

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20230425002

冷甜甜, 谢婧倩, 刘必林. 海洋中上层鱼类微量元素赋存研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(4): 115-130

Leng T T, Xie J Q, Liu B L. Progress on trace elements occurrence of marine pelagic fish [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(4): 115-130 (in Chinese)

海洋中上层鱼类微量元素赋存研究进展

冷甜甜¹, 谢婧倩², 刘必林^{1,3,4,5,*}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306
2. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306
4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306
5. 农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室, 上海 201306

收稿日期: 2023-04-25 录用日期: 2023-06-26

摘要: 微量元素在生物体内发挥着至关重要的作用。海洋中上层鱼类是海洋食物网的重要组成部分, 可以富集海洋环境中的微量元素, 并通过食物链的传递, 最终到达顶端营养级海洋生物。当部分微量元素在海洋生物体中过少或过多累积将会造成生命威胁, 甚至危害人群健康。随着海洋中上层鱼产品需求量日益增加, 引发了人们对海洋中上层鱼类食品安全问题的高度关注。目前, 微量元素在海洋中上层鱼类体内赋存特征已被广泛研究, 但缺少对其元素分布、影响因素以及相互关系等系统梳理。本文综述了海洋中上层鱼类微量元素的赋存特征和微量元素之间的相互作用, 总结了微量元素在海洋中上层鱼类研究含量测定的应用和评价方法, 以期为实现海洋渔业的可持续开发和水产养殖等相关研究提供参考。

关键词: 微量元素; 中上层鱼类; 元素相关性; 重金属

文章编号: 1673-5897(2023)4-115-16 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Progress on Trace Elements Occurrence of Marine Pelagic Fish

Leng Tiantian¹, Xie Jingqian², Liu Bilin^{1,3,4,5,*}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China
4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China
5. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Received 25 April 2023 accepted 26 June 2023

Abstract: Trace elements are important to organisms. Pelagic fish are vital component to the marine food web. They have the ability to accumulate trace elements from the marine environment and transfer them through the food chain, ultimately reaching top-level marine organisms. Insufficient or excessive accumulation of trace elements can pose threats to marine life and further harm human health. The growing demand for pelagic fish products has raised

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目(YFD0901404); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位跟踪计划项目(22GZ03); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估专项(公海渔业资源综合科学调查)

第一作者: 冷甜甜(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态重金属污染, E-mail: 1277456578@qq.com

* 通信作者(Corresponding author), E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

significant concerns regarding food safety. While there has been extensive research on the occurrence characteristics of trace elements in pelagic fish, a systematic understanding of their distribution, influencing factors, and relationships is still absent. This article provides an overview of the occurrence characteristics of trace elements in pelagic fish, as well as the interactions among these elements. It also summarizes the application and evaluation methods for determining trace element content in research on pelagic fish, aiming to provide references for the sustainable development of marine fisheries and related studies, including aquaculture.

Keywords: trace elements; marine pelagic fish; elemental correlation; heavy metal

中上层鱼类作为海洋生态系统的重要组成部分^[1-2],它在海洋食物网中发挥着关键作用^[3],是连接浮游生物和底栖生物的关键种类^[4],并且在人类的饮食中占有重要地位^[5-7]。海洋中上层鱼类主要通过体表渗透、鳃膜吸附和饵料消化3种途径,吸收海洋环境中的化学元素^[8]。其中,微量元素是构成海洋鱼类有机体的重要组成部分,对于海洋鱼类骨骼的形成、维持内环境的稳定、保持物质代谢正常进行和促进生长发育等具有关键作用^[9]。铁(Fe)、钼(Mo)、锰(Mn)、硒(Se)、钴(Co)、铜(Cu)和锌(Zn)等微量元素属于必需元素,主要以金属酶的形式参与生理过程^[10-11],如精氨酸酶、谷胱甘肽过氧化物酶、丙酮酸脱羧酶,但在低水平时会引起一系列的缺乏症,高水平时可能会产生毒性作用;砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)和汞(Hg)等是非必需微量元素,即使在很低的浓度下,也对生物体有较强的毒性^[12]。

国内外有关海洋中上层鱼类微量元素的相关研究主要涉及元素分布和赋存机制,其为海洋渔业资源的开发利用提供了重要参考^[13]。近年来,随着世界海洋环境的污染和破坏,海洋生态系统中的微量元素污染受到了广泛关注。人体摄入海产品中的过量微量元素,会导致生理、代谢过程障碍,遗传突变

等疾病^[14-17]。微量元素对海产品的污染和人类健康的危害已成为国内外研究者普遍关注的安全问题。目前,海洋中上层鱼类微量元素赋存特征是海洋生态的研究热点,但微量元素之间作用关系、赋存影响因素和相关应用却少有报道。本文综述了近30年海洋中上层鱼类微量元素赋存特征,概括了元素相关性以及影响赋存水平的因素,总结了微量元素在鱼类生态学中的应用和微量元素风险评价方法,以期渔业资源开发利用和健康风险评估提供参考。

1 发表文献概况 (Overview of published literature)

1.1 文献计量分析载文量分析

本研究基于 Web of Science(WOS)中的核心合集数据,以“TS = ‘ Marine pelagic fish ’ AND TS = ‘ Trace element ’ AND TS = ‘ Occurrence ’ ”为主题词为检索项,时间跨度为1995—2022年,经过结果的扩展和精炼,共获得943篇文献。1995—2002年海洋中上层鱼类微量元素赋存的研究,发文量整体呈上升趋势(图1)。其中1995—2010年间发文量波动不大,发文量呈现缓慢增长趋势;2010年后发文量迅速增长,从2010年的16篇到2021年的峰值140篇。

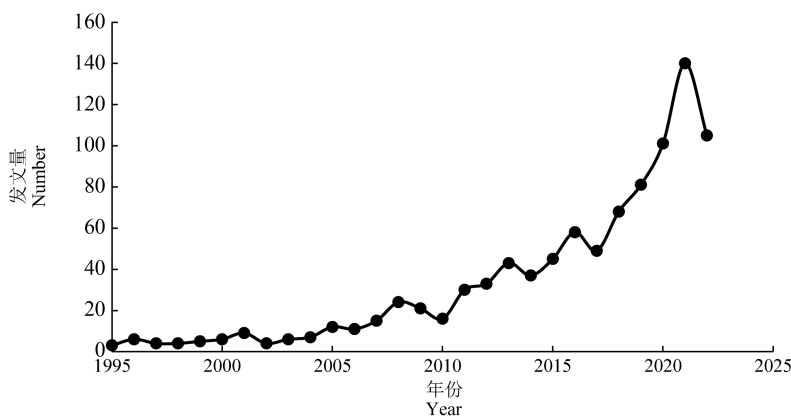


图1 1995—2022年海洋中上层鱼类微量元素赋存论文年度变化趋势

Fig. 1 Annual trends of papers on trace element occurrence of marine pelagic fish from 1995 to 2022

整体数据表明,海洋中上层鱼类微量元素研究发文量呈上升趋势,近几年来相关研究越来越得到国际学术界重视和关注。

1.2 关键词突现分析

运用 Citespace 软件分析海洋中上层鱼类微量元素赋存相关词频的变动趋势,可以直观地看出关键词的研究强度和时间变化趋势。分析 WOS 文献关键词(表 1),首先,1995—2014 年期间,“cadmium”“copper”“zinc”“food chain”和“lead”这些突现词大量出现且有很高的研究强度,表明在海洋中上层鱼类微量元素赋存研究初期,镉、铜、锌和铅是主要研究元素,食物链是主要的研究方向,这些研究内容具有极其重要的研究价值。其次,“methyl mercury”“South China”和“total mercury”等关键词在 2005—2018 年突现强度较高,表明该时期主要研究对象是甲基汞和总汞,中国南部海洋地区成为海洋中上层鱼类微量元素赋存研究的热点地区。最后,在 2019—2022 年期间,“health risk assessment”呈现出较高的突现度,说明海洋中超标的微量元素引起了人类对生态以及自身健康的关注。今后,关于海洋中上层鱼类微量元素赋存情况对人类健康的影响仍会是重要的研究方向。

1.3 关键词聚类分析

为探究近期海洋中上层鱼类微量元素的研究热

点,对 WOS 核心合集文献库中近 10 年海洋中上层鱼类微量元素赋存研究的文献数据进行关键词共现分析,通过 CiteSpace 软件在此基础上使用聚类功能得到相应图谱(图 2)。根据 2012—2022 年关键词进行聚类排序,主要为“heavy metal”“ecological risk assessment”“element level”“toxic element”和“element concentration”。基于微量元素的赋存特征对海洋中上层鱼类的影响研究,研究人员尤其关注重金属相关研究。近年来各种风险评估应用普遍,生态风险评估成为该领域主要研究方向,表明生态环



图2 2012—2022 年外文文献关键词聚类分析
Fig. 2 Keyword clustering analysis of foreign literature from 2012—2022

表 1 1995—2022 年外文文献关键词突现分析
Table 1 Analysis of keyword emergence in foreign language literature from 1995—2022

突现词 Emergent word	突现强度 Strength	突现开始时间 Beginning	突现结束时间 Ending
铜 Copper	7.14	1995	2010
锌 Zinc	6.3	1995	2014
镉 Cadmium	8.39	1998	2013
食物链 Food chain	3.77	2000	2008
铅 Lead	5.75	2002	2013
甲基汞 Methyl mercury	3.78	2005	2012
海洋 Marine	4.18	2010	2015
有机氯农药 Organochlorine pesticide	5.56	2011	2016
中国南部 South China	4.2	2011	2018
锌 Zn	4.13	2011	2018
土耳其 Turkey	3.62	2011	2018
总汞 Total mercury	3.46	2012	2015
大小 Size	3.99	2014	2015
海 Sea	3.89	2014	2017
淡水 Fresh water	3.69	2014	2016
健康风险评估 Health risk assessment	5.46	2019	2022

境导致海洋中上层鱼类微量元素含量超标,微量元素污染评价具有与人体健康相结合的趋势。“element level”是一个重要的聚类,与此相关的关键词为“toxic element”和“element concentration”反映出海洋中上层鱼类微量元素的赋存水平及特征成为重要的研究方向。

1.4 海洋中上层鱼微量元素的前沿方向

文献统计分析显示,目前海洋中上层鱼类微量元素赋存的前沿研究方向包括以下3类:(1)赋存特征相关研究,包括元素分布、富集能力以及生物利用和影响因素等;(2)微量元素在鱼类生态学研究中的应用,包括种群判定、栖息环境和洄游分布等;(3)风险评估,如在食物链中传递的生态风险以及对人类的健康风险评估。

2 海洋中上层鱼类微量元素赋存特征(Trace element occurrence characteristics of pelagic fish in the ocean)

2.1 微量元素赋存情况

海洋中上层鱼类微量元素富集能力普遍与组织、体型、物种和营养级有关。Shalini 等^[18]对印度东南沿岸部分海洋中上层鱼类不同器官中微量元素浓度进行了研究,发现在肌肉中微量元素的存在顺序为 Fe>Zn>Cu>As>Ni>Cr>Cd>Hg>Co>Pb,在鳃中顺序为 Fe>Zn>Cu>As>Cd>Ni>Cr>Co>Pb>Hg,在肝脏中顺序为 Fe>Zn>Cu>As>Cd>Co>Pb>Ni>Cr>Hg,在骨骼中顺序为 Fe>Zn>Cu>As>Cr>Cd>Ni>Co>Pb>Hg。Rubio 等^[19]通过研究竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)20种微量元素,发现肝脏中 Fe、Mn 和 Cu 的平均浓度高于肌肉,且肌肉中 Cd 和 Pb 的平均浓度均未超过欧盟委员会规定的最大限值。Afandi 等^[20]对来自非洲西北部海岸日本鲈(*Scomber japonicus*)、竹荚鱼、鳀鱼(*Engraulis japonicus*)和沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)4种中上层鱼体肌肉10种微量元素进行测定,发现不同物种的微量元素水平存在显著差异($P<0.05$),将4种鱼类不同组织微量元素浓度作对比,发现日本鲈肝脏中 Fe、Zn、Cd、Co、Cu 和 Pb 的含量显著较高($P<0.05$),鳀鱼肌肉中具有较高的 Mn、Cu、Cr、Ni 和 Pb 含量。Agusa 等^[21]发现 Cu、Se、Ag、Sn、Cd 和 Hg 的浓度与大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)体长呈显著正相关关系,Pb 的浓度随大眼金枪鱼体长的增加而降低。Honda 等^[22]研究发现海洋中上层鱼类肌肉中 Mn、Cu、Cd 和 Pb 的浓度随着体长的增加而降低。Bodin 等^[23]在西印度洋海洋中上层生物群

落微量元素的研究中,发现 Hg 浓度与营养位置之间存在正相关关系,反映了 Hg 通过海洋中上层食物网产生生物放大作用。

不同海域、季节和食性的海洋中上层鱼类对微量元素的富集水平有所差异,微量元素在鱼体含量有所差别。比较不同海域鱼类肌肉中微量元素含量发现(表2),Ni、Pb、Cr 和 Co 之间的差异并不大,Cu、Zn 和 Fe 在不同海域之间差异较明显。对比不同海域沙丁鱼属微量元素水平,发现印度洋金带沙丁鱼(*Sardinella gibbosa*)各元素水平均低于澳大利亚周边海域沙丁鱼,可能是由于后者的近海污染程度大于前者的远洋污染程度所造成的。杨美兰^[24]研究发现海洋鱼类微量元素含量在不同食性鱼类体内存在差异,摄食小型鱼虾贝的鱼类、肉食性鱼类、主食小型浮游生物的鱼类一般高于广食性鱼类。Ghosn 等^[25]研究发现地中海脂眼鲱(*Etrumeus teres*)微量元素含量存在季节性差异,Ti、Cr、Mn、Fe、Ni、As 和 Hg 在雨水较多的冬季表现出更高的含量。Abdallah^[26]通过研究墨西哥湾和伊朗沿岸海域中上层鱼类微量元素水平,发现前者海域鱼内 Cr、Cd、Pb、Cu 和 Zn 的浓度高于后者,2个海域之间微量元素水平出现明显差异,可能是大量排入墨西哥湾的工业废水导致了墨西哥湾海域污染。有研究发现,加那利群岛(西班牙管辖)和葡萄牙2个渔场的小型中上层鱼类微量元素含量有所差别,加那利群岛物种的 Cd 和 Pb 浓度较高,可能与非洲上升流输入有关,这极大地影响了该海域物种的 Cd 和 Pb 浓度^[27]。

海洋中上层鱼内赋存的微量元素,会经过不断富集形成重金属,并通过食物链传递放大,这可能导致人类食用这类鱼产品而危害健康^[28-31]。微量元素在海洋中上层鱼类组织或器官中赋存的浓度与人类可食用范围比较,有助于研究海产品中的微量元素富集对人体健康的影响^[32]。近年来,少有研究表明食用海产品会对人类造成明显的健康危害,但大量研究表明人类摄食海产品可能存在潜在健康风险。Gobert 等^[33]研究了地中海剑鱼(*Xiphias gladius*)的18种微量元素浓度,并进行人类暴露风险评估,发现剑鱼肌肉中的平均元素水平明显低于国际食品安全法规规定的最大允许浓度,食用地中海剑鱼对人类健康风险较小。程家丽等^[34]研究报道,中国1198条海洋鱼产品微量元素整体上污染程度较轻,但多种元素的联合危害应引起重视。吴昊等^[35]对我国厦门湾海域中上层鱼类进行 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb

元素含量测量,并采用不同评价模型对人类的健康风险评价,结果发现样品中 As 的残留量超过了国家食品安全限量标准,且会对人类健康造成潜在的风险。

2.2 微量元素之间的关系

2.2.1 拮抗作用

微量元素之间的作用关系主要表现为拮抗作用和协同作用。拮抗作用是指在机体内微量元素之间相互抑制其吸收作用,或对各自在动物体内的生理

生化功能互相产生相反的影响^[24-37](表 3)。大量研究表明^[38],Hg 与 Se 的结合具有解毒作用(图 3),可通过检测机体内 Hg 和 Se 的含量来判断海洋鱼类是否达到汞中毒的阈值。Hg 和 Se 的主要存在形式是有机 Hg 和有机 Se,有机 Hg 是海洋生态系统中毒性较强的污染物^[39],海洋鱼类体内 Hg 的毒性与 Se 的含量呈正相关关系。目前,不溶化合物硒化汞(HgSe)被发现在海豹、海狮和鲸等多种动物体内的大脑和肝脏中^[40-41]。Hg 和 Se 会在机体解毒器官内

表 2 海洋中上层鱼类不同组织中微量元素平均含量
Table 2 Mean trace element content in different tissues of marine pelagic fish

(mg·kg⁻¹)

海域 Sea area	鱼种 Fish species	组织 Tissue	元素 Trace element									
			Cu	Zn	As	Hg	Fe	Co	Cr	Ni	Cd	Pb
印度洋 ^[18] Indian Ocean ^[18]	金带沙丁鱼 <i>Sardinella gibbosa</i>	肌肉 Muscle	3.71	10.5	2.21	0.010	26.9	0.023	0.073	0.130	0.005	0.032
		鳃 Gills	3.76	14.6	0.819	0.004	117.4	0.043	0.112	0.117	0.072	0.045
		肝脏 Liver	10.8	10.6	1.76	0.013	53.158	0.040	0.036	0.050	0.270	0.038
		骨骼 Bone	1.97	11.8	2.12	0.007	175	0.025	0.053	0.080	0.009	0.009
	六带鲹 <i>Caranx sexfasciatus</i>	肌肉 Muscle	0.31	4.6	0.510	0.026	9.914	0.003	0.073	0.023	0.010	0.001
		鳃 Gills	1.49	11.9	0.600	0.012	105.4	0.049	0.034	0.043	0.013	0.027
		肝脏 Liver	2.23	17.8	1.31	0.075	103	0.053	0.084	0.051	0.166	0.006
		骨骼 Bone	0.385	16.5	0.570	0.010	122.1	0.150	0.340	0.227	0.136	0.023
	斑条鲆 <i>Sphyaena jello</i>	肌肉 Muscle	9.58	6.75	2.58	0.052	23.8	0.102	0.039	0.083	0.211	0.025
		鳃 Gills	0.773	12.3	2.44	0.014	68.9	0.016	0.078	0.107	0.020	0.037
		肝脏 Liver	15.3	17.3	2.77	0.024	65.5	0.042	0.030	0.069	2.04	0.019
		骨骼 Bone	18.8	23.2	3.90	0.012	472.4	0.092	0.400	0.225	0.141	0.009
	斑点马鲛 <i>Scomberomorus guttatus</i>	整体 Whole	3.16	39.2	0.16	0.28	—	0.02	0.24	0.07	0.04	0.24
大西洋 ^[20] Atlantic Ocean ^[20]	沙丁鱼 Sardine	肌肉 Muscle	4.86	31.91	—	0.03	66.10	0.049	0.11	0.172	0.067	0.035
	日本鲈 <i>Scomber japonicus</i>	肌肉 Muscle	3.60	37.50	—	0.094	68.52	0.068	0.11	0.140	0.198	0.035
地中海 ^[26] Mediterranean ^[26]	金色小沙丁鱼 <i>Sardinella aurita</i>	肌肉 Muscle	4.0	42.0	—	—	—	—	—	—	1.2	4.7
澳大利亚周边 ^[36] Around Australia ^[36]	剑鱼 Swordfish	肌肉 Muscle	1.64	17.8	3.13	2.72	—	0.12	0.61	0.18	0.16	0.39
	沙丁鱼 Sardine	肌肉 Muscle	7.78	39.2	9.95	0.04	—	0.19	0.69	0.36	0.09	0.46
	蓝鳍金枪鱼 Bluefin tuna	肌肉 Muscle	1.9	10.1	2.33	0.76	—	0.05	0.71	0.35	0.05	0.48
中国近海 ^[35] Offshore China ^[35]	青石斑鱼 <i>Epinephelus awoara</i>	肌肉 Muscle	0.47	4.55	0.61	—	—	—	0.22	0.11	0.0024	0.11
	斑鲷 <i>Konosirus punctatus</i>	肌肉 Muscle	0.43	3.67	0.73	—	—	—	0.26	0.16	0.0057	0.16
	孔鰽虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i>	肌肉 Muscle	0.85	6.37	0.61	—	—	—	0.35	0.20	0.0033	0.13

形成 HgSe 晶体^[42],从而减少甲基汞在机体内的含量,形成 Se 对 Hg 毒性的拮抗作用,降低 Hg 对海洋鱼类的伤害。Se 作为海洋鱼类有益的必需元素,除了和 Hg 具有很强的亲和力,还和多种有毒元素 Pb、Cd 和 As 等形成分子晶体,以降低重金属富集对海洋鱼类的危害。

拮抗作用的机制还体现在蛋白质活性基团对不同元素配位能力的差异导致置换反应的发生^[43]。肾脏等器官内重金属积累较多,金属硫蛋白(MT)表达量及含量较高。金属硫蛋白可以稳定螯合 Cd²⁺、Hg²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺等金属离子,形成无毒的金属离子-MT 复合物,从而降低金属离子在机体内的富集,减少对生物体的伤害^[44-45]。Zn 和 Cr 在生物体内的浓度关联性较大,Zn 在诱导金属硫蛋白的表达中,对 Cr 中毒具有拮抗作用^[46]。当海洋中上层鱼类生存环境中 Zn 浓度增加,会导致体内组织中的 Zn 浓度增加,且 Cr 和 Cu 等金属元素会随之减弱生物富集效应,这与淡水鱼类研究相似。Sato 等^[47]研究尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)发现,Fe 和 Zn 在全鱼体内呈显著负相关,吸收饲料中的 Zn 与全鱼的 Fe

含量也呈显著负相关。

2.2.2 协同作用

协同作用是依赖于某些微量元素而加强另一元素的生物学功能,或使该元素的有效水平增加。Fe、Cu、Co、Mn 等微量元素分布于动物造血器官的不同位置,参与造血的不同环节,共同发挥造血功能,相互配合,完成造血过程^[48]。彩虹方头鱼(*Paracheir-odon innesi*)^[49]不仅在 Cu 和 Pb 的混合体系中表现出机体对 Cu 和 Pb 吸收的协同作用,还在经 Cu 预暴露后再投放到含 Pb 体系中表现出相同作用。朱毅和张瑞涛^[50]在 As、Cu、苯酚对鲤鱼(*Cyprinus carpio*)的联合毒性研究中发现,Cu 和 As 的联合毒性表现为协同作用。某些微量元素在消化道内表现出直接协同作用,各元素的吸收水平决定于食糜和饲料中各元素的比例。Hilton 和 Hodson^[51]发现虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)肝脏 Se 含量与饲料 Cu 水平显著相互促进^[52]。微量元素不仅在消化道内表现出协同作用,还表现在组织细胞水平代谢上。动物骨骼组织的重要成分羟基磷灰石(用于骨组织修复)的形成过程中,Fe 和 Cu 协同参与血红蛋白的合成。

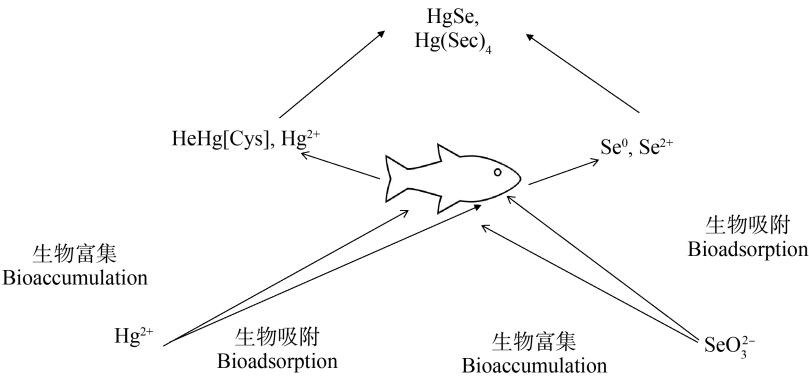


图 3 海洋鱼类汞和硒之间作用关系图

Fig. 3 Relationship between mercury and selenium in marine fish

表 3 海洋中上层鱼类微量元素之间的作用关系^[53-66]

Table 3 Relationships between trace elements in marine pelagic fish^[53-66]

元素 Trace element	协同元素 Synergistic elements	拮抗元素 Antagonistic elements
Zn	Mo	Mn, Co, Cu, Fe, P, Cd
Cu	Se, As, Pb	Mn, Zn
Fe	Cu	Mn, Zn, P
Mn	-	Zn, Co, P
Se	Cu	Hg, S
I	P	Mo

2.3 影响微量元素赋存的因素

2.3.1 地理差异

鱼类的生存环境对鱼体内微量元素的浓度起主要决定作用。鱼类在不同地区间物种的食物组成和营养位置可能会发生变化,因此在不同生存环境中的海洋中上层鱼类微量元素含量有明显的差异。Anan 等^[67]为减少体型大小对生物体内微量元素赋存的影响,以体质量为协变量,采用协方差分析(ANCOVA)对不同海域数据进行分析,发现里海拟鲤(*Rutilus rutilus*)体内 Co、Zn、Se 和 Mo 含量以及幼体体内 Pb 含量在采样点之间存在显著差异($P<0.001$),进一步研究发现不同站点的里海拟鲤中 Ag 和 Cr 含量从东侧站点到西侧站点呈增加趋势,说明这些元素的污染源可能存在于里海的特定海域。Agusa 等^[21]研究发现,马来西亚东海岸脂眼凹肩鲹(*Selar crumenophthalmus*)中 Cu、Zn、Se、Ag、Cd、Cs 和 Hg 的浓度高于马来西亚西海岸的同类。

2.3.2 种间差异

海洋中上层鱼类中微量元素含量存在种间差异,这些差异可能是由于物种间的食性、生存环境和体型大小的差异造成的。Kojadinovic 等^[68]研究发现 Se、Cu、Fe 和 Zn 在黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)的肝脏中含量最高,在普通金枪鱼中含量最低。Shalini 等^[18]在研究印度东南沿海鱼类组织中微量元素含量差异时,除斑条鲈和巴鲳(*Euthynnus affinis*)外,Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 在所

有鱼种中的浓度差异显著($P<0.05$)。Rahman 等^[66]通过测量澳大利亚和印度周边海域中上层鱼类中汞的含量,并与其他地区作对比,发现不同鱼种之间汞含量存在显著差异。Vieira 等^[69]采集了东北大西洋和中大西洋东部海域中的沙丁鱼、竹荚鱼等海洋中上层鱼类,通过统计评估金属在生物体内累积种内和种间变异性,发现 Hg 和 As 含量变化主要受物种和体型影响。

2.3.3 体型

微量元素水平与海洋中上层鱼类体型之间的相关性受到广泛研究。鱼类的体质量与体长之间一般存在显著的正相关关系。鱼体内的微量元素含量与鱼体长体质量之间存在生长依赖性变化^[70]。Hg 浓度与海洋中上层鱼类体型大小呈正相关关系已得到广泛证实^[71],部分微量元素与体型呈负相关^[72],如 Zn 和 Cu 浓度随体型增大而降低^[73-75]。Kojadinovic 等^[70]在研究西印度洋中上层鱼类微量元素的生物累积中发现,肝、肾和肌肉组织中的 Hg 含量与剑鱼、黄鳍金枪鱼、鲳(*Katsuwonus pelamis*)和鲱鲈(*Coryphaena hippurus*)4 种鱼类体长确实存在相关性。Cr 在剑鱼和鲳体内的浓度与鱼体长度呈正相关,Se 含量同样会受到鱼体大小的影响,而 Pb 与鱼体长度没有表现出相关性。微量元素水平的生长依赖性变化受多种因素的影响^[76-77],如代谢率,以及元素的生长稀释,这些因素可能导致了生长与元素含量相关性的不同(表 4)。

表 4 海洋中上层鱼类生长与微量元素含量的关系

Table 4 Relationship between growth of pelagic fish and trace element content in the ocean

鱼种 Fish species	组织 Tissue	相关元素 Related elements
黄鳍金枪鱼 ^[38] <i>Thunnus albacares</i> ^[38]	肝脏 Liver	Fe(+), Se(+), Zn(+)
剑鱼 ^[38] Swordfish ^[38]	肌肉 Muscle	Cu(-), Mn(-) Cd(+), Hg(+), Se(+)
大眼金枪鱼 ^[21] <i>Thunnus obesus</i> ^[21]	肝脏 Liver	Pb(-), V(-) Cu(+), Se(+), Ag(+), Sn(+), Cs(+), Hg(+)
虾虎鱼 ^[67] Gobiidae ^[67]	肌肉 Muscle	Cu(-), Mo(-), V(-), Cd(-), Pb(-)
博氏南冰魮 ^[22] <i>Pagothenia borchgrevinki</i> ^[22]	肌肉 Muscle	Mn(-), Cu(-), Cd(-), Pb(-)
纵带裸颊鲷 ^[78] <i>Lethrinus lentjan</i> ^[78]	肌肉 Muscle	Cu(-), Cd(-), Mn(-)

注:“+”代表海洋中上层鱼类生长与微量元素含量呈正相关关系;“-”代表呈海洋中上层鱼类生长与微量元素含量负相关关系。

Note: “+” represents a positive correlation between the growth of pelagic fish and trace element content in the ocean; “-” represents a negative correlation between the growth of pelagic fish and trace element content in the ocean.

2.3.4 年龄及发育状况

海洋中上层鱼类微量元素富集能力的高低,取决于金属对鱼类组织的亲和力、摄取、沉积和排泄速率。海洋鱼类对微量元素的吸收速率与代谢速率呈正相关,幼鱼的代谢活性通常高于成年鱼,通常幼鱼体内的微量元素累积量较高^[68]。Lozano-Bilbao等^[79]研究发现沙丁鱼、鲱鱼和蓝鲱鱼(*Pomatomus saltatrix*)所有未成熟样本微量元素含量高于成熟样本。在生殖发育过程中,微量元素水平会随着代谢活动减少而减少,与生殖相关的生理变化对海洋鱼类微量元素水平影响相对较小,性腺成熟系数(GSI)与微量元素水平的相关性在物种间存在差异。有研究发现^[68],鲚肌肉中Mn含量随GSI的降低而降低,表明该元素可能在性腺发育时期从肌肉中转移到其他组织器官使用。

2.3.5 组织

海洋中上层鱼类不同组织与器官对微量元素具有高度选择性^[38]。大量研究表明,微量元素在不同器官的富集规律与鱼类代谢过程有关,其中含量最高的是内脏,其次是鳃、骨骼和肌肉^[80]。鱼类内脏具有较高的富集能力,可能是由于肝脏和肾脏等器官内能合成大量金属硫蛋白,金属硫蛋白对金属元素有较强的亲和力,导致肝脏和肾脏内积累大量的金属元素,金属硫蛋白对金属元素的毒性作用具有拮抗关系^[81-82]。Uluturhan和Kucuksezgin^[83]研究了鱼体不同组织中金属元素的分布和积累,发现Hg、Cu、Cd、Pb和Zn在肌肉中的浓度普遍小于肝脏中的浓度。

3 海洋中上层鱼类微量元素含量测定的应用 (Application of trace element content determination for pelagic fish in the ocean)

海洋中上层鱼类硬组织的微量元素可应用于判别鱼类洄游环境史、鱼类产卵场的海洋环境、鱼类种群结构及资源评估等研究^[84-86],对研究鱼类生活史起重要作用。近年来,海洋鱼类眼睛晶体和耳石等钙化组织中微量元素含量的分析被广泛应用于区分鱼类种群,海洋生物的摄食偏好等。有研究表明,鱼类眼睛晶体微量元素的组成与物种和生活环境有关,因其代谢惰性可以将其沉积生活环境中的微量元素信息永久保存。Dove和Kingsford^[87]发现眼睛晶体可用于区分鱼类种群,Cu、Mn和Fe主要分布在晶体外围,发挥辅酶的作用,晶体核心区与晶体外围层会随晶体蛋白的合成和降解存在显著的差异。Rooker等^[88]研究发现地中海海域不同产卵场幼鱼

的耳石微量元素时空变化存在显著差异,分析表明微量元素的积累具有一定程度上的时间持续性。耳石微量元素指纹技术应用在种群结构及资源评估分析具有较大的应用潜力。

在鱼类的生长发育过程中,海洋环境中的微量元素通过鱼类的生命活动钙化沉积在耳石中^[89]。耳石可以永久性保存生活环境中的微量元素,从而反映出鱼类的栖息地特征^[90]。研究表明^[91],海洋环境的变化会影响耳石中微量元素分布,如:温度、盐度、环境污染等环境因子的改变会通过影响海洋鱼类的生长发育过程和生理生化反应等机能形成微量元素分布不同的耳石^[92]。Mayer等^[84]发现研究耳石微量元素的组成,可以对鱼类洄游环境史和个体发育的变化有进一步的了解。Arai等^[85]通过比较Sr和Ca在西太平洋鲚耳石的浓度,发现两者的浓度存在显著的差异,可能是由于孵化场海洋环境中微量元素含量不同造成的。Walther和Thorrold^[93]研究发现海洋鱼类耳石中的一些微量元素含量与鱼类栖息环境相关,其中海洋鱼类耳石中83%的Sr和98%的Ba主要来源于栖息环境的海水。

目前,通过硬组织微化学信息来探究海洋鱼类栖息地变迁过程的研究,主要集中在微量元素等方面,以分析微量元素值的变化规律和其沉积机制及与环境因子的关系技术手段,追溯海洋鱼类生活史过程。李云凯和沈永富^[94]研究发现,通过观察和测量海洋软骨鱼类脊椎骨微量元素含量后可以校正大青鲨(*Prionace glauca*)年龄,并了解其洄游行为。Lin^[86]通过比较印度尼西亚海域和印度洋的南方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus maccoyii*)耳石中的微量元素组成,发现两者之间存在显著差异,但核心部位的元素组成成分相似,表明这2个海域的南方蓝鳍金枪鱼产卵场可能相同,洄游路径不同。微量元素测量结果显示随着年龄的增长,微量元素组成呈现不同的变化,可能是由于南方蓝鳍金枪鱼不同的发育阶段洄游环境不同。

4 微量元素风险评价方法 (Trace elements risk evaluation method)

目前,关于海洋中上层鱼类必需微量元素的营养评价方法尚未明确。但当海洋中上层鱼制品某些微量元素超标时,会对消费者健康构成重大威胁。根据常见金属不同程度的毒性,我们列出了联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO)/世界卫生组织(World

Health Organization, WHO)与中国关于海洋中上层鱼类食品中金属的最大允许限量(表 5)。Bodin 等^[23]在西印度洋海洋中上层生物群落微量元素的研究中,发现所有渔获物中均含 Pb 和 Cr 2 种有害元素,但其浓度均低于食品污染最大限值。海洋环境中的有害微量元素可以在鱼类体内富集积累,鱼类微量元素的含量可以在一定程度上反映海洋环境的污染状况。目前,对鱼类微量元素的监测已成为海洋环境污染监测的重要手段之一^[95]。陶玲等^[96]根据 FAO 提供的研究海域日平均摄入量,计算鲑鱼肌肉中 5 种有毒元素每日摄入量(EDI),表明该海域 3 种鲑鱼样品对人类不存在潜在的微量元素污染健康风险。陈永正^[97]测定了福建海区鱼类样品中 12 种微量元素,运用主成分分析法筛选出主要的污染元素,并建立预测海区污染模型,预报了此海区的污染状况,从而在一定程度上实现对海洋环境的监测。

人类健康风险评估方法主要包括单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、重金属污染指数法、每周可耐受摄入量法以及目标危险系数法(表 6)。这几种评价方法的特点、使用范围和作用对象各不相同,将几种评价方法联合使用,可以较好地对海洋中上层鱼类微量元素污染状况及其食用安全性进行评

估,为人体健康风险评估及生态风险评估提供参考。Storelli 等^[103]通过运用每周耐受法发现,不同年龄组重金属的每周摄入量均为 $Hg>Pb>Cd$,儿童的摄入浓度最高,其次为青少年、成人和老年人。Bouiba 等^[104]在地中海西南部海胆微量元素动态的研究中运用环境和目标危险系数法双重风险评估方法,发现地中海西南部海域存在 Pb 污染,对人类健康问题造成了一定的威胁。

5 结论与展望(Conclusion and outlook)

本文综述了海洋中上层鱼体微量元素赋存特征、微量元素之间的作用关系、影响微量元素赋存的因素 3 个方面内容,归纳和总结了微量元素在鱼类硬组织和人体健康风险评估中的应用。海洋中上层鱼类体内微量元素水平与组织器官、体型、性别、时空要素等因素相关,Fe、Zn 是鱼体内浓度较高的微量元素。一般来说,微量元素在鱼类肝脏中的赋存水平大于肌肉,而元素之间的相互作用主要表现为拮抗作用和协同作用。赋存在鱼类硬组织中的微量元素可以用于判别洄游环境史、产卵场的海洋环境、种群结构及进行资源评估等研究。不同的微量元素评价方法,可以对海洋中上层鱼类产品进行健康风险评估,保障人类食品安全。

表 5 国际与中国鱼类微量元素标准限量值

Table 5 International and Chinese fish trace elements standard limit values

分类 Sort	元素 Trace elements	化学符号 Chemical symbols	限量/(mg·kg ⁻¹) Limit/(mg·kg ⁻¹)	标准 Standard
必需元素 Essential elements	铜 Copper	Cu	4.5	FAO/WHO ^[98]
	锰 Manganese	Mn	50	NY 5073—2006 ^[99]
			1.0	WHO ^[100]
	锌 Zinc	Zn	40	FAO/WHO ^[98]
	铬 Chromium	Cr	1.0 2.0	FAO/WHO ^[98] GB 2762—2022 ^[101]
非必需有害元素 Non-essential harmful elements	砷 Arsenic	As	1.0 0.1	FAO/WHO ^[98] GB 2762—2022 ^[101]
	汞 Mercury	Hg	0.5	FAO/WHO ^[102]
			0.5	GB 2762—2022 ^[101]
	镉 Cadmium	Cd	0.1	FAO/WHO ^[98]
			0.1	GB 2762—2022 ^[101]
	铅 Lead	Pb	0.5	FAO/WHO ^[98]
			0.5	GB 2762—2022 ^[101]
	镍 Nickel	Ni	0.8	FAO/WHO ^[98]

表 6 海洋中上层鱼类微量元素污染程度及健康风险评价方法^[105]
Table 6 The degree of trace element contamination and health risk
evaluation methods for pelagic fish in the ocean^[105]

评价方法 Evaluation methodology	计算公式 Calculation formula	参数含义 Parameter meaning	用途 Uses
单因子污染指数法 Single factor pollution index method	$P_i = \frac{C_i}{S_i}$	P_i 代表鱼体中微量元素 i 的单因子污染指数; C_i 代表鱼体中微量元素 i 含量实测值的平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为鱼体中微量元素 i 的限量标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) P_i represents the single factor pollution index of trace element i in fish; C_i represents the average of measured values of trace element in fish ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i is the limit standard of trace element i in fish ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	评价微量元素污染程度 Evaluation of trace element contamination levels
内梅罗综合污染指数法 Nemiro composite pollution index method	$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}$	$P_{\text{综}}$ 表征不同种类的鱼体受到多种不同种类的微量元素污染而产生的污染叠加效果, P_{ave} 代表污染指数的平均值, P_{max} 代表污染指数的最大值 $P_{\text{synthesis}}$ is to characterize the superimposed effect of contamination of different species of fish by many different kinds of trace elements, P_{ave} represents the mean value of the contamination index and P_{max} represents the maximum value of the contamination index	表示鱼类受不同种类微量元素污染的叠加效果 Indicates the superimposed effect of fish contamination by different types of trace elements
微量元素污染指数法 Trace element pollution index method	$\text{MPI} = \sqrt[i]{C_1 \cdot C_2 \cdots C_i}$	C_i 代表鱼体中微量元素 i 含量实测值的平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) C_i represents the average of the measured values of trace elements i in fish ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	比较各类鱼体微量元素含量 差异而产生的整体差异 Comparison of overall differences due to differences in trace element content in various fish species
每周可耐受摄入量 Tolerable weekly intake method	$\text{AWI} = C_i \times \text{WC}$	AWI 是成人每周的微量元素实际摄入量(mg); C_i 是鱼体微量元素 i 含量实测值的平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); WC 是居民每周鱼类消费量(kg) AWI is the actual weekly intake of trace elements for adults (mg); C_i is the mean of the measured values of trace element in fish ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); WC is the weekly fish consumption of the population (kg)	一种针对有害物质通过 食物的摄入而损害人体 健康的污染评价标准 A contamination evaluation standard for harmful substances that can damage human health through food intake
目标危险系数法 Target hazard factor method	$Q_{\text{t,h}} = \frac{E_{\text{F}} \cdot E_{\text{D}} \cdot F_{\text{IR}} \cdot C}{R_{\text{FD}} \cdot W_{\text{AB}} \cdot T_{\text{A}}} \times 10^{-3}$ $Q_{\text{t,h}} = \sum Q_{\text{t,h}}$	E_{F} 代表暴露频率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), E_{D} 代表暴露时间(a), F_{IR} 代表食物摄入量($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$), W_{AB} 代表平均体质量(kg), C 代表鱼体中微量元素的质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), T_{A} 代表非致癌性平均暴露时间(d), R_{FD} 代表参考剂量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) E_{F} represents exposure frequency ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), E_{D} represents exposure time (a), F_{IR} represents food intake rate ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$), W_{AB} represents mean body weight (kg), C represents mass fraction of trace elements in fish ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), T_{A} represents non-carcinogenic mean exposure time (d), and R_{FD} represents reference dose ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	评价单一微量元素污染风险和 多种微量元素复合污染风险 Evaluation of single trace element contamination risk and multiple trace element compound contamination risk

但仍存在以下问题需要进一步研究。(1)海洋中上层鱼类微量元素之间相互作用研究仍不够系统、完善。研究内容较为局限,主要集中在淡水养殖鱼类,对海洋中上层鱼类研究较少。(2)海洋生态系统中有害元素会与其他环境介质存在复杂的作用关系,但有害元素在不同环境介质条件下对海洋中上层鱼类的联合毒性作用研究还不够深入。(3)影响海洋中上层鱼类微量元素赋存的因素研究还不够全面,目前对于地理差异、种间差异、年龄与生长状况、体型和组织研究较为深入,但对于性别、鱼类不同发育时期、气候现象及自然条件的改变等方面研究较少。(4)海洋中上层小型鱼体内的污染物主要来源之一是海洋环境,其体内的污染物经过食物链的传递,会不断富集在海洋中上层高营养级生物,当海洋环境污染严重时,将会对高营养级生物及人类健康会造成威胁。目前对微量元素在海洋食物网中的营养传递动力学研究还不够深入,关于微量元素迁移转化差异等方面研究还有所欠缺。

通信作者简介:刘必林(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为渔业资源生物学、微量元素与稳定同位素生态学、鱼类年龄鉴定与生活史重塑。

参考文献(References):

- [1] 沈国英,施并章.海洋生态学[M].3版.北京:科学出版社,2002:37-38
- [2] 中国农业百科全书总编辑委员会水产业卷编辑委员会,中国农业百科全书编辑部.中国农业百科全书.水产业卷[M].北京:中国农业出版社,1994:328-329
- [3] 纪炜炜,李圣法,陈雪忠.鱼类营养级在海洋生态系统研究中的应用[J].中国水产科学,2010,17(4):878-887
Ji W W, Li S F, Chen X Z. Application of fish trophic level in marine ecosystem [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 878-887 (in Chinese)
- [4] Rice J. Food web theory, marine food webs, and what climate change may do to northern marine fish populations [J]. Climate Change & Northern Fish Populations, 1995, 1: 561-568
- [5] 卞晓东,万瑞景,单秀娟,等.莱州湾中上层小型鱼类早期资源量动态及其外在驱动因素[J].中国水产科学,2022,29(3):446-468
Bian X D, Wan R J, Shan X J, et al. Preliminary analysis on recruitment variation and the exogenous driving factors to early life stages of small pelagic fishes in the Laizhou Bay [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(3): 446-468 (in Chinese)
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation [R]. Rome: FAO, 2022
- [7] 郑元甲,李建生,张其永,等.中国重要海洋中上层经济鱼类生物学研究进展[J].水产学报,2014,38(1):149-160
Zheng Y J, Li J S, Zhang Q Y, et al. Research progresses of resource biology of important marine pelagic food fishes in China [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(1): 149-160 (in Chinese)
- [8] 王勤.从'94全国水产加工展示交易会看我国中上层鱼类的加工利用现状[J].现代渔业信息,1995,10(10):10-12
Wang Q. Status of utilization of pelagic fish in China-From view of 94' national aquatic products fair [J]. Modern Fisheries Information, 1995, 10(10): 10-12 (in Chinese)
- [9] 顾佳丽.辽西地区食用鱼中重金属含量的测定及食用安全性评价[J].食品科学,2012,33(10):237-240
Gu J L. Determination of heavy metals and safety evaluation of fish from the west of Liaoning Province [J]. Food Science, 2012, 33(10): 237-240 (in Chinese)
- [10] Sivaperumal P, Sankar T V, Viswanathan Nair P G. Heavy metal concentrations in fish, shellfish and fish products from internal markets of India vis-a-vis international standards [J]. Food Chemistry, 2007, 102(3): 612-620
- [11] National Research Council (NRC). Nutrient requirements of fish and shrimp [S]. Washington D C: National Academy Press, 2011: 206-207
- [12] Bosch A C, O'Neill B, Sigge G O, et al. Heavy metals in marine fish meat and consumer health: A review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(1): 32-48
- [13] Sivaperumal P, Sankar T V, Viswanathan Nair P G. Heavy metal concentrations in fish, shellfish and fish products from internal markets of India vis-a-vis international standards [J]. Food Chemistry, 2007, 102(3): 612-620
- [14] Yin Z B, Milatovic D, Aschner J L, et al. Methylmercury induces oxidative injury, alterations in permeability and glutamine transport in cultured astrocytes [J]. Brain Research, 2007, 1131(1): 1-10
- [15] Mourón S A, Grillo C A, Dulout F N, et al. A comparative investigation of DNA strand breaks, sister chromatid exchanges and *K-ras* gene mutations induced by cadmium salts in cultured human cells [J]. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis,

- 2004, 568(2): 221-231
- [16] Potts R J, Bespalov I A, Wallace S S, et al. Inhibition of oxidative DNA repair in cadmium-adapted alveolar epithelial cells and the potential involvement of metallothionein [J]. *Toxicology*, 2001, 161(1-2): 25-38
- [17] Filipič M, Hei T K. Mutagenicity of cadmium in mammalian cells: Implication of oxidative DNA damage [J]. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2004, 546(1-2): 81-91
- [18] Shalini R, Jeyasekaran G, Shakila R J, et al. Trace element concentrations in the organs of fish along the south-east coast of India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 162: 111817
- [19] Rubio C, Acosta L, Luis-González G, et al. A limited survey of metal content in blue jack mackerel (*Trachurus picturatus*) obtained from markets in the canary islands [J]. *Journal of Food Protection*, 2018, 81(2): 202-208
- [20] Afandi I, Talba S, Benhra A, et al. Trace metal distribution in pelagic fish species from the north-west African coast (Morocco) [J]. *International Aquatic Research*, 2018, 10(2): 191-205
- [21] Agusa T, Kunito T, Yasunaga G, et al. Concentrations of trace elements in marine fish and its risk assessment in Malaysia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51(8-12): 896-911
- [22] Honda K, Sahrul M, Hidaka H, et al. Organ and tissue distribution of heavy metals, and their growth-related changes in Antarctic fish, *Pagothenia borchgrevinki* [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1983, 47 (11): 2521-2532
- [23] Bodin N, Lesperance D, Albert R, et al. Trace elements in oceanic pelagic communities in the western Indian Ocean [J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 354-362
- [24] 杨美兰. 海产鱼类中重金属的分布[J]. *微量元素*, 1990, 7(3): 54-56
- [25] Ghosn M, Mahfouz C, Chekri R, et al. Seasonal and spatial variability of trace elements in livers and muscles of three fish species from the eastern Mediterranean [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(11): 12428-12438
- [26] Abdallah M A M. Trace element levels in some commercially valuable fish species from coastal waters of Mediterranean Sea, Egypt [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 73(1-2): 114-122
- [27] Lozano-Bilbao E, Raimundo J, Jurado-Ruzafa A, et al. Comparing element content in small pelagic fish species from different fishing grounds in the central-east Atlantic Ocean. Risk assessment [J]. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 2021, 37(2): 861-869
- [28] Amiard-Triquet C, Jeantet A Y, Berthet B. Metal transfer in marine food chains: Bioaccumulation and toxicity [J]. *Acta Biologica Hungarica*, 1993, 44(4): 387-409
- [29] 王文雄, 潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 599-604
- Wang W X, Pan J F. The transfer of metals in marine food chains: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 599-604 (in Chinese)
- [30] 余杨, 王雨春, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 3847-3853
- Yu Y, Wang Y C, Zhou H D, et al. Biomagnification of heavy metals in the aquatic food chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir during initial impoundment [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 3847-3853 (in Chinese)
- [31] Rainbow P S. The significance of trace metal concentrations in marine invertebrates [J]. *Ecotoxicology of Metals in Invertebrates*, 1993, 1: 3-23
- [32] 孙鹏飞, 刘越, 代乾良, 等. 水产品重金属富集及人群健康风险评价[J]. *中国渔业质量与标准*, 2021, 11(3): 56-63
- Sun P F, Liu Y, Dai Q L, et al. Heavy metal accumulation in aquatic products and risk assessment for human health [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2021, 11(3): 56-63 (in Chinese)
- [33] Gobert S, Pasqualini V, Dijoux J, et al. Trace element concentrations in the apex predator swordfish (*Xiphias gladius*) from a Mediterranean fishery and risk assessment for consumers [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 120(1-2): 364-369
- [34] 程家丽, 马彦宁, 刘婷婷, 等. 中国部分海产品重金属污染特征及健康风险评价[J]. *卫生研究*, 2017, 46(1): 148-154
- Cheng J L, Ma Y N, Liu T T, et al. Accumulation and health risks of heavy metals in the seafood from China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2017, 46(1): 148-154 (in Chinese)
- [35] 吴昊, 张乐蒙, 黄智伟, 等. 厦门湾常见海洋经济生物重金属污染特征及风险评价[J]. *应用海洋学报*, 2022, 41(3): 395-406
- Wu H, Zhang L M, Huang Z W, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution of common marine commercial organisms in Xiamen Bay [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(3): 395-406 (in Chinese)

- [36] Rahman M M, Shehzad M T, Nayak A K, et al. Health risks from trace elements in muscles of some commonly available fish in Australia and India [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27 (17): 21000-21012
- [37] 澹台炳琰, 张兆兰. 微量元素间的互作关系及在日粮中的平衡[J]. 河北农业大学学报, 1998, 21(3): 75-79
Tantai B Y, Zhang Z L. The interactive relations among some trace elements and its balance in daily feeds [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1998, 21(3): 75-79 (in Chinese)
- [38] Hansen A M, Bryan C E, West K, et al. Trace element concentrations in liver of 16 species of cetaceans stranded on Pacific Islands from 1997 through 2013 [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 70(1): 75-95
- [39] 张启华. 海湾扇贝软体组织中汞与硒的形态分析及硒对汞的拮抗作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 92-101
Zhang Q H. Studies on the speciation of mercury and selenium in the soft tissues of bay scallops and the antagonism of selenium species to mercury species [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 92-101 (in Chinese)
- [40] Ralston C R, Lloyd Blackwell J III, Ralston N V C. Effects of dietary selenium and mercury on house crickets (*Acheta domesticus* L.): Implications of environmental co-exposures [J]. Environmental Bioindicators, 2006, 1(1): 98-109
- [41] Nigro M, Leonzio C. Intracellular storage of mercury and selenium in different marine vertebrates [J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 135: 137-143
- [42] Lailson-Brito J, Cruz R, Dorneles P R, et al. Mercury-selenium relationships in liver of Guiana dolphin: The possible role of Kupffer cells in the detoxification process by tiemannite formation [J]. PLoS One, 2012, 7(7): e42162
- [43] 梅光泉. 微量元素硒的生物拮抗作用[J]. 微量元素, 1991, 8(3): 4, 12
- [44] Wang W X, Rainbow P S. Significance of metallothioneins in metal accumulation kinetics in marine animals [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2010, 152(1): 1-8
- [45] Yu H T, Zhen J, Leng J Y, et al. Zinc as a countermeasure for cadmium toxicity [J]. Acta Pharmacologica Sinica, 2021, 42(3): 340-346
- [46] 陈细香, 吴文杰, 林玲玲. 重金属 Cd、Zn 对文蛤的急性毒性和联合毒性[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(7): 241-244
- Chen X X, Wu W J, Lin L L. Acute toxicity and combined toxicity of heavy metals Cd and Zn to *Meretrix meretrix* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(7): 241-244 (in Chinese)
- [47] Satoh S, Tabata K, Izume K, et al. Mineral nutrition in fish. X XI. Effect of dietary tricalcium phosphate on availability of zinc to rainbow trout [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1987, 53(7): 1199-1205
- [48] 李光辉. 微量元素间及其与营养素之间的协同与拮抗作用[J]. 乳业科学与技术, 2005, 28(2): 80-82
Li G H. The cooperation and antagonism between trace elements and nutrients [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2005, 28(2): 80-82 (in Chinese)
- [49] 梁涛, 陶澍, 曹军. 铜铅被鱼吸收过程中的相互作用[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 621-624
Liang T, Tao S, Cao J. Interaction of Cu and Pb in accumulation process by fish [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 621-624 (in Chinese)
- [50] 朱毅, 张瑞涛. 砷、铜、苯酚对鲤鱼 (*Cyprinus carpio* Linn.) 的联合毒性研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(3): 262-266
Zhu Y, Zhang R T. Joint toxicity of arsenic, copper and phenol to carps (*Cyprinus carpio* Linn.) [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2001, 7(3): 262-266 (in Chinese)
- [51] Hilton J W, Hodson P V. Effects of diet composition on selenium metabolism in rainbow trout [J]. Journal of Nutrition, 1983, 113: 1242-1248
- [52] Poppe T T, Hastein T, Froslic A, et al. Nutritional aspects of Haemorrhagic Syndrome ('Hitra Disease') in farmed Atlantic salmon *Salmo salar* [J]. Diseases of Aquatic Organisms, 1985, 1: 155-162
- [53] 张子仪. 中国饲料科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 90-95
- [54] Vangen B, Hemre G I. Dietary carbohydrate, iron and zinc interactions in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Aquaculture, 2003, 219(1-4): 597-611
- [55] 叶超霞, 刘永坚, 田丽霞, 等. 斜带石斑鱼 (*Epinephelus coioides*) 饲料中铜的适宜添加量研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(2): 461-466
Ye C X, Liu Y J, Tian L X, et al. Dietary copper requirement of juvenile grouper *Epinephelus coioides* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(2): 461-466 (in Chinese)
- [56] Maage A, Lygren B, Ali El-Mowafic A F. Manganese requirement of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry [J]. Fisheries Science, 2000, 66(1): 1-8

- [57] Luo Z, Tan X Y, Zheng J L, et al. Quantitative dietary zinc requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*, and effects on hepatic intermediary metabolism and antioxidant responses [J]. Aquaculture, 2011, 319(1-2): 150-155
- [58] Jobling M. National Research Council (NRC): Nutrient requirements of fish and shrimp [J]. Aquaculture International, 2012, 20: 601-602
- [59] Eid A E, Ghonim S I. Dietary zinc requirement of fingerling *Oreochromis niloticus* [J]. Aquaculture, 1994, 119(2-3): 259-264
- [60] 叶超霞, 刘永坚, 田丽霞, 等. 饲料中锌含量对斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)生长、饲料效率、矿物质含量和体组成的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 83-89
Ye C X, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary zinc on growth, feed efficiency, mineral content and body composition of juvenile grouper *Epinephelus coioides* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 83-89 (in Chinese)
- [61] Lanno R P, Slinger S J, Hilton J W. Maximum tolerable and toxicity levels of dietary copper in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) [J]. Aquaculture, 1985, 49(3-4): 257-268
- [62] Conrad M E, Umbreit J N, Moore E G, et al. Separate pathways for cellular uptake of ferric and ferrous iron [J]. American Journal of Physiology Gastrointestinal and Liver Physiology, 2000, 279(4): G767-G774
- [63] Gunshin H, MacKenzie B, Berger U V, et al. Cloning and characterization of a mammalian proton-coupled metal-ion transporter [J]. Nature, 1997, 388(6641): 482-488
- [64] Carriquiriborde P, Handy R D, Davies S J. Physiological modulation of iron metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low and high iron diets [J]. The Journal of Experimental Biology, 2004, 207(Pt 1): 75-86
- [65] Anderson R A. Trace Elements in Human and Animal Nutrition [M]. Orlando Academic Press, 1987: 225-244
- [66] Satoh S, Takeuchi T, Watanabe T. Availability of manganese and magnesium contained in white fish meal to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57(1): 99-104
- [67] Anan Y, Kunito T, Tanabe S, et al. Trace element accumulation in fishes collected from coastal waters of the Caspian Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51 (8-12): 882-888
- [68] Kojadinovic J, Potier M, Le Corre M, et al. Bioaccumulation of trace elements in pelagic fish from the Western Indian Ocean [J]. Environmental Pollution, 2007, 146 (2): 548-566
- [69] Vieira C, Morais S, Ramos S, et al. Mercury, cadmium, lead and arsenic levels in three pelagic fish species from the Atlantic Ocean: Intra- and inter-specific variability and human health risks for consumption [J]. Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2011, 49(4): 923-932
- [70] Agah H, Leermakers M, Elskens M, et al. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(1-4): 499-514
- [71] Barone G, Storelli A, Mallamaci R, et al. Comparative study on trace metal accumulation in liver of Mediterranean deep-sea fish and their selenium/mercury molar ratios [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2017, 228(6): 211
- [72] Khezri P H, Takhsha M, Jamshid K A, et al. Assessment level of heavy metals (Pb, Cd, Hg) in four fish species of Persian Gulf (Bushehr-Iran) [J]. International Journal of Advanced Technology & Engineering Research, 2014, 4: 34-38
- [73] Ikemoto T, Kunito T, Watanabe I, et al. Comparison of trace element accumulation in Baikal seals (*Pusa sibirica*), Caspian seals (*Pusa caspica*) and northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) [J]. Environmental Pollution, 2004, 127 (1): 83-97
- [74] Seixas T G, do A Kehrig H, Fillmann G, et al. Ecological and biological determinants of trace elements accumulation in liver and kidney of *Pontoporia blainvillei* [J]. Science of the Total Environment, 2007, 385(1-3): 208-220
- [75] Kojadinovic J, Potier M, Le Corre M, et al. Bioaccumulation of trace elements in pelagic fish from the Western Indian Ocean [J]. Environmental Pollution, 2007, 146 (2): 548-566
- [76] Phillips D. Quantitative Aquatic Biological Indicators: Their Use to Monitor Trace Metal and Organochlorine Pollution [M]. Barking: Applied Science Publishers, 1980: 56-72
- [77] Langston W J, Spence S K. Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms [J]. Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems, 1995, 3: 407-478
- [78] Al-Yousuf M H, El-Shahawi M S, Al-Ghais S M. Trace metals in liver, skin and muscle of *Lethrinus lentjan* fish species in relation to body length and sex [J]. Science of the Total Environment, 2000, 256(2-3): 87-94
- [79] Lozano-Bilbao E, Jurado-Ruzafa A, Lozano G, et al. De-

- velopment stage and season influence in the metal content of small pelagic fish in the North-West Africa [J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 127692
- [80] 阮晓, 郑春霞, 王强, 等. 重金属在罗非鱼淡水白鲳和鲤鱼体内的蓄积[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(5): 357-359
- Ruan X, Zheng C X, Wang Q, et al. Accumulation of heavy metal in *Tilapia nilotica*, *Colossoma brachypomum* and *Cyprinus carpio* [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(5): 357-359 (in Chinese)
- [81] Wang W X, Rainbow P S. Significance of metallothioneins in metal accumulation kinetics in marine animals [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2010, 152(1): 1-8
- [82] Yu H T, Zhen J, Leng J Y, et al. Zinc as a countermeasure for cadmium toxicity [J]. *Acta Pharmacologica Sinica*, 2021, 42(3): 340-346
- [83] Uluturhan E, Kucuksezgin F. Heavy metal contaminants in red pandora (*Pagellus erythrinus*) tissues from the Eastern Aegean Sea, Turkey [J]. *Water Research*, 2007, 41(6): 1185-1192
- [84] Mayer Jr F L, Marking L L, Bills T D, et al. Physico-chemical Factors Affecting Toxicity in Freshwater: Hardness, pH and Temperature [M]// Hamelink J L, Landrum P F, Bergman H L, et al. *Bioavailability: Physical, Chemical and Biological Interactions*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994: 5-22
- [85] Arai T, Kotake A, Kayama S, et al. Movements and stock discrimination of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the Western Pacific by otolith Sr:Ca ratios [C]. 17th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish. Majuro, Marshall Islands: The Scientific Committee of the Commission for the Conservation and Management of Highly Migratory Fish Stocks in the Western and Central Pacific Ocean, 2004: Bio-7
- [86] Lin Y T. Age, growth and migratory environmental history of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) in the Indian Ocean [D]. Taipei, Taiwan, China: Taiwan University, 2006: 15-30
- [87] Dove S G, Kingsford M J. Use of otoliths and eye lenses for measuring trace-metal incorporation in fishes: A biogeographic study [J]. *Marine Biology*, 1998, 130(3): 377-387
- [88] Rooker J R, Secor D H, Zdanowicz V S, et al. Otolith elemental fingerprints of Atlantic bluefin tuna from eastern and western nurseries [R]. Madrid: The International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT), 2002, 54: 198-506
- [89] Payan P, DePontual H, Bœuf G, et al. Endolymph chemistry and otolith growth in fish [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2004, 3(6-7): 535-547
- [90] Elsdon T S, Wells B K, Campana S E, et al. Otolith Chemistry to Describe Movements and Life-history Parameters of Fishes: Hypotheses, Assumptions, Limitations and Inferences [M]// *Oceanography and Marine Biology*. CRC Press, 2008: 303-336
- [91] Wells B K, Rieman B E, Clayton J L, et al. Relationships between water, otolith, and scale chemistries of westslope cutthroat trout from the Coeur d'Alene River, Idaho: The potential application of hard-part chemistry to describe movements in freshwater [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2003, 132(3): 409-424
- [92] Luo J. The influential factors of strontium and barium enrichment in otolith and their response to the environment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 18
- [93] Walther B D, Thorrold S R. Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 311: 125-130
- [94] 李云凯, 沈永富. 脊椎骨在软骨鱼类年龄、摄食及洄游研究中的应用[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(1): 112-121
- Li Y K, Shen Y F. A review of studies on the age, feeding habits, and migration using vertebrae of cartilaginous fishes [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(1): 112-121 (in Chinese)
- [95] 许昆灿, 吴丽卿, 汪惠昌. 海洋生物体中痕量金属分析方法的实验室间分析互校[J]. *台湾海峡*, 1993, 12(2): 102-109
- Xu K C, Wu L Q, Wang H C. Summary report on China Intercomparison Exercise for analytical methods of trace metals in biological tissue [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1993, 12(2): 102-109 (in Chinese)
- [96] 陶玲, 吴强, 李铁军, 等. 大洋鱿鱼体内重金属富集特征及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2022, 17(3): 293-302
- Tao L, Wu Q, Li T J, et al. Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals in pelagic squid [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(3): 293-302 (in Chinese)
- [97] 陈永正. 应用鱼类微量元素含量建立预测福建海域污染的数学模型[J]. *台湾海峡*, 1997, 16(2): 181-185
- Chen Y Z. Model coastal water pollution in Fujian by examination of trace elements in fish [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1997, 16(2): 181-185 (in Chinese)

- nese)
- [98] Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization (FAO/WHO). Evaluation of certain mycotoxins in food: Fifty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [R]. Geneva: World Health Organization, 2002: 56
- [99] 中华人民共和国农业部. 无公害食品 水产品中有毒有害物质限量: NY 5073—2006[S]. 北京: 农业出版社, 2006
- [100] Mokhtar M, Aris A Z, Munusamy V, et al. Assessment level of heavy metals in *Penaeus monodon* and *Oreochromis* spp in selected aquaculture ponds of high densities development area [J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 30: 348-360
- [101] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022
- [102] Bosch A C, O' Neill B, Sigge G O, et al. Heavy metals in marine fish meat and consumer health: A review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(1): 32-48
- [103] Storelli A, Barone G, Dambrosio A, et al. Occurrence of trace metals in fish from South Italy: Assessment risk to consumer's health [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 90: 103487
- [104] Bouiba S, Bendimerad M E A, Rouane-Hacene O, et al. Metallic trace element dynamics in *Paracentrotus lividus* from Algeria: Environmental and human health risk assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 187: 114485
- [105] 刘庄, 林嘉立, 潘巧敏, 等. 食用鱼类食用安全性评价方法综述[J]. 广东化工, 2019, 46(11): 122-123
- Liu Z, Lin J L, Pan Q M, et al. Review on the evaluation methods of food safety of edible fish in Meijiang River [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(11): 122-123 (in Chinese) ◆