

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.021

新疆博斯腾湖鱼类肌肉硒含量及生物累积效应研究

刘拓¹, 赵禹^{1*}, 白金¹, 梁楠¹, 王超², 王鹏¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 新疆地矿局第三地质大队, 新疆 库尔勒市 841000)

摘要: 鱼类因具有强的硒生物累积效应, 是科学补硒的重要食材。博斯腾湖位于新疆博湖县, 是中国最大的内陆淡水吞吐湖。研究查明博斯腾湖各类鱼肌肉中 Se 含量范围、赋存形态及其分布特征, 探讨不同鱼类 Se 的生物累积效应及影响因素, 对于研究区特色鱼类资源开发和助力当地经济发展意义重大。系统采集并测试了博斯腾湖 44 件鱼肉中 Se 含量, 研究结果表明, 博斯腾湖鱼肉 Se 含量由高到低依次为: 白条鱼 > 五道黑 > 池沼公鱼 > 鲫鱼 > 鲤鱼 > 鲢鱼 > 草鱼, 同一种鱼的肌肉 Se 含量在小湖区高于大湖区; 鱼肉中硒代蛋氨酸 SeMet 占绝对优势, 有机硒占比 71.54%~94.08%, Se 的生物可利用率高。水生生物食物链中 Se 的累积效应和水层生态环境的变化, 造成鱼肉中 Se 的生物富集系数 BAF 存在差异: 肉食性鱼 > 杂食性鱼 > 草食性鱼, 底栖鱼肌肉 Se 含量高于中上层、中下层鱼。博斯腾湖鱼富硒率高, 品质好, 应结合已有区位和资源优势, 大力发展天然野生有机富硒渔业。

关键词: 博斯腾湖; 鱼肌肉; Se; 生物富集系数; 富硒渔业

中图分类号: P67

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)03-0236-08

Study on the Content of Selenium in Fish Muscles and the Bioaccumulation Effect in Bosten Lake, Xinjiang

LIU Tuo¹, ZHAO Yu^{1*}, BAI Jin¹, LIANG Nan¹, WANG Chao², WANG Peng¹

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. No. 3 Geological party, Xinjiang Bureau of Exploration and Development of Mineral Resources, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Fish is Se-enriched supplement to food for its strong bioaccumulation effect of selenium. Bosten Lake is the largest inland freshwater lake in Bohu County, Xinjiang. It is of great significance to the exploitation of fish resources and the development of local economy to probe into the selenium content, the chemical speciation and the bioaccumulation factors. Selenium content of fish muscle in 44 samples from Bosten Lake was investigated. The results showed that selenium content from high to low was as follows: white streaked fish > five black streaks > pond male fish > crucian carp > carp > silver carp > grass carp. The content was higher in the small lake area than in the large lake area in the same species. Selenomethionine (SeMet) was the dominant speciation of selenium in fish muscles, the proportion of organic selenium being 71.54%-94.08%, and the

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2021-02-27

基金项目: 新疆巴音郭楞蒙古自治州自然资源局项目“新疆焉耆盆地 1:5 万土地质量地球化学调查”(XJCYZB-KEL-2019166), 中国地质调查局项目“新疆耕地区土地质量地球化学调查”(DD20190521)。

作者简介: 刘拓(1964-), 男, 教授级高级工程师, 从事应用地球化学研究。E-mail: ltuo@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者: 赵禹(1988-), 男, 工程师, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: zhaoyu01@mail.cgs.gov.cn。

bioavailability of selenium being high. The accumulation effect of selenium and the ecological environment in food chain of aquatic organism result in the difference of bioaccumulation factor (BAF), i. e. carnivorous fish > omnivorous fish > herbivorous fish. Fish inhabiting in the bottom of water has much higher selenium content in fish muscle than those in the upper and middle layers. Natural organic se-enriched fishery should be developed in Bosten Lake due to the good quality of selenium enrichment in fish.

Keywords: Bosten Lake; fish muscle; selenium; bioaccumulation factor; selenium - rich fishery

Se 是人体必需的微量营养元素,它影响活体细胞的新陈代谢、抗氧化防御和免疫功能,补 Se 逐渐成为一个健康话题 (Rayman, 2000)。余光辉等 (2007) 研究表明,人体每日摄入的总 Se 中植物性食品 Se 占 26.3%,而动物性食品 Se 占 73.7%。由此可见,动物性食品是人们在日常生活中进行有效补 Se 的主要来源。各类动物性食品中 Se 含量顺序为鱼类 > 肉类及其制品 > 禽蛋,表明鱼类具有强的 Se 生物累积效应,是科学补硒的重要食材 (马文琦等, 1993; 段叶辉等, 2011)。然而,目前国内外针对水产养殖生物中 Se 的研究多集中在 Se 对水产动物中的营养作用 (陈星灿等, 2018; Bai et al., 2019; Liu et al., 2010)、硒对水产动物的毒性作用 (王宏伟等, 2007; Bjerregaard et al., 2012; Gao et al., 2002)、水产动物对 Se 的需要量等方面 (苏传福, 2008; 梁达智等, 2019; Stewart et al., 2020), 对水产生物中 Se 组织特异性积累、形态分析及影响因素的报道较少,且多集中于国外,缺少可供全国对比的基础数据。鉴于此,笔者对中国最大的内陆淡水湖—博斯腾湖水体中主要鱼类进行采样,旨在查明博斯腾湖鱼肌肉中 Se 含量特征及存在形态,研究相同水环境条件下不同鱼类 Se 生物累积效应差异,评价 Se 的生物可利用性,分析博斯腾湖富 Se 鱼开发前景,为博斯腾湖富硒渔业发展提供科学依据。

1 研究区自然地理与渔业现状

博斯腾湖 (41°56'~42°14'N, 86°40'~87°26'E) 位于新疆巴音郭楞蒙古自治州博湖县境内,海拔 1 048 m,湖泊东西长约 55 km,南北宽约 25 km,水域面积约 1 300 km²,是中国最大的内陆淡水湖,也是干旱、半干旱地区最具代表性的湖泊之一 (巴雅尔等, 2013)。博斯腾湖主要的补给水源为开都河和清水河,湖体由大湖、小湖、苇沼 3 部分组成。大湖区

平均水深 7.38 m,最大水深 16 m,水域面积 1 150 km²;小湖群由多个小湖组成,多分布在大湖西南苇沼,水深 2~4 m,水面面积 30~40 km²,其中位于焉耆县的相思湖面积最大;苇沼主要在大湖西南、西北部,面积约 350 km²,是中国三大芦苇产区之一 (图 1)。



图 1 博斯腾湖交通位置图

Fig. 1 Location map of Bosten lake

博斯腾湖 1958 年开始商业化渔业生产 (陈朋等, 2014), 目前湖中淡水鱼达 32 种, 其中青虾、赤鲈、鲢鱼、鳙鱼、鲫鱼、草鱼、鲤鱼、池沼公鱼等 10 种鱼获得有机产品认证, 全湖面鱼产量 7 200t/y, 产值 0.88 亿元/年, 已成为新疆最大的渔业生产基地和中国最大的淡水有机水产品生产基地。随着博斯腾湖渔业开发的快速发展, 鱼类资源结构不断发生改变, 湖泊食物网结构及生态系统稳定性面临挑战 (陈朋等, 2014; 杜新宪等, 2009)。因此, 发展富硒渔业成为博斯腾湖渔业生态集约化、高质量高收益发展的重要途径。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2019年8月,在博湖县乌兰再格森乡大河口(博斯腾湖大湖区野生鱼唯一的捕鱼码头)获取鲢鱼5件、草鱼5件、池沼公鱼5件、鲫鱼5件和鲤鱼4件共24件鱼样品,做为大湖区样品;在焉耆县相思湖获取鲢鱼4件、草鱼3件、池沼公鱼2件、鲫鱼2件、白条鱼2件和五道黑7件共20件鱼样品,做为小湖区样品(图2)。所有样品均取鱼腹部肌肉,共计44件样品冷冻后送实验室。

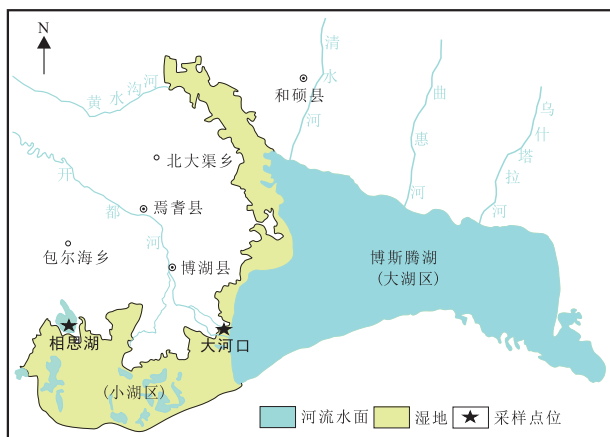


图2 博斯腾湖水系及采样点位示意图

Fig. 2 Location of the sampling stations in Bosten lake

2.2 鱼的生活习性

获取的44件鱼样品包括7个品种,生活习性存在差异。鲢鱼,属于鲤行目、鲤科,为以植物为主的杂食性鱼类,生活在水体中上层;草鱼,属于鲤行目、鲤科,为草食性鱼类,生活在水体中下层;鲫鱼,属于鲤行目、鲤科,为以植物为主的杂食性鱼类,生活在水体底层;池沼公鱼,属于鲢行目、胡瓜鱼科,为肉食性鱼类,生活在水体底层;鲤鱼,属于鲤行目、鲤科,为杂食性鱼类,生活在水体底层;白条鱼,属于鲤行目、鲤科,为以植物为主的杂食性鱼类,生活在水体上层;五道黑,属于鲈形目、鲈科,为肉食性鱼类,生活在水体底层。

2.3 分析测试

采用苟体忠等(2012)建立的方法测定鱼体中的Se含量,其简要方法为:在装有鱼肉样品的锥形瓶中加入15 mL混酸 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (2:1),冷消化至溶液澄清,并于电热板上低温加热至溶液约1 mL,

并趁热加入5 mL浓盐酸,再于电热板上低温加热至溶液约1 mL,取下,冷却。然后将溶液转移至50 mL容量瓶中,并加入12.5 mL浓盐酸,再用超纯水定容至刻度,摇匀。最后采用氢化物发生-冷原子荧光光谱法测定样品溶液中的Se含量。

鱼硒形态的测定参考《富硒农产品GH/T1135-2017》中“附录A 硒代氨基酸含量的测定方法”,采用液相色谱分离原子荧光法测定,测定硒酸盐 Se(VI) 、亚硒酸盐 Se(IV) 、硒代蛋氨酸(SeMet)、硒代胱氨酸(Se-Cys_2)、硒甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)共5种形态。

以上指标均进行2次重复性测定,并计算2次独立测定结果的相对误差 RE ($RE = \text{绝对差值} / \text{算术平均值}$)。结果表明,全部指标 RE 介于0.5%~12.6%,符合精密密度 $\leq 20\%$ 要求,且总Se的测试精密密度高于Se形态。因此,采用算术平均值作为测试指标最终含量值。

2.4 数据处理

采用Excel 2010软件(微软公司,美国)对数据进行统计分析,Origin 8.0(OriginLab公司,美国)和Coreldraw X4(Corel公司,加拿大)绘制各类图件。

3 结果与分析

3.1 博斯腾湖鱼肌肉Se含量特征

博斯腾湖44件鱼肌肉样品全Se含量介于 $0.07 \times 10^{-6} \sim 0.65 \times 10^{-6}$,均值为 0.27×10^{-6} ,高于广州(0.24×10^{-6})(余光辉等,2007)、安康(0.20×10^{-6})(张斌鑫,2019)、克山(0.17×10^{-6})(张薛勤等,2018)地区鱼平均Se含量。对鲢鱼、草鱼、鲫鱼、池沼公鱼、鲤鱼、白条、五道黑7种鱼的肌肉Se含量分别统计(表1),结果表明,鱼肌肉Se含量由高到低依次为:白条鱼>五道黑>池沼公鱼>鲫鱼>鲤鱼>鲢鱼>草鱼,白条鱼肌肉Se含量是草鱼的3.7倍。目前国内有关鱼Se含量的报道相对较少,与其相比,研究区鲫鱼Se含量为 0.23×10^{-6} ,高于贵阳市清水江三板溪水库(0.22×10^{-6})(苟体忠等,2017)、广州市(0.13×10^{-6})(余光辉等,2007)、上海市(0.18×10^{-6})(马文琦等,1993)鲫鱼Se含量,但低于鄱阳湖中鲫鱼Se含量(0.5×10^{-6})(姚刚,2006);鲤鱼Se含量为 0.22×10^{-6} ,高于广州市的 0.19×10^{-6} (余光辉等,2007),但低于三板溪水库的 0.24×10^{-6} (苟体忠等,2017);鲢鱼Se含量为 0.20×10^{-6} ,高于贵阳市清水江三板溪

水库中鲢鱼 Se 含量(0.15×10^{-6}) (苟体忠等, 2017); 草鱼 Se 含量为 0.15×10^{-6} , 高于广州市的 $0.07 \times$

10^{-6} (余光辉等, 2007)。整体看来, 博斯腾湖鱼肌肉中 Se 含量与国内已报道数据相比, 属于较高水平。

表 1 博斯腾湖鱼肌肉 Se 含量分类统计表 (10^{-6})

Tab. 1 Statistical table of selenium content of fish muscles in Bosten Lake (10^{-6})

鱼类	草鱼	鲢鱼	鲫鱼	鲤鱼	白条	公鱼	五道黑
食性	草食性	杂食性	杂食性	杂食性	杂食性	肉食性	肉食性
生活层位	中下层鱼	中上层鱼	底层鱼	底层鱼	上层鱼	底层鱼	底层鱼
大湖区							
样本数	5	5	5	4	—	5	—
最大值	0.22	0.20	0.29	0.40	—	0.27	—
最小值	0.08	0.15	0.19	0.07	—	0.22	—
均值	0.13	0.17	0.22	0.22	—	0.24	—
小湖区							
样本数	3	4	2	—	2	2	7
最大值	0.16	0.26	0.26	—	0.58	0.65	0.47
最小值	0.19	0.24	0.25	—	0.55	0.67	0.32
均值	0.18	0.25	0.25	—	0.56	0.66	0.37
博斯腾湖							
均值	0.15	0.20	0.23	0.22	0.56	0.36	0.37

对比大、小湖区各种鱼肌肉中 Se 含量, 表明大湖区 5 种鱼肌肉 Se 含量从高到低为池沼公鱼 > 鲤鱼、鲫鱼 > 鲢鱼 > 草鱼; 小湖区 6 种鱼肌肉 Se 含量从高到低为池沼公鱼 > 白条鱼 > 五道黑 > 鲢鱼、鲫鱼 > 草鱼。大、小湖区采集相同种类的 4 种鱼肌肉 Se 含量规律一致, 即 Se 含量从高到低依次为池沼公鱼 > 鲫鱼 > 鲢鱼 > 草鱼, 且同一种类鱼肌肉 Se 含量具有小湖区高于大湖区的特征。

3.2 不同生活习性鱼的 Se 含量特征

为查明 Se 元素在水生生物食物链中的变化规律, 是否具有累积效应并随着生物链逐级传递而升高, 将采集的鱼样品按其生物食性分为肉食性鱼、杂食性鱼和草食性鱼 (表 1)。对比博斯腾湖不同食性鱼肌肉 Se 含量, 结果表明, 鱼肌肉 Se 含量表现为肉食性鱼 (0.36×10^{-6}) > 杂食性鱼 (0.26×10^{-6}) > 草食性鱼 (0.15×10^{-6}) 的规律。该结论与 Elzbieta et al. (2017) 对位于波兰西部的沃塔河食肉动物、杂食动物和植食性动物 Se 含量研究结果一致。大、小湖区不同食性鱼肌肉 Se 含量表现规律一致, 且小湖区各食性鱼的肌肉 Se 含量均高于大湖区 (图 3)。

由于鱼类生活不同的水层区域, 不同的水层区域环境之间存在着一定的差异, 为了考察水生生态环境差异对 Se 含量的影响, 根据鱼类活动的水层

区域可将样品划分为底层鱼、中下层鱼和中上层鱼。小湖区水深 2~4m, 水位浅不存在明显的水层位差异, 因此仅就博斯腾湖大湖区 24 件鱼肌肉样品 Se 含量进行统计, 分析不同栖息层位鱼类 Se 含量特征。统计结果表明, 位于底层生活的鱼, 其鱼肌肉 Se 含量 (0.23×10^{-6} , $n=14$) 明显高于中上层 (0.17×10^{-6} , $n=5$)、中下层 (0.13×10^{-6} , $n=5$) 生活的鱼类, 但中上层和中下层之间差异不显著。

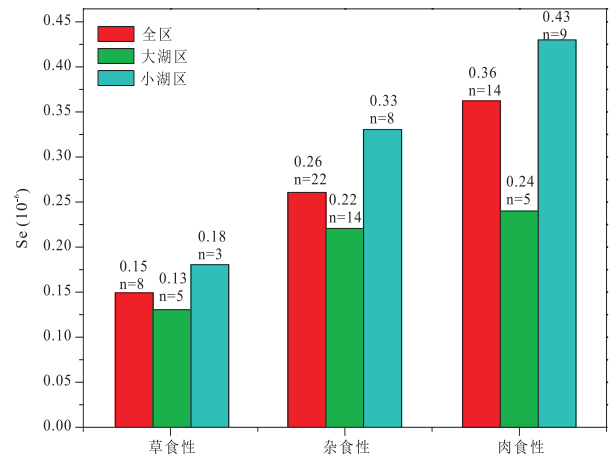


图 3 不同食性鱼肌肉中 Se 含量对比图

Fig. 3 Comparison of selenium content in fish muscle of different feeding habits

3.3 鱼肌肉中 Se 形态组成特征

Se 主要以有机硒的形式存在于鱼组织器官中, 鱼的来源和种类不同, Se 形态也不同, 进而影响到 Se 的双重生物效应。因此, 查明鱼中 Se 形态组成具有重要意义(Cabanero et al., 2004; Zurdo et al., 2019)。笔者选取了 4 件鱼肌肉样品测定其 Se 形态组成, 结果表明, 草鱼(CY01)、鲢鱼(BL01)、鲫鱼(JY01)、五道黑(WDH01)肌肉中全 Se 含量分别为 0.18×10^{-6} 、 0.26×10^{-6} 、 0.25×10^{-6} 、 0.34×10^{-6} 。其中, 硒代蛋氨酸 SeMet 占全 Se 比例介于 51.22%~86.39%, 是鱼肌肉中最主要的 Se 存在形态(图 4); 其次为硒代胱氨酸 SeCys₂, 占比均值为 11.35%, 硒甲基硒代半胱氨酸 MeSeCys 占比为 5.72%; 以上 3 种有机硒占到全 Se 的 71.54%~94.08%, 均值为 85.21%。动物对自然界中有机硒的吸收是通过主动运输, 而对无机硒的吸收是靠肠道被动扩散, 一定程度上解释了鱼中有机硒较高的吸收率(谢凌天等, 2018)。鱼肌肉中无机硒以硒酸盐为主, 占到全 Se 的 3.25%~22.76%, 受鱼种类影响变化幅度大, 主要是由于硒酸盐必须先被还原为亚硒酸盐, 然后才能进一步代谢, 这导致亚硒酸盐被更快的代谢并合并到蛋白质中, 更大比例的亚硒酸盐在生物转化作用之前被消除, 鱼的生长期不同, 硒酸盐和亚硒酸盐含量差异程度也不同(Lanctot et al., 2017)。

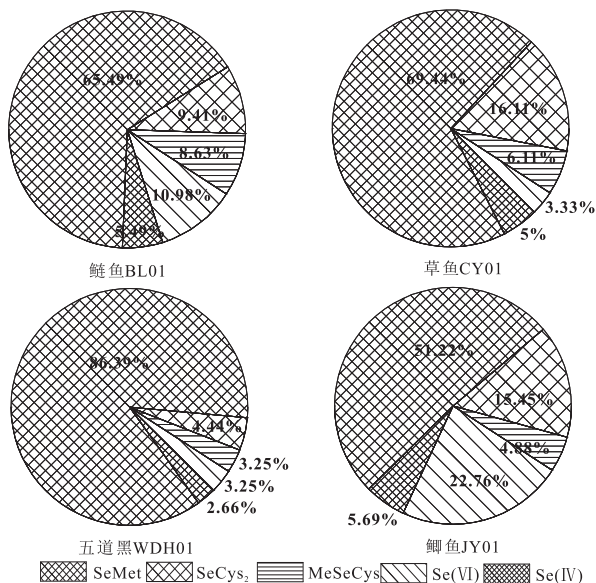


图 4 鱼肌肉中硒形态组成图

Fig. 4 Speciation of selenium in fish muscle

4 讨论

4.1 博斯腾湖鱼肌肉 Se 生物累积效应影响因素

为表征不同鱼类对 Se 的吸收能力差异, 引入生物富集系数(BAF)参数(苟体忠等, 2017), 计算公式为: $BAF = C_y / C_t$, 其中, C_y 表示 Se 在鱼体中的硒含量, C_t 表示 Se 在湖底沉积物的 Se 含量。研究区土地质量地球化学调查工作查明博斯腾湖小湖区湖底沉积物 Se 含量为 0.34×10^{-6} , 大湖区湖岸沉积物 Se 含量为 0.43×10^{-6} (刘拓等, 2019)。

博斯腾湖鱼硒的生物富集系数 BAF 介于 0.42~1.08(图 5), 均值为 0.75, 其中五道黑鱼 BAF 为 1.08, 硒生物累积能力最强, 主要与其为肉食性、且常年生活在湖底区域, 与水底沉积物及水生动物等环境因素关系密切, 更易受到这些因素的影响(南雪娇等, 2016); 鲫鱼、鲢鱼、鲤鱼 3 种鱼均为杂食性鱼, BAF 值相近, 分别为 0.56、0.54、0.52。贵州清水江三板溪水库对应 3 种鱼 BAF 分别为 0.6、0.4、0.6(苟体忠等, 2017), 2 个地区 BAF 值整体相差不大, 初步推断鲫鱼、鲢鱼、鲤鱼 3 种鱼在不同地质背景水体中硒生物累积效应具有相近性; 草鱼硒生物累积效应最差, 与其草食性生活习性有关(陈朋等, 2016)。

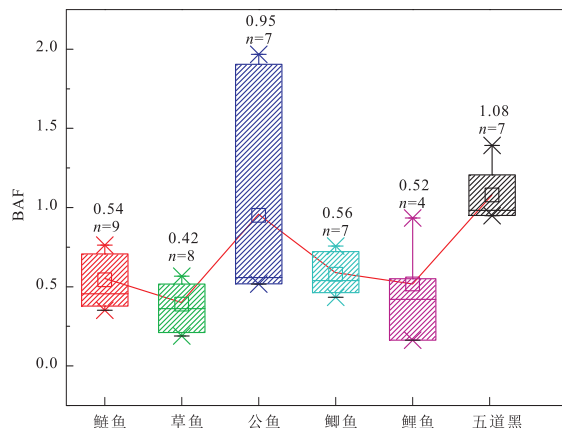


图 5 不同鱼肌肉中硒生物累积因子箱状图

Fig. 5 Box diagram of BAF in different fish muscles

综上所述, 水生生态系统中水生生物与 Se 的相互作用大致可概括为, 水体沉积物是 Se 的储备源, 湖水中汇集了大量溶于地表水的硒盐(包括硒酸盐和亚硒酸盐)(梁兴唐等, 2017), 二者为水生生物提

供了重要 Se 源,对于滤食性动物,可通过从水、藻类植物、微生物中摄食 Se,而底栖生物还可直接从沉积物中摄取 Se,通过生物累积和生物转化成为可供生物利用的有机硒。由于水生生物食物链中硒的累积效应和水层水生生态环境的变化,造成不同食性鱼类食物链硒营养级差异和不同栖息层位鱼类 Se 含量差异。鲢鱼属于杂食性鱼,喜欢生活在水体的中上层,草鱼为草食性鱼,一般生活在水体的中下层,二者 Se 含量表现为鲢鱼(0.17×10^{-6}) > 草鱼(0.13×10^{-6}),表明鱼的食性比栖息层位更能影响到鱼体中 Se 含量特征。

4.2 博斯腾湖富 Se 渔业开发前景

依据《富硒含硒食品与相关产品硒含量标准 DB 65/T 556-2018》中“新鲜水产动物”富 Se 标准($Se \geq 0.08 \times 10^{-6}$),44 件鱼肌肉样品富 Se 率达 97.7%,Se 含量均值为 0.27×10^{-6} ,高出新鲜水产动物富 Se 标准 2.4 倍。《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则 GB 28050-2011》中营养成分含量声明要求,预包装食品富 Se 鱼中 Se 含量需 $\geq 0.15 \times 10^{-6}$,以此为标准,44 件鱼肌肉样品中有 40 件符合要求,富 Se 率达 90.91%,同样具有非常高的富 Se 率。相关研究表明,Se 在鱼体中的累积具有组织特异性差异,鱼的肾脏、肝脏、性腺、鳃中硒含量均高于肌肉(Lizarraga et al., 2020; Lanctot et al., 2017),如此推断,博斯腾湖中鱼体应具有比本文更高的 Se 含量。与其他形态的 Se 相比,硒代蛋氨酸具有更高的生物利用率和营养转移特性(Misra et al., 2012),研究区鱼肌肉中硒代蛋氨酸 SeMet 占全 Se 比例介于 51.22% ~ 86.39%,均值为 68.14%,表明博斯腾湖鱼不仅全 Se 含量高,品质也非常优良。

博斯腾湖为中国最大的内陆淡水湖,国家 5A 级旅游景区,产鱼量约 7 200t/y,是新疆最大的渔业生产基地,带动当地 6 万余人就业增收。博斯腾湖采取人工增殖放流,推广“人放天养”的生态渔业模式,鲤鱼、池沼公鱼等 10 种鱼获得有机产品认证,资源优势明显。因此,博斯腾湖具有发展富硒渔业得天独厚的区位优势、资源优势,应重点发展现代渔业、生态渔业、休闲渔业;同时,依托科技创新,开发富硒水产深加工产品,如富硒鱼肝油等经济高附加值产品。

5 结论

(1)博斯腾湖获取的 7 种鱼的肌肉 Se 含量从高到低依次为:白条鱼 > 五道黑 > 池沼公鱼 > 鲫鱼 > 鲤鱼 > 鲢鱼 > 草鱼,且同一种类鱼肌肉 Se 含量具有小湖区高于大湖区的特征。受鱼种类影响,鱼肌肉中 Se 形态组成变化较大,以硒代蛋氨酸 SeMet 占绝对优势,其次为硒代胱氨酸 SeCys₂ 或硒酸盐,有机硒占比 71.54% ~ 94.08%,硒的生物可利用率高。

(2)基于鱼肌肉生物富集系数 BAF 对比研究表明,水生生物食物链中 Se 的累积效应和水层生态环境的变化,造成不同食性鱼类食物链硒营养级差异和不同栖息层位鱼类 Se 含量差异,博斯腾湖鱼肌肉 Se 含量表现为肉食性鱼 > 杂食性鱼 > 草食性鱼,底层生活的鱼肌肉 Se 含量高于中上层、中下层鱼。

(3)博斯腾湖参考新鲜水产动物富硒标准,富硒率为 97.7%;参考预包装食品富硒鱼标准,富 Se 率为 90.91%;硒代蛋氨酸含量占比高,品质优质,应结合区位优势、资源优势,重点发展现代渔业、生态渔业、休闲渔业,依托科技创新,开发富硒水产深加工产品。

参考文献(References):

- 余光辉,温琰茂,何树慈,等. 广州市食品硒含量及居民硒摄入量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2600-2608.
- YU Guanghui, WEN Yanmao, HE Shuhan, et al. Food selenium content and resident daily selenium intake in Guangzhou City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2600-2608.
- 马文琦,何慧珍. 上海地区 79 种动物性食物的硒含量分析[J]. 营养学报, 1993, 15(04): 464-465.
- MA Wenqi, HE Huizhen. Analysis of selenium contents of 79 kinds of animal food in Shanghai[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1993, 15(4): 464-465.
- 段叶辉,李丽立,张彬,等. 不同途径补硒对放养鸡体内硒含量和胴体性状的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(10): 14-17.
- DUAN Yehui, LI Lili, ZHANG Bin, et al. The effects of stocking and supplementing selenium through different channels on body selenium contents and carcass charac-

- teristics of chickens[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 38(10):14-17.
- 陈星灿, 王磊, 相兴伟, 等. 不同类型硒对黑鲷幼鱼生长及血清免疫指标的影响[J]. *水产科学*, 2018, 37(05): 577-583.
- CHEN Xingcan, WANG Lei, XIANG Xingwei, et al. Effect of dietary selenium sources on growth performance and serum immune indices of juvenile black seabream[J]. *Acanthopagrus Schlegelii*, 2018, 37(05):577-583.
- 王宏伟, 霍艳高, 门金闫, 等. 氯化汞胁迫下硒对中华米虾 SOD 活性的影响[J]. *淡水渔业*, 2007(01):69-71.
- WANG Hongwei, HUO Yangao, MEN Jinshuan, et al. Effect of dietary selenium supplementation on the activity of SOD *Caridina denticulate sinensis* under $HgCl_2$ stress[J]. *Freshwater Fisheries*, 2007(01):69-71.
- 苏传福. 草鱼幼鱼硒的营养需要研究[D]. 重庆:西南大学, 2008.
- SU Chuanfu. Studies on dietary selenium requirements of juvenile grass carp, *ctenopharyngodon ideelus* [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- 梁达智, 马豪勇, 杨奇慧, 等. 硒源及硒水平对斜带石斑鱼幼鱼生长性能、免疫酶活性和全鱼及脊椎骨硒含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(06):2777-2787.
- LIANG Dazhi, MA Haoyong, YANG Qihui, et al. Effects of Selenium Sources and Selenium Levels on Growth Performance, Immune Enzyme activities and Selenium Contents of Whole Fish and Vertebrae for Juvenile Grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(06):2777-2787.
- 巴雅尔, 郭家盛, 卢少勇, 等. 博斯腾湖大湖区近 20 年生态健康状况评价[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(03): 503-507.
- BA Yaer, GUO Jiasheng, LU Shaoyong, et al. Assessing ecological health of open water region from Bostenhu Lake during last 20 years[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(03):503-507.
- 陈朋, 马燕武, 谢春刚, 等. 博斯腾湖鱼类群落结构的初步研究[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(02):36-42.
- CHEN Peng, MA Yanwu, XIE Chungang, et al. Preliminary study on community structure of fishes in Bositeng Lake [J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(02):36-42.
- 杜新宪, 许月英. 博斯腾湖流域污染治理与生态环境保护对策浅析[J]. *干旱环境监测*, 2009, 23(02):113-116.
- DU Xinxian, XU Yueying. Bosten Lake Basin Pollution Control and Ecological Response of the Environmental Protection [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2009, 23(02):113-116.
- 苟体忠, 唐文华, 张文华, 等. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定植物样品中的硒[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1401-1404.
- GOU Tizhong, TANG Wenhua, ZHANG Wenhua, et al. Determination of selenium in plant samples by Hydride Generation atomic fluorescence spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(5): 1401-1404.
- 中华全国供销合作总社, 中华人民共和国供销合作行业标准. GH/T1135-2017 富硒农产品[S]. 2017.
- All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Industry Standard for Supply and Marketing Cooperation of the People's Republic of China. GH/T1135-2017 Selenium-enriched Agricultural Products[S]. 2017.
- 张斌鑫. 安康市鱼产品富硒状况调查及加硒饲料对多鳞白甲鱼体内硒沉积水平的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- ZHANG Binxin. Investigation on the selenium-enriched condition of fish products in Ankang city and the effect of selenium-enriched feed on the selenium deposition level in the *Onychostoma macrolepis* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- 张薛勤, 梅晓宏, 袁长梅, 等. 中国不同地区畜禽水产品硒含量分析[J]. *中国食物与营养*, 2018, 24(06):15-19.
- ZHANG Xueqin, MEI Xiaohong, YUAN Changmei, et al. Selenium Content in Poultry Aquatic Products in Different Areas of China[J]. *Food and Nutrition in China*, 2018, 24(06):15-19.
- 苟体忠, 蒋天智, 常飞, 等. 三板溪水库鱼体中的硒含量及其生物累积效应研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(09): 205-208.
- GOU Tizhong, JIANG Tianzhi, CHANG Fei, et al. Study on the Content and Bioaccumulation Effect of Selenium in fish from Sanbanxi Reservoir[J]. *The Food Industry*, 2017, 38(09):205-208.
- 姚刚. 鄱阳湖水生生物中痕量元素砷硒汞的环境和生物效应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2006.
- YAO Gang. Studies on environmental and biological effects of trace elements of arsenic, selenium, and mercury in aquatic organism in Poyang Lake, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- 谢凌天, 应光国, 陈红星, 等. 硒对水生生物双重生物效应的研究进展[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(05):52-59.
- XIE Lingtian, YING Guangguo, CHEN Hongxing, et al.

- Dual effects of selenium in aquatic organisms: a review [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 50(05):52-59.
- 刘拓,段星星,赵禹,等. 西北五省耕地区 1:25 万土地质量地球化学调查成果报告[R],西安地质调查中心,2019.
- LIU Tuo, DUAN Xingxing, ZHAO Yu, et al. Investigation of 1:250,000 geochemistry in cultivated area of five provinces in northwest China[R], Xi'an Center of China Geological Survey, 2019.
- 南雪娇,余晓平,郭金玲,等. 水生生态系统中汞-硒相互作用研究进展[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(01):1-9.
- NAN Xuejiao, YU Xiaoping, GUO Jinling, et al. Progresses on the interaction between selenium and mercury in an aquatic ecosystem[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(01):1-9.
- 陈朋,马燕武,谢春刚,等. 博斯腾湖草鱼生长特征的研究[J]. *淡水渔业*, 2016, 46(04):38-43.
- CHEN Peng, MA Yanwu, XIE Chungang, et al. The growth of *Ctenopharyngodon idellus* in Bositeng Lake in Xinjiang [J]. *Freshwater Fisheries*, 2016, 46 (04): 38-43.
- 梁兴唐,刘永贤,钟书明,等. 沿海典型海产品硒含量及其富硒化研究进展[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(6):450-456.
- LIANG Xingtang, LIU Yongxian, ZHONG Shuming, et al. Advance in Selenium Content and Enriched Selenylation of the Coastal Typical Marine Product[J]. *Current Biotechnology*, 2017, 7(6):450-456.
- 陕西省质量技术监督局,陕西省地方标准. DB 65/T 556-2018 富硒含硒食品与相关产品硒含量标准[S]. 2018.
- Shaanxi Provincial Bureau of Quality and technical supervision, Local standard of Shaanxi Province. DB 65/T 556-2018 Standard for selenium content in selenium-enriched/selenium-containing foods and related products [S]. 2018.
- RAYMAN M P. The importance of selenium to human health[J]. *Lancet*, 2000, 356(9225): 233-241.
- Bai Zhuoan, Ren Tongjun, Han Yuzhe, et al. Effect of dietary Bio-fermented selenium on growth performance, nonspecific immune enzyme, proximate composition and bioaccumulation of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2019, 13:100180.
- Liu K, Wang X J, Ai Q H, et al. Dietary selenium requirement for juvenile coibia, *Rachycentron canadum* L [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(10):594-601.
- Bjerregaard P, Christensen A. Selenium Reduces the Retention of Methyl Mercury in the Brown Shrimp *Crangon crangon* [J]. USA: *Environmental Science & Technology*, 2012, 46:6324-6329.
- Gao Xueyun, Zhang Jinsong, Zhang Lide. Hollow Sphere Selenium Nanoparticles: Their In-Vitro Anti Hydroxyl Radical Effect [J]. USA: *Adv Mater*, 2002, 14 (4): 290-293.
- Stewart A. R, Feyrer F, Johnson R C. Resolving selenium exposure risk: Spatial, temporal, and tissue-specific variability of an endemic fish in a large, dynamic estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707:135919.
- Eizbieta Kalisinska, Arendarczyk Natalia Lanocha, Bogacka Danuta Kosik, et al. Muscle mercury and selenium in fishes and semiaquatic mammals from a selenium-deficient area[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 136:24-30.
- CABANERO Ana I, MADRID Yolanda, CAMARA Carmen. Selenium and mercury bioaccessibility in fish samples: an in vitro digestion method[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 526(1):51-61.
- Zurdo David Vicente, GOMEZ Beatriz Gómez, CORONA María Teresa Pérez, et al. Impact of fish growing conditions and cooking methods on selenium species in swordfish and salmon fillets[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 83:103275.
- Lancot C M, Melvin S D, Cresswell T. Selenium speciation influences bioaccumulation in *Limnodynastes peronii* tadpoles[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 187:1-8.
- Lizarraga L G A, Tiznado M E B, SANCHEZ C B, et al. Bioaccumulation of mercury and selenium in tissues of the mesopelagic fish Pacific hake (*Merluccius productus*) from the northern Gulf of California and the risk assessment on human health [J]. *Chemosphere*, 2020, 255:126941.
- Misra Sougat, Peak Derek, Chen Ning, et al. Tissue-specific accumulation and speciation of selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to elevated dietary selenomethionine[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 2012, 155(4):560-565.