

# 基于稳定同位素比值的鲍鱼指纹特征及产地溯源研究

洪赫阳<sup>1,2</sup>, 田秀慧<sup>2,3</sup>, 姜立生<sup>2</sup>, 彭凯秀<sup>1,2</sup>, 崔艳梅<sup>2,3</sup>, 赵军强<sup>1,2</sup>, 曹伟<sup>2,3</sup>, 乔瑞光<sup>2</sup>, 姜雪琴<sup>2,3</sup>, 刘永春<sup>2,3</sup>, 王明磊<sup>2,3</sup>, 徐英江<sup>2,3\*</sup>  
 (1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306, 2. 山东海洋资源与环境研究院, 山东 烟台 264006, 3. 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006)

## 摘要

随着人们对水产品的需求量日益增加, 原产地信息不清、以假乱真、以次充好等问题逐渐显现出来。稳定同位素蕴含了丰富的产地环境信息, 其指纹分析技术是产地溯源最具应用前景之一。为了保护消费者合法权益, 实现对鲍鱼产地来源的追溯, 本研究应用稳定同位素质谱仪, 分析了连江、长岛、荣成和大连四个地点鲍鱼的贝柱、裙边、消化腺性腺以及外套膜中的碳、氮稳定同位素比值, 利用Fisher判别分析建立产地溯源模型, 并结合留一交叉验证法验证模型, 指出了不同产区鲍鱼稳定同位素比值的指纹特征, 并评估了鲍鱼不同组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值对产地溯源的识别能力。研究表明, 全部组织的总体产地判别的原始正确判别率为90.5%, 交叉验证正确判别率为89.0%, 其中连江和荣成两个产区的鲍鱼溯源效果最好。此外, 每个部位单独进行产地溯源结果普遍小于全部组织整体判别分析, 建议全部组织结合溯源, 以提高产地溯源准确率, 但连江鲍鱼可单独使用外套膜作为溯源指标进行产地溯源。本研究提供了鲍鱼产地溯源方法, 为完善水产品的产地溯源模型奠定基础。

## 1 材料与方法

- **鲍鱼采集:** 福建连江、山东长岛、山东荣成和辽宁大连四个产区, 共200只鲍鱼
- **主要仪器:** 同位素比率质谱仪 (253 Plus; 美国赛默飞世尔)
- **稳定同位素的自然丰度由公式确定:**  $\delta = (R_{\text{样品}} / R_{\text{标准}} - 1) \times 1000\%$
- **数据处理:** 本研究采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)对不同组织不同产地鲍鱼的C、N稳定同位素进行差异分析, 再用spss 28.0软件进行判别分析

## 2 结果与分析

### 2.1 鲍鱼碳、氮稳定同位素比值特征分析

四个产地鲍鱼样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为-25.53‰~-15.90‰,  $\delta^{15}\text{N}$ 值的分布范围为3.65‰~9.68‰。

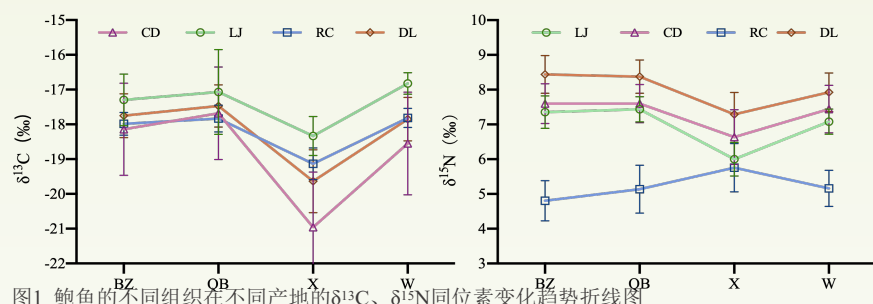


图1 鲍鱼的不同组织在不同产地的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素变化趋势折线图  
 BZ: 贝柱, QB: 裙边, X: 消化腺性腺, W: 外套膜; LJ: 连江, CD: 长岛, RC: 荣成, DL: 大连

### 2.2 不同产地鲍鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异性分析

不同产地间 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有极显著差异性 ( $P < 0.0001$ ), 且鲍鱼四个组织间的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异极显著, 可作为产地溯源指标。

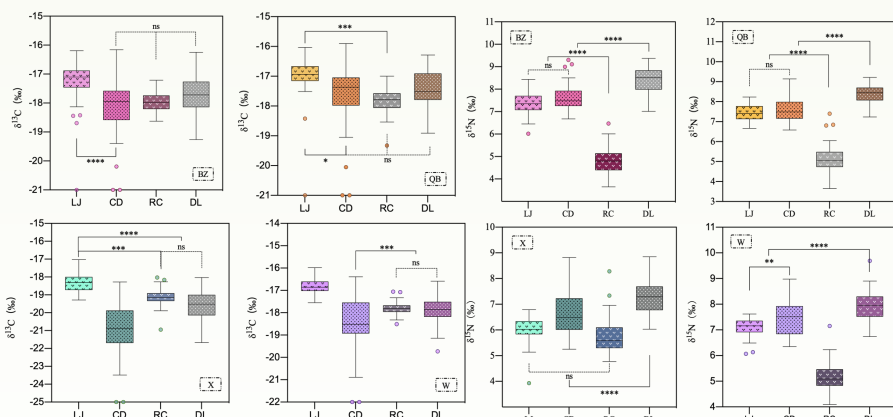


图2 鲍鱼各组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布及产地差异性箱线图  
 ns: 无显著性差异, \* ( $P < 0.05$ ): 差异显著, \*\* ( $P < 0.01$ ), \*\*\* ( $P < 0.001$ ), \*\*\*\* ( $P < 0.0001$ ): 差异极显著

## 3 结论

### 2.3 鲍鱼的产地判别分析及模型验证

基于Fisher判别函数的一般判别法对鲍鱼样品进行判别分析, 建立鲍鱼产地溯源模型对4个产地的鲍鱼进行归类, 并结合留一交叉验证法对建立的判别模型进行准确性评估。选取判别函数1和判别函数2做得分散点图。

鲍鱼产地溯源模型:

$$\begin{aligned}
 F(\text{连江}) &= -11.241\delta^{13}\text{C}_1 - 2.736\delta^{13}\text{C}_2 - 12.402\delta^{13}\text{C}_3 - 1.449\delta^{13}\text{C}_4 + 4.575\delta^{15}\text{N}_1 + 13.890\delta^{15}\text{N}_2 + 2.912\delta^{15}\text{N}_3 + 11.334\delta^{15}\text{N}_4 - 365.170 \\
 F(\text{长岛}) &= -10.105\delta^{13}\text{C}_1 - 0.718\delta^{13}\text{C}_2 - 16.855\delta^{13}\text{C}_3 - 2.461\delta^{13}\text{C}_4 + 3.519\delta^{15}\text{N}_1 + 12.323\delta^{15}\text{N}_2 + 7.127\delta^{15}\text{N}_3 + 12.054\delta^{15}\text{N}_4 - 427.550 \\
 F(\text{荣成}) &= -11.756\delta^{13}\text{C}_1 - 1.169\delta^{13}\text{C}_2 - 12.362\delta^{13}\text{C}_3 - 4.469\delta^{13}\text{C}_4 - 5.464\delta^{15}\text{N}_1 + 9.800\delta^{15}\text{N}_2 + 12.783\delta^{15}\text{N}_3 + 6.795\delta^{15}\text{N}_4 - 341.960 \\
 F(\text{大连}) &= -10.555\delta^{13}\text{C}_1 - 1.474\delta^{13}\text{C}_2 - 14.950\delta^{13}\text{C}_3 - 2.175\delta^{13}\text{C}_4 + 6.365\delta^{15}\text{N}_1 + 13.928\delta^{15}\text{N}_2 + 6.163\delta^{15}\text{N}_3 + 10.857\delta^{15}\text{N}_4 - 424.779
 \end{aligned}$$

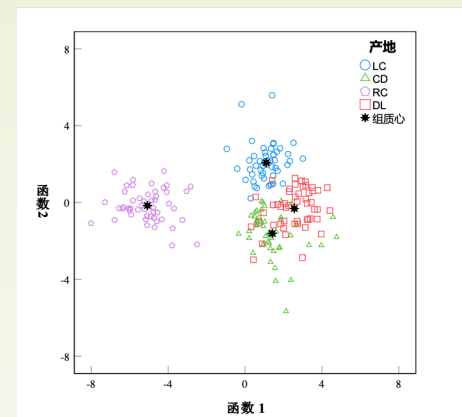


图3 鲍鱼全部组织典型判别函数得分散点图

其中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 、 $\delta^{13}\text{C}_4$ 分别表示贝柱、裙边、消化腺性腺和外套膜的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;  $\delta^{15}\text{N}_1$ 、 $\delta^{15}\text{N}_2$ 、 $\delta^{15}\text{N}_3$ 、 $\delta^{15}\text{N}_4$ 分别表示贝柱、裙边、消化腺性腺和外套膜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

原始正确判别率为90.5%, 交叉验证正确判别率为89.0%, 其中荣成的原始和交叉判别率均为100%, 溯源效果最佳

表4 不同产地鲍鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值线性判别分析结果<sup>a</sup>

	产地	预测组成员信息				整体正确率/%	
		LJ	CD	RC	DL		
原始/交叉验证	计数	LJ	50/49	0/0	0/0	0/1	90.5/89.0
		CD	0/0	40/39	0/0	10/11	
		RC	0/0	0/0	50/50	0/0	
		DL	1/1	8/9	0/0	41/40	
	正确判别率/%	100.0/98.0	80.0/78.0	100.0/100.0	82.0/80.0		

<sup>a</sup> 原始验证/交叉验证

为了进一步提取有效指标, 本研究分析了鲍鱼不同组织的产地判别率, 结果表明, 每个部位单独进行产地溯源结果普遍小于全部组织整体判别分析, 建议全组织溯源。考虑到时间成本问题, 也可单独用外套膜作为溯源指标进行产地溯源。

本实验通过测定福建连江、山东长岛、山东荣成和辽宁大连四个产区鲍鱼样品中不同部位的碳、氮稳定同位素比值, 建立了鲍鱼产地溯源判别模型, 采用Fisher线性判别分析建立溯源模型, 并用留一交叉验证法验证模型准确性。结果表明, 全部组织的总体产地判别的原始正确判别率为90.5%, 交叉验证正确判别率为89.0%, 以连江和荣成鲍鱼溯源效果最优, 基本实现了鲍鱼全部组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值在四个产区的产地判别。由于鲍鱼的每个部位单独判别结果低于全部组织整体判别结果, 因此建议以鲍鱼全部组织为指标进行产地溯源。本实验为建立鲍鱼产地溯源提供了技术路线, 为筛选有效溯源指标提供了参考。此外, 要建立更可靠的溯源模型还需进一步采集更全面的鲍鱼样本进行验证, 应结合更多的溯源指标建立溯源模型, 如重同位素比值, 元素光谱特征等, 为构建出有效的鲍鱼产地溯源模型奠定基础。