目: 浙江省市场监督管理局科技计划项目(ZC2023096)
第一作者: 罗振玲(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品、农产品质量安全检测和分析。E-mail: zlluo1989@sinam.com
***通信作者:** 夏慧丽(1978—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为食品、农产品质量安全检测和分析。E-mail: 64463403@qq.com

ABSTRACT: Objective To utilize the nutritional composition of the meat and the mineral element composition of the shells of the *Sinonovacula constricta* to construct a reliable model for discriminating the origin and farming mode of the species. **Methods** The 4 major production areas in Zhejiang Province, namely Linhai, Sanmen, Ninghai (pond farming) and Xiangshan (mudflat farming), were selected as the research subjects. The quality indicators of the *Sinonovacula constricta*, including appearance traits, nutritional composition, amino acid composition, fatty acid composition and mineral element content, were systematically analyzed. Principal component analysis (PCA), partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) and variable importance in the projection (VIP) were used to screen out the key characteristic parameters that affect the discrimination of the origin of the *Sinonovacula constricta*, and a discrimination model for different origins of the *Sinonovacula constricta* was constructed. **Results** The quality analysis indicated that there were significant differences in the characteristics of the *Sinonovacula constricta* from different production areas and farming modes: The amino acid content (49.88 g/100 g) and the proportion of polyunsaturated fatty acids (41.46%) of the Sanmen (pond farming) *Sinonovacula constricta* were the highest; the content of trace elements in the Ninghai (pond farming) *Sinonovacula constricta* was relatively high; and the content of multiple nutritional indicators in the Xiangshan (mudflat farming) *Sinonovacula constricta* was relatively low. PCA, PLS-DA and VIP screened out 19 key characteristic parameters, including 5 kinds of minerals (iron, manganese, copper, calcium and zinc) in the soft tissue of the *Sinonovacula constricta*, 8 kinds of fatty acids (eicosapentaenoic acid, docosahexaenoic acid, *etc*.), and alanine; and 5 kinds of minerals (sodium, manganese, selenium, magnesium and calcium) in the shell. The constructed PLS-DA model had a good fit. The samples from pond farming and mudflat farming were clearly distinguished in the latent variable space; at the same time, the samples from the 3 adjacent pond farming production areas (Linhai, Sanmen and Ninghai) also showed independent clustering trends, indicating that the model could effectively capture the chemical fingerprint differences shaped by both the origin and the farming mode. **Conclusion** This study screens out 19 key characteristic parameters for the discrimination of the origin of the *Sinonovacula constricta* and constructed a discrimination model that can effectively distinguish the *Sinonovacula constricta* from different origins and farming modes (pond and mudflat) within Zhejiang Province. The model not only overcame the interference caused by the difference in farming modes but also accurately discriminate the Xiangshan (mudflat) production area, and shows good discrimination ability for the 3 adjacent pond farming production areas (Linhai, Sanmen and Ninghai). This provides a reliable technical means for the origin traceability of the *Sinonovacula constricta* under complex farming backgrounds.

KEY WORDS: *Sinonovacula constricta*; quality variation; origin discrimination; principal component analysis; partial least squares-discriminant analysis

0 引 言

缢蛏(*Sinonovacula constricta*)是双壳类软体动物，又名蛏子[1–2]，广泛分布于中国、日本和朝鲜等各国沿海地区，我国从南至北沿海滩涂均有养殖，其中以浙江、福建两地缢蛏养殖最为发达[3–4]。在浙江省内，三门、宁海、温岭、象山等地的缢蛏养殖产量位居全省前列。值得注意的是，养殖环境、养殖方式、品种、季节等因素均会对缢蛏品质产生显著影响[5]，导致以次充好、产地冒充等市场乱象，进而影响其市场溢价和产品口碑。

不同缢蛏种苗[6]、温度[7]、盐度[8–9]、饵料[10]及季节[11]等环境影响缢蛏潜沙、摄食、代谢等生理活性，进而影响缢蛏营养品质，因此，围绕缢蛏品质差异的研究众多。如崔燕等[12]采集宁海长街、三门健跳、乐清蒲岐和福清城头 4 个养殖场养殖缢蛏，通过分析其色泽、营养成分和滋味成分的差异，发现在 P<0.05 条件下，长街缢蛏壳体色泽、铁、硒、总氨基酸、必需氨基酸含量显著高于其他 3 组，三门缢蛏粗蛋白、钙、锌含量显著高于其他组，长街、三门组缢蛏鲜味显著高于乐清、福清组。张煜炯等[13]以同一批缢蛏稚贝为研究对象，分别采用浙江象山和福建云霄两地新鲜海水进行模拟养殖 25 d，通过分析两组样品的全脂成分，建立了两地差异性脂质数据库。吴延华[14]采集了三门

湾、象山港和定海湾 3 个养殖区域缢蛏, 分析其脂肪酸组成及脂质质量指数, 结果发现三门湾和象山港缢蛏无明显差异, 但均显著高于定海湾的样品(P<0.05)。品质差异分析主要有主成分分析(principal component analysis, PCA)[15–16]、偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)[17–18]、因子分析(factor analysis, FA)[19]等化学计量学方法。

但目前缢蛏品质差异分析的研究多局限于对单一养殖主体样本的比较, 这种方法受个体差异影响较大, 且县域范围较广, 仅以单个养殖主体样品为研究对象来区分不同产地缢蛏品质, 存在较多局限性。

本研究以夏季养殖缢蛏为研究对象, 随机采集临海、三门、宁海、象山浙江 4 个主产区 5 个不同主体的缢蛏样品(象山为滩涂养殖, 其余均为围塘养殖), 分析其外观性状、基本营养成分, 水解氨基酸组成、脂肪酸组成、蛏肉和蛏壳矿物质含量等指标, 通过主成分分析、偏最小二乘判别分析等化学计量学方法, 筛选出不同产区缢蛏的品质差异特征, 为建立更加科学可靠的缢蛏产地溯源判定模型, 赋能地理标志产品的保护与品质控制积累数据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

鲜活缢蛏分别于 2025 年 6 月采自台州临海(LH)、三门(SM)、宁波宁海(NH)、象山(XS)各 5 份, 共计 20 份样品。带泥低温运至实验室, 用流水清洗去除表面淤泥, 经海水暂养吐泥, 洗净沥干体表水分, 每个样品取 10 只大小均匀的测量壳长、壳宽、壳高、总重、壳重等物理参数; 其余带壳于–60 ℃冻干后取缢蛏肉粉碎备用。

标准品: 17 种氨基酸混合标准溶液(天门冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸, 2.50 μmol/mL, 日本富士胶片和光纯药株式会社); 37 种脂肪酸甲酯标准溶液(清单详见表 1, 纯度>99%, 上海安谱璀世标准技术服务有限公司); 硒标准溶液[质量浓度 1000 mg/L, 安谱云实验用品(上海)有限公司]; 多元素标准溶液、钙钾镁钠多元素标准溶液、磷标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 柠檬酸钠(分析纯)、硫酸(优级纯)(国药集团化学试剂有限公司); 盐酸(优级纯, 西陇科学股份有限公司); 石油醚(分析纯, 上海润捷科技发展有限公司); 无水乙醇、无水乙醚(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司); 苯酚(分析纯, 江苏强盛功能化学股份有限公司); 正庚烷(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司)。

1.2　仪器与设备

IP54 游标卡尺[0~200 mm, 上海美耐特实业(集团)有限公司]; PR1602 ZH/E 电子天平(精度 0.01 g, 美国奥豪斯公司); MS204S/01 电子天平(精度 0.0001 g, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); Alpha 1-4 LSC basic 冻干机(德国 Christ 公司); JYL-Y16 高速匀浆调理机(九阳股份有限公司); UF260 鼓风干燥箱(德国 Memmert 公司); prepASH229 水分灰分测定仪(瑞士普利赛斯公司); UV2600 紫外可见分光光度计(日本岛津公司); ST202A 自动水浴回流提取仪(济南盛泰电子科技有限公司); K-375 全自动凯氏定氮仪、R-300 旋转蒸发仪(瑞士步琦有限公司); SW23 恒温水浴振荡器(德国优莱博公司); UltraCLAVE 超级微波消解仪(意大利 Milestone 公司); ICP RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); AVIO500 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 PE 公司); LA8080 全自动氨基酸分析仪(日本日立公司); F80 气相色谱仪(浙江福立分析仪器有限公司); CD-2560 色谱柱(100 m×0.25 mm, 0.2 μm, 上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　缢蛏外观物理性状测定

每份样品分别取 10 只大小均匀的经暂养洗净沥干的鲜活缢蛏, 用游标卡尺测量其壳长、壳宽、壳高, 用电子天平称其总重, 去肉沥干汁液后称量壳重, 总重减去壳重计为软体部重。

1.3.2　缢蛏营养成分测定

取冻干粉碎的缢蛏肉缓至室温, 依次测定水分、粗蛋白、总糖含量。水分测定采用 GB 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; 粗蛋白测定采用 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; 总糖测定参考 GB/T 9695.31—2008《肉制品 总糖含量测定》第一法 分光光度法测定。

1.3.3　缢蛏中氨基酸的测定

按照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》方法测定冻干缢蛏中 17 种氨基酸含量。准确称取缓至室温的缢蛏冻干粉 0.1 g(精确至 0.0001 g), 加入 10 mL 6 mol/L 盐酸溶液, 3 滴苯酚充氮后于(110±1) ℃电热鼓风干燥箱中水解 22 h, 冷却后过滤定容至 50 mL, 振荡混匀。准确吸取 1.0 mL 于 40 ℃氮吹浓缩至干, 用 2.0 mL pH 2.2 柠檬酸钠缓冲溶液复溶, 振荡混匀后经 0.22 μm 滤膜过滤, 经氨基酸分析仪测定。

1.3.4　缢蛏中脂肪酸的测定

按照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》第二法 外标法测定。根据蛏干中脂肪含量, 称取 4 g(精确至 0.0001g)缢蛏冻干粉, 于 75 ℃下经 8.3 mol/L 盐

酸水解 40 min, 水解后冷却至室温。经无水乙醇、乙醚、石油醚混合液重复提取 3 遍后, 旋蒸浓缩得脂肪提取物。于 80 ℃水浴回流皂化和脂肪酸甲酯化, 经正庚烷萃取富集后, 取上层溶液经气相色谱仪测定, 37 种脂肪酸甲酯标准溶液如表 1 所示。

1.3.5 *缢蛏肉及外壳中的矿物元素的测定*

称取 0.1 g(精确至 0.0001 g)缢蛏肉冻干粉、蛏壳粉按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法 电感耦合等离子体质谱法分别测定缢蛏和蛏壳中钠、钾、钙、镁、铁、锌、锰、铜、硒 9 种元素含量; 第二法 电感耦合等离子体发射光谱法分别测定缢蛏和蛏壳中磷元素含量。

所有检测均进行 3 次平行实验。氨基酸、脂肪酸、矿物元素含量等关键指标检测均遵循标准流程, 经验证, 回收率在 95%~105%之间, 相对标准偏差小于 5%, 符合实验室质量控制要求。

表 1 37 种脂肪酸甲酯混合标准溶液

Table 1 Mixed standard solution of 37 kinds of fatty acid methyl esters

序号	正式名称	常见名称/俗称	标记(关键营养素)	序号	正式名称	常见名称/俗称	标记(关键营养素)
1	丁酸甲酯	丁酸甲酯	C4:0	20	顺,顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯	亚油酸甲酯	C18:2n6c
2	己酸甲酯	己酸甲酯	C6:0	21	二十碳酸甲酯	花生酸甲酯	C20:0
3	辛酸甲酯	辛酸甲酯	C8:0	22	顺,顺,顺-6,9,12-十八碳三烯酸甲酯	γ-亚麻酸甲酯	C18:3n6
4	癸酸甲酯	癸酸甲酯	C10:0	23	顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯	α-亚麻酸甲酯	C18:3n3
5	十一碳酸甲酯	十一酸甲酯	C11:0	24	顺-11-二十碳一烯酸甲酯	鳕油酸甲酯	C20:1
6	十二碳酸甲酯	月桂酸甲酯	C12:0	25	二十一碳酸甲酯	二十一酸甲酯	C21:0
7	十三碳酸甲酯	十三酸甲酯	C13:0	26	顺,顺-11,14-二十碳二烯酸甲酯	二十碳二烯酸甲酯	C20:2
8	十四碳酸甲酯	肉豆蔻酸甲酯	C14:0	27	二十二碳酸甲酯	山嵛酸甲酯	C22:0
9	顺-9-十四碳一烯酸甲酯	肉豆蔻油酸甲酯	C14:1	28	顺,顺,顺-8,11,14-二十碳三烯酸甲酯	二高-γ-亚麻酸甲酯	C20:3n6
10	十五碳酸甲酯	十五酸甲酯	C15:0	29	顺-13-二十二碳一烯酸甲酯	芥酸甲酯	C22:1n9
11	顺-10-十五碳一烯酸甲酯	十五碳一烯酸甲酯	C15:1	30	顺-11,14,17-二十碳三烯酸甲酯	二十碳三烯酸甲酯	C20:3n3
12	十六碳酸甲酯	棕榈酸甲酯	C16:0	31	顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸甲酯	花生四烯酸甲酯	C20:4n6
13	顺-9-十六碳一烯酸甲酯	棕榈油酸甲酯	C16:1	32	二十三碳酸甲酯	二十三酸甲酯	C23:0
14	十七碳酸甲酯	十七酸甲酯	C17:0	33	顺 13,16-二十二碳二烯酸甲酯	二十二碳二烯酸甲酯	C22:2
15	顺-10-十七碳一烯酸甲酯	十七碳一烯酸甲酯	C17:1	34	二十四碳酸甲酯	木蜡酸甲酯	C24:0
16	十八碳酸甲酯	硬脂酸甲酯	C18:0	35	顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯	二十碳五烯酸甲酯	C20:5
17	反-9-十八碳一烯酸甲酯	反式油酸甲酯	C18:1n9t	36	顺-15-二十四碳一烯酸甲酯	神经酸甲酯	C24:1
18	顺-9-十八碳一烯酸甲酯	油酸甲酯	C18:1n9c	37	顺 4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸甲酯	二十二碳六烯酸甲酯	C22:6n3
19	反,反-9,12-十八碳二烯酸甲酯	反式亚油酸甲酯	C18:2n6t				

1.4　数据处理

采集的数据分别经仪器定量分析软件分析，所有数据为 3 次独立重复实验的平均值，以平均值±标准偏差表示。采用 Origin Pro 2025 绘制箱式图，SMICA 14.1 软件进行主成分、偏最小二乘判别分析，Excel 2016 整理数据及绘制图表。

2　结果与分析

2.1　缢蛏规格性状及营养成分分析

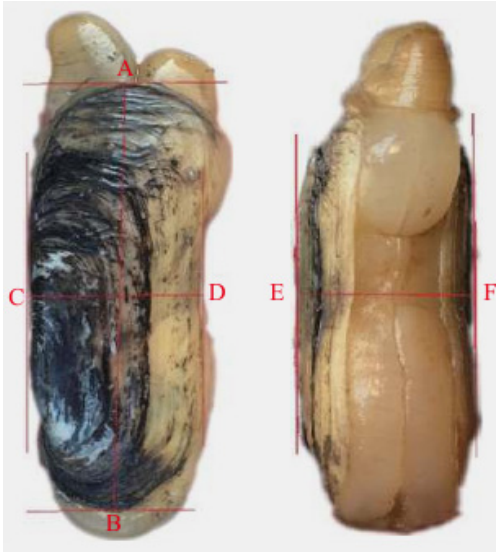
缢蛏样品采集位置如图 1 所示，按图 2 方法[20]测定缢蛏的壳高、壳长、壳宽；用电子天平称量其总重、壳重，两者相减得软体部重；以全自动凯氏定氮法测定缢蛏中蛋白质含量；以分光光度法测定缢蛏中总糖含量，20 个样品上述指标的箱式图如图 3 所示。从外观性状指标看：临海、宁海采集的样品在长度、重量上较为集中，象山采集的样品较离散，三门采集的样品外观性状普遍处于中位值以上。物理指标最大的来自于三门县 5 号样品，最小的来自于象山县 2 号样品。从蛋白质和总糖含量看，不同缢蛏间总糖含量差异大，样品分布离散；蛋白质含量分布则相对集中，蛋白质、总糖含量最高的样品均为三门县 2 号样品，蛋白质含量最低的为临海市 4 号样品，总糖含量最低的则为象山县 2 号样品。



注：XS1~XS5 代表象山县采集样品；NH1~NH5 代表宁海县采集样品；SM1~SM5 代表三门县采集样品；LH1~LH5 代表临海市采集样品；[图 4(b)同]。

图 1　缢蛏样品信息

Fig.1　Sample informations of the *Sinonovacula constricta*



注：d_{AB} 为壳长；d_{CD} 为壳高；两壳合拢后，E、F 间最大距离为壳宽。

图 2　缢蛏壳形态性状测量位点

Fig.2　Landmark points of morphological measurement in *Sinonovacula constricta*

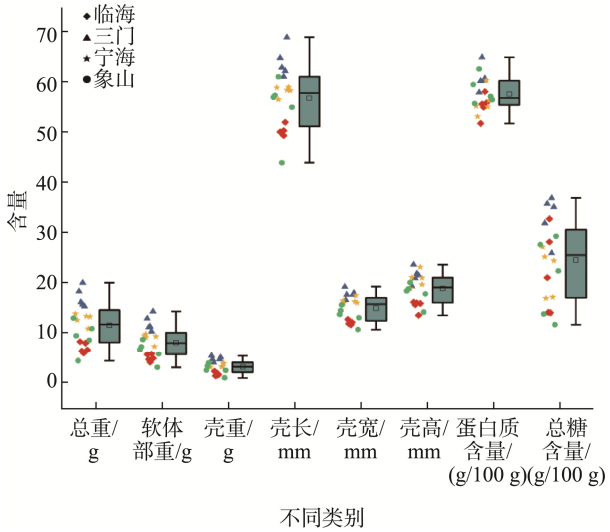


图 3　不同产地缢蛏外观性状及粗蛋白、总糖含量箱式图

Fig.3　Box plots of the appearance characteristics, crude protein and total sugar content of the *Sinonovacula constricta* from different origin

2.2　缢蛏中氨基酸组成及含量分析

不同产地缢蛏软组织中氨基酸含量如表 2、图 4 所示。由表 2 数据可知，缢蛏中呈味氨基酸含量丰富，占总氨基酸含量约 50%，其中谷氨酸、天门冬氨酸、丙氨酸含量尤为丰富，居缢蛏各氨基酸含量排行榜前 3，是缢蛏鲜味的主要贡献者，这与崔燕等[12]、李太武等[22]研究结果一致。缢蛏富含人体所需 8 种必需氨基酸，其组成占总氨基酸含量的 40%[23]，以赖氨酸、亮氨酸为主。赖氨酸在蛋白质

代谢、营养和表观基因调控中具有独特作用，有助于人体生长发育、增强机体免疫力、缓解焦虑情绪[24–26]。雷晓凌等[27]研究发现缢蛏中赖氨酸含量位居第 4，且效价最高。此外，缢蛏中含有较多精氨酸及适量脯氨酸、组氨酸。研究表明，丙氨酸、精氨酸、脯氨酸的积累有助于缢蛏适应环境盐度变化[28]。从氨基酸总量及占比看，三门、宁海产区与临海、象山产区缢蛏中总氨基酸含量差值较显著(P<0.05)，其中三门、象山产区缢蛏总氨基酸含量分别为 49.88 g/100 g、差值最大，达 7.45 g/100 g；而必需氨基酸占总氨基酸百分比差值最小，分别为宁海 41.52%，象山 39.61%，极差为 1.91%。表 2 列出的 23 个氨基酸指标中三门缢蛏有 20 个指标含量居 4 个产地缢蛏之首，表现出较为优异的氨基酸品质。

2.3 缢蛏中脂肪酸含量及组成分析

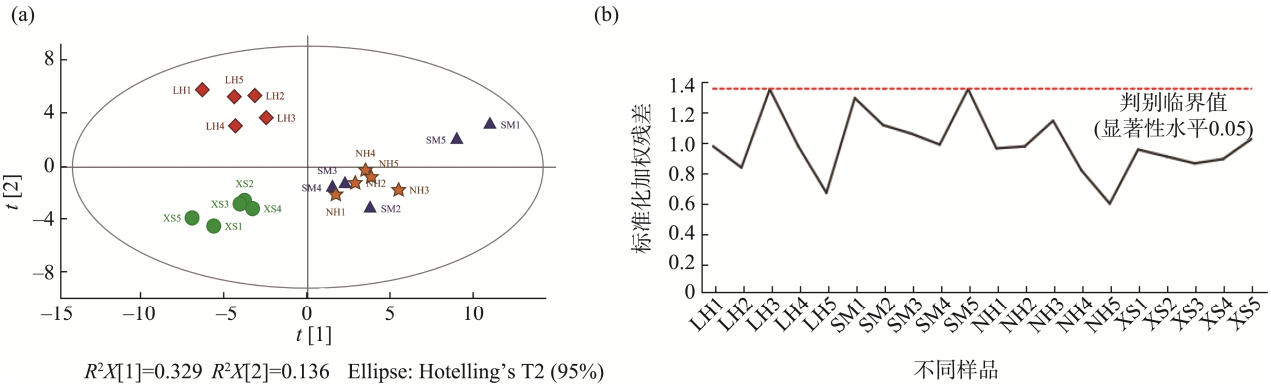
缢蛏富含多不饱和脂肪酸，实验结果显示，缢蛏中不饱和脂肪酸含量高，其中多不饱和脂肪酸占 34%~42%。高含量的多不饱和脂肪酸反映肌肉的多汁性，且能显著增加香味。研究表明，二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)贝类本身不能合成，其含量与摄食饵料有关[29]。表 3 列出 4 个产地缢蛏中百分含量高于 1%的脂肪酸，百分含量排名靠前的有 C20:5n3 (EPA)、C16:0(棕榈酸)、C22:6n3 (DHA)、C16:1(棕榈油酸)。由表 3 数据可知，从三门采集的缢蛏样本中多不饱和脂肪酸平均含量最高，象山采集的样本含量最低，单从多不饱和脂肪酸含量比较，采集样本中三门缢

表 2 不同产地缢蛏中氨基酸组成及含量(干重)

Table 2 Amino acid composition and content of *Sinonovacula constricta* in different regions (dried weight)

氨基酸	临海	三门	宁海	象山
总氨基酸/(g/100 g)	42.90±0.97^{a}	49.88±3.63^{b}	46.75±2.23^{b}	42.43±2.97^{a}
非必需氨基酸/(g/100 g)	25.82±0.58^{a}	29.55±1.74^{b}	27.35±1.47^{a}	25.62±1.69^{a}
精氨酸/(g/100 g)	3.53±0.07^{a}	3.93±0.54^{b}	3.45±0.06^{a}	3.29±0.18^{a}
脯氨酸/(g/100 g)	1.59±0.03^{a}	1.88±0.15^{b}	1.85±0.08^{b}	1.62±0.14^{a}
组氨酸/(g/100 g)	1.01±0.07^{a}	1.20±0.01^{b}	1.18±0.02^{b}	1.02±0.07^{a}
半胱氨酸/(g/100 g)	0.246±0.180^{a}	0.366±0.270^{ab}	0.565±0.140^{b}	0.456±0.120^{ab}
必需氨基酸/(g/100 g)	17.08±0.49^{a}	20.33±1.98^{b}	19.40±0.77^{b}	16.81±1.30^{a}
(必需氨基酸/总氨基酸)/%	39.81±0.54^{ab}	40.70±1.19^{bc}	41.52±0.33^{c}	39.61±0.51^{a}
赖氨酸/(g/100 g)	3.30±0.07^{a}	4.06±0.48^{b}	3.73±0.06^{b}	3.21±0.17^{a}
亮氨酸/(g/100 g)	3.08±0.08^{a}	3.69±0.44^{b}	3.50±0.17^{b}	3.08±0.28^{a}
苏氨酸/(g/100 g)	2.12±0.12^{a}	2.44±0.18^{b}	2.37±0.13^{b}	2.07±0.16^{a}
缬氨酸/(g/100 g)	2.00±0.06^{a}	2.40±0.24^{b}	2.28±0.10^{b}	1.97±0.15^{a}
异亮氨酸/(g/100 g)	1.90±0.10^{ab}	2.25±0.23^{c}	2.13±0.11^{bc}	1.85±0.17^{a}
苯丙氨酸/(g/100 g)	1.85±0.05^{a}	2.25±0.19^{b}	2.23±0.10^{b}	1.88±0.15^{a}
酪氨酸/(g/100 g)	1.65±0.06^{a}	1.92±0.14^{b}	1.89±0.09^{b}	1.65±0.16^{a}
甲硫氨酸/(g/100 g)	1.18±0.11^{ab}	1.32±0.15^{b}	1.34±0.12^{b}	1.10±0.09^{a}
呈味氨基酸/(g/100 g)	19.45±0.67^{a}	22.19±1.42^{b}	20.33±1.30^{a}	19.23±1.36^{a}
(呈味氨基酸/总氨基酸)/%	45.34±0.86^{b}	44.52±1.20^{ab}	43.46±0.68^{a}	45.33±0.71^{b}
谷氨酸*/(g/100 g)	6.20±0.38^{a}	7.15±0.72^{b}	6.87±0.25^{b}	6.08±0.47^{a}
天门冬氨酸*/(g/100 g)	4.39±0.19^{ab}	5.13±0.57^{c}	4.77±0.10^{bc}	4.20±0.31^{a}
丙氨酸*/(g/100 g)	4.07±0.49^{ab}	4.58±0.51^{b}	3.58±0.59^{a}	4.17±0.52^{ab}
甘氨酸*/(g/100 g)	2.61±0.07^{a}	2.86±0.20^{a}	2.76±0.31^{a}	2.71±0.22^{a}
丝氨酸*/(g/100 g)	2.19±0.21^{ab}	2.46±0.15^{c}	2.36±0.10^{bc}	2.08±0.13^{a}

注: *之和为呈味氨基酸含量[21]。同行不同上标字母表示组间差异显著(P<0.05)；下同。



注: (a) PCA 分布图; (b)模型拟合诊断图。

图 4　不同产地缢蛏 PCA 结果

Fig. 4　PCA results of *Sinonovacula constricta* in different regions

表 3　不同产地缢蛏的脂肪酸百分含量组成(%，干重)

Table 3　Fatty acid percentage content composition of *Sinonovacula constricta* in different regions (%, dried weight)

	临海	三门	宁海	象山
Σ 饱和脂肪酸	35.17±2.76^{a}	35.44±2.95^{a}	37.27±1.55^{ab}	39.57±2.57^{b}
C16:0	15.41±1.91^{a}	15.98±1.11^{a}	17.96±0.74^{b}	15.58±1.67^{a}
C18:0	8.72±1.11^{b}	7.50±0.22^{a}	7.54±0.80^{a}	10.37±0.92^{c}
C14:0	4.33±0.63^{a}	4.79±1.14^{ab}	5.36±0.32^{b}	5.80±0.58^{b}
C17:0	2.35±0.58^{a}	2.20±0.19^{a}	2.25±0.25^{a}	2.32±0.49^{a}
C23:0	1.20±0.33^{ab}	1.94±0.78^{c}	0.80±0.06^{a}	1.81±0.55^{bc}
C15:0	1.43±0.27^{ab}	1.26±0.21^{a}	1.58±0.07^{b}	1.39±0.10^{ab}
Σ 单不饱和脂肪酸	22.58±2.17^{a}	23.39±1.01^{a}	24.54±1.07^{a}	23.22±0.66^{a}
C16:1	11.32±2.31^{ab}	10.34±1.13^{a}	9.89±2.13^{a}	13.35±0.91^{b}
C20:1	5.02±1.61^{ab}	5.98±0.32^{bc}	7.05±0.96^{c}	4.23±0.42^{a}
C18:1n9c	3.23±0.69^{ab}	3.36±0.79^{ab}	3.99±0.53^{b}	2.65±0.27^{a}
C18:1n9t	1.34±0.19^{ab}	1.76±0.38^{ab}	1.50±0.13^{b}	1.66±0.33^{a}
Σ 多不饱和脂肪酸	41.27±0.89^{bc}	41.46±2.08^{c}	38.85±2.17^{b}	34.70±1.86^{a}
C20:5n3 (EPA)	20.03±2.30^{b}	20.17±3.72^{b}	14.66±1.60^{a}	18.73±1.38^{b}
C22:6n3 (DHA)	12.21±1.49^{b}	11.69±2.99^{b}	13.75±1.36^{b}	7.84±0.84^{a}
C20:3n3	3.19±0.76^{a}	2.97±0.63^{a}	2.99±0.47^{a}	2.71±0.12^{a}
C18:3n3	1.71±0.28^{a}	1.52±0.36^{a}	1.66±0.24^{a}	1.74±0.28^{a}
C20:2	1.70±0.53^{ab}	2.22±0.43^{bc}	2.58±0.84^{c}	1.36±0.12^{a}
C18:2n6c	1.28±0.51^{a}	1.82±0.40^{b}	2.13±0.43^{b}	1.02±0.18^{a}

注：仅列出含量在 1%以上的脂肪酸。

蛏口感高于象山产。周率等[30]研究发现就脂肪酸而言，缢蛏稚贝投喂金藻的混合藻饵料后，对人体有益的多不饱和脂肪酸含量增加。另外，脂肪酸含量与盐度有关，长链多不饱和脂肪酸在高盐环境下合成活跃，百分含量逐渐增加[31–32]。这在一定程度上解释了三门采缢蛏与象山采缢蛏在脂肪酸含量组成上的差异：本次研究采集的三门缢蛏均为围塘养殖，规格普遍大于象山采的滩涂养殖缢蛏，在饵料管理和盐度控制上，围塘养殖较滩涂养殖精细。

2.4　缢蛏软组织及蛏壳中矿物元素分析

表 4、表 5 分别给出了 4 个产地缢蛏软组织、蛏壳中常量元素钠、钾、磷、钙、镁和微量元素铁、锌、锰、铜、

表 4 不同产地缢蛏软组织中矿物元素含量(干重)

Table 4 Content of mineral composition in soft tissues of *Sinonovacula constricta* from different regions (dried weight)

		临海	三门	宁海	象山
常量元素/(g/kg)	钠	27.31±2.35^{c}	14.69±3.70^{a}	20.89±5.11^{ab}	23.17±5.25^{bc}
	钾	10.21±0.50^{a}	9.53±2.01^{a}	9.37±0.94^{a}	11.22±2.41^{a}
	磷	6.30±0.29^{a}	7.21±0.77^{ab}	7.78±0.24^{b}	7.04±1.60^{ab}
	钙	3.95±1.19^{a}	7.06±0.97^{ab}	10.84±1.17^{b}	18.32±5.01^{c}
	镁	3.27±0.13^{c}	2.06±0.50^{a}	2.57±0.31^{ab}	3.62±1.02^{bc}
微常量元素/(mg/kg)	铁	827.26±35.46^{b}	624.46±146.47^{a}	1358.36±34.99^{c}	918.23±188.15^{b}
	锌	140.68±8.25^{b}	109.69±35.05^{a}	119.64±4.97^{ab}	98.28±14.58^{a}
	锰	25.21±1.71^{b}	13.76±6.62^{a}	46.79±8.85^{d}	35.77±4.83^{c}
	铜	31.61±2.53^{c}	16.46±5.84^{a}	34.00±3.01^{c}	25.47±4.72^{b}
	硒	7.46±1.47^{ab}	6.74±1.38^{a}	9.03±1.63^{bc}	9.57±1.16^{c}

表 5 不同产地缢蛏壳中矿物元素含量(干重)

Table 5 Content of mineral composition in *Sinonovacula constricta* shells from different regions (dried weight)

		临海	三门	宁海	象山
常量元素/(g/kg)	钠	4.70±0.38^{a}	6.96±1.30^{b}	8.03±0.19^{bc}	8.39±0.40^{c}
	钾	0.44±0.16^{a}	0.53±0.16^{a}	0.52±0.17^{a}	0.59±0.20^{a}
	磷	0.10±0.03^{a}	0.18±0.08^{a}	0.19±0.05^{a}	0.18±0.07^{a}
	钙	0.24±0.05^{a}	0.31±0.02^{a}	0.32±0.04^{a}	0.40±0.07^{b}
	镁	265.86±18.56^{a}	329.18±39.26^{b}	360.11±5.92^{b}	332.97±29.74^{b}
微常量元素/(mg/kg)	铁	288.01±49.83^{a}	434.34±98.24^{b}	455.03±38.15^{b}	396.84±44.93^{b}
	锌	1.71±0.12^{a}	2.10±0.57^{ab}	2.42±0.28^{b}	2.11±0.23^{ab}
	锰	26.89±1.08^{a}	33.88±8.28^{bc}	32.64±3.37^{ab}	39.45±3.22^{c}
	铜	1.96±0.10^{a}	2.23±0.21^{ab}	1.86±0.04^{a}	2.47±0.60^{b}
	硒	10.95±1.32^{a}	18.38±1.82^{b}	17.38±1.15^{b}	19.47±2.60^{b}

硒测定结果。缢蛏软组织中富含多种对人体有益的微量元素, 含量由高到低依次为: 铁、锌、锰(铜)和硒, 且产地间差异显著(P<0.05), 宁海缢蛏普遍高于三门缢蛏。与软组织相比, 蛏壳中矿物元素组成含量差异较小, 临海产缢蛏壳中矿物元素含量较低。

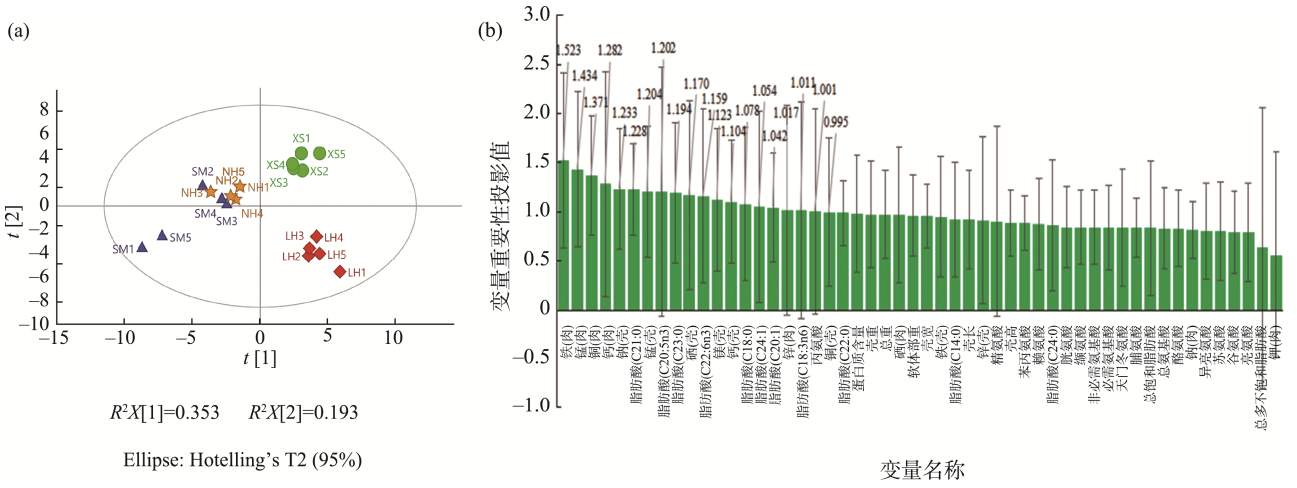
2.5 缢蛏多参数融合化学计量分析

对上述所测 4 个产地缢蛏形态性状、营养成分、氨基酸组成及含量、脂肪酸组成及含量和矿物元素含量等 82 项参数进行无监督的主成分分析, 以探索数据的整体结构。PCA 分析结果[图 4(a)]显示, 前两个主成分累计解释了数据中约 50%的变异, 临海与象山产区的样品呈现较好的分离趋势, 但三门和宁海产区部分重叠。图 4(b)模型拟合诊断图显示所有样本的标准化加权残差值均在 0.05 显著性水平下的判别临界线之下, 表明数据集中不存在统计异常值, 模型稳健可靠。

在 PCA 基础上, 采用有监督模式的 PLS-DA 进一步分析差异性。按照 PLS-DA 模型中的变量重要性投影(variable importance in the projection, VIP)值大于 1 的标准筛选出 34 个参数, 结合 PCA 中在 PC-1 和 PC-2 上的载荷值的平方和排名前 50%的参数, 合并同类项后共筛选出 52 个参数, 对筛选出的 52 个参数开展 PLS-DA 分析, 仍不能有效区分三门和宁海的样本, 图 5(a)展现的是 52 个参数的 PLS-DA 图, 图 5(b)展现的是 52 个参数的 VIP 值。

通过 52 个参数的 PLS-DA 模型, 筛选出 19 个 VIP>1 的参数, 分别为蛏肉中的铁、锰、铜、钙、锌(以 T 为前缀), 蛏壳中的钠、锰、硒、镁、钙(以 S 为前缀), C20:5n3 (EPA)、C22:6n3 (DHA)等 8 种脂肪酸和丙氨酸。

对筛选出的 19 个参数再次开展 PLS-DA 分析, 得图 6(a), 其自变量拟合指数(R^2X)为 0.770, 因变量拟合指数(R^2Y)为 0.929, 模型预测指数(Q^2)为 0.832, 表明该模型中两个主成分能有效解释 4 个产地之间的差异, 且预测能力较好(R^2>0.5, Q^2>0.5)[33–35]。19 个参数的载荷图如图 6(b)所示,

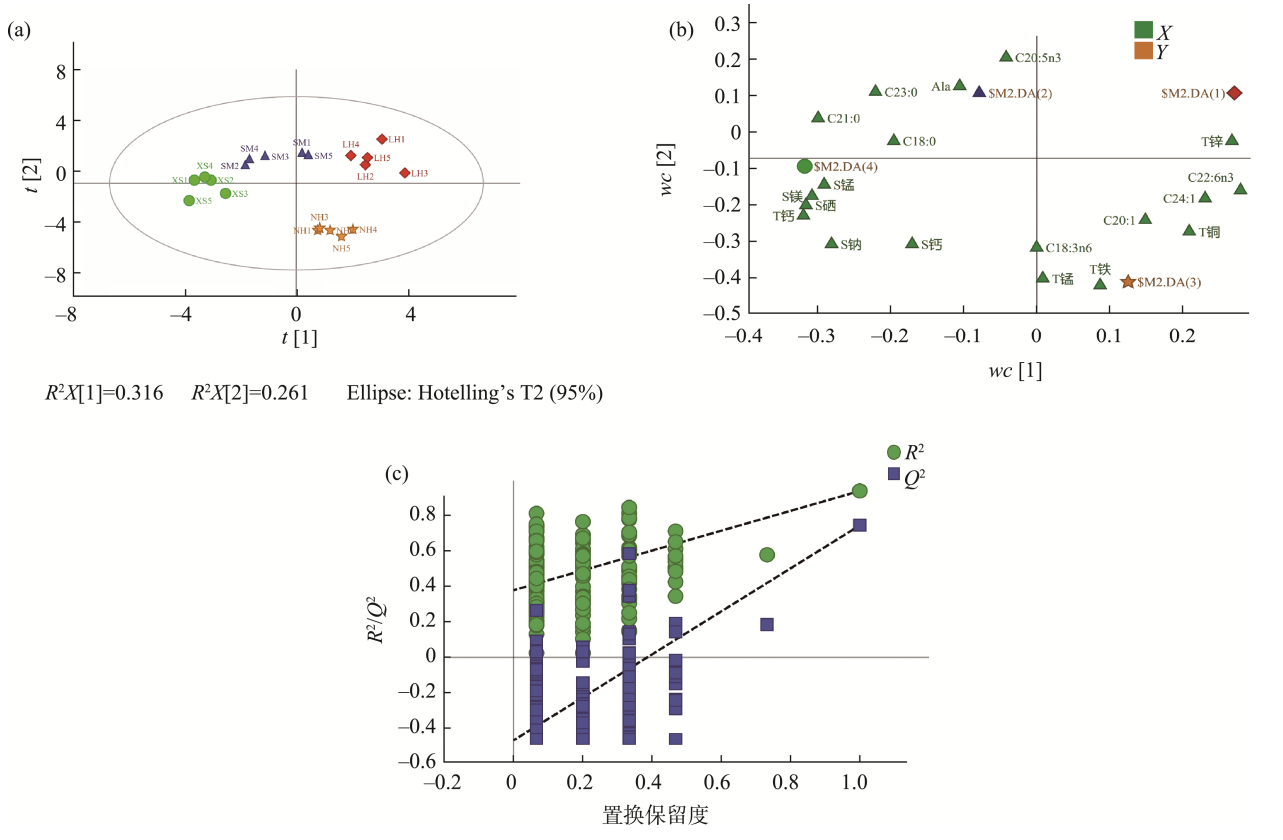


注: (a) PLS-DA 分布图; (b)不同参数变量重要性投影值。

图 5　不同产地缢蛏 PLS-DA 结果(52 个参数)

Fig.5　PLS-DA results of *Sinonovacula constricta* in different regions (52 parameters)

由载荷图可知，19 个参数均离原点较远，表明其可作为不同产区缢蛏判别的特征参数。为了进一步验证该模型的可预测性，进行了 200 次模型置换交叉检验[图 6(c)]，随着置换保留度逐渐降低，随机模型的 R^2 和 Q^2 逐渐下降(R^2=0.303<0.5，Q^2=–0.527<0)，说明原模型稳健性良好，不存在过拟合现象[36–37]。



注: ◆代表临海 LH; ▲代表三门 SM; ★代表宁海 NH; ○代表象山 XS。

(a) PLS-DA 分布图; (b) PLS-DA 载荷散点图; (c)置换交叉检验图。

图 6　不同产地缢蛏 PLS-DA 分析(19 个参数)

Fig. 6　PLS-DA results of *Sinonovacula constricta* in different regions (19 parameters)

3 结论与讨论

本研究通过系统分析浙江 4 个主产区缢蛏的 82 项品质参数，明确了其在外观性状、营养成分和矿物元素组成上的差异。三门产缢蛏在氨基酸和脂肪酸综合品质上表现突出，宁海产缢蛏富含微量元素，而象山产缢蛏整体营养指标相对较低。PCA 主成分分析初步揭示了产区间的差异，但难以完全区分宁海与三门样本。结合主成分分析各参数的载荷值和偏最小二乘判别分析 VIP 值，筛选出 19 个特征参数，包括 10 种矿物元素、8 种脂肪酸组成和丙氨酸，PLS-DA 分析模型显示该 19 种特征参数能完全区分 4 个产区缢蛏，其 $R^2(X)$=0.770，$R^2(Y)$=0.929，Q^2=0.832，所建判别模型具有较高的解释度和预测能力。200 次模型置换交叉检验结果显示该模型没有过拟合现象。

3.1 品质差异成因与产地特异性机制分析

不同产区缢蛏品质差异的形成是养殖环境与生物响应的综合体现。研究结果表明，蛏肉营养指标(氨基酸、脂肪酸)与蛏壳矿物元素可作为互补的产地判别指标。蛏壳元素的生物矿化过程是产地判别的重要机制。蛏壳中的钠、锰、硒等元素直接来源于水体中的溶解态离子，其组成受海水化学特征(如钠离子/钙离子比值)和底质矿物组成的影响。宁海产区缢蛏壳中较高的微量元素含量可能与该海域泥质底质富含矿物元素有关。蛏壳形成过程中的生物矿化作用将这些环境特征“记录”下来，形成稳定的地理指纹。蛏肉中的不饱和脂肪酸(如 EPA、DHA)和氨基酸则更多地反映了营养代谢过程。三门产区缢蛏较高的多不饱和脂肪酸比例可能与当地围塘养殖的盐度调控(15‰~25‰)和丰富的天然饵料资源有关，适度的盐度变化可刺激脂质代谢。

3.2 养殖模式对判别模型的影响分析

本研究包含围塘(临海、三门、宁海)与滩涂(象山)两种养殖模式。虽然养殖模式可能影响缢蛏的生长速率和部分营养指标，但判别模型依然展现出良好的产区区分能力，这表明筛选出的特征参数具有较强的产地特异性。值得注意的是，蛏壳元素(如钠、锰、硒)在区分养殖模式与产地效应方面表现出不同的重要性。蛏壳作为直接与环境接触的矿化组织，其元素组成可能同时受养殖环境水体特征和地理背景的双重影响。尽管如此，模型对 3 个围塘养殖毗邻产区(三门、宁海、临海)仍表现出良好的区分能力，说明这些特征参数能够在相当程度上克服养殖模式差异带来的干扰，捕捉到地理来源的本质差异。

3.3 模型对科学问题的回应与展望

本研究建立的基于“蛏肉-蛏壳”多指标融合的判别模型，有效回应了“毗邻产区品质区分”和“壳肉特征融合判别”两个核心科学问题。通过 19 个关键参数，模型不仅成功区分了养殖模式不同的象山滩涂样本，还能有效辨别地理邻近、养殖模式相同的 3 个围塘产区。这种“代谢指标与环境印记”相结合的策略，为复杂背景下的水产品产地溯源提供了新思路。模型的高判别准确率[$R^2(Y)$=0.929，Q^2=0.832]证明了这种多维度信息融合的有效性。

本研究亦存在一定局限性，所有样本均采集与同一季节(6 月)，未能涵盖缢蛏品质的季节性动态变化；每个县(市)仅采集 5 个样本，覆盖范围较小。未来研究将扩大样本量和时空覆盖范围，纳入更多养殖环境参数(如水质、底质、饵料组成)，建立“环境-品质”相关模型，进一步提升模型的机制解释深度和实际应用中的稳定性。同时在更广的地理范围和养殖模式下验证模型的普适性，为鉴别缢蛏地理标志产品真伪、提高品牌价值、促进缢蛏产业高质量发展提供重要技术支撑。

参考文献

[1] GUO ZQ, CHEN YK, DU XX, *et al*. Ammonia-induced oxidative stress triggered apoptosis in the razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(15): 22380–22394.

[2] WANG C, CHU JJ, FU LL, *et al*. iTRAQ-based quantitative proteomics reveals the biochemical mechanism of cold stress adaption of razor clam during controlled freezingpoint storage [J]. Food Chemistry, 2018, 247: 73–80.

[3] PENG MX, LIU XJ, NIU DH, *et al*. Survival, growth and physiology of marine bivalve (*Sinonovacula constricta*) in long-term low-salt culture [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 2819.

[4] CAO W, BI SQ, CHI CF, *et al*. Effects of high salinity stress on the survival, gill tissue, enzyme activity and free amino acid content in razor clam *Sinonovacula constricta* [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 839614.

[5] 宣晓婷, 钟建永, 尚海涛, 等. 缢蛏营养品质及其影响因素研究进展[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(2): 144–149.
XUAN XT, ZHONG JY, SHANG HT, *et al*. Research progress of nutritional quality and influencing factors of *Sinovovacula constricta* [J]. Storage and Process, 2025, 25(2): 144–149.

[6] 杜鑫鑫, 牛东红, 张树源, 等. 不同缢蛏群体应对高盐养殖环境的潜沙和摄食响应能力[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(3): 203–213.
DU XX, NIU DH, ZHANG SY, *et al*. Burrowing and feeding responses of different populations of *Sinonovacula constricta* to high-salt culture environment [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(3): 203–213.

[7] FREYTES-ORTIZ IM, STALLINGS CD. Elevated temperatures suppress inducible defenses and alter shell shape of intertidal mussel [J]. Marine Biology, 2018, 165(7): 113.

[8] HIKARUU S, RYO O, KOSUKE S, *et al*. Impact of salinity changes on burrowing behavior and energy metabolism in juvenile razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. Aquaculture Reports, 2025, 45: 103098.

[9] YANG YM, NI JY, NIU DH, *et al*. Physiological response of the razor

clam *Sinonovacula constricta* exposed to hyposalinity stress [J]. Aquaculture and Fisheries, 2024, 9: 663–673.

[10] 黄呈炜, 王晗栋, 张清科, 等. 供饵式养殖中水质理化因子与缢蛏生长的相关性研究[J]. 中国水产, 2025, 9: 16–20.
HUANG CW, WANG HD, ZHANG QK, *et al*. Study on the correlation between water quality physicochemical factors and the growth of *Sinonovacula constricta* in bait-supplied aquaculture [J]. China Fisheries, 2025, 9: 16–20.

[11] 方增冰, 梅泊承, 赵淳朴, 等. 春季和秋季播苗的缢蛏(*Sinonovacula constricta*)生长模型及肥满度比较研究[J]. 海洋与湖沼, 2024, 3: 736–745.
FANG ZB, MEI BC, ZHAO CP, *et al*. Comparative study on growth modeling and fattening of *Sinonovacula constricta* sown in spring and fall [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2024, 3: 736–745.

[12] 崔燕, 钟建永, 朱麟, 等. 四个区域塘养殖缢蛏营养成分及其滋味组分差异分析[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(4): 132–143.
CUI Y, ZHONG JY, ZHU L, *et al*. Difference analysis of nutritional composition and taste components of pond razor clams (*Sinonovacula constricta*) in four different regions [J]. Storage and Process, 2025, 25(4): 132–143.

[13] 张煜炯, 孙崇鲁, 杨颖欣, 等. 高分辨质谱技术分析两地缢蛏的脂质差异性[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 216–224.
ZHANG YJ, SUN CL, YANG YX, *et al*. High resolution mass spectrometry analysis of lipid differences in *Sinonovacula constricta* from two regions [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 216–224.

[14] 吴延华. 养殖区域、生长过程及暂养方式对三种双壳贝类脂质营养品质的影响[D]. 宁波: 宁波大学, 2022.
WU YH. The effects of aquaculture area, growth and temporary culture on lipid nutritional quality of three species of bivalve shellfish [D]. Ningbo: Ningbo University, 2022.

[15] 秦力悦, 何代琴, 常雅欣, 等. 基于多元统计学分析余甘子果脯综合品质[J/OL]. 食品工业科技, 2025, 1-24. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030068
QIN LY, HE DQ, CHANG YX, *et a*l. Comprehensive quality analysis of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit based on multivariate statistical analysis [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 1-24. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030068

[16] 刘小琼, 王应清, 戴余波, 等. 基于多元统计方法分析福贡地区草果香气成分差异[J]. 热带农业科学, 2025, 45(8): 73–81.
LIU XQ, WANG YQ, DAI YB, *et al.* Analysis of aroma component differences in Amomum Tsaoko from Fugong areas via multivariate statistical methods [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2025, 45(8): 73–81.

[17] 苗震, 聂斌, 陈星鑫, 等. 基于偏最小二乘变量投影重要性探析协同作用关系[J]. 现代信息科技, 2025, 9(13): 83–94.
MIAO Z, NIE B, CHEN XX, *et al*. Analysis of synergistic relationship based on the importance of partial least squares variable projection [J]. Modern Information Technology, 2025, 9(13): 83–94.

[18] 柳薇, 邱熙文, 蒋立文, 等. 基于近红外光谱技术和变量筛选-偏最小二乘判别分析方法的铁皮石斛产地无损溯源[J]. 分析测试学报, 2025, 44(2): 246–252.
LIU W, QIU XW, JIANG LW, *et al*. Origin traceability of dendrobium candidum with near infrared spectroscopy and variable selection-partial least squares discriminant analysis [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(2): 246–252.

[19] 谢敏, 郑磊, 李志明, 等. 基于多指标定量测定联合 PCA、OPLS-DA、FA 及熵权 TOPSIS 模型的四季青等级预测[J]. 中国现代中药, 2025, 27(8): 1457–1465.
XIE M, ZHENG L, LI ZM, *et al*. Prediction of ilicis Chinensis folium grade based on multi-index quantitative determination combined with PCA, OPLS-DA, FA, and entropy weight TOPSIS model [J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(8): 1457–1465.

[20] 薛宝宝, 李浩, 牛东红, 等. 不同月龄缢蛏新品种数量性状的相关与通径分析[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 941–949.
XUE BB, LI H, NIU DH, *et al*. Correlation and path analysis of quantitative traits of new variety of *Sinonovacula constricta* at different months of age [J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 941–949.

[21] 周率, 冉照收, 于珊珊, 等. 几种微藻饵料对缢蛏稚贝脂质营养组成的影响[J]. 生物学杂志, 2016, 33(3): 52–56.
ZHOU L, RAN ZS, YU SS, *et al*. Effect of several diets on the composition of fatty acids and sterols in juvenile *Sinonovacula constricta* [J]. Journal of Biology, 2016, 33(3): 52–56.

[22] 李太武, 林叶, 苏秀榕. 不同群体缢蛏营养成分的多元性分析[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 548–551.
LI TW, LIN Y, SU XR. Multivariation analysis of nutrients of *Sinonovaculla constricta* lamarck in different populations [J]. Food Science, 2008, 29(11): 548–551.

[23] 林叶, 苏秀榕, 孙蓓, 等. 不同种群缢蛏氨基酸及脂肪酸比较研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 675–678.
LIN Y, SU XR, SUN B, *et al*. A comparative study on amino acid and fatty acid in *Sinonovacula constricta* of varied populations [J]. Food Science, 2006, 27(12): 675–678.

[24] HOLEČEK M. Lysine: Sources, metabolism, physiological importance, and use as a supplement [J]. International Journal of Molecular. Sciences, 2025, 26: 8791.

[25] XIAO CW, HENDRY A, KENNEY L, *et al*. L-*Lysine* supplementation affects dietary protein quality and growth and serum amino acid concentrations in rats [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 19943.

[26] SMRIGA M, ANDO T, AKUTSU M, *et al*. Oral treatment with *L*-lysine and *L*-arginine reduces anxiety and basal cortisol levels in healthy humans [J]. Biomedical Research, 2007, 28(2): 85–90.

[27] 雷晓凌, 吴红棉, 范秀萍, 等. 缢蛏肉的食品化学特性及其营养液的研制[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 4–7.
LEI XL, WU HM, FAN XP, *et al*. Food chemistry characteristics and development of nutritive liquid from *Sinonovacula constricta* (Lamarck) [J]. Marine Sciences, 2004, 28(12): 4–7.

[28] 邓敏, 刘瑞琦, 杨栋, 等. 脯氨酸对缢蛏高盐耐受性的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 77–85.
DENG M, LIU RQ, YANG D, *et al*. Effect of proline on high salt tolerance of razor clam [J]. Journal of Shanghai Ocean Uniersity, 2024, 33(1): 77–85.

[29] 杨建敏, 邱盛尧, 郑小东, 等. 美洲帘蛤软体部营养成分分析及评价[J]. 水产学报, 2003, 27(5): 495–498.
YANG JM, QIU SY, ZHENG XD, *et al*. Analysis and evaluation of nutritive composition in edible part of *Mercenaria mercenaria* [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(5): 495–498.

[30] 李娜. 贝类中氨基酸、脂肪酸和重金属的含量分析及其产品质量评价[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2011.
LI N. The amino acids, fatty acids and heavy metals content analysis of the shellfish and its product quality evaluation [D]. Shijiazhuang: Agricultural University of Hebei, 2011.

[31] 冉照收, 卢文奇, 徐继林, 等. 盐度对缢蛏稚贝脂肪酸和甾醇组成的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(9): 48–57.
RAN ZS, LU WQ, XU JL, *et al*. Salinity effect on fatty acid and sterol compositions of juvenile *Sinonovacula constricta* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(9): 48–57.

[32] FONSECA-MADEIGAL J, PINEDA-DELGADO D, MARTÍNEZ-PALACIOS C, *et al*. Effect of salinity on the biosynthesis of n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in silverside *Chirostoma estor* [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(4): 1047–1057.

[33] 张爱琴, 郭斌, 柳利龙, 等. 基于 ICP-MS 的甘肃不同产地小米矿物元素含量特征及判别分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 301–310.
ZHANG AIQ, GUO B, LIU LL, *et al*. Characteristics of mineral elements contents and discriminant analysis of foxtail millet from different producing areas in Gansu Province based on ICP-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 301–310.

[34] WU FH, ZHAO HA, SUN J, *et al*. ICP-MS-based ionomics method for discriminating the geographical origin of honey of Apis cerana Fabricius [J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129568–129568.

[35] XIAO XH, HUANG Q, RAO BY, *et al*. Integrating LC-MS based molecular networks and comparative metabolomics for variety identification and origin tracing of *Zanthoxylum nitidum* (Roxb.) DC [J]. Industrial Crop and Products, 2025, 226: 120633.

[36] WANG TY, LU H, TIAN YY, *et al*. Evaluation of aroma characteristics of *Eriocheir sinensis* meat as affected by environmental ammonia [J]. Food Chemistry: X, 2025, 30: 10295.

[37] 康新玥, 郭莹, 秦立芹, 等. 不同地区酱香型高温大曲制曲过程理化指标及挥发性化合物分析[J]. 中国酿造, 2025, 44(6): 116–122.
KANG XY, GUO Y, QIN LQ, *et al*. Analysis of physiochemical indicators and volatile flavor compounds in the process of sauce-flavor high-temperature Daqu in different regions [J]. China Brewing, 2025, 44(6): 116–122.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)