

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180813001

http://www.yykxjz.cn/

陈胜军, 刘先进, 杨贤庆, 李来好, 黄卉, 吴燕燕, 李春生. 不同产地鲍鱼特征元素分析与主成分评价模型的建立. 渔业科学进展, 2019, 40(2): 83-90

Chen SJ, Liu XJ, Yang XQ, Li LH, Huang H, Wu YY, Li CS. Analysis of characteristic elements and establishment of principal component evaluation model of abalone from different habitats. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(2): 83-90

# 不同产地鲍鱼特征元素分析与主成分评价模型的建立\*

陈胜军<sup>1①</sup> 刘先进<sup>1,2</sup> 杨贤庆<sup>1</sup> 李来好<sup>1</sup>  
黄卉<sup>1</sup> 吴燕燕<sup>1</sup> 李春生<sup>1</sup>

(1. 农业农村部水产品加工重点实验室 国家水产品加工技术研发中心  
中国水产科学研究院南海水产研究所 广州 510300; 2. 上海海洋大学食品学院 上海 201306)

**摘要** 为了找出不同产地鲍鱼(*Haliotis Spp. Abalone*)的区域性差异,并探究一种有效的鲍鱼产地的鉴别方法,采用主成分分析法对广东、福建、山东、辽宁4个主要养殖省份鲍鱼样品肌肉中的特征元素(Na、K、Mg、Ca、Fe、Zn、Cu、Ni、As、Al、Mn、Cr、Se)进行分析。结果显示,鲍鱼样品的元素含量存在差异,Mn的变异程度最大,变异系数为74%,Ni次之,为65%,其次是Se(60%),其余元素的变异系数均高于10%。同时,通过对这些数据进行降维处理,有效地从13个特征元素中提取了6个元素作为主成分,累计方差贡献率达89.87%;同时发现Ca、Se、Na、Fe、Mn、K、Ni这7种元素是不同产地鲍鱼的特征元素,并建立了主成分综合评价模型: $F=0.2777F_1+0.2652F_2+0.1295F_3+0.1066F_4+0.0656F_5+0.0541F_6$ 。模型的建立可以为利用特征元素对不同产地鲍鱼的产地溯源提供一定的理论参考。

**关键词** 鲍鱼; 特征元素; 主成分评价; 不同产地

**中图分类号** S932.6 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)02-0083-08

中国是世界第一鲍鱼(*Haliotis Spp. Abalone*)养殖国家,养殖产量占全球的92%,从2006年的 $2.16 \times 10^4$  t快速增长到2016年的 $13.97 \times 10^4$  t,近10年的平均年增长率达到54.68%(农业部渔业渔政管理局,2007-2017)。鲍鱼由于其极高的食用价值和药用价值,深受国内外广大消费者喜爱。

不同产地的鲍鱼品质有很大差异,且难以区分,

因此导致市场上以次充好的现象屡见不鲜。刘艳青(2013)研究发现,春季荣成产地的鲍鱼与福建、青岛两地的鲍鱼可以进行区分;夏季时3个产地的鲍鱼难以区分;秋季时青岛产地的鲍鱼与其他两产地鲍鱼可以区分;冬季时福建产地的鲍鱼与青岛产地的鲍鱼差异显著。刘桃花等(2016)通过判别分析和聚类分析对鲍鱼年龄进行了分类。贾亮亮等(2009、2014)对大连、

\* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院基本科研业务费)(2016HY-ZD0802)、2017年国家农产品质量安全风险评估计划(GJFP201700904)和农业部财政重大专项(NFZX2013)共同资助[This work was supported by the Special Funds for the Basic Scientific Research Operations of the Central Public Welfare Research Institutes (Basic Scientific Research Operating Expenses of China Academy of Fishery Sciences)(2016HY-ZD0802), 2017 National Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Plan(GJFP201700904), Major Financial Projects of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R.China(NFZX2013)].

① 通讯作者: 陈胜军, 研究员, E-mail: chenshengjun@scsfri.ac.cn

收稿日期: 2018-08-13, 收修改稿日期: 2018-09-11

山东、澳洲3个不同产地鲍鱼中若干元素含量进行了测定分析并建立了 FTIR 图谱。孙建民等(2010)建立了大连、山东、澳洲3个产地鲍鱼的 HPLC 指纹图谱。目前只能对鲍鱼的外观和微量元素进行简单的对比分析,很难找出其差异性,而通过大量的数据和主成分分析方法可以建立综合模型,找出主成分元素,为产地溯源建立基础。

区分不同产地的产品需要测定大量的数据,同时需要采用合适的工具对所得数据进行处理。统计分析方法在各个领域都有广泛应用,具有节省人工、提高速率、科学可靠、全面系统等优点。其中的主成分分析法是最常用的一种统计分析方法(Gupta *et al*, 2018; Alharbi, 2018),通过数据降维处理,可以找出数据中的代表性指标,并且独立成新的变量,并获得变量间的线性关系(姜雪等, 2017),目前已广泛应用于食品(黄鸾玉等, 2018)、药品(关倩倩等, 2018)、水产品(李来好等, 2012; 韩青鹏等, 2017; 李忠义等, 2009; 李达等, 2017)等领域。目前,我国不同产地的鲍鱼品质上的差异尚未实现量化评价,鲍鱼产品价格与其品质不一致,导致中国鲍鱼在国际市场上缺乏竞争力。另外,相较于茶叶、水果等产品,鲍鱼尚没有完善的溯源体系。中国鲍鱼养殖主要集中于福建、山东、广东以及辽宁四省。本研究通过对这4个产地鲍鱼的13种常量元素与微量元素进行统计分析,建立基于主成分分析的综合评价模型,旨在为不同产地鲍鱼的营养品质进行评价以及产地溯源提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

鲜活鲍鱼样品于2017年6月分别采集自福建、山东、广东、辽宁4个鲍鱼主要养殖省份,其中样品1~6号采自广东省,样品7~11号采自福建省,样品12~15号采自山东省,样品16~18号采自辽宁省,规格大小在20粒/kg左右(带壳)。HCl、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、NaOH、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、AgNO<sub>3</sub>等均为分析纯,HNO<sub>3</sub>为优级纯,购于广州左克科技发展有限公司;元素标准溶液为10 μg/L,购于国家标准测试中心;实验用水为超纯水。

### 1.2 仪器与设备

Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(安捷伦公司,美国);CEM MARS5 型高压高通量微波消解装置(CEM公司,美国);Milli-Q 型超纯水系统(密理博公司,美国);GB204 型电子天平(Mettler 公司,瑞士)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品的处理

将采集的鲍鱼去壳、去内脏,

取腹足肌肉搅碎混匀制成样品急冻运回实验室,并于-20℃冰箱中保存备用。

**1.3.2 常量及微量元素含量的测定** 按照 SN/T 2208-2008《水产品中钠、镁、铝、钙、铬、铁、镍、铜、锌、砷、镉、钼、镉、铅、汞、硒的测定微波消解—电感耦合等离子体—质谱法》的方法,使用微波消解装置进行消解,采用电感耦合等离子体质谱仪在标准模式下测定13种元素。

**1.3.3 数据处理分析** 采用 SPSS 20.0 和 Excel 软件进行数据分析处理。将 Na、K、Mg、Ca、Fe、Zn、Cu、Ni、As、Al、Mn、Cr 和 Se 这13种元素数据,运用 SPSS 20.0 软件进行相关性分析和主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 鲍鱼中常量与微量元素含量

鲍鱼样品中13种元素含量如表1所示。18个鲍鱼样品之间元素含量变异幅度均较大,其中,Mn的变异程度最大,变异系数为74%,Ni次之,为65%,其次是Se(60%),其余元素的变异系数均高于10%,表明所选鲍鱼样品之间的元素差异明显,适于进行主成分分析(白沙沙等, 2012)。

### 2.2 数据标准化处理与相关性分析

由于原始数据不是在同一区域范围内,因此需要对原始数据进行标准化数据处理。首先,将原始数据进行标准化处理,计算出各元素的特征值和方差贡献率,并提取累计方差贡献率大于85%的指标作为主成分对象;然后主成分载荷系数矩阵数值除以主成分相应特征值的平方根,得到各主成分的特征向量值,进而得到各主成分的函数表达式,得到主成分综合模型(洗燕萍等, 2016);最后根据各主成分得分和综合得分,确定排名,选择出不同产地鲍鱼的特征元素。结果见表2。

对经标准化处理后的数据进行不同元素之间的相关性分析,从而衡量2个变量因素的相关密切程度。元素之间的相关性分析结果见表3。

由表3可知,18个鲍鱼样品中Na含量与Mg含量呈极显著正相关;K含量与Zn含量呈显著正相关;Mg含量与Ca含量呈显著正相关;Ca含量与Fe、Cu、Mn、Cr含量呈显著正相关;Fe含量与Ni含量呈显著正相关;Zn含量与Cr含量呈显著正相关,与Se含量呈极显著正相关;Cu含量与Ni、Cr、Se含量呈显著正相关;Ni含量与Cr含量呈极显著正相关,与Se含量呈显著正相关;As含量与Mn含量呈显著正

表 1 鲍鱼中常量与微量元素含量(mg/100 g)  
Tab. 1 The content of constant and trace elements in abalone (mg/100 g)

序号 Number	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	Cu	Ni	As	Al	Mn	Cr	Se
1	308.41	259.41	55.85	2.99	2.60	0.81	0.39	0.04	0.19	0.13	0.05	0.01	0.02
2	319.66	259.56	55.65	6.04	7.00	1.17	1.27	0.31	0.23	0.26	0.12	0.05	0.04
3	238.64	301.17	51.57	3.01	5.21	0.95	0.46	0.10	0.23	0.09	0.07	0.01	0.02
4	254.89	274.65	55.43	3.43	4.03	0.64	0.94	0.14	0.13	0.21	0.07	0.01	0.02
5	157.40	311.88	41.87	2.40	2.28	1.00	0.19	0.10	0.10	0.10	0.09	0.01	0.01
6	273.73	320.06	55.92	3.10	3.33	1.18	0.45	0.12	0.30	0.10	0.08	0.03	0.03
7	348.26	280.53	61.35	3.98	5.97	0.81	0.79	0.08	0.29	0.67	0.08	0.02	0.01
8	391.63	250.44	65.10	4.06	5.12	0.70	0.79	0.07	0.30	0.52	0.09	0.01	0.01
9	226.34	222.06	52.08	3.19	4.71	0.70	0.64	0.09	0.31	0.25	0.06	0.01	0.01
10	257.57	280.97	43.14	3.75	7.08	0.71	0.58	0.06	0.33	0.33	0.03	0.03	0.01
11	351.86	243.95	61.66	3.60	2.73	0.61	0.42	0.06	0.34	0.22	0.06	0.02	0.01
12	254.71	255.27	62.25	4.68	6.82	0.75	0.39	0.12	0.40	0.34	0.32	0.01	0.01
13	280.75	243.78	63.20	4.80	7.06	0.76	0.43	0.12	0.41	0.28	0.34	0.01	0.01
14	554.06	231.93	69.42	3.95	3.33	0.70	0.33	0.09	0.28	0.13	0.17	0.01	0.01
15	293.29	278.79	58.59	3.60	8.04	0.63	0.52	0.28	0.36	0.27	0.14	0.02	0.01
16	209.00	214.41	48.35	3.76	4.40	0.75	0.43	0.04	0.15	0.30	0.13	0.01	0.01
17	436.00	222.74	74.52	5.00	4.05	0.89	0.53	0.06	0.23	0.27	0.15	0.02	0.01
18	251.34	250.94	57.47	3.87	7.09	0.68	0.46	0.18	0.15	0.25	0.05	0.03	0.01
$\bar{x}$	300.42	261.25	57.41	3.85	5.05	0.80	0.56	0.11	0.26	0.26	0.12	0.02	0.01
s	92.06	30.49	8.36	0.86	1.83	0.17	0.25	0.07	0.09	0.15	0.09	0.01	0.01
变异系数 Coefficient of variation	31%	12%	15%	22%	36%	21%	46%	65%	35%	56%	74%	56%	60%

表 2 标准化数据  
Tab. 2 Standardized data

序号 Number	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	Cu	Ni	As	Al	Mn	Cr	Se
1	0.0868	-0.06042	-0.18676	-0.99131	-1.34086	0.04527	-0.65408	-0.99353	-0.78922	-0.89952	-0.77071	-0.69795	0.64933
2	0.209	-0.0555	-0.21067	2.54494	1.06995	2.14083	2.81103	2.60987	-0.35545	-0.01512	0.03854	2.89151	2.98691
3	-0.67107	1.30914	-0.69844	-0.96812	0.08919	0.86021	-0.37845	-0.19277	-0.35545	-1.17165	-0.5395	-0.69795	0.64933
4	-0.49455	0.43939	-0.23698	-0.48116	-0.55735	-0.9443	1.51161	0.34106	-1.43987	-0.35527	-0.5395	-0.69795	0.64933
5	-1.55353	1.66038	-1.85808	-1.67537	-1.51619	1.15126	-1.44161	-0.19277	-1.7652	-1.10362	-0.30828	-0.69795	-0.51946
6	-0.28991	1.92865	-0.1784	-0.86377	-0.94088	2.19904	-0.41783	0.07414	0.40365	-1.10362	-0.42389	1.09678	1.81812
7	0.51967	0.63223	0.47076	0.15652	0.5056	0.04527	0.92097	-0.45969	0.2952	2.77416	-0.42389	0.19941	-0.51946
8	0.99077	-0.3546	0.91908	0.24928	0.03988	-0.59504	0.92097	-0.59315	0.40365	1.75369	-0.30828	-0.69795	-0.51946
9	-0.80468	-1.28534	-0.63747	-0.75942	-0.18477	-0.59504	0.33032	-0.32623	0.51209	-0.08315	-0.6551	-0.69795	-0.51946
10	-0.46544	0.64666	-1.70625	-0.11015	1.11378	-0.53683	0.09407	-0.72661	0.72897	0.4611	-1.00192	1.09678	-0.51946
11	0.55877	-0.56744	0.50782	-0.28406	-1.26963	-1.11893	-0.53595	-0.72661	0.83742	-0.28724	-0.6551	0.19941	-0.51946
12	-0.49651	-0.19619	0.57836	0.96812	0.97132	-0.30399	-0.65408	0.07414	1.48807	0.52913	2.35066	-0.69795	-0.51946
13	-0.21365	-0.57302	0.69193	1.10725	1.10282	-0.24578	-0.49658	0.07414	1.59651	0.12094	2.58187	-0.69795	-0.51946
14	2.75515	-0.96165	1.43553	0.12174	-0.94088	-0.59504	-0.89034	-0.32623	0.18676	-0.89952	0.61657	-0.69795	-0.51946
15	-0.07744	0.57517	0.1408	-0.28406	1.63977	-1.00251	-0.14219	2.20949	1.0543	0.05291	0.26975	0.19941	-0.51946
16	-0.99303	-1.53623	-1.08339	-0.09855	-0.35462	-0.30399	-0.49658	-0.99353	-1.22299	0.25701	0.15414	-0.69795	-0.51946
17	1.47274	-1.26304	2.04524	1.33914	-0.54639	0.51095	-0.10282	-0.72661	-0.35545	0.05291	0.38535	0.19941	-0.51946
18	-0.53312	-0.3382	0.00691	0.02899	1.11926	-0.71146	-0.37845	0.8749	-1.22299	-0.08315	-0.77071	1.09678	-0.51946

表3 18个鲍鱼样品元素含量的相关性  
Tab. 3 Correlation coefficients among element content of 18 kind of abalone sample

序号 Number	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	Cu	Ni	As	Al	Mn	Cr	Se
Na	1												
K	-0.382	1											
Mg	0.812**	-0.456	1										
Ca	0.395	-0.446	0.520*	1									
Fe	-0.136	-0.034	0.024	0.528*	1								
Zn	-0.145	0.488*	-0.185	0.131	-0.157	1							
Cu	0.101	-0.044	0.067	0.537*	0.356	0.168	1						
Ni	-0.094	0.211	-0.007	0.403	0.581*	0.234	0.482*	1					
As	0.259	-0.108	0.374	0.324	0.446	-0.218	-0.041	0.060	1				
Al	0.170	-0.212	0.253	0.382	0.455	-0.290	0.419	-0.073	0.315	1			
Mn	0.121	-0.274	0.429	0.517*	0.333	-0.039	-0.191	0.133	0.512*	0.090	1		
Cr	0.039	0.192	-0.076	0.487*	0.380	0.470*	0.527*	0.590**	0.012	0.057	-0.246	1	
Se	-0.071	0.370	-0.145	0.238	-0.033	0.741**	0.555*	0.490*	-0.196	-0.322	-0.178	0.603**	1

\*: 相关性显著( $P<0.05$ ); \*\*: 相关性极显著( $P<0.01$ )

\*: Significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\*: Highly significant correlation ( $P<0.01$ )

相关; Cr 含量与 Se 含量呈极显著正相关。说明这些样品元素含量之间存在着密切的联系,但由于信息的重叠,难以看出整体关联性,因此,使用主成分分析法将这些数据进行降维处理,将复杂的数据简单化,有助于得出元素之间的关联规律。

### 2.3 主成分分析

将 18 个鲍鱼样品中的常量与微量元素含量数据进行标准化处理后,对其进行主成分分析。由表 4 可知,第 1 主成分的特征值为 3.610,方差贡献率为 27.769%,累计方差贡献率为 27.769%;第 2 主成分特征值为 3.447,方差贡献率为 26.516%;第 3、4、5、6 主成分的方差贡献率分别为 12.951%、10.662%、6.563%和 5.411%。当主成分的个数为 6 时,累计方差贡献率为 89.872%(>85%),即意味着可以通过前 6 个主成分来解释全部样品的 13 个元素指标的绝大部分信息,因此选择前 6 个主成分对鲍鱼元素含量进行综合评价。

主成分载荷系数矩阵反映了各元素对主成分的影响程度。由表 5 可知,在第 1 主成分中, Ca 有较大的正系数值,说明第 1 主成分可以有效反映 Ca 的信息;在第 2 主成分中, Se 有较大的正系数值,说明第 2 主成分可以有效反映 Se 的信息;在第 3 主成分中, Na 有较大的正系数值, Fe 有较大的负系数值,说明第 3 主成分可以有效反映 Na、Fe 的信息;第 4 主成分中, Mn 有较大的正系数值,说明第 4 主成分

可以有效反映 Mn 的信息;第 5 主成分中, K 有较大的正系数值,说明第 5 主成分可以有效反映 K 的信息;第 6 主成分中, Ni 有较大的负系数值,说明第 6 主成分可以有效反映 Ni 的信息。根据上面结果可以确定, Ca、Se、Na、Fe、Mn、K 和 Ni 这 7 种元素是不同产地鲍鱼的特征元素。

表4 主成分分析特征值及方差贡献率  
Tab. 4 Principal component analysis eigenvalue and variance contribution rate

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate(%)	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate(%)
1	3.610	27.769	27.769
2	3.447	26.516	54.285
3	1.684	12.951	67.237
4	1.386	10.662	77.898
5	0.853	6.563	84.461
6	0.703	5.411	89.872
7	0.488	3.755	93.627
8	0.408	3.141	96.768
9	0.138	1.058	97.826
10	0.114	0.880	98.706
11	0.106	0.814	99.520
12	0.052	0.402	99.922
13	0.010	0.078	100.000

表 5 主成分载荷系数矩阵  
Tab. 5 Principal component loading coefficient matrix

元素 Element	第 1 主成分 First principal component	第 2 主成分 Second principal component	第 3 主成分 Third principal component	第 4 主成分 Fourth principal component	第 5 主成分 Fifth principal component	第 6 主成分 Sixth principal component
Na	0.460	-0.381	0.667	-0.099	0.247	-0.258
K	-0.370	0.588	-0.207	0.242	0.549	-0.068
Mg	0.596	-0.482	0.514	0.096	0.123	-0.119
Ca	0.920	0.064	0.142	0.047	-0.205	0.205
Fe	0.672	0.127	-0.660	0.042	-0.039	-0.118
Zn	-0.030	0.727	0.338	0.343	0.159	0.382
Cu	0.579	0.498	0.037	-0.505	-0.030	0.127
Ni	0.504	0.598	-0.206	0.179	-0.215	-0.402
As	0.528	-0.343	-0.261	0.374	0.453	-0.096
Al	0.523	-0.265	-0.334	-0.506	0.336	0.351
Mn	0.477	-0.372	-0.111	0.689	-0.186	0.269
Cr	0.462	0.718	0.056	-0.131	0.082	-0.168
Se	0.157	0.853	0.350	0.113	-0.008	0.078

2.4 特征元素主成分评价模型

由表 5 的主成分载荷系数矩阵数值除以其相应特征值的平方根, 可得到各主成分的特征向量值, 见表 6, 与标准化的元素含量数据相乘后即可得到 6 个主成分的元素函数表达式(式中  $Z_{Na}$  表示标准化后的 Na 含量数据, 其他函数同理)。

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 0.2421Z_{Na} - 0.1947Z_K + 0.3137Z_{Mg} + 0.4842Z_{Ca} + \\
 & 0.3537Z_{Fe} - 0.0158Z_{Zn} + 0.3047Z_{Cu} + 0.2653Z_{Ni} + \\
 & 0.2779Z_{As} + 0.2753Z_{Al} + 0.2511Z_{Mn} + 0.2432Z_{Cr} + \\
 & 0.0826Z_{Se} \\
 F_2 &= -0.2052Z_{Na} + 0.3167Z_K - 0.2596Z_{Mg} + 0.0345Z_{Ca} + \\
 & 0.0684Z_{Fe} + 0.3916Z_{Zn} + 0.2682Z_{Cu} + 0.3221Z_{Ni} - \\
 & 0.1847Z_{As} - 0.1427Z_{Al} - 0.2004Z_{Mn} + 0.3867Z_{Cr} + \\
 & 0.4594Z_{Se} \\
 F_3 &= 0.5140Z_{Na} - 0.1595Z_K + 0.3961Z_{Mg} + 0.1094Z_{Ca} - \\
 & 0.5086Z_{Fe} + 0.2605Z_{Zn} + 0.0285Z_{Cu} - 0.1587Z_{Ni} - \\
 & 0.2011Z_{As} - 0.2574Z_{Al} - 0.0855Z_{Mn} + 0.0432Z_{Cr} + \\
 & 0.2697Z_{Se} \\
 F_4 &= -0.0841Z_{Na} + 0.2056Z_K + 0.0815Z_{Mg} + 0.0399Z_{Ca} + \\
 & 0.0357Z_{Fe} + 0.2913Z_{Zn} - 0.4290Z_{Cu} + 0.1520Z_{Ni} + \\
 & 0.3177Z_{As} - 0.4298Z_{Al} + 0.5852Z_{Mn} - 0.1113Z_{Cr} + \\
 & 0.0960Z_{Se} \\
 F_5 &= 0.2674Z_{Na} + 0.5944Z_K + 0.1332Z_{Mg} - 0.2220Z_{Ca} - \\
 & 0.0422Z_{Fe} + 0.1722Z_{Zn} - 0.0325Z_{Cu} - 0.2328Z_{Ni} + \\
 & 0.4905Z_{As} + 0.3638Z_{Al} - 0.2014Z_{Mn} + 0.0888Z_{Cr} - \\
 & 0.0087Z_{Se} \\
 F_6 &= -0.3077Z_{Na} - 0.0811Z_K - 0.1419Z_{Mg} + 0.2445Z_{Ca} - \\
 & 0.1407Z_{Fe} + 0.4556Z_{Zn} + 0.1515Z_{Cu} - 0.4795Z_{Ni} - \\
 & 0.1145Z_{As} + 0.4186Z_{Al} + 0.3208Z_{Mn} - 0.2004Z_{Cr} + \\
 & 0.0930Z_{Se}
 \end{aligned}$$

将各主成分的方差贡献率作为系数与主成分的乘积之和, 得出主成分综合模型为:

$$F = 0.2777F_1 + 0.2652F_2 + 0.1295F_3 + 0.1066F_4 + 0.0656F_5 + 0.0541F_6$$

其中  $F_1$  表示第 1 主成分,  $F_2 \sim F_6$  表示第 2 至第 6 主成分。

根据主成分的函数表达式计算出 18 个鲍鱼样品各主成分得分及排序情况, 再以主成分综合模型函数表达式计算出 18 个鲍鱼样品元素含量的综合得分和综合排序(表 7)。由表 6 可知, 综合排名在前 6 位的是 2 号样品、6 号样品、17 号样品、13 号样品、7 号样品以及 15 号样品, 排名最低的是 5 号样品。

2 号样品  $F_1$ 、 $F_2$  值、综合排名都是第一,  $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_6$  值排名居中,  $F_5$  值靠后, 表明其主要优势体现在  $F_1$  和  $F_2$  上, 即 Ca、Se 含量较高, K 含量较低。6 号样品的  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$  值排名靠前,  $F_1$  值排名靠后, 表明其主要优势是在  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$  上, 即 Se、Na、Mn、K 含量较高, 而 Ca 含量较低。7 号样品,  $F_1$ 、 $F_5$ 、 $F_6$  值排名靠前,  $F_4$  值最低, 表明其主要优势是在  $F_1$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ , 即 Ca、K 含量较高, Mn、Ni 含量较低。12 号和 13 号样品  $F_1$ 、 $F_4$ 、 $F_6$  值排名都靠前,  $F_5$  排名都居中,  $F_2$ 、 $F_3$  排名都靠后, 表明其主要优势是在  $F_1$ 、 $F_4$ 、 $F_6$  上, 即 Ca、Mn 含量较高, Se、Na、Ni 含量较低。贾亮亮等(2009)通过火焰原子吸收光谱法对大连、青岛、河北 3 个产地的鲍鱼若干元素含量进行测定后发现, 3 个产地鲍鱼的 K、Na、Ca、Mg、Fe、P 含量存在显著差异( $P < 0.01$ ), Zn, Cu 无显著性差异( $P < 0.5$ )。这与本研究的特征元素相符, 其中 Fe、P 未表现出明显优势可能是由于采样地点、品种以及检测方法差异导致的。

表6 特征向量值  
Tab. 6 Characteristic vector values

元素 Element	第1主成分 First principal component	第2主成分 Second principal component	第3主成分 Third principal component	第4主成分 Fourth principal component	第5主成分 Fifth principal component	第6主成分 Sixth principal component
Na	0.2421	-0.2052	0.5140	-0.0841	0.2674	-0.3077
K	-0.1947	0.3167	-0.1595	0.2056	0.5944	-0.0811
Mg	0.3137	-0.2596	0.3961	0.0815	0.1332	-0.1419
Ca	0.4842	0.0345	0.1094	0.0399	-0.222	0.2445
Fe	0.3537	0.0684	-0.5086	0.0357	-0.0422	-0.1407
Zn	-0.0158	0.3916	0.2605	0.2913	0.1722	0.4556
Cu	0.3047	0.2682	0.0285	-0.429	-0.0325	0.1515
Ni	0.2653	0.3221	-0.1587	0.152	-0.2328	-0.4795
As	0.2779	-0.1847	-0.2011	0.3177	0.4905	-0.1145
Al	0.2753	-0.1427	-0.2574	-0.4298	0.3638	0.4186
Mn	0.2511	-0.2004	-0.0855	0.5852	-0.2014	0.3208
Cr	0.2432	0.3867	0.0432	-0.1113	0.0888	-0.2004
Se	0.0826	0.4594	0.2697	0.0960	-0.0087	0.0930

表7 主成分得分及排序  
Tab. 7 Principal component score and sort

序号 Number	$F_1$	排序 Sort	$F_2$	排序 Sort	$F_3$	排序 Sort	$F_4$	排序 Sort	$F_5$	排序 Sort	$F_6$	排序 Sort	$F$	排序 Sort
1	-2.2203	17	-0.1351	9	1.3057	3	-0.1547	9	-0.1273	10	0.0157	10	-0.5073	15
2	3.9778	1	5.1385	1	0.9932	5	-0.2110	10	-0.9024	16	0.3366	8	2.5325	1
3	-1.9266	16	1.2490	3	-0.1736	9	0.8318	5	0.3626	6	-0.0454	12	-0.1163	9
4	-0.8933	13	0.8461	5	0.1277	8	-1.2786	16	-0.8579	15	-0.2105	13	-0.2111	12
5	-4.2228	18	1.2043	4	-0.4269	10	0.8851	4	-0.2128	11	0.5421	5	-0.7988	18
6	-1.2763	14	2.8227	2	1.1828	4	1.5764	3	1.6150	2	0.0874	9	0.8260	2
7	1.3079	5	-0.3989	10	-0.6450	12	-1.7215	18	1.8679	1	0.9729	2	0.1655	5
8	1.1696	7	-1.4915	15	0.2258	7	-1.5066	17	0.9659	3	0.4822	6	-0.1127	8
9	-0.8118	12	-0.8248	11	-0.7398	13	-0.8072	13	-0.6295	14	0.0060	11	-0.6670	16
10	-0.2871	10	0.5824	6	-1.8909	17	-0.9636	15	0.9128	4	-0.2126	14	-0.2245	13
11	-0.5252	11	-1.4827	14	0.8321	6	-0.4513	11	0.4507	5	-0.8459	15	-0.4956	14
12	1.6737	3	-1.6111	16	-1.2992	16	1.9739	2	-0.0851	9	0.8103	3	0.1180	7
13	1.9880	2	-1.7473	17	-1.0172	15	2.1868	1	-0.3917	13	0.6945	4	0.2019	4
14	0.4287	8	-2.4178	18	2.4724	1	0.6525	7	-0.0458	8	-1.1695	16	-0.1987	11
15	1.2955	6	0.1269	8	-1.9369	18	0.6863	6	0.1557	7	-1.9810	18	0.1188	6
16	-1.3075	15	-0.9516	12	-0.4642	11	-0.7447	12	-1.6859	18	1.2610	1	-0.7973	17
17	1.4852	4	-1.4665	13	2.3319	2	-0.0826	8	-0.3087	12	0.4272	7	0.3195	3
18	0.1444	9	0.5574	7	-0.8779	14	-0.8707	14	-1.0832	17	-1.1710	17	-0.1530	10

### 3 结论

本研究通过对18个不同产地鲍鱼样品的13种常量与微量元素的测定并进行主成分分析,有效地从13个元素中提取了6个元素作为主成分,累计方差贡献率达89.872%;经分析,得出Ca、Se、Na、Fe、

Mn、K和Ni这7种元素是不同产地鲍鱼的特征元素。建立了基于特征元素主成分分析的综合评价模型: $F=0.2777F_1+0.2652F_2+0.1295F_3+0.1066F_4+0.0656F_5+0.0541F_6$

为科学评价鲍鱼营养品质以及鲍鱼产地溯源提供了一定的理论参考。

本研究虽然对鲍鱼的 13 个常量元素及微量元素含量进行了主成分分析, 但其对营养成分评价并不全面, 对产地溯源只有一定参考作用, 下一步可以结合脂肪酸、氨基酸等营养成分进行主成分分析、聚类分析等数据分析, 构建出更为准确、简便、快捷的产地溯源模型。

## 参 考 文 献

- Alharbi T. Energy resolution improvement of CdTe detectors by using the principal component analysis technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2018, 882: 114–116
- Bai SS, Bi JF, Wang P, *et al.* Fruit quality analysis of different apple varieties. *Food Science*, 2012, 33(17): 68–72 [白沙沙, 毕金峰, 王沛, 等. 不同品种苹果果实品质分析. *食品科学*, 2012, 33(17): 68–72]
- Gupta A, Barbu A. Parameterized principal component analysis. *Pattern Recognition*, 2018, 78(6): 215–227
- Guan QQ, Zong AZ, Qi YT, *et al.* Cultivars selection of yam for diabetes based on principal component analysis. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(4): 38–43 [关倩倩, 宗爱珍, 祁瑜婷, 等. 基于主成分分析的糖尿病专用山药品种筛选. *食品工业科技*, 2018, 39(4): 38–43]
- Huang LY, Wu XQ, Pang FY, *et al.* Comprehensive evaluation of nutritional value of aquatic products using principal component analysis. *Food Science and Technology*, 2018, 43(2): 175–179 [黄鸾玉, 吴祥庆, 庞燕飞, 等. 主成分分析法综合评价水产品营养价值. *食品科技*, 2018, 43(2): 175–179]
- Han QP, Lu HJ, Chen XJ, *et al.* Morphological analysis of beaks of *Uroteuthis chinensis* in the northern South China Sea. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(4): 122–130 [韩青鹏, 陆化杰, 陈新军, 等. 南海北部海域中国枪乌贼角质颚的形态学分析. *南方水产科学*, 2017, 13(4): 122–130]
- Jia LL, Sun JM, Chang D, *et al.* The Analysis of elements content of abalone from different places. *Studies of Trace Elements and Health*, 2009, 26(3): 37–38 [贾亮亮, 孙建民, 常丹, 等. 不同产地鲍鱼中若干元素含量的分析. *微量元素与健康研究*, 2009, 26(3): 37–38]
- Jia LL. Analysis of FTIR spectra of abalone from different areas. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2014, 20(1): 10–12 [贾亮亮. 不同产地鲍鱼的 FTIR 谱图分析. *分析测试技术与仪器*, 2014, 20(1): 10–12]
- Jiang X, Liu N, Sun Y, *et al.* Application of statistical analysis methods in food quality evaluation. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(1): 13–19 [姜雪, 刘楠, 孙永, 等. 统计分析方法在食品品质评价中的应用. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(1): 13–19]
- Liu YQ. Studies on the original and seasonal analysis of abalone (*Halotis discus hannai* Ino) and anti-obesity activity of phospholipids from abalone viscera. Master's Thesis of Ocean University of China, 2013, 1–73 [刘艳青. 皱纹盘鲍地域及季节性差异分析及内脏磷脂减肥活性研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2013, 1–73]
- Liu TH, Hou MZ. Discriminant analysis and cluster analysis in the classification of abalone age. *Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(1): 14–18 [刘桃花, 侯木舟. 鲍鱼年龄分类中的判别分析和聚类分析. *邵阳学院学报(自然科学版)*, 2016, 13(1): 14–18]
- Li D, Liu CL, Li A, *et al.* Principal component analysis of the morphometric traits of the cuttlebone of *Sepia esculenta* at early developmental stages. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(5): 41–49 [李达, 刘长琳, 李昂, 等. 金乌贼(*Sepia esculenta*)早期发育阶段内壳形态学指标的主成分分析. *渔业科学进展*, 2017, 38(5): 41–49]
- Li LH, Wang GC, Hao SX, *et al.* Discrimination of tilapia at different frozen storage time by electronic nose. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(4): 1–6 [李来好, 王国超, 郝淑贤, 等. 电子鼻检测冷冻罗非鱼肉的研究. *南方水产科学*, 2012, 8(4): 1–6]
- Li ZY, Lin Q, Dai FQ, *et al.* Food quality analysis of some forage fish in Yellow Sea with principal component method. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, 30(5): 64–67 [李忠义, 林群, 戴芳群, 等. 主成分分析对黄海 6 种主要饵料鱼类的质量分析评价. *渔业科学进展*, 2009, 30(5): 64–67]
- Ministry of agriculture fishery administration bureau. *China fishery statistics yearbook of 2007–2017*. Beijing: China Agriculture Press, 2007–2017, 32–38 [农业部渔业渔政管理局. 2007–2017 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2007–2017, 32–38]
- Sun JM, Jia LL, Ma Y, *et al.* Fingerprint of abalone from different areas by HPLC. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2010, 30(6): 676–681 [孙建民, 贾亮亮, 马勇, 等. 不同产地鲍鱼的 HPLC 指纹图谱. *河北大学学报(自然科学版)*, 2010, 30(6): 676–681]
- Xian YP, Dong H, Luo DH, *et al.* Quality evaluation modeling of dried shark fin products based on principal component analysis. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(1): 210–217 [洗燕萍, 董浩, 罗东辉, 等. 基于主成分分析法的鱼翅干制品品质评价模型的构建. *现代食品科技*, 2016, 32(1): 210–217]

## Analysis of Characteristic Elements and Establishment of Principal Component Evaluation Model of Abalone from Different Habitats

CHEN Shengjun<sup>1</sup>①, LIU Xianjin<sup>1,2</sup>, YANG Xianqing<sup>1</sup>, LI Laihao<sup>1</sup>,  
HUANG Hui<sup>1</sup>, WU Yanyan<sup>1</sup>, LI Chunsheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National R&D Center for Aquatic Product Processing, South China Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300;

2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract** This study was done to assess regional differences among abalone from different habitats and develop a new and efficient method to identify abalone from different habitats of origin. To do this, the content and composition of 13 major elements and trace elements (Na, K, Mg, Ca, Fe, Zn, Cu, Ni, As, Al, Mn, Cr, and Se) in the muscle tissue of 18 kinds of abalone samples from the four major breeding provinces of Guangdong, Fujian, Shandong, and Liaoning, China, were determined and analyzed using principal component analysis (PCA). The results showed that the elemental content differed among the 18 abalone samples. The variation in Manganese (Mn) was the largest [the coefficient of variation (CV) was 74% among samples], followed by Nickel (Ni) (CV = 65%), and then by Selenium (Se) (CV = 60%); all the rest of the analyzed elements had CVs higher than 10%. At the same time, after using the PCA method to reduce the dimensions of these data, six elements were effectively extracted from among the 13 elements examined that cumulatively explained 89.87% of the variance among samples. These characteristic elements of abalone from different habitats were Ca, Se, Na, Fe, Mn, K, and Ni, and a comprehensive model of the six principal components including them was established as follows:  $F = 0.2777F_1 + 0.2652F_2 + 0.1295F_3 + 0.1066F_4 + 0.0656F_5 + 0.0541F_6$ , where  $F_1$  represents the first principal component, and  $F_2 \sim F_6$  represent the second to sixth principal components, respectively. On the basis of the comprehensive PCA score, the top six samples were samples No. 2, 6, 17, 13, 7, and 15, and the lowest one was sample No. 5. Among these, sample No. 2 had a higher content of all characteristic elements and better quality than all others. The PCA approach was found to be quite suitable for the evaluation of the nutritive quality of abalone. The establishment of this PCA model provided an empirical basis for the theoretical determination of the origin of abalone samples.

**Key words** Abalone; Characteristic elements; Principal component analysis; Different habitats

① Corresponding author: CHEN Shengjun, E-mail: chenshengjun@scsfri.ac.cn