



丁昊, 何颖琳, 潘燕芳, 等. 三种藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态和肠道抗氧化功能的影响 [J]. 水产学报, 2026, 50(5): 059617.

Ding H, He Y L, Pan Y F, *et al.* Effects of three microalgal powders on growth, metamorphosis, and intestinal antioxidant function of bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) tadpoles [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(5): 059617 (in Chinese).

三种藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态和肠道抗氧化功能的影响

丁昊^{1,2}, 何颖琳^{1,2}, 潘燕芳^{1,2}, 李沃杏^{1,2}, 宋雨键^{1,2}, 雷榕^{1,2},
张特^{1,2}, 陈卓^{1,2}, 徐超^{1,2*}, 杨慧荣^{1,2*}

(1. 华南农业大学海洋学院, 广东 广州 510642;

2. 华南农业大学中山创新中心, 广东 中山 528400)

摘要: 【目的】探究 3 种藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态和肠道抗氧化功能的影响, 并筛选促生长更优的藻粉。【方法】将 1 800 尾牛蛙蝌蚪 [初始均重 (0.04±0.00) g] 随机分成 15 组, 每组 3 个重复, 分别饲喂添加不同量 3 种藻粉的饲料, 即裂壶藻粉 (0、2、5、10、15 和 20 g/kg, SC0~SC5)、螺旋藻粉 (10、20、40 和 60 g/kg, SP1~SP4) 和小球藻粉 (1、5、10、15 和 20 g/kg, CH1~CH5), 养殖 90 d, 评估蝌蚪生长和变态性能、血清甲状腺激素水平、肠道酶活性, 及肠道抗氧化功能等指标。【结果】裂壶藻粉 (SC4)、螺旋藻粉 (SP3) 和小球藻粉 (CH4) 组蝌蚪的未变态均重 (LAW)、已变态均重 (PAW)、增重率 (WGR)、特定生长率 (SGR)、摄食量 (FI) 和变态率 (MMR) 均显著高于其他实验组; 饵料系数 (FCR) 变化趋势则与之相反。各藻粉添加组蝌蚪的水分和灰分, 及饲喂螺旋藻粉蝌蚪的粗脂肪含量均无显著性差异。裂壶藻粉添加量增加至 20 g/kg 时, 粗蛋白含量达到最高值; 裂壶藻粉添加量增加至 10 g/kg 时, 粗脂肪含量达到最高值, 随着藻粉添加量的进一步增加, 粗脂肪含量则降低。螺旋藻粉添加量增加至 60 g/kg 时, 粗蛋白的含量达到最高值。小球藻粉添加量增加至 15 g/kg 时, 粗蛋白和粗脂肪含量达到最高值, 随着藻粉添加量进一步增加, 粗蛋白和粗脂肪含量则降低。各生长优势组间相比, SC4 组的 LAW 以及肠道 α -淀粉酶 (α -AMS)、脂肪酶 (LPS)、 Na^+/K^+ -ATP 酶 (Na^+/K^+ -ATPase)、肌酸激酶 (CK)、过氧化氢酶 (CAT) 活性和总抗氧化能力 (T-AOC) 的值均显著高于 SP3 和 CH4 组蝌蚪, 并且 SC4 组的 PAW、SGR、FI、MMR, 血清三碘甲状腺原氨酸 (T_3) 和四碘甲状腺原氨酸 (T_4) 水平, 以及肠道碱性磷酸酶 (AKP) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性也高于 SP3 和 CH4 组蝌蚪。然而, SC4 组蝌蚪肠道丙二醛 (MDA) 含量低于 SP3 和 CH4 组。【结论】裂壶藻粉、螺旋藻粉和小球藻粉能促进牛蛙蝌蚪的生长与变态, 这可能是由于它们可以提高肠道消化和吸收酶活性, 增强肠道的抗氧化功能和增加血清 T_3 和 T_4 水平。以 LAW 和 MMR 为评价指标, 裂壶藻粉、螺旋藻粉和小球藻粉的适宜添加量范围分别为 13.39~15.06、34.05~37.42 和 13.97~

收稿日期: 2025-12-12 修回日期: 2026-02-02

资助项目: 广东省科技厅“百千万工程”农村科技特派员第二轮重点派驻项目 (KTP20240658)

第一作者: 丁昊, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: haoding@stu.scau.edu.cn;

何颖琳, 从事水生生物学研究, E-mail: yinglinhe@stu.scau.edu.cn

通信作者: 徐超, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: xuc1213@scau.edu.cn;

杨慧荣, 从事水产养殖研究, E-mail: hry@scau.edu.cn



15.41 g/kg。此外,各生长优势组相比,15 g/kg 裂壶藻粉在促蝌蚪生长和变态中的效果更优。本研究为微藻在牛蛙蝌蚪饲料的优化提供了理论和应用依据。

关键词: 牛蛙蝌蚪;裂壶藻粉;螺旋藻粉;小球藻粉;生长和变态;甲状腺激素;消化吸收;抗氧化能力

中图分类号: S 966.3⁺¹

文献标志码: A

牛蛙 (*Lithobates catesbeianus*) 原产于北美,20 世纪末引入中国,凭借肉质鲜美、蛋白质含量高、生长速率快以及饲料转化率高优良特性,迅速发展成为我国南方地区重要的两栖类经济养殖品种^[1]。中国牛蛙产业规模持续扩张,截至 2023 年,年产量已突破 100 万 t^[2],成为水产养殖领域极具经济价值的品类之一。牛蛙完整养殖周期中,蝌蚪阶段是个体发育的关键转折期:此阶段需经历从水生幼体到水陆两栖成体的剧烈代谢重构(如食性从植食性向肉食性转变)与器官形态变化(如四肢萌出、尾部吸收、肠道结构重塑)。其中,肠道作为蝌蚪主要的营养吸收器官与免疫屏障,其功能稳定性(如消化酶活性、抗氧化能力)对营养摄取效率与免疫防御能力具有决定性影响^[3]。肠道功能优良的蝌蚪,不仅能更高效地利用饲料营养,提升生长速率,还能增强对养殖环境中病原体的抵抗力^[4]。

微藻是一类分布广泛的自养或异养微生物,因其丰富的营养成分及生态可持续性而受到关注,它们作为鱼粉等优质饲料原料的替代品表现出巨大潜力^[5]。裂壶藻 (*Schizochytrium* sp.) 为单细胞异养型海洋真菌,其多不饱和脂肪酸 (PUFA) 含量丰富,特别是二十碳五烯酸 (EPA, 20:5n-3) 和二十二碳六烯酸 (DHA, 22:6n-3)^[6]。螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 属于蓝藻门 (Cyanobacteria) 微藻,其蛋白质含量超 60%,且氨基酸组成均衡^[7]。小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 为绿藻门 (Chlorophyta) 单细胞微藻,其蛋白质含量超 50%^[8]。刘校成等^[9] 研究发现,添加 1.6% 裂壶藻粉能有效改善中国花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 的生长性能,并增强其非特异性免疫与肝脏抗氧化能力。黄亮华等^[10] 研究发现,添加 1.25% 的裂壶藻显著促进刺参 (*Apostichopus japonicus*) 的生长,并提高其免疫酶活性及肠道消化酶活性。刘翠等^[11] 研究发现,添加 2% 螺旋藻可通过在黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 皮肤中积累叶黄素增强皮肤黄度、红度和饱和度,同时通过降低血浆丙二醛 (MDA) 含量以减轻氧化

损伤,从而综合改善其体色和抗氧化状态。杨冰洁等^[12] 研究发现,添加 2.1%~5.0% 的螺旋藻能促进凡纳对虾 (*Penaeus vannamei*) 的生长性能,提高肉中蛋白质、DHA 和 EPA 含量,并激活其免疫防御系统。阙江龙等^[13] 研究表明,添加 0.75% 小球藻能提高草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 的生长性能、非特异性免疫、抗氧化能力及肌肉品质。陈度煌等^[14] 研究发现,藻粉通过提升半刺厚唇鱼 (*Acrossocheilus hemispinus*) 的消化能力与抗氧化能力来增强鱼体的健康水平,且添加小球藻粉的效果优于螺旋藻粉。

然而,目前这些微藻在两栖动物上的研究尚较缺乏,它们作为营养添加剂调控两栖动物生长和变态的生理机制有待探究。鉴于此,本研究以牛蛙蝌蚪为实验对象,分别饲喂添加不同量 3 种藻粉的饲料,养殖 90 d,评估 3 种藻粉对牛蛙蝌蚪生长和变态性能、血清甲状腺激素水平、肠道酶活性,及肠道抗氧化功能的影响,并筛选促生长更优的藻粉,以期对牛蛙蝌蚪饲料的优化提供理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 伦理声明

本研究获得华南农业大学动物伦理委员会批准(批准号:2017D006)。

1.2 实验饲料

裂壶藻粉粗蛋白和粗脂肪含量分别为 23.80% 和 41.52%,螺旋藻粉粗蛋白和粗脂肪含量分别为 61.71% 和 6.35%,小球藻粉粗蛋白和粗脂肪含量分别为 51.29% 和 15.63%,均由广东省星蛙农业科技有限公司提供。饲料配方及营养成分见表 1,其中鱼粉、鸡肉粉、脱酚棉籽蛋白、菜粕、豆粕为主要蛋白源,鱼油和豆油为主要脂肪源。在基础饲料中分别添加不同量的裂壶藻粉(0、2、5、10、15 和 20 g/kg, SC0~SC5)、螺旋藻粉(10、20、

表 1 基础饲料配方及其营养成分

Tab. 1 Ingredients and proximate composition of the basal diet

项目 item	比例/% percent
原料 formulation	
鱼粉 fish meal	10.00
鸡肉粉 chicken meal	8.00
脱酚棉籽蛋白 dephenolized cottonseed protein	15.00
菜粕 rapeseed meal	16.00
豆粕 soybean meal	30.00
玉米淀粉 corn starch	14.50
鱼油 fish oil	1.50
豆油 soybean oil	1.50
磷酸二氢钙 calcium biphosphate	1.00
氯化胆碱 choline chloride	0.50
预混料 premix ¹⁾	1.00
赖氨酸 lysine	0.50
蛋氨酸 methionine	0.50
营养成分(干物质重) proximate composition (dry weight basis)	
水分 moisture	8.14
粗蛋白 crude protein	29.17
粗脂肪 crude lipid	4.23
灰分 ash	15.53

注: 1) 预混料为每千克饲料提供CaCO₃ 314.0 g, KH₂PO₄ 469.3 g, MgSO₄·7H₂O 147.4 g, NaCl 49.8 g, FeSO₄·7H₂O 10.9 g, MnSO₄·7H₂O 3.12 g, ZnSO₄·7H₂O 4.67 g, CuSO₄·5H₂O 0.62 g, KI 0.16 g, CoCl₂·6H₂O 0.08 g, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.06 g, NaSeO₃ 0.02 g, VA 500 000 IU, VC 10 000 mg, VD₃ 50 000 IU, VE₂ 500 mg, VK₃ 1 000 mg, VB₁ 5 000 mg, VB₂ 5 000 mg, VB₆ 5 000 mg, VB₁₂ 5 000 μg, 肌醇 25 000 mg, 泛酸 10 000 mg, 胆碱 100 000 mg, 烟酸 25 000 mg, 叶酸 1 000 mg, 生物素 250 mg。

Notes: 1) per kilogram of premix supplied CaCO₃ 314.0 g, KH₂PO₄ 469.3 g, MgSO₄·7H₂O 147.4 g, NaCl 49.8 g, FeSO₄·7H₂O 10.9 g, MnSO₄·7H₂O 3.12 g, ZnSO₄·7H₂O 4.67 g, CuSO₄·5H₂O 0.62 g, KI 0.16 g, CoCl₂·6H₂O 0.08 g, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.06 g, NaSeO₃ 0.02 g, VA 500 000 IU, VC 10 000 mg, VD₃ 50 000 IU, VE₂ 500 mg, VK₃ 1 000 mg, VB₁ 5 000 mg, VB₂ 5 000 mg, VB₆ 5 000 mg, VB₁₂ 5 000 μg, inositol 25 000 mg, pantothenic acid 10 000 mg, choline 100 000 mg, niacin 25 000 mg, folic acid 1 000 mg, biotin 250 mg.

40 和 60 g/kg, SP1~SP4) 和小球藻粉 (1、5、10、15 和 20 g/kg, CH1~CH5) 作为实验饲料, 其中 SC0 为所有实验组的对照组, 其添加量分别参考刘校成等^[9]、杨冰洁等^[12]和 Shi 等^[15]的研究。本实验室测得, 各组添加藻粉饲料的营养成分均无统计学差异 ($P>0.05$)。

饲料制备严格按照配方比例准确称取各原料

粉末, 按照粒径从小到大逐级混合, 确保均匀。混合后的原料通过湿法制粒机 (北京现代洋工机械科技发展有限公司) 制成直径为 2.5 mm 的饲料颗粒, 并置于 60 °C 烘箱中干燥 24 h。干燥后将颗粒粉碎, 并通过 0.2 mm 筛网筛分。所有饲料密封包装后储存在 -20 °C 的冰箱中, 以备后续实验使用。

1.3 实验动物及饲养管理

本实验所用牛蛙蝌蚪 (7 日龄) 由广东省星蛙农业科技有限公司提供, 养殖实验在华南农业大学中山创新中心室内循环水养殖系统中进行。选取 1 800 尾健康且大小均一的蝌蚪 [(0.04±0.00) g], 随机分到 45 个循环水养殖缸 (40 L) 中, 每缸投放 40 尾, 共 15 组, 每组 3 个重复, 进行为期 90 d 的养殖实验。其间, 分别每天饱食投喂 4 次 (8:00、12:00、15:00、18:00), 水温为 25~26 °C, 溶解氧含量 ≥ 7 mg/L, 氨氮含量 < 0.1 mg/L, pH 值为 7.0~8.5, 光周期为光照 : 黑暗 = 12L : 12D。

1.4 样品采集

养殖实验结束后, 禁食 24 h, 参照 Gosner^[16]的分期方法, 分别对每缸中未变态蝌蚪和已变态幼蛙 (Gosner 42~46 期) 计数并称重。每缸随机挑选 5 尾蝌蚪 (Gosner 34~38 期), 使用浓度为 100 mg/L 的 MS-222 (Sigma, 美国) 麻醉后, 将 1 mL 无菌注射器从心脏穿刺抽血, 血液样品在 4 °C 环境静置 6 h 后 2 500 r/min 离心 10 min, 吸取血清放置于 1.5 mL 离心管中, -80 °C 保存。随后立即取出肠道组织, 液氮速冻后 -80 °C 储存, 用于肠道消化酶活性和抗氧化功能指标测定。同时, 每缸另随机采取 4 尾蝌蚪 (Gosner 34~38 期) 于 -20 °C 保存, 用于体营养成分的测定。

1.5 生长及变态指标分析

未变态均重 (LAW, g) = W_a / N_a

已变态均重 (PAW, g) = W_b / N_b

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

饵料系数 (FCR) = $S / (W_t - W_0)$

摄食量 [FI, mg/(尾·d)] = $S / (N_t \times t)$

变态率 (MMR, %) = $(N_b / N_0) \times 100\%$

式中, W_a 为 90 d 未完成变态蝌蚪总重 (g), N_a 为 90 d 未完成变态蝌蚪数 (尾), W_b 为 90 d 已完成变态幼蛙总重 (g), N_b 为 90 d 已完成变态幼蛙数 (只), W_t 为 90 d 未完成变态蝌蚪或已完成变

态的幼蛙总重 (g), W_0 为初始蝌蚪总重 (g), S 表示 90 d 摄食饲料总量 (mg), N_t 为 90 d 未完成变态蝌蚪或已完成变态幼蛙总数 (尾或只), t 为养殖天数 (d), N_0 为初始蝌蚪总数 (尾)。

1.6 饲料和蝌蚪营养成分、血清甲状腺激素水平的测定

饲料和蝌蚪样品的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量参照徐超等^[7]报道的方法进行测定。水分含量采用 105 °C 烘箱干燥至恒重法测定; 粗灰分含量通过 550 °C 马弗炉灼烧法测定; 粗蛋白含量采用杜马斯燃烧定氮法测定; 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定。

采用江苏酶免实业有限公司生产的酶联免疫法 (ELISA) 试剂盒, 使用多功能酶标仪 (Agilent, synergy H1) 测定血清三碘甲状腺原氨酸 (T_3 , MM-92885) 和四碘甲状腺原氨酸 (T_4 , MM-928864) 水平。

1.7 肠道消化酶活性及抗氧化功能的测定

准确称取牛蛙蝌蚪肠道 0.1 g, 按照重量 (g): 体积 (mL) = 1:9 加入 0.9 mL 的 0.9% 的生理盐水进行匀浆, 在 4 °C 下 2 500 r/min 离心 15 min, 取上清液。采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒, 通过使用酶标仪测定肠道 α -淀粉酶 (α -AMS, C016-1-2)、脂肪酶 (LPS, A054-2-1)、胃蛋白酶 (PES, A080-1-1)、 Na^+/K^+ -ATP 酶 (Na^+/K^+ -ATPase, A070-2-2)、碱性磷酸酶 (AKP, A059-2-2)、 γ -谷氨酰转移酶 (γ -GT, C017-2-1)、肌酸激酶 (CK, A032-1-1)、超氧化物歧化酶 (SOD, A001-2-2)、过氧化氢酶 (CAT, A007-1-1)、总抗氧化能力 (T-AOC, A015-2-1) 和 MDA (A003-1-2) 指标。

1.8 数据分析

用 IBM SPSS Statistics V22.0 软件对数据进行正态性及方差齐性检验后, 进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 并通过 Turkey 氏法进行事后多重比较, 结果均以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 裂壶藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

裂壶藻粉添加量增加至 15 g/kg 时, 蝌蚪 LAW、

PAW、SGR、FI 和 MMR 达到最高值 ($P < 0.05$), 随着裂壶藻粉添加量的进一步增加, 其值则降低; 然而 FCR 变化趋势则与之相反 (图 1)。

饲料中裂壶藻粉添加量与 LAW 和 MMR 的二次曲线回归分析结果显示, 蝌蚪生长和变态的最适添加量分别为 13.39 和 15.06 g/kg (图 2)。

2.2 螺旋藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

螺旋藻粉添加量增加至 40 g/kg 时, 蝌蚪 LAW、PAW、SGR、FI 和 MMR 达到最高值 ($P < 0.05$), 随着螺旋藻粉添加量的进一步增加, 其值降低; 然而 FCR 变化趋势与之相反 (图 3)。

饲料中螺旋藻粉添加量与 LAW 和 MMR 的二次曲线回归分析结果显示, 蝌蚪生长和变态的最适添加量分别为 37.42 和 34.05 g/kg (图 4)。

2.3 小球藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

小球藻粉添加量增加至 15 g/kg 时, 蝌蚪 LAW、PAW、SGR、FI 和 MMR 达到最高值 ($P < 0.05$), 随着小球藻粉添加量的进一步增加, 其降低; 然而 FCR 变化趋势与之相反 (图 5)。

饲料中小球藻粉添加量与 LAW 和 MMR 的二次曲线回归分析结果显示, 蝌蚪生长和变态的最适添加量分别为 13.97 和 15.41 g/kg (图 6)。

2.4 饲料中添加不同藻粉对牛蛙蝌蚪营养成分的影响

各裂壶藻粉组蝌蚪的水分和灰分含量均无显著性差异 ($P > 0.05$)。裂壶藻粉添加量增加至 20 g/kg 时, 粗蛋白含量达到最高值 ($P < 0.05$); 裂壶藻粉添加量增加至 10 g/kg 时, 粗脂肪含量达到最高值 ($P < 0.05$), 随着裂壶藻粉添加量的进一步增加, 粗脂肪含量则降低 (表 2)。

各螺旋藻粉组蝌蚪的水分、粗脂肪和灰分均无显著性差异 ($P > 0.05$)。螺旋藻粉添加量增加至 60 g/kg 时, 粗蛋白含量达到最高值 ($P < 0.05$); 螺旋藻粉添加量增加至 60 g/kg 时, 粗脂肪含量也达到最高值 (表 3)。

各小球藻粉组蝌蚪的水分和灰分均无显著性差异 ($P > 0.05$)。小球藻粉添加量增至 15 g/kg 时, 粗蛋白和粗脂肪含量达最高值 ($P < 0.05$), 随着裂壶藻粉添加量进一步增加, 粗脂肪含量降低 (表 4)。

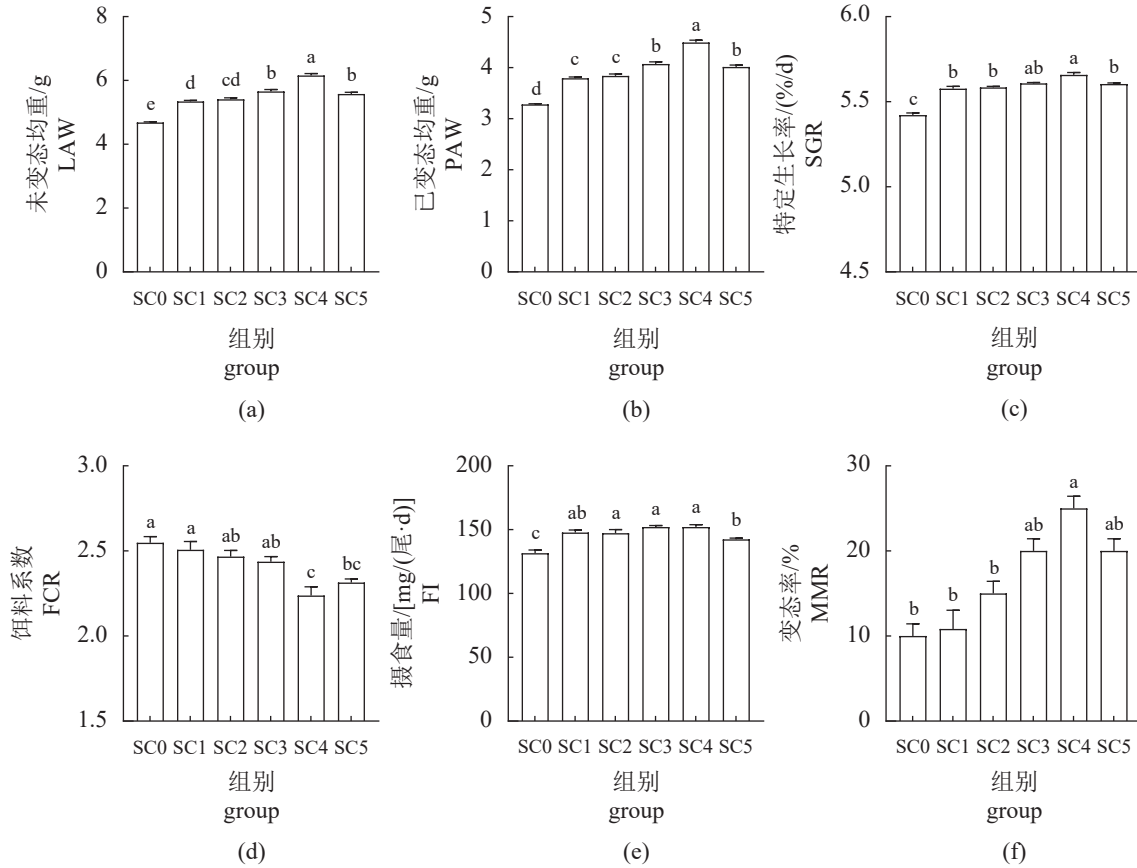


图 1 裂壶藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

SC0-SC5 分别代表添加 0、2、5、10、15 和 20 g/kg 裂壶藻粉。不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

Fig. 1 Effects of *Schizochytrium* powder on growth, metamorphosis and feed utilization in *L. catesbeianus* tadpoles

SC0-SC5 denote diets supplemented with 0, 2, 5, 10, 15, and 20 g/kg of *Schizochytrium* powder, respectively; different lowercase letters indicate significant difference between groups ($P<0.05$), the same below.

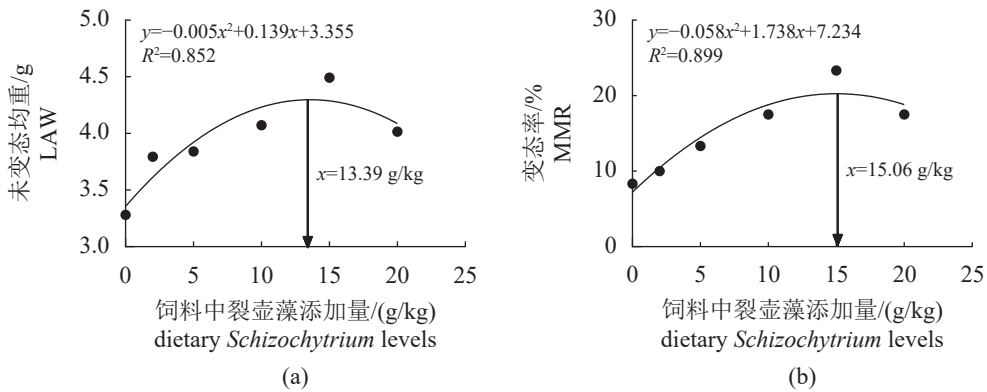


图 2 裂壶藻粉与牛蛙蝌蚪未变态均重 (LAW) 和变态率 (MMR) 的回归分析

Fig. 2 Regression analysis of the effects of dietary *Schizochytrium* levels on the larval average weight (LAW) and metamorphosis rate (MMR) of *L. catesbeianus* tadpoles

2.5 各藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的对比

各藻粉组蝌蚪的 SGR、FCR 和 FI 无显著性差异 ($P>0.05$)。SC4 组蝌蚪的 LAW 显著高于 SP3

和 CH4 组 ($P<0.05$)。SC4 组蝌蚪的 PAW 显著高于 CH4 组 ($P<0.05$), 高于 SP3 组。SC4 组蝌蚪的 MMR 显著高于 SP4 组 ($P<0.05$), 高于 CH4 组。此外, SC4 组蝌蚪 SGR 和 FI 均高于 SP3 和 CH4

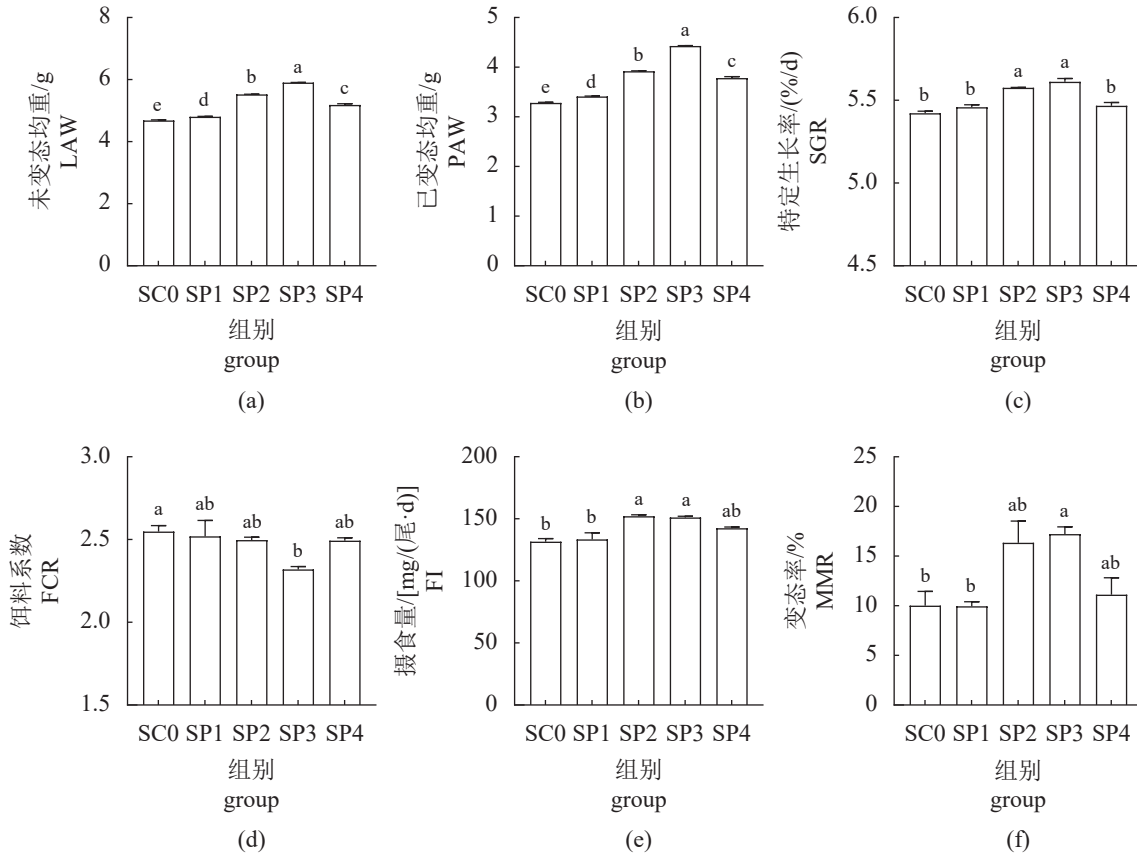


图 3 螺旋藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

SP1~SP4 分别代表添加 10、20、40 和 60 g/kg 螺旋藻粉，下同。

Fig. 3 Effects of *Spirulina* powder on growth, metamorphosis and feed utilization in *L. catsebianus* tadpoles

SP1-SP4 denote diets supplemented with 10, 20, 40 and 60 g/kg of *Spirulina* powder, respectively; the same below.

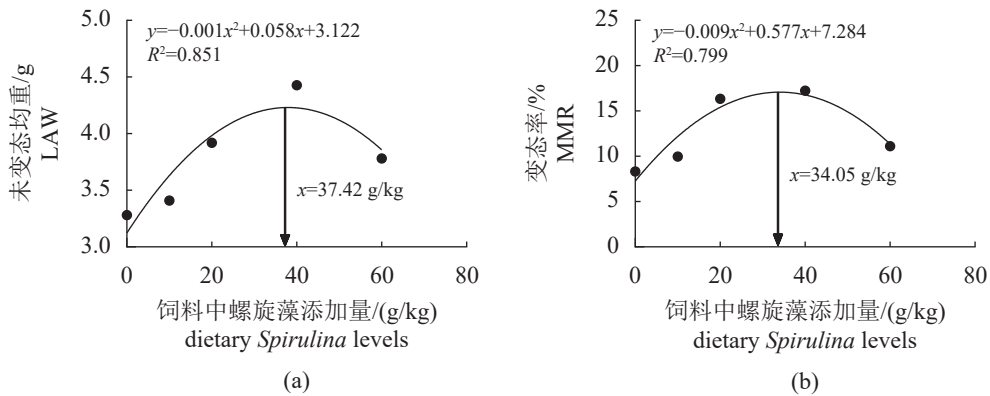


图 4 螺旋藻粉与牛蛙蝌蚪未变态均重 (LAW) 和变态率 (MMR) 的回归分析

Fig. 4 Regression analysis of the effects of dietary *Spirulina* levels on the larval average weight (LAW) and metamorphosis rate (MMR) of *L. catsebianus* tadpoles

组，FCR 则相反 (图 7)。

2.6 各藻粉对牛蛙蝌蚪血清甲状腺激素水平的影响

各藻粉组蝌蚪血清 T_3 和 T_4 水平无显著性差异 ($P > 0.05$)。SC4 组蝌蚪血清的 T_3 和 T_4 水平高于 SP3 和 CH4 组 (图 8)。

2.7 各藻粉对牛蛙蝌蚪肠道酶活性的影响

SC4 组蝌蚪肠道 α -AMS、LPS、 Na^+/K^+ -ATPase 和 CK 活性显著高于 SP3 和 CH4 组 ($P < 0.05$)。SC4 和 SP3 组蝌蚪肠道的 AKP 和 γ -GT 活性显著高于 CH4 组 ($P < 0.05$)。SC4 和 CH4 组间蝌蚪肠道

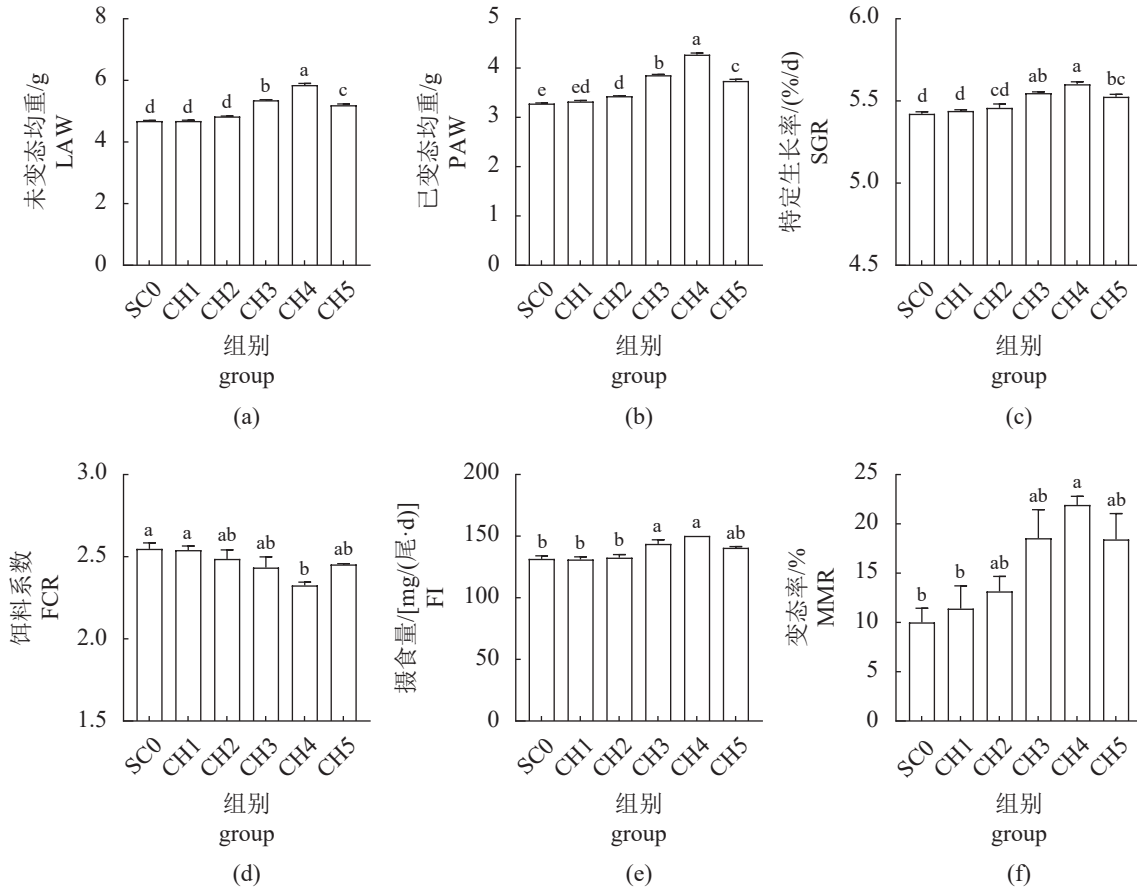


图 5 小球藻粉对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的影响

CH1~CH5 分别代表添加 1、5、10、15 和 20 g/kg 裂壶藻粉, 下同。

Fig. 5 Effects of *Chlorella* powder on growth, metamorphosis and feed utilization in *L. catesbeianus* tadpoles

CH1-CH5 denote diets supplemented with 1, 5, 10, 15, and 20 g/kg of *Chlorella* powder, respectively; the same below.

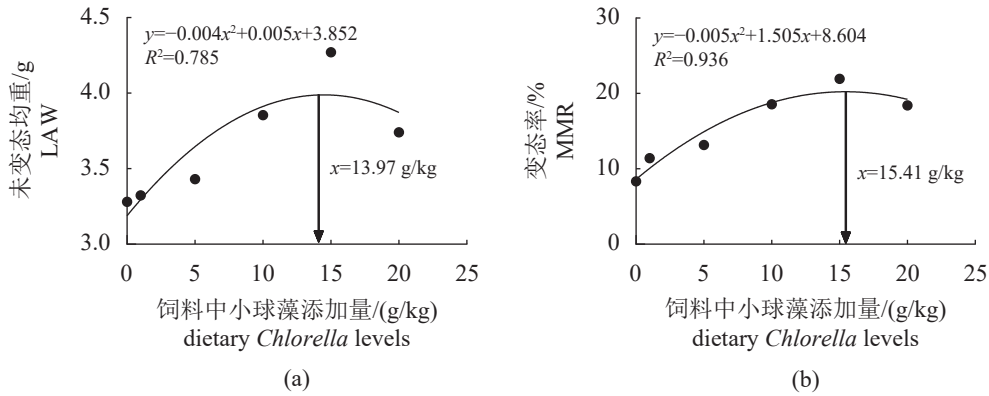


图 6 小球藻粉与牛蛙蝌蚪未变态均重 (LAW) 和变态率 (MMR) 的回归分析

Fig. 6 Regression analysis of the effects of dietary *Chlorella* levels on the larval average weight (LAW) and metamorphosis rate (MMR) of *L. catesbeianus* tadpoles

的 PES 活性显著低于 SP3 组 ($P < 0.05$) (图 9)。

2.8 各藻粉对牛蛙蝌蚪肠道抗氧化功能的影响

各藻粉组蝌蚪肠道 MDA 含量无显著性差异

($P > 0.05$)。SC4 组蝌蚪肠道的 SOD 活性显著高于 CH4 组 ($P < 0.05$), 高于 SP3 组。SC4 组蝌蚪肠道的 CAT 活性和 T-AOC 的值显著高于 SP3 和 CH4 组 ($P < 0.05$), MDA 含量低于 SP3 和 CH4 组 (图 10)。

表 2 饲料中裂壶藻粉对牛蛙蝌蚪体营养成分的影响 (干物质重)

Tab. 2 Effects of *Schizochytrium* powder on proximate composition in *L. catesbeianus* tadpoles (dry weight basis) %

项目 item	对照组 SC0	组别 group				
		SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
水分 moisture	80.16±2.64	76.69±2.90	77.02±1.64	75.23±2.49	76.62±1.53	79.15±1.88
粗蛋白 crude protein	76.53±0.91 ^c	81.84±0.21 ^{ab}	80.68±1.03 ^{bc}	84.02±0.08 ^{ab}	84.56±1.46 ^{ab}	85.19±0.78 ^a
粗脂肪 crude lipid	14.56±0.14 ^{ab}	14.40±0.22 ^b	14.51±0.21 ^b	15.91±0.33 ^a	15.03±0.15 ^{ab}	15.50±0.52 ^{ab}
灰分 ash	12.37±0.51	12.08±0.85	12.98±0.39	11.90±1.54	12.30±1.34	12.93±1.63

注: 同列数据上标不同字母表示组间存在显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

Notes: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$), the same below.

表 3 饲料中螺旋藻粉对牛蛙蝌蚪体营养成分的影响 (干物质重)

Tab. 3 Effects of *Spirulina* powder on proximate composition in *L. catesbeianus* tadpoles (dry weight basis) %

项目 item	对照组 SC0	组别 group			
		SP1	SP2	SP3	SP4
水分 moisture	80.16±2.64	79.02±0.45	77.43±0.78	78.35±0.78	77.62±0.37
粗蛋白 crude protein	76.53±0.91 ^b	81.06±0.96 ^{ab}	80.28±1.87 ^{ab}	81.80±0.98 ^{ab}	83.13±0.62 ^a
粗脂肪 crude lipid	14.56±0.14	14.63±0.32	14.70±0.20	15.22±0.07	15.74±0.41
灰分 ash	12.37±0.51	12.26±0.67	12.49±0.34	11.81±1.06	11.60±1.62

表 4 饲料中小球藻粉对牛蛙蝌蚪体营养成分的影响 (干物质重)

Tab. 4 Effects of *Chlorella* powder on proximate composition in *L. catesbeianus* tadpoles (dry weight basis) %

项目 item	对照组 SC0	组别 group				
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
水分 moisture	80.16±2.64	81.20±0.98	79.42±0.69	78.28±1.98	76.90±1.85	79.78±1.29
粗蛋白 crude protein	76.53±0.91 ^b	80.80±0.84 ^a	80.68±1.03 ^a	81.88±0.67 ^a	84.30±0.68 ^a	82.68±0.87 ^a
粗脂肪 crude lipid	14.56±0.14 ^b	14.42±0.29 ^b	14.50±0.24 ^b	14.98±0.14 ^b	16.05±0.26 ^a	15.13±0.23 ^{ab}
灰分 ash	12.37±0.51	12.71±1.01	12.44±0.24	12.02±1.27	11.52±1.33	12.47±1.28

3 讨论

3.1 藻粉影响牛蛙蝌蚪生长性能、变态及体营养成分的原因

微藻作为添加剂可促进鱼、虾、蟹及贝类幼虫的生长和变态发育, 还可降低饲料成本^[18-19]。本研究发现, 随裂壶藻粉、螺旋藻粉、小球藻粉添加量的增加, 蝌蚪的生长性能和变态均呈先升后降趋势。SC4、SP3 和 CH4 组蝌蚪的 LAW、PAW、SGR、FI 和 MMR 最高, FCR 最低。这表明, 添加 15 g/kg 裂壶藻、40 g/kg 螺旋藻粉和 15 g/kg 小球藻均能提高蝌蚪的生长、变态及饲料利用率。这些结果可能分别归因于: ①富含 DHA 和 EPA 的裂壶藻粉会激活生命有机体内的生长激

素-胰岛素样生长因子-1 (GH-IGF-1) 轴, 进而促进 IGF-1 的合成和释放^[20-21], 这可能提高蝌蚪的生长性能和变态率; ②富含藻蓝蛋白和类胡萝卜素等抗氧化活性成分的螺旋藻粉会提高机体的抗氧化能力^[22], 这有助于促进蝌蚪的生长和变态; ③富含小球藻生长因子 (CGF) 的小球藻粉会促进机体的细胞增殖及蛋白质和脂质合成^[23], 这可能有利于蝌蚪在生长和变态过程中物质的积累, 进而提高它的生长性能和变态率。此外, 对摩尔氏雨蛙 (*Litoria moorei*) 蝌蚪的研究表明, 蝌蚪体重的增加也会提高其变态速率和变态率^[24]。随着 3 种藻粉添加量的进一步增加, 蝌蚪的生长性能和变态率下降, 这可能是由于在高剂量下, 藻粉中的抗营养因子含量增加, 阻碍了营养物质的吸收,

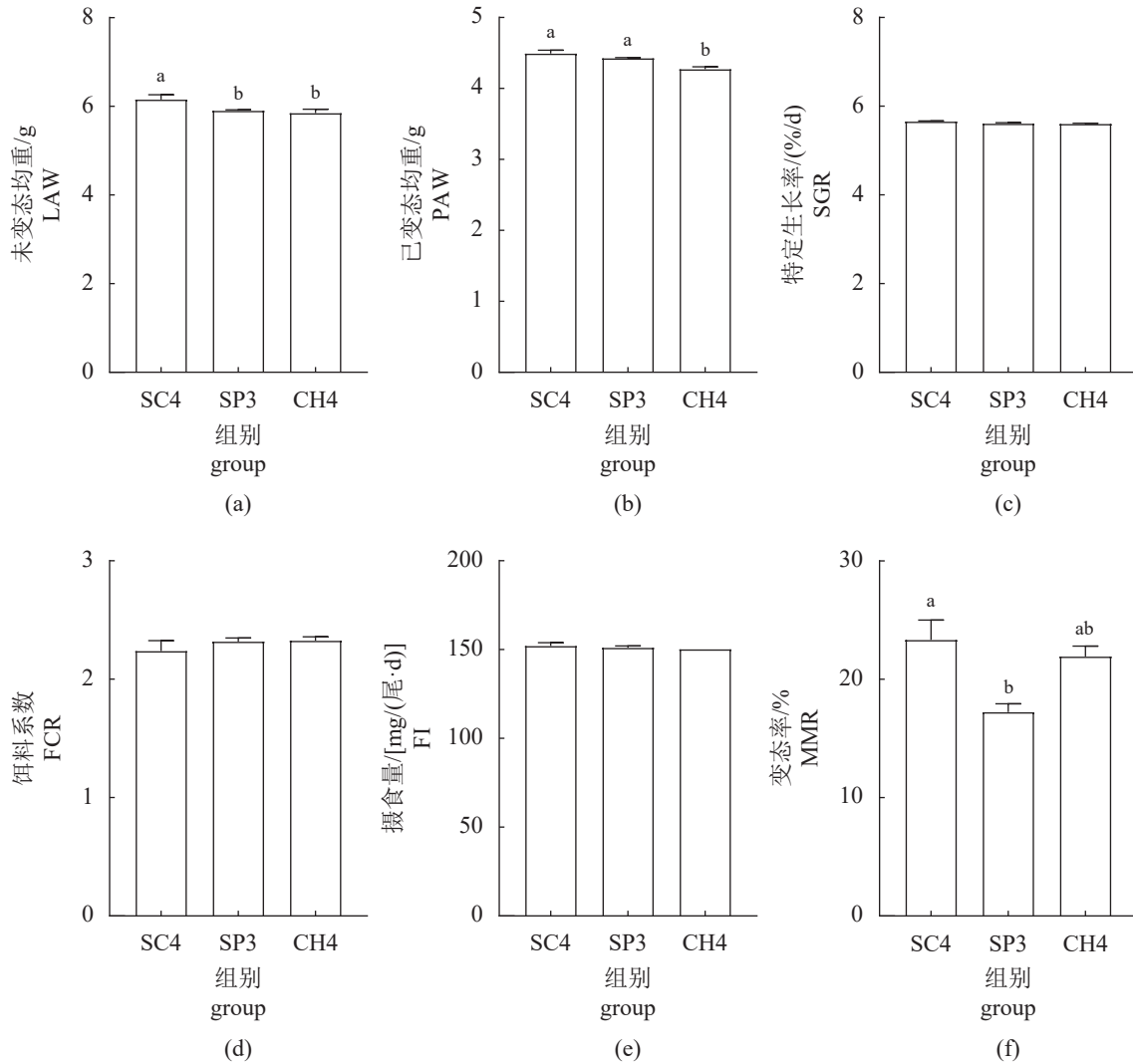


图 7 各藻粉优势组对牛蛙蝌蚪生长、变态及饲料利用的对比

Fig. 7 Comparison of different microalgal powder at their optimum levels on the growth, metamorphosis and feed utilization in *L. catesbeianus* tadpoles

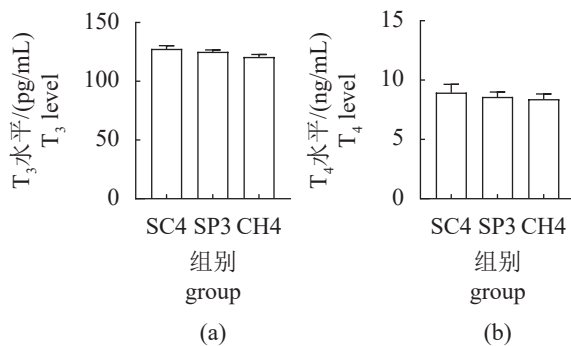


图 8 各藻粉对牛蛙蝌蚪血清甲状腺素水平的影响

Fig. 8 Effects of different microalgal powders on serum thyroid hormone levels in *L. catesbeianus* tadpoles

进而限制了蝌蚪生长和变态^[25]。

在蝌蚪体营养成分的结果中发现, 裂壶藻粉、

螺旋藻粉、小球藻粉均提高了蝌蚪的粗蛋白和粗脂肪含量。表明三种藻粉的添加均改善了蝌蚪的营养组成, 这意味着蝌蚪能把营养物质高效地转化并沉积为自身的蛋白质和脂肪。这可能分别归因于: ①富含 DHA 和 EPA 的裂壶藻粉通过上调雷帕霉素靶标蛋白 (mTOR) 信号通路, 促进核糖体的生物合成和蛋白质的翻译^[26]; 通过上调去乙酰化酶通路 (SIRT1) 信号通路, 减少脂肪分解^[25]; ②螺旋藻粉和小球藻粉中的优质蛋白, 为机体蛋白质合成提供了优质的原料^[27]; 螺旋藻粉和小球藻粉作为免疫促进剂, 通过上调过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (PPAR γ) 信号通路, 促进机体脂肪合成^[28]。

各生长优势组对比, SC4 组蝌蚪 LAW、PAW、

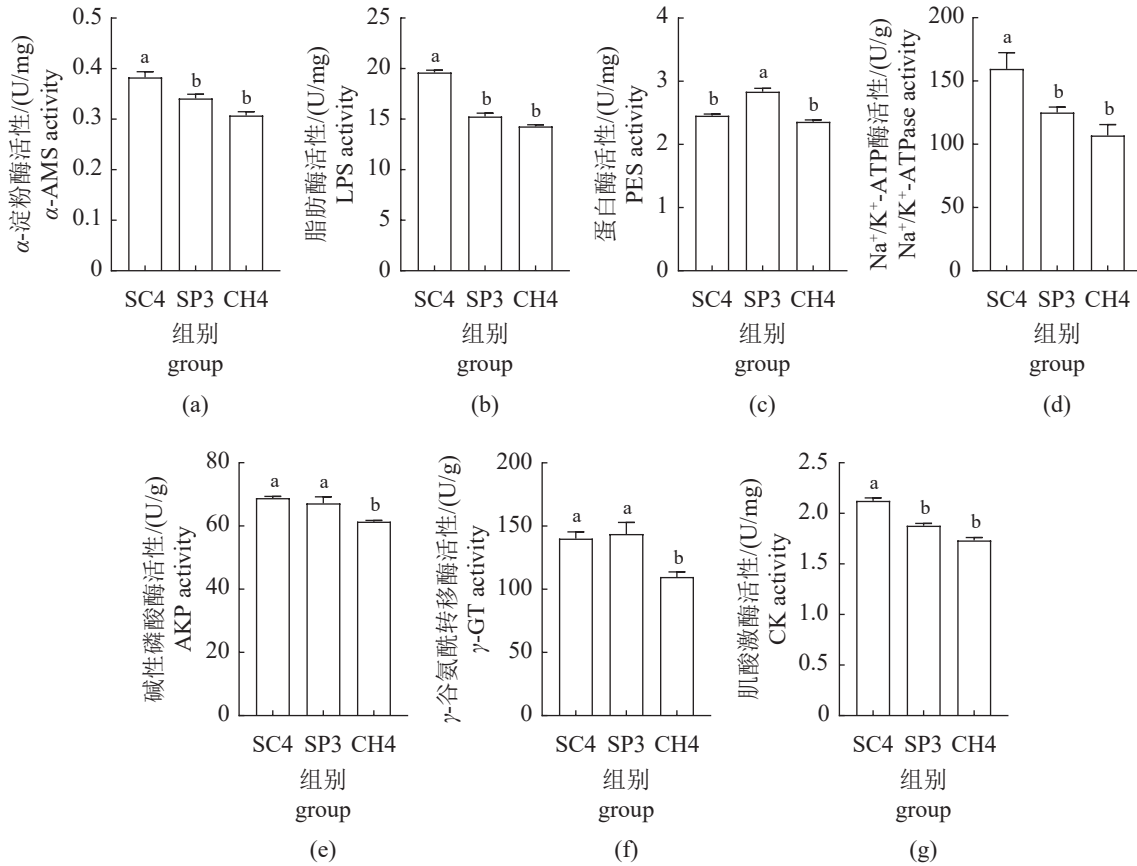


图 9 各藻粉对牛蛙蝌蚪肠道酶活性的影响

Fig. 9 Effects of different microalgal powders on intestinal enzyme activities in *L. catesbeianus* tadpoles

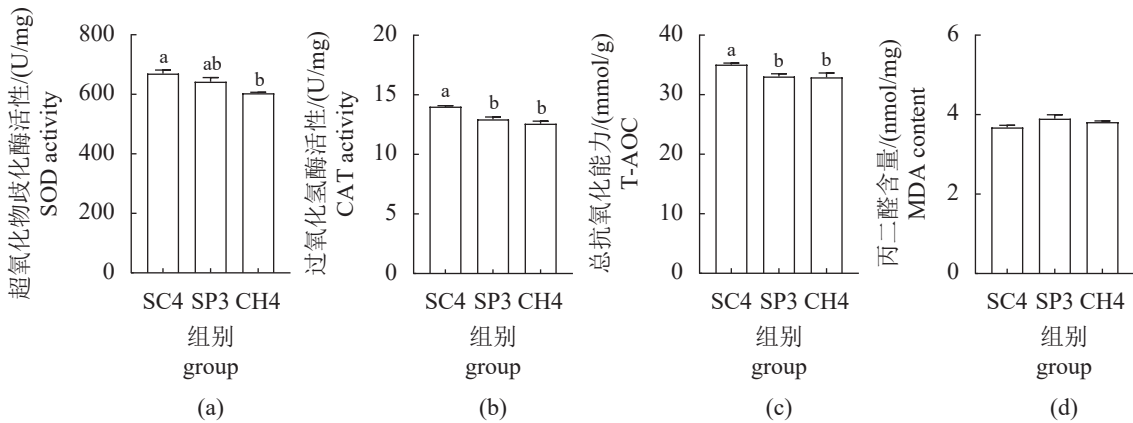


图 10 各藻粉对牛蛙蝌蚪肠道抗氧化功能的影响

Fig. 10 Effects of different microalgal powders on intestinal antioxidant capacity in *L. catesbeianus* tadpoles

SGR、FI 和 MMR 均高于 SP3 和 CH4 组，表明裂壶藻粉在促进蝌蚪生长和变态上效果更佳。这可能归因于裂壶藻粉中的 DHA 和 EPA 作为细胞膜的重要组成部分，补充后通过改善肠上皮细胞膜的完整性和功能，提高蝌蚪对营养物质的吸收能力，进而促进蝌蚪生长和变态^[29]。DHA 和 EPA 被认为是鱼类正常生理所需的必需脂肪

酸，已被证实实在鱼类的生长、发育和繁殖等多个阶段中发挥关键作用^[30]。螺旋藻粉和小球藻粉虽然富含蛋白质，但其脂肪酸组成以 α-亚麻酸 (ALA, 18:3n-3) 等为主^[31-32]。ALA 作为 DHA 和 EPA 的前体，在鱼体中虽可通过 Δ6 去饱和酶途径 (D6D) 转化为 DHA 和 EPA，但效率低于从食物中直接获取^[33]。

3.2 藻粉影响牛蛙蝌蚪血清甲状腺激素水平和肠道酶活性的原因

蝌蚪的变态过程主要受下丘脑-垂体-甲状腺(HPT)轴的调控, 它会驱动蝌蚪的组织重组和形态重塑^[34]。甲状腺通过分泌 T₃ 和 T₄ 发挥核心作用, 其中 T₄ 作为循环系统中的主要激素形式, 需在外周组织中转化为生物活性更高的 T₃^[35]。T₃ 通过结合细胞核内的甲状腺激素受体, 直接调控下游基因的转录表达, 从而启动包括尾部吸收、肢体发育及器官转化在内的变态程序^[36]。本研究发现, SC4 组 T₃ 和 T₄ 水平均高于 SP3 和 CH4 组, 这表明, 15 g/kg 裂壶藻在提高蝌蚪体内 T₃ 和 T₄ 水平方面效果更优。这可能也部分解释了蝌蚪 MMR 在 SC4 组最高的原因。这些结果可能是由于富含 PUFA 的裂壶藻粉通过激活机体 HPT 轴, 上调促甲状腺激素基因(TSH)的表达量^[37], 进而促进了 T₃ 和 T₄ 的合成和释放。此外, SP3 组 T₃ 和 T₄ 水平也高于 CH4 组。这可能是由于螺旋藻粉富含的藻蓝蛋白和类胡萝卜素等抗氧化活性成分改善了机体的抗氧化能力, 增强了甲状腺滤泡细胞的功能^[38], 从而有助于蝌蚪体内 T₃ 和 T₄ 合成能力的提升。

在肠道酶活性的结果中发现, SC4 组蝌蚪肠道 α -AMS、LPS、Na⁺/K⁺-ATPase、AKP 和 CK 活性均高于 SP3 和 CH4 组, 这表明, 15 g/kg 裂壶藻粉在促进蝌蚪肠道消化和吸收功能方面更优。这是由于: ① α -AMS 和 LPS 分别是碳水化合物和脂质消化过程中的关键酶^[39]; ② 肠道对营养物质的吸收和转运与 Na⁺/K⁺-ATP 和 AKP 等基底膜酶活性呈正相关^[40]; ③ CK 直接参与 ATP 代谢, 为营养物质吸收提供所需能量^[41]。以往研究表明, 裂壶藻粉能改善肠道绒毛长度和肌肉层厚度^[42], 这可能会提高蝌蚪肠道内消化和吸收酶的活性。此外, SP3 组蝌蚪肠道 α -AMS、LPS、PES、Na⁺/K⁺-ATPase、AKP、 γ -GT 和 CK 活性均高于 CH4 组, 这可能归因于螺旋藻粉能通过改善肠道的有益菌群^[43], 来提高肠道消化和吸收能力。

3.3 藻粉影响牛蛙蝌蚪肠道抗氧化功能的原因

蝌蚪在生长和变态过程中代谢旺盛, 会产生大量活性氧(ROS), 若超出机体清除能力将引发氧化应激, 进而损伤组织功能^[44-45]。本研究发现, SC4 组蝌蚪肠道 SOD 和 CAT 活性及 T-AOC 高于

SP3 和 CH4 组, 但该组的 MDA 含量变化趋势与之相反。这表明, 15 g/kg 裂壶藻粉在增强机体抗氧化能力方面效果更优。这是由于: ① SOD 和 CAT 是与清除超氧阴离子($\cdot\text{O}_2^-$)密切相关的重要的抗氧化酶, 其活性反映机体 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除效率; ② T-AOC 可以直接反映机体的抗氧化能力, T-AOC 高意味着抗氧化能力上升; ③ 机体的氧化损伤程度与 MDA 含量呈正相关。以往研究表明, DHA 会通过激活腺苷酸活化蛋白激酶-核因子 E2 相关因子 2 (AMPK-Nrf2) 等信号通路, 上调抗氧化酶(如 SOD 和 CAT 等)基因的表达^[46], 进而提高了机体抗氧化酶活性, 增强机体的抗氧化能力。此外, SP3 组蝌蚪肠道 SOD 和 CAT 活性及 T-AOC 均高于 CH4 组。这可能由于: ① 螺旋藻中的藻蓝蛋白会通过抑制细胞内促氧化酶(如 iNOS 和 COX-2 等)的表达与活性, 进而降低 ROS 的生成^[47]。② 螺旋藻中的 β -胡萝卜素会直接中和机体内的自由基, 进而增强机体的抗氧化能力^[48]。

4 结论

裂壶藻粉、螺旋藻粉和小球藻粉能通过提高牛蛙蝌蚪肠道消化和吸收酶活性, 增强肠道的抗氧化功能, 并增加血清 T₃ 和 T₄ 水平, 进而提高其生长与变态。裂壶藻粉、螺旋藻粉和小球藻粉的适宜添加量范围分别为 13.39~15.06、34.05~37.42 和 13.97~15.41 g/kg。各生长优势组相比, 15 g/kg 裂壶藻粉在促蝌蚪生长和变态中的效果更优。

感谢广东省星蛙农业科技有限公司提供实验动物和实验饲料, 感谢舒锐、雷小婷和张浩田作为技术顾问对本研究的支持。

(作者声明本文无利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 肖双燕, 韦冬冬, 刘明珠, 等. 广西地区美国牛蛙源弗氏柠檬酸杆菌的分离鉴定、耐药性及组织病理 [J]. 水产学报, 2024, 48(5): 059412.
- Xiao S Y, Wei D D, Liu M Z, et al. Isolation, identification, drug resistance and histopathology of *Citrobacter freundii* from bullfrog (*Rana catesbeiana*) in Guangxi[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(5): 059412 (in Chinese).
- [2] Zheng X T, Yang J L, Declercq A M, et al. The path forward for China's bullfrog industry: exploring green farming

- models[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2025, 17(3): e70012.
- [3] Munguia-Fragozo P V, Alatorre-Jacome O, Aguirre-Becerra H, *et al.* Growth and metabolic effects of stocking density in bullfrog tadpoles (*Rana catesbeiana*) under greenhouse conditions[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2015, 17(4): 711-718.
- [4] 丁昊, 何颖琳, 李沃杏, 等. 高温胁迫和恢复对牛蛙蝌蚪及幼蛙生长、变态和抗氧化功能的影响 [J/OL]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2025, 1-10. [2025-12-12] <https://xuebaozr.sysu.edu.cn/zh/article/doi/10.13471/j.cnki.acta.snus.ZR20250170/>.
- Ding H, He Y L, Li W X, *et al.* Effects of high temperature stress and recovery on growth, metamorphosis and antioxidant function of bullfrog (*Lithobates catesbeiana*) in tadpoles and juvenile stage[J/OL]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2025, 1-10. [2025-12-12] <https://xuebaozr.sysu.edu.cn/zh/article/doi/10.13471/j.cnki.acta.snus.ZR20250170/> (in Chinese).
- [5] Oostlander P C, van Houcke J, Wijffels R H, *et al.* Microalgae production cost in aquaculture hatcheries[J]. *Aquaculture*, 2020, 525: 735310.
- [6] Perez-Velazquez M, Gatlin D M, González-Félix M L, *et al.* Effect of fishmeal and fish oil replacement by algal meals on biological performance and fatty acid profile of hybrid striped bass (*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂)[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 83-90.
- [7] 李湘河, 徐静雯, 赵勇. 钝顶螺旋藻中 C-藻蓝蛋白的提取及性质 [J]. 上海海洋大学学报, 2025, 34(3): 651-663.
- Li X H, Xu J W, Zhao Y, *et al.* Extraction and characterization of C-phycoerythrin from *Spirulina platensis*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2025, 34(3): 651-663 (in Chinese).
- [8] 王安坤, 罗钰, 高群, 等. 小球藻蛋白质加工特性分析及其在冰淇淋产品中的应用 [J]. *食品工业科技*, 2026, 47(1): 31-42.
- Wang A K, Luo Y, Gao Q, *et al.* Analysis of *Chlorella* protein processing characteristics and its application in ice cream products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2026, 47(1): 31-42 (in Chinese).
- [9] 刘校成, 熊熠, 钟惠昌, 等. 饲料中添加裂壶藻粕对花鲈生长性能、非特异性免疫力及抗氧化能力的影响 [J]. *动物营养学报*, 2025, 37(4): 2576-2586.
- Liu X C, Xiong Y, Zhong H C, *et al.* Effects of dietary supplementation with *Schizochytrium* meal on growth performance, non-specific immunity and antioxidant capacity of lateolabrax maculatus[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(4): 2576-2586 (in Chinese).
- [10] 黄亮华, 李浩洋, 李彬, 等. 裂壶藻对刺参生长、免疫及消化酶的影响 [J]. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 91-97.
- Huang L H, Li H Y, Li B, *et al.* Effects of dietary *Schizochytrium limacinum* on the growth, immunity and digestion enzyme activity of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(3): 91-97 (in Chinese).
- [11] 刘翠, 刘昊昆, 朱晓鸣, 等. 饲料中添加螺旋藻和叶黄素对杂交黄颡鱼生长、抗氧化能力和体色异常调控的比较研究 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(5): 1024-1033.
- Liu C, Liu H K, Zhu X M, *et al.* The effects of *Arthrospira platensis* and lutein on the growth, antioxidant capacity and pigmentation in hybrid yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* ♀ × *P. vachelli* ♂)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1024-1033 (in Chinese).
- [12] 杨冰洁, 李涛, 吴华莲, 等. 饲料添加海水螺旋藻对凡纳滨对虾生长、营养和相关免疫因子的影响 [J]. *饲料工业*, 2020, 41(10): 38-43.
- Yang B J, Li T, Wu H L, *et al.* Effects of seawater *Spirulina platensis* in diet on growth, nutrition and immune factors of *Penaeus vannamei*[J]. *Feed Industry*, 2020, 41(10): 38-43 (in Chinese).
- [13] 阙江龙, 饶毅, 徐先栋, 等. 小球藻对草鱼生长、免疫、消化酶活性和肌肉的影响 [J]. *水产科学*, 2023, 42(5): 839-846.
- Que J L, Rao Y, Xu X D, *et al.* Effects of green alga *Chlorella pyrenoidosa* on growth performance, immune function, digestive enzyme activities and muscle quality of grass carp *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Fisheries Science*, 2023, 42(5): 839-846 (in Chinese).
- [14] 陈度煌, 张天华, 薛凌展, 等. 饵料中添加藻粉对半刺厚唇鱼消化酶活性、抗氧化能力及体成分的影响 [J]. *饲料研究*, 2022, 45(21): 67-69.
- Chen D H, Zhang T H, Xue L Z, *et al.* Effect of dietary algal powder on activity of digestive enzymes, antioxidant capacity and body composition in *Acrossocheilus hemispinus*[J]. *Feed Research*, 2022, 45(21): 67-69 (in Chinese).
- [15] Shi X, Luo Z, Chen F, *et al.* Effects of dietary cellulase addition on growth performance, nutrient digestibility and digestive enzyme activities of juvenile crucian carp *Carassius auratus*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(3): 618-628.
- [16] Gosner K L. A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification[J]. *Herpetologica*, 1960, 16(3): 183-190.
- [17] 徐超, 刘文斌, 李远友, 等. 苯磷酰胺对饲喂高糖饲料团头鲂血浆生化指标及肝糖脂代谢的影响 [J]. *中国水产科学*, 2021,

- 28(2): 186-194.
- Xu C, Liu W B, Li Y Y, *et al.* Effects of benfotiamine on serum biochemical indicators and glycolipid metabolism of blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* fed high-carbohydrate diets[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(2): 186-194 (in Chinese).
- [18] Ma K, Bao Q W, Wu Y, *et al.* Evaluation of microalgae as immunostimulants and recombinant vaccines for diseases prevention and control in aquaculture[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 590431.
- [19] Karapanagiotidis I T, Metsoviti M N, Gkalogianni E Z, *et al.* The effects of replacing fishmeal by *Chlorella vulgaris* and fish oil by *Schizochytrium* sp. and *Microchloropsis gaditana* blend on growth performance, feed efficiency, muscle fatty acid composition and liver histology of gilthead seabream (*Sparus aurata*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 561: 738709.
- [20] Ding H, He Y L, Song Y J, *et al.* *Schizochytrium* supplementation in compound feed: effects on growth, metamorphosis, intermediate metabolism, and intestinal health of bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*)[J]. *Antioxidants*, 2025, 14(10): 1208.
- [21] Innis S M. Dietary (n-3) fatty acids and brain development1[J]. *The Journal of Nutrition*, 2007, 137(4): 855-859.
- [22] Bermejo P, Piñero E, Villar Á M. Iron-chelating ability and antioxidant properties of phycocyanin isolated from a protean extract of *Spirulinaplatensis*[J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(2): 436-445.
- [23] Kitano M, Yoshida T, Maeda K, *et al.* Degradation of *Chlorella* cells during composting[J]. *Journal of Biotechnology*, 1998, 66(2-3): 187-193.
- [24] Matson P, Gaikhorst G, Kappelle W, *et al.* Enriched diets and the growth, development and survival of *Litoria moorei* (Anura) tadpoles reared in captivity at low density[J]. *Asian Herpetological Research*, 2010, 1(2): 103-110.
- [25] Sun Z L, Chi Q L, Sun L Q, *et al.* Protein extraction from microalgae residue and nutritional assessment[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2022, 45(11): 1879-1888.
- [26] Gao Y, Liu C D, Wang X, *et al.* EPA and DHA promote cell proliferation and enhance activity of the Akt-TOR-S6K anabolic signaling pathway in primary muscle cells of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2024, 50(4): 1483-1494.
- [27] Lijassi I, Arahou F, El Habacha G, *et al.* Optimization and characterization of *Spirulina* and *Chlorella* hydrolysates for industrial application[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2024, 196(3): 1255-1271.
- [28] Li Y, Jia Z, Liang X, *et al.* Growth performance, fatty-acid composition, lipid deposition and hepatic-lipid metabolism-related gene expression in juvenile pond loach *Misgurnus anguillicaudatus* fed diets with different dietary soybean oil levels[J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(1): 17-33.
- [29] Gylfason G A, Knútsdóttir E, Ásgeirsson B. Isolation and biochemical characterisation of lipid rafts from Atlantic cod (*Gadus morhua*) intestinal enterocytes[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2010, 155(1): 86-95.
- [30] Péron M, Bertrand M, Baranek E, *et al.* N-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in fish physiology: from aquaculture to economic, ecological and public health challenges[J]. *Biochimie*, 2025, 239: 4-18.
- [31] Liu M Y, Zhang M M, He Y Q, *et al.* *Spirulina subsalsa* powder produced from seawater-wastewater: a nutrient-rich and safe alternative for aquaculture feed[J]. *Bioresource Technology*, 2026, 439: 133285.
- [32] Zibarev N, Toumi A, Politaeva N, *et al.* Nutrients recovery from dairy wastewater by *Chlorella vulgaris* and comparison of the lipid's composition with various chlorella strains for biodiesel production[J]. *PLoS One*, 2024, 19(4): e0297464.
- [33] Taipale S J, Pulkkinen K, Keva O, *et al.* Lowered nutritional quality of prey decrease the growth and biomolecule content of rainbow trout fry[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2022, 262: 110767.
- [34] Carr J A, Patiño R. The hypothalamus–pituitary–thyroid axis in teleosts and amphibians: endocrine disruption and its consequences to natural populations[J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2011, 170(2): 299-312.
- [35] Heijlen M, Houbrechts A M, Darras V M. Zebrafish as a model to study peripheral thyroid hormone metabolism in vertebrate development[J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2013, 188: 289-296.
- [36] Tribondeau A, Du Pasquier D, Benchouaia M, *et al.* Overlapping action of T₃ and T₄ during *Xenopus laevis* development[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2024, 15: 1360188.
- [37] Martínez-Guitarte J L, Beltrán E M, González-Doncel M, *et al.* Effect assessment of reclaimed waters and carbamazepine exposure on the thyroid axis of *Xenopus laevis*: gene expression modifications[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 291: 118226.
- [38] Isazaei A, Bagherzadeh-Kasmani F, Ghazaghi M, *et al.* Dietary supplementation of spirulina powder (*Arthrospira platensis*)

- enhances growth, antioxidant status, immune function, and cardiac health in Japanese quails[J]. *Poultry Science*, 2025, 104(11): 105874.
- [39] Suzer C, Çoban D, Kamaci H O, *et al.* *Lactobacillus* spp. bacteria as probiotics in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) larvae: effects on growth performance and digestive enzyme activities[J]. *Aquaculture*, 2008, 280(1-4): 140-145.
- [40] Tengjaroenkul B, Smith B J, Smith S A, *et al.* Ontogenic development of the intestinal enzymes of cultured Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L.[J]. *Aquaculture*, 2002, 211(1-4): 241-251.
- [41] Wallimann T, Hemmer W. Creatine kinase in non-muscle tissues and cells[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 1994, 133-134: 193-220.
- [42] Xie J J, Fang H H, Liao S Y, *et al.* Study on *Schizochytrium* sp. improving the growth performance and non-specific immunity of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) while not affecting the antioxidant capacity[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 95: 617-623.
- [43] Liang C, Jia Y, He R T, *et al.* Spirulina regulates plastic degradation process in *Zophobas atratus* larvae: gut microbiota, molecular responses, and plastic digestion[J]. *Journal of Hazardous materials*, 2025, 497: 139594.
- [44] Liu T, Shang J J, Chen Q J. Superoxide dismutases in immune regulation and infectious diseases[J]. *Antioxidants*, 2025, 14(7): 809.
- [45] Glorieux C, Buc Calderon P. Targeting catalase in cancer[J]. *Redox Biology*, 2024, 77: 103404.
- [46] Luo L, Ai L C, Liang X F, *et al.* Effect of dietary DHA/EPA ratio on the early development, antioxidant response and lipid metabolism in larvae of Siberia sturgeon (*Acipenser baerii*, Brandt)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25(1): 239-248.
- [47] Bannu S M, Lomada D, Gulla S, *et al.* Potential therapeutic applications of C-phycoerythrin[J]. *Current Drug Metabolism*, 2019, 20(12): 967-976.
- [48] Edge R, Truscott T G. Singlet oxygen and free radical reactions of retinoids and carotenoids—a review[J]. *Antioxidants*, 2018, 7(1): 5.

Effects of three microalgal powders on growth, metamorphosis, and intestinal antioxidant function of bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) tadpoles

DING Hao^{1,2}, HE Yinglin^{1,2}, PAN Yanfang^{1,2}, LI Woxing^{1,2}, SONG Yujian^{1,2}, LEI Rong^{1,2},
ZHANG Te^{1,2}, CHEN Zhuo^{1,2}, XU Chao^{1,2*}, YANG Huirong^{1,2*}

(1. College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Zhongshan Innovation Center of South China Agricultural University, Zhongshan 528400, China)

Abstract: In the complete culture cycle of the bullfrog (*Lithobates catesbeianus*), the tadpole stage represents a critical developmental transition, accounting for approximately half of the entire cycle. Therefore, enhancing the growth and metamorphosis rate of tadpoles is of paramount importance. Microalgae are a group of widely distributed autotrophic or heterotrophic microorganisms, which have garnered attention due to their rich nutritional composition and ecological sustainability. This study investigated the effects of three microalgal powders on the growth, metamorphosis, and intestinal antioxidant function of *L. catesbeianus* tadpoles to identify the most effective supplement. A total of 1 800 tadpoles [initial body weight: (0.04±0.00) g] were randomly assigned to 15 groups with three replicates each. Over a 90-day trial, groups received diets containing graded levels of *Schizochytrium* powder (0, 2, 5, 10, 15, and 20 g/kg; SC0-SC5), *Spirulina* powder (10, 20, 40, and 60 g/kg; SP1-SP4), and *Chlorella* powder (1, 5, 10, 15, and 20 g/kg; CH1-CH5). After the 90-day feeding trial, growth performance, metamorphosis parameters, serum thyroid hormone levels, intestinal enzyme activities, and intestinal antioxidant function were evaluated. The results show that larval average weight (LAW), post-metamorphic average weight (PAW), specific growth rate (SGR), feed intake (FI), and metamorphosis rate (MMR) were significantly higher in the SC4, SP, and CH4 groups than in other groups, while the feed conversion ratio (FCR) showed an inverse pattern. Moisture and ash content did not differ significantly among supplementation groups, nor did crude lipid content in tadpoles fed *Spirulina* powder. Crude protein content was highest with 20 g/kg *Schizochytrium* powder. Crude lipid content peaked at 10 g/kg *Schizochytrium* powder before declining at higher levels. For *Spirulina* powder, crude protein content reached a maximum at 60 g/kg. Both crude protein and crude lipid contents were highest at 15 g/kg *Chlorella* powder and decreased with further supplementation. Among the three optimal growth groups (SC4, SP3, CH4), the SC4 group exhibited significantly higher LAW and intestinal activities of α -amylase (α -AMS), lipase (LPS), Na⁺/K⁺-ATPase, creatine kinase (CK), catalase (CAT), and total antioxidant capacity (T-AOC) than the SP3 and CH4 groups ($P < 0.05$). The SC4 group also showed higher LAW, SGR, FI, MMR, serum levels of triiodothyronine (T₃) and thyroxine (T₄), and intestinal alkaline phosphatase (AKP) and superoxide dismutase (SOD) activities. In contrast, intestinal malondialdehyde (MDA) content was lower in the SC4 group. *Schizochytrium*, *Spirulina*, and *Chlorella* powders promoted tadpole growth and metamorphosis, likely by enhancing intestinal digestive and absorptive enzyme activities, improving intestinal antioxidant status, and elevating serum T₃ and T₄ levels. Based on LAW and MMR, the appropriate supplementation ranges are 13.39~15.06 g/kg for *Schizochytrium* powder, 34.05~37.42 g/kg for *Spirulina* powder, and 13.97~15.41 g/kg for *Chlorella* powder. Furthermore, 15 g/kg *Schizochytrium* powder proved most effective among the optimal groups. These findings provide a theoretical and practical basis for optimizing microalgal supplementation in bullfrog tadpole feed.

Key words: *Lithobates catesbeianus* tadpoles; *Schizochytrium* powder; *Spirulina* powder; *Chlorella* powder; growth and metamorphosis; thyroid hormones; digestion and absorption; antioxidant capacity

Corresponding authors: XU Chao. E-mail: xuc1213@scau.edu.cn;

YANG Huirong. E-mail: hry@scau.edu.cn

Funding projects: The Second Round of Rural Science and Technology Special Correspondent Project of the Hundred, Thousand, and Ten Thousand Project (KTP20240658)