

网络出版时间:2024-07-31 10:12 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.02.002  
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240730.1237.003

# 稻草对草鱼生长、血清生化指标及 肠道结构和菌群的影响

罗王燕<sup>1,2</sup>,张凯<sup>2</sup>,李坤<sup>1,2</sup>,杨顺慧<sup>2</sup>,王广军<sup>2</sup>

(1 上海海洋大学 水产与生命学院,上海 210306;

2 中国水产科学研究院 珠江水产研究所 广东省水产动物免疫与绿色养殖重点实验室,广东 广州 510380)

**【摘要】**【目的】探究稻草对草鱼生长、血清生化指标、肌肉营养成分、肠道结构和菌群的影响,为稻渔轮作提供理论依据。【方法】选取规格整齐、健康的草鱼 270 尾[平均初始体质量为(55.36±0.52)g/尾],随机平均分为对照组(CF)、干稻草组(DS)和新鲜稻草组(FS),每组 3 个重复,每重复 30 尾鱼。CF 组草鱼只投喂配合饲料,DS 组草鱼投喂处理后的干稻草,FS 组草鱼投喂新鲜稻草,进行为期 60 d 的养殖试验。养殖试验结束后,测定生长指标(成活率、增重率、摄食率、特定增长率、脏体比、肝体比、肠重比、肠长比、肥满度)、血清生化指标(总蛋白、白蛋白、球蛋白、总胆固醇、甘油三酯、高密度脂蛋白胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量)、肌肉营养成分(蛋白质、脂肪、灰分、水分含量)、肠道结构(肌层厚度、绒毛高度和绒毛宽度)和菌群多样性。【结果】与 CF 组相比,除成活率 3 组差异不显著外,DS 和 FS 组的其余生长指标均显著降低( $P<0.05$ )。各组草鱼血清总蛋白和白蛋白差异显著( $P<0.05$ ),以 CF 组最高;CF 组的球蛋白、总胆固醇、甘油三酯和高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于 DS 组和 FS 组( $P<0.05$ ),低密度脂蛋白胆固醇含量显著高于 DS 组。各组草鱼肌肉灰分含量差异不显著;CF 组草鱼肌肉脂肪含量显著高于 DS 组和 FS 组( $P<0.05$ ),蛋白质含量显著高于 FS 组,水分含量显著低于 FS 组( $P<0.05$ )。与 DS 组相比,CF 和 FS 组草鱼肠道结构较为完整;DS 组草鱼的肌层厚度、绒毛高度和绒毛宽度最低。CF、DS 和 FS 组草鱼肠道优势菌门一致,均以厚壁菌门的相对丰度最大,分别为 73.31%,58.62%和 32.89%,而优势菌属各不相同。FS 组草鱼肠道菌群 OTU 数量最多。【结论】草鱼摄食稻草对生长、免疫和肠道造成一定的损伤,在稻渔轮作中建议补充一些配合饲料,以弥补单一摄食稻草而造成的营养不足。

**【关键词】** 草鱼;稻草;稻渔轮作;血清生化指标;肠道结构;肠道菌群

**【中图分类号】** S965.112

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2025)02-0010-09

## Effects of straw on the growth, serum biochemical parameters, intestinal structure, and microbiota of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

LUO Wangyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, LI Kun<sup>1,2</sup>, YANG Shunhui<sup>2</sup>, WANG Guangjun<sup>2</sup>

(1 College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 210306, China; 2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Animal Immunization and Green Breeding, Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou, Guangdong 510380, China)

**Abstract:** 【Objective】 This research aimed to investigate the impact of straw on the growth, serum biochemical indicators, muscle nutritional composition, intestinal structure, and microbiota of grass carp, and provide a theoretical basis for rice-fish rotation. 【Method】 Healthy grass carp of similar size was selected as

【收稿日期】 2023-11-24

【基金项目】 广东省农业科研项目和农业技术推广项目“稻渔综合种养模式示范”(502022023); 畜禽种业全国重点实验室开放课题“稻渔鸭立体生态农业技术研究”(2023GZ21)

【作者简介】 罗王燕(1999-),女,四川宜宾人,在读硕士,主要从事水产动物健康养殖研究。E-mail:lwy413888@163.com

【通信作者】 王广军(1973-),男,山东济宁人,研究员,硕士生导师,主要从事水产动物健康养殖研究。E-mail:gjwang@prfri.ac.cn

experimental material, with a total of 270 individuals [average initial body weight of  $(55.36 \pm 0.52)$  g/individual]. They were randomly but equally divided into three groups: control group (CF), dry straw group (DS), and fresh straw group (FS), with 3 replicates in each group and 30 individuals in each replicate. The CF group was fed with formulated feed, the DS group was fed with processed dry straw, and the FS group was fed with fresh straw. A 60-day aquaculture trial was conducted. After the trial, growth indicators, serum biochemical indicators, muscle nutrition composition, intestinal structure and intestinal microbiota were determined. Growth indicators included survival rate, weight gain rate, feed intake rate, specific growth rate, visceral index, liver index, intestine weight index, intestine length index, and plumpness. Serum biochemical indicators included total protein, albumin, globulin, total cholesterol, triglycerides, high-density lipoprotein cholesterol, and low-density lipoprotein cholesterol content. Muscle nutrition composition measurements included protein, fat, ash, and water content, and intestinal structure measurements included muscular layer thickness, villus height, villus width, and bacterial community diversity. **【Result】** Compared with the CF group, except the insignificant difference in survival rate for the three groups, the remaining growth indicators of the DS and FS groups were significantly decreased ( $P < 0.05$ ). The differences in total protein and albumin between different groups of grass carp are significant ( $P < 0.05$ ), with the CF group having the highest level. The CF group had significantly higher levels of globulin, total cholesterol, triglycerides, and high-density lipoprotein cholesterol compared to the DS and FS groups ( $P < 0.05$ ), and the levels of low-density lipoprotein cholesterol of the CF group were significantly higher than the DS group. There was no significant difference in ash content of grass carp muscles among the groups, the CF group of grass carp had significantly higher fat content than the DS and FS groups ( $P < 0.05$ ). Protein content of the CF group was significantly higher than the FS group, and moisture content was significantly lower than the FS group ( $P < 0.05$ ). Compared with the DS group, the CF and FS groups of grass carp had more intact intestinal structures. The DS group of grass carp had the lowest muscle layer thickness, villus height, and villus width. The dominant intestinal phylum of grass carp in the CF, DS, and FS groups was consistent, with the highest relative abundance belonging to the Firmicutes phylum, at 73.31%, 58.62%, and 32.89%, respectively, while the dominant genera were different. The FS group had the largest number of OTUs in the intestinal flora of the grass carp. **【Conclusion】** Grass carp fed on rice straw can cause certain damages to their growth, immunity, and intestines. It is suggested to supplement some compound feed in rice-fish rotation to compensate for the nutritional deficiency caused by solely feeding on rice straw.

**Key words:** grass carp (*Ctenopharyngodon idella*); straw; rice-fish rotation; serum biochemical parameters; intestinal structure; intestinal microbiota

稻渔综合种养在我国有悠久的历史,其主要有2种模式,即稻鱼共生和稻鱼轮作。稻鱼轮作是指利用同一稻田,在不同季节分别进行种稻和养鱼,该模式可以有效地避免2个物种之间管理上的差异。稻鱼轮作在我国已经非常普遍,其推广实践大大提高了水稻的种植面积和产量<sup>[1]</sup>。但水稻收割之后,只有少部分稻草用于饲养陆生动物,其余大多在农田焚烧,不仅降低了稻草的利用效率,而且对环境和土壤也造成了一定的损害<sup>[2-3]</sup>。因此,拓展稻草的利用途径,既有利于稻草的资源化利用,又有利于保护农田环境。我国是农业大国,稻草是水稻的副产物,

其生产量远远大于其利用量,据统计每年仅有10%的稻草被有效利用<sup>[4-7]</sup>,现今稻草的有效利用问题成为一个研究热点。有研究表明,稻草干物质营养成分中的中性洗涤纤维在70%左右<sup>[8]</sup>,用稻草饲喂陆地反刍动物可增加其瘤胃的酸度,提高精饲料的摄食量<sup>[9-10]</sup>。但目前,在水生动物的养殖中饲喂稻草的研究报道较少,仅有一些将稻草粉碎后作为配合饲料的原料用于水产养殖的报道<sup>[11]</sup>,且饲喂稻草对鱼各方面的影响还需进一步研究。

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是草食性鱼类,具有生长速度快、肉质鲜美且营养丰富等优

点<sup>[12]</sup>。根据《2023 年中国渔业年鉴》统计,全国淡水养殖中,草鱼养殖产量近 600 万 t,位居淡水养殖品种第一<sup>[13]</sup>。草鱼作为常见的草食性高产鱼类,是稻渔轮作的一个重要养殖品种,对解决稻草的饲料化利用意义重大。张敏<sup>[14]</sup>指出,利用处理后的稻草养鱼经济效益明显,不仅可提高稻草的利用效率,而且还节省了饲料原料。但目前对稻草作为饲料养鱼是否健康尚无相关的理论支撑,稻草对鱼生长、生理、肠道微生物的影响如何还未见文献报道。因此,本试验以草鱼为研究对象,用新鲜稻草和经过处理的干稻草饲喂草鱼,进行为期 60 d 的养殖试验,探讨稻草对草鱼生长、血清生化指标、肌肉营养成分、肠道组织结构及微生物的影响,旨在为稻草在稻渔综合种养中的应用提供理论依据,也为稻渔轮作模

式的推广提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验饲料和草鱼

试验所用草鱼购于广州市诚一水产养殖有限公司。配合饲料为购自通威股份有限公司的草鱼专用膨化饲料(型号:155),粒径为 3 mm;干稻草和鲜稻草均采自广东国际渔业高科技园,饲喂前,将干稻草用粉碎机破碎,置于样品袋中加水密封,浸泡 2~3 d 使其软化后,取出去除多余水分;鲜稻草清理干净后,切成 3~5 mm 小段,放于样品袋中。处理后的稻草样品放 4 °C 冰箱保存。试验饲料营养成分含量见表 1。

表 1 试验饲料的营养水平

Table 1 Nutritional level of experimental feed

饲料 Feed	粗蛋白质 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗灰分 Crude ash	水分 Moisture
配合饲料 Compound feed	29.00	4.0	15.0	12.0
处理后干稻草 Treated dry straw	1.15	0.4	1.4	82.8
新鲜稻草 Fresh straw	1.98	0.5	2.4	78.3

### 1.2 试验设计

试验在中国水产科学研究院珠江水产研究所养殖基地进行,设置 3 个处理,分别为饲喂配合饲料的对照组(CF)、饲喂经处理的干稻草组(DS)和饲喂新鲜稻草的鲜稻草组(FS)。草鱼在养殖池塘中用配合饲料暂养 2 周,待其适应环境后进行 24 h 饥饿处理,然后选取体质健壮、规格相近的草鱼 270 尾[平均初始体质量为(55.36±0.52)g/尾],随机平均分为 CF 组、DS 组和 FS 组,放于池塘网箱(长×宽×高=1.9 m×0.9 m×1.5 m)中,进行为期 60 d 的养殖试验,每组设置 3 个重复,每个重复 30 尾草鱼,每天定时(08:00 和 18:00)饱食投喂 2 次。养殖期间用罗茨鼓风机连续 24 h 供氧,每周测 1 次池塘水质指标,养殖期间水体溶解氧为 6.0 mg/L 左右,pH 在 7.2~7.7,水温为 24.7~29.1 °C。

### 1.3 样品采集与处理

养殖试验结束后,草鱼禁食 24 h,对每个网箱中草鱼进行逐尾计数,统计成活率。从各网箱中随机挑选 8 尾草鱼,将其中 4 尾草鱼称量体质量,计算摄食率、特定生长率、脏体比等生长指标,之后将试鱼宰杀,采集肠道内容物,装入 EP 管放 -80 °C 冷冻保存,用于测定肠道内微生物的多样性;并取肌肉,置 -80 °C 冰箱保存,用于肌肉营养成分的测定。另外 4 尾草鱼进行采血,分离血清,置于 -80 °C 冰箱保

存,用于测定血清生化指标;然后解剖取出肠道组织,用 4% 多聚甲醛溶液固定,用于肠道组织结构分析。

### 1.4 指标检测方法

1.4.1 草鱼生长指标检测 测算草鱼生长性能和形体指标:

$$\text{成活率(survival rate, SR)} = N_t / N_i \times 100\%,$$

$$\text{增重率(weight gain rate, WGR)} = (W_t - W_i) / W_i \times 100\%,$$

$$\text{摄食率(feeding efficiency, FE)} = F / [t \times (W_i + W_t) / 2] \times 100\%,$$

$$\text{特定生长率(specific growth rate, SGR)} = (\ln W_t - \ln W_i) / t \times 100\%,$$

$$\text{脏体比(viscerasomatic index, VSI)} = W_v / W_e \times 100\%,$$

$$\text{肝体比(hepatosomatic index, HSI)} = W_h / W_e \times 100\%,$$

$$\text{肠重比(intestinal weight ratio, IWR)} = W_n / W_e \times 100\%,$$

$$\text{肠长比(relative gut length, RGL)} = GL / L \times 100\%,$$

$$\text{肥满度(relative fatness, RF)} = 100 \times W_e / L^3.$$

式中: $N_t$  为试验终末草鱼尾数, $N_i$  为试验初始草鱼尾数, $W_t$  为试验终末草鱼平均体质量(g/尾), $W_i$  为

试验初始草鱼平均体质量(g/尾),  $F$  为每个网箱摄入饲料总质量(风干样, g),  $t$  为饲喂周期(d),  $W_v$  为内脏质量(g),  $W_e$  为试验终末草鱼体质量(g/尾),  $W_l$  为试验终末草鱼肝脏质量(g/尾),  $W_n$  为试验终末草鱼肠道质量(g),  $GL$  为试验终末草鱼肠长(cm),  $L$  为试验终末草鱼体长(cm)。

1.4.2 血清生化指标检测 从 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中取出血清样品,置于冰上解冻后,采用南京建成生物工程研究所试剂盒检测血清生化指标。其中,总蛋白(total protein, TP)含量使用双缩脲法测定,白蛋白(albumin, ALB)含量使用溴甲酚绿法测定,球蛋白(globulin, GLB)含量使用计算值法(GLB含量=TP含量-ALB含量)测定,总胆固醇(total cholesterol, TCHOL)和甘油三酯(triglycerides, TG)含量使用酶法测定,高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)含量使用均相酶比色法测定。上述血清生化指标均使用全自动生化分析仪(迈瑞生化 BS-2800M)进行测定。

1.4.3 肌肉营养成分测定 草鱼肌肉组织蛋白质含量按照 GB 5009.5-2016 采用凯氏定氮法测定,脂肪含量按照 GB 5009.6-2016 采用酸水解法测定,灰分含量按照 GB 5009.4-2016 采用 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灼烧法测定,水分含量按照 GB 5009.3-2016 采用直接干燥法测定。

1.4.4 肠道组织结构观察 将固定好的草鱼肠道样品制作石蜡切片,脱蜡至水,然后用苏木素染色液(Harris)和伊红染液(醇溶性)染色,最后透明、封

固、镜检并白光扫描拍照(NanoZoomer<sup>®</sup> S360)。通过读图软件 NDP.view 2.9.22 RUO 观察草鱼肠组织的形态,每组随机选取 10 处肠绒毛和肌层组织,测量并记录肌层厚度(muscular thickness, MT)、绒毛高度(villus height, VH)和绒毛宽度(villus width, VW)。最后以每组的平均值作为测定数据统计分析。

1.4.5 肠道菌群的测定 取出一 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱保存的草鱼内容物样品,送至美吉生物公司,利用 Illumina MiSeq PE300 测序平台进行高通量测序。试验所引物为 338F(5'-ACTCCTACGGGAG-GCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGT-WTCTAAT-3'),分析草鱼肠道内菌群结构。相关数据分析由该检测公司提供的云平台进行处理。

## 1.5 数据处理

试验数据采用“平均数±标准差”表示。用 Excel 对数据进行整理,采用 SPSS 26.0(IBM SPSS Statistics, 26)软件对数据进行统计分析,采用 origin 2022 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻草对草鱼生长的影响

由表 2 可知,3 组草鱼成活率均在 90%以上,各组间无显著性差异( $P>0.05$ );与 CF 组相比,DS 和 FS 组草鱼的增重率显著下降,分别降低了 97.02%和 90.72%;CF 组草鱼的其余 7 个生长指标均显著高于 DS 和 FS 组( $P<0.05$ ),而 DS 组与 FS 组无显著性差异( $P>0.05$ )。

表 2 稻草对草鱼生长指标的影响

Table 2 Effect of rice straw on growth indices of grass carp

组别 Groups	成活率/% Survival rate	初始体质量/ (g·尾 <sup>-1</sup> ) Initial weight	终末体质量/ (g·尾 <sup>-1</sup> ) Final weight	增重率/% Weight gain rate	摄食率/% Feeding efficiency	特定生长率/% Specific growth rate
CF	95.56±1.92	55.68±0.37	143.57±10.68 a	157.78±17.58 a	36.92±2.02 a	1.56±0.11 a
DS	97.78±1.92	55.64±0.53	58.25±1.92 b	4.70±3.79 b	2.75±0.05 b	0.08±0.06 b
FS	93.33±3.33	54.75±1.61	62.85±6.55 b	14.64±9.05 b	2.26±0.15 b	0.22±0.13 b
组别 Groups	脏体比/% Viscerasomatic index	肝体比/% Hepatosomatic index	肠重比/% Intestinal weight ratio	肠长比/% Relative gut length	肥满度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Relative fatness	
CF	10.91±1.29 a	2.36±0.24 a	3.26±0.26 a	171.96±4.04 a	2.00±0.10 a	
DS	5.01±0.20 b	0.63±0.09 b	1.77±0.28 b	130.18±10.20 b	1.61±0.10 b	
FS	6.61±0.86 b	0.76±0.17 b	2.06±0.15 b	142.40±3.97 b	1.59±0.09 b	

注:CF. 对照组;DS. 干稻草组;FS. 新鲜稻草组。同列数据后标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note:CF. Control group;DS. Dry straw group;FS. Fresh straw group. Data in the same column followed by different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

### 2.2 稻草对草鱼血清生化指标的影响

由表 3 可知,草鱼血清 TP 和 ALB 含量在各组间差异显著( $P<0.05$ ),表现为 CF 组>DS 组>FS

组;CF 组草鱼血清的 GLB、TCHOL、TG 和 HDL-C 含量显著高于 DS 和 FS 组( $P<0.05$ ),而 DS 组与 FS 组无显著差异( $P>0.05$ );与 CF 组相比,DS 组

草鱼血清 LDL-C 含量显著降低( $P < 0.05$ ),而 FS 组与 DS 和 CF 组无显著差异( $P > 0.05$ )。

表3 稻草对草鱼血清生化指标的影响

Table 3 Effect of rice straw on serum biochemical indices of grass carp

组别 Groups	总蛋白/(g · L <sup>-1</sup> ) Total protein	白蛋白/(g · L <sup>-1</sup> ) Albumin	球蛋白/(g · L <sup>-1</sup> ) Globulin	总胆固醇/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Total cholesterol
CF	20.77 ± 1.30 a	6.27 ± 0.57 a	14.50 ± 0.96 a	6.12 ± 0.35 a
DS	14.20 ± 0.75 b	4.60 ± 0.30 b	9.60 ± 0.62 b	3.12 ± 0.78 b
FS	12.23 ± 0.55 c	3.80 ± 0.10 c	8.43 ± 0.57 b	3.79 ± 1.18 b

组别 Groups	甘油三酯/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Triglycerides	高密度脂蛋白胆固醇/ (mmol · L <sup>-1</sup> ) High-density lipoprotein cholesterol	低密度脂蛋白胆固醇/ (mmol · L <sup>-1</sup> ) Low-density lipoprotein cholesterol
CF	1.50 ± 0.07 a	2.87 ± 0.19 a	2.25 ± 0.18 a
DS	0.17 ± 0.04 b	1.72 ± 0.21 b	0.72 ± 0.44 b
FS	0.15 ± 0.01 b	1.66 ± 0.27 b	1.28 ± 0.69 ab

### 2.3 稻草对草鱼肌肉营养成分的影响

由表4可知,CF和DS组草鱼肌肉蛋白质含量显著高于FS组( $P < 0.05$ ),而CF与DS组之间无显著差异( $P > 0.05$ );DS和FS组草鱼肌肉脂肪含量显著低于CF组( $P < 0.05$ ),而DS和FS组之间

无显著差异( $P > 0.05$ )。FS组草鱼的肌肉水分含量显著高于CF组( $P < 0.05$ ),而DS组与CF和FS组无显著差异( $P > 0.05$ )。各组草鱼肌肉灰分含量无显著差异( $P > 0.05$ )。

表4 稻草对草鱼肌肉常规营养成分的影响

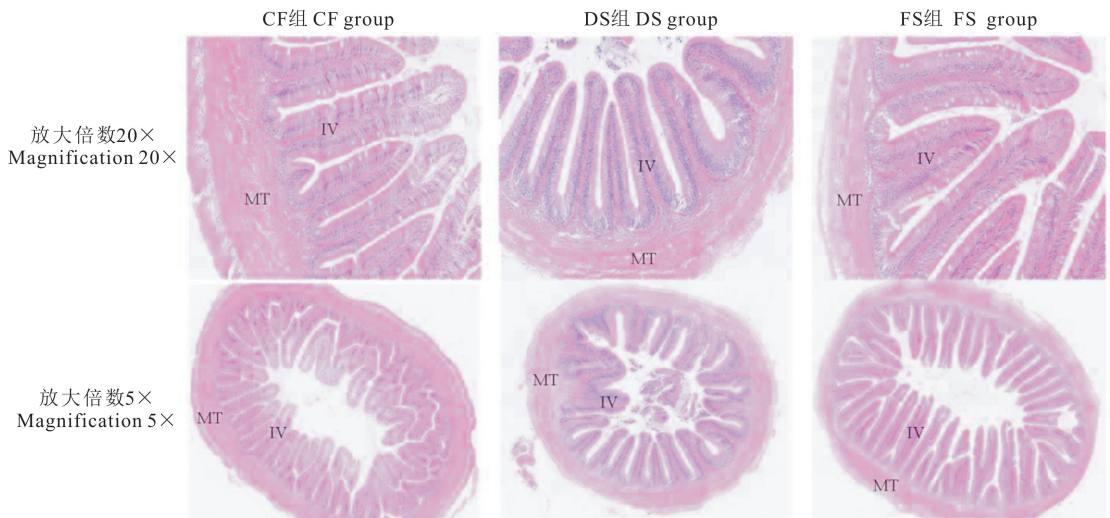
Table 4 The effect of rice straw on the conventional nutrient composition of grass carp muscle g/hg

组别 Groups	蛋白质 Protein	脂肪 Fat	灰分 Ash	水分 Moisture
CF	17.10 ± 0.36 a	1.83 ± 0.25 a	1.20 ± 0.00	78.90 ± 0.56 a
DS	16.43 ± 1.16 a	0.53 ± 0.06 b	1.23 ± 0.06	80.97 ± 1.96 ab
FS	14.87 ± 0.38 b	0.50 ± 0.00 b	1.20 ± 0.00	82.97 ± 0.65 b

### 2.4 稻草对草鱼肠道组织结构及菌群多样性的影响

2.4.1 肠道组织结构 由图1可知,相较于DS组而言,CF和FS组草鱼肠道结构较为完整。FS组的肠道结构更为整齐,其肌层厚度和绒毛密度较为均一。由表5可知,DS和FS组草鱼肠道肌层厚度

无显著差异( $P > 0.05$ ),但均显著低于CF组( $P < 0.05$ );DS组草鱼肠道绒毛高度显著低于CF和FS组( $P < 0.05$ ),而CF与FS组无显著差异( $P > 0.05$ );FS组草鱼的肠绒毛宽度与CF和DS组无显著差异( $P > 0.05$ ),而CF组草鱼的肠绒毛宽度显著高于DS组( $P < 0.05$ )。



MT, 肌层;IV, 绒毛。MT, Muscle layer;IV, Villus.

图1 稻草对草鱼肠道组织结构的影响

Fig. 1 The effect of rice straw on the intestinal organisation of grass carp

表 5 稻草对草鱼肠组织形态的影响

Table 5 The effect of rice straw on the morphology of the intestinal tissue of grass carp μm

组别 Groups	肌层厚度 Muscle thickness	绒毛高度 Villus height	绒毛宽度 Villus width
CF	114.60±13.71 a	510.90±94.35 a	141.22±33.87 a
DS	69.28±11.50 b	278.90±40.74 b	100.47±28.95 b
FS	84.44±15.66 b	581.60±89.39 a	113.52±22.63 ab

2.4.2 肠道菌群多样性分析 由图 2 和表 6 可知,CF,DS 和 FS 组优势菌门均是厚壁菌门(Firmicutes)、变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)和蓝细菌门(Cyanobacteria),其中厚

壁菌门相对丰度最大,分别为 73.31%,58.62%和 32.89%。DS 组中放线菌门的相对丰度显著高于另外 2 组( $P<0.05$ ),CF 组蓝细菌门的相对丰度显著低于 FS 组( $P<0.05$ )。

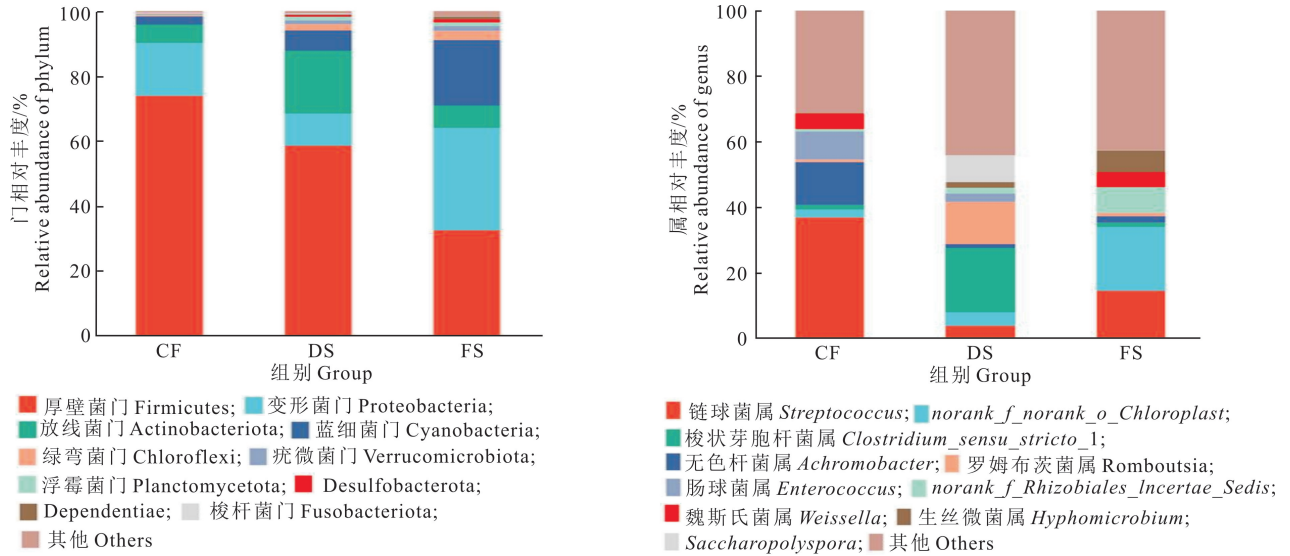


图 2 摄食稻草和配合饲料的草鱼肠道菌群在门、属水平上的相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of intestinal flora at the phylum and the genus level in grass carp feeding on rice straw and compounded feeds

表 6 摄食稻草和配合饲料草鱼肠道菌群在门、属水平上的相对丰度(前 4)

Table 6 Relative abundance of intestinal flora at the phylum and genus levels in grass carp feeding on rice straw and on a coordinated diet (Top 4)

组别 Groups	门相对丰度/% Relative abundance of phylum			
	厚壁菌门 Firmicutes	变形菌门 Proteobacteria	放线菌门 Actinobacteriota	蓝细菌门 Cyanobacteria
CF	73.31±21.57	16.26±14.93	5.63±4.25 b	2.50±1.38 b
DS	58.62±17.85	9.82±6.03	19.40±2.17 a	6.22±5.11 ab
FS	32.89±24.62	31.54±22.95	6.88±2.16 b	20.17±11.98 a
组别 Groups	属相对丰度/% Relative abundance of genu			
	链球菌属 <i>Streptococcus</i>	<i>norank_f_norank_o_Chloroplast</i>	梭状芽胞杆菌属 <i>Clostridium_sensu_stricto_1</i>	无色杆菌属 <i>Achromobacter</i>
CF	36.82±38.55	2.46±1.36 b	1.36±0.86 b	13.07±11.95
DS	3.72±3.57	4.14±3.11 ab	19.60±6.40 a	1.20±0.36
FS	14.38±17.36	19.56±12.34 a	1.25±0.17 b	2.02±2.63

在属水平的相对丰度上,3 组的优势菌属各不相同,在 CF 组中相对丰度最大的是链球菌属(*Streptococcus*),为 36.82%;在 DS 组中相对丰度最大的是梭状芽胞杆菌属(*Clostridium\_sensu\_stricto\_1*),为 19.60%;在 FS 组中相对丰度最大的是 *norank\_f\_norank\_o\_Chloroplast*,为 19.56%。

CF 组 *norank\_f\_norank\_o\_Chloroplastd* 的相对丰度显著低于 FS 组,梭状芽胞杆菌属的相对丰度显著低于 DS 组( $P<0.05$ )。

由图 3 可知,CF、DS 和 FS 组的 OTU 数分别是 570,1 315 和 1 835,共享 OTUs 有 373 个,占 CF、DS 和 FS 组 OTUs 的比例分别为 65.44%,

28.37%和 20.33%。

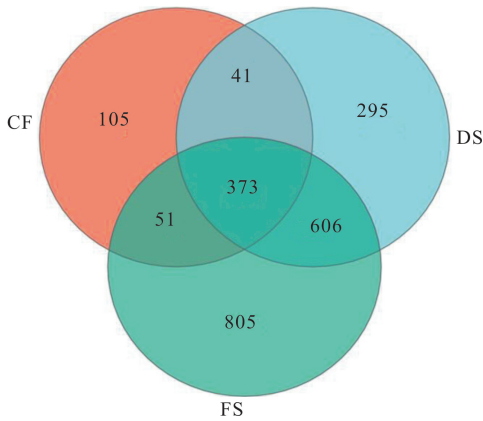


图 3 3 组草鱼肠道菌群 OTUs Venn 图分析

Fig. 3 Analysis of OTUs Venn diagrams of the intestinal flora of grass carp in 3 groups

## 3 讨 论

### 3.1 稻草对草鱼生长的影响

生长性能和形体指标可以反映草鱼的生长情况,是评价草鱼生长状况的重要指标<sup>[15]</sup>。在本研究中,DS 和 FS 组草鱼的各项生长指标均显著低于 CF 组,这与陈丽婷<sup>[16]</sup>用不同饲草投喂草鱼导致生长性能降低的研究结果相似,说明仅投喂稻草会显著降低草鱼的生长性能,造成这种情况的原因可能是稻草中粗蛋白质含量极低(干稻草和鲜稻草的粗蛋白质含量分别为 1.15%和 1.98%),无法满足鱼类生长对蛋白质的需求,且稻草的适口性差,导致摄食率下降,使得草鱼的生长性能变差。FS 组的大部分生长指标较 DS 组稍高,说明鲜稻草用作草鱼饲料比干稻草的效果好,可在一定程度上提高草鱼的生长性能<sup>[17]</sup>。DS 组与 FS 组草鱼的肠长比和肠重比显著低于 CF 组,表明投喂稻草在一定程度上影响了肠道发育。本研究结果与 HOSSAIN 等<sup>[17]</sup>用水草喂草鱼可提高其生长性能的研究结果相反,原因可能是水草是经加工成饲料投喂,其营养全面,而本研究仅投喂未加工的稻草,其营养单一。因此,为了获得更好的养殖经济效益,在稻渔轮作时,应结合投喂部分的人工配合饲料,使养殖鱼类的营养均衡,从而获得较高的产量。

### 3.2 稻草对草鱼血清生化指标的影响

血清指标在一定程度上反映了鱼体免疫和生理状况。血清总蛋白(TP)由 ALB 和 GLB 组成,在免疫和新陈代谢方面具有重要作用<sup>[18]</sup>。血清中 TCHOL 和 TG 含量是反映鱼类机体脂类代谢与应激水平的重要指标<sup>[19]</sup>。TG 是鱼机体脂类代谢的主

要产物,其主要在肝脏合成;TCHOL 是血液中各种脂蛋白所含胆固醇的总和,HDL-C 和 LDL-C 是其存在形式,血清中 HDL-C 和 LDL-C 水平主要反映脂类在机体内的吸收和代谢状况<sup>[20]</sup>。在本试验中,CF 组的 TP、ALB 和 GLB 含量显著高于 DS 和 FS 组,可能是配合饲料营养相对于稻草更均衡且含量更高所致。DS 组的 TP 和 ALB 显著高于 FS 组,而 GLB 无显著性差异,其原因可能是干稻草适口性较差,用其作为饲料,草鱼因摄食不足而长期处于饥饿状态,导致血清 TP 和 ALB 高于摄食鲜稻草的草鱼。CF 组草鱼血清 TCHOL、TG、HDL-C 和 LDL-C 最高,在一定程度上表明投喂配合饲料促进了脂肪合成,这与 YOUSEFI 等<sup>[21]</sup>的研究结果相似,推测原因可能是稻草营养不足以维持鱼类自身的生理需求,从而分解机体脂肪以满足自身生存需要,导致血脂降低。

### 3.3 稻草对草鱼肠道组织结构和肠道菌群的影响

肠道是草鱼消化吸收的主要器官<sup>[22]</sup>,同时具有选择性渗透屏障功能,可以抵御病原体入侵,防止细菌、病毒等进入机体内部<sup>[23]</sup>。肠道的肌层和绒毛在一定程度上可反映机体对物质的消化吸收能力,绒毛高度和绒毛宽度增加,肠道表面积增大,消化吸收能力增强<sup>[24-25]</sup>。在本研究结果显示,DS 组的肠道组织完整度明显低于 CF 和 FS 组,说明投喂干稻草对草鱼肠道造成了损伤,降低了肠道的消化吸收能力,这与 SELIM 等<sup>[26]</sup>对母牛的研究结果相反。程辉辉<sup>[27]</sup>研究表明,种青养鱼对鱼肠道无损伤,这与本研究鲜稻草喂草鱼的结果相似。因此,稻渔轮作中需根据稻草品质进行投喂。

微生物的种类与数量对草鱼的生长和代谢有重要影响,可反映草鱼的健康状况<sup>[25]</sup>。本研究中,CF、DS 和 FS 组草鱼肠道菌群的优势菌门均是厚壁菌门、变形菌门、放线菌门和蓝细菌门,其中厚壁菌门相对丰度最大,分别为 73.31%、58.62%和 32.89%,但各组的优势菌属并不相同,CF 组中相对丰度最大的是链球菌属,DS 组中相对丰度最大的是梭状芽胞杆菌属,FS 组中相对丰度最大的是 *norank\_f\_norank\_o\_Chloroplast*。上述结果表明,3 组草鱼肠道优势菌群在门水平上具有一致性<sup>[27]</sup>,可能是摄食饵料的不同造成了 FS 组草鱼优势菌门相对丰度降低和 3 组优势菌属各不相同的差异<sup>[28]</sup>。有研究表明,厚壁菌门可以控制机体的能量平衡,变形菌门与鱼体健康状况关系密切,放线菌门可维持肠道稳态<sup>[29-30]</sup>,据此可知 CF 组的肠道菌群较 FS 组

更健康。DS组草鱼肠道中相对丰度最高的是梭状芽胞杆菌,该菌是厌氧致病菌,过多会导致鱼体死亡<sup>[31]</sup>,这表明稻草对鱼体产生了不利影响。同时由Venn图可知,饲喂鲜稻草可增加草鱼肠道微生物种数,使草鱼肠道内环境更加稳定。本研究结果提示,在开展稻渔轮作时,为了提高养殖鱼类的健康和生长速度,可以采取鲜稻草和配合饲料结合投喂的方式进行。

## 4 结 论

与投喂配合饲料相比,单一摄食稻草的草鱼生长性能过低,对肠道也造成了一定的损伤,降低了免疫力和肠道菌群丰度。因此,在稻渔轮作中,为了获得更好的产量和经济效益,建议补充一些配合饲料,以弥补单一摄食稻草而造成的营养不足。

### [参考文献]

[1] 王广军,蔡云川,符云. 稻渔综合种养技术与典型模式 [M]. 北京:中国农业出版社,2023.  
WANG G J, CAI Y C, FU Y. Comprehensive planting and breeding technology and typical model of rice and fishery [M]. Beijing:China Agriculture Press,2023.

[2] AKAY H. Grain and straw yield of paddy cultivars and feed quality traits of paddy straw [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2022, 74(3): 549-560.

[3] RAMOS M, LAVERIANO E, SAN SEBASTIÁN L, et al. Rice straw as a valuable source of cellulose and polyphenols: applications in the food industry [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 131: 14-27.

[4] 罗浩威,殷雨洋,黄杰,等. 湖州地区稻草秸秆饲料化利用的现状与对策 [J]. *当代畜牧*, 2023(7): 123-124.  
LUO H W, YIN Y Y, HUANG J, et al. Current situation and countermeasures of rice straw feed utilisation in Huzhou area [J]. *Contemporary Animal Husbandry*, 2023(7): 123-124.

[5] 鲁旭锋,朱慧霞,吴欢,等. 微生物发酵稻草秸秆生产蛋白饲料培养条件优化 [J]. *中国酿造*, 2021, 40(4): 66-71.  
LU X F, ZHU H X, WU H, et al. Optimization of culture conditions for protein feed production from straw stalks by microbial fermentation [J]. *China Brewing*, 2021, 40(4): 66-71.

[6] 李聚才,施安,樊华,等. 不同复合氨化处理稻草对育成羊瘤胃干物质降解率的影响 [J]. *中国饲料*, 2018(15): 85-90.  
LI J C, SHI A, FAN H, et al. The effect of the degradation rate of dry matter in rumen of ram Hogg by different compound ammoniated treating straw [J]. *China Feed*, 2018(15): 85-90.

[7] 胡松梅,龚泽修,张翠永,等. 不同添加比例的稻草、玉米秸秆混合青贮饲料品质分析及其对荷斯坦牛干物质采食量和产奶性能的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(4): 100-105.  
HU S M, GONG Z X, ZHANG C Y, et al. Quality analysis of mixed silage of rice straw and corn straw with different addi-

tion ratios and its effects on dry matter intake and milk production performance of Holstein cattle [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(4): 100-105.

[8] 王庆,张巧娥,吴少飞,等. 宁夏不同地区稻草营养价值的评定 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(1): 96-102.  
WANG Q, ZHANG Q E, WU S F, et al. Evaluation of the nutritional value of rice straw in different regions of Ningxia [J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2022(1): 96-102.

[9] GENIS S, VERDU M, CUCURULL J, et al. Complete feed versus concentrate and straw fed separately: effect of feeding method on eating and sorting behavior, rumen acidosis, and digestibility in crossbred Angus bulls fed high-concentrate diets [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 273: 114820.

[10] MONJEZI Y, SARI M, CHAJI M, et al. Effects of concentrate starch level and free-choice provision of straw on performance, feeding behaviour and feed sorting of fattening lambs [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2022, 256: 105773.

[11] BABA S, YUDU S, NURLELAH S. The effect of subjective norm on farmer behaviour in utilizing rice straw as feed in Barru district [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 788(1): 012160.

[12] 侯廷龙,刘惠茹,涂彦芳,等. 饲料中添加丁酸梭菌对草鱼生长性能、免疫力及抗嗜水气单胞菌的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(6): 1195-1204.  
HOU T L, LIU H R, TU Y F, et al. Effect of dietary *Clostridium butyricum* supplementation on grass carp growth performance, immunity, and resistance against *Aeromonas hydrophila* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(6): 1195-1204.

[13] 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. 2023 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京:中国农业出版社,2023.  
Bureau of Fisheries and Fishery Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National General Station of Aquatic Technology Promotion, Chinese Fisheries Society. 2023 China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.

[14] 张敏. 稻草粉经生化处理后养鱼效益明显 [J]. *水产科技情报*, 1986, 13(6): 28.  
ZHANG M. After biochemical treatment of rice straw powder, the benefit of fish culture is obvious [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1986, 13(6): 28.

[15] PAN L, QIAN J H, LIU H Y, et al. Implications on growth performance, glucose metabolism, PI3K/AKT pathway, intestinal flora induced by dietary taurine in a high-carbohydrate diet for grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2024, 131(1): 27-40.

[16] 陈丽婷. 3种优质青饲料对草鱼饲养效果及投喂技术研究 [D]. 长沙:湖南农业大学, 2013.  
CHEN L T. The effects of 3 qualified forage on feeding value and feeding technology in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)



- [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [17] HOSSAIN M M, ALI M L, KHAN S, et al. Use of Asian watergrass as feed of grass carp [J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 18: 100434.
- [18] GOKULAKRISHNAN M, KUMAR R, PILLAI B R, et al. Dietary brewer's spent yeast enhances growth, hematological parameters, and innate immune responses at reducing fishmeal concentration in the diet of climbing perch, *Anabas testudineus* fingerlings [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 982572.
- [19] 魏凯, 马龙, 李小龙, 等. 饲料中添加不同硒源对细鳞鲑幼鱼生长性能、血清生化指标和肝脏抗氧化能力的影响研究 [J]. *中国水产*, 2023(9): 73-77.
- WEI K, MA L, LI X L, et al. Effects of adding different selenium sources to feed on growth performance, serum biochemical indexes and liver antioxidant capacity of juvenile *Chinook salmon* [J]. *China Fisheries*, 2023(9): 73-77.
- [20] KRAJNOVIC O M, OZRETIC B. Detection and evaluation of hepatic intoxication in fish [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(4): 233-243.
- [21] YOUSEFI M, NEDAEI S, NADERI FARSAANI M, et al. Dietary chrysin supplementation improves growth performance, immune responses, antioxidant status, and resistance against crowding stress in rainbow trout [J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 32: 101708.
- [22] 毕冰, 孙中武, 毛天强, 等. 鲤、鲢、鳙、草鱼消化道结构与食性的研究 [J]. *水产学杂志*, 2011, 24(1): 26-29.
- BI B, SUN Z W, MAO T Q, et al. Relationship between digestive tract structure and feeding habits in common carp, grass carp, silver carp and bighead carp [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2011, 24(1): 26-29.
- [23] YANG P X, YANG W N, HE M, et al. Dietary synbiotics improved the growth, feed utilization and intestinal structure of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) juvenile [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(2): 590-600.
- [24] JANG W J, LEE J M, HASAN M T, et al. Effects of probiotic supplementation of a plant-based protein diet on intestinal microbial diversity, digestive enzyme activity, intestinal structure, and immunity in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 92: 719-727.
- [25] 孙悦, 王广军, 张凯, 等. 稻田环境对鲤血清生化指标、肠道组织形态及细菌群落结构的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(4): 601-612.
- SUN Y, WANG G J, ZHANG K, et al. Effects of paddy field environment on serum biochemical indexes, intestinal tissue-morphology and bacterial community structure of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(4): 601-612.
- [26] ABU S M S, MAHBUB S, MUEENA J, et al. Effects of probiotic-treated rice straw on blood parameters and gut microbes of heifers [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2019, 14(35): 2032-2037.
- [27] 程辉辉. 种青养鱼模式下草鱼肌肉营养成分和品质特性 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- CHENG H H. Muscular nutritional components and meat quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) cultured under the model of cultivating fish with grass [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [28] QIN Y, HOU J, DENG M, et al. Bacterial abundance and diversity in pond water supplied with different feeds [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35232.
- [29] 荣华, 谢雨晴, 赵涛, 等. 四种不同食性鱼类肠道微生物群落组成及多样性比较分析 [J]. *渔业科学进展*, 2024, 45(4): 75-84.
- RONG H, XIE Y Q, ZHAO T, et al. Comparative analysis of the composition and diversity of the intestinal microflora of four fishes with different feeding habits [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(4): 75-84.
- [30] 胡晓伟. 山药多糖与枸杞多糖对大鳞鲂肠道菌群及生长性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2023.
- HU X W. Effects of yam polysaccharide and *Lycium barbarum* polysaccharide on intestinal flora and growth performance of *Luciobarbus capito* [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2023.
- [31] WANG Y, WU P C, JIANG W D, et al. Effect of dietary supplementation of the quenching enzyme AiiO-AIO6 on growth performance, digestion and absorption capacity, and intestinal barrier function of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Aquaculture*, 2024, 579(6): 740243.

(责任编辑: 马秋明)