

王文娟, 张 曼, 韦良茄, 等. 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长性能、肠道组织结构和抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2122-2130.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.016

桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长性能、肠道组织结构和抗氧化能力的影响

王文娟¹, 张 曼¹, 韦良茄¹, 李 萍¹, 谢明宏¹, 杨 枝¹, 马陇鑫¹, 韦俊广¹, 郑云峰²

(1. 西南大学水产学院, 重庆 400715; 2. 云南绿宝香精香料股份有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 为探究桉叶精油对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)幼鱼生长发育的影响, 本研究以黄颡鱼幼鱼为研究对象, 在黄颡鱼基础饲料中添加不同含量的桉叶精油(L16处理、L32处理、L48处理、L64处理桉叶精油添加量分别为0.16 mL/kg、0.32 mL/kg、0.48 mL/kg、0.64 mL/kg), 并评估黄颡鱼幼鱼的生长性能、抗氧化能力及肠道健康状况。结果表明, 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长和形体指标没有影响。桉叶精油能够改善黄颡鱼幼鱼肠道组织结构, 其中L48处理和L64处理效果较好。L48处理黄颡鱼幼鱼前肠肌层厚度、中肠绒毛长度、中肠绒毛宽度、中肠肌层厚度均显著高于对照($P < 0.05$)。L64处理黄颡鱼幼鱼中肠和后肠的绒毛长度、绒毛宽度、肌层厚度均显著高于对照($P < 0.05$)。同时桉叶精油能够提高黄颡鱼幼鱼肝脏和肠道超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性, 其中L48处理和L64处理效果较好。综上, 在黄颡鱼基础饲料中, 桉叶精油较适宜的添加量为0.48~0.64 mL/kg。本研究结果可为桉叶精油在水产养殖中的应用提供理论依据。

关键词: 桉叶精油; 黄颡鱼; 肠道组织结构; 抗氧化能力

中图分类号: S963.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)11-2122-09

Effects of eucalyptus essential oil on growth performance, intestinal histology, and antioxidant capacity of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

WANG Wenjuan¹, ZHANG Man¹, WEI Liangjia¹, LI Ping¹, XIE Minghong¹, YANG Zhi¹,
MA Longxin¹, WEI Junguang¹, ZHENG Yunfeng²

(1. College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Yunnan Emerald Essence Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: To investigate the effects of eucalyptus essential oil on the growth and development of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*, this study used juvenile *P. fulvidraco* as the research object. Different concentrations of eucalyptus essential oil were added to the basal diet of juvenile *P. fulvidraco* (the additions of eucalyptus essential oils in treatments L16, L32, L48, L64 were 0.16 mL/kg, 0.32 mL/kg, 0.48 mL/kg, 0.64 mL/kg, respectively), and their growth performance, antioxidant capacity and intestinal health were evaluated. The results indicated that eucalyptus essential oil had no effect on the growth or morphological indices of juvenile *P. fulvidraco*. However, eucalyptus essential oil was able to improve the intestinal histological structure of juvenile *P. fulvidraco*, with L48 and L64 treatments showing better effects. Specifically, the anterior intestinal muscularis thickness, mid-intestinal villus length, mid-intestinal villus width, and mid-intestinal muscularis thickness of juvenile *P. fulvidraco* under L48 treatment were significantly higher than those of control ($P < 0.05$). The villus length, villus width, and muscularis thickness of both the mid-intestine and hind-intestine of juvenile *P. fulvidraco* under L64 treatment were

收稿日期: 2024-04-08

作者简介: 王文娟(1979-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事水产动物营养与饲料研究。(E-mail) wangwenjuan1997@163.com

通讯作者: 郑云峰, (E-mail) zhengyf008@163.com

significantly higher than those of control ($P < 0.05$). Additionally, eucalyptus essential oil enhanced the activities of superoxide dismutase and glutathione peroxidase in the liver and intestine of juvenile *P. fulvidraco*, with L48 and L64 treatments exhibiting superior effects. In summary, the optimal concentration range for adding eucalyptus essential oil to the basal diet of juvenile *P. fulvidraco* is 0.48 mL/kg to 0.64 mL/kg. The results of this study provide a theoretical basis for the application of eucalyptus oil in aquaculture.

Key words: eucalyptus essential oil; *Pseudobagrus fulvidraco*; intestinal histology; antioxidant capacity

桉叶精油是一种从桉树、香樟树等植物的枝叶中提取的无色或淡黄色液体混合物,具有独特的清凉桉叶气味^[1]。桉叶精油的主要化学成分是一些相对分子量较小的萜类化合物,如 1,8-桉叶素、 α -蒎烯^[2]、柠檬烯、松油醇^[3]等,这些化合物大多极性较低或者无极性^[4]。其中,1,8-桉叶素是桉叶精油的主要活性成分,其分子式为 $C_{10}H_{18}$ 。桉叶精油具有抗菌、杀虫、抗氧化、消炎和镇痛等功效^[5],已经被广泛用于医疗、护理、食品和美容等多个领域^[6-8]。自 2020 年 7 月 1 日起,中国全面禁止抗生素类饲料添加剂的使用,开发抗生素的替代品迫在眉睫。目前,研究发现,桉树提取物、桉叶粉、桉叶精油能够提高 AA 肉鸡、罗斯 308 肉鸡、白羽肉鸡和小鼠的生长性能及免疫器官指数和抗氧化能力^[3,9-11],并且能够提高荷斯坦雄性犍牛的摄食量,提高犍牛对酸性洗涤纤维、粗蛋白和干物质的消化率,进而促进犍牛增重^[12];Wang 等^[13]发现,在体外试验中,桉叶精油能够减少甲烷的释放量,而对挥发性脂肪酸含量没有影响。

在水产领域,相关研究大多集中于 1,8-桉叶素对水产动物的影响。研究发现,1,8-桉叶素具有降低血脂、抗炎、抗氧化、缓解应激的作用^[14-15],能够缓解鲤(*Cyprinus carpio*)^[16]、大口黑鲈(*Micropterus salmoides* L.)^[17]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[18]受到的拥挤胁迫、氨氮胁迫和应激反应,提高动物的成活率。除此之外,桉叶素具有镇静、麻醉作用,作为麻醉剂,其对虹鳟的副作用低于丁香酚^[19]。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)别名“黄辣丁”、“刺黄股”、“角角鱼”等,是中国重要的优质水产养殖品种^[19]。其肉质细嫩,无肌间刺,味道鲜美,营养丰富,深受消费者的喜爱^[20]。为满足市场需求,黄颡鱼高密度集约化养殖模式迅速发展。然而,由于水环境污染加剧、病原微生物孳生,黄颡鱼病害频发,使黄颡鱼养殖业遭受了巨大的损失。作为一种无鳞鱼类,黄颡鱼对药物的耐受度较低,因此黄颡

鱼病害防治应以预防为主。桉叶精油是一种具有抗菌、抗氧化、抗炎等多种功能的新型饲料添加剂,具有良好的应用潜力,有助于促进水产养殖业的健康可持续发展。本研究拟在黄颡鱼幼鱼饲料中添加不同含量的桉叶精油,分析其对黄颡鱼生长性能、肠道组织结构及抗氧化能力的影响,旨在为黄颡鱼大规模养殖提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

基础饲料组成如表 1 所示,其营养水平如表 2 所示。主要蛋白质源为秘鲁鱼粉、豆粕;主要脂肪源为大豆油。在基础饲料中分别添加 0 mL/kg、0.16 mL/kg、0.32 mL/kg、0.48 mL/kg、0.64 mL/kg 桉叶精油。每种原料粉碎后过 60 目筛,按照饲料配方精确称量,采用逐级扩大法混匀,加入豆油和适量水充分混合后,制成颗粒饲料,晒干后置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存备用。乳化桉叶精油(1,8-桉叶素含量 $\geq 20\%$,薄荷脑含量 $\geq 0.5\%$)购自云南绿宝香香料股份有限公司(产品批号:2023070904)。

1.2 试验设计

试验所用黄颡鱼幼鱼购自重庆市荣昌区双河渔业养殖服务中心。购买的鱼苗经 3% NaCl 溶液消毒后置于西南大学水产学院校内养殖基地的水泥池(2.35 m \times 1.20 m \times 0.70 m)中暂养 14 d 后,挑选规格相似、体质健壮、初始体重为(1.16 \pm 0.02) g 的幼鱼 375 尾,随机分为 5 组,分别为饲喂基础饲料的对照(CK)、基础饲料+0.16 mL/kg 桉叶精油处理(L16)、基础饲料+0.32 mL/kg 桉叶精油处理(L32)、基础饲料+0.48 mL/kg 桉叶精油处理(L48)、基础饲料+0.64 mL/kg 桉叶精油处理(L64),每处理 3 个重复,每个重复 25 尾鱼,分别饲养于水族缸(0.90 m \times 0.40 m \times 0.40 m)中。

1.3 饲养管理

试验在西南大学水产学院养殖基地蠡园进行,

为期 70 d。每日定时于 8:00、12:00、18:00 定点投喂饲料,及时清理残饵和排泄物以保证水质清澈。记录黄颡鱼幼鱼的摄食、健康状况,每日换水 1 次,换水量约为总水量的 1/3。定期测定水质、水温。养殖试验期间,保持水溶氧量高于 6.5 mg/L,亚硝酸盐质量浓度低于 0.01 mg/L,水温 23.0~27.9 ℃,pH 值 7.0~8.0,氨氮含量低于 0.05 mg/L。

表 1 基础饲料组成

Table 1 Composition of the basal diet

成分	含量 (%)
鱼粉	35.00
豆粕	32.00
面粉	25.00
豆油	4.00
麸皮	2.00
氯化胆碱	0.30
磷酸二氢钙	1.50
预混料	0.20
总计	100.00

氯化胆碱有效含量为 60%。预混料为每千克饲料提供:维生素 A 5 100 IU,维生素 D₃ 4 800 IU,维生素 E 4.80 mg,维生素 K₃ 0.30 mg,维生素 B₁ 3.00 mg,维生素 B₂ 1.80 mg,维生素 B₆ 1.20 mg,维生素 B₁₂ 0.03 mg,甲硫氨酸 6.00 mg,硫酸铜 41.80 mg,硫酸铁 312.00 mg,硫酸锰 3.60 mg,硫酸锌 6.00 mg,碘化钾 0.60 mg,轻质碳酸钙 0.36 mg。以干物质计。

表 2 基础饲料营养水平

Table 2 Nutrient levels of the basal diet

指标	含量 (%)
粗蛋白	39.25
粗脂肪	8.55
粗灰分	11.59

营养水平为实测值。

1.4 样品采集与分析

饲养试验结束后,禁食 24 h,对每缸鱼进行计数、称重。每缸随机挑选 3 尾鱼,用 3-氨基苯甲酸乙酯甲磺酸盐 (MS-222) 麻醉后称重,在冰盘上解剖,分离并称取内脏团、肝脏以及肠道的重量。将肠道分为前、中、后肠 3 段,分别取样并固定于 4% 多聚甲醛溶液中,用于制作石蜡切片。再取一部分肠道和肝脏样品保存于 -80 ℃ 冰箱中,用于肝脏、肠道内抗氧化酶活性和丙二醛含量的测定。

1.4.1 组织学分析 冲洗肠道组织 24~48 h,脱水、透明、浸蜡、包埋并切片,采用苏木精-伊红 (H.E) 染

色,中性树胶封片。利用 Image-Pro Plus 6 图像处理软件对肠道切片图像进行分析,测定前肠、中肠和后肠的绒毛长度、绒毛宽度和肌层厚度。

1.4.2 抗氧化能力 肝脏超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活性、丙二醛 (MDA) 含量测定采用苏州梦犀生物试剂盒测定;肠道 SOD 活性、GSH-Px 活性、MDA 含量以及总蛋白质 (TP) 浓度采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

1.5 计算公式

1.5.1 生长指标 生长指标包括增重率 (WGR)、特定生长率 (SGR)。

$$WGR = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$$

$$SGR = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$$

式中, W_t 为终末体重 (g); W_0 为初始体重 (g); t 为试验周期 (70 d)。

1.5.2 形体指标 形体指标包括脏体比 (VSI)、肝体比 (HSI)、肠体比 (IWI)、肥满度 (CF)。

$$VSI = W_v / W_t \times 100\%$$

$$HSI = W_h / W_t \times 100\%$$

$$IWI = W_l / W_t \times 100\%$$

$$CF = W_v / L^3 \times 100\%$$

式中, W_v 为内脏重 (g); W_t 为终末体重 (g); W_h 为肝脏重 (g); W_l 为肠道重 (g); L 为鱼体长 (cm)。

1.6 数据统计与分析

用 Excel 2018 初步统计和计算试验数据,用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA),并使用 Duncan's 法进行多重比较,试验结果以平均值±标准差 (mean±SD) 表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长和形体指标的影响

如表 3 所示,经过 70 d 饲养后,各处理黄颡鱼幼鱼终末体重、增重率、特定生长率均无显著差异 ($P > 0.05$),各处理黄颡鱼幼鱼的脏体比、肝体比、肠体比及肥满度也无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼肠道组织结构的影响

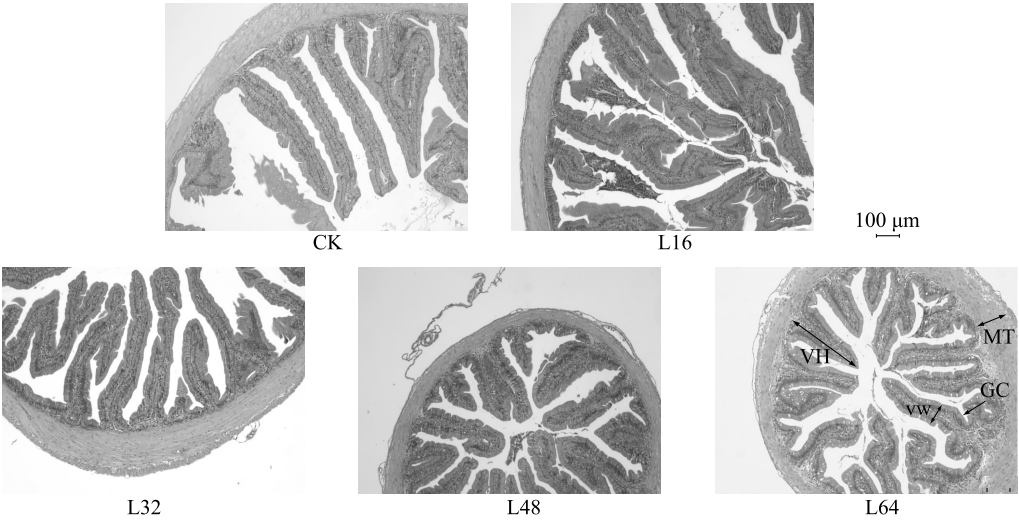
2.2.1 前肠肠道组织结构 如图 1 所示,对照黄颡鱼幼鱼前肠肠绒毛细长且稀疏。L32 和 L48 处理黄颡鱼幼鱼肠绒毛相对较紧密,充满整个肠腔。如表

4 所示,各处理黄颡鱼幼鱼前肠绒毛长度和宽度均并无显著性变化 ($P>0.05$),但添加桉叶精油的 L16、L32、L48 和 L64 处理黄颡鱼幼鱼肌层厚度均显著高于对照 ($P<0.05$)。

表 3 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长性能和形体指标的影响
Table 3 Effect of eucalyptus essential oil on growth performance and morphometric parameters of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

指标	CK	E16	E32	E48	E64
初始体重(g)	1.15±0.01a	1.16±0.01a	1.16±0.01a	1.17±0.01a	1.16±0.03a
终末体重(g)	7.00±0.05a	6.36±0.93a	6.66±0.73a	6.24±0.24a	6.57±0.99a
增重率(%)	506.57±5.78a	451.65±81.02a	474.22±59.78a	437.42±21.47a	464.01±81.28a
特定生长率(%)	2.72±0.06a	2.61±0.22a	2.67±0.16a	2.58±0.06a	2.65±0.22a
脏体比(%)	7.42±1.12a	7.57±0.77a	7.69±1.84a	8.13±1.21a	7.83±0.80a
肝体比(%)	2.30±0.44a	2.54±1.61a	2.07±0.70a	2.66±0.54a	2.33±0.37a
肠体比(%)	2.38±1.35a	2.55±0.93a	2.38±0.95a	2.30±0.49a	2.32±0.39a
肥满度(%)	2.36±0.25a	2.06±0.28a	2.17±0.35a	2.26±0.30a	2.05±0.27a

CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。



CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。VH: 绒毛长度; VW: 绒毛宽度; MT: 肌层厚度; IWT: 肠壁厚度; GC: 杯状细胞。

图 1 饲料桉叶精油水平对黄颡鱼幼鱼前肠肠道组织结构的影响
Fig.1 Effects of eucalyptus essential oil on anterior intestinal histological structure of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

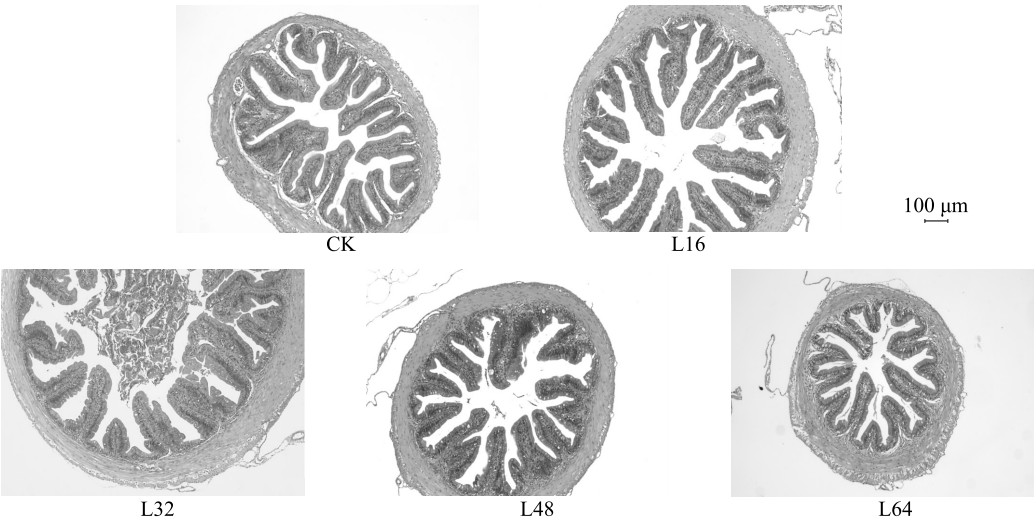
表 4 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼前肠绒毛长度、绒毛宽度和肌层厚度的影响
Table 4 Effects of eucalyptus essential oil on villus length, villus width and muscular thickness of the foregut of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

指标	CK	L16	L32	L48	L64
绒毛长度(μm)	579.8±68.5a	483.8±313.6a	513.0±104.6a	515.8±185.8a	690.0±349.7a
绒毛宽度(μm)	91.8±12.4a	76.0±29.8a	83.7±18.0a	110.7±88.3a	99.8±40.5a
肌层厚度(μm)	57.1±33.0c	126.0±25.5ab	123.9±48.3ab	145.5±57.7a	113.2±26.6b

CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2.2 中肠肠道组织结构 黄颡鱼幼鱼中肠的肠道组织结构如图 2 所示,随着饲料中桉叶精油添加

量的升高,黄颡鱼幼鱼中肠肠绒毛长度、宽度和肌层厚度均增加。如表 5 所示,L48 处理、L64 处理黄颡鱼幼鱼中肠肠绒毛长度、宽度和肌层厚度均显著高于对照($P<0.05$)。L48 处理黄颡鱼幼鱼中肠肠绒毛长度显著高于对照、L16 处理、L32 处理、L64 处理($P<0.05$)。



CK: 饲喂基础饲料对照;L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理;L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理;L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理;L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。

图 2 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼中肠肠道组织结构的影响

Fig.2 Effects of eucalyptus essential oil on midgut histological structure of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

表 5 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼中肠绒毛长度、绒毛宽度和肌层厚度的影响

Table 5 Effects of eucalyptus essential oil concentrations on villus length, villus width and muscular thickness of the midgut of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

指标	CK	L16	L32	L48	L64
绒毛长度(μm)	187.6±34.7c	202.3±85.7c	274.8±68.6c	583.7±166.3a	441.1±154.4b
绒毛宽度(μm)	86.1±20.2b	84.0±16.6b	104.7±19.7b	182.9±29.5a	183.7±43.4a
肌层厚度(μm)	87.2±26.2b	85.9±26.2b	106.5±61.5b	138.9±30.4a	159.3±52.0a

CK: 饲喂基础饲料对照;L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理;L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理;L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理;L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2.3 后肠肠道组织结构 黄颡鱼幼鱼后肠的肠道组织结构如图 3 所示,未添加桉叶精油的对照黄颡鱼幼鱼后肠绒毛短而稀疏。如表 6 所示,添加桉叶精油对肠道组织结构有改善作用,其中 L64 处理黄颡鱼幼鱼后肠肠绒毛长度、宽度和肌层厚度均显著高于对照($P<0.05$)。

2.3 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼抗氧化酶活性的影响

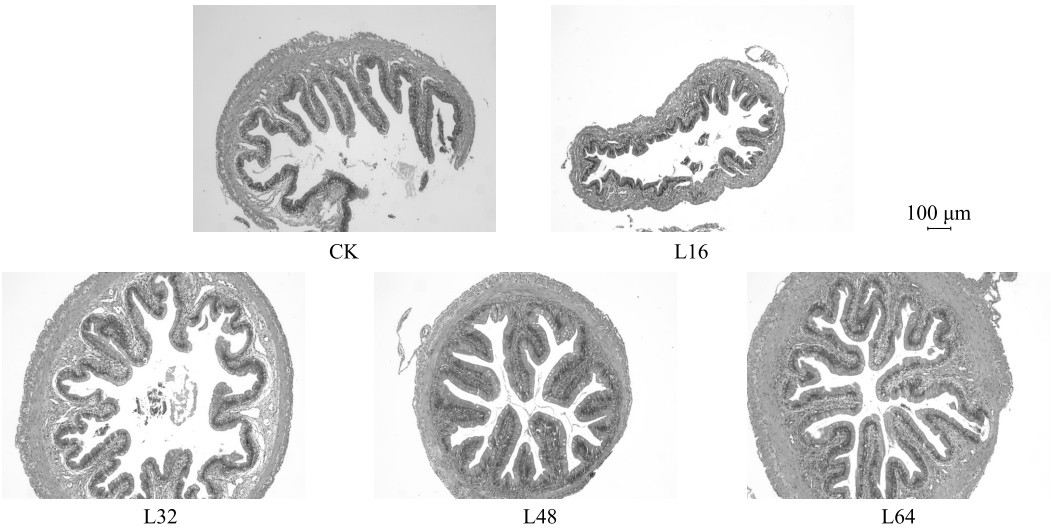
如表 7 所示,饲喂桉叶精油能提高黄颡鱼幼鱼肝脏的抗氧化力。L48 处理黄颡鱼幼鱼肝脏中超氧化物歧化酶(*SOD*)、谷胱甘肽过氧化物酶(*GSH-Px*)活性显著高于对照($P<0.05$),各处理黄颡鱼幼鱼肝脏中丙二醛含量无显著差异($P>0.05$)。L48 处理和 L64 处理黄颡鱼幼鱼肠道中 *SOD*、*GSH-Px* 活性显

著高于对照($P<0.05$),各处理黄颡鱼幼鱼肠道中丙二醛含量无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼生长性能的影响

动物生长性能与营养物质的摄入、消化吸收及机体的健康状况密切相关。桉叶精油富含多种萜烯类芳香化合物,其独特的气味能够刺激动物的食欲,改善饲料的适口性,从而提高动物对于干物质的摄入量,提高生长性能^[21-22]。Nie 等^[12]的研究结果表明,持续 8 周每天给雄性犍牛饲喂 0.5 g 桉树精油,犍牛对日粮干物质、粗蛋白及酸性洗涤纤维的消化率显著提高。目前,关于桉叶精油影响水产动物生长性能的研究较少。



CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。

图3 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼后肠道组织结构的影响
Fig.3 Effects of eucalyptus essential oil on hindgut histological structure of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

表6 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼后肠绒毛长度、绒毛宽度和肌层厚度的影响

Table 6 Effects of eucalyptus essential oil on villus length, villus width and muscular thickness of the hindgut of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

指标	CK	L16	L32	L48	L64
绒毛长度(μm)	217.4±46.9b	235.1±136.1b	192.8±50.0b	257.0±77.5ab	341.1±181.4a
绒毛宽度(μm)	83.4±17.2b	101.3±49.9ab	101.3±18.7ab	104.6±37.3ab	135.8±47.2a
肌层厚度(μm)	58.9±12.4b	28.6±7.4c	89.4±47.2a	70.4±20.1ab	91.2±61.1a

CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表7 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼抗氧化能力的影响

Table 7 Effects of eucalyptus essential oil on antioxidant capacity of juvenile *Pseudobagrus fulvidraco*

器官	抗氧化指标	CK	L16	L32	L48	L64
肝脏	超氧化物歧化酶活性(U/mg)	56.66±7.21bc	55.45±6.64c	68.15±6.76ab	76.57±4.90a	71.28±5.83a
	谷胱甘肽过氧化物酶活性(U/mg)	72.24±17.80b	80.13±29.99b	112.29±16.43ab	148.27±20.63a	96.39±7.99ab
	丙二醛含量(nmol/mg)	3.82±0.93a	4.02±0.35a	2.35±0.39a	2.86±0.52a	2.77±0.14a
肠道	超氧化物歧化酶活性(U/mg)	47.05±3.39c	50.15±5.09bc	51.50±8.70bc	64.04±5.59a	58.39±3.68ab
	谷胱甘肽过氧化物酶活性(U/mg)	134.95±12.48b	125.39±23.56b	151.81±24.53b	198.35±19.40a	203.82±10.09a
	丙二醛含量(nmol/mg)	5.71±0.32a	6.38±1.34a	5.65±0.53a	4.70±1.21a	4.82±1.48a

CK: 饲喂基础饲料对照; L16: 饲喂基础饲料+0.16 mL/kg桉叶精油处理; L32: 饲喂基础饲料+0.32 mL/kg桉叶精油处理; L48: 饲喂基础饲料+0.48 mL/kg桉叶精油处理; L64: 饲喂基础饲料+0.64 mL/kg桉叶精油处理。同一行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

已有研究结果表明,植物提取物能够通过改善水产动物的健康状况提高其生长性能^[23-24]。Hoseini等^[25]研究发现,持续50 d每天给虹鳟饲喂含0.05%~1.00% 1,8-桉叶素的日粮,可显著提高虹鳟的生长性能,当桉叶素含量为0.84%~0.88%时效果

最佳;同时,其血清总蛋白、球蛋白、血红蛋白含量升高,甘油三酯含量、胆固醇含量、谷丙转氨酶活性、谷草转氨酶活性降低。桉叶素可以改善遭受拥挤胁迫的虹鳟生长性能,可能是因为桉叶素能够降低虹鳟血清中皮质醇水平^[18,26]。本研究中,饲喂桉叶精油

的黄颡鱼幼鱼的部分生长性能和形体指标没有显著提高,这可能与鱼种类或鱼的生理阶段有关。

3.2 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼肠道组织结构的影响

鱼类的肠道是其主要的消化器官,肠道结构的完整性对鱼类的消化吸收和生长发育至关重要。肠绒毛是肠黏膜表面的特殊结构,由黏膜上皮和固有膜突向肠腔形成,其作用在于增加肠道的内表面积,从而提高肠道对饲料的消化吸收效率。当肠绒毛长度和宽度增加时,肠道的吸收能力也随之增强^[27]。目前,关于桉叶精油影响胃肠道组织结构及屏障完整性的研究较少。Caldas 等^[28]发现,1,8-桉叶素能够修复大鼠胃黏膜和黏膜下层,恢复腺细胞分泌黏液的功能,保护胃黏膜免受急性损伤并加速受损黏膜的愈合。Akinrinde 等^[29]发现,口服桉叶精油能够缓解黄曲霉毒素 B₁引起的小鼠胃和十二指肠的损伤。

本研究结果表明,饲喂桉叶精油可以显著提高黄颡鱼幼鱼肠绒毛长度和宽度。植物精油通过破坏肠道有害菌细胞结构,影响其代谢,从而抑制或杀灭有害菌,有助于改善肠道组织形态^[30-31]。此外,桉叶精油的抗氧化特性能够减少自由基对机体组织的氧化损伤,从而维持肠道组织形态。Akinrinde 等^[29]发现,小鼠口服桉叶精油后,其胃肠道抗氧化酶活性升高,丙二醛含量降低,这与本研究结论一致。肌层厚度是反映肠道收缩能力的重要指标,肌层厚度的增加有助于提高肠道对内容物的消化能力,从而提高生长性能^[32]。本研究发现,饲喂桉叶精油可以增加黄颡鱼幼鱼肠道肌层厚度,基础饲料中添加桉叶精油的处理黄颡鱼幼鱼前肠肌层厚度均显著高于对照。

3.3 桉叶精油对黄颡鱼幼鱼肝脏和肠道抗氧化能力的影响

抗氧化防御系统中的关键酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等^[11]。SOD能够高效催化超氧负离子歧化反应^[18],构筑生物体抗氧化防御的第一道防线,同时在免疫系统起到核心作用。GSH-Px广泛存在于生物体内,特别是在动物的肝脏和红细胞中,其酶活性可以催化H₂O₂转化成水,对维持机体免疫功能和代谢活动具有重要意义。

研究结果表明,在肉鸡、小鼠、犊牛的饲料或饮水中添加桉叶精油或桉叶提取物,可显著提高血清、肝脏、肾脏中的抗氧化酶如GSH-Px、T-SOD、过氧化氢酶的活性,同时显著降低丙二醛含量^[3,11-12]。Zhao

等^[33]发现,通过脂多糖诱导炎症反应时,小鼠机体内的氧化应激水平会升高,表现为超氧阴离子的增加和抗氧化酶活性的降低,而添加桉叶精油后可以显著提高小鼠血清中的超氧化物歧化酶活性,增强机体清除活性氧的能力,同时桉叶精油能够降低血清中NO含量。本研究中,添加桉叶精油的部分处理可以显著提高黄颡鱼幼鱼肝脏和肠道的SOD活性和GSH-Px活性。

丙二醛(MDA)是脂质过氧化的终产物之一,其含量的高低可以反映机体脂质氧化的程度。丙二醛含量降低表明机体抗氧化能力增强。本研究中,添加桉叶精油对黄颡鱼幼鱼肝脏和肠道中MDA含量没有明显影响。桉叶精油的抗氧化作用与其主要成分1,8-桉叶素有关。在虹鳟、大口黑鲈中的研究发现,1,8-桉叶素能够提高血清抗氧化酶如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性与总抗氧化能力(T-AOC)和谷胱甘肽(GSH)含量,降低丙二醛含量,从而缓解鱼类在运输过程中产生的应激反应。Chen 等^[34]发现1,8-桉叶素能够激活Nrf2/Keap1信号通路,诱导抗氧化酶如血红素加氧酶、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)等酶基因的表达^[35],降低丙二醛含量。除此之外,1,8-桉叶素还能够捕获自由基,螯合金属离子,减少活性氧(ROS)的生成,保护细胞免受氧化损伤^[36]。

4 结 论

本研究发现,在饲料中添加桉叶精油能够改善黄颡鱼幼鱼肠道组织结构,提高肝脏和肠道抗氧化能力。L48处理黄颡鱼幼鱼前肠肌层厚度、中肠绒毛长度、中肠绒毛宽度、中肠肌层厚度均显著高于对照($P < 0.05$)。L64处理黄颡鱼幼鱼中肠和后肠的绒毛长度、绒毛宽度、肌层厚度均显著高于对照($P < 0.05$)。同时添加桉叶精油处理能够提高黄颡鱼幼鱼肝脏和肠道超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性,其中L48处理和L64处理效果较好。综上,在黄颡鱼基础饲料中,桉叶精油较适宜的添加量为0.48~0.64 mL/kg。本研究结果可为黄颡鱼高密度集约化养殖提供理论依据。

参考文献:

- [1] 尹晓燕,王燕燕. 1,8-桉叶素药理作用及其机制研究进展[J].

- 生命的化学,2020,40(11):2026-2034.
- [2] LIMA P R, MELO T S D, CARVALHO K M, et al. 1,8-cineole (eucalyptol) ameliorates cerulein-induced acute pancreatitis via modulation of cytokines, oxidative stress and NF- κ B activity in mice[J]. Life Science,2013,92(24/25/26):1195-1201.
- [3] 秦国栋,谭子超,周东,等. 不同桉树精油添加水平对笼养白羽肉鸡生长性能、免疫机能和抗氧化机能的影响[J]. 动物营养学报,2021,20(1):1-10.
- [4] ELAISSI A, SALAH K H, MABROUK S, et al. Antibacterial activity and chemical composition of 20 *Eucalyptus* species' essential oils[J]. Food Chemistry,2011,129(4):1427-1434.
- [5] 邹璇,王成,陈晓阳,等. 桉叶油和迷迭香油对柱花草青贮藏品质的影响[J]. 中国草地学报,2022,44(2):89-97.
- [6] JU J, XU X M, XIE Y F, et al. Inhibitory effects of cinnamon and clove essential oils on mold growth on baked foods[J]. Food Chemistry,2018,240:850-855.
- [7] 王挥,龚吉军,唐静,等. 肉桂与桉叶复合精油处理对“夏黑”葡萄保鲜质量的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(9):3703-3709.
- [8] 咎春兰,汤海青,欧昌荣,等. 桉叶精油对水产品中4种微生物的抑菌效果及抑菌机理[J]. 食品工业科技,2018,39(19):20-26.
- [9] AL-FATAFATAH A R, ABDELQADER A. Effect of *Salix babylonica*, *Populus nigra* and *Eucalyptus camaldulensis* extracts in drinking water on performance and heat tolerance of broiler chickens during heat stress[J]. American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science,2013,13(10):1309-1313.
- [10] MASHAYEKHI H, MAZHARI M, ESMAELIPOUR O. *Eucalyptus* leaves powder, antibiotic and probiotic addition to broiler diets: effect on growth performance, immune response, blood components and carcass traits[J]. Animal,2018,12(10):2049-2055.
- [11] AHLEM S, KHALED H, WAFA M, et al. Oral administration of *Eucalyptus globulus* extract reduces the alloxan-induced oxidative stress in rats[J]. Chemico-Biological Interactions,2009,181(1):71-76.
- [12] NIE D, LIU S, TANG W, et al. Effects of castration and eucalyptus oil supplementation on growth performance, nutrient digestibility, and blood-immunity indicators of male Holstein calves[J]. Journal of Dairy Science,2024,107(5):2850-2863.
- [13] WANG B, JIA M, FANG L Y, et al. Effects of eucalyptus oil and anise oil supplementation on rumen fermentation characteristics, methane emission, and digestibility in sheep[J]. Journal of Animal Science,2018,96:3460-3470.
- [14] MORTEZA H S, TAHERI M A, YOUSEF I, et al. Effects of dietary cineole administration on growth performance, hematological and biochemical parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture,2018,495:766-772.
- [15] TAHERI-MIRGHAED A, FAYAZ S, HOSEINI S M. Dietary 1,8-cineole affects serum enzymatic activities and immunological characteristics in common carp (*Cyprinus carpio*) exposed to ambient ammonia[J]. Aquaculture Research,2019,50(1):146-153.
- [16] MIRGHAED A T, FAYAZ S, HOSEINI S M. Effects of dietary 1,8-cineole supplementation on serum stress and antioxidant markers of common carp (*Cyprinus carpio*) acutely exposed to ambient ammonia[J]. Aquaculture,2019,509:8-15.
- [17] LIU Y H, ZHAO Y, ZHU D, et al. 1,8-cineole and ginger extract (*Zingiber officinale* Rose) as stress mitigator for transportation of largemouth bass (*Micropterus salmoides* L.) [J]. Aquaculture,2022,561:738622.
- [18] MIRGHAED A T, HOSEINI S M, GHELICHPOUR M. Effects of dietary 1,8-cineole supplementation on physiological, immunological and antioxidant responses to crowding stress in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Fish & Shellfish Immunology,2018,81:182-188.
- [19] MIRGHAED A T, GHELICHPOUR M, ZARGARI A, et al. Anaesthetic efficacy and biochemical effects of 1,8-cineole in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) [J]. Aquaculture Research,2018,49:2156-2165.
- [20] 王文彬. 黄颡鱼池塘健康养殖实用技术[J]. 新农村,2022(4):30-31.
- [21] 孔令杰,张毅,马有民. 黑龙江省黄颡鱼增殖现状 & 前景[J]. 黑龙江水产,2003(1):1-2,9.
- [22] FRANZ C, BASER K H C, WINDISCH W. Essential oil and aromatic plants in animal feeding-A European perspective. A review [J]. Flavour and Fragrance Journal,2010,25:327-340.
- [23] KURALKAR P, KURALKAR S V. Role of herbal products in animal production-an updated review [J]. Journal of Ethnopharmacology,2021,278:114246.
- [24] TAN X H, SUN Z Z, CHEN S, et al. Effects of dietary dandelion extracts on growth performance, body composition, plasma biochemical parameters, immune responses and disease resistance of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus* [J]. Fish & Shellfish Immunology,2017,66:198-206.
- [25] HOSEINI S M, MIRGHAED A T, LRI Y, et al. Effects of dietary cineole administration on growth performance, hematological and biochemical parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture,2018,495:766-772.
- [26] 蔡晓芳,李庆昌,张晓林,等. 大黄鱼皮质醇无创检测技术研究[J]. 海洋通报,2019,38(5):569-573.
- [27] 刘欣平,董文静,黄汉,等. 饲料中高直链淀粉对大口黑鲈肠道物理屏障和菌群的影响[J]. 水产学报,2023,47(10):109601.
- [28] CALDAS G F R, OLIVEIRA A R D S, ALICE V A, et al. Gastro-protective mechanisms of the monoterpene 1,8-cineole (eucalyptol) [J]. PloS One,2015,10(8):e0134558.
- [29] AKINRINDE A S, ADEBIYI O E, ASEKUN A. Amelioration of aflatoxin B₁-induced gastrointestinal injuries by *Eucalyptus* oil in rats [J]. Journal of Complementary and Integrative Medicine,2019,17,20190002.
- [30] 田玉红,张祥民,黄泰松,等. 桉叶油的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2008,33(10):139-143.
- [31] 王猛强,黄晓玲,金敏,等. 饲料中添加植物精油对凡纳滨对

- 虾生长性能及肠道健康的改善作用[J]. 动物营养学报, 2015, 27(4):1163-1171.
- [32] WU N, XU X, WANG B, et al. Anti-foodborne enteritis effect of galantamine potentially via acetylcholine antiinflammatory pathway in fish[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 97:204-215.
- [33] ZHAO C, CAO Y W, ZHANG Z, et al. Cinnamon and eucalyptus oils suppress the inflammation induced by lipopolysaccharide in vivo[J]. Molecules, 2021, 26:7410.
- [34] CHEN L, TAO D Y, YU F C, et al. Cineole regulates Wnt/ β -catenin pathway through Nrf2/keap1/ROS to inhibit bisphenol A-induced apoptosis, autophagy inhibition and immunosuppression of grass carp hepatocytes [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2022, 131:30-41.
- [35] KUNDU J K, SURH Y J. Nrf2-Keap1 signaling as a potential target for chemoprevention of inflammation-associated carcinogenesis [J]. Pharmaceutical Research, 2010, 27(6):999-1013.
- [36] ANTONELLA D S, FEDERICO D, GRAZIA S M, et al. Antimutagenic and antioxidant activities of some bioflavours from wine[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 60:141-146.

(责任编辑:成纾寒)