



黄颡鱼不同组织矿物元素的分布及含量

宋长春, 刘涛, 仲崇超, 谭肖英, 张电光,
刘璐璐, 雷锡俊, 罗智*

(华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了探究鱼类不同组织中矿物元素的含量, 实验以养殖黄颡鱼为对象, 采用电感耦合等离子体质谱法测定了黄颡鱼 18 个组织 (心脏、肝脏、脑、脾脏、肾脏、肌肉、脂肪、前肠、中后肠、眼睛、鳃、尾鳍、鱼鳔、骨骼、胃、皮肤、血液、全鱼) 中 7 种矿物元素 (Ca、Mg、Zn、Fe、Cu、Mn 和 Se) 的含量与分布。结果显示, Ca 在骨骼、鳃、尾鳍和肌肉中占比较高, 在尾鳍和骨骼中含量最高, 在脂肪组织中含量最低; Mg 在骨骼和肌肉中占比较高, 在骨骼和尾鳍中含量最高, 在眼睛中含量最低; Zn 在骨骼、肌肉、皮肤和眼睛中占比较高, 在眼睛中含量最高, 在脂肪组织中含量最低; Fe 在骨骼、血液和肌肉中占比较高, 在血液中含量最高, 在脂肪组织中含量最低; Cu 在骨骼、肌肉和肝脏中占比较高, 在肾脏和肝脏中含量较高, 而在脂肪和眼睛中含量最低; Mn 在骨骼和肌肉中占比较高, 在骨骼和尾鳍中含量较高, 在眼睛和脂肪中含量较低; Se 在肌肉、骨骼、皮肤和肝脏中占比较高, 在脾脏、肝脏、肾脏和前肠中含量较高, 在肌肉和脂肪中含量较低。研究表明, 黄颡鱼体内含有丰富的矿物元素 (Ca、Mg、Zn、Fe、Cu、Mn、Se), 而且在不同组织中具有不同的分布特征。研究采用 ICP-MS 的方法, 阐明黄颡鱼不同组织中矿物元素的分布及含量, 为黄颡鱼矿物元素营养价值的判定提供了基础数据和科学依据, 同时也对其他鱼类中矿物元素相关研究具有重要的意义。

关键词: 黄颡鱼; 矿物元素; 组织分布; 营养成分; 营养价值评定

中图分类号: S 965.1

文献标志码: A

黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 属鲇形目 (Siluriformes) 鲇科 (Bagridae), 是一种广泛分布于我国内陆的杂食性淡水鱼。因其肉质细嫩、营养价值高而在市场上受到广泛欢迎。黄颡鱼除了含有丰富的蛋白质、不饱和脂肪酸和维生素等营养素外, 还含有大量的矿物元素。矿物元素在鱼类的生命活动中起着重要的作用, 广泛影响鱼类的生长、发育和营养代谢等许多重要的生化过程, 而且是影响鱼肉营养价值的重要因素。除此以外,

黄颡鱼体内还含有丰富的矿物元素, 是人体所需矿物元素的良好来源。

矿物元素参与体内各种生化反应, 对人体健康及生理功能有重要的作用。研究表明, Ca 是动物机体的重要元素之一, 体内的总量仅次于 C、H、O、N 而居第 5 位, Ca 离子在细胞分裂、生长和死亡等过程中起着重要的作用, 调控细胞的增殖、发育、神经细胞传导和细胞的死亡^[1]。Mg 是含量第 2 多的细胞阳离子, 是 300 多种不同酶的特异

收稿日期: 2022-09-08 修回日期: 2022-11-10

资助项目: 国家自然科学基金 (32030111, 32220103013)

第一作者: 宋长春 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: songchangchun@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 罗智, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: luozhi99@mail.hzau.edu.cn



性激活剂, 在多种代谢途径中如碳水化合物、蛋白质和脂质代谢中发挥重要作用^[2]; Zn 是构成多种酶和辅酶的必需成分, 在动物新陈代谢、生长发育、营养代谢、细胞信号识别及免疫功能等方面发挥着重要作用^[3]; Fe 是构成或活化多种金属酶的必需成分, 是脊椎动物能量代谢、氧转运、协助输送其他元素、维护机体正常免疫功能和 DNA 合成/修复等多种生理过程所必需的一种重要矿物质^[4-5]; Cu 作为体内关键亚铁氧化酶、血浆铜蓝蛋白的重要组成成分, 对维持正常生命活动具有重要作用; Mn 是脊椎动物生长、糖脂代谢、抗氧化等生理过程中所必需的微量元素之一, 参与中枢神经系统激素的传递, 催化造血机能, 提高免疫功能等^[6-7]; Se 是脊椎动物必需的微量元素, 具有改善胰岛素活性、抗糖尿病和抗癌的功能, 同时在体内发挥抗氧化的作用^[8-9]。因此, 不同矿物元素发挥不同的功能, 共同维持机体的稳态。

矿物元素在体内不能合成, 但却发挥着非常重要的生理功能。一旦食物源中缺乏或过量, 就会导致机体内矿物元素含量不均衡, 引起生理功能和组织结构异常, 导致各种疾病发生, 因此人类日常膳食中矿物元素的含量非常重要。迄今为止, 国内外有关鱼类矿物元素含量及分析的研究较少, 主要集中在异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 等^[10-11]。而关于黄颡鱼体内矿物元素的分布和含量的报道很少, 主要分析了全鱼、肝脏、肠道等组织的矿物元素含量, 并没有对其他组织进行详细研究^[12]。本实验利用电感耦合等离子体发射质谱仪 (ICP-MS) 法对黄颡鱼 18 个组织中 7 种矿物元素 (Ca、Mg、Zn、Fe、Cu、Mn 和 Se) 进行了测定与比较分析, 为黄颡鱼的相关营养学研究提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

元素标准储备液 (Ca、Mg: 1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$; Cu、Zn、Mn: 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$; Fe: 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 硝酸、盐酸、氢氧化钠、硼氢化钠、铁氰化钾和过氧化氢 (优级纯, 上海国药集团化学试剂有限公司) 和高氯酸 (优级纯, 上海凌峰化学试剂有限公司)。实验所用黄颡鱼成鱼取自华中农业大学水产养殖基地, 体重 (58.27 ± 1.43) g。本研究所有实验程序均遵循华中农业大学关于实验动物使用的伦理规范, 并经华

中农业大学伦理委员会批准。

实验仪器包括 PE 电感耦合等离子体发射质谱仪 (ICP-MS) (Optima 8000, 美国), Millipore 公 Milli-Q50 超纯水系统、电子天平 (赛多利斯科学仪器有限公司, 美国)。

1.2 样品前处理

采用常规的解剖方法获取黄颡鱼的肝脏、脾脏、肾脏、肌肉、脂肪、前肠、中后肠、眼睛、鳃、尾鳍、鱼鳔、骨骼、胃、皮肤、血液和全鱼等器官和组织样品。准确称量适量的样品置于微波消解管中, 缓慢加入 4.5 mL 70% HNO_3 以及 0.5 mL 的 HClO_4 , 混匀, 使样品与消化液充分接触, 放入微波消解仪 (CEM, 美国) 中, 85 $^\circ\text{C}$ 消解 4 h, 同时进行空白实验, 将样品冷却至室温, 打开消解仪。消解后, 于电热板上 140 $^\circ\text{C}$ 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 $^\circ\text{C}$ 保存 (在 Se 含量测定中, 使用 2 mL 70% HNO_3 和 2 mL 35% H_2O_2 来进行消化)。

1.3 试样分析

准确吸取各元素标准储备液, 用 2% HNO_3 稀释配制成以下浓度范围的标准溶液 (Ca: 0.16~20.00 mg/L; Mg: 0.08~10.00 mg/L; Zn: 0.08~10.00 mg/L; Fe: 0.16~20.00 mg/L; Cu: 0.02~1.00 mg/L; Mn: 0.03~2.00 mg/L; Se: 3.12~50.00 mg/L)。在最佳的实验条件下进行标准曲线的绘制, 并且采用 ICP-MS 测定不同组织中 7 种元素的含量。

1.4 数据分析

使用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计和分析, 以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示结果。进行统计分析前, 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验评估不同处理的正态性。各处理组间显著性使用单因素方差分析和 Duncan 氏多重比较检验, $P < 0.05$ 被认为具有显著差异, 这 7 种矿物元素在不同组织间的差异显著性采用不同字母表示。

2 结果

2.1 黄颡鱼全鱼以及血液中矿物元素含量的测定

黄颡鱼全鱼中, Ca (3010.80 mg/kg) 含量最高,

Mg (376.44 mg/kg) 次之, 然后依次为 Fe (21.16 mg/kg)、Zn (13.88 mg/kg)、Mn (1.39 mg/kg)、Cu (0.86 mg/kg) 和 Se (0.21 mg/kg)。血液中的 Fe 含量 (194.78 mg/L) 最高, Zn (8.85 mg/L) 次之, 然后依次为 Cu (0.58 mg/L)、Se (0.20 mg/L)、Ca (0.09 mg/L)、Mn (0.07 mg/L) 和 Mg (0.06 mg/L) (表 1)。

表 1 全鱼以及血液中矿物元素的含量

Tab. 1 Mineral elements content of whole body and blood

矿物元素 mineral elements	全鱼(湿重)/(mg/kg) whole body (wet weight)	血液/(mg/L) blood
钙 Ca	3010.80±33.62	0.09±0.00
镁 Mg	376.44±25.60	0.06±0.00
铁 Fe	21.16±0.42	194.78±2.01
锌 Zn	13.88±0.11	8.85±0.04
锰 Mn	1.39±0.04	0.07±0.00
铜 Cu	0.86±0.03	0.58±0.05
硒 Se	0.21±0.01	0.20±0.01

2.2 黄颡鱼各组织中 Ca 含量的测定及分布

黄颡鱼的 Ca 元素主要分布于骨骼、鳃、尾鳍和肌肉中, 分别占全鱼总 Ca 含量的 90.50%、3.53%、3.29% 和 2.07%, 而在其他组织中分布较少, 其中脾脏中 Ca 分布最低, 只占全鱼总 Ca 含量的 0.0034% (图 1-a)。

Ca 元素在尾鳍中含量最高 (18.20 g/kg), 骨骼 (16.17 g/kg) 和鳃 (4.26 g/kg) 中次之, 在其他组织中含量较低, 其中脂肪组织中 Ca 含量最低, 为 0.01 g/kg (图 1-b), 由于血液的单位是 mg/L, 其结果在表 1 中已经展示, 因此所有的 b 图内未展示血液相关数值。

2.3 黄颡鱼各组织中 Mg 含量的测定及分布

Mg 元素主要分布于骨骼、肌肉、皮肤和尾鳍中, 分别占全鱼总 Mg 含量的 65.60%、28.94%、1.71% 和 1.40%, 而在其他组织中分布较少, 其中眼睛中 Mg 分布最低 (图 2-a)。

Mg 元素在骨骼中含量最高 (1.30 g/kg), 尾鳍 (0.86 g/kg)、脾脏 (0.29 g/kg) 和肌肉 (0.26 g/kg) 次之, 在其他组织中含量较低, 鳃和眼睛中 Mg 含量最低, 分别为 0.25 和 0.11 mg/kg (图 2-b)。

2.4 黄颡鱼各组织中 Zn 含量的测定及分布

黄颡鱼 Zn 元素要分布于骨骼、肌肉、皮肤和眼睛中, 分别占全鱼总 Zn 含量的 45.50%、22.84%、11.11% 和 5.54%, 而在其他组织中分布

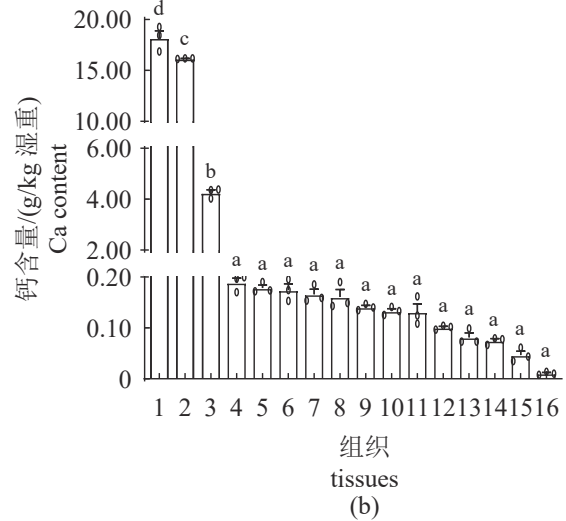
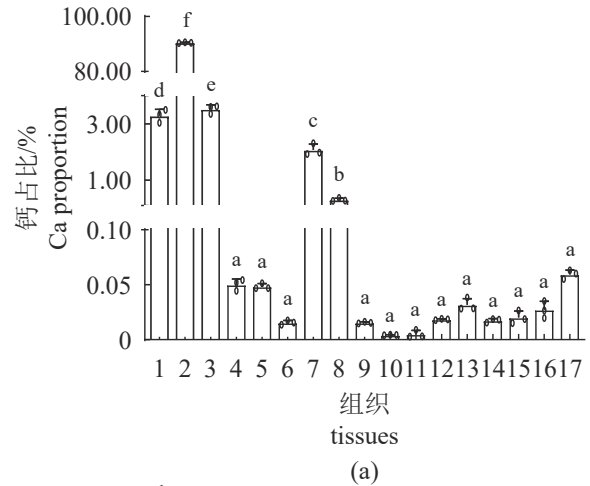


图 1 黄颡鱼不同组织中 Ca 含量的测定及分布

1. 尾鳍, 2. 骨骼, 3. 鳃, 4. 鳔, 5. 前肠, 6. 脑, 7. 肌肉, 8. 皮肤, 9. 中肠, 10. 心脏, 11. 脾脏, 12. 眼, 13. 胃, 14. 肾脏, 15. 肝脏, 16. 脂肪, 17. 血液; 不同字母表示在不同组织之间的元素含量差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Fig. 1 Determination and distribution of Ca content in different tissues of *P. fulvidraco*

1. tail fin, 2. bone, 3. gill, 4. swim bladder, 5. fore-intestine, 6. brain, 7. muscle, 8. skin, 9. mid-intestine, 10. heart, 11. spleen, 12. eye, 13. stomach, 14. kidney, 15. liver, 16. fat, 17. blood; different letters indicate significant differences in elements content among different tissues ($P < 0.05$); the same below.

较少, 其中脾脏中 Zn 分布最低, 只占全鱼总 Zn 含量的 0.09% (图 3-a)。

Zn 元素在眼睛中含量最高 (134.39 mg/kg), 尾鳍 (55.79 mg/kg)、骨骼 (34.68 mg/kg) 和肾脏 (28.93 mg/kg) 次之, 在其他组织中含量较低, 其中脂肪组织中 Zn 含量最低, 为 2.00 mg/kg (图 3-b)。

2.5 黄颡鱼各组织中 Fe 含量的测定及分布

黄颡鱼 Fe 元素主要分布于骨骼、血液、肌肉、

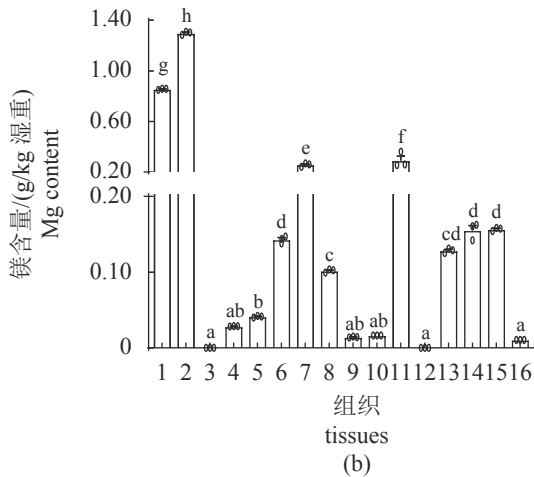
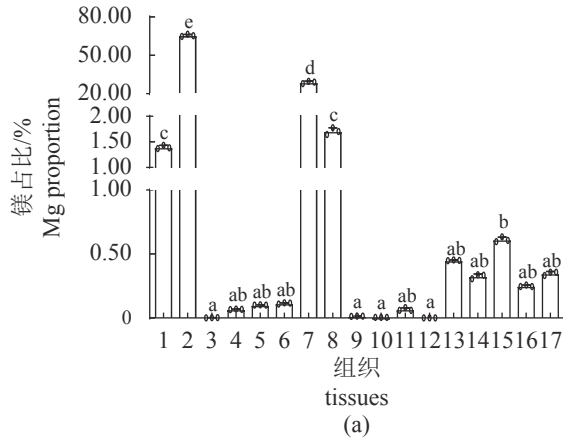


图 2 黄颡鱼不同组织中 Mg 含量的测定及分布

Fig. 2 Determination and distribution of Mg content in different tissues of *P. fulvidraco*

皮肤和肝脏中, 分别占全鱼总 Fe 含量的 34.39%、22.26%、18.53%、4.59% 和 4.31%, 而在其他组织中分布较少, 其中脾脏中 Fe 分布最低, 只占全鱼总 Fe 含量的 0.25% (图 4-a)。

Fe 元素在心脏中含量最高 (103.93 mg/kg), 尾鳍 (100.78 mg/kg)、肾脏 (81.87 mg/kg)、肝脏 (61.33 mg/kg) 和脾脏 (59.00 mg/kg) 次之, 在其他组织中含量较低, 其中脂肪中 Fe 含量最低, 为 3.00 mg/kg (图 4-b)。

2.6 黄颡鱼各组织中 Cu 含量的测定及分布

黄颡鱼 Cu 元素主要分布于骨骼、肌肉、肝脏、肾脏和皮肤中, 分别占全鱼总 Cu 含量的 46.25%、18.88%、10.52%、5.75% 和 4.96%, 而在其他组织中分布较少, 其中脾脏中 Cu 分布最低, 只占全鱼总 Cu 含量的 0.10% (图 5-a)。

Cu 元素在肾脏 (7.20 mg/kg) 和肝脏 (6.77 mg/kg) 中含量最高, 心脏 (3.80 mg/kg)、鱼鳃

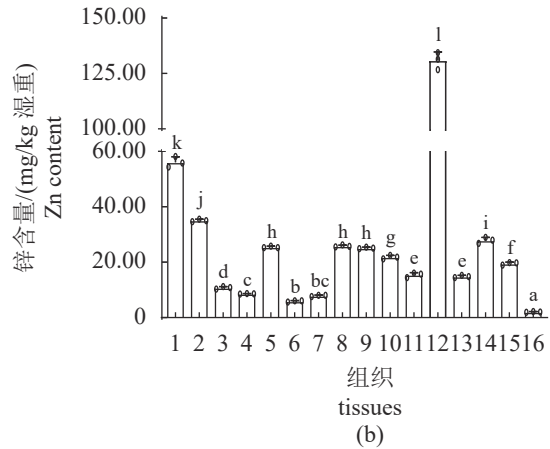
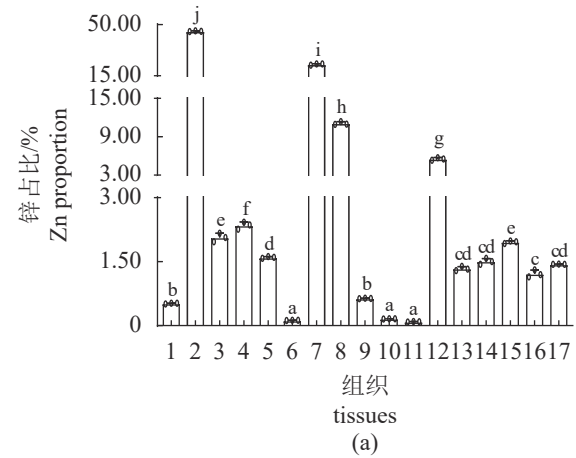


图 3 黄颡鱼不同组织中 Zn 含量的测定及分布

Fig. 3 Determination and distribution of Zn content in different tissues of *P. fulvidraco*

(3.29 mg/kg) 和中肠 (2.80 mg/kg) 次之, 在其他组织中含量较低, 其中眼睛中 Cu 含量最低, 为 0.19 mg/kg (图 5-b)。

2.7 黄颡鱼各组织中 Mn 含量的测定及分布

黄颡鱼 Mn 元素主要分布于骨骼、肌肉、鳃、尾鳍和皮肤中, 分别占全鱼总 Mn 含量的 87.34%、3.93%、1.68%、1.67% 和 1.59%, 而在其他组织中分布较少, 其中脾脏中 Mn 分布最低, 只占全鱼总 Mn 含量的 0.02% (图 6-a)。

Mn 元素在骨骼 (6.42 mg/kg) 中含量最高, 尾鳍 (3.96 mg/kg)、前肠 (1.09 mg/kg)、肝脏 (0.88 mg/kg) 和鳃 (0.83 mg/kg) 中次之, 在其他组织中含量较低, 其中脂肪中 Mn 含量最低, 为 0.07 mg/kg (图 6-b)。

2.8 黄颡鱼各组织中 Se 含量的测定及分布

黄颡鱼 Se 元素主要分布于肌肉、骨骼、皮肤、

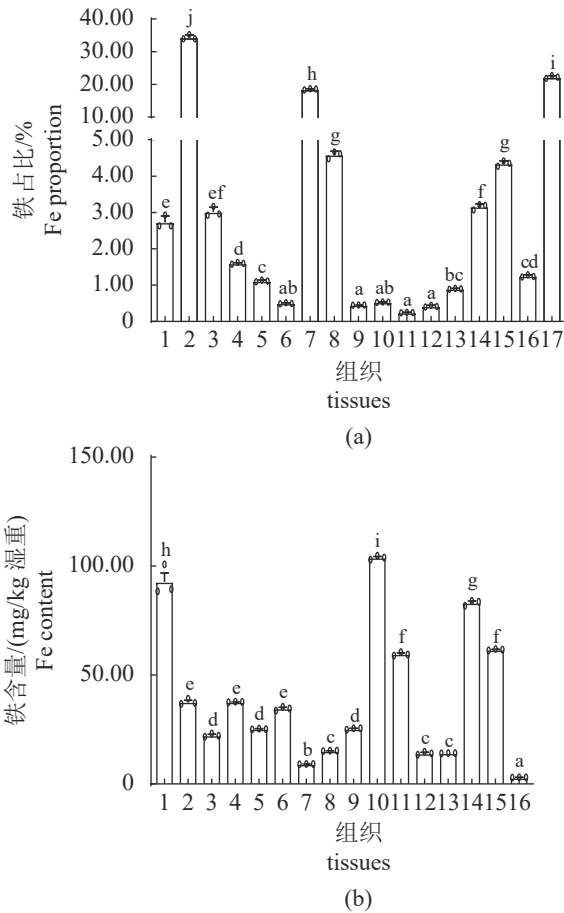


图 4 黄颡鱼不同组织中 Fe 含量的测定及分布

Fig. 4 Determination and distribution of Fe content in different tissues of *P. fulvidraco*

肝脏和鳃中, 分别占全鱼总 Se 含量的 36.6%、29.53%、7.25%、5.55% 和 5.29%, 而在其他组织中分布较少, 其中心脏中 Se 分布最低, 只占全鱼总 Se 含量的 0.37% (图 7-a)。

Se 元素在脾脏 (0.67 mg/kg) 中含量最高, 肝脏 (0.64 mg/kg)、肾脏 (0.63 mg/kg) 和前肠 (0.62 mg/kg) 次之, 在其他组织中含量较低, 脂肪组织中 Se 含量最低, 为 0.07 mg/kg (图 7-b)。

3 讨论

矿物元素与动物的生长、发育、营养代谢和健康状况有关, 常存在于细胞内、外液中, 与蛋白质一起调节细胞膜的通透性、维持渗透压、酸碱平衡等生理活动。本研究通过对黄颡鱼不同组织中矿物元素含量进行测定, 发现不同矿物元素在各组织具有不同的分布特征, 可能与这些元素在特定组织中所具有的重要生理作用直接相关, 为后续不同组织中多种矿物元素生理作用的研究

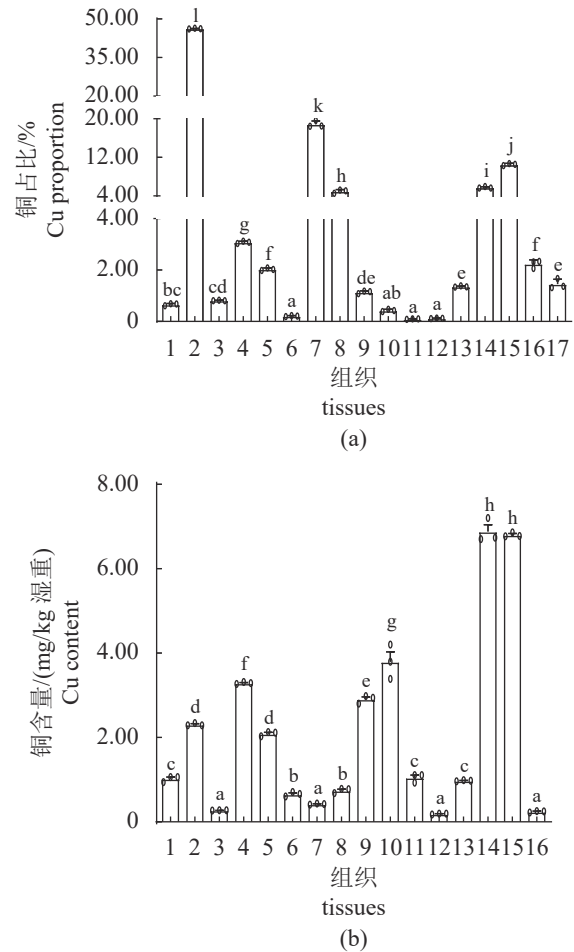


图 5 黄颡鱼不同组织中 Cu 含量的测定及分布

Fig. 5 Determination and distribution of Cu content in different tissues of *P. fulvidraco*

奠定了基础。

Ca 参与骨骼的形成, 在维持酸碱平衡中起到重要作用, 此外 Ca 还参与肌肉收缩、血液凝固、神经冲动传递, 渗透压调节和多种酶促反应过程^[13]。本研究发现, 黄颡鱼全鱼中 Ca 的含量主要分布在骨骼中, 而且在黄颡鱼尾鳍、骨骼和鳃中含量较高, 这主要是因为 Ca 能够促进骨骼的形成和矿化, 在水生动物骨骼构造中起着重要作用^[14]。

Mg 除了参与鱼类的骨骼形成外, 还是很多酶, 如磷酸转移酶、脱羧酶和酰基转移酶等的激活剂。本研究发现, Mg 主要分布于骨骼和肌肉中, 其中在黄颡鱼骨骼和尾鳍中含量最高, 表明 Mg 是黄颡鱼骨骼的重要组成成分。相似的研究表明, Mg 是脊椎动物预防骨骼畸形所必需的最重要的微量元素之一^[15]。综上, 黄颡鱼的 Ca 和 Mg 大量分布于骨骼中, 参与骨骼的形成等生理活动。

Zn 是体内 100 多种酶的组成成分或激活因子,

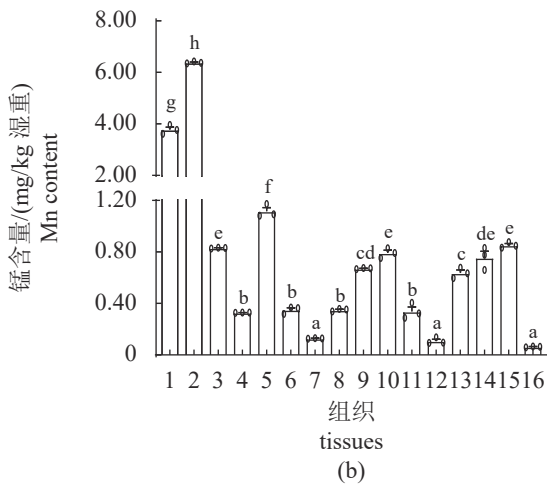
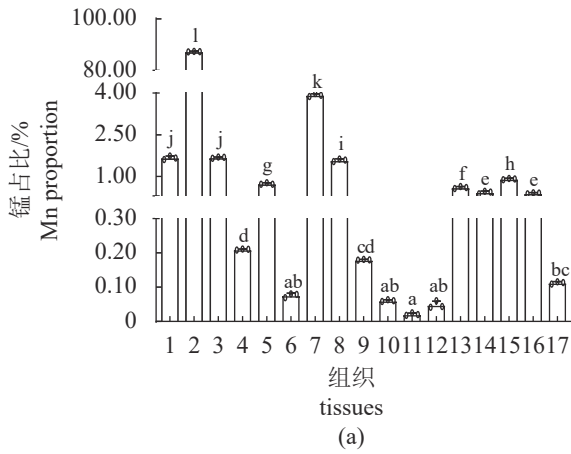


图 6 黄颡鱼不同组织 Mn 含量的测定及分布

Fig. 6 Determination and distribution of Mn content in different tissues of *P. fulvidraco*

参与蛋白质的合成以及脂肪和糖的代谢, 对激素合成分泌、生殖发育、免疫系统的维持起着举足轻重的作用。本研究发现, Zn 主要分布在骨骼、肌肉、皮肤和眼睛中。Sun 等^[16]的研究指出, 淡水鱼类的 Zn 含量范围为 10~100 mg/kg, 这与本研究中全鱼 Zn 含量的结果相似。本研究发现, 黄颡鱼眼睛中 Zn 离子含量最高, 表明 Zn 可能与视力相关功能有一定的关系。相似的研究指出, Zn 是视网膜内 V_A-还原酶的活性成分, 这种酶与视黄醛的合成有直接关系, 进而影响动物的正常视力和暗视力^[10]。而且鳟和鲑的白内障和眼球突出已被报道与 Zn 缺乏有关^[17]。除此以外, 与袁建明^[18]的研究结果类似的是, Zn 在骨骼中的含量也较高, 表明 Zn 可能参与骨细胞核酸和蛋白质代谢, 影响骨的生成。已有的研究还报道了肠道中的 Zn 含量很高^[19], 表明肠道是 Zn 的主要吸收和贮存场所。此外, Wu 等^[20]的研究发现, 正常饲料 Zn 浓度下,

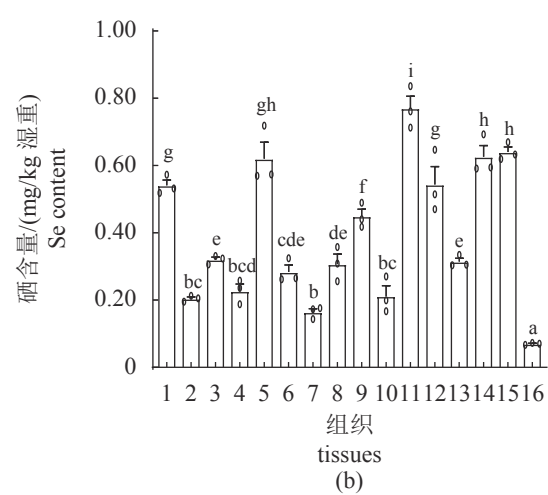
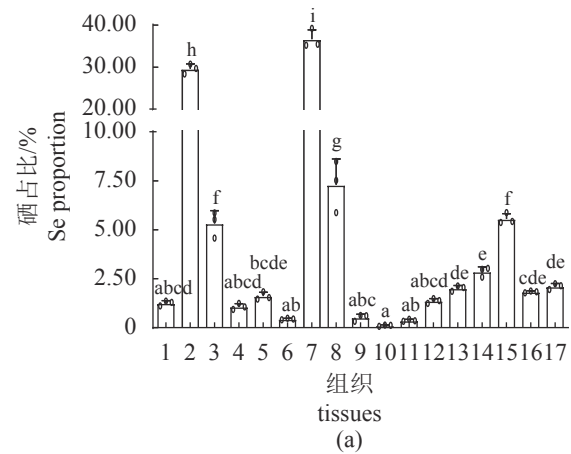


图 7 黄颡鱼不同组织 Se 含量的测定及分布

Fig. 7 Determination and distribution of Se content in different tissues of *P. fulvidraco*

黄颡鱼肠道的 Zn 含量与本研究结果相似。表明 Zn 在鱼体中不仅以结构性成分参与骨骼的形成, 同时还与视力相关功能具有密切的联系。

Fe 参与血红素分子的合成, 在氧气运输、电子传递和细胞增殖中起着核心作用, 是人体最重要的营养素之一, 对生物的生命和健康具有更直接和更重要的作用^[21]。本研究结果发现, Fe 主要分布在骨骼、血液和肌肉中。此外血液中的 Fe 含量最高, 可能是血红蛋白中含有较高的 Fe 的缘故, 这表明了 Fe 与机体氧气的运输以及造血功能的维持有一定的关系^[22]。心脏作为血液循环的中枢系统, 其 Fe 含量也非常高, 可能是含有丰富的细胞色素 C 还原酶和线粒体等缘故, 与本研究结果相似^[10]。本研究还发现黄颡鱼的造血、免疫器官, 如脾脏和肾脏中也含有大量的 Fe, 远超过全鱼中的 Fe 含量。相似的研究表明, 异育银鲫以及黄颡鱼中的脾脏和肾脏中也含有大量的 Fe, 可能是因

为血红蛋白主要在鱼类脾脏的淋巴髓质组织中形成^[11-12]。肝脏作为鱼体代谢的中心器官, 不仅是铁调素合成的场所, 也是铁蛋白的储存场所, 其中也还含有大量的 Fe, 与本研究结果相似^[23]。因此, Fe 在鱼体中主要作为功能性物质的组成成分参与血红蛋白的合成, 进而发挥氧气运输、造血等功能。

Cu 具有广泛的生物学效应, 与动物的生长性能、繁殖以及免疫力有密切的关系。Cu 的缺乏会对动物的神经系统、造血功能以及营养代谢造成影响。本研究结果表明, Cu 主要分布在骨骼、肌肉、肝脏、肾脏和皮肤中。而且, Cu 在黄颡鱼肾脏和肝脏中含量最高, 分别为 6.88 和 6.80 mg/kg。相关研究表明 Cu 参与机体免疫系统的维持, Cu 缺乏会导致白细胞介素 2 减少, 抑制 T 细胞的增殖并影响免疫功能^[24]。Zhong 等^[25]研究发现, 黄颡鱼肝脏中 Cu 含量较高, 且随着饲料 Cu 的添加而上升, 表明肝脏作为储存 Cu 的主要器官, 参与 Cu 稳态的调控。除此以外, 蒋蓉^[12]发现 Cu 在黄颡鱼心脏中也有较高的含量, 这与本研究结果一致。综上, Cu 在鱼体中主要存在于肝脏和肾脏中, 因此对免疫系统、造血及抗氧化功能等的维持具有重要意义。

Mn 是保持脊椎动物正常生长、大脑功能、生殖性能和预防骨骼畸形所必需的重要微量元素之一^[26]。本研究结果表明, 黄颡鱼各组织都有 Mn 的蓄积, 主要分布在骨骼、肌肉、鳃、尾鳍和皮肤中。同时, Mn 在骨骼中的含量最高, 为 6.38 mg/kg, 表明鱼类的骨骼系统比其他组织器官有更高的 Mn 需求量, 与其他研究结果相似^[12]。Mn 元素是骨骼的重要成分, 参与构成骨骼基质硫酸软骨素的形成, 而硫酸软骨素是骨有机质-黏多糖的组成部分, 缺 Mn 还会导致骨畸形, 因此对骨骼的生长发育起着非常重要的作用^[18]。Lv 等^[6]的研究表明, Mn 在黄颡鱼肠道中的含量较高, 而在肌肉组织中含量较低, 这与本研究结果相似。因此, Mn 在鱼体中主要作为结构性成分参与骨骼的形成。

Se 是一种重要的微量元素, 在脊椎动物体内的抗氧化防御、新陈代谢、炎症调节和甲状腺激素的产生中发挥着重要作用^[27]。本研究结果表明, 黄颡鱼 Se 集中分布在肌肉、骨骼、皮肤、肝脏和鳃中。值得注意的是, 脾脏、肾脏和肝脏作为机体重要的免疫器官, Se 在这些器官中的含量较高, 可能是这些器官需要较高的 Se 浓度来维持机体免

疫系统的正常运作。相关研究表明, 缺 Se 会导致鲤 (*Cyprinus carpio*) 幼鱼免疫力低下等一系列功能障碍, 最终导致疾病的发生, 通过补 Se 可有效提高机体免疫水平^[28]。此外, 肠道中含有较高的 Se 含量, 表明肠道是黄颡鱼 Se 的主要贮存场所。相似的, Zhang 等^[29]发现黄颡鱼肠道 Se 含量随着饲料 Se 含量增加而上升, 表明肠道对 Se 有一定的积累作用。Se 主要富集在鱼体的免疫组织中, 并对免疫相关功能及抗氧化具有重要作用。

4 结论

本研究采用 ICP-MS 对黄颡鱼不同组织中 7 种矿物元素的含量进行了分析, 结果表明, 黄颡鱼体内含有丰富的必需的人体必需的 Ca、Mg、Cu、Fe、Zn、Mn 和 Se 等矿物元素, 而且在不同组织中的含量存在较大差异。实验结果为深入研究黄颡鱼矿物元素营养代谢及其鱼肉品质的评价提供了重要基础。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Baker A J, Mooney A, Hughes J, *et al.* Mesangial cell apoptosis: the major mechanism for resolution of glomerular hypercellularity in experimental mesangial proliferative nephritis[J]. *The Journal of Clinical Investigation*, 1994, 94(5): 2105-2116.
- [2] Wei C C, Wu K, Gao Y, *et al.* Magnesium reduces hepatic lipid accumulation in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) and modulates lipogenesis and lipolysis via PPARA, JAK-STAT, and AMPK pathways in hepatocytes[J]. *The Journal of Nutrition*, 2017, 147(6): 1070-1078.
- [3] Song C C, Wu L X, Chen G H, *et al.* Six members of SLC30A/ZnTs family related with the control of zinc homeostasis: characterization, mRNA expression and their responses to dietary ZnO nanoparticles in yellow catfish[J]. *Aquaculture*, 2020, 528: 735570.
- [4] Chen G H, Song C C, Pantopoulos K, *et al.* Mitochondrial oxidative stress mediated Fe-induced ferroptosis via the NRF2-ARE pathway[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2022, 180: 95-107.
- [5] Song C C, Pantopoulos K, Chen G H, *et al.* Iron increases lipid deposition via oxidative stress-mediated mitochondrial dysfunction and the HIF1 α -PPAR γ pathway[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2022,

- 79(7): 394.
- [6] Lv W H, Zhao T, Pantopoulos K, *et al.* Manganese-induced oxidative stress contributes to intestinal lipid deposition via the deacetylation of PPAR γ at K339 by SIRT1[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2022, 37(7-9): 417-436.
- [7] Zhao T, Lv W H, Hogstrand C, *et al.* Sirt3-Sod2-mROS-mediated manganese triggered hepatic mitochondrial dysfunction and lipotoxicity in a freshwater teleost[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 8020-8033.
- [8] Clark L C, Combs G F Jr, Turnbull B W, *et al.* Effects of selenium supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin. A randomized controlled trial. Nutritional Prevention of Cancer Study Group[J]. *JAMA*, 1996, 276(24): 1957-1963.
- [9] Mueller A S, Pallauf J. Compendium of the antidiabetic effects of supranutritional selenate doses. *In vivo* and *in vitro* investigations with type II diabetic *db/db* mice[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2006, 17(8): 548-560.
- [10] 郭建林. Fe、Cu、Mn、Zn 对异育银鲫生长、生理机能及器官微量元素含量的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- Guo J L. Effect of Fe、Cu、Mn、Zn on growth, physiological function, content of trace elements in organs of *Carassius auratus gibelio*[D]. Suzhou: Soochow University, 2007 (in Chinese).
- [11] 萧培珍. 日粮铁、锌补充量对异育银鲫生长、生理机能及器官中微量元素含量的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- Xiao P Z. Effect of dietary iron and zinc supplement on growth performance, physiological function and the trace element concentration of the different organs in *Carassius auratus gibelio*[D]. Suzhou: Soochow University, 2007 (in Chinese).
- [12] 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 (in Chinese).
- [13] 赵明明, 袁野, 金敏, 等. 饲料不同钙磷比对三疣梭子蟹幼蟹生长性能、矿物质沉积和能量代谢的影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(10): 1677-1691.
- Zhao M M, Yuan Y, Jin M, *et al.* Influence of dietary calcium to phosphorus ratio on growth, minerals bioaccumulation and energy metabolism in juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(10): 1677-1691 (in Chinese).
- [14] Beattie J H, Avenell A. Trace element nutrition and bone metabolism[J]. *Nutrition Research Reviews*, 1992, 5(1): 167-188.
- [15] 梁键钧. 草鱼幼鱼的矿物质营养研究 [D]. 广州: 中山大学, 2012.
- Liang J J. Mineral nutrition of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2012 (in Chinese).
- [16] Sun L T, Jeng S S. Comparative zinc concentrations in tissues of common carp and other aquatic organisms[J]. *Zoological Studies*, 1998, 37(3): 184-190.
- [17] Grahn B H, Paterson P G, Gottschall-Pass K T, *et al.* Zinc and the eye[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2001, 20(2): 106-118.
- [18] 袁建明. 饲料 Cu、Mn 补充量对异育银鲫生长、部分生理机能及器官中微量元素含量的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- Yuan J M. Effect of dietary Cu and Mn supplement on growth performance, physiological function and the trace element concentration of the different organs in *Carassius auratus gibelio*[D]. Suzhou: Soochow University, 2008 (in Chinese).
- [19] Knox D, Cowey C B, Adron J W. Effects of dietary zinc intake upon copper metabolism in rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *Aquaculture*, 1984, 40(3): 199-207.
- [20] Wu K, Luo Z, Hogstrand C, *et al.* Zn stimulates the phospholipids biosynthesis via the pathways of oxidative and endoplasmic reticulum stress in the intestine of freshwater teleost yellow catfish[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(16): 9206-9214.
- [21] Galaris D, Barbouti A, Pantopoulos K. Iron homeostasis and oxidative stress: an intimate relationship[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 2019, 1866(12): 118535.
- [22] Pantopoulos K, Porwal S K, Tartakoff A, *et al.* Mechanisms of mammalian iron homeostasis[J]. *Biochemistry*, 2012, 51(29): 5705-5724.
- [23] Yiannikourides A, Latunde-Dada G O. A short review of iron metabolism and pathophysiology of iron disorders[J]. *Medicines*, 2019, 6(3): 85.
- [24] Percival S S. Copper and immunity[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1998, 67(5S): 1064-1068.
- [25] Zhong C C, Zhao T, Hogstrand C, *et al.* Copper (Cu) induced changes of lipid metabolism through oxidative stress-mediated autophagy and Nrf2/PPAR γ

- pathways[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2022, 100: 108883.
- [26] Musharraf M, Khan M A. Dietary manganese requirement of fingerling Indian major carp, *Labeo rohita* (Hamilton) estimated by growth, tissue manganese concentration and hepatic manganese-superoxide dismutase activity[J]. *Aquaculture*, 2021, 540: 736734.
- [27] Xu X J, Zhang D G, Zhao T, *et al.* Dietary selenium sources differentially regulate selenium concentration, mRNA and protein expression of representative selenoproteins in various tissues of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *British Journal of Nutrition*, 2022, 127(4): 490-502.
- [28] 汪开毓, 彭成卓, 金明昌, 等. 鲤硒缺乏的病理学[J]. 水产学报, 2009, 33(1): 103-111.
- Wang K Y, Peng C Z, Jin M C, *et al.* Pathology of selenium deficiency in common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(1): 103-111 (in Chinese).
- [29] Zhang D G, Zhao T, Xu X J, *et al.* Dietary marginal and excess selenium increased triglycerides deposition, induced endoplasmic reticulum stress and differentially influenced selenoproteins expression in the anterior and middle intestines of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(4): 535.

Distribution and contents of mineral elements in different tissues of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)

SONG Changchun , LIU Tao , ZHONG Chongchao , TAN Xiaoying , ZHANG Dianguang ,
LIU Lulu , LEI Xijun , LUO Zhi *

(Fishery College, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) has good taste and nutritional value, and can provide the necessary mineral elements for the human body. In order to explore the content of mineral elements in different tissues, the experiment use the *P. fulvidraco* as the object. The distribution and content of calcium (Ca), magnesium (Mg), zinc (Zn), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and selenium (Se) were determined by flame atomic absorption spectrometry in 18 tissues of *P. fulvidraco* (heart, liver, brain, spleen, kidney, muscle, fat, fore-intestine, mid-intestine, eyes, gill, tail fin, swim bladder, bone, stomach, skin, blood and whole fish). The results showed that Ca accounted for a higher proportion in bone, gill, tail fin and muscle, and the Ca content was the highest in tail fin and bone and the lowest in fat; Mg accounted for a higher proportion in bone and muscle, and the Mg content was highest in bone and tail fin and the lowest in eyes; Zn had a higher proportion in the bone, muscle, skin and eye, and the Zn content was the highest in eyes and the lowest in fat tissue; Fe had a higher proportion in the bone, blood and muscle, and the Fe content was the highest in blood and the lowest in fat; Cu had a higher proportion in bone, muscle and liver, and the Cu content was the highest in kidney and liver, while the lowest in fat and eyes; Mn had a higher proportion in bone and muscle, and the Mn content was the highest in bone and tail fin and the lowest in eyes and fat; Se had a higher proportion in muscle, bone, skin, and liver, and the Se content was highest in spleen, liver, kidney, and fore-intestine, and the lowest in muscle and fat; The present study used ICP-MS to explore the distribution and content of mineral elements (Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, Mn and Se) in different tissues of *P. fulvidraco*, which provided good basis for determining the nutritional value of mineral elements in *P. fulvidraco*, and also has important significance for related research of mineral elements in other fishes.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; mineral elements; tissue distribution; nutrient composition; evaluation of nutrition value

Corresponding author: LUO Zhi. E-mail: luozhi99@mail.hzau.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32030111, 32220103013)