

## 调查研究

## 杭州市售大黄鱼不同可食部位中24种元素的分布特征

王姝婷, 龚立科, 薛鸣, 何华丽, 任韧

(杭州市疾病预防控制中心(杭州市卫生监督所)卫生检验中心, 浙江 杭州 310021)

**摘要:**目的 探究杭州市售大黄鱼5种可食部位中24种元素的分布特征。方法 于2022年3月—2023年4月,采集杭州市售大黄鱼样品51份。采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法对大黄鱼轴上肌、轴下肌、鱼皮、鱼鳔、性腺中的24种元素进行测定。结合相关性分析、主成分分析对相应可食部位中元素间的相关性、可食部位间的分布差异等特征进行探讨。结果 5个可食部位均以锌、铁的平均含量为最高。性腺、鱼皮、鱼鳔中的锰、铁、钴等人体必需微量元素和铅、镉、砷等污染元素的平均含量高于肌肉部位。3.9%的鱼皮和性腺样品的镉含量高于限量要求。各可食部位中存在多种元素呈显著的相关性(相关系数为0.702~0.992),可食部位间元素的分布差异主要集中在锶、钛、钡、钒等元素。结论 杭州市售大黄鱼样品可食部位中的镉存在一定程度的污染,不同可食部位的元素分布差异明显,对大黄鱼的污染物监测、膳食评估、资源利用、产品研发等相关工作中需关注不同可食部位元素的分布特征。

**关键词:** 大黄鱼; 可食部位; 元素; 分布特征

中图分类号: R155

文献标识码: A

文章编号: 1004-8456(2024)08-0922-06

DOI: 10.13590/j.cjfh.2024.08.005

**Distribution characteristics of 24 elements in different edible parts of *Pseudosciaena crocea* from Hangzhou market**

WANG Shuting, GONG Like, XUE Ming, HE Huali, REN Ren

(Hangzhou Center for Disease Control and Prevention (Hangzhou Health Supervision Institution) Center for Hygienic Inspection, Zhejiang Hangzhou 310021, China)

**Abstract: Objective** To investigate the distribution characteristics of 24 elements in 5 edible parts of *Pseudosciaena crocea* from Hangzhou market. **Methods** From March 2022 to April 2023, 51 *Pseudosciaena crocea* samples were collected from Hangzhou market. Twenty-four elements in the supraaxial muscle, infraaxial muscle, fish skin, swim bladder and gonad of samples were measured by ICP-MS after microwave digestion. Correlation analysis and principal component analysis were combined to explore the characteristics in the edible parts, such as the correlation between elements, the distribution differences between edible parts. **Results** In the 5 edible parts, Zn, Fe showed highest average content. The average content of essential trace elements (such as Mn, Fe, Co) and pollution elements (such as Pb, Cd, As) in gonads, fish skin, and swim bladder were higher than muscle parts. Fish skin and gonad samples were both exceeding the limit value at the rate of 3.9%. There were obvious correlations between multiple elements in various edible parts (correlation coefficient was 0.702~0.992). The distributional difference mainly focused on Sr, Ti, Ba, V and other elements. **Conclusion** There was a certain degree of contamination of Cd in the edible parts of *Pseudosciaena crocea* samples from Hangzhou market. The distribution of elements showed obvious difference between different edible parts. These characteristics of *Pseudosciaena crocea* should receive more attention in the contamination monitoring, dietary assessment, resource exploiting, product development and other related work.

**Key words:** *Pseudosciaena crocea*; edible part; element; distribution characteristic

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 杭州市卫生科技计划项目(A20220609)

作者简介: 王姝婷 女 副主任技师 研究方向为理化检验及风险评估 E-mail: lskane@163.com

通信作者: 任韧 女 主任技师 研究方向为理化检验及风险评估 E-mail: hzren@sina.com

水产品不同组织部位的元素富集和污染往往存在一定的差异,如 STEFANIA 等<sup>[1]</sup>对地中海四鳍旗鱼的研究发现,锡、镉在肌肉中的平均含量分别为 1.727、0.019 mg/kg,而其在肝脏中则分别高达 6.577、5.815 mg/kg;蓝圆鲂头部的铅、铬含量明显高于鱼尾、鱼皮、鱼肉<sup>[2]</sup>。饲料、栖息环境等生长环节的内源、外源因素是水产品体内重金属元素的重要来源之一<sup>[3-4]</sup>,而流通环节中水产品的品质和理化特性也会发生一定的变化<sup>[5]</sup>,加工、包装、运输等流通环节中元素迁移也可能是冰鲜鱼类水产品重金属元素的来源之一<sup>[6-7]</sup>。国内水产品具有高产量、高消费特点,18~59岁消费人群约80%的水产品类食物摄入来自鱼类<sup>[8-9]</sup>。其中,海洋动物性水产品的有害元素污染已成为食品安全领域关注的焦点<sup>[10-12]</sup>。大黄鱼是我国特有的具有最大养殖规模的海洋经济鱼种之一<sup>[13]</sup>,而针对其不同可食部位的元素分布特征,特别是针对消费链末端的市售大黄鱼的相关元素分布特征报道相对较少。本文采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometry, MD-ICP-MS),对杭州市售大黄鱼中轴上肌、轴下肌、鱼皮、鱼鳔、性腺5个可食部位中锂(Li)、硼(B)、铝(Al)、钛(Ti)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、硒(Se)、锶(Sr)、钼(Mo)、镉(Cd)、锡(Sn)、锑(Sb)、钡(Ba)、汞(Hg)、铊(Tl)、铅(Pb)、铀(U)24种元素进行测定,并利用主成分分析(Principal component analysis, PCA)对其进行多元统计分析,旨在了解经包装、运输、贮藏等环节后,处于消费链末端的大黄鱼产品的元素分布特征,对优化大黄鱼等水产品的污染监测、膳食暴露的风险评估、资源利用、促进精深加工产品的开发等相关工作具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

于2022年3月至2023年4月,随机在杭州市内各大农贸市场、水产市场、大型超市、小型商铺采集大黄鱼样品共51份,个体重量为342~461 g。对大黄鱼个体进行独立制样,解剖取轴上肌、轴下肌、鱼皮、性腺(精巢/卵巢)、鱼鳔,分别搅碎、均质后置于洁净的聚丙烯管中,在-20℃密封冷冻保存。

硝酸为超级级(67%~70%, Fisher公司),实验用水均为超纯水(Milli-Q Direct8)。

### 1.2 仪器与设备

iCAP-RQ型电感耦合等离子体质谱仪(美国Thermo公司);Mars6型微波消解系统(美国CEM公司);TUBE-MILL型样品捣碎机(德国IKA公司)。

### 1.3 样品分析

参考GB 5009.268—2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》,准确称取0.3~1.0 g样品(精确到0.000 1 g,性腺样品:0.3~0.6 g,其他部位样品:0.5~1.0 g)于微波消解罐内,加入5 mL硝酸,放置2 h后,置于微波消解仪中进行消解(步骤1:12 min升温至140℃,保持2 min;步骤2:10 min升温至180℃,保持25 min)。待冷却至室温后,以超纯水转移并定容至25 mL,摇匀待测,同时做试剂空白。

ICP-MS仪器参数条件为:分析模式:KED模式,射频功率1550 W,等离子体气流量15.0 L/min,辅助气流速:0.80 L/min,雾化气流量1.00 L/min,采样深度5.0 mm,碰撞气(He)流量4.0 mL/min,提取透镜1电压:0.0 V,提取透镜2电压:-126.0 V,监测同位素为:<sup>7</sup>Li、<sup>11</sup>B、<sup>27</sup>Al、<sup>48</sup>Ti、<sup>51</sup>V、<sup>52</sup>Cr、<sup>55</sup>Mn、<sup>57</sup>Fe、<sup>59</sup>Co、<sup>60</sup>Ni、<sup>63</sup>Cu、<sup>66</sup>Zn、<sup>75</sup>As、<sup>78</sup>Se、<sup>88</sup>Sr、<sup>95</sup>Mo、<sup>111</sup>Cd、<sup>118</sup>Sn、<sup>121</sup>Sb、<sup>137</sup>Ba、<sup>202</sup>Hg、<sup>205</sup>Tl、<sup>206,207,208</sup>Pb、<sup>238</sup>U;内标同位素为:<sup>115</sup>In、<sup>103</sup>Rh、<sup>185</sup>Re。采用在线加入方式进行内标校正。

采用加标回收试验、平行样测定进行质量控制。加标浓度分别为Hg:0.010 0 mg/kg, B、Mn、Fe、Cu、Zn、Ba:2.00 mg/kg, Al:4.00 mg/kg,其他元素:0.200 mg/kg。加标回收试验结果为:81.2%(Cd)~111.5%(Al)。参考GB 5009.268—2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》,以2次独立测定结果的绝对差值与算术平均值的比值计算精密度的结果,其结果为:1.9%(Co)~12.5%(B),满足该国家标准对多元素测定的相关要求。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2007进行数据统计。采用SPSS 11.0软件进行数据的相关性分析(Pearson相关性分析)和PCA分析。PCA结果显示,KMO值(Kaiser-Meyer-Olkin)为0.709且Bartlett球形检验值为0.000,表明数据关联度高,适用于PCA分析。以各主成分元素变量的载荷值除以主成分相对应特征值的平方根,得到PC1~PC5中每个元素变量所对应的系数(特征向量)。以各主成分的特征值占所选取的5个主成分特征值之和的比值作为各主成分的权重系数,通过相应特征向量与权重系数乘积之和作为综合权重评价元素变量对不同组织间元素分布差异的贡献程度<sup>[14]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 大黄鱼不同可食部位的元素含量

大黄鱼轴上肌、轴下肌、鱼皮、性腺、鱼鳔中24种元素的测定结果(表1)表明,5个可食部位均以人体必需的微量元素Zn、Fe的平均含量为最高。对

于不同可食部位中的人体必需微量元素,性腺中Cu、Co、Fe、Mn、Mo、Se、Zn、Sn的平均含量相对高于其他部位,而轴上肌中V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Se、Mo的平均含量为最低,前者中Co、Cu、Mo的平均含量分别可达后者的9.7、12.4、54.8倍;而鱼皮中V、Cr的平均含量相对高于其他部位,分别可达轴上肌的5.5倍和21.9倍。此外,GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》对鱼类中的Pb、Cd、Cr、无机砷、甲基汞作了相关限量要求。5个可食部位样品的Pb、Cr含量均低于相应限量要求(Pb≤0.5 mg/kg, Cr≤2.0 mg/kg),总汞含量均显著低于甲基汞限量要求(≤1.0 mg/kg);轴上肌、轴下肌、鱼鳃

中的Cd含量均低于限量要求(≤0.1 mg/kg),而鱼皮和性腺中均有3.9%的样品Cd含量超过限量要求;各可食部位的总砷含量均高于0.1 mg/kg的无机砷限量要求,分别为限量要求的3.7~31.6倍(轴上肌)、3.9~40.7倍(轴下肌)、2.7~22.5倍(鱼皮)、3.5~364.0倍(性腺)、2.4~65.3倍(鱼鳃)。污染元素中,Sb、Al、Pb在鱼皮中的平均含量相对高于其他部位,其平均含量分别为肌肉部位(轴上肌、轴下肌)的2.1~2.7倍、1.9~2.1倍、6.5~10.7倍,As、Tl、Cd在性腺中的平均含量相对高于其他部位,其平均含量分别为肌肉部位的4.6~5.6倍、7.3~8.5倍、6.9~30.6倍,而肌肉中Hg的平均含量相对高于其他部位。

表1 大黄鱼样品中24种元素的测定结果/(mg/kg)

Table 1 Results of 24 elements in *Pseudosciaena crocea* samples/(mg/kg)

元素	轴上肌		轴下肌		鱼皮		性腺		鱼鳃	
	平均值 (中位值)	含量范围	平均值 (中位值)	含量范围	平均值 (中位值)	含量范围	平均值 (中位值)	含量范围	平均值 (中位值)	含量范围
Li	0.013 0 (0.013 8)	0.005 66~ 0.020 7	0.017 9 (0.018 3)	0.006 67~ 0.027 3	0.016 4 (0.015 6)	0.004 99~ 0.037 8	0.020 7 (0.020 6)	0.008 10~ 0.033 4	0.013 4 (0.013 7)	0.005 35~ 0.020 2
B	0.235(0.214)	0.078 7~0.372	0.297(0.281)	0.121~0.466	0.447(0.466)	0.164~0.764	0.283(0.247)	0.116~0.704	0.233(0.219)	0.114~0.388
Al	0.894(0.712)	0.134~2.84	0.984(0.831)	0.213~4.24	1.89(1.99)	0.585~3.50	0.746(0.580)	0.158~2.60	1.43(1.47)	0.309~2.54
Ti	0.300(0.224)	0.174~1.52	0.581(0.434)	0.201~2.60	0.960(0.793)	0.299~4.90	0.325(0.293)	0.107~0.866	0.261(0.175)	0.075 5~1.24
V	0.001 50 (0.001 36)	0.000 523~ 0.003 74	0.002 47 (0.002 05)	0.001 29~ 0.008 82	0.008 30 (0.007 91)	0.004 82~ 0.012 8	0.004 24 (0.004 01)	0.001 92~ 0.010 3	0.006 39 (0.005 82)	0.003 25~ 0.012 2
Cr	0.021 5 (0.016 2)	0.005 86~ 0.074 3	0.035 3 (0.025 9)	0.004 28~ 0.124	0.471(0.434)	0.196~1.30	0.066 0 (0.028 6)	0.006 02~ 0.506	0.126 (0.060 7)	0.018 8~ 0.805
Mn	0.079 2 (0.075 4)	0.049 5~ 0.136	0.117 (0.094 4)	0.063 0~ 0.549	0.181(0.157)	0.086 2~ 0.570	0.360(0.334)	0.118~1.22	0.220(0.208)	0.121~0.396
Fe	2.42(1.13)	0.788~27.3	2.66(2.44)	1.49~6.68	7.69(5.82)	3.89~86.9	11.3(8.32)	3.03~34.0	6.23(5.67)	3.54~14.4
Co	0.001 82 (0.001 51)	0.000 895~ 0.007 37	0.003 08 (0.002 91)	0.001 89~ 0.004 99	0.006 62 (0.006 32)	0.004 00~ 0.013 3	0.017 7 (0.012 9)	0.006 59~ 0.052 5	0.009 97 (0.009 37)	0.004 83~ 0.018 4
Ni	0.006 74 (0.004 02)	0.001 87~ 0.030 7	0.009 14 (0.005 45)	0.002 00~ 0.042 5	0.023 1 (0.020 2)	0.008 49~ 0.079 7	0.023 7 (0.010 4)	0.003 00~ 0.203	0.032 5 (0.012 5)	0.004 75~ 0.197
Cu	0.139(0.139)	0.090 4~0.188	0.172(0.169)	0.107~0.305	0.223(0.224)	0.167~0.280	1.73(0.900)	0.222~6.39	0.367(0.325)	0.217~0.792
Zn	4.35(4.36)	3.32~5.07	4.22(4.22)	3.27~5.18	7.36(7.35)	4.40~13.3	29.9(14.9)	2.67~187	5.92(5.88)	3.23~8.36
As	0.999(0.898)	0.365~3.16	1.22(0.864)	0.393~4.07	0.770(0.617)	0.274~2.25	5.59(1.77)	0.354~36.4	1.84(1.29)	0.241~6.53
Se	0.381(0.376)	0.305~0.496	0.423(0.427)	0.336~0.516	0.435(0.436)	0.326~0.570	0.736(0.641)	0.354~1.60	0.627(0.634)	0.473~0.916
Sr	0.444(0.282)	0.198~2.79	1.12(0.894)	0.356~4.47	2.00(1.68)	0.621~8.22	1.10(0.939)	0.341~2.47	0.809(0.669)	0.326~2.87
Cd	0.001 05 (0.000 508)	0.000 119~ 0.006 39	0.004 66 (0.002 88)	0.000 390~ 0.026 3	0.022 6 (0.012 6)	0.003 01~ 0.133	0.032 1 (0.026 3)	0.002 68~ 0.140	0.019 1 (0.014 7)	0.004 71~ 0.072 9
Sn	0.026 0 (0.025 8)	0.009 92~ 0.044 8	0.024 7 (0.024 0)	0.011 9~ 0.046 5	0.009 56 (0.008 39)	0.003 35~ 0.033 0	0.043 9 (0.043 8)	0.005 13~ 0.114	0.010 3 (0.005 85)	0.002 09~ 0.060 6
Ba	0.010 7 (0.007 84)	0.001 92~ 0.034 1	0.021 4 (0.017 3)	0.002 30~ 0.109	0.108(0.110)	0.026 4~ 0.247	0.024 4 (0.020 7)	0.004 15~ 0.072 2	0.036 2 (0.029 9)	0.008 49~ 0.127
Hg	0.030 8 (0.030 0)	0.017 2~ 0.058 4	0.027 5 (0.026 3)	0.014 9~ 0.053 6	0.004 20 (0.003 64)	0.001 97~ 0.009 54	0.017 6 (0.016 1)	0.001 50~ 0.048 7	0.004 10 (0.003 88)	0.001 72~ 0.007 96
Pb	0.001 08 (0.000 955)	ND~0.003 31	0.001 79 (0.001 42)	0.000 287~ 0.005 54	0.011 6 (0.008 78)	0.002 29~ 0.036 4	0.004 22 (0.002 94)	0.000 624~ 0.021 1	0.004 29 (0.003 96)	0.001 56~ 0.009 34
Sb*	0.967(0.853)	ND~5.85	0.744(0.723)	ND~1.75	2.01(1.62)	ND~12.4	1.18(1.09)	ND~3.96	0.930(1.09)	ND~2.09
Mo*	0.159(0.056 4)	ND~1.36	0.551(0.271)	ND~2.07	4.82(4.29)	0.490~13.5	8.68(7.74)	2.83~38.3	5.40(4.53)	0.343~18.9
Tl*	0.049 8 (0.051 0)	ND~0.118	0.042 8 (0.003 55)	ND~0.135	0.071 9 (0.009 16)	ND~0.150	0.365(0.250)	ND~1.21	0.052 3 (0.041 9)	ND~0.167
U*	0.033 2 (0.009 23)	ND~0.222	0.109 (0.006 68)	ND~0.506	0.465(0.470)	0.175~1.17	2.12(0.435)	0.084 9~ 27.6	0.309(0.242)	0.052 9~1.19

注:ND为未检出,在平均值等统计中以1/2 LOD(检出限)计,相应LOD分别为:Pb(0.000 102 mg/kg)、Sb(0.620 μg/kg)、Mo(0.113 μg/kg)、Tl(0.006 87 μg/kg)、U(0.007 68 μg/kg);\*表示该元素测定结果的单位为μg/kg

## 2.2 大黄鱼可食部位的元素相关性分析

对大黄鱼样品5个可食部位中24种元素的相关性分析结果表明:对于Cr、Mn、Fe、Cu、Se、Mo、Zn、Co、V、Ni、Sn 11种人体必需微量元素,轴上肌中的V与Mn, Cr与Ni呈不同程度的正相关性,相关系数分别为0.611和0.945,而其他人体必需微量元素间的相关性较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.465$ 。对于Al、As、Cd、Sb、Hg、Pb、Tl等7种污染元素,其相互间的相关性相对较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.493$ 。此外,Al与V, Ti与Mn、Sr、U, Mn与Sr, Sr与Cd、U, Cd与U均呈较显著的正相关性,相关系数为0.705~0.992,而As与Li呈一定的负相关性,相关系数为-0.561。

在轴下肌中,人体必需微量元素Cr与Ni, V与Fe呈较显著的正相关,相关系数分别为0.954和0.851。Mn与Co, Sn与Fe呈一定的正相关性,相关系数分别为0.512和0.606,而其他人体必需微量元素间的相关性较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.483$ 。污染元素中,Al与Cd呈较显著的正相关性,相关系数为0.707, Sb与Tl则呈一定的负相关性,相关系数为-0.683,而其他污染元素间的相关性相对较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.499$ 。此外,Al与V、Fe、Cd, Ti与Mn、Sr、U, Mn与Sr、U, Sr与U均呈较显著的正相关性(相关系数为0.703~0.990),而Li与As, B与As, Ti与Cu, Cu与Sr成一定的负相关性(相关系数为-0.508~-0.676)。同时,相关元素在上述2个不同肌肉部位间富集的程度亦有明显的差异性:Al与Fe、Cd, V与Fe, Fe与Cd, Sn在轴下肌中的正相关性(相关系数为0.606~0.851)明显高于轴上肌(相关系数为0.095~0.266)。Ti与V、Cd, Mn与Cd, Cd与U, Sr与Cd在轴上肌中的正相关性(相关系数为0.539~0.716)明显高于轴下肌(相关系数为-0.171~0.211)。

在鱼皮中,人体必需微量元素Mn与Fe、Sn, Co与Zn呈一定的正相关性,相关系数为0.524~0.635,而其他人体必需微量元素间的相关性较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.482$ 。污染元素中,Al与Tl呈一定的正相关性,相关系数为0.542,而其他污染元素间的相关性相对较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.484$ 。此外, Ti与Sr, Sr与U呈较显著的正相关性,相关系数分别为0.982和0.743,而B与As、Tl呈一定的负相关性(相关系数为-0.549~-0.587)。

在性腺中,人体必需微量元素Cr与Ni, Mn与Cu、Se, Fe与Co、Zn, Co与Zn, Cu与Se呈较显著的正相关性,相关系数为0.702~0.953。V与Fe、Co、Mo, Se与Fe、Co呈一定的正相关性,相关系数为

0.516~0.670,而其他人体必需微量元素间的相关性较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.469$ 。污染元素中, Cd与Pb、As与Tl呈不同程度的正相关性,相关系数分别为0.813和0.658,而其他污染元素间的相关性相对较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.457$ 。此外, B与Sr、Sb, Fe与U, Mo与Cd、Pb均呈较显著的正相关性(相关系数为0.709~0.845),而Ba与Tl呈一定的负相关性(相关系数为-0.577)。

在鱼鳔中,人体必需微量元素V与Mn, Cr与Ni、Mo呈较显著的正相关性,相关系数为0.746~0.897。V与Zn, Cr与Co, Mn与Zn, Mo与Co、Ni均呈一定的正相关性,相关系数为0.501~0.688,而其他人体必需微量元素间的相关性较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.475$ 。污染元素中, As与Hg呈一定的正相关性,相关系数为0.510, Sb与Tl则呈一定的负相关性,相关系数为-0.604,而其他污染元素间的相关性相对较弱,相关系数绝对值 $\leq 0.472$ 。此外, Li与Zn, Ti与Sr, 均呈较显著的正相关性(相关系数为0.712~0.969),而Li与As, B与Tl呈一定的负相关性,相关系数分别为-0.685和-0.651。

不同可食部位间元素富集的相关程度具有较明显的差异性:Ti与Sr在轴上肌、轴下肌、鱼皮、鱼鳔中富集的相关性(相关系数为0.969~0.992)高于性腺(相关系数为0.516), Al与V在肌肉(轴上肌、轴下肌)中富集的相关性(相关系数为0.750~0.857)高于鱼皮、鱼鳔、性腺(相关系数为0.296~0.538), Sr与U在肌肉、鱼皮中富集的相关性(相关系数为0.743~0.877)高于鱼鳔、性腺(相关系数分别为0.453、0.318)。

## 2.3 不同可食部位中元素的分布差异

为进一步了解可食部位间元素的分布差异,本文对样品的多元素测定结果进行了PCA分析。由PC1-PC3构成的三维得分散点图(图1)可见,不同可食部位的集群分布较清晰,元素分布特征具有较为明显的差异。通过正交旋转得到的成分矩阵结果显示:PC1(方差贡献率31.11%)中具有较大载荷值的元素为V(0.695)、Mn(0.801)、Fe(0.622)、Co(0.807)、Cu(0.523)、Zn(0.575)、Se(0.672)、Mo(0.768)、Cd(0.646)、Hg(-0.558)。PC2(方差贡献率22.93%)中具有较大载荷值的元素为Al(0.627)、Ti(0.566)、V(0.543)、Cr(0.670)、Cu(-0.558)、Se(-0.538)、Sr(0.514)、Sn(-0.602)、Ba(0.721), PC1和PC2主要综合了V、Mn、Fe、Co等人体必需的微量元素。PC3(方差贡献率12.33%)中具有较大载荷值的元素为Li(0.718)、Ti(0.632)、Sr(0.600); PC4(方差贡献率6.62%)中具有较大载荷值的元素



为 Zn(-0.526);PC5(方差贡献率 5.70%)中具有较大载荷值的元素为 Cd(0.607)。综合权重系数的计算结果表明,对大黄鱼 5 个可食部位的元素分布差异贡献(综合权重系数)较大的元素为 Sr(0.214)、Ti(0.194)、Ba(0.190)、V(0.183),其次为 B(0.150)、Li(0.143)、Cr(0.140)、Cd(0.137)、Al(0.116)、Mo(0.101),而 Mn、Co、Fe 等元素贡献较小(综合权重系数 $<0.1$ )。其中,人体必需微量元素的权重系数总和为 0.637,而污染元素的权重系数总和为 0.174。

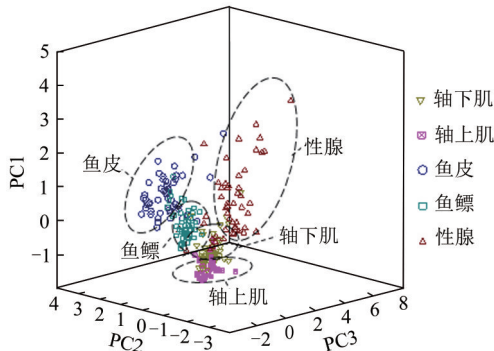


图1 大黄鱼不同可食部位的PCA散点图

Figure 1 PCA scatter plot of different *Pseudosciaena crocea* edible parts

### 3 讨论

对杭州市售大黄鱼轴上肌、轴下肌、鱼皮、性腺、鱼鳃 5 个可食部位中 24 种元素的测定结果表明,其富含 Zn、Fe、Se、Cu、Mn、Sr 等人体必需微量元素。性腺、鱼皮、鱼鳃中的 V、Mn、Fe、Co、Zn 等多种人体必需微量元素的平均含量相对高于 2 个肌肉部位。而对于 Al、As、Cd、Sb、Pb、Tl 等污染元素,鱼皮、性腺中的平均含量相对高于肌肉部位。参考 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》,性腺和鱼皮样品中超过限量要求的样品(各 3.9%)Cd 含量分别为 0.106、0.140 mg/kg 和 0.114、0.133 mg/kg,存在一定程度的污染。而 GB 2762—2022 的相关限量要求主要针对鱼类所有可食用部位混合制样后的整体含量。因此,在大黄鱼样品整体制样时,上述超过限量要求的鱼皮、性腺样品中的 Cd 可被组织比例较高、Cd 含量较低的肌肉部位所稀释。相关研究显示<sup>[15]</sup>,水相和生物相中的 Cd 可通过鳃、消化系统和皮肤等途径吸收进入鱼体,这也可能导致其在鱼皮中相对易富集。而本文性腺中的 Cd 含量整体高于肌肉部位(轴上肌、轴下肌)与该研究报道中 Cd 易在性腺、肝脏等内脏中蓄积的结论相一致。鱼类海产品中的 As 主要以砷甜菜碱等低毒或无毒的有机砷形态存在<sup>[16-18]</sup>,青岛市售大黄鱼中无机砷的调查显示其仅占总砷含

量的 2.30%<sup>[19]</sup>。由此可见,鱼类海产品中无机砷占总砷含量的比例较低,但对砷的风险评估仍需进一步结合其无机砷含量水平。对于偏爱食用鱼皮、性腺及其制品的消费者,在考虑其营养价值的同时仍需关注 As、Cd 等污染元素的含量水平,过高的膳食暴露也可能造成一定的健康风险。

此外,不同可食部位间的元素分布差异较为明显,Sr、Ti、Ba、V 等元素对分布差异的贡献较大,而污染元素对该差异的贡献相对较小。相关研究表明,无机元素可通过水相(鳃吸收)和生物相(摄食吸收)进入鱼体,并通过被动扩散、主动运输、脂质渗透、胞饮作用等多种途径分布于鱼体不同组织内,同时不同组织对不同元素的亲和力不同,也导致了不同元素的靶器官、蓄积器官具有一定的差异<sup>[15,20-22]</sup>。但相关研究主要针对环境因素与鱼类个体或其鳃、肌肉、鱼鳍、内脏等组织器官中 Pb、Cd、Cu、Zn 等常见重金属富集行为的相关性,而对本文中 5 种可食部位间的多元素富集相关性和差异性的报道较少。因此,在对大黄鱼的污染物监测、膳食评估、资源利用、产品研发等工作中仍需关注不同可食部位中相关元素分布的差异性。

### 参考文献

- [1] STEFANIA A, GIACOMO M, ROSETTA P, et al. Trace elements levels in muscle and liver of a rarely investigated large pelagic fish: The Mediterranean spearfish *Tetrapturus belone* (Rafinesque, 1810)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 151: 110878-110887.
- [2] 郑瑞生,王巧燕,张冰泉,等. 9种近海鱼重金属污染状况及食用安全性评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(14): 353-359.  
ZHENG R S, WANG Q Y, ZHANG B Q, et al. Evaluation of heavy metal pollution status and food safety of nine offshore fish species[J]. *Food Science*, 2022, 43(14): 353-359.
- [3] 吴嘉文,漆亚乔,苏燕瑜. 水产品中重金属的污染现状及其检测技术的研究[J]. *农产品加工*, 2019, 8: 57-58, 62.  
WU J W, QI Y Q, SU Y Y. Research on Pollution Status and Detection Technology of Heavy Metals in Aquatic Products[J]. *Farm Products Processing*, 2019, 8: 16: 57-58, 62.
- [4] 何琨玉,陈红霞,江青艳. 2018年广东省饲料企业矿物质原料中重金属含量调查[J]. *广东饲料*, 2019, 9: 25-27.  
HE K Y, CHEN H X, JIANG Q Y. Survey of heavy metal content in mineral raw materials of feed enterprises in Guangdong province in 2018[J]. *Guangdong Feed*, 2019, 9: 25-27.
- [5] 王倩,蓝蔚青,张楠楠,等. 植物源复合保鲜冰对大黄鱼流通期间品质与抗氧化性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 179-185.  
WANG Q, LAN W Q, ZHANG N N, et al. Effects of ice with complex plant-source extracts on the quality and antioxidant activity of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during logistics process[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 179-185.

- [6] 张智. 食品包材中重金属残留安全性评价及迁移研究[D]. 天津:天津科技大学,2010.  
ZHANG Z. The safety evaluation and migration study about the residue of heavy metal in food packing materials [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2010.
- [7] 张罗娟,张森,袁信,等. 我国水产品体内重金属含量的研究现状[J]. 食品研究与开发,2017,38(21):212-215.  
ZHANG L J, ZHANG M, YUAN X, et al. Research status of heavy metals in aquatic products in China [J]. Food Research and Development, 2017, 38(21): 212-215.
- [8] 万涌蓉. 我国城镇居民水产品消费影响机理研究[D]. 上海:上海海洋大学,2018.  
WANG Y R. Research on the impact mechanism of aquatic product consumption among urban residents in China [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [9] 苏畅,王志宏,贾小芳,等. 2015年中国十五省(区、市)18~59岁居民水产品类食物摄入状况分析[J]. 营养学报,2018,40(1):23-26.  
SU C, WANG Z H, JIA X F, et al. An analysis on marine food consumption among Chinese adults aged 18 to 59 years old in 15 provinces in 2015 [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2018, 40(1): 23-26.
- [10] 王慧,毛伟峰,蒋定国,等. 中国居民水产品中四种常见重金属暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志,2019,31(5):470-475.  
WANG H, MAO W F, JIANG D G, et al. Risk assessment of specific heavy metals exposure to aquatic products in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(5): 470-475.
- [11] 叶兵,宋旭岩,薛建杰,等. 青岛市市场销售甲壳类、软体类海产品重金属污染状况分析[J]. 中国初级卫生保健,2023,37(8):91-92.  
YE B, SONG X Y, XUE J J, et al. Analysis of heavy metal pollution of crustaceans and soft-bodied seafood sold in Qingdao market [J]. Chinese Primary Health Care, 2023, 37(8): 91-92.
- [12] 曹佩,陈子慧,毛伟峰,等. 海鱼中5种形态有害元素在不同烹调方式下的加工系数研究[J]. 中国食品卫生杂志,2022,34(5):896-901.  
CAO P, CHEN Z H, MAO W F, et al. Study of cooking coefficient of five toxic metals in marine fish in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(5): 896-901.
- [13] 王凡,廖碧钗,孙敏秋,等. 福建大黄鱼产业发展形势分析[J]. 中国水产,2019,3:45-49.  
WANG F, LIAO B C, SUN M Q, et al. Analysis of the Development Situation of Fujian Yellow Croaker Industry [J]. China Fisheries, 2019, 3: 45-49.
- [14] 石彦国,单彤彤,曾剑华,等. 基于主成分分析和偏最小二乘法的蒸煮大豆食味品质评价[J]. 中国食品学报,2019,19(10):265-277.  
SHI Y G, SHAN T T, ZENG J H, et al. Estimating the eating quality of cooking-soybean based on principal component analysis and partial least squares [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 265-277.
- [15] 龙萌,王振华,陈浩,等. 水环境中镉对鱼类的毒理效应研究进展[J]. 水生态学杂志,2022,43(2):142-150.  
LONG M, WANG Z H, CHEN H, et al. Research progress on the toxic effects of cadmium on fish in aquatic environments [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(2): 142-150.
- [16] LUCAS S, JULIO A L, DIOGO L R N, et al. A feasible method for As speciation in several types of seafood by LC-ICP-MS/MS [J]. Food Chem, 2018, 255: 340-347.
- [17] TAYLOR V, GOODALE B, RAAB A, et al. Human exposure to organic Arsenic species from seafood [J]. The Science of Total Environment, 2017, 580: 266-282.
- [18] KALANTZI I, MYLONA K, SOFOULAKI K, et al. Arsenic speciation in fish from Greek coastal areas [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 56(6): 300-312.
- [19] 张荣昶,宋扬,于红卫,等. 青岛市市售海产品砷污染状况及无机砷暴露风险评估[J]. 现代预防医学,2020,47(6):1016-1019,1027.  
ZHANG R C, SONG Y, YU H W, et al. Arsenic pollution and risk assessment of inorganic arsenic from seafood in Qingdao [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(6): 1016-1019, 1027.
- [20] BAHNASAWY M, KHIDR A A, DHEINA N. Assessment of heavy metal concentrations in water, plankton and fish of Lake Manzala, Egypt [J]. Turkish Journal of Zoology, 2014, 35(2): 271-280.
- [21] AJIMA M N O, NNODI P C, OGO O A, et al. Bioaccumulation of heavy metals in Mbaa River and the impact on aquatic ecosystem [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(12): 768-776.
- [22] 李宏,潘晓洁,万成炎,等. 重金属对鱼类的生态毒理学研究进展[J]. 水生态学杂志,2019,40(5):104-111.  
LI H, PAN X J, WAN C Y, et al. Advances in ecotoxicology research on fish exposed to heavy metals [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(5): 104-111.