

文章编号: 1674-5566(2025)02-0341-09

DOI: 10.12024/jsou.20240904628

独角雪冰鱼与伯氏肩孔南极鱼3种组织的微量元素比较分析

李雨曦^{1,2}, 江守文³, 吴智超³, 翟万营³, 许强华^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 国家海洋生物科学国际联合研究中心, 上海 201306)

摘要: 为探究两种南极鱼对不同元素的富集差异, 采用电感耦合等离子体质谱法, 对两种南极鱼的脑、心脏、十二指肠3种组织中的铁(Fe)、铬(Cr)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)和汞(Hg)等9种微量元素含量进行测定与比较分析。结果表明, 独角雪冰鱼(*Chionodraco hamatus*)脑中的Fe、Cu、As、Hg、Cd等元素含量显著低于伯氏肩孔南极鱼(*Trematomus bernacchii*) ($P < 0.05$); 心脏组织中的Fe、Cu、Cd、Hg等4种元素含量同样显著低于伯氏肩孔南极鱼 ($P < 0.05$); 而十二指肠中的Hg、Mn、As、Se的含量则显著高于伯氏肩孔南极鱼 ($P < 0.05$)。Fe作为血红蛋白的重要组成元素, 独角雪冰鱼脑与心脏中Fe元素含量显著低于伯氏肩孔南极鱼, 推测与独角雪冰鱼缺乏血红蛋白有关。独角雪冰鱼十二指肠中重金属元素含量显著较高, 推测与其底栖生活习性相关, 更容易积累重金属元素。与其他海域的鱼类相比, 2种南极鱼体内的Cr、As、Cd、Hg、Mn、Cu含量比较高, 反映了部分南极海域可能已经受到一定程度的重金属污染。

关键词: 南极鱼; 心脏; 脑; 十二指肠; 微量元素; 重金属

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

在漫长的演化中, 南极海域鱼类逐渐进化出适应极端低温环境的独特生理机制, 南极鱼类因此也成为了研究鱼类抗低温机制的重要生物^[1]。南极海域占绝对主导地位的南极鱼亚目鱼类有100余种, 分为8个科。独角雪冰鱼(*Chionodraco hamatus*)隶属于鲈形目(Perciformes)南极鱼亚目(Notothenioidei)鳕冰鱼科(Channichthyidae), 缺乏血红蛋白和功能性红血球; 而伯氏肩孔南极鱼(*Trematomus bernacchii*)则是隶属于鲈形目(Perciformes)南极鱼亚目(Notothenioidei)南极鱼科(Nototheniidae), 是生活海域环境与独角雪冰鱼类似, 体内正常表达血红蛋白和红血球的近缘种^[2]。

微量元素是动物生长发育、基本生理活动的必要营养成分, 几乎参与了机体的全部生理生化过程, 在维持生物体正常生理活动中起重要调节作用, 包括参与骨骼形成、电子传递、酸碱平衡和渗透压调节。另外, 微量元素还是激素

和酶的重要成分和激活剂。微量元素缺乏时, 会使生物学产生生化、结构和组织上的病变^[3]。因此, 对鱼类开展微量元素研究是鱼类生理研究的重要部分。

重金属元素是指密度在4.5 g/cm³以上的金属元素, 如Pb、Cd、Hg、Cu、Zn等。一些重金属元素对生物生长过程具有积极作用, 如Cu、Zn等; 但大部分重金属元素对生物生长发育无益, 甚至产生抑制或毒性作用^[4]。事实上, 在海洋生物的生长发育过程中, 不可避免地会通过食物链在体内富集重金属元素。南极鱼类作为南极食物网中的重要中间组成部分, 其体内重金属元素含量可作为衡量南极海域重金属污染水平的重要指标^[5]。

独角雪冰鱼与伯氏肩孔南极鱼同属鲈形目, 且生活海域重叠度较高, 其独特的生理结构特征, 使其成为了研究低温环境中生物功能基因进化的代表性生物。对两者各组织微量元素差异

收稿日期: 2024-09-03 修回日期: 2024-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(32470557); 国家重点研发计划(2022YFD2400800)

作者简介: 李雨曦(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分子生物学。E-mail: 924314611@qq.com

通信作者: 许强华, E-mail: qhxu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

的研究有助于了解因血红蛋白丢失所带来的影响以及两种鱼类的生理差异。

目前,已有学者对南极鱼骨骼、肝脏、肾、胃、肠的微量元素含量进行了测定,发现南极鱼肝脏中Fe元素含量相对其他海域鱼类较低,但其他有害重金属(如:As、Cd、Hg)的含量较高,这可能与南极海域本身的重金属含量有关^[6-8]。对于8种凯尔盖伦海域底栖南极鱼类的微量元素测定显示,Cd在不同南极鱼的肝脏和肾脏中的含量表现出很大的种间差异,可能与不同深度水域南极鱼食物构成不同有关^[9]。但学术界对于南极鱼脑组织及心脏等器官微量元素水平的研究目前仍然较少。

因此,本研究拟对独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼的脑、心脏、十二指肠3种组织中的铁(Fe)、铬(Cr)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)和汞(Hg)等9种元素进行测定,以探究缺乏血红蛋白的独角雪冰鱼与具有血红蛋白和红细胞的伯氏肩孔南极鱼两者对不同微量元素吸收富集规律的差异,并为探究南极海域重金属污染水平提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 样本来源

实验用的独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼样品均来自“雪龙”号南极科考船,采样地点为南极罗斯海海域(74°55'S,163°46'E)。

1.2 主要实验仪器与试剂

实验用仪器主要有诱导耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500CE)、电子天平(BS-4083,北京科恒实业发展有限公司)、大型微波消解仪(Milestone ETHOS UP)、鼓风干燥箱(DHG-9030A,上海一恒科学仪器有限公司)、移液器(Eppendorf)、超纯水系统(MilliQ, P2PA7491)等。实验所用试剂硝酸、双氧水、高氯酸等均购于生工生物工程(上海)股份有限公司。

1.3 样品处理

实验所用的南极鱼样品在运输过程及实验之前一直储存在-80℃超低温冰箱中。样品解冻后,利用酸洗消毒过的解剖工具分离独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼样品的脑、心脏与十二指肠组织。称量适量的样品置于微波消解管中,缓慢加入4.5 mL 70% HNO₃,再加入0.5 mL的HClO₄,摇

动消解管使两者混匀,使样品与消化液充分接触。随后,将消解管放入微波消解仪(CEM Mars)中,在85℃下消解4 h,同时进行空白对照组的实验。待样品冷却至室温后,打开消解仪。将消解后的样品置于电热板上140℃赶酸,待白烟冒尽,剩余体积1 mL左右转移到15 mL容量瓶中,用超纯水定容,混匀待测。待测的样品置于4℃保存(在Se含量测定中,使用2 mL 70% HNO₃和2 mL 35% H₂O₂来进行消化)。为避免所用实验用具被微量元素污染,在使用之前用洗涤剂清洗玻璃器皿和塑料器皿,并将其在1:3硝酸溶液中浸泡至少24 h,之后用超纯水冲洗并烘干。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500CE)对空白溶液和标准溶液不同组织样品中的Fe、Cr、Mn、Cu、Zn、As、Se、Cd和Hg等9种元素的含量进行测定。

1.4 数据分析

实验数据采用SPSS 10.0软件进行统计处理,采用One-way ANOVA检验法对不同组织内元素含量的差异分别进行显著性分析。测定结果用平均值±标准差(Mean±SD)表示,显著性水平设为0.05,极显著性水平设为0.01。

2 结果

2.1 两种南极鱼3种组织中的微量元素含量

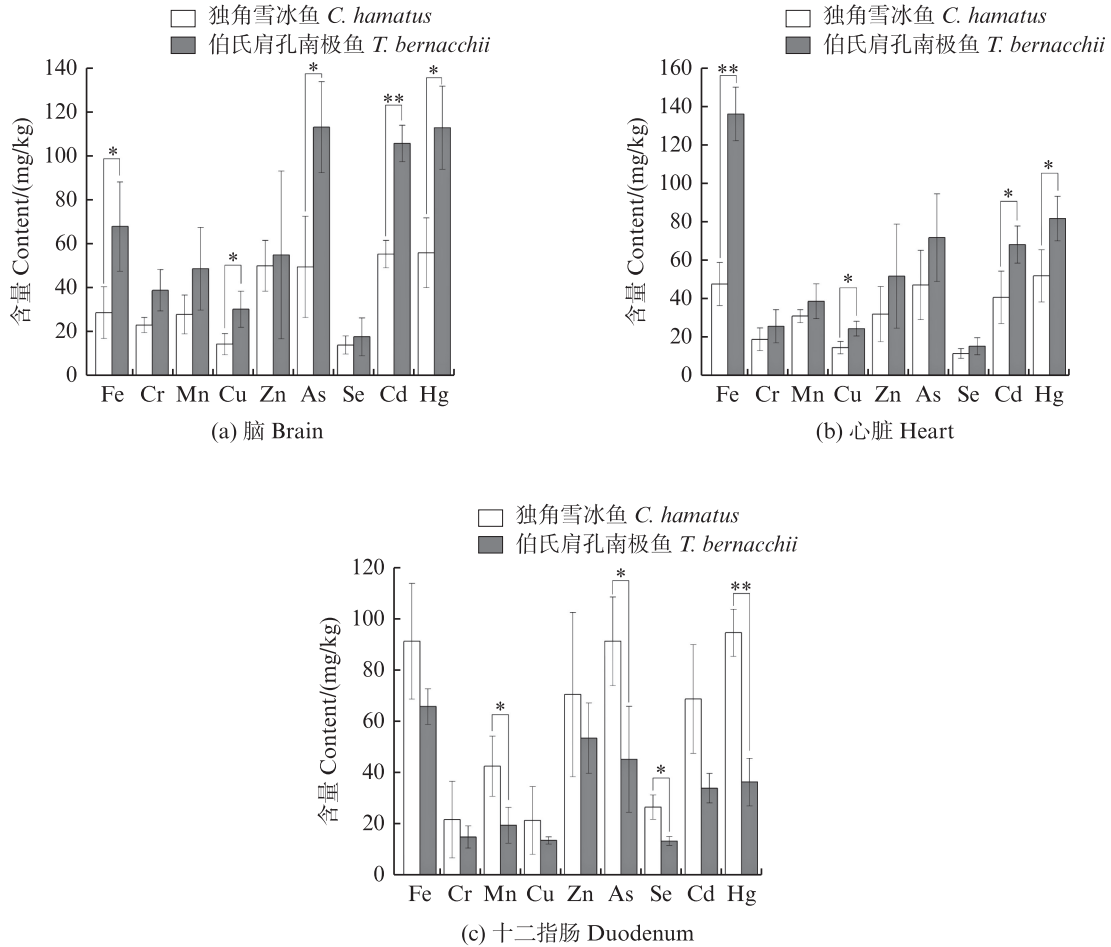
实验测定了两种南极鱼的脑、心脏与十二指肠中Fe、Cr、Mn、Cu、Zn、As、Se、Cd、Hg等9种微量元素含量,并对其差异进行显著性分析。两种南极鱼的脑组织微量元素的平均含量与标准差如图1a所示。在9种微量元素中,Fe、Cu、As、Hg等4种元素含量在两种南极鱼脑组织中存在显著性差异($P<0.05$),而Cd元素含量在两种南极鱼脑组织中的含量存在极显著性差异($P<0.01$)。独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼的脑组织微量元素含量顺序分别为Hg>Cd>Zn>As>Fe>Mn>Cr>Cu>Se和As>Hg>Cd>Fe>Zn>Mn>Cr>Cu>Se。值得一提的是,伯氏肩孔南极鱼的脑组织中各微量元素的含量均高于独角雪冰鱼(图1a)。

两种南极鱼心脏中的Fe元素含量呈现极显著性差异($P<0.01$),两种南极鱼心脏中的Cu、Cd、Hg等3种元素含量存在显著性差异($P<0.05$)。两种南极鱼心脏组织中,独角雪冰鱼的9种微量元素含量顺序为Hg>Fe>As>Cd>Zn>Mn>

Cr>Cu>Se;伯氏肩孔南极鱼的微量元素含量顺序为Fe>Hg>As>Cd>Zn>Mn>Cr>Cu>Se。跟脑组织类似,伯氏肩孔南极鱼的心脏组织中各微量元素的含量均高于独角雪冰鱼(图1b)。

从图1c可看出,独角雪冰鱼十二指肠的9种微量元素含量均在伯氏肩孔南极鱼之上。两种

南极鱼十二指肠中Mn、Se、As等3种微量元素的含量呈显著性差异($P<0.05$),Hg含量呈极显著性差异($P<0.01$)。独角雪冰鱼十二指肠中元素含量依次为Fe>Zn>As>Hg>Cd>Mn>Cu>Se>Cr,伯氏肩孔南极鱼十二指肠中元素含量顺序为Fe>Zn>As>Cd>Hg>Mn>Cr>Cu>Se(图1c)。



柱状图上“*”表示差异性显著,“**”表示差异性极显著。

“*”means $P<0.05$, the difference is significant; “**”means $P<0.01$, the difference is very significant.

图1 独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼3种组织中不同元素含量比较

Fig. 1 Comparison of contents of different elements in three kinds of tissues of *C. hamatus* and *T. bernacchii*

2.2 两种南极鱼不同组织中的微量元素分布

图2a和2b显示了独角雪冰鱼3种不同组织中的微量元素含量的分布规律,对于Fe、Cu、Mn、Zn、Se等5种必需微量元素来说,其含量最高的器官均为十二指肠,而Cr、As等有害重金属的含量顺序则是脑>十二指肠>心脏。

图2c和2d则显示了Fe、Cr、Mn、Cu、Zn、As、Se、Cd、Hg等9种元素在伯氏肩孔南极鱼不同组织中的分布规律。可以看出,伯氏肩孔南极鱼心脏中Fe的含量远高于其他2种组织,3种组织中的Zn元素水平相差不大,而其他7种微量元素的含量顺序都为脑>心脏>十二指肠。

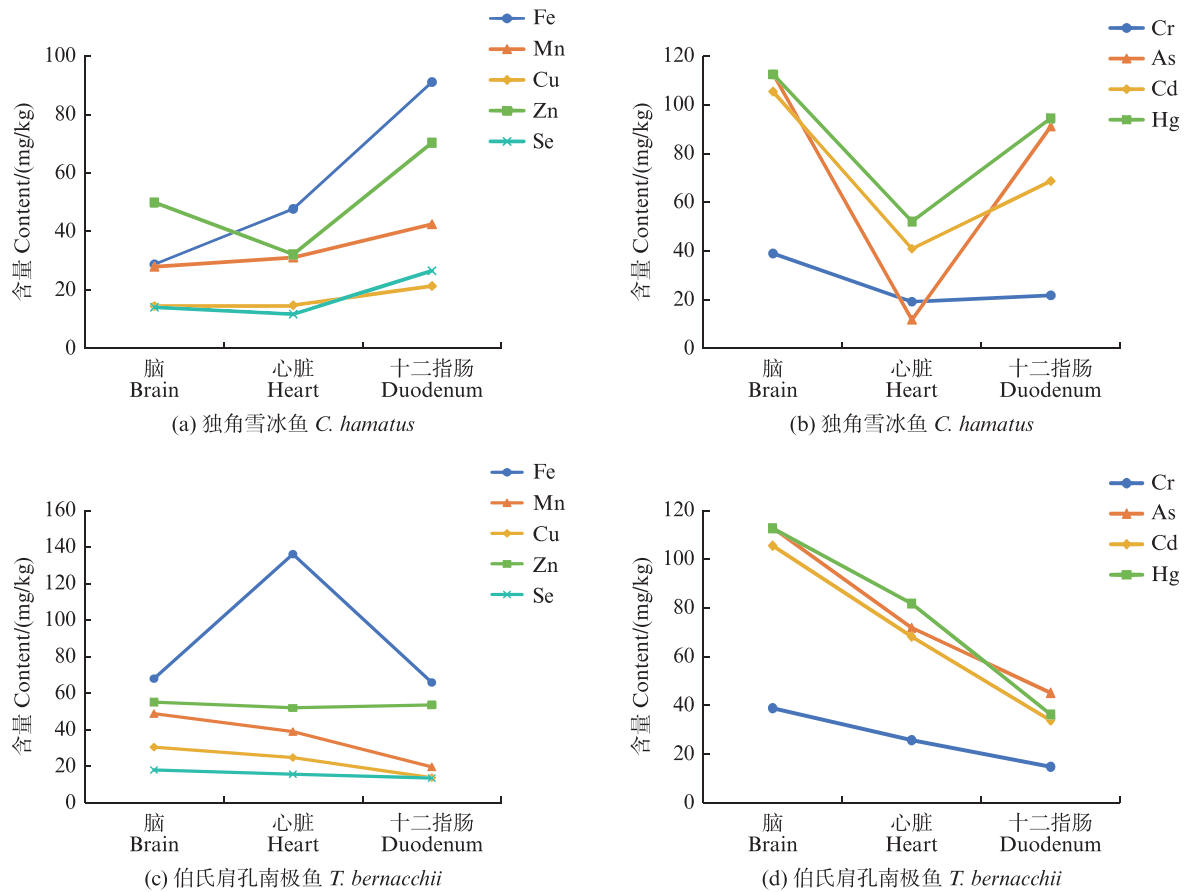


图2 不同微量元素在两种南极鱼的3种组织中的分布规律

Fig. 2 Distribution patterns of different trace elements in three tissues of two species of Antarctic fish

3 讨论

3.1 两种鱼类脑部微量元素含量差异

脑是鱼类最复杂的器官,控制着鱼类各项生理活动。与哺乳动物相比,鱼脑的结构相对简单,可分为端脑、间脑、中脑、小脑和延脑5个部分^[10]。Hg是一种广泛存在的有害重金属元素,对中枢神经系统有着严重的毒害作用,相较于其他重金属微量元素,Hg²⁺更容易穿透和损害脑部的血脑屏障,破坏神经细胞,并导致神经系统受损^[11]。本研究的测定结果显示,两种南极鱼脑部的Hg元素浓度超过其他重金属元素(图1a)。Hg容易通过大气运输,较其他重金属元素更易扩散^[12],推测南极海域的Hg污染主要来自大气污染。

Zn元素在神经系统发育中具有重要作用。在分子水平上,Zn控制细胞周期、细胞凋亡,蛋白质折叠等过程。Zn也是许多酶系统的组成部分,包括碳酸酐酶(Carbonic anhydrase)、超氧化物歧

化酶(Superoxide dismutase)、核糖核酸酶(Ribonuclease)和DNA聚合酶(DNA polymerase)^[13]。Zn参与许多免疫细胞,如NK细胞,单核细胞及巨噬细胞等的信号传导过程,缺Zn会导致衰老、神经退行性疾病、免疫缺陷、生长异常、癌症和其他症状^[14],但过量的Zn离子对突触后神经元造成神经毒性损害^[15]。独角雪冰鱼脑部的Zn元素含量高于Fe元素,在必需微量元素中占首位(图1a),可以看出Zn元素在神经系统中的重要作用。

3.2 两种鱼类心脏微量元素含量差异

心脏是最重要的血液循环器官。具有红细胞和血红蛋白的伯氏肩孔南极鱼心脏中Fe元素含量显著高于其他两种组织(图1b)。与伯氏肩孔南极鱼相比,独角雪冰鱼心脏的Fe元素含量相对较低(图1b)。Fe作为动物机体维持正常生长发育和代谢所必需的微量元素之一,在机体内发挥着重要的生物学功能。例如,Fe处于许多氧化还原酶的催化位置,影响线粒体电子传递过程;Fe与肌红蛋白结合用于肌肉储存氧;Fe还参

与血红蛋白、DNA、蛋白质等合成以及氧的运输等^[16-17]。由于Fe在能量释放过程中起到重要作用,心脏、肝脏等具有高度生理活动能力和生化功能的细胞线粒体内Fe元素含量极高^[18]。两种南极鱼心脏中Fe元素含量的显著差异推测与独角雪冰鱼不具有血红蛋白有关。

在鱼的心脏组织中,Cd²⁺可能诱发心律失常。HAVERINEN等^[19]研究表明Cd²⁺改变了虹鳟心脏心室动作电位(APs)的波形。许多对斑马鱼、日本青鳉和虹鳟的研究表明,暴露于Cd²⁺中会改变鱼类心率并引起心电图变化。且用浓度为10 μmol/L的Cd处理的幼虫的心包和心室扩大^[20-21]。

独角雪冰鱼心脏中的微量元素含量明显低于其他2个器官(图2a和2b),伯氏肩孔南极鱼心脏中的重金属含量也比脑中的重金属的含量低很多(图2c和2d),这说明,与脑组织相比,心脏组织可能更难以富集微量元素,推测与心脏频繁的血液流动有关。

3.3 两种南极鱼十二指肠微量元素含量差异

十二指肠为小肠的第一段,介于胃与空肠之间,是小肠中长度最短、管径最大、位置最深且最为固定的部分。它既接受胃液,又接受胰液和胆汁,在消化过程中起到非常重要的作用^[22]。

肠道是鱼类吸收多种微量元素(如Fe、Cu、Se、Mn)的主要器官^[23]。Cu是所有生物体细胞功能所必需的微量元素^[24]。Cu离子具有独特的化学性质,参与Fe代谢、细胞能量产生、保护细胞免受自由基损伤、脑神经递质中的胶原合成以及黑色素产生等过程^[25]。Se同样具有重要的生理作用,硒蛋白通过降解有毒的H₂O₂使细胞避免氧化损伤^[26]。已有研究指出^[27],Se与动物、人类和鱼类的健康和疾病预防密切相关。独角雪冰鱼十二指肠中各种微量元素的含量均高于伯氏肩孔南极鱼,推测可能与该鱼体型较大,捕获更多的食物有关。

3.4 南极鱼与非南极鱼组织元素含量差异

由于南极海域的特殊环境,两种南极鱼脑、心脏与肠道中的微量元素水平与其他海域的鱼类有着较为明显的差异。从表1可以看出^[28-33],

和其他水域的鱼类相比,两种南极鱼的脑与心脏中的Fe元素含量相对较低。作为鱼类中血液含量相对丰富的两种器官,其Fe元素含量相对其他水域鱼类较低原因可能与南极海域长期低温环境导致南极鱼的血红蛋白含量相对较低相关^[34]。但其他水域大部分鱼类的组织器官中Hg、As、Cd等重金属元素浓度都要远低于独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼,Hg、As、Cd等重金属元素皆为对鱼类生理活动有严重负面影响的有害微量元素,其主要摄入来源是由食物链逐渐积累,南极鱼类重金属元素含量较高,可能原因是获取样品海域受到了一定程度的重金属污染。

南极海域相较于其他海域,环境相对独立,离各类污染源距离较远。然而,由于人类活动的全球化及大气循环、洋流的存在,仍然有重金属污染物进入了南极海域,如南极海域中Hg的主要来源是大气污染物^[35],其源头包括工业污染、能源生产和废弃物处理等活动释放的有机汞和无机汞。这些污染物可以通过大气传输到南极海域,再通过水柱和食物链的传递进入南极生态系统,最终累积在南极的生物体内^[36]。本研究在两种南极鱼体内检测到相对较高的Hg、As、Cd等重金属元素积累,这在一定程度上反映出南极海域中可能存在一定程度的重金属污染。

4 结论

当前对于南极鱼类体内的微量元素的研究表明,南极鱼体内与其他海域鱼类的微量元素水平既在南极鱼的生理活动调控及抗低温中起到重要作用,也受到南极海域水体环境的金属元素浓度的影响。同时,作为极少数缺乏血红蛋白的南极鱼类,独角雪冰鱼与伯氏肩孔南极鱼组织器官的微量元素含量差异也有着显著差异。对两种南极鱼不同组织微量元素含量差异的研究有助于我们分析南极环境对南极鱼生理演化的影响,并一定程度反映该地区重金属污染的情况。

作者声明本文无利益冲突。

表1 南极鱼与非南极鱼脑与心脏的微量元素含量比较
 Tab. 1 Comparison of trace element content in the brain and heart of Antarctic fish and non-Antarctic fish

种类 Species	微量元素含量(干重)Element content (dry weight)/(mg/kg)								
	Fe	Cr	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd	Hg
脑 Brain									
独角雪冰鱼 <i>Chionodraco hamatus</i>	28.68±11.70	23.07±3.43	27.87±8.83	14.40±4.80	49.92±11.53	49.43±22.97	13.99±4.07	55.26±6.19	55.84±15.87
伯氏肩孔南极鱼 <i>Trematomus bernacchii</i>	67.79±20.23	38.86±9.42	48.61±18.76	30.23±8.18	54.91±38.08	112.83±20.68	17.72±8.60	105.47±8.29	112.60±18.83
鲶 ^[28] <i>Silurus asotus</i>	198.64±128.42	32.87	1.50	68.36±50.60	198.64	1.29	1.80	0.58±0.89	0.72±0.15
岩原鲤 ^[29] <i>Procypris rabaudi</i>	169.19±60.50	-	3.46±1.01	2.19±0.21	20.59± 5.9	-	-	-	-
黄颡鱼 ^[29] <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	145.35±45.22	-	11.24±1.5	22.48±2.01	43.37±17.4	-	-	-	-
鳊 ^[30] <i>Aristichthys nobilis</i>	-	0.31	-	3.00	-	-	-	0.045	-
青鱼 ^[30] <i>Mylopharyngodon piceus</i>	-	0.34	-	1.59	-	-	-	0.038	-
心脏 Heart									
独角雪冰鱼 <i>Chionodraco hamatus</i>	47.69±11.23	18.98±5.96	31.02±3.39	14.65±3.18	32.09±14.33	47.15±18.03	11.63±2.55	40.79±13.62	51.97±13.57
伯氏肩孔南极鱼 <i>Trematomus bernacchii</i>	136.06±13.88	25.76±8.61	38.76±9.03	24.52±3.79	51.82±27.07	71.84±22.79	15.39±4.43	68.21±9.67	81.70±11.51
鲶 ^[28] <i>Silurus asotus</i>	470.47	0.71±0.80	2.16±0.37	22.15±2.77	143.73±42.51	-	3.15	0.20±0.24	1.05
黄颡鱼 ^[31] <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	746.72±244.96	-	36.1±21.34	43.0±17.41	120.2±35.49	-	-	-	-
鲢 ^[32] <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	-	3.24	-	17.9	-	0.64	-	0.88	0.10
鲤 ^[32] <i>Cyprinus carpio</i>	-	4.77	-	19.10	-	1.00	-	0.06	0.07
鳊 ^[33] <i>Aristichthys nobilis</i>	-	-	-	2.72±0.66	8.04±1.06	-	-	0.13±0.05	-
草鱼 ^[33] <i>Ctenopharyngodon idella</i>	-	-	-	3.06±0.37	6.71±0.34	-	-	0.42±0.04	-
青鱼 ^[33] <i>Mylopharyngodon piceus</i>	-	-	-	3.32±0.40	7.72±1.42	-	-	0.23±0.07	-

参考文献:

- [1] RABOSKY D L, CHANG J, TITLE P O, et al. An inverse latitudinal gradient inspeciation rate formarine fishes[J]. Nature, 2018, 559(7714): 392-395.
- [2] BHATIA M, KUJAWINSKI E, DAS S, et al. Greenland melt water as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(4): 274-278.
- [3] National Research Council (NRC) , Board on Agriculture, Subcommittee on Fish Nutrition. Nutrient requirements of fish[M]. Washington: National Academy Press, 1993.
- [4] 王东利, 张晓鸣, 刘玉敏. 持久性有机污染物的环境行为及对人体健康的危害[J]. 国外医学卫生学分册,

- 2003, 30(3): 169-173.
- WANG D L, ZHANG X M, LIU Y M. Environmental behavior of persistent organic pollutants and their hazards to human health [J]. Foreign Medical Sciences Section Hygiene, 2003, 30(3): 169-173.
- [5] 李莹莹. 南极南乔治亚岛与南奥克尼群岛裘氏鳄头冰鱼微量元素水平、分布及区域差异研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- LI Y Y. Concentration, distribution and regional differences of trace elements in Mackerel Ice fish (*Champscephalus gunnari*) in the South Georgia and South Orkney Islands, Antarctic [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [6] 孙建飞, 刘洋, 许强华. 独角雪冰鱼和伯氏肩孔南极鱼骨骼中的元素分析[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(4): 387-392.
- SUN J F, LIU Y, XU Q H. Analysis of elements in skeleton of Antarctic icefishes *Chionodraco hamatus* and *Trematomus bernacchii* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(4): 387-392.
- [7] 李雪, 翟万营, 江守文, 等. 两种南极鱼类4种组织中微量元素测定与比较[J]. 海洋渔业, 2024, 46(3): 325-333.
- LI X, ZHAI W Y, JIANG S W, et al. Determination and comparison of trace element content in four tissues of two antarctic fish species [J]. Marine Fisheries, 2024, 46(3): 325-333.
- [8] 咸晨微, 黄少君, 翟万营, 等. 2种南极鱼多组织的微量元素含量测定分析[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 503-511.
- XIAN C W, HUANG S J, ZHAI W Y, et al. Determination and analysis of trace element content in multi-organization of two antarctic fish species [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2023, 42(6): 503-511.
- [9] ISHIKAWA M, NAKAMURA K. Trace elements in tissues and organs of an Antarctic icefish, *Champscephalus gunnari*. [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1990, 49(1/4): 220-224.
- [10] 温海深, 王孝杰. 辐鳍鱼脑的发生、分化及生理功能研究综述[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(7): 1-10.
- WEN H S, WANG X J. Review of the advances in the phylogenetic development, differentiation and physiological function of ray-finned fish brains [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(7): 1-10.
- [11] 徐永江, 柳学周, 马爱军. 重金属对鱼类毒性效应及其分子机理的研究概况[J]. 海洋科学, 2004, 28(10): 67-70.
- XU Y J, LIU X Z, MA A J. Current research on toxicity effect and molecular mechanism of heavy metals on fish [J]. Marine Sciences, 2004, 28(10): 67-70.
- [12] LESCORD G L, JOHNSTON T A, HEERSCHAP M J, et al. Arsenic, chromium, and other elements of concern in fish from remote boreal lakes and rivers: drivers of variation and implications for subsistence consumption [J]. Environmental Pollution, 2020, 259: 113878.
- [13] National Academy of Sciences-National Research Council, Assembly of Life Science. Report, 1979-1980: assembly of life sciences, national research council[R]. 1980.
- [14] KUMAR V, KUMAR A, SINGH K, et al. Neurobiology of zinc and its role in neurogenesis[J]. European Journal of Nutrition, 2021, 60(1): 55-64.
- [15] CHOI S, HONG D K, CHOI B Y, et al. Zinc in the Brain: friend or foe? [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(23): 8941.
- [16] CHENG C H C. Evolution of the diverse antifreeze proteins [J]. Current Opinion in Genetics & Development, 1998, 8(6): 715-720.
- [17] CHENG C H C, CHEN L B. Evolution of an antifreeze glycoprotein[J]. Nature, 1999, 401(6752): 443-444.
- [18] 王三根. 微量元素与健康[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2004: 29.
- WANG S G. Trace Elements and Health[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2004: 29.
- [19] HAVERINEN E, FERNANDEZ M F, MUSTIELES V, et al. Metabolic syndrome and endocrine disrupting chemicals: an overview of exposure and health effects [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(24): 13047.
- [20] BARJHOUX I, GONZALEZ P, BAUDRIMONT M, et al. Molecular and phenotypic responses of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) early life stages to environmental concentrations of cadmium in sediment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18): 17969-17981.
- [21] WOLD M, BECKMANN M, POITRA S, et al. The longitudinal effects of early developmental cadmium exposure on conditioned place preference and cardiovascular physiology in zebra fish [J]. Aquatic Toxicology, 2017, 191: 73-84.
- [22] 姜国华. 局部解剖学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2016.
- JIANG G H. Topographic Anatomy[M]. Beijing: China Traditional Chinese Medicine Press, 2016.
- [23] BURY N R, WALKER P A, GLOVER C N. Nutritive metal uptake in teleost fish[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(1): 11-23.
- [24] LALL S P, KAUSHIK S J. Nutrition and metabolism of

- minerals in fish[J]. *Animals*, 2021, 11(9): 2711.
- [25] LINDER M C. Biochemistry and molecular biology of copper in mammals [M]//Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology. Totowa: Humana Press, 2002: 3-32.
- [26] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health [J]. *Metallomics*, 2014, 6(1): 25-54.
- [27] ARTHUR J R, MCKENZIE R C, BECKETT G J. Selenium in the immune system [J]. *The Journal of Nutrition*, 2003, 133(5): 1457S-1459S.
- [28] 唐精, 叶元土, 萧培珍, 等. 胡子鲶组织器官中4种微量元素的测定分析[J]. *饲料广角*, 2008(18): 36-38.
- TANG J, YE Y T, XIAO P Z, et al. Determination and analysis of four trace elements in catfish tissues and organs [J]. *Feed China*, 2008(18): 36-38.
- [29] 王友慧, 叶元土, 林仕梅, 等. 嘉陵江8种鱼类不同组织微量元素含量分析[J]. *动物学杂志*, 2005, 40(5): 99-103.
- WANG Y H, YE Y T, LIN S M, et al. Analysis of trace elements in different tissues of 8 kinds of rare fish in Jialing River [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2005, 40(5): 99-103.
- [30] 陈小洋. 初探鱼体内各器官重金属的分布及食用安全 [J]. *理科考试研究*, 2015(21): 72-72
- CHEN X Y. The distribution and food safety of heavy metals in various organs of fish [J]. *Science examination and research*, 2015, (21): 72-72
- [31] 蒋蓉. 铜、铁、锰、锌对黄颡鱼生长和生理机能的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
- JIANG R. Effects of Cu, Fe, Mn and Zn on growth and physiological function of *Pelteobagrus fulvidraco* [D]. Suzhou: Soochow University, 2006.
- [32] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖鱼体器官及肌肉组织中重金属的分布特征及其与水体重金属污染水平的相关性[J]. *水产学报*, 2012, 36(5): 714-722.
- TIAN L F, HU J W, LUO G L, et al. Distribution characteristics of heavy metals in fish organs and muscle tissues of Baihua Lake, Guizhou, and their correlation with heavy metal pollution level in water [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(5): 714-722.
- [33] 涂宗财, 庞娟娟, 郑婷婷, 等. 吴城鄱阳湖自然保护区鱼体重金属的富集及安全性评价[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(4): 878-883.
- TU Z C, PANG J J, ZHENG T T, et al. Enrichment and safety evaluation of fish body weight metals in Wucheng Poyang Lake Nature Reserve [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(4): 878-883.
- [34] CHEN L B, DEVRIES A L, CHENG C H C. Convergent evolution of antifreeze glycoproteins in Antarctic notothenioid fish and Arctic cod [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(8): 3817-3822.
- [35] 王建成. 南极内陆和海洋边界层大气汞传输和气态汞海—气交换过程研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- WANG J C. Study on atmospheric Hg's transport in the boundary layer over the antarctic inland and sea sand—air-sea flux [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [36] 王丹蓉. 南极半岛北部南极磷虾体内微量元素时空分布及其影响因素分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- WANG D R. Spatial-temporal variations and influencing factors of trace elements in Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.

Comparative analysis of trace elements in three tissues of *Chionodraco hamatus* and *Trematomus bernacchii*

LI Yuxi^{1,2}, JIANG Shouwen³, WU Zhichao³, ZHAI Wanying³, XU Qianghua^{1,2,3}

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. International Research Center for Marine Biosciences, Ministry of Science and Technology, Shanghai 201306, China)

Abstract: To explore the differences in element accumulation between two Antarctic fish species, this study utilized inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) to determine and compare the contents of nine trace elements: iron (Fe), chromium (Cr), manganese (Mn), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), selenium (Se), cadmium (Cd), and mercury (Hg) in three tissues (brain, heart, and duodenum) of both species. The results show that the content of Fe, Cu, As, Hg, Cd and other elements in the brain of *Chionodraco hamatus* was significantly lower than that of *Trematomus bernacchii* ($P < 0.05$); The content of Fe, Cu, Cd and Hg in heart tissue was also significantly lower than *T. bernacchii* ($P < 0.05$); However, the amount of Hg, Mn, As, and Se in the duodenum of *C. hamatus* was significantly higher than *T. bernacchii* ($P < 0.05$), The content of Fe, an important constituent element of hemoglobin, in the brain and heart of the *C. hamatus* is significantly lower than *T. bernacchii*. Lack of hemoglobin should be the main cause of this difference. The heavy metal content in the duodenum of the *C. hamatus* is significantly high, which is speculated to be related to its benthic lifestyle, making it more prone to accumulating heavy metals. Compared with fish in other waters, the content of Cr, As, Cd, Hg, Mn and Cu in the two Antarctic species were higher than that of other fish, which may reflect a certain degree of heavy metal pollution in some Antarctic waters.

Key words: Antarctic fish; heart; brain; duodenum; trace element; heavy metal