

酵母代谢物对养殖池塘浮游生物群落的影响

侍强¹, 王辉², 宋庆洋², 孙少强³, 米武娟³, 魏文志¹, 宋高飞³, 毕永红³

(1.扬州大学 动物科学与技术学院,江苏 扬州 225000;2.酵母功能湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443003;

3.中国科学院 水生生物研究所;中国科学院藻类生物学重点实验室,武汉 430072)

摘要:为深入探究酵母代谢物对养殖水体浮游生物群落的具体影响,研究选取草鱼主养池塘作为研究对象,设置添加酵母代谢物的实验组与未添加酵母代谢物的对照组,对两组池塘中浮游生物群落差异分析,研究结果显示,向池塘中添加酵母代谢物能够显著促进浮游动植物生长,并调节浮游动植物群落结构.具体而言,实验组浮游植物的细胞密度、叶绿素 a (Chl a) 含量以及浮游动物的密度、生物量均显著高于对照组 ($P < 0.05$).且实验组隐藻、绿藻门中多个物种优势度显著提升,第9天起 α 多样性高于对照组 ($P < 0.05$);浮游动物中轮虫和枝角类类群多个物种优势度显著提升,第12天起 α 多样性高于对照组 ($P < 0.05$).研究表明,酵母代谢物的添加显著提高实验组池塘浮游生物多样性,使得池塘生态系统更加稳定;同时形成“浮游植物增殖-浮游动物扩增”的级联效应,显著提升饵料质量,为养殖鱼类提供更丰富的营养资源.

关键词:酵母代谢物;养殖池塘;浮游植物;浮游动物

中图分类号: Q178

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)04-0041-06

浮游生物群落在水生食物网中扮演着核心角色,兼具初级生产者和消费者的双重功能,对维持水生生态系统的结构与功能至关重要^[1].在养殖池塘中,其稳定性尤为关键,直接影响水质调控效率、饵料供给能力、病害发生风险及养殖经济效益^[2].然而,随着现代化高密度集约化养殖模式的快速发展,饲料残留和养殖动物排泄物累积等问题日益突出,共同导致水体富营养化,破坏浮游生物群落结构平衡,已成为产业可持续发展的关键瓶颈^[3-4].饲料添加剂的引入在一定程度上提高了饲料利用率并增强了养殖动物免疫力^[5].但当前饲料添加剂多以化学药物为主,过度使用不仅会引发耐药性、药物残留等生态风险,还会危害人类健康^[6].因此,开发绿色、健康且能提升养殖动物品质的新型饲料添加剂刻不容缓.

酵母代谢物是指酵母菌经深度有氧发酵分泌或裂解产生的复合有机物质,其核心成分包括小分子有机酸、多糖、氨基酸、多肽、富里酸、维生素及生长因子等生物活性物质^[7].近年研究发现,饲料中添加适宜水平的酵母培养物可有效提升多种养殖动物(如松浦镜鲤 *Cyprinus carpio* var. *specularis* 'Songpu'、黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco*、草鱼 *Ctenopharyngodon idellus*、大菱鲂 *Scophthalmus maximus*、南美白对虾 *Litopenaeus vannamei*、中华绒螯蟹 *Eriocheir sinensis*)的生长性能和免疫水平^[8-10].研究表明,适量添加酵母代谢物可显著改善欧洲鲈对饲料中氮的利用率^[11].水产养殖应用研究发现,酵母代谢物能有效去除养殖水体中的氨态氮、微囊藻毒素和异味物质,并能显著增加浮游动植物的多样性,有助于维持水生生态平衡,为苗期及滤食性水产动物提供更优质的天然生物饵料^[8].由此可见,与传统仅具备单一功能的饲料添加剂不同,酵母代谢物融合了营养供给、净化水质、生物刺激、解毒调控等多重功能,可通过多途径协同提升养殖动物生

收稿日期: 2025-06-11; **修回日期:** 2025-08-27.

基金项目: 湖北省中国科学院科技合作专项;国家重点研发计划(2020YFA0907400).

作者简介: 侍强(1999—),男,江苏宿迁人,扬州大学硕士研究生,研究方向为水产养殖, E-mail: sqiangyzu@163.com.

通信作者: 宋高飞, E-mail: song@ihb.ac.cn; 魏文志, E-mail: weiwz@yzu.edu.cn.

引用本文: 侍强,王辉,宋庆洋,等.酵母代谢物对养殖池塘浮游生物群落的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(4): 41-46. (Shi Qiang, Wang Hui, Song Qingyang, et al. The effect of yeast metabolites on the plankton community in aquaculture ponds [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2026, 54(4): 41-46. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.06.11.0001.)

长性能、改善饲料利用率、调控浮游生物群落动态等.尽管酵母代谢物已在养殖实践中广泛应用,但其具体机制与生态效应尚未完全阐明.本研究通过在草鱼主养池塘中添加酵母代谢物,结合其成分特性与生态学原理,系统解析其对浮游生物群落的影响路径,为规范酵母代谢物的应用和健康养殖提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 池塘与实验材料

实验于 2023 年 6 月在湖北省洪湖市大沙镇大沙渔场进行,选取 6 个主养草鱼的池塘,其面积和水深基本相同,单池面积约 4 000 m²,平均水深 3.0 m.每个池塘均配备 1 台投饵机和 2 台功率 1.5 kW 增氧机.放养密度为:2 龄草鱼 *Ctenopharyngodon idellus* 1.5 万尾、白鲢 *Hypophthalmichthys molitrix* 1 000 尾、花鲢 *Aristichthys nobilis* 1 000 尾.实验期间投喂荆州市海大饲料公司提供的配合饲料(产品成分保证值(均为质量分数):水分≤10.0%、粗蛋白质≥28.0%、粗纤维≤13.5%、粗灰分≤13.0%、粗脂肪≥3.5%、总磷≥0.7%、赖氨酸≥1.35%),各池塘每日投喂 2 次,每次投喂 345 kg/hm²,日投喂量保持一致.酵母代谢物实验产品由宜昌安琪酵母股份有限公司提供.

1.2 实验设计

实验设置实验组(EG,添加酵母代谢物)和对照组(CG,未添加酵母代谢物),每组包含 3 个平行池塘.实验周期为 2023 年 6 月 16 日至 7 月 5 日,其间于 6 月 16 日及 25 日向 EG 池塘分 2 次添加酵母代谢物,每次添加量为 37.5 kg/hm².实验开始前采集初始水样,自首次添加后每隔 2 d 采集水样.

1.3 实验方法

实验开始前进行现场监测和采样 1 次,实验开展期间每隔 2 d 采样监测 1 次.使用 5 L 采水器在每个池塘的 3 个不同方位采集等体积水样混合用于 Chl *a* 测定和浮游动植物的定性、定量分析,具体方法详见文献[12–13].

1.4 数据分析

使用 PAST 2.17 计算浮游生物的 Shannon-Weiner 多样性指数、Simpson 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数.所有数据均记录在 Excel 中,使用 JMP 15 软件对 Chl *a*、生物多样性指数进行独立样本 *T* 检验分析,通过 Levene’s 方差齐性检验判断样本差异是否显著.使用 Origin 2021 软件进行绘图.根据公式计算浮游动植物的优势度(P_Y), $P_Y = (n_i/N) \times f_i$, n_i 为第 *i* 种浮游动物或植物的个体数, N 为样品中浮游动物或植物个体的总数, f_i 为第 *i* 种浮游动物或植物在各样本出现的频率.将 $P_Y \geq 0.02$ 作为优势种的评定标准^[14].

2 结果

2.1 浮游生物组成及丰度

实验期间共鉴定浮游植物 8 门 74 种,分属蓝藻、隐藻、金藻、黄藻、裸藻、甲藻、硅藻和绿藻.其中,对照组鉴定出 52 种浮游植物,实验组鉴定出 72 种浮游植物,实验组中绿藻种类明显增加(图 1(a)).

共鉴定浮游动物 63 种,其中原生动物 18 种、轮虫 31 种、枝角类 7 种、桡足类 7 种.对照组和实验组分别鉴定出浮游动物 58 种和 62 种(图 1(b)).与对照组相比,实验组的原生动物和枝角类物种数有所增加.

如图 2 所示,实验期间浮游植物与浮游动物密度均呈上升趋势.对照组浮游植物细胞密度范围为 $4.29 \times 10^7 \sim 7.23 \times 10^7$ L⁻¹,实验组为 $5.56 \times 10^7 \sim 11.01 \times 10^7$ L⁻¹;浮游动物密度对照组为 522~1 602 ind./L,实验组为 648~2 649 ind./L.添加酵母代谢物后,浮游植物中硅藻细胞密度与浮游动物中轮虫密度均显著增加($P < 0.05$).

浮游植物叶绿素 *a* 含量、浮游动物生物量的变化趋势均与其密度变化一致(图 3).实验期间,对照组浮游植物叶绿素质量浓度为 21.26~31.72 μg/L、实验组为 21.36~44.41 μg/L;浮游动物生物量对照组为 1.42~4.69 mg/L,实验组为 1.79~9.04 mg/L.添加酵母代谢物后,实验组浮游植物的叶绿素 *a* 质量浓度与浮游动物生物量均显著高于对照组($P < 0.05$).

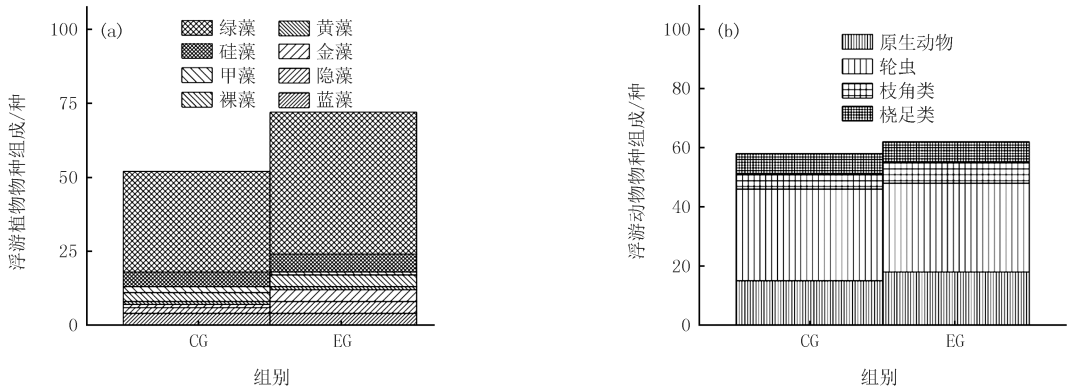


图1 对照组和实验组浮游植物(a)、浮游动物(b)物种组成
Fig.1 Phytoplankton(a),zooplankton(b) species composition in control groups and experimental groups

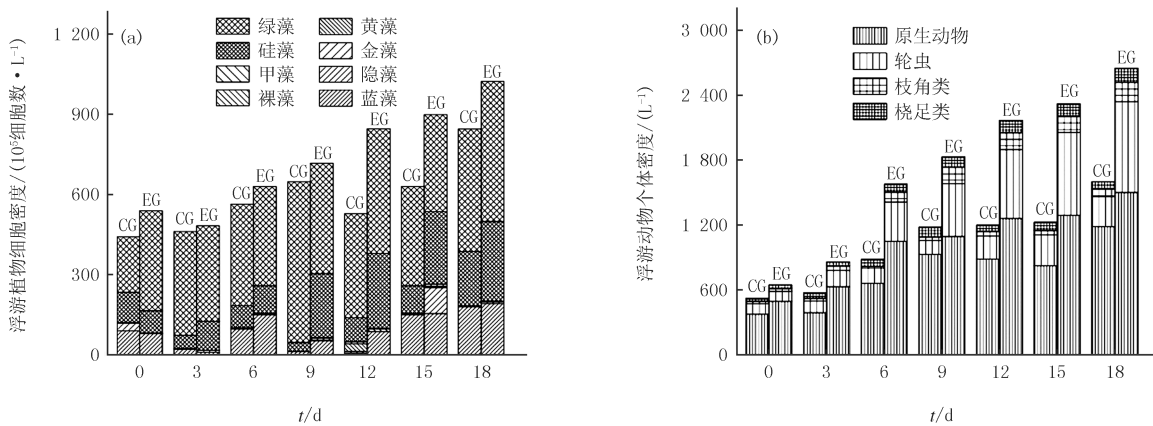
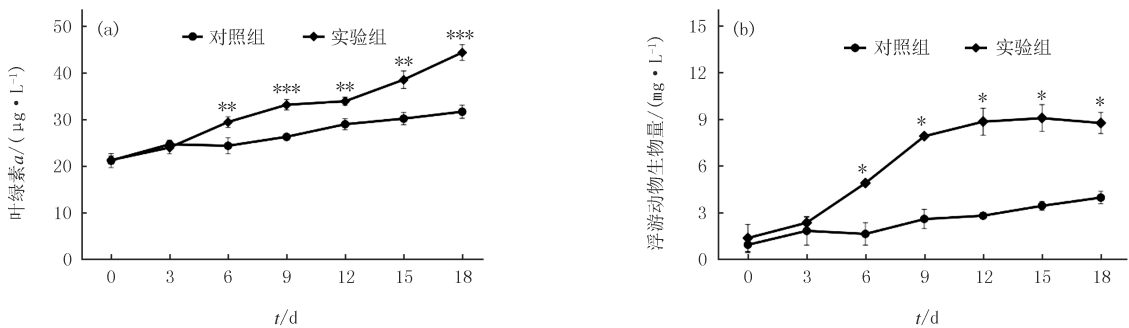


图2 对照组和实验组浮游植物细胞密度(a)、浮游动物密度(b)
Fig.2 The densities of phytoplankton(a) and zooplankton(b) in control and experimental groups



注:不同的符号表示相同时间点组间两两比较的显著性差异:* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$.

图3 实验期间对照组和实验组池塘浮游植物叶绿素a和浮游动物生物量的变化
Fig.3 The variation of phytoplankton chlorophylla a content and zooplankton biomass

2.2 浮游生物优势种与 α 多样性

浮游植物群落分析共鉴定出 10 个优势种(附录表 S1).与对照组相比,实验组蓝藻门中的细小平裂藻 *Merismopedia minima* 和硅藻门的小环藻 *Cyclotella* sp.物种优势度降低,而硅藻门的针杆藻 *Synedra* sp.以及绿藻门的蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*、四足十字藻 *Crucigenia tetrapedia*、双对栅藻 *Scenedesmus bijuga*、蹄形藻 *Kirchneriella* sp.物种优势度升高.此外,实验组中形成了隐藻 *Cryptomonas* sp.优势种,该类群在对照组中未占据优势地位.

浮游动物群落分析共鉴定出 13 个优势种,包括原生动物 5 种、轮虫 6 种和枝角类 2 种(附录表 S2).与对

对照组相比,实验组中原生动物中普通表壳虫 *Arcella vulgaris*、弯凸表壳虫 *Arcella gibbosa*、褐砂壳虫 *Difflugia avellana*、针棘刺胞虫 *Acanthocystis aculeata* 失去优势地位,而轮虫中红眼旋轮虫 *Philodina erythrophthalma*、双棘萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus ampiceros*、尼氏臂尾轮虫 *Brachionus nilsoni*、前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta*、广布多肢轮虫 *Polyarthra vulgaris* 和枝角类的短尾秀体溞 *Diaphanosoma brachyurum*、模糊秀体溞 *Diaphanosoma dubium* 物种优势度则显著升高。

添加酵母代谢物后实验组池塘的浮游生物多样性明显提升,特别是施肥 9~12 d 以后,实验组的浮游植物和浮游动物的 α 多样性显著高于对照组($P<0.05$),见附录表 S3 和 S4。

3 讨论

3.1 酵母代谢物促进浮游生物生长

在添加酵母代谢物的实验组中,浮游植物丰度处于 $5.56 \times 10^7 \sim 11.01 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ 的范围,叶绿素 *a* 质量浓度在 $21.36 \sim 44.41 \text{ }\mu\text{g/L}$ 之间,浮游动物生物量达到 $1.79 \sim 9.04 \text{ mg/L}$,均显著高于对照组的 $4.29 \times 10^7 \sim 7.23 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ (浮游植物细胞密度), $21.26 \sim 31.72 \text{ }\mu\text{g/L}$ (Chl *a* 质量浓度) 和 $1.42 \sim 4.69 \text{ mg/L}$ (浮游动物生物量),该结果证实添加酵母代谢物可有效促进浮游动植物的生长。已有研究表明,养殖水体中的氮主要源于外部输入,例如肥料和饲料的溶解、鱼类等水生生物的排泄废物等^[15]。酵母代谢物的添加,可有效促进水体中氮的利用率,而可利用氮含量的增加进一步促进了浮游植物的生长与代谢活动^[11,16]。另有研究表明,在水体中添加腐殖酸,借助腐殖酸的吸附和络合作用,可以增加浮游植物对营养元素的吸收;然而腐殖酸的加入通常会降低水体的透明度,进而影响浮游植物的光合作用,最终对浮游植物的生长产生抑制作用^[17-18]。与腐殖酸相比,添加酵母代谢物不仅不会降低养殖池塘的透明度,还能直接或间接提供有机酸、氨基酸等营养物质,进而促进水体中浮游植物的生长。

在养殖池塘中,轮虫、枝角类、桡足类等浮游动物是水产动物幼体和中上层鱼类重要的天然饵料^[19]。酵母代谢物富含生长因子、维生素和必需氨基酸,这些成分能够直接促进浮游动物的生长,进而增加浮游动物的数量和生物量^[11]。另外,在褶皱臂尾轮虫添加酵母维生素混合物的培养实验中,发现轮虫密度与叶绿素 *a* 含量正相关,这表明酵母代谢物通过促进饵料藻类的生长,间接支持轮虫数量的增长^[20]。同样有研究表明,在天然水体中添加酵母发酵碳源后,枝角类生物量增加了 50% 以上,这是因为其主要饵料小球藻的丰度上升,而且酵母代谢物中的黄酮类化合物(如阿氏丝孢酵母 HZ10 产物)能够调节枝角类的肠道菌群平衡,提升摄食效率^[21]。因此,酵母代谢物的添加可直接或间接提高浮游生物的生长速率。

3.2 酵母代谢物调节浮游生物群落结构

酵母代谢物添加还能调节浮游生物群落结构。实验组硅藻和轮虫的细胞密度显著高于对照组,且绿藻、隐藻以及轮虫、枝角类类群的多个物种优势度上升。硅藻细胞密度的增加取决于其细胞壁硅化速度,该过程需要酵母代谢物中的糖基化蛋白质和多糖,以及富里酸对环境硅酸盐的溶解作用^[22-23]。而浮游植物优势类群的转化,一方面是由于富里酸与铁产生特异性螯合剂,降低铁的可利用性并在细胞内产生过氧化氢,使蓝藻丧失竞争优势;另一方面富里酸可作为选择性肥料,有效促进绿藻和硅藻的生长并转化为优势类群^[24-25]。酵母代谢物的添加在给浮游动物提供营养与生物活性物质的同时,也通过促进硅藻、绿藻等优质浮游植物的生长,为浮游动物提供了高营养价值的饵料。因此,酵母代谢物中的特定成分可直接或间接促进某些浮游生物类群,进而改变其群落组成和优势类群。

实验组的浮游生物 α 多样性显著高于对照组($P<0.05$),表明添加酵母代谢物可提升浮游动植物的多样性,增强池塘生态稳定性。实验组中隐藻、绿藻类群的整体物种优势度及丰度均显著上升。这些藻类富含蛋白质、多糖、不饱和脂肪酸及维生素,是浮游动物和鱼类的优质饵料来源。轮虫与枝角类因摄食浮游植物,其生物量随之增加,形成“浮游植物增殖-浮游动物扩增”的级联效应。浮游动物生物量的显著提升,直接增加了鱼类的潜在饵料资源,是提升鱼类产量的重要潜在因素之一。综上,添加酵母代谢物可通过优化浮游动植物群落结构,显著提高饵料生物比例,为养殖鱼类提供更丰富的营养基础。

综上所述,添加酵母代谢物能有效提高浮游动植物的生物量和多样性。其作用机制在于增加水体营养物

质及其可利用性,从而促进浮游植物生物量和多样性的提升,并进一步驱动浮游动物生物量和多样性的增长.同时,酵母代谢物还优化了浮游动植物群落结构,促使适宜鱼类的饵料生物种类增多、生物量提高.这些变化有助于增加池塘生物多样性、维持水体稳定性,最终提升池塘生产力.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.06.11.0001).

参 考 文 献

[1] Zwart J A, Solomon C T, Jones S E. Phytoplankton traits predict ecosystem function in a global set of lakes[J]. Ecology, 2015, 96(8): 2257-2264.

[2] Hu J, Cai T H, Klümper U, et al. Novel multi-drug-resistant yeast efficiently removed ammonia nitrogen from antibiotic-contaminated aquaculture water[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2025, 203: 106111.

[3] 董纹好. 近海水产养殖对海洋渔业环境影响的研究[J]. 河北渔业, 2025(6): 83-86.

[4] Dong W Y. Research on the environmental of coastal aquaculture on the marine fisheries[J]. Hebei Fisheries, 2025(6): 83-86.

[5] 林建伟, 季高华, 杨洁, 等. 崇明岛中华绒螯蟹成蟹养殖池塘的水质变化特征及评价[J]. 上海海洋大学学报, 2025, 34(5): 1115-1130.

[6] Lin J W, Ji G H, Yang J, et al. Changes and evaluation of water quality in adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2025, 34(5): 1115-1130.

[7] 姜艳艳. 饲料添加剂行业现状与未来趋势[J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(7): 5-7.

[8] Jiang Y Y. The current status and future trends of the feed additives industry[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2025, 33(7): 5-7.

[9] 李晓晨. 功能性饲料添加剂在水产养殖中的应用研究进展[J]. 养殖与饲料, 2025, 24(6): 16-20.

[10] Li X C. Progress on the application of functional additives for feed in aquaculture[J]. Animal Breeding and Feed, 2025, 24(6): 16-20.

[11] 张煜, 牛义然, 詹吉东. 酵母菌及其衍生物在水产养殖中的研究与应用[J]. 渔业致富指南, 2019(5): 59-63.

[12] Liu H, Li J T, Guo X W, et al. Yeast culture dietary supplementation modulates gut microbiota, growth and biochemical parameters of grass carp[J]. Microbial Biotechnology, 2018, 11(3): 551-565.

[13] 杨计芳, 马嵩, 李庆飞, 等. 酵母培养物对草鱼生长性能和肠道消化酶活性的影响[J]. 中国饲料, 2025(6): 57-60.

[14] Yang J F, Ma S, Li Q F, et al. Effects of yeast culture on growth performance and intestinal digestive enzyme activity of grass carp[J]. China Feed, 2025(6): 57-60.

[15] 杨凡, 易建华, 聂琴, 等. 酵母水解物在水产饲料中的应用[J]. 中国饲料, 2016(16): 41-43.

[16] Yang F, Yi J H, Nie Q, et al. The application of yeast hydrolysate in aquatic feed[J]. China Feed, 2016(16): 41-43.

[17] Oliva-Teles A, Gonçalves P. Partial replacement of fishmeal by brewers yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in diets for sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles[J]. Aquaculture, 2001, 202(3/4): 269-278.

[18] 宋高飞, 朱宇轩, 米武娟, 等. 武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 135-142.

[19] Song G F, Zhu Y X, Mi W J, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(3): 135-142.

[20] 宋高飞, 张春梅, 朱宇轩, 等. 南水北调中线浮游植物群落分布特征及其影响因子[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 17-26.

[21] Song G F, Zhang C M, Zhu Y X, et al. Distribution characteristics of phytoplankton communities and their influencing factors along the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2023, 51(4): 17-26.

[22] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. Marine Biology, 1993, 116(4): 689-702.

[23] 王文强, 温琰茂, 柴士伟. 养殖水体沉积物中氮的形态、分布及环境效应[J]. 水产科学, 2004, 23(1): 29-33.

[24] Wang W Q, Wen Y M, Chai S W. Nitrogenous forms, distribution and environmental impacts in the sediment of aquacultural water column[J]. Fisheries Science, 2004, 23(1): 29-33.

[25] 赵忠民. 谈养鱼的科学投饵及施肥技术[J]. 农民致富之友, 2014(2): 83.

[26] Ebeling J M, Timmons M B, Bisogni J J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 2006, 257(1/2/3/4): 346-358.

[27] Ji Y Y, Shi W Q, Qin B Q. An indispensable role of overlying water in nitrogen removal in shallow lakes[J]. Science of the Total Environment, 2024, 923: 171487.

[28] 陈剑, 徐兆礼. 闽江口和椒江口浮游动物饵料特征和渔场属性的比较[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 770-779.

[29] Chen J, Xu Z L. Comparison between the zooplankton assemblage and fishing ground quality of the Minjiang River and Jiaojiang River estuaries[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 770-779.

[20] 朱天,徐世陈,蔡萌,等.褶皱臂尾轮虫土池大规模培育中酵母维生素替代鸡粪的应用效果[J].水产养殖,2022,43(7):17-22.
Zhu T,Xu S C,Cai M,et al.Effect of yeast and vitamin application in large-scale cultivation of *Brachionus plicatilis* in earthen ponds[J].
Journal of Aquaculture,2022,43(7):17-22.

[21] Xue S J,Liu J,Li X C,et al.First natural yeast strain *Trichosporon asahii* HZ10 with robust flavonoid productivity and its potential bio-synthetic pathway[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2023,71(45):17130-17140.

[22] Kröger N,Poulsen N.Diatoms:from cell wall biogenesis to nanotechnology[J].Annual Review of Genetics,2008,42:83-107.

[23] Martin M V,Gebühr C,Mártire D O,et al.Characterization of a humic acid extracted from marine sediment and its influence on the growth of marine diatoms[J].Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom,2014,94(5):895-906.

[24] Vraná D,Votruba J.Influence of soluble humic substances on the growth of *Algæ* and blue-green *Algæ*[J].Folia Microbiologica,1995,40(2):207-208.

[25] Chen M,Wang W X.Accelerated uptake by phytoplankton of iron bound to humic acids[J].Aquatic Biology,2008,3(2):155-166.

The effect of yeast metabolites on the plankton community in aquaculture ponds

Shi Qiang¹, Wang Hui², Song Qingyang², Sun Shaoqiang³, Mi Wujuan³,
Wei Wenzhi¹, Song Gaofei³, Bi Yonghong³

(1. College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China; 2. The Hubei Provincial
Key Laboratory of Yeast Function, Yichang 443003, China; 3. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and
Biotechnology; Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the specific effects of yeast metabolites on the plankton community in aquaculture water bodies, this study selected grass carp-dominated ponds as the research subject. By establishing experimental groups with added yeast metabolites and control groups without, a comparative analysis of plankton community differences was conducted. The results demonstrate that adding yeast metabolites significantly promotes the growth of plankton and regulates community structure. Specifically, the experimental group showed significantly higher values than the control group($P<0.05$) in phytoplankton cell density and Chlorophylla *a* (Chl *a*) concentration, Zooplankton density and biomass. Moreover, the dominance of multiple species within the Cryptophytes, Chlorophytes in the phytoplankton community of the experimental group was significantly increased, and the α diversity was higher than that the control group from the ninth day onwards($P<0.05$); and the dominance of multiple species within the Rotifers and Cladocerans in the zooplankton was significantly increased, and the α diversity was higher than that the control group from the twelfth day onwards($P<0.05$). This study confirms that the addition of yeast metabolites significantly increases the diversity of plankton in the experimental group ponds, making the pond ecosystem more stable. At the same time, it creates a cascade effect of "plankton proliferation-zooplankton expansion", significantly improving forage quality and providing more abundant nutritional resources for cultured fish.

Keywords: yeast metabolites; culture ponds; phytoplankton; zooplankton

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

表 S1 浮游植物主要优势种的优势度($Y\geq 0.02$)
Tab. S1 Dominance index of dominant species of phytoplankton($Y\geq 0.02$)

门	优势种	优势度	
		对照组	实验组
蓝藻	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	0.169	0.084
隐藻	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	—	0.170
硅藻	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.269	0.219
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	—	0.023
绿藻	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	—	0.040
	短刺四星藻 <i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>	0.024	—
	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	0.218	0.176
	蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp.	0.062	0.074
	蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	—	0.023
	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	0.060	0.078

注：“—”表示优势度 $Y<0.02$.

表 S2 浮游动物主要优势种的优势度($Y\geq 0.02$)
Tab. S2 Dominance index of dominant species of zooplankton($Y\geq 0.02$)

类	优势种	优势度	
		对照组	实验组
原生动物	普通表壳虫 <i>Arcella vulgaris</i>	0.073	—
	弯凸表壳虫 <i>Arcella gibbosa</i>	0.045	—
	褐砂壳虫 <i>Difflugia avellana</i>	0.028	—
	针棘刺胞虫 <i>Acanthocystis aculeata</i>	0.065	—
	阔口游仆虫 <i>Euplotes eury stomus</i>	—	0.055
轮虫	红眼旋轮虫 <i>Philodina erythrophthalma</i>	—	0.094
	双棘萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus am phiceros</i>	—	0.171
	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	0.131	0.118
	尼氏臂尾轮虫 <i>Brachionus nilsoni</i>	—	0.077
	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	0.036	0.041
	广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	—	0.034
枝角类	短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	—	0.020
	模糊秀体溞 <i>Diaphanosoma dubium</i>	—	0.032

注：“—”表示优势度 $Y<0.02$.

表 S3 浮游植物的 α 多样性指数
Tab. S3 α diversity index of phytoplankton

天数	多样性指数(H)		丰富度指数(D)		均匀度指数(J)	
	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组	实验组
0	2.84±0.387	2.75±0.186	3.08±0.39	2.92±0.16	0.73±0.020	0.72±0.010
3	2.93±0.180	2.52±0.095	2.96±0.18	2.88±0.13	0.72±0.015	0.68±0.031
6	2.67±0.202	2.84±0.086	2.63±0.20	2.84±0.08	0.63±0.035	0.64±0.010
9	2.40±0.206 ^a	2.89±0.170 ^b	2.75±0.20	2.89±0.17	0.54±0.025	0.62±0.021
12	2.59±0.087 ^a	3.05±0.151 ^b	2.71±0.15 ^a	3.20±0.13 ^b	0.51±0.025 ^a	0.72±0.056 ^b
15	2.71±0.153 ^a	3.13±0.130 ^b	2.69±0.19 ^a	3.42±0.23 ^b	0.57±0.040 ^a	0.71±0.056 ^b
18	2.66±0.186 ^a	3.16±0.100 ^b	2.74±0.17 ^a	3.38±0.12 ^b	0.58±0.036 ^a	0.76±0.056 ^b

注：相同指数不同组肩标不同时，小写字母表示显著差异($P<0.05$)，大写字母表示差异极显著($P<0.01$)，相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

表 S4 浮游动物的 α 多样性指数
Tab. S4 α diversity index of zooplankton

天数	多样性指数(H)		丰富度指数(D)		均匀度指数(J)	
	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组	实验组
0	2.81±0.048	2.91±0.047	4.58±0.127	4.77±0.080	0.88±0.060	0.87±0.083
3	2.93±0.071	2.97±0.062	4.61±0.050	4.45±0.032	0.91±0.052	0.89±0.034
6	2.61±0.041 ^a	3.19±0.097 ^b	4.63±0.130	4.72±0.074	0.84±0.055	0.92±0.036
9	2.56±0.070 ^a	3.17±0.063 ^b	4.77±0.030	4.83±0.046	0.70±0.058 ^a	0.92±0.052 ^b
12	2.65±0.054 ^a	3.24±0.075 ^b	4.78±0.083 ^a	5.06±0.112 ^b	0.77±0.077 ^a	0.93±0.056 ^b
15	2.89±0.039 ^a	3.29±0.05 ^b	4.83±0.092 ^a	5.29±0.051 ^b	0.81±0.050	0.86±0.055
18	3.07±0.051 ^a	3.28±0.030 ^b	4.90±0.157 ^a	5.32±0.098 ^b	0.85±0.034 ^a	0.94±0.037 ^b

注：相同指数不同组肩标不同时，小写字母表示显著差异($P<0.05$)，大写字母表示差异极显著($P<0.01$)，相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。