JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20241214819
Science Press

岳颖淇, 王识栋, 唐延杰, 等. 饲料添加白藜芦醇对大口黑鲈生长、抗氧化及氨氮解毒的影响 [J]. 水产学报, 2026, 50(1): 019614.

Yue Y Q, Wang S D, Tang Y J, *et al*. Effects of dietary resveratrol supplementation on growth performance, antioxidant response, and ammonia detoxification in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(1): 019614 (in Chinese).

饲料添加白藜芦醇对大口黑鲈生长、抗氧化及氨氮解毒的影响

岳颖淇[1]，　王识栋[1]，　唐延杰[1]，　冯德祥[2*]，　黎　明[1*]

(1. 宁波大学海洋学院，浙江 宁波　315211；
2. 信阳农林学院水产学院，河南 信阳　464000)

摘要：【目的】探讨饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈生长性能、健康状况及氨氮耐受的影响。**【方法】**实验以平均体重为 (7.40±0.05) g 的大口黑鲈为研究对象，随机分为 3 组，每组 3 个重复，每个重复 30 尾鱼，分别投喂含 0.00%、0.50% 和 1.00% 白藜芦醇的实验饲料，饱食投喂每天 2 次，持续 56 d。**【结果】**饲料中添加白藜芦醇能够显著提高大口黑鲈增重率、蛋白质效率及摄食量，降低饲料系数；提高血清总蛋白 (TP)、白蛋白 (ALB) 及球蛋白 (GLB) 含量，降低甘油三酯 (TG)、胆固醇 (TC)、谷丙转氨酶 (ALT) 及谷草转氨酶 (AST) 含量；提高肝脏总抗氧化能力 (T-AOC)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 及谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 活性，降低肝脏肿瘤坏死因子-α(TNF-α)、白细胞介素-1(IL-1) 及白细胞介素-8(IL-8) 含量；上调肝脏超氧化物歧化酶 (*sod*)、过氧化氢酶 (*cat*)、谷胱甘肽还原酶 (*gr*)、谷胱甘肽过氧化物酶 (*gpx*) 及 B 细胞淋巴瘤-2(*bcl*-2) 基因 mRNA 表达，下调白细胞介素 1(*il*-1)、白细胞介素 8(*il*-8)、肿瘤蛋白 *p*53、抑制凋亡因子 (*bax*)、半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 3(*caspase* 3) 及半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 9(*caspase* 9) 基因 mRNA 表达。氨氮暴露 96 h 后，摄食白藜芦醇的实验鱼，累积死亡率和血氨含量显著低于对照组，而血清溶菌酶活性 (LZM)、总补体 (CH50)、总免疫球蛋白含量 (IG)、抗体效价 (Ab titer)、肝脏中精氨酸代琥珀酸合成酶 (ASS)、精氨酸代琥珀酸裂解酶 (ASL)、精氨酸酶 (ARG) 及鸟氨酸氨甲酰基转移酶 (OTC) 活性显著高于对照组。**【结论】**饲料中添加白藜芦醇能够提高大口黑鲈的生长性能，改善血清健康状况、抗氧化能力、炎症及细胞凋亡；白藜芦醇通过激活尿素循环增强大口黑鲈的氨氮耐受性，提高应激发生时的免疫应答能力。

关键词：大口黑鲈；白藜芦醇；氨氮；生长性能

中图分类号：S 963.73　　**文献标志码：**A

收稿日期：2024-12-22　　**修回日期：**2025-04-28

资助项目：国家自然科学基金 (32473130，32072948)；浙江省“三农九方”科技协作计划 (2024SNJF059)；宁波市自然科学基金 (2024J172)

第一作者：岳颖淇，从事鱼类营养生理学研究，E-mail：1430586778@qq.com

通信作者：冯德祥，从事水生动物营养生理学研究，E-mail：dxfeng@xyafu.edu.cn；
黎明，从事水生动物营养生理学研究，E-mail：liming1@nbu.edu.cn

白藜芦醇广泛存在于葡萄、花生和虎杖等植物中，具有多种生物学功能，如抗氧化、抗炎、增强免疫及促生长，同时还能够调节脂质代谢，有效降低动物体内脂肪的过度积累[1]。已有研究报道，在大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 饲料中添加 0.05% 的白藜芦醇，可以显著提高其抗氧化能力[2]；在高脂饲料中添加 0.50%~1.00% 的白藜芦醇能够增强团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 肝脏抗氧化酶活性[3]；饲料中添加白藜芦醇能够有效抑制 NF-κB 信号通路，下调 *TNF-α*、*IL*-1 和 *IL*-8 基因表达，上调 *IL*-10 基因表达，以缓解尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 由于过度炎症反应造成的肝损伤[4]；斑马鱼 (*Danio rerio*) 摄入白藜芦醇还能减轻由氧化锌引起的细胞凋亡[5]。白藜芦醇在水产领域中应用广泛，被认为是一种具有广阔应用前景的水产饲料添加剂。

随着集约化养殖的迅猛发展，氨氮胁迫问题愈发凸显，其对养殖鱼类造成的负面影响受到了广泛关注[6]。当环境中氨氮浓度超过耐受阈值时，会对鱼类的生长和发育造成不同程度的伤害，例如日本花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 对环境氨氮的耐受上限是 0.28 mg/L[7]；当环境氨氮浓度超过 1.25 mg/L 会对黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的生长造成抑制，而浓度超过10 mg/L 则会引起存活率下降[8]。绝大多数鱼类氨氮中毒的典型症状表现为生长迟缓、组织损伤、氧化应激、免疫抑制及肠道有害微生物增多等[9]，例如大菱鲆[10]、银鲈 (*Bidyanus bidyanus*)[11] 和鲤 (*Cyprinus carpio*)[12] 等。研究表明，营养调控能够较好地缓解鱼类氨氮中毒症状。在团头鲂幼鱼饲料中添加富含多酚的硒酵母和绿茶，可显著增强其抗氧化能力和免疫应答，减轻氧化应激和氨氮胁迫造成的伤害[13]；在异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 饲料中添加富含多酚的姜黄素可以缓解肝脏氧化应激，减轻氨氮胁迫诱导的铁死亡[14]；在黄颡鱼饲料中添加富含多酚的鞣花酸，能够有效缓解氨氮胁迫造成的生长抑制和氧化损伤[15]。白藜芦醇也是一种多酚类有机化合物，最近在哺乳动物中有研究指出，白藜芦醇能够有效缓解高血氨症对大鼠肝脏和脑组织造成的不良影响[16]。在鱼类中，白藜芦醇能否发挥氨氮解毒的作用尚未见报道。

大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 是我国重要的淡水养殖鱼类之一[17]。据不完全统计，2023 年全国大口黑鲈的养殖总产量超过 80 万 t[18]。然而，随着养殖规模的不断扩大，氨氮对大口黑鲈养殖业造成的经济损失也日益严重。高密度养殖条件下，采用持续换水、生物膜过滤、底质改良等措施处理氨氮，成本高且操作繁琐，而营养手段恰好是一种简单易行的调控手段[19]。本研究通过解析白藜芦醇对大口黑鲈生长性能、血清生化稳态 (总蛋白、胆固醇)、抗氧化能力 (SOD、CAT)、炎症-凋亡信号平衡 (*tnf-α*、*caspase*-3) 及氨氮应激耐受性的综合调控效应，为开发抗逆性人工饲料提供关键理论支撑。

1　材料与方法

1.1　实验饲料

共配置 3 种含不同浓度白藜芦醇 (0.00%、0.50% 和 1.00%) 的实验饲料[20]。所有原料经过粉碎、过 60 目筛及充分混合后，使用 F-26II 双螺杆造粒机 (广州华工光机电科技有限公司) 制成直径为 3 mm 的颗粒，室温下干燥，储存于−20 ℃ 备用。饲料配方及近似营养组成见表 1。

1.2　动物及饲养管理

大口黑鲈购自信阳市水宏水产养殖公司，所有鱼暂养 15 d。挑选初始体重为 (7.40±0.50) g 的鱼随机分配到 9 个养殖桶 (500 L) 中，每桶 30 尾，设置 3 个重复；每日饱食投喂 2 次 (7:00—7:30，6:00—6:30)，并记录饲料消耗量；隔天更换 1/3 体积水，养殖周期为 56 d。整个养殖期间，水温 23~25 ℃，溶解氧 (7.85±0.45) mg/L，亚硝酸盐 < 0.5 mg/L，pH 7.10~7.50，采用自然光照。本研究获得了宁波大学实验动物管理和使用伦理委员会批准，实验过程中操作人员严格遵守宁波大学伦理规范 (SYXK, ZHE, 2012–011, 012)，并按照宁波大学伦理委员会制定的规章制度执行。

1.3　样品采集

实验结束后，所有鱼禁食 24 h，采用 120 mg/L 甲磺酸三卡因 (MS-222) 进行麻醉，用于计数、测量和称重；每缸随机选择 3 尾鱼，−20 ℃ 保存，用于全鱼粗成分分析；每缸另取 3 尾鱼，尾静脉抽血，4 ℃ 3 000 r/min 离心 10 min，获得的血清−20 ℃ 保存，用于生化成分分析；抽血后的鱼，解剖获取肝脏，称重计算肝体指数，一部分肝脏−20 ℃ 储存，用于酶活性测定，另一部分肝脏经液氮速冻，−80 ℃ 储存，用于 RNA 提取。

表 1　实验饲料配方和近似组成 (干物质)

Tab. 1　Formulation and proximate composition of the experimental diets (dry matter)　%

项目 item	饲料中白藜芦醇添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
原料　ingredients			
秘鲁鱼粉　Peru fish meal	15.00	15.00	15.00
豆粕　soybean meal	25.00	25.00	25.00
大豆浓缩蛋白 soy protein concentrate	16.00	16.00	16.00
玉米蛋白粉　corn gluten meal	9.00	9.00	9.00
菜籽粕　rapeseed meal	3.00	3.00	3.00
棉籽粕　cottonseed meal	2.00	2.00	2.00
鱼粉　fish oil	2.50	2.50	2.50
大豆油　soybean oil	2.50	2.50	2.50
小麦面粉　wheat flour	21.50	21.50	21.50
沸石粉　zeolite powder	1.50	1.00	0.50
维生素预混料　vitamin premix[1)]	0.50	0.50	0.50
矿物质预混料　mineral premix[2)]	0.50	0.50	0.50
磷酸二氢钙　monocalcium phosphate	1.00	1.00	1.00
白藜芦醇　resveratrol[3)]	0.00	0.50	1.00
近似组成　proximate composition			
粗蛋白　crude protein	39.07	39.15	39.32
粗脂肪　crude lipid	7.25	7.23	7.26

注：1)维生素预混料(IU或mg/kg)含维生素A 8 000 000 IU，维生素D 2000 000 IU，维生素E 5 000 IU，维生素K 1 000 mg，维生素B_1 1 500 mg，维生素B_2 1 500 mg，维生素B_6 800 mg，维生素B_{12} 20 mg，烟酰胺 400 mg，泛酸钙 25 mg，叶酸 25 mg，生物素8 mg，肌醇100 mg。2)矿物质预混料(mg/kg)含一水硫酸锰 50，碘化钾 100，氯化钴(1%)100，五水硫酸铜 20，一水硫酸亚铁 260，一水硫酸锌 150，亚硒酸钠(1%) 50。3)镇海百川生物科技有限公司，宁波。

Notes: 1) vitamin premix(IU or mg/kg), VA 8 000 000 IU, VD 2 000 000 IU, VE 5 000 IU, VK 1 000 mg, VB_1 1 500 mg, VB_2 1 500 mg, VB_6 800 mg, VB_{12} 20 mg, nicotinamide 400 mg, calcium pantothenate 25 mg, folic acid 25 mg, biotin 8 mg, inositol 100 mg. 2) mineral premix(mg/kg diets), $MnSO_4·H_2O$ 50, KI 100, $CoCl_2$(1%)100, $CuSO_4·5H_2O$ 20, $FeSO_4·H_2O$ 260, $ZnSO_4·H_2O$ 150, Na_2SeO_3(1%) 50. 3) Zhenhai Baichuan Biotechnology Co., Ltd., Ningbo, China.

1.4　急性氨氮暴露及样品采集

摄食生长实验结束后，每缸随机挑选 15 尾实验鱼，置于半致死浓度 (33.24 mg/L) 氨氮水体中，开展 96 h 的急性氨氮暴露实验。本实验采用的半致死浓度参考 Egnew 等[19]，其测定条件 (水温 25 ℃，pH 7.8 ~ 0.2) 与本研究一致，且预实验验证了该浓度在本实验体系下的适用性。实验期间，采用 10 g/L NH_4Cl 母液每隔 8 h 进行浓度调节，采用 YSI 多参数水质测定仪监控水中氨氮浓度。每隔 12 h 记录 1 次死亡率，并及时清除死亡动物。

急性氨氮暴露结束后，采用 120 mg/L MS-222 进行麻醉。每缸随机挑选 3 尾实验鱼，尾静脉抽血，并获取血清，−20 ℃ 保存，用于免疫应答分析；抽血后的鱼，解剖获取肝脏，一部分肝脏保存于 4% 多聚甲醛溶液中，用于组织学观察，一部分肝脏−20 ℃ 保存，用于酶活性分析。

1.5　生化分析

采用 AOAC(2000) 标准方法测定实验饲料和全鱼样品的粗成分[21]。将样品置于 105 ℃ 烘箱中干燥直至恒重，以确定水分含量；粗蛋白含量的测定采用 FP-528 全自动蛋白质分析仪 (Leco 公司，美国)；粗脂肪含量的测定采用 2055 索氏抽提系统 (Foss 公司，瑞典)；粗灰分含量的测定是将碳化后的样品置于马弗炉中 550 ℃ 烘至恒重。

采用 7600-110 全自动生化分析仪 (日立，日本) 测定血清中总蛋白 (TP)、白蛋白 (ALB)、球蛋白 (GLB)、总胆固醇 (TC)、甘油三酯 (TG)、葡萄糖 (Glu)、乳酸脱氢酶 (LDH)、谷丙转氨酶 (ALT) 和谷草转氨酶 (AST) 含量；采用商业试剂盒测定血清中溶菌酶活性 (LYZ)、总补体 (CH50)、总免疫球蛋白含量 (Ig) 及抗体滴度 (Ab titer)(伊利康公司，中国)。

肝脏样品在预冷的磷酸缓冲液中匀浆，4 ℃ 12 000 r/min 离心 15 min，收集上清液。采用商业试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 测定总抗氧化能力(T-AOC)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 活性及丙二醛 (MDA) 含量；使用 ELISA 试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 测定肿瘤坏死因子-α (TNF-α)、白细胞介素-1 (IL-1)、白细胞介素-8 (IL-8) 含量、精氨酸琥珀酸合成酶 (ASS)、精氨酸琥珀酸裂解酶 (ASL)、精氨酸酶 (ARG) 及鸟氨酸氨基甲酰转移酶 (OTC) 活性。

1.6　组织学分析

肝脏组织经 4% 多聚甲醛 (PFA，Sigma-Aldrich，美国，pH 7.4) 固定 24 h 后，依次进行脱水、透明及浸蜡处理：脱水过程包括 70% 乙醇 (4 h)、80% 乙醇 (2 h)、90% 乙醇 (1 h)、95% 乙醇 (1 h) 及 2 次无水乙醇 (每次 30 min)；透明处理采用乙醇-二甲苯混合液 (1∶1，30 min) 和 2 次二甲苯

(每次 20 min)；浸蜡于液态石蜡 (熔点 56~58 ℃，Leica，德国) 中分 3 次浸渍 (每次 1 h，60 ℃ 恒温)。随后使用石蜡切片机 (RM2235，Leica，德国) 制备 4 μm 厚连续切片，贴附于多聚赖氨酸载玻片 (Servicebio，中国)。切片经 2 次二甲苯脱蜡 (每次 10 min)、梯度乙醇复水后，进行苏木精染色 5 min，流水冲洗返蓝，1% 盐酸乙醇分化 3 s，再以 0.5% 伊红水溶液染色 1 min。最后经梯度乙醇脱水、二甲苯透明，中性树胶封片，于 Eclipse 200 光学显微镜 (尼康公司，日本) 下观察并拍照。

1.7　总 RNA 提取、cDNA 合成及 qPCR 分析

采用 RNAiso 试剂盒从肝脏中提取总 RNA(大连宝生物, 中国)，通过 Nanodrop 2000 微型紫外分光光度计 (Thermo 公司，美国) 测定 260/280 比值，利用 Prime Script™ RT 试剂盒 (大连宝生物, 中国) 获得 cDNA 第一链。使用 SYBR Premix Ex *Taq*(大连宝生物, 中国) 试剂盒在 LightCycler®480 II(Roche 公司，瑞士) 荧光定量 PCR 仪上进行分析，循环条件设置：95 ℃ 10 s 预变性，95 ℃ 5 s，57 ℃ 30 s 进行 40 个循环，72 ℃ 30 s 终止反应，借助 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法测定基因的相对表达水平，*β-actin* 和 *GAPDH* 作为管家基因[22]。根据 MIQE 指南[23]，每个样本进行 3 次检测，每次检测独立重复 3 次。本实验所用于实时荧光定量聚合酶链式反应 (qPCR) 的引物序列见表 2。

表 2　大口黑鲈 qPCR 分析引物设计

Tab. 2　Primers used for qPCR analysis from *M. salmoides*

目的基因 target gene	上游引物(5′-3′) forward primer (5′-3′)	下游引物(3′-5′) reverse primer (3′-5′)	大小/bp size
sod	CATTTCAATCCCCACAACAAGA	CTTTGCGACATTATCTGCTCCT	102
gr	TTATGTCGGTCACCTAAATCG	CCTGGAACTTCAGCATCACTC	195
gpx	CCCTGCAATCAGTTTGGACA	TTGGTTCAAAGCCATTCCCT	94
cat	CTGCTGTTCCCGTCCTTCAT	GGTAGCCATCAGGCAAACCT	154
il-1	ACCTCTAACCCAGGGCTGAT	GGTTCCATTCAGTGGCGAGA	102
il-8	CAGTGGTGTCGCTGCATACG	AGAGCCGTTTCTCCTGGTGA	129
*P*53	ACGGATCTCTGTCCCTCCAA	GTCCTGTTGCTCAGAGACCC	246
bax	GCTTGTCACCACAGCCATTG	TACAGCAGACCAGCACAAGG	134
bcl-2	TGGGAAATTCAACTGGGGCA	GGTGAGAACACCAGCCAAGA	241
caspase 3	CACGGTGATGAGGGTGTGTT	CCAGATCAGTGCCTCTGCAA	145
caspase 9	GCTTCCCTGGTGCTGTGTAT	AGGCGACACCTCAAATCCTG	167
β-actin	CTCTGCATACATGCCTACAC	GTAGAGTTTCTCCCCATCAGG	117
gadph	AGGTCATCACCATCGGCAAT	TGTAGGTAGTCTCGTGGATTCC	102

1.8　统计分析

实验数据使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析。采用 Duncan 氏检验进行多重比较，显著差异为 $P<0.05$。统计数据均以平均值±标准差 (mean ± SD) 表示。

生长性能相关计算公式：

存活率 (SR, %) = $N_t / N_0 \times 100\%$

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

特定生长率 (SGR %/d) = $(\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$

饲料系数 (FCR) = $W_f / (W_t - W_0)$

肝体指数 (HSI, %) = $W_h / W \times 100\%$

肥满度 (CF, g/cm^3) = $W / L^3 \times 100$

蛋白效率 (PER, %) = $(W_t - W_0) / (W_f \times S_0) \times 100\%$

式中，N_t 为终末尾数，N_0 为初始尾数，W_t 为终末体重 (g)，W_0 为初始体重 (g)，W_f 为摄入饲料量 (g)，W_h 为鱼肝脏重 (g)，W 为鱼体重 (g)，L 为鱼体长 (cm)，t 为养殖天数 (d)，S_0 为饲料粗蛋白含量 (%)。

2　结果

2.1　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈生长性能、血液健康、抗氧化酶活性、炎症及细胞凋亡的影响

各实验组间存活率 (100%) 无显著性差异 (表 3)；饲料中添加白藜芦醇显著提高了实验鱼

的终末体重、增重率、特定生长率、蛋白质效率和摄食量 (P<0.05)，饲料中添加 0.50% 和 1.00% 白藜芦醇无显著性差异 (P>0.05)；相反，对照组实验鱼的饲料系数显著高于 0.50% 和 1.00% 白藜芦醇组 (P<0.05)；饲料中添加白藜芦醇对实验鱼的肝体指数和肥满度无显著性影响 (P>0.05)。

表 3　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈生长性能和饲料利用的影响

Tab. 3　Effects of dietary resveratrol on growth performance and feed utilization of *M. salmoides*

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
终末体重/g final body weight	38.64±0.78^{b}	43.50±0.50^{a}	43.25±0.69^{a}
WGR/%	422.21±10.50^{b}	487.82±6.78^{a}	484.52±9.27^{a}
SGR/ (%/d)	2.95±0.04^{b}	3.16±0.02^{a}	3.15±0.03^{a}
FCR	1.27±0.03^{a}	1.16±0.01^{b}	1.18±0.03^{b}
HSI/%	1.36±0.09	1.25±0.07	1.26±0.03
PER/%	2.01±0.05^{b}	2.21±0.02^{a}	2.18±0.06^{a}
CF/(g/cm^{3})	1.42±0.11	1.69±0.22	1.60±0.13
饲料摄入量/g feed intake	39.74±0.33^{b}	41.78±0.13^{a}	42.05±0.54^{a}
SR/%	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00

注：同行数据肩标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，下同。

Notes: In the same line, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), the same below.

饲料中添加白藜芦醇显著提高了实验鱼全鱼粗蛋白和粗灰分含量 (P<0.05)(表 4)；与对照组相比，0.50% 和 1.00% 白藜芦醇显著降低了全鱼粗脂肪含量 (P<0.05)；摄食富含白藜芦醇的饲料并没有影响全鱼水分含量 (P>0.05)。

饲料中添加白藜芦醇显著提高了实验鱼血清 TP、ALB 及 GLB 的含量，1.00% 白藜芦醇组最高 (P<0.05)(表 5)；摄食富含白藜芦醇 (0.05% 和 1.00%) 饲料的实验鱼血清 TG、TC、AST、ALT 活性显著低于对照组 (P<0.05)；饲料中添加白藜芦醇并未对实验鱼血清 GLU 含量及 LDH 活性造成影响 (P>0.05)。

实验鱼肝脏 T-AOC、SOD、CAT、GPX 活性随着饲料中白藜芦醇含量的提高显著升高 (P<0.05)(表 6)。相反，对照组实验鱼肝脏中 MDA 含量显著高于白藜芦醇组 (P<0.05)；实验鱼肝脏中 TNF-α、IL-1 及 IL-8 含量随着饲料中白藜芦醇含量的提高显著降低 (P<0.05)。

表 4　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈体成分的影响

Tab. 4　Effects of dietary resveratrol on body composition of *M. salmoides*　%

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
粗蛋白(干重) crude protein (dry matter)	52.19±0.50^{b}	54.95±0.40^{a}	53.96±0.74^{a}
粗脂肪(干重) crude lipid (dry matter)	28.72±0.76^{a}	24.92±0.69^{b}	24.81±0.28^{b}
粗灰分(干重) crude ash (dry matter)	10.86±0.04^{b}	12.00±0.17^{a}	11.88±0.42^{a}
水分 moisture	28.80±0.31	28.72±0.14	28.80±0.04

表 5　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈血清生化指标的影响

Tab. 5　Effects of dietary resveratrol supplementation on serum biochemical index of *M. salmoides*

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
TP/(g/L)	35.00±1.91^{c}	40.22±0.45^{b}	42.95±0.93^{a}
ALB/(g/L)	15.30±1.10^{c}	18.55±0.45^{b}	20.15±0.05^{a}
GLB/(g/L)	24.20±2.70^{b}	26.50±0.90^{a}	27.30±0.40^{a}
TG/(mmol/L)	11.76±1.07^{a}	5.76±0.55^{b}	4.87±0.77^{b}
TC/(mmol/L)	7.56±0.50^{a}	6.73±0.05^{b}	6.24±0.20^{b}
ALT/(U/L)	11.50±0.50^{a}	6.15±0.15^{b}	5.83±0.48^{b}
AST/(U/L)	94.50±8.50^{a}	57.50±0.50^{b}	55.50±9.50^{b}
Glu/(mmol/L)	3.33±0.02	2.95±0.57	2.68±0.58
LDH/(U/L)	1 252.50±191.50	1 250.00±114.00	1 255.00±34.00

表 6　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈肝脏抗氧化酶活性及炎症的影响

Tab. 6　Effects of dietary resveratrol supplementation on liver antioxidant enzyme activity and inflammation of *M. salmoide*

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
T-AOC/(U/mg prot)	2.57±0.15^{c}	3.69±0.04^{b}	3.89±0.04^{a}
SOD/(U/mg prot)	16.13±0.48^{c}	19.21±2.32^{b}	22.13±0.46^{a}
CAT/(U/mg prot)	19.97±0.70^{b}	22.68±1.65^{a}	24.72±0.60^{a}
GPX/(U/mg prot)	234.64±0.42^{c}	261.86±15.17^{b}	297.54±7.30^{a}
MAD/(nmol/mg prot)	8.29±1.87^{a}	4.67±1.04^{b}	3.42±0.20^{b}
TNF-α/(pg/mg prot)	84.55±3.02^{a}	72.4±3.65^{b}	60.87±1.22^{c}
IL-1/(pg/mg prot)	34.25±1.70^{a}	30.00±1.98^{b}	26.18±1.86^{c}
IL-8/(pg/mg prot)	43.16±2.85^{a}	36.25±1.30^{b}	33.56±1.00^{b}

随着饲料中白藜芦醇含量的升高，实验鱼肝脏中 *sod*、*gpx*、*cat* 和 *gr* 基因的 mRNA 表达量显著上调，相反，*il*-1 和 *il*-8 基因的 mRNA 表达量显著下调 (P<0.05)(图 1)；饲料中添加白藜芦醇显著下调了实验鱼肝脏中 *p*53、*bax*、*caspase*3 和 *caspase*9 基因的 mRNA 表达量，上调了 *bcl*-2 基因的表达量 (P<0.05)。

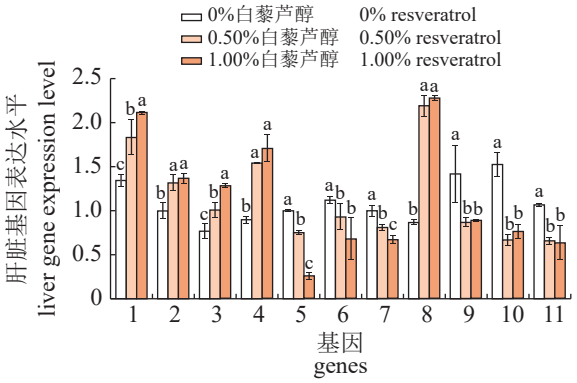


图 1　饲料中添加不同水平白藜芦醇对大口黑鲈肝脏中抗氧化、炎症及凋亡相关基因表达的影响

Fig. 1　Effects of dietary resveratrol supplementation on relative expression of antioxidant, inflammatory and apoptotic related genes in the liver of *M. salmoides*

1.*sod*, 2.*cat*, 3.*gpx*, 4.*gr*, 5.*il*-1, 6.*il*-8, 7.*bax*, 8.*bcl*-2, 9.*caspase*3, 10.*caspase*9, 11.*p*53.

2.2　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈氨氮耐受力的影响

氨氮暴露 96 h 后，白藜芦醇组实验鱼的累计死亡率显著低于对照组 (P<0.05)(表 7)；随着饲料中白藜芦醇含量的提高，实验鱼血清 LYZ 活性、CH50、Ig 及 Ab titer 显著升高 (P<0.05)。

氨氮暴露 96 h 后，随着饲料中白藜芦醇含量的提高，实验鱼血氨含量显著降低 (P<0.05)(表 8)；实验鱼肝脏中 ASS、ASL、ARG、OTC 活性随着饲料中白藜芦醇含量的提高显著升高 (P<0.05)。

氨氮暴露 96 h 后，对照组实验鱼肝脏组织切片发现大量细胞核浓缩、肝细胞空泡变性和细胞外周核 (图版)；与对照组相比，白藜芦醇组实验鱼肝细胞形态正常，细胞核完整。

表 7　氨氮暴露 96 h 后大口黑鲈的累积死亡率及血清免疫应答

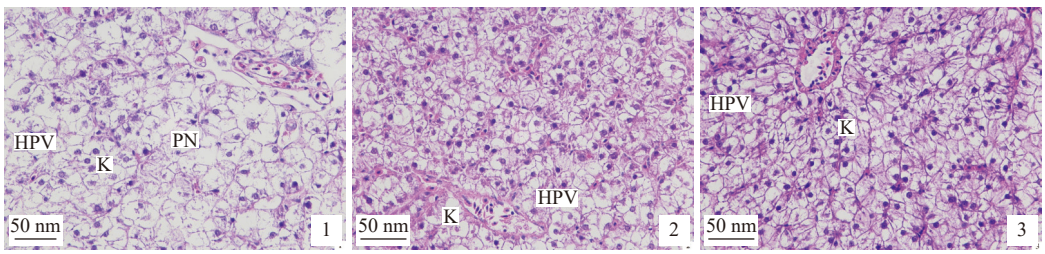
Tab. 7　Cumulative mortality and serum immune response of *M. salmoides* exposed to ammonia for 96 h

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
累计死亡率/% cumulative mortality	53.03±6.94^a	36.36±4.55^b	34.85±2.62^b
LYZ/(U/mL)	32.00±0.50^b	41.63±7.88^a	46.50±2.50^a
CH50/(ng/mL)	32.05±1.36^c	37.5±1.36^b	43.3±0.84^a
Ig/(mg/mL)	2.51±0.02^b	2.56±0.02^a	2.59±0.01^a
Ab titer	1.29±0.07^c	2.11±0.06^b	2.34±0.10^a

表 8　氨氮暴露 96 h 对大口黑鲈肝脏氨代谢酶活性的影响

Tab. 8　Ammonia metabolizing enzyme activity of liver in *M. salmoides* exposed to ammonia for 96 h

项目 item	饲料中白藜芦醇的添加量 dietary supplementation levels of resveratrol		
	0.00%	0.50%	1.00%
血氨/(μmol/L) blood ammonia	1 060.17±2.03^a	710.61±7.12^b	652.13±42.86^c
ASS/(U/g prot)	11.05±0.07^c	11.75±0.28^b	13.64±0.35^a
ASL/(U/g prot)	18.88±0.48^b	20.22±1.09^b	23.01±0.87^a
ARG/(U/g prot)	7.39±0.26^c	8.32±0.27^b	8.95±0.33^a
OTC/(U/g prot)	19.41±1.08^b	20.33±0.77^b	23.68±0.91^a



图版　氨氮胁迫 96 h 后，饲料中添加不同浓度白藜芦醇对大口黑鲈肝脏组织的影响

放大倍数为 40 倍。1. 0.00% 白藜芦醇，2. 0.50% 白藜芦醇，3. 1.00% 白藜芦醇；K. 核溶解，PN. 细胞外周核，HPV. 肝细胞空泡化。

Plate　Effects of different concentrations of resveratrol on liver histology in *M. salmoides* exposed to ammonia for 96 h

The magnification was 40 ×. 1. 0.00% resveratrol, 2. 0.50% resveratrol, 3. 1.00% resveratrol; K. karyolysis, PN. cellular peripheral nucleus, HPV. hepatol cellular vacuolation.

3　讨论

3.1　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈生长性能、血液健康、抗氧化酶活性、炎症及细胞凋亡的影响

白藜芦醇是一种植物源性多酚化合物，具有多种保健活性，广泛应用于营养和食品添加剂。当前不仅能够从植物中提取，在工程大肠杆菌中也能大量合成，工程大肠杆菌通过处理后可产生238.71 mg/L 的白藜芦醇，降低了白藜芦醇的市场价格，提高了白藜芦醇的应用前景[24]。尽管白藜芦醇在组织中的流动性相当有限，但在体外研究中，白藜芦醇已被证明具有强大的生理作用和对细胞的有益作用[25]，可以通过一系列的技术，如使用茶水不溶性蛋白纳米颗粒 (TWIPNPEs) 包裹的白藜芦醇在体外消化时，生物利用度可得到显著提高[26]。将白藜芦醇封装在卵磷脂-多糖自组装微球 (LPSM) 中，可提高白藜芦醇的抗氧化能力，并提高白藜芦醇在体外模拟消化过程中的生物利用度[27]。在鱼类养殖过程中饲料添加白藜芦醇 (0.5%~1.0%) 可显著提高水生动物的生长性能、免疫反应、抗病能力和抗应激能力。尽管白藜芦醇的代谢率高，半衰期短，但其生物活性使其成为水产饲料中推荐的植物添加剂[28]。在哺乳动物和鱼类研究中并未发现耐受性直接证据，尽管白藜芦醇在鱼类组织中的蓄积性较低，但其脂溶性代谢物可能通过食物链传递至高级消费者，未来需通过同位素示踪技术和生态毒理模型评估其长期生态风险。

白藜芦醇作为一种广泛应用于水产饲料的添加剂，已被证明可以提高鱼类的生长性能[29]。在鲤研究中发现，饲料添加 300 mg/kg 白藜芦醇，其末重和增重显著高于对照组[30]。在漠斑牙鲆 (*Paralichthys lethostigma*) 幼鱼研究中发现，饲料添加 600 μg/g 白藜芦醇，通过提高鱼体抗氧化能力，降低非溶酶体和溶酶体降解指标来提高其终末体重[31]。然而过高的白藜芦醇添加量会抑制团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 的生长[32]，相关研究发现这种现象与雷帕霉素靶蛋白信号通路有关[33]。在本研究中，添加白藜芦醇饲料组的大口黑鲈终末体重、WGR 和 SGR 均显著高于对照组，本研究结果和以往研究一致。在哺乳动物研究中发现，饲料添加白藜芦醇可以显著提高其粗蛋白含量[34]。在西伯利亚鲟 (*Acipenser baerii*) 研究中发现，饲料添加白藜芦醇可通过提高胞质氨基酸水平，激活MTOR 信号通路，增加肌肉蛋白质合成和积累[35]。本研究也发现，饲料中添加白藜芦醇显著提高了大口黑鲈全鱼粗蛋白的含量，饲料利用率得到显著提高，以往的研究也报道过多酚类物质提高机体饲料利用率的发现[36]。

血清生化指标通常被用来评估动物的健康状态[37]。本研究发现，饲料中添加白藜芦醇显著提高了大口黑鲈血清 TP、ALB 和 GLB 的含量。TP、ALB 和 GLB 含量的提高，往往对改善鱼类代谢水平和免疫力具有积极作用[31]。在团头鲂高脂研究中发现，饲料添加适量白藜芦醇喂养 8 周可显著降低其血浆 TG 和 TC 含量[3]。在斑马鱼的研究中发现，白藜芦醇能够通过增加斑马鱼 Sirt1 蛋白水平，来降低过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 蛋白水平，以此降低血浆 TG 水平[38]。在尼罗罗非鱼的研究中发现，饲料中添加白藜芦醇可以通过激活 *sirt*1 基因，调控 *PPAR α/γ* 通路及相关基因，来降低肝脏 TG 含量，从而调节肝脏脂肪合成和代谢[39]。本研究发现，摄食富含白藜芦醇饲料的大口黑鲈，血清 TG 和 TC 水平显著降低，同时全鱼粗脂肪含量也出现显著下降，研究结果和以往研究一致。在哺乳动物研究中同样发现，高血脂症小鼠通过外源补充白藜芦醇，显著降低了血液中 TC 和 TG 的含量，提示白藜芦醇的摄入，对脂质代谢具有较好的调节作用[40]。血清 ALT 和 AST 含量升高与肝脏损伤有关[41]。在大鼠研究中发现，外源补充白藜芦醇显著降低了血液中 ALT 和 AST 的含量，肝损伤得到了明显的缓解[42]。该发现与本研究的结果是一致的，摄食白藜芦醇的大口黑鲈血清中 ALT 和 AST 水平显著低于对照组。

在生物体有氧代谢过程中，线粒体会产生代谢副产物活性氧 (ROS)，而 ROS 的异常积累和外源性应激可通过破坏细胞内 ROS 稳态诱发氧化应激[43]。生物体自身具有的抗氧化系统，如 SOD、CAT 和 GPX 等，在保护机体免受氧化损伤方面发挥了关键作用[44]。SOD 能够将 ROS 催化为过氧化氢 (H_2O_2)，有毒的过氧化氢在 CAT 和 GPX 的进一步催化下，转变成无毒的分子氧和水[45]。白藜芦醇是一种强效抗氧化剂，能够通过减少自由基的产生来缓解氧化损伤[46]。在团头鲂研究中发现，白藜芦醇通过上调 Cu/Zn-sod 的转录，增加 T-

SOD、CAT 和 GPX 的活性，缓解高碳水化合物饲料对其抗氧化酶活性的抑制，增强机体的抗氧化性能[47]。在乌鳢 (*Channa argus*) 研究中发现，在饲料中添加 75~125 mg/kg 白藜芦醇，可以显著提高血清中 SOD、CAT 和 GPX 水平[48]。本研究发现，饲料中添加白藜芦醇显著提高了大口黑鲈肝脏中抗氧化酶的活性，此结果与大菱鲆[2] 和仔猪[49] 的研究报道一致。以往的研究认为，抗氧化酶活性的强弱还受到相关基因 mRNA 表达的调节。本研究发现，饲料中添加白藜芦醇能够显著上调大口黑鲈肝脏中 *sod*、*cat*、*gpx* 和 *gr* 基因的 mRNA 表达量，与酶活性的变化趋势一致，因此推测白藜芦醇通过提高 *sod*、*cat*、*gpx* 和 *gr* 基因的 mRNA 表达，来增强 T-AOC、SOD、CAT 和 GPX 的活性，以此提高大口黑鲈的抗氧化能力。

氧化损伤往往会诱发炎症，通过促炎细胞因子的释放，从而激活炎症反应[50]。在贡氏圆尾鲶 (*Nothobranchius guentheri*) 研究中证实，饲料中添加白藜芦醇能够显著下调肝脏中 *il*-1*β*、*tnf*-*α* 和 *il*-8 基因的表达量，以降低炎症对机体的伤害[51]。本研究也获得了类似的结果，饲料中添加白藜芦醇显著下调了大口黑鲈肝脏中 *il*-1 和 *il*-8 基因 mRNA 的表达量，从而降低了 TNF-α、IL-1 及 IL-8 的含量，提示白藜芦醇能够显著降低炎症对大口黑鲈造成的不利影响。

一般而言，炎症反应通常会伴随着细胞凋亡的发生[52]。肿瘤抑制蛋白 *p*53 是调控细胞凋亡的关键基因，通过其蛋白质产物上调促凋亡基因 *bax* 的表达，下调抗凋亡基因 *bcl*-2 的表达，在细胞凋亡过程中发挥重要的作用[53]。*bax* 的表达会进一步诱发细胞色素 C 的释放，从而激活半胱天冬氨酸酶家族成员，如 *caspase*3 和 *caspase*9[54]。在鱼肾细胞研究中发现，白藜芦醇能够降低 *bax*、*cyt*-*C*、*caspase*3 和 *caspase*9 的 mRNA 和蛋白表达水平来缓解细胞凋亡[55]。在斑马鱼胚胎研究中发现，白藜芦醇能够有效降低戊康唑诱导的 *p*53、*bcl*-2、*bax* 和 *caspase*3 基因的上调，来缓解斑马鱼胚胎细胞的凋亡[56]。本研究发现，饲料中添加白藜芦醇显著下调了大口黑鲈肝脏中 *p*53、*bax*、*caspase*3 和 *caspase*9 基因的 mRNA 表达，并上调了 *bcl*-2 的表达，类似的发现在斑马鱼研究中也有报道：外源摄入白藜芦醇抑制了由 PM2.5 衍生有机物在斑马鱼胚胎心脏中诱导的细胞凋亡[57]。推测白藜芦醇通过提高 *bcl*-2 基因表达来降低 *bax*、*caspase*3 和 *caspase*9 基因表达，以此抑制大口黑鲈肝细胞凋亡。

3.2　饲料中添加白藜芦醇对大口黑鲈氨氮耐受的影响

在 Caco-2 细胞模型中发现，白藜芦醇能够有效调节精氨酸生物合成、谷胱甘肽代谢和尿素循环[58]。在大鼠研究中发现，使用 5 mg/kg 白藜芦醇纳米乳剂可以有效降低肝脏和脑中的氨水平，改善大鼠高血氨症引起的肝脏和脑不良反应[16]。相关研究发现，白藜芦醇也能通过增加大鼠谷氨酸摄取，增强谷氨酰胺合成酶活性，增加谷氨酰胺合成酶和谷氨酸转运体表达[59]。本研究发现，96 h 急性氨氮暴露后，摄食富含白藜芦醇饲料的大口黑鲈的累计死亡率显著下降。先前的研究认为，尿素循环在鱼类急性氨氮解毒过程中发挥了重要作用[60]。本研究对大口黑鲈肝脏中尿素循环关键酶 (ASS、ASL、ARG 及 OTC) 的活性开展了进一步的测定，结果发现，氨氮胁迫对上述酶类的活性造成了抑制，通过外源摄入白藜芦醇能够显著提高它们的活性。此外，从血氨指标的变化来看，随着饲料中白藜芦醇含量的升高，尿素循环关键酶活性显著提高，血氨水平显著降低，表明白藜芦醇对尿素循环的运行具有积极的作用。肝脏是尿素循环发生的主要场所，组织学证据表明，急性氨氮胁迫造成大口黑鲈肝细胞核溶解、细胞外周核及肝细胞空泡化，而通过外源摄入白藜芦醇，大口黑鲈肝脏损伤的情况得到明显缓解。

有研究表明，氨氮胁迫还会对鱼类的免疫系统造成负面影响，导致对疾病的敏感性增强[61]。本研究证实，氨氮胁迫显著降低了大口黑鲈血清 LZM 活性、CH50 和 IG 及 Ab titer。在哺乳类研究中证实，白藜芦醇能够提高机体非特异性免疫应答，同时促进 T 淋巴细胞的增殖[62]。在本研究中，摄食富含白藜芦醇饲料的大口黑鲈血清免疫应答显著提高，与死亡率数据呈负相关，但仍不清楚氨氮耐受力与免疫应答之间是否存在必然联系，尚需进行深入研究。

4　结论

饲料中添加白藜芦醇能够提高大口黑鲈的生长性能，改善血清健康状况、抗氧化能力、炎症

及细胞凋亡；白藜芦醇通过激活尿素循环，增强大口黑鲈的氨氮耐受性，提高应激发生时的免疫应答能力。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] Kuršvietienė L, Stanevičienė I, Mongirdienė A, *et al*. Multiplicity of effects and health benefits of resveratrol[J]. Medicina, 2016, 52(3): 148-155.

[2] Tan C, Zhou H H, Wang X, *et al*. Resveratrol attenuates oxidative stress and inflammatory response in turbot fed with soybean meal based diet[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 91: 130-135.

[3] Jia E T, Yan Y N, Zhou M, *et al*. Combined effects of dietary quercetin and resveratrol on growth performance, antioxidant capability and innate immunity of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Animal Feed Science and Technology, 2019, 256: 114268.

[4] Jia R, Li Y, Cao L P, *et al*. Antioxidative, anti-inflammatory and hepatoprotective effects of resveratrol on oxidative stress-induced liver damage in tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology, 2019, 215: 56-66.

[5] Giordo R, Nasrallah G K, Al-Jamal O, *et al*. Resveratrol inhibits oxidative stress and prevents mitochondrial damage induced by zinc oxide nanoparticles in zebrafish (*Danio rerio*)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(11): 3838.

[6] Fan X Y, Yu H, Cui H W, *et al*. Optimal dietary protein/energy ratio and phosphorus level on water quality and output for a hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀) recirculating aquaculture system[J]. Water, 2023, 15(7): 1261.

[7] Zhang M Z, Wang S D, Sun Z, *et al*. The effects of acute and chronic ammonia exposure on growth, survival, and free amino acid abundance in juvenile Japanese sea perch *Lateolabrax japonicus*[J]. Aquaculture, 2022, 560: 738512.

[8] Sun Z, Wang S D, Zhang M Z, *et al*. Chronic toxicity study of ammonia exposure in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Aquaculture, 2023, 567: 739266.

[9] Wang S D, Li X, Zhang M Z, *et al*. Ammonia stress disrupts intestinal microbial community and amino acid metabolism of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 227: 112932.

[10] Ruyet J P L, Galland R, Le Roux A, *et al*. Chronic ammonia toxicity in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Aquaculture, 1997, 154(2): 155-171.

[11] Frances J, Nowak B F, A Allan G L. Effects of ammonia on juvenile silver perch (*Bidyanus bidyanus*)[J]. Aquaculture, 2000, 183(1-2): 95-103.

[12] Dawood M A O, Gewaily M S, Monier M N, *et al*. The regulatory roles of yucca extract on the growth rate, hepato-renal function, histopathological alterations, and immune-related genes in common carp exposed with acute ammonia stress[J]. Aquaculture, 2021, 534: 736287.

[13] Guo H H, Lin W, Wang L K, *et al*. The supplementation of dietary selenium yeast and green tea‐derived polyphenols improves antioxidant capacity and immune response in juvenile Wuchang bream under ammonia stress[J]. Aquaculture Research, 2020, 51(9): 3790-3803.

[14] Wu L Y, Dong B, Chen Q Z, *et al*. Effects of curcumin on oxidative stress and ferroptosis in acute ammonia stress-induced liver injury in gibel carp (*Carassius gibelio*)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(7): 6441.

[15] Wang S D, Li X, Zhang M Z, *et al*. Ellagic acid can mitigate chronic ammonia stress-induced adverse effects through the augmentation of liver autophagy in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Aquaculture, 2024, 592: 741171.

[16] Nasr M, Ahmed-Farid O A H, Ahmed R F. Curcumin-resveratrol nano-formulation counteracting hyperammonemia in rats[J]. Metabolic Brain Disease, 2023, 38(4): 1365-1377.

[17] 周向阳, 王识栋, 唐延杰, 等. 饲料中添加乙酸钠对大口黑鲈幼鱼生长、肠道健康和氨氮耐受力的影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(10): 109605.

Zhou X Y, Wang Sh D, Tang Y J, L *et al*. Effects of dietary sodium acetate supplementation on growth, intestinal health and ammonia tolerance of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(10): 109605.

[18] 中华人民共和国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. 2024 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 25.

Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook-2024[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 25 (in Chinese).

[19] Egnew N, Renukdas N, Ramena Y, *et al*. Physiological insights into largemouth bass (*Micropterus salmoides*) survival during long-term exposure to high environmental ammonia[J]. Aquatic

Toxicology, 2019, 207: 72-82.

[20] Liu Y, Liu N, Wang A, *et al*. Resveratrol inclusion alleviated high dietary carbohydrate induced glycogen deposition and immune response of largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. British Journal of Nutrition, 2022, 127(2): 165-176.

[21] AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International[M]. 18th ed. Gaithersburg, Md.: AOAC International, 2005..

[22] Schmittgen T D, Livak K J. Analyzing real-time PCR data by the comparative C_T method[J]. Nature Protocols, 2008, 3(6): 1101-1108.

[23] Li M, Zhang M Z, Qian Y X, *et al*. Ammonia toxicity in the yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*): the mechanistic insight from physiological detoxification to poisoning[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 102: 195-202.

[24] Zhao Y, Wu B H, Liu Z N, *et al*. Combinatorial optimization of resveratrol production in engineered *E. coli*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(51): 13444-13453.

[25] Gambini J, Inglés M, Olaso G, *et al*. Properties of resveratrol: *in vitro* and *in vivo* studies about metabolism, bioavailability, and biological effects in animal models and humans[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2015, 2015: 837042.

[26] Ren Z Y, Chen Z Z, Zhang Y Y, *et al*. Characteristics and *in vitro* digestion of resveratrol encapsulated in pickering emulsions stabilized by tea water-insoluble protein nanoparticles[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100642.

[27] Wang L, Lai C T, Li D, *et al*. Lecithin-polysaccharide self-assembled microspheres for resveratrol delivery[J]. Antioxidants, 2022, 11(9): 1666.

[28] Malarvizhi K, Pandi K, Ranjan A. Exploring the potential of resveratrol as feed supplement in aquaculture – a review[J]. Annals of Animal Science, 2025, 25(2): 429-440.

[29] Salomão R A S, De Paula T G, Zanella B T T, *et al*. The combination of resveratrol and exercise enhances muscle growth characteristics in pacu (*Piaractus mesopotamicus*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2019, 235: 46-55.

[30] Rohmah M K, Salahdin O D, Gupta R, *et al*. Modulatory role of dietary curcumin and resveratrol on growth performance, serum immunity responses, mucus enzymes activity, antioxidant capacity and serum and mucus biochemicals in the common carp, *Cyprinus carpio* exposed to abamectin[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2022, 129: 221-230.

[31] Wilson W N, Baumgarner B L, Watanabe W O, *et al*. Effects of resveratrol on growth and skeletal muscle physiology of juvenile southern flounder[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2015, 183: 27-35.

[32] Zhang D D, Yan Y N, Tian H Y, *et al*. Resveratrol supplementation improves lipid and glucose metabolism in high-fat diet-fed blunt snout bream[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2018, 44(1): 163-173.

[33] Liu M L, Liu F. Resveratrol inhibits mTOR signaling by targeting DEPTOR[J]. Communicative & Integrative Biology, 2011, 4(4): 382-384.

[34] Zhang C, Luo J Q, Yu B, *et al*. Dietary resveratrol supplementation improves meat quality of finishing pigs through changing muscle fiber characteristics and antioxidative status[J]. Meat Science, 2015, 102: 15-21.

[35] Yang S Y, Zhang J J, Xu Z H, *et al*. Dietary resveratrol improves the flesh quality of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) by enhancing myofiber growth, nutrient accumulation and antioxidant capacity[J]. BMC Genomics, 2024, 25(1): 514.

[36] Correddu F, Lunesu M F, Buffa G, *et al*. Can agro-industrial by-products rich in polyphenols be advantageously used in the feeding and nutrition of dairy small ruminants?[J]. Animals, 2020, 10(1): 131.

[37] Hekmatpour F, Nazemroaya S, Mousavi S M, *et al*. Digestive function and serum biochemical parameters of juvenile *Cyprinus carpio* in response to substitution of dietary soybean meal with sesame seed (*Sesamum indicum*) cake[J]. Aquaculture Reports, 2023, 28: 101438.

[38] Ran G, Ying L, Li L, *et al*. Resveratrol ameliorates diet-induced dysregulation of lipid metabolism in zebrafish (*Danio rerio*)[J]. PLoS One, 2017, 12(7): e0180865.

[39] Zheng Y, Shi Y L, Yang X X, *et al*. Effects of resveratrol on lipid metabolism in liver of red tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology, 2022, 261: 109408.

[40] Xie H C, Han H P, Chen Z, *et al*. A study on the effect of resveratrol on lipid metabolism in hyperlipidemic mice[J]. African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines, 2014, 11(1): 209-212.

[41] Zhang Y L, Zhang H L, Wang L Y, *et al*. Changes of ammonia, urea contents and transaminase activity in the body during aerial exposure and ammonia loading in Chinese loach *Paramisgurnus dabryanus*[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2017, 43(2): 631-640.

[42] Fang J N, Luo L L, Ke Z L, *et al*. Polydatin protects against

acute cholestatic liver injury in mice via the inhibition of oxidative stress and endoplasmic reticulum stress[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 55: 175-183.

[43] Okoye C N, Stevens D, Kamunde C. Modulation of mitochondrial site-specific hydrogen peroxide efflux by exogenous stressors[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2021, 164: 439-456.

[44] Wu D, Li J N, Fan Z, *et al*. Resveratrol ameliorates oxidative stress, inflammatory response and lipid metabolism in common carp (*Cyprinus carpio*) fed with high-fat diet[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 965954.

[45] Mohanty D, Samanta L. Dietary supplementation of *Spirulina* ameliorates iron-induced oxidative stress in Indian knife fish *Notopterus Notopterus*[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2018, 61: 71-78.

[46] Lee S H, Kim H S, An Y S, *et al*. Protective effect of resveratrol against cisplatin-induced ototoxicity in HEI-OC1 auditory cells[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2015, 79(1): 58-62.

[47] Ge Y P, Zhang L, Chen W L, *et al*. Resveratrol modulates the redox response and bile acid metabolism to maintain the cholesterol homeostasis in fish *Megalobrama amblycephala* offered a high-carbohydrate diet[J]. Antioxidants, 2023, 12(1): 121.

[48] Tian J X, Han G H, Li Y, *et al*. Effects of resveratrol on growth, antioxidative status and immune response of snakehead fish (*Channa argus*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(5): 1472-1481.

[49] Meng Q W, Li J W, Wang C S, *et al*. Biological function of resveratrol and its application in animal production: a review[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2023, 14(1): 25.

[50] De Lima S L S, Gomes M J C, Da Silva B P, *et al*. Whole flour and protein hydrolysate from common beans reduce the inflammation in BALB/c mice fed with high fat high cholesterol diet[J]. Food Research International, 2019, 122: 330-339.

[51] Zhu H Y, Li X W, Qiao M X, *et al*. Resveratrol alleviates inflammation and ER stress through SIRT1/NRF2 to delay ovarian aging in a short-lived fish[J]. The Journals of Gerontology: Series A, 2023, 78(4): 596-602.

[52] Zhang Y W, Dong Q L, Liu C, *et al*. Resveratrol affects the migration and apoptosis of monocytes by blocking HMGB1/NF-κB pathway[J]. Translational Cancer Research, 2021, 10(8): 3647-3658.

[53] Cao J L, Chen J J, Wang J D, *et al*. Effects of fluoride on liver apoptosis and Bcl-2, Bax protein expression in freshwater teleost, *Cyprinus carpio*[J]. Chemosphere, 2013, 91(8): 1203-1212.

[54] Xue S Q, Lin J W, Han Y, *et al*. Ammonia stress–induced apoptosis by p53–BAX/BCL-2 signal pathway in hepatopancreas of common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Aquaculture International, 2021, 29(4): 1895-1907.

[55] Li X J, Yao Y J, Wang S C, *et al*. Resveratrol relieves chlorothalonil-induced apoptosis and necroptosis through miR-15a/Bcl2-A20 axis in fish kidney cells[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 107: 427-434.

[56] Jiang X, Wang J, Liu J, *et al*. Resveratrol ameliorates penconazole-induced cardiotoxicity by inhibition of oxidative stress and apoptosis in zebrafish larvae[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 256: 114865.

[57] Ren F, Huang Y J, Tao Y Z, *et al*. Resveratrol protects against PM2.5-induced heart defects in zebrafish embryos as an antioxidant rather than as an AHR antagonist[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2020, 398: 115029.

[58] Zhang Z D, Tao Q, Bai L X, *et al*. The transport and uptake of resveratrol mediated via glucose transporter 1 and its antioxidant effect in Caco-2 Cells[J]. Molecules, 2023, 28(12): 4569.

[59] Zeng K H, Yang N, Wang D Z, *et al*. Resveratrol prevents retinal dysfunction by regulating glutamate transporters, glutamine synthetase expression and activity in diabetic retina[J]. Neurochemical Research, 2016, 41(5): 1050-1064.

[60] Song P W, Li M, Zhang M Z, *et al*. Inhibition of argininosuccinate synthase (ASS) affected ammonia excretion in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* during acute ammonia poisoning[J]. Aquaculture Reports, 2022, 22: 100931.

[61] Chen J, Wu Y C, Chen X, *et al*. A simple and reliable method for discriminating between *Helicoverpa armigera* and *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Insect Science, 2011, 18(6): 629-634.

[62] Lai X, Pei Q S, Song X, *et al*. The enhancement of immune function and activation of NF-κB by resveratrol-treatment in immunosuppressive mice[J]. International Immunopharmacology, 2016, 33: 42-47.

Effects of dietary resveratrol supplementation on growth performance, antioxidant response, and ammonia detoxification in largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

YUE Yingqi [1], WANG Shidong [1], TANG Yanjie [1], FENG Dexiang [2*], LI Ming [1*]

(1. *School of Marine Sciences*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *China*;
2. *School of Fisheries*, *Xinyang Agriculture and Forestry University*, *Xinyang* 464000, *China*)

Abstract: In order to investigate the effects of adding resveratrol to the feed on the growth performance, health status and ammonia nitrogen tolerance of *Micropterus salmoides*, the experiment was conducted on largemouth bass with an average body mass of (7.40±0.05) g. The fish were randomly divided into three groups, each with three replicates of 30 fish each, and were fed with experimental feeds containing 0.00%, 0.50% and 1.00% of resveratrol, and saturated feeding was carried out twice a day for 56 d. The results showed that supplementing the diet with resveratrol significantly enhanced the weight gain rate, protein efficiency rate and food intake, and reduced the feed conversion ratio; increased the serum total protein (TP), albumin (ALB) and globulin (GLB) contents, and decreased the triglyceride (TG), cholesterol (TC), alanine aminotransferase (ALT), and aspartate aminotransferase (AST) contents; increased the activities of total antioxidant capacity (T-AOC), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and glutathione peroxidase (GPX) in liver, decreased the contents of tumor necrosis factor-α (TNF-α), interleukin-1 (IL-1), and interleukin-8 (IL-8); up-regulated the mRNA expression of superoxide dismutase (*sod*), catalase (*cat*), glutathione reductase (*gr*), *glutathione peroxidase* (*gpx*), and b-cell lymphoma 2 (*bcl*-2) genes, and down-regulated the expression of interleukin-1 (*il*-1), interleukin-8 (*il*-8), tumor protein 53 (*p*53), bcl-2 associated X protein (*bax*), cysteine aspartate protease 3 (*caspase*3) and cysteine aspartate protease 9 (*caspase*9) genes. After 96 h of ammonia exposure, the cumulative mortality and blood ammonia content in resveratrol group were significantly lower than those in control group; but the serum lysozyme (LZM) activity, total complement (CH50), total immunoglobulin contents (IG), antibody titer (Ab titer), the activities of argininosuccinate synthetase (ASS), argininosuccinate lyase (ASL), arginase (ARG), and ornithine carbamoyltransferase (OTC) in liver were significantly higher than those in control group. The study showed that the addition of resveratrol to the feed could improve the growth performance, serum health, antioxidant capacity, inflammation and apoptosis of largemouth bass, and that resveratrol could enhance the ammonia-nitrogen tolerance of largemouth bass by activating the urea cycle, and improve the immune response to the occurrence of stress.

Key words: *Micropterus salmoides*; resveratrol; ammonia; stress resistance

Corresponding authors: FENG Dexiang. E-mail: dxfeng@xyafu.edu.cn;
LI Ming. E-mail: liming1@nbu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32473130, 32072948); Zhejiang Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs Science and Technology Cooperation Project (2024SNJF059); Natural Science Foundation of Ningbo (2024J172)