

越冬期养殖草鱼肝胰脏颜色与脂肪及矿物质含量间的关系

黄春红^{1,2}, 李嘉丽¹, 类延菊¹, 谢中国¹

(1. 湖南文理学院生命与环境科学学院, 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 动物学湖南省高校重点实验室, 湖南常德 415000; 2. 长沙理工大学化学与生物工程学院, 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南长沙 410004)

摘要: 为明确草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 肝胰脏颜色与肝脂肪及矿物质沉积量间的关系, 对越冬期草鱼暗红肝、花肝、白肝、黄肝 4 种不同颜色肝胰脏中水分、脂肪和 12 种矿物质含量进行了检测与分析。结果表明, 越冬期草鱼暗红肝、花肝、白肝、黄肝中平均水分质量分数依次为 77.78%、70.98%、67.91%、64.01%, 平均脂肪质量分数分别为 2.06%、2.85%、4.24%、5.28%, 且 4 种颜色草鱼肝胰脏中水分和脂肪质量分数差异显著 ($P<0.05$); 相对暗红肝, 花肝、白肝和黄肝中钙 (Ca)、铬 (Cr)、锌 (Zn)、硒 (Se) 质量分数显著上升 ($P<0.05$); 花肝仅铜 (Cu) 和砷 (As) 的质量分数低于暗红肝, 白肝仅镁 (Mg)、铁 (Fe)、Cu 质量分数低于暗红肝, 黄肝则所有被检矿物质均高于暗红肝。研究表明, 越冬期草鱼肝胰脏脂肪沉积较少, 但随着肝颜色由暗红肝变成花肝、白肝与黄肝, 肝中水分含量依次减少, 脂肪沉积量则依次增加; 相对于脂肪质量分数较低的暗红肝, 脂肪质量分数相对较高的其他颜色草鱼肝胰脏中 Ca、Cr、Zn、Se 质量分数显著上升 ($P<0.05$)。

关键词: 草鱼; 肝胰脏; ICP-AES; 矿物元素

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Relationship of hepatopancreas colours with lipid and mineral contents in cultured grass carp during winter

HUANG Chunhong^{1,2}, LI Jiali¹, LEI Yanju¹, XIE Zhongguo¹

(1. Key Laboratory of Zoology in Hunan Higher Education, Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, College of Life and Environmental Science, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Food Processing of Aquatic Biotic Resources, School of Chemistry and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To clarify the relationship between hepatopancreas colours and lipid and mineral contents of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*), we analyzed the moisture, total lipid and minerals contents of hepatopancreas with different colours during winter. Results show that the average moisture and lipid contents in kermesinus, spot, white and yellow hepatopancreas were 77.78%, 70.98%, 67.91%, 64.01% and 2.06%, 2.85%, 4.24%, 5.28%, respectively, which were significantly different ($P<0.05$). Compared with kermesinus hepatopancreas, the Ca, Cr, Zn and Se contents in spot, white and yellow hepatopancreas all increased significantly ($P<0.05$). Cu and As contents in spot hepatopancreas, and Mg, Fe, Cu contents in white hepatopancreas were lower than those in kermesinus hepatopancreas. However, all the detected minerals in yellow hepatopancreas were higher than those in kermesinus hepatopancreas. Briefly, there was less lipid in hepatopancreas of grass carp during winter, but when the hepatopancreas colours changed

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-05-20

资助项目: 湖南省科技重大专项 (2017NK1031); 湖南省教育厅创新平台开放基金 (17K065); 湖南文理学院博士科研启动基金 (16BSQD46); 中央引导地方科技发展专项基金 (2017CT5013); 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心开放基金 (L2016GCZX05)

作者简介: 黄春红 (1978—), 女, 博士, 副教授, 从事水产动物营养与生理研究。E-mail: chunhong0158@sina.com

from kermesinus to spot, white and yellow, the moisture contents gradually decreased but the lipid gradually increased. Compared with kermesinus hepatopancreas that had lower lipid content, the contents of Ca, Cr, Zn and Se in hepatopancreas with the other colours which had higher lipid contents significantly increased ($P<0.05$).

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; hepatopancreas; inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy; minerals

草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 为草食性鱼类, 2017 年中国草鱼养殖产量已达 534.56×10^4 t^[1], 居我国淡水鱼之首。由于当前草鱼主要为人工养殖, 饲料成为草鱼高密度养殖条件下的主要食物来源。但是, 高密度养殖模式以及饲料营养不平衡等容易引起草鱼肝胰脏肿大、肝脂过量沉积以及肝胰脏颜色变化等, 继而导致草鱼肝胰脏功能损伤^[2-4]。肝胰脏是鱼类消化系统的重要构成部分, 主要参与体内物质代谢和离子转运, 肝功能受水温、病菌、饲料营养水平等多种因素影响。近年来, 鱼类肝脂过量蓄积及肝功能变化受到了不少研究者的关注。已有研究对草鱼不同颜色肝胰脏脂肪含量或脂肪蓄积程度进行了分析和评价^[5], 也对饲料蛋白质、脂肪、碳水化合物水平及来源与草鱼肝胰脏脂肪蓄积之间的关系进行了探索^[6-8], 还对不同脂肪蓄积程度草鱼肝胰脏中脂肪酸组成及含量进行了检测和分析^[9]。但是, 对草鱼肝色异常变化的具体原因尚缺乏研究。

矿物质是鱼类的必需营养素, 饲料、养殖水体及底泥中各种矿物质的存在形式和含量等均可影响鱼类的生长和健康。目前, 有关矿物质对鱼类肝胰脏影响的研究中, 以水体和饲料中铜 (Cu)^[10]、铁 (Fe)^[11]、锌 (Zn)^[12]、硒 (Se)^[13] 等对鱼类肝胰脏功能的影响研究较多, 但主要集中在对其组织结构和抗氧化能力的影响方面。有关其他矿物质对草鱼肝胰脏功能的影响, 以及不同矿物质对草鱼肝胰脏颜色以及脂肪沉积等方面的影响研究较少。草鱼肝胰脏颜色发白、发黄等常被认为是肝脂过量蓄积导致的异常颜色和不正常现象^[5], 并被用作草鱼脂肪肝的初步诊断依据, 而草鱼脂肪肝的病理特征之一是贫血^[4]。许多矿物质, 如 Fe、Cu、钴 (Co) 等不仅参与动物体内的能量代谢, 还参与造血机能并影响肝功能。例如, 余飞苑等^[14] 发现持续高脂饮食能够引起脂代谢紊乱, 同时伴有矿物元素代谢紊乱, 且矿物元素代谢紊乱的程度与高脂饮食和脂肪代谢紊乱的持续时间关系密切。这表明动物肝脂沉积量与矿物质代谢之间存在联系。但有关草鱼肝胰脏的颜色、矿物质沉积量、脂肪沉积量这三者之间

的关系还缺少研究。本文研究了养殖草鱼肝胰脏颜色与脂肪及矿物质含量间的关系, 旨在为后继从矿物质角度探讨草鱼肝脂过量蓄积的分子机理奠定基础, 也可为改善草鱼的饲料配方并促进草鱼的健康养殖等提供参考。

1 材料与方法

1.1 草鱼肝胰脏

于 2018 年 1—2 月, 分别从湖南省常德市武陵区南坪岗乡渔场不同养殖户的养殖池塘中分 4 批随机采集养殖草鱼, 每批 10 尾, 平均体质量为 (2.18 ± 0.11) kg。不同养殖户投喂不同饲料企业生产的渔用配合饲料。将草鱼解剖, 记录肝胰脏颜色, 将肝胰脏按暗红肝、花肝、白肝和黄肝 (图 1) 分别装入不同样品袋中, -80 °C 冷藏。从不同颜色肝胰脏样品中各选择颜色最接近的 6 份样品, 用于水分、脂肪和矿物质的检测和分析。

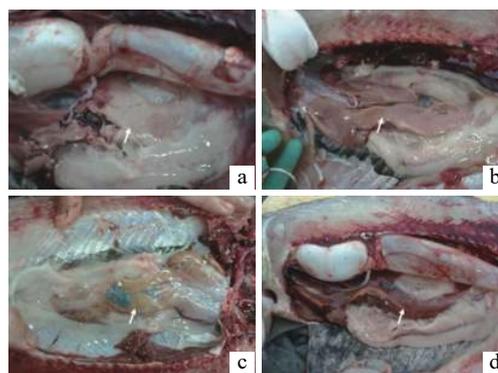


图1 草鱼不同颜色肝胰脏

a. 白肝; b. 花肝; c. 黄肝; d. 暗红肝; 图中箭头所指即为草鱼肝胰脏

Figure 1 Grass carp hepatopancreas with different colours

a. white hepatopancreas; b. spot hepatopancreas; c. yellow hepatopancreas; d. kermesinus hepatopancreas; the arrows refer to the hepatopancreas of grass carp.

1.2 药品、试剂

无水乙醚、硝酸、高氯酸等均为国产分析纯; 多元素混合标准液 (各矿物质元素质量浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 购于国家标准物质网; 实验用水为超纯水。

1.3 仪器与设备

真空冷冻干燥机 (LGJ-10, 北京四环科学仪器

厂)、电热鼓风干燥箱 (GFL-125, 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司)、电子天平 (BS124, 感量 ± 0.1 mg, 海精密仪器仪表有限公司)、超低温冰箱 (DW-86L388A, 海南赛乐敏生物科技有限公司)、超纯水仪 (ULUP- I, 西安优普仪器设备有限公司)、高速万能粉碎机 (FW100, 天津市泰斯特仪器有限公司)、ICP-AES 仪 [Optima 8300, 珀金埃尔默仪器 (上海) 有限公司]、电热恒温水浴锅 (HH-S4, 北京科伟永兴仪器有限公司)。

1.4 ICP-AES 仪器工作条件

等离子冷却气流为 $8.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 辅助气体流速为 $0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 雾化器流量为 $0.50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 功率为 1.30 kW , 观测高度为 15 mm , 观测方式为轴式。

1.5 样品制备与肝胰脏水分含量测定

从 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 超低温冰箱中取出肝胰脏样品, 称取后置于已称质量的洁净干燥铝盒中, 迅速于预冷了 30 min 的真空冷冻干燥机 ($-46 \text{ }^\circ\text{C}$) 中冷冻干燥 24 h 。取出样品, 先称质量, 以计算样品的水分含量; 再用高速万能粉碎机将干燥好的样品依次粉碎, 分装于样品袋中 (图 2), 并于干燥器中保存, 待测。

1.6 草鱼不同颜色肝胰脏总脂肪含量测定

参照 GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》^[15], 采用索氏提取法测定不同颜色肝胰脏样品

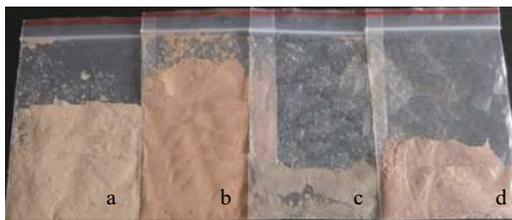


图2 已制备好的草鱼不同颜色肝胰脏样品

a. 白肝; b. 花肝; c. 黄肝; d. 暗红肝

Figure 2 Prepared samples of grass carp hepatopancreas with different colours

a. white hepatopancreas; b. spot hepatopancreas; c. yellow hepatopancreas; d. kermesinus hepatopancreas

中总脂肪含量。

1.7 草鱼不同颜色肝胰脏矿物元素含量测定

采用湿法消化法处理样品, 即准确称取约 0.3 g (精确至 0.1 mg) 已制备好的样品于消化管中, 向消化管中加入 10 mL 混合酸 [$V(\text{硝酸}) : V(\text{高氯酸}) = 4 : 1$], 于消化炉中消解。当消化管内液体变澄清和透明, 且管底仅剩约 $1\sim 2 \text{ mL}$ 消化液时, 关炉, 冷却; 向各管中加入 10 mL 超纯水, 加热赶酸; 将赶酸后的样液无损地转移到 100 mL 容量瓶中, 定容至刻度, 摇匀。用 $w=2\%$ 硝酸制备多元素混合标准工作液, 各元素标准系列梯度为 0.1 、 0.2 、 0.5 、 $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES) 测定标准溶液与待测溶液中钙 (Ca)、镁 (Mg)、Fe、铬 (Cr)、Zn、Cu、砷 (As)、锰 (Mn)、Se、汞 (Hg)、镉 (Cd)、铅 (Pb) 12 种矿物元素含量。

1.8 数据分析

采用 Excel 2010 软件对实验数据进行整理和计算, 结果以“平均值 \pm 标准差 ($\bar{X}\pm\text{SD}$)”表示; 采用 SPSS 19.0 软件对结果进行单因素 ANOVA 方差分析与 Duncan 多重比较, 显著性水平设为 0.05 。

2 结果

2.1 不同颜色草鱼肝胰脏水分和总脂肪质量分数

不同颜色草鱼肝胰脏水分和总脂肪质量分数均存在显著差异 ($P<0.05$, 表 1)。草鱼暗红肝、花肝、白肝和黄肝 4 种不同颜色肝胰脏中, 以暗红肝水分质量分数最高, 花肝、白肝和黄肝的水分质量分数依次明显降低。与暗红肝相比, 花肝、白肝和黄肝中总脂肪质量分数则均显著升高 ($P<0.05$), 分别为暗红肝脂肪质量分数的 1.38 、 2.06 和 2.56 倍。

2.2 不同颜色草鱼肝胰脏矿物元素质量分数

被检的 12 种矿物质中, 不同颜色草鱼肝胰脏均以 Ca 质量分数最高且差异显著 ($P<0.05$), 以暗红肝 Ca 质量分数最低, 花肝、白肝和黄肝均高于

表1 越冬期草鱼不同颜色肝胰脏水分和总脂肪质量分数 (鲜样)

Table 1 Moisture and total lipid contents in hepatopancreas with different colours of grass carp during winter (fresh sample) %

指标 indicator	暗红肝 kermesinus hepatopancreas	花肝 spot hepatopancreas	白肝 white hepatopancreas	黄肝 yellow hepatopancreas
水分 moisture	77.78 ± 1.30^a	70.98 ± 2.52^b	67.91 ± 1.56^c	64.01 ± 1.24^d
总脂肪 total lipid	2.06 ± 0.19^d	2.85 ± 0.17^c	4.24 ± 0.45^b	5.28 ± 0.31^a

注: 同行数据肩标字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

Note: Difference lowercase letters indicate significant difference between different colours hepatopancreas ($P<0.05$).

暗红肝,白肝最高;不同颜色草鱼肝胰脏中微量元素则以 Fe 质量分数最高,相对于暗红肝,白肝 Fe 质量分数明显降低,但黄肝 Fe 质量分数则显著上升 ($P<0.05$),花肝 Fe 质量分数与暗红肝相同(表 2)。不同颜色草鱼肝胰脏中均未检出 Pb、Hg 和 Cd,但均含有不同程度的 As,除花肝 As 质量分数与暗红肝接近外,白肝和黄肝中 As 质量分

数均显著上升 ($P<0.05$)。总体来看,与暗红肝相比,花肝、白肝和黄肝中的 Ca、Cr、Zn、Se 质量分数均显著上升;在检出的矿物元素中,花肝仅 Cu 和 As 的含量低于暗红肝,白肝仅 Mg、Fe、Cu 质量分数低于暗红肝,而黄肝中所有被检矿物质均高于暗红肝。

表2 越冬期草鱼不同颜色肝胰脏矿物元素质量分数(鲜样)

元素 mineral	暗红肝 kermesinus hepatopancreas	花肝 spot hepatopancreas	白肝 white hepatopancreas	黄肝 yellow hepatopancreas
钙 Ca	443.82±80.88 ^a	722.23±94.14 ^b	975.62±49.42 ^c	644.23±58.38 ^b
镁 Mg	225.44±10.81 ^b	230.92±30.04 ^b	170.23±15.32 ^a	299.43±15.62 ^c
铁 Fe	218.84±3.90 ^a	218.82±6.21 ^a	196.74±5.04 ^a	428.94±4.83 ^b
铬 Cr	12.18±2.06 ^a	22.86±2.49 ^c	25.58±1.42 ^d	18.00±1.52 ^b
锌 Zn	11.74±1.19 ^a	21.08±2.51 ^c	24.12±1.71 ^d	17.24±2.16 ^b
铜 Cu	13.38±2.16 ^b	2.39±0.68 ^a	4.70±0.90 ^a	25.22±4.36 ^c
砷 As	4.2±0.65 ^a	4.07±0.65 ^a	6.50±1.29 ^b	8.00±1.17 ^c
锰 Mn	0.26±0.56 ^a	3.13±0.71 ^{ab}	2.63±0.87 ^a	4.1±1.55 ^b
硒 Se	0.7±0.64 ^a	3.36±1.38 ^b	3.78±1.86 ^b	5.3±1.48 ^c
汞 Hg	-	-	-	-
镉 Cd	-	-	-	-
铅 Pb	-	-	-	-

注:同行数据不同肩标字母表示差异显著 ($P<0.05$),相同肩标字母表示差异不显著 ($P>0.05$); - 表示未检出

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$), while the same lowercase letters indicate no significant difference ($P>0.05$); - undetected

3 讨论

3.1 草鱼肝胰脏颜色与脂肪含量间的关系

田娟等^[5]将草鱼肝胰脏按颜色分为正常肝、花肝、发白肝和发黄肝 4 类,发现其成鱼肝胰脏脂肪含量会随水分含量降低而增加,且随着肝胰脏颜色由正常肝色转变成花肝、发白肝和发黄肝,肝内脂肪含量也随之明显递增;与本研究结果非常相似。但田娟等^[5]测得草鱼成鱼正常肝、花肝、发白肝和发黄肝内平均脂肪质量分数分别为 2.29%、6.83%、9.87% 和 13.41%,均明显高于本研究中相应颜色草鱼肝胰脏中的脂肪质量分数(2.06%、2.85%、2.24% 和 5.28%),即相同颜色的草鱼肝胰脏中脂肪质量分数存在较大差异。前者样品采集时间为 9—10 月,此时草鱼经过较长时间大量摄食配合饲料后,部分草鱼由于摄入的饲料能量营养素过剩^[16],

或因为饲料原料不当^[17],以及一些功能物质缺乏^[18-19]等导致肝内脂肪蓄积较多,进而使肝功能受损,并呈现出不同的颜色变化。本研究中样品采集时间为 1—2 月,此时草鱼正处于越冬期,草鱼因水温低停止摄食,肝内脂肪处于不断动员阶段,肝内脂肪含量较 9—10 月明显下降。养殖鱼类,如草鱼、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 等肝胰脏颜色变黄、变浅或变成花肝等,常被认为是肝胰脏脂肪过量蓄积的标志之一,且草鱼肝胰脏脂肪蓄积量超过 5% 及团头鲂肝胰脏脂肪质量分数超过 8.48% 即为肝脂过量蓄积或脂肪肝^[4-5, 20-21]。综上,草鱼和团头鲂的肝脂质量分数分别大于 5% 和 8.48% 时,其肝胰脏才会显现异常肝色。但是,相对于其他研究者 9—10 月高脂肪含量的异常颜色草鱼肝胰脏,本研究中 1—2 月越冬期低脂肪含量的

草鱼肝胰脏也呈现出异常肝色。越冬期草鱼脂肪含量较低的肝胰脏呈现出来的异常颜色极有可能与其前期已遭受过肝脂过量蓄积有关,且因脂肪过量蓄积导致的异常肝色一旦形成可能不会再因肝脂含量的下降而恢复至正常色,即草鱼肝色变化很可能不可逆转,但具体情况有待需深入研究。由此可见,肝胰脏颜色可以作为草鱼肝脂含量的定性评价指标,但仅适用于评价同一时期或相同季节的草鱼,而不适用于评价不同时期或不同季节。总之,同一时期或相同季节,草鱼随暗红肝色转变成花肝、发白肝和发黄肝色,其脂肪含量逐渐上升。

3.2 草鱼肝胰脏脂肪与矿物质含量间的关系

有关外源矿物质对水产动物肝脏的影响已有不少报道,如水体 Cr^{3+} 暴露可使金鱼肝脏遭受氧化损伤并损害肝功能^[22],而 $50\sim 150\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ Co^{2+} 暴露同样也会使金鱼肝脏内增加 $30\%\sim 66\%$ 的脂质过氧化产物,同时肝内超氧化物歧化酶和过氧化氢酶等抗氧化酶活性明显受到抑制^[23];水体 Cu 暴露可以增加鱼体内的脂肪沉积量^[23-25],由于水体 Cu 水平上升可能直接导致鱼肝中 Cu 含量增加,但本研究却发现草鱼肝脂含量并未随肝 Cu 含量的增加而上升; Ca 和 Cu 联合暴露则可影响黄颡 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的肝脂酶活性,同时会改变肝中 Cu 的沉积量,且相同 Cu 水平下,随着 Ca 的添加,肝受损程度会减轻^[26]; Hg 暴露也会影响草鱼肝胰脏功能,但 Hg 浓度不同对肝胰脏的影响程度也不同^[27]。当草鱼幼鱼饲料中添加较高水平 ($3.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的吡啶甲酸铬,相对于低质量分数组 ($0.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),草鱼体脂肪含量下降,表明高质量分数 Cr 饲料可降低草鱼肝脂沉积量,即一定范围内饲料 Cr 水平与草鱼肝脂含量间呈负相关^[28],这与本研究结果相反,本研究中肝脂含量高的草鱼肝胰脏中 Cr 含量也高;草鱼幼鱼饲料中 Zn 质量分数超过 $53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,草鱼体脂和肝脂含量均显著升高 ($P<0.05$)^[29],本研究中异常颜色草鱼肝胰脏脂肪及 Zn 含量也均高于正常颜色草鱼肝胰脏,表明草鱼肝胰脏脂肪沉积量增加以及颜色发生异常变化可能与饲料或水体中 Zn 的摄入量增加有关。高 $w(\text{Mg})$ 饲料 ($1\ 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 会降低草鱼的肝脏功能^[30],即草鱼的 Mg 摄入量一定程度上与其肝胰脏功能之间存在关联。综上所述,养殖水体和饲料中的矿物质水平会直接影响草鱼及其他鱼类的肝脂含量及肝功能。但是,目前有

关饲料或水体矿物质对养殖鱼类肝脂沉积的影响研究尚不全面,研究结果存在一定差异,外源矿物质对鱼类肝脂沉积的调控机制研究更是比较欠缺。虽然本研究发现越冬期较大规格草鱼脂肪含量较高的异常颜色肝胰脏中 Ca 、 Cr 、 Zn 、 Se 含量均显著高于脂肪含量较低的正常颜色肝胰脏,但有关这几种矿物质在非越冬期以及较小规格草鱼肝脂沉积中的作用还需深入研究。

4 结论

越冬期不同颜色草鱼肝胰脏中平均脂肪沉积量低于 5.5% 。肝胰脏颜色可以作为同一时期或相同季节草鱼肝脂含量定性评价的参考指标,即同一时期或相同季节的草鱼肝胰脏随着颜色由暗红色转变成花色、白色和黄色,肝中脂肪沉积量依次增加,水分含量则依次下降。相对于脂肪含量较低的暗红色草鱼肝胰脏,越冬期花色、白色、黄色等脂肪含量相对较高的肝胰脏中 Ca 、 Cr 、 Zn 、 Se 含量均显著上升。有关饲料和水中不同种类矿物质对草鱼肝脂沉积的影响值得深入研究,但要较为全面地了解草鱼肝胰脏脂肪与外源矿物质含量间的关系,还需对不同生长阶段以及不同季节的草鱼进行综合研究。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 45.
- [2] 雷晓中, 汪亮, 温周瑞, 等. 三种不同养殖模式对草鱼肝胰脏结构与功能的影响 [J]. 淡水渔业, 2015, 45(6): 59-62, 96.
- [3] 陈科全, 叶元土, 蔡春芳, 等. 饲料氧化鱼油对草鱼肝胰脏结构和功能的损伤 [J]. 水生生物学报, 2016, 40(4): 793-803.
- [4] LIN D, MAO Y Q, CAI F S. Nutritional lipid liver disease of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* (C. et V.) [J]. Chin J Oceanol Limn, 1990, 8(4): 363-373.
- [5] 田娟, 文华, 曾令兵, 等. 草鱼食用鱼不同颜色肝脏脂肪肝程度的判断 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2011, 37(5): 557-564.
- [6] 杨天俊, 陈彦良, 刘文舒, 等. 高脂饲料中添加绿原酸对草鱼生长性能和脂质代谢的影响 [J]. 动物营养学报, 2018, 30(8): 3219-3228.
- [7] 王一飞. 投喂蚕豆对草鱼脂质代谢的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 1.
- [8] TIAN J J, JI H, WANG Y F, et al. Lipid accumulation in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fed faba beans (*Vicia faba* L.) [J]. Fish Physiol Biochem, 2019, 45(2): 631-642.
- [9] 曹俊明, 关国强, 刘永坚, 等. 饲料蛋白质水平影响草鱼肝胰脏

- 脂肪酸组成[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1997, 36(5): 64-68.
- [10] TANG Q, FENG L, JIANG W, et al. Effects of dietary Copper on growth, digestive, and brush border enzyme activities and antioxidant defense of hepatopancreas and intestine for young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Biol Trace Elem Res, 2013, 155(3): 370-380.
- [11] 张丽. 铁对生长中期草鱼肉质, 抗氧化能力和免疫功能的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 24-31.
- [12] 伍云萍. 锌对生长中期草鱼肉质, 抗氧化能力和免疫功能的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 7-8.
- [13] 苏传福, 罗莉, 李芹, 等. 硒对草鱼抗氧化功能及组织结构的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2008, 33(5): 69-75.
- [14] 余飞苑, 刘浩宇, 刘锡仪. 高脂饮食对小鼠脂代谢和矿物元素代谢的影响[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(8): 1502-1504.
- [15] 汪安利, 祖晋锋, 时文强, 等. 白鲢鱼营养成分分析与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 2219-2224.
- [16] 汪开毓, 苗常鸿, 黄锦炉, 等. 投喂高脂饲料后草鱼主要生化指标和乙酰辅酶 A 羧化酶 1 mRNA 表达的变化[J]. 动物营养学报, 2012, 24(12): 2375-2383.
- [17] 陈科全, 叶元土, 蔡春芳, 等. 饲料中豆粕含量对草鱼肝胰脏结构和功能的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(7): 1873-1879.
- [18] 朱瑞俊, 李小勤, 谢骏, 等. 饲料中添加氯化胆碱对草鱼成鱼生长、脂肪沉积和脂肪代谢酶活性的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 527-535.
- [19] 吴春艳. 垂盆草提取物对草鱼脂肪肝模型药效作用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 29-38.
- [20] 刘猛, 叶元土, 蔡春芳, 等. 湖泊野生团头鲂健康评价指标体系的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 178-188.
- [21] LUSHCHAK O V, KUBRAK O I, LOZINSKY O V, et al. Chromium (III) induces oxidative stress in goldfish liver and kidney[J]. Aquat Tox, 2009, 93(1): 45-52.
- [22] KUBRAK O I, HUSAK V V, ROVENKO B M, et al. Cobalt-induced oxidative stress in brain, liver and kidney of goldfish *Carassius auratus*[J]. Chemosphere, 2011, 85(6): 983-989.
- [23] ZHU Q L, LUO Z, ZHUO M Q, et al. *In vitro* exposure to copper influences lipid metabolism in hepatocytes from grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Fish Physiol Biochem, 2014, 40(2): 595-605.
- [24] CHEN Q L, LUO Z, LIU X, et al. Effects of waterborne chronic copper exposure on hepatic lipid metabolism and metal-element composition in *Synechogobius hasta*[J]. Arch Environ Contam Tox, 2013, 64(2): 301-315.
- [25] CHEN Q L, LUO Z, PAN Y X, et al. Differential induction of enzymes and genes involved in lipid metabolism in liver and visceral adipose tissue of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* exposed to Copper[J]. Aquat Toxicol, 2013, 136(3): 72-78.
- [26] CHEN Q L, LUO Z, ZHENG J L, et al. Protective effects of calcium on copper toxicity in *Pelteobagrus fulvidraco*: copper accumulation, enzymatic activities, histology[J]. Ecotox Environ Safe, 2012, 76(2): 126-134.
- [27] 孔祥会, 郭彦玲, 刘占才, 等. 汞离子暴露下草鱼肝胰脏过氧化氢酶活性动态变化[J]. 淡水渔业, 2007, 37(4): 34-36.
- [28] LIU T L, HUA W, MING J, et al. Effect of dietary chromium picolinate on growth performance and blood parameters in grass carp fingerling, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Fish Physiol Biochem, 2010, 36(3): 565-572.
- [29] LIANG J J, YANG H J, LIU Y J, et al. Dietary zinc requirement of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on growth and mineralization[J]. Aquacult Nutr, 2018, 18(4): 380-387.
- [30] 汪福保, 罗莉, 文华, 等. 镁对草鱼生长、形体、肝功能和糖代谢的影响[J]. 淡水渔业, 2011, 41(2): 57-62, 68.