

文章编号: 1000-0615(2019)10-2268-10

DOI: 10.11964/jfc.20190911943

饲料中添加氯化钠对草鱼生长性能和肌肉品质的影响

冀东^{1,2,3}, 王璞¹, 程卓¹, 李小勤^{1,2,3}, 冷向军^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 为研究饲料中添加氯化钠对草鱼生长性能和肌肉品质的影响, 在基础饲料中分别添加0(对照组)、10、20、30和40 g/kg氯化钠, 配制成5组饲料, 饲养平均体质量为(12.26±0.03) g的草鱼60 d。结果显示, 添加10和20 g/kg氯化钠对草鱼增重率和饲料系数没有显著影响, 但30和40 g/kg氯化钠添加组的增重率显著低于对照组, 饲料系数显著升高。各组肌肉水分、粗蛋白与粗脂肪含量没有显著差异, 但肌肉灰分含量随氯化钠添加量的增加而升高; 与对照组相比, 各氯化钠添加组的肌肉蒸失水率、离心失水率和冷冻失水率(除10 g/kg氯化钠添加组外)显著增加, 10和20 g/kg氯化钠添加组的肌肉总游离氨基酸含量显著升高, 20、30和40 g/kg氯化钠添加组的肌肉游离谷氨酸、天冬氨酸含量显著降低; 各氯化钠添加组的肌肉硬度及30、40 g/kg氯化钠添加组的肌肉咀嚼性均显著低于对照组, 而肌肉弹性和回复性无显著差异; 在肠道组织学方面, 30和40 g/kg氯化钠添加组的绒毛高度和绒毛宽度较对照组显著降低, 各氯化钠添加组的肌层厚度显著增加。研究表明, 在饲料中添加10~40 g/kg氯化钠, 对草鱼幼鱼的生长性能和肌肉品质没有改善作用。

关键词: 草鱼; 氯化钠; 生长性能; 肌肉品质

中图分类号: S 963

文献标志码: A

钠、钾、氯是生物体中最丰富的电解质, 主要分布在体液和软组织中。钠和氯是细胞外液中主要的阳离子和阴离子, 钾则是细胞内液的主要阳离子之一。其作用是维持渗透压和酸碱平衡, 控制代谢水平和营养物质进入细胞等。淡水鱼主要通过鳃和肾脏进行渗透压调节, 其体内的钠、氯离子主要从外界环境吸收, 同时由尿液中排出一部分, 以保持平衡。钠离子除了调节渗透压和维持肌肉兴奋性外, 还参与糖和氨基酸的主动转运, 钠离子、钾离子和氯离子均参与体内的酸碱平衡调节, 并构成胃的酸性和肠内的碱性环境。

在畜禽饲料中通常需补充氯化钠, 而在水产饲料中是否需要补充氯化钠, 则没有定论。研究表明, 随着饲料中氯化钠含量升高, 虹鳟

(*Oncorhynchus mykiss*)存活率和饲料利用率提高, 抵抗盐胁迫的能力增强^[1]; 在饲料中添加6 g/kg食盐喂养斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*), 提高了饲料利用率, 改善了鱼的体型、体色, 提高了商品价值^[2]。也有研究发现, 在大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*)幼鱼饲料中添加15 g/kg食盐, 其增重率降低了7%^[3]; 在大西洋鲑(*Salmo salar*)的饲料中补充80和120 g/kg无机盐, 其增重率显著降低, 饲料系数升高^[4]。

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是我国养殖产量最大的鱼类, 2017年全国产量为534.5万t^[5]。研究表明, 在一定盐度(7.5)水体中养殖草鱼, 可改善其肌肉品质^[6]。在饲料中补充食盐, 也可以改善凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的肌肉品质^[7]。目前, 在饲料中补充氯化钠对草鱼生长性能和

收稿日期: 2019-09-05 修回日期: 2019-09-29

资助项目: 国家自然科学基金(31772858); 卓越农林人才培养计划(A1-0201-00-0001)

通信作者: 冷向军, E-mail: xjleng@shou.edu.cn

肌肉品质的研究尚未见相关报道。故本实验旨在研究饲料中添加不同水平氯化钠对草鱼生长性能、肌肉品质和肠组织形态结构的影响, 为氯化钠在草鱼饲料中的合理使用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料与实验设计

在基础饲料中分别添加0 (对照组)、10、20、30和40 g/kg氯化钠, 配制成5组饲料, 通过调整米糠、麸皮、豆粕的含量来平衡饲料组成。饲料原料经粉碎、过筛(40目)后, 用混匀机(GH200, 上海展望机电设备有限公司)混匀。用

环模式颗粒饲料机(HKJ-218, 无锡市华明机器厂)制成粒径3 mm的沉性颗粒饲料(制粒温度80~85 °C), 密封储藏于阴凉干燥处备用。饲料原料购于浙江粤海饲料公司, 氯化钠购于国药集团[GR(沪试), ≥99.8%]。实验饲料的配方组成及营养成分含量见表1, 氨基酸组成见表2。

1.2 实验用鱼与饲养管理

实验用鱼购买于上海青浦水产养殖场。养殖实验开始前, 使用基础饲料饲喂草鱼7 d, 以适应饲料和养殖环境。选取300尾大小均匀、体质健康的草鱼[初始均重(12.26±0.03) g]随机分配到15个网箱(1.5 m×1.5 m×1.2 m)中, 每个网箱

表 1 实验饲料配方组成及营养成分含量 (g/kg, 风干重)

Tab. 1 Ingredients and proximate composition of experimental diets (g/kg, air dry basis)

项目 items	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
原料^a ingredients					
鱼粉 fish meal	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
豆粕 soybean meal	180.0	185.0	190.0	195.0	200.0
棉粕 cottonseed meal	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0
菜粕 rapeseed meal	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
米糠 rice bran	100.0	92.5	85.0	77.5	70.0
麸皮 wheat bran	100.0	92.5	85.0	77.5	70.0
次粉 wheat middling	220.0	219.6	219.2	218.9	218.5
豆油 soybean oil	10.0	10.4	10.8	11.1	11.5
氯化钠 sodium chloride	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
维生素预混料 ^b vitamin premix	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
矿物元素预混料 ^c mineral premix	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
总计 total	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0
常规成分 proximate composition					
粗蛋白 crude protein	307.5	307.5	307.3	307.6	307.2
粗脂肪 crude lipid	27.7	27.8	27.8	27.7	27.7
灰分 ash	50.6	59.8	69.0	78.3	87.5
水分 moisture	89.0	89.3	89.5	89.6	89.8

注: a. 饲料原料购于浙江粤海饲料公司, 原料蛋白质含量为鱼粉 630 g/kg, 豆粕 442 g/kg, 棉粕 500 g/kg, 菜粕 377 g/kg, 次粉 169 g/kg, 脱脂米糠 143 g/kg, 麸皮 151 g/kg; b. 维生素预混料(mg或IU/kg饲料): VA 10 000 IU, VD₃ 3 000 IU, VE 150 IU, VK₃ 12.17 mg, VB₁ 20 mg, VB₂ 20 mg, VB₃ 100 mg, VB₆ 22 mg, VB₁₂ 0.15 mg, VC 1 000 mg, 生物素 0.6 mg, 叶酸 8 mg, 肌醇 500 mg; c. 矿物元素预混料(mg/kg饲料): 碘 1.5 mg, 钴 0.6 mg, 铜 3 mg, 铁 63 mg, 锌 89 mg, 锰 11.45 mg, 硒 0.24 mg, 镁 180 mg, 磷酸二氢钙 20 g

Notes: a. the ingredients were purchased from the Yuehai Feed company (Zhejiang, China), and the protein contents of ingredients are as follow: fish meal 630 g/kg, soybean meal 442 g/kg, cottonseed meal 500 g/kg, rapeseed meal 377 g/kg, wheat middling 169 g/kg, rice bran 143 g/kg, wheat bran 151 g/kg; b. vitamin premix (mg or IU/kg diet): VA 10 000 IU, VD₃ 3 000 IU, VE 150 IU, VK₃ 12.17 mg, VB₁ 20 mg, VB₂ 20 mg, VB₃ 100 mg, VB₆ 22 mg, VB₁₂ 0.15 mg, VC 1 000 mg, biotin 0.6 mg, folic acid 8 mg, inositol 500 mg; c. mineral premix (mg/kg diet): I 1.5 mg, Co 0.6 mg, Cu 3 mg, Fe 63 mg, Zn 89 mg, Mn 11.45 mg, Se 0.24 mg, Mg 180 mg, monocalcium phosphate 20 g

表 2 实验饲料氨基酸组成(干物质, g/kg)

Tab. 2 Amino acid composition of the experimental diets (dry matter, g/kg)

氨基酸 amino acids	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
苏氨酸 Thr	9.3	10.6	9.4	9.3	11.0
缬氨酸 Val	12.1	12.2	11.8	12.4	12.2
蛋氨酸 Met	52.1	54.2	54.0	51.8	52.1
异亮氨酸 Ile	13.3	12.8	12.7	13.1	14.2
亮氨酸 Leu	21.4	22.2	21.8	21.4	20.9
苯丙氨酸 Phe	19.5	21.3	20.8	19.4	21.1
组氨酸 His	12.2	11.9	10.8	11.5	12.1
赖氨酸 Lys	16.2	14.5	14.3	15.4	16.7
精氨酸 Arg	23.2	24.1	22.3	24.1	23.5
天冬氨酸 Asp	28.4	31.2	30.4	29.4	31.3
丝氨酸 Ser	13.6	14.1	13.7	12.6	12.7
谷氨酸 Glu	53.2	52.4	53.7	54.3	51.6
甘氨酸 Gly	14.7	15.1	13.8	15.0	14.3
丙氨酸 Ala	13.3	12.8	12.6	13.7	12.4
半胱氨酸 Cys	2.2	1.7	3.5	1.8	2.3
酪氨酸 Tyr	7.4	8.3	8.5	7.8	7.7
脯氨酸 Pro	12.4	12.6	11.2	11.3	11.7
总氨基酸 TAA	324.5	332.0	325.3	324.3	327.8

20尾, 每个实验组设3个重复。养殖实验在上海海洋大学滨海养殖基地室内水泥养殖池进行, 养殖周期60 d。每天进行3次投喂(07:30、12:00、17:00), 日投饲率为鱼体质量的3.0%~4.0%。根据天气、水温和摄食情况进行调整, 以投喂后15 min内无残饵为宜。养殖实验期间, 溶解氧>5.0 mg/L, 水温25~30℃, pH 7.5~8.0, 氨氮含量<0.2 mg/L, 亚硝酸盐<0.1 mg/L。

1.3 样品采集

养殖实验结束后饥饿24 h, 统计每个网箱草鱼尾数并称重, 计算增重率(WGR)、饲料系数(FCR)、成活率(SR)。每个网箱随机取3尾鱼, 测量体质量、体长后立即解剖, 称量内脏团重、肝脏重和肠脂重, 计算肥满度(CF)、脏体比(VSI)、肝体比(HSI)和肠脂比(IFR)。从鱼的左侧采集肌肉(鱼体鳃盖后缘至背鳍第1鳍条的侧线以下部分白肌), 作肌肉常规成分、游离氨基酸、胶原蛋白检测使用; 采集右侧肌肉进行系水力

测定; 用于组织学分析的肌肉(0.5 cm×0.5 cm×2 cm)亦从右侧采集(采集部位同左侧), 浸没在固定液(饱和苦味酸水溶液: 甲醛: 冰醋酸=15: 5: 1)中24 h, 转移至70%酒精保存备用。另在右侧取规格大小为1 cm³左右的背肌, 立即进行质构分析。取前肠(约1 cm)保存于固定液(同上)中, 用于肠道组织形态分析。

1.4 测定指标与方法

生长指标与形体指标 成活率(survival rate, SR, %) = $N_t/N_0 \times 100\%$

增重率(weight gain rate, WGR, %) = $(W_t - W_0)/W_0 \times 100\%$

饲料系数(feed conversion ratio, FCR) = $W_f/(W_t - W_0)$
肝体比(hepatosomatic index, HSI, %) = $W_h/W \times 100\%$

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %) = $W_v/W \times 100\%$

肠脂比(intestinal fat ratio, IFR, %) = $W_i/W \times 100\%$

肥满度(condition factor, CF, g/cm^3) = $W/L^3 \times 100$ 式中, N_t 为终末尾数, N_0 为初始尾数, W_t 为终末体质量(g), W_0 为初始体质量(g), W_f 为摄入饲料量(g), W_h 为鱼肝脏重(g), W_v 为鱼内脏重(g), W_i 为鱼肠外脂肪重(g), W 为鱼体质量(g), L 为鱼体长(cm)。

饲料与肌肉组成 水分含量采用105 °C常压干燥法,粗蛋白含量采用凯氏定氮法(2300自动凯氏定氮仪, FOSS, Sweden),粗脂肪含量采用Folch氯仿—甲醇抽提法,粗灰分采用550 °C马弗炉高温灼烧法。

饲料氨基酸与肌肉游离氨基酸 饲料氨基酸组成采用氨基酸自动分析仪(Sykam S-433D, Germany)测定。取70 mg冷冻干燥的饲料样品,用6 N盐酸(加入1 g/L苯酚)110 °C水解24 h。其中进行蛋氨酸的测定时,用2 mL过甲酸在55 °C水解15 min。水解完成后冷却,取0.5 mL水解液经烘干后加5 mL稀释液稀释,取1.5 mL样液上机分析。

取鲜肌肉40 mg,加入1.2 mL提取液(甲醇:水=4:1),匀浆,冰水浴超声波10 min, -20 °C置2 h, 4 °C离心30 min (12 000 r/min),取上清液,用超高效液质联用仪(Waters ACQUITY, 美国)测定游离氨基酸。

胶原蛋白 总羟脯氨酸含量测定采用碱水解法,试剂盒由南京建成生物技术研究所提供。其原理为羟脯氨酸在氧化剂的作用下所产生的氧化产物与二甲氨基苯甲醛作用呈现紫红色,根据其呈色的深浅推算出其含量。用羟脯氨酸含量乘以8所得。

肌肉系水力 蒸失水率:取2 g肌肉(W_1)于蒸锅上蒸5 min,取出,吸干表面水分,冷却后称重(W_2)。

离心失水率:取2 g肌肉(W_1)于5 mL离心管中,3 000 r/min离心10 min,取出,吸干表面水分,称重(W_2)。

冷冻失水率:取2 g肌肉(W_1)于-20 °C冻存24 h后取出,室温解冻,吸干表面水分,称重(W_2)。

蒸、离心和冷冻失水率(%)的计算公式:
 $(W_1 - W_2) / W_1 \times 100\%$

肌肉质构特性 取1 cm^3 背部肌肉,使用Universal TA质构分析仪(腾跋公司,上海,中国)进行全质构分析(TPA)(硬度、弹性、咀嚼性、回复性)。采用25 mm×25 mm的柱形探头,

接触感应力为0.049 N,测试速度1 mm/s,目标模式为形变,形变量为30,时间为2 s。每个样品测定2次,取平均值。

肌肉和肠道组织学 制作肌肉组织和肠道组织石蜡切片,将样品进行逐级脱水、浸蜡、包埋、切片(7 μm ; Leica RM2245, Germany),经苏木精—伊红染色后装片,用装有DS-Ril相机的光学显微镜(Nikon 551, Japan)在20倍镜下观察肌肉组织形态并拍照,测定每平方毫米(mm^2)内的肌纤维数量(根),每个样品选取50个视野进行数据统计,并计算肌纤维直径;前肠组织切片风干后于Olympus光学显微镜下观察肠道组织结构并拍照。

1.5 数据分析

实验所得数据以平均值±标准差(mean±SD)表示,用SPSS 22.0统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),差异显著者进行Duncan氏多重比较检验, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 生长性能

养殖期间,各组草鱼SR均为100%。10和20 g/kg氯化钠添加组的WGR和FCR与对照组相比无显著差异($P > 0.05$),30和40 g/kg氯化钠添加组的WGR较对照组显著降低,而FCR显著升高($P < 0.05$);40 g/kg氯化钠添加组的HSI、VSI和IFR最大,而CF最低;各氯化钠添加组的IFR显著高于对照组,而CF显著低于对照组(10 g/kg氯化钠添加组除外)($P < 0.05$)(表3)。

2.2 肌肉组成

各组肌肉水分、粗蛋白、粗脂肪以及胶原蛋白含量没有显著差异($P > 0.05$),但20、30和40 g/kg氯化钠添加组的肌肉灰分含量显著高于对照组($P < 0.05$)(表4)。

2.3 肌肉游离氨基酸

10和20 g/kg氯化钠添加组的肌肉总游离氨基酸含量显著高于其他各组($P < 0.05$);各氯化钠添加组的肌肉游离谷氨酸、天冬氨酸含量显著低于对照组($P < 0.05$)(表5)。

2.4 肌纤维密度与直径

与对照组相比,氯化钠添加组的肌纤维密

表3 饲料中添加氯化钠对草鱼生长性能的影响

Tab. 3 Growth performance of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels

指标 indices	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
初始均重/g IBW	12.23±0.04	12.26±0.07	12.27±0.07	12.3±0.01	12.27±0.03
终末均重/g FBW	50.13±0.53 ^a	48.55±0.42 ^b	48.34±0.51 ^b	46.86±0.73 ^c	46.17±0.59 ^c
增重率/% WGR	303.72±11.82 ^a	299.17±5.83 ^{ab}	291.04±13.54 ^{ab}	284.13±7.11 ^b	282.23±18.10 ^b
饲料系数 FCR	1.63±0.07 ^a	1.65±0.02 ^{ab}	1.65±0.02 ^{ab}	1.71±0.02 ^b	1.70±0.06 ^b
成活率/% SR	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
肝体比/% HSI	2.21±0.03 ^a	2.21±0.04 ^a	2.26±0.02 ^{ab}	2.28±0.04 ^{ab}	2.36±0.03 ^b
脏体比/% VSI	8.19±0.06 ^a	8.35±0.07 ^{ab}	8.44±0.01 ^{ab}	8.34±0.02 ^{ab}	9.17±0.43 ^c
肠脂比/% IFR	1.61±0.09 ^a	1.80±0.04 ^b	1.85±0.02 ^b	1.80±0.01 ^b	1.93±0.01 ^c
肥满度/(g/cm ³) CF	1.91±0.01 ^a	1.89±0.01 ^a	1.82±0.01 ^b	1.81±0.02 ^b	1.77±0.01 ^c

注：同一行数据中不同小写字母表示二者有显著差异($P<0.05$)，下同

Notes: values in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$), the same below

表4 饲料中添加氯化钠对草鱼肌肉组成的影响 (鲜物质, g/kg)

Tab. 4 Flesh chemical composition of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels (fresh tissue, g/kg)

指标 indices	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
水分 moisture	780.3±13.6	776.4±26.6	775.2±15.8	782.4±21.7	781.3±16.3
粗蛋白 crude protein	192.2±13.8	199.5±6.2	196.1±12.3	194.1±7.8	195.8±10.1
粗脂肪 crude lipid	12.8±0.7	12.5±0.4	12.4±0.4	12.5±0.8	12.5±0.4
粗灰分 crude ash	18.1±0.1 ^a	18.4±0.3 ^a	20.4±0.3 ^b	20.1±1.8 ^b	20.3±0.4 ^b
胶原蛋白 collagen	27.2±0.5	26.8±0.6	27.0±0.8	27.2±0.4	27.1±0.7

度显著降低($P<0.05$)，肌纤维直径显著增加($P<0.05$) (表6)。

2.5 肌肉质构和系水力

与对照组相比，各氯化钠添加组的肌肉硬度都显著降低($P<0.05$)，而肌肉弹性和回复性均无显著差异($P>0.05$)；10和20 g/kg氯化钠添加组的咀嚼性与对照组无显著差异($P>0.05$)，而30和40 g/kg氯化钠添加组的咀嚼性显著低于对照组($P<0.05$)；各氯化钠添加组的肌肉蒸失水率、离心失水率和冷冻失水率(除10 g/kg氯化钠添加组)较对照组均显著增加($P<0.05$) (表7)。

2.6 肠道组织学

30和40 g/kg氯化钠添加组的绒毛高度和宽度与对照组相比显著降低($P<0.05$)，其余2组与对照组相比无显著差异($P>0.05$)；氯化钠添加组的肌层厚度显著高于对照组($P<0.05$) (表8)。

3 讨论

3.1 饲料中添加氯化钠对草鱼生长性能和肠道组织的影响

Zaugg等^[8]认为，在低渗环境的淡水中，鱼类不能从水中获得足够的离子来满足生长的需要，在饲料中补充食盐将能满足鱼体生长对于 Na^+ 和 Cl^- 的需求；同时，饲料中的食盐满足渗透调节的需求后，将节省用于调节渗透压的能量，从而能将更多的能量用于鱼体生长。在对虹鳟的研究中，随着饲料中氯化钠添加量的增加(45~119 g/kg)，鱼体存活率和饲料利用率提高，抵抗盐度胁迫的能力增强^[1]；在饲料中添加6 g/kg的食盐喂养斑点叉尾鲷，提高了饲料利用率，改善了鱼的体型、体色，提高了商品价值^[2]；然而，饲料中添加过高含量的食盐，对鱼类营养物质的消化吸收产生了负面影响，进而影响其生长性能。如在大麻哈鱼幼鱼饲料中添加15

表 5 饲料中添加氯化钠对草鱼肌肉游离氨基酸组成的影响 (鲜物质, mg/100 g)

Tab. 5 Muscle free amino acid composition of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels (fresh tissue, mg/100 g)

氨基酸 amino acids	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
苏氨酸 Thr	7.32±0.45 ^a	6.40±0.79 ^b	7.61±0.78 ^a	7.03±0.77 ^c	6.04±0.67 ^b
缬氨酸 Val	2.10±0.27 ^a	2.58±0.79 ^a	0.94±0.49 ^b	2.63±0.56 ^a	2.37±0.88 ^a
蛋氨酸 Met	0.47±0.01 ^a	0.47±0.02 ^a	0.43±0.01 ^b	0.43±0.01 ^b	0.40±0.01 ^c
异亮氨酸 Ile	1.22±0.03	1.24±0.04	1.22±0.02	1.22±0.02	1.25±0.04
亮氨酸 Leu	1.39±0.01	1.40±0.01	1.38±0.02	1.38±0.01	1.39±0.02
苯丙氨酸 Phe	6.03±0.22	6.32±0.19	6.25±0.13	6.19±0.15	6.09±0.07
组氨酸 His	17.59±1.52	18.60±1.72	20.13±2.13	18.72±2.21	17.39±1.68
赖氨酸 Lys	21.18±2.58	22.38±1.2	21.76±2.72	23.58±1.56	24.16±1.04
精氨酸 Arg	3.13±0.34 ^a	6.13±0.22 ^b	5.89±0.29 ^c	2.99±0.15 ^a	2.96±0.48 ^a
色氨酸 Trp	3.00±0.33	3.15±0.22	2.83±0.09	2.99±0.34	2.94±0.48
天冬氨酸 Asp	0.57±0.02 ^a	0.41±0.03 ^b	0.21±0.02 ^c	0.27±0.02 ^d	0.23±0.02 ^c
丝氨酸 Ser	4.23±0.09 ^{ac}	3.63±0.10 ^b	4.43±0.14 ^c	3.82±0.13 ^b	4.12±0.20 ^a
谷氨酸 Glu	3.06±0.39 ^a	2.96±0.26 ^a	1.74±0.13 ^b	1.56±0.03 ^b	1.63±0.08 ^b
谷氨酰胺 Gln	4.23±0.34 ^a	3.45±0.13 ^b	3.44±0.41 ^b	2.52±0.13 ^c	2.98±0.20 ^d
半胱氨酸 Cys	0.65±0.05 ^a	0.46±0.02 ^b	0.62±0.04 ^a	0.31±0.02 ^c	0.45±0.03 ^b
脯氨酸 Pro	6.92±1.64 ^a	8.01±1.39 ^b	7.06±0.28 ^a	7.95±1.30 ^b	3.37±1.08 ^c
天冬酰胺 Asn	0.04±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.04±0.01
总氨基酸 TAA	113.82±2.49 ^a	118.27±1.60 ^b	117.67±1.15 ^b	112.56±2.53 ^a	105.36±2.38 ^c

表 6 饲料中添加氯化钠对草鱼肌纤维密度和直径的影响

Tab. 6 Muscle fibre density and diameter of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels

项目 items	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
肌纤维密度/(根/mm ²) muscle fiber density	123.5±3.3 ^a	107.6±4.5 ^b	73.5±4.1 ^{cd}	64.8±3.7 ^e	75.9±3.5 ^d
肌纤维直径/μm muscle fiber diameter	51.2±1.4 ^a	62.1±2.5 ^b	81.3±2.4 ^c	79.3±1.0 ^e	72.7±3.8 ^d

g/kg的食盐, 其增重率降低了7%^[3]; 在大西洋鲑的饲料中补充80和120 g/kg的无机盐, 其增重率显著降低, 饲料系数升高^[4]。

本实验在饲料中添加10和20 g/kg氯化钠, 对草鱼增重率和饲料系数没有显著影响, 但当氯化钠含量达到30和40 g/kg后, 草鱼增重率显著降低, 饲料系数显著升高(表3)。Salman^[9]认为, 氯化钠降低生长性能的原因, 可能在于其对饲料中的营养素有稀释作用, 并且过高含量的食盐会加快食物通过消化道的速率, 影响鱼体对于饲料的消化利用率。本实验中, 各组饲料保持等氮等脂的水平, 故不存在对营养素的稀释

作用。氯化钠导致草鱼生长性能下降的原因, 可能是因为食物通过消化道的速度加快, 或者是与肠道的损伤有关。

鱼类的肠道是鱼体从外界获取营养物质的通路, 还参与着机体的免疫、新陈代谢和应激反应等^[10]。有研究表明, 对小鼠进行高盐灌胃后, 肠道蛋白酶活性降低, 机体免疫功能下降, 增加了患病的风险^[11]; 高盐饮食习惯会破坏肠道的免疫平衡状态, 可能会增加炎症性肠病的发病风险^[12]。本研究发现, 30和40 g/kg氯化钠添加组的肠绒毛高度和宽度与对照组相比显著降低, 添加氯化钠后, 使肠壁肌层显著增厚,

表7 饲料中添加氯化钠对草鱼肌肉系水力和质构的影响

Tab. 7 Flesh texture characteristics and water-holding capacity of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels

项目 items	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
硬度/N hardness	3.67±0.21 ^a	2.77±0.24 ^b	2.71±0.24 ^b	2.27±0.25 ^c	2.48±0.16 ^c
弹性 springiness	0.62±0.05	0.63±0.04	0.63±0.02	0.59±0.02	0.61±0.03
回复性 resilience	1.74±0.09	1.69±0.04	1.67±0.08	1.65±0.07	1.70±0.07
咀嚼性 chewiness	153.95±9.74 ^a	146.71±4.61 ^a	144.27±5.22 ^a	93.85±6.95 ^b	99.48±5.97 ^b
蒸失水率/% steaming loss	15.35±1.62 ^a	18.69±1.94 ^b	18.54±2.45 ^b	18.76±1.8 ^b	19.47±2.24 ^c
离心失水率/% centrifuge loss	13.63±1.18 ^a	15.56±1.62 ^b	17.43±1.24 ^c	19.01±2.52 ^d	19.63±2.31 ^d
冷冻失水率/% thawing loss	11.47±2.11 ^a	10.95±1.71 ^a	13.92±1.49 ^b	14.13±1.56 ^b	14.23±1.74 ^b

表8 饲料中添加氯化钠对草鱼肠道组织的影响

Tab. 8 Intestinal structure of *C. idella* fed diets with various sodium chloride levels

项目 items	对照组 control	10 g/kg氯化钠组 10 g/kg NaCl	20 g/kg氯化钠组 20 g/kg NaCl	30 g/kg氯化钠组 30 g/kg NaCl	40 g/kg氯化钠组 40 g/kg NaCl
绒毛高度/ μm villus height	973.6±15.9 ^a	941.7±12.1 ^a	969.3±5.6 ^a	586.3±8.6 ^b	368.4±16.9 ^b
绒毛宽度/ μm villus width	60.2±1.7 ^a	62.7±2.8 ^a	60.3±2.4 ^a	48.2±3.6 ^b	45.1±4.4 ^b
肌层厚度/ μm muscular thickness	189.1±8.8 ^a	235.5±12.5 ^b	221.5±2.5 ^b	218.3±5.6 ^b	224.3±9.8 ^b

这些均表明肠道出现了异常，从而降低了草鱼的消化吸收功能。其原因可能是因为大量钠离子、氯离子的摄入已经超过了鱼体的代谢能力，进而影响了肠道乃至整个鱼体的渗透平衡和离子平衡。

3.2 饲料中添加氯化钠对草鱼肌肉品质的影响

有研究表明，在低盐养殖水体中饲养凡纳滨对虾，随着饲料中氯化钠添加量升高，虾体水分、脂肪有降低的趋势^[7]。肌肉的品质与脂肪含量有一定的相关性^[13]。通常，肌肉粗脂肪含量降低，使得肌束之间摩擦力增大，降低了肌肉嫩度，但同时也增加了肌肉的咀嚼性^[14]；在本实验中，与对照组相比，各氯化钠添加组的粗蛋白、粗脂肪、水分和胶原蛋白均无显著差异。可见氯化钠的添加没有改变草鱼幼鱼的肌肉常规组成。

系水力是衡量肌肉品质的主要指标之一^[15]，影响肌肉的定性与定量^[16]。蒸失水率主要反映在蒸的过程中肌肉中液态和可溶性物质的损失，所以失水率越低则肌肉保留营养与风味物质的能力越强。本实验在饲料中添加氯化钠后，草鱼肌肉的蒸、冷冻和离心失水率均显著升高，是否是因为氯化钠导致了肌肉细胞的通透性增

加，从而使失水率增加，有待于今后进一步研究。

用含盐量为20 g/kg的饲料喂养凡纳滨对虾，肌肉甘氨酸、丙氨酸和谷氨酸等鲜味氨基酸含量显著增加。对虾可从饲料中摄入相对足量的盐来调节渗透压，而无需动用较多的氨基酸来调节渗透压，从而使虾体的甘氨酸、丙氨酸和谷氨酸等含量增加，改善了低盐养殖条件下对虾的风味。用40 g/kg原料肉重的食盐腌制腊肉，其总氨基酸含量显著高于其他各组^[17]。本实验中，10和20 g/kg氯化钠添加组的肌肉总游离氨基酸含量显著高于其他各组；各氯化钠添加组(10 g/kg氯化钠添加组除外)天冬氨酸、谷氨酸含量显著低于对照组，可能是因为草鱼属于狭盐性鱼类，从饲料中摄取了过量的氯化钠，导致鱼体动用了更多的能量来调节渗透压，从而无法节省鲜味氨基酸。

肌肉的咀嚼性、硬度与肌纤维密度成正比^[13]，即在一定范围内，肌纤维密度越高，肌肉的硬度就越大。鱼类肌肉的生长有2种方式：增生及肥大^[18]。增生是肌纤维数量的增加，肥大是肌纤维直径的增加。增生通常持续至鱼体生长至最大体长的40%，此后肌肉的生长以肥大为主^[19]。在Zhou等^[20]的实验中，饲料中添加氯化钠后，虾肉硬度显著增加，20和40 g/kg氯化钠添加组的肌

肉弹性也显著高于对照组。用14 g/kg的氯化钠溶液浸泡鸡肉, 降低了鸡肉剪切力, 提高了鸡肉嫩度^[21]。本实验中, 与对照组相比, 氯化钠添加组肌纤维密度均显著降低, 肌纤维直径显著增加, 肌肉硬度也显著低于对照组; 咀嚼性除10 g/kg氯化钠添加组外, 其余各组均显著低于对照组。出现这种结果可能由于摄食含盐饲料之后渗透压调节的差异所导致的^[22]。

综上, 在本实验条件下, 在饲料中添加氯化钠10~40 g/kg, 对草鱼幼鱼生长性能和肌肉品质没有改善作用。

参考文献:

- [1] Park G S, Takeuchi T, Yokoyama M, *et al.* Effect of dietary sodium chloride levels on growth and tolerance to sea water of rainbow trout[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1998, 64(3): 469-474.
- [2] 汪军涛, 叶元土, 袁建明, 等. 食盐在饲料中添加对斑点叉尾鲷生长的影响[J]. *饲料工业*, 2008, 29(2): 27-29. Wang J T, Ye Y T, Yuan J M, *et al.* Effect of adding salt in feed on growth of channel catfish[J]. *Feed Industry*, 2008, 29(2): 27-29(in Chinese).
- [3] Zaugg W S, McLain L R. Inorganic salt effects on growth, salt water adaption, and gill ATPase of pacific salmon[M]//Neuhaus O W, Halver J E. *Fish in Research*. New York: Academic Press, 1969: 293-306.
- [4] Basulto S. Induced saltwater tolerance in connection with inorganic salts in the feeding of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *Aquaculture*, 1976, 8(1): 45-55.
- [5] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018. Fisheries and Fishery Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fishery Technology Promotion Station, China Society of Fisheries. *China Fishery Statistics Yearbook 2018*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018(in Chinese).
- [6] 李小勤, 李星星, 冷向军, 等. 盐度对草鱼生长和肌肉品质的影响[J]. *水产学报*, 2007, 31(3): 343-348. Li X Q, Li X X, Leng X J, *et al.* Effect of different salinities on growth and flesh quality of *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(3): 343-348(in Chinese).
- [7] 梁萌青, 王士稳, 王家林, 等. 饲料中添加食盐对凡纳滨对虾生长及风味的影响[J]. *渔业科学进展*, 2009, 30(3): 117-124. Liang M Q, Wang S W, Wang J L, *et al.* Effects of adding salt in the diet of the shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in low salinity and sea water on growth and flavour[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, 30(3): 117-124(in Chinese).
- [8] Zaugg W S, Roley D D, Prentice E F, *et al.* Increased seawater survival and contribution to the fishery of chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) by supplemental dietary salt[J]. *Aquaculture*, 1983, 32(1-2): 183-188.
- [9] Salman N. Some nutritional and osmoregulatory responses of fish to dietary salt[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007, 146: 90.
- [10] Dimitroglou A, Davies S, Sweetman J. The effect of dietary mannan oligosaccharides on the intestinal histology of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2008, 150(3): 56.
- [11] 朱佳源, 郑淘, 肖嫩群, 等. 食盐对小鼠肠道微生物、酶活及血常规的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 43-46. Zhu J Y, Zhen T, Xiao N Q, *et al.* Effect of salt on intestinal microorganism, enzyme activities and blood in mice[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(9): 43-46(in Chinese).
- [12] 彭小萍. 高盐饮食对小鼠肠道菌群及认知功能的影响[D]. 湛江: 广东医科大学, 2017. Peng X P. The influence of high salt diet on mice intestinal immunity and TNBS-induced colitis[D]. Zhanjiang: Guangdong Medical University, 2017(in Chinese).
- [13] Johnston I A, Alderson R, Sandham C, *et al.* Muscle fibre density in relation to the colour and texture of smoked Atlantic salmon (*Salmo salar*.)[J]. *Aquaculture*, 2000, 189(3-4): 335-349.
- [14] Grigorakis K, Alexis M N. Effects of fasting on the meat quality and fat deposition of commercial-size farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fed different dietary regimes[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2005, 11(5):

- 341-344.
- [15] Brinker A, Reiter R. Fish meal replacement by plant protein substitution and guar gum addition in trout feed, Part I: Effects on feed utilization and fish quality[J]. *Aquaculture*, 2011, 310(3-4): 350-360.
- [16] Kauffman R G, Eikelenboom G, Van Der Wal P G, *et al.* The use of filter paper to estimate drip loss of porcine musculature[J]. *Meat Science*, 1986, 18(3): 191-200.
- [17] 张东, 李洪军, 王鑫月, 等. 食盐添加量对腊肉品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(11): 159-164, 171. Zhang D, Li H J, Wang X Y, *et al.* Effect of different amounts of salt on the quality of Chinese bacon[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(11): 159-164, 171(in Chinese).
- [18] Egginto S, Johnston I A. A morphometric analysis of regional differences in myotomal muscle ultrastructure in the juvenile eel (*Anguilla anguilla* L.)[J]. *Cell and Tissue Research*, 1982, 222(3): 579-596.
- [19] Johnston I A, Fernández D A, Calvo J, *et al.* Reduction in muscle fibre number during the adaptive radiation of notothenioid fishes: a phylogenetic perspective[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(15): 2595-2609.
- [20] Zhou X X, Zhang J Y, Liu S L, *et al.* Supplementation of sodium chloride in diets to improve the meat quality of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low-salinity water[J]. *Aquaculture Research*, 2014, 45(7): 1187-1195.
- [21] 韩惠瑛, 朱迎春, 李海虹. 氯化钠和有机酸对鸡肉嫩度的影响[J]. *中国畜牧兽医文摘*, 2014, 30(12): 202-203. Han H Y, Zhu Y C, Li H H. Effect of sodium chloride and organic acid on tenderness of chicken[J]. *Chinese Abstracts of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2014, 30(12): 202-203(in Chinese).
- [22] 吴新颖, 梁萌青, 薛长湖, 等. 饲料中添加盐对低盐养殖凡纳滨对虾肌肉常规营养成分及质构的影响[J]. *海洋水产研究*, 2008, 29(6): 84-89. Wu X Y, Liang M Q, Xue C H, *et al.* Effects of salt addition in feed on muscle nutritional composition and texture of *Litopenaeus vannamei* cultured in low salinity water[J]. *Marine fisheries research*, 2008, 29(6): 84-89 (in Chinese).

Effects of dietary sodium chloride on growth and muscle quality of *Ctenopharyngodon idella*

JI Dong^{1,2,3}, WANG Pu¹, CHENG Zhuo¹, LI Xiaoqin^{1,2,3}, LENG Xiangjun^{1,2,3*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN), Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Shanghai Collaborative Innovation Centre for Aquatic Animal Genetics and Breeding,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To investigate the effects of adding sodium chloride (NaCl) to diets on the growth performance and flesh quality of *Ctenopharyngodon idella*, five diets were prepared with NaCl addition at 0 (control diet), 10, 20, 30, 40 g/kg and fed to *C. idella* with an initial body weight of (12.26±0.03) g. After 60 days of feeding, 10 and 20 g/kg NaCl groups showed the similar growth to the control, while 30 and 40 g/kg NaCl groups had lower weight gain and higher feed conversion ratio than the control. No significant differences were observed in flesh proximate composition except ash among all the groups, and the ash content increased with the increasing NaCl level. The water-holding capacity was significantly decreased by the supplementation of NaCl except in thawing loss of 10 g/kg NaCl group. The addition of 10 and 20 g/kg NaCl increased the total free amino acids contents, but the supplementation of 20, 30, 40 g/kg NaCl significantly decreased the contents of free Glu and Asp in flesh. Dietary NaCl decreased the flesh hardness and the supplementation of 30 and 40 g/kg NaCl decreased the flesh chewiness, but there was no significant difference in elasticity and resilience among all the groups. In intestinal histology, the villus height and the villus width of 30 and 40 g/kg NaCl groups were significantly lower than those of the control, and the supplementation of NaCl significantly increased the muscular thickness. In conclusion, the supplementation of NaCl (10-40 g/kg) in diet did not improve the growth performance and flesh quality of *C. idella*.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; sodium chloride; growth; muscle quality

Corresponding author: LENG Xiangjun. E-mail: xjleng@shou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31772858); Talents Training Plan for Excellent Agriculture and Forestry (A1-0201-00-0001)