

丁振源, 何冬成, 祭仲石, 等. 不同养殖模式下斑点叉尾鲷回池塘水质及微生物群落特征[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(7): 1429-1440.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.07.014

不同养殖模式下斑点叉尾鲷池塘水质及微生物群落特征

丁振源¹, 何冬成², 祭仲石³, 韦艳³, 管卫兵¹

(1.上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2.无锡三智生物科技有限公司, 江苏 无锡 214145; 3.上海市海丰水产养殖有限公司, 江苏 盐城 224151)

摘要: 为探究斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)混养模式的生态可持续性并优化生态养殖体系, 本研究通过国家标准水质检测法和 16S rRNA 基因高通量测序技术, 分析比较斑点叉尾鲷主养模式及其与凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)混养模式池塘水体不同时空的水质指标以及门、属水平微生物群落结构的差异。水质分析结果显示, 斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养模式池塘水体氨态氮(NH₃-N)含量、可溶性磷酸盐(PO₄³⁻-P)含量均显著高于斑点叉尾鲷主养模式($P < 0.05$), 但在健康养殖阈值内未诱发病害。养殖水体微生物群落分析结果表明, 放线菌门(Actinobacteriota)细菌和变形菌门(Proteobacteria)细菌在斑点叉尾鲷主养塘及其与凡纳滨对虾混养塘水体中相对丰度均占据优势地位。冗余分析(RDA)结果表明, 斑点叉尾鲷主养塘水体微生物群落受总氮(TN)含量、总磷(TP)含量影响显著($P < 0.05$), 斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘水体可溶性磷酸盐含量是影响微生物群落的主要环境因子($P < 0.05$)。综上, 斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养系统具有良好的生态互补性和水质稳定性, 该模式通过生态位互补机制优化水质, 降低水体富营养化, 在高密度生态养殖中具有可行性。

关键词: 斑点叉尾鲷; 混养模式; 水质指标; 微生物群落

中图分类号: S964.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)07-1429-12

Water quality and microbial community characteristics in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) ponds under different aquaculture patterns

DING Zhenyuan¹, HE Dongcheng², JI Zhongshi³, WEI Yan³, GUAN Weibing¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Wuxi Sanzhi Biotechnology Co., Ltd., Wuxi 214145, China; 3. Shanghai Haifeng Aquaculture Co., Ltd., Yancheng 224151, China)

Abstract: To investigate the ecological sustainability of the polyculture model of *Ictalurus punctatus* and optimize the ecological aquaculture system, this study compared the spatiotemporal characteristics of water quality indicators and the differences in microbial community structure at phylum and genus levels between the monoculture model of *I. punctatus* and its polyculture model with *Penaeus vannamei*, using national standard water quality testing methods and 16S rRNA high-throughput sequencing technology. Water quality analysis revealed that the polyculture system exhibited significantly higher

收稿日期: 2025-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2400500)

作者简介: 丁振源(1999-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为生态渔业。(E-mail) m230501228@st.shou.edu.cn

通讯作者: 管卫兵, (E-mail) wbguan@shou.edu.cn

levels of ammonium nitrogen and soluble phosphate compared with the monoculture system ($P < 0.05$). However, all values remained within the healthy aquaculture thresholds, and no disease outbreaks were observed. Microbial community analysis indicated that Actinobacteri-

ota and Proteobacteria were the dominant phyla in both systems. Redundancy analysis further revealed that the microbial community in monoculture ponds was significantly influenced by total nitrogen content and total phosphorus content ($P < 0.05$), whereas soluble phosphate content was the primary environmental factor affecting the microbial community in polyculture ponds ($P < 0.05$). In summary, the *I. punctatus*-*P. vannamei* polyculture system exhibits strong ecological complementarity and water quality stability. This model enhances water quality and reduces eutrophication through niche complementarity mechanisms, demonstrating its feasibility in high-density pond aquaculture.

Key words: *Ictalurus punctatus*; polyculture system; water quality indicators; microbial community

斑点叉尾鲴 (*Ictalurus punctatus*) 原产于美洲, 现已成为中国经济性状优良的淡水养殖鱼类之一。1984 年引入中国后, 科研人员围绕其生物学特性、繁殖技术及养殖技术开展了一系列本土化研究^[1], 为产业发展奠定了坚实基础。由江苏省淡水水产研究所主导育成的江丰一号斑点叉尾鲴杂交品种突破了该产业的种源封锁瓶颈, 构建了国内首个斑点叉尾鲴育种体系^[2]; 湖北省水产科学研究所蔡焰值研发优化了适用于中国养殖条件的斑点叉尾鲴培育技术, 改进了池塘精养与网箱养殖模式, 并针对国内斑点叉尾鲴常见病害, 提出了预防性用药与免疫增强的综合性预防控制方案^[3-4]; 江苏省淡水水产研究所陈校辉、钟立强、王明华等在斑点叉尾鲴遗传育种、健康养殖、病害防治等领域开展了系统性研究, 持续推动产业的可持续发展^[5-6]。其中, 钟立强等^[7-8]采用高通量测序技术, 分析了江苏省南京市斑点叉尾鲴养殖池塘底泥与水体的微生物群落结构, 证实其细菌群落存在明显的季节性差异, 但该研究仅聚焦于南京地区的池塘主养模式, 未涉及混养体系; 盖建军等^[9]对斑点叉尾鲴不同养殖模式的水质状况进行了初步比较, 结果表明, 池塘工业化循环水养殖模式水质表现最优, 大水面混养模式水质次之, 小水体主养模式水质相对较差, 但其研究未对不同养殖模式下的微生物群落特征展开对比分析。目前, 研究人员已在全国范围内探索与推广斑点叉尾鲴生态混养模式, 而关于该模式下微生物群落的时空变化特征及其与水质的关联性研究仍较为欠缺。

当前, 斑点叉尾鲴养殖面临模式单一、市场波动大等问题, 导致效益不稳定, 制约了产业的可持续发展。为降低风险、提高效益, 优化放养结构、实行多品种混养已成为重要方向。混养模式利用生物间的互利共生关系, 能有效控制病害、提高饵料利用率。相关研究结果表明, 杂食性的斑点叉尾鲴具有良好的混养适应性, 可与多种鱼类混养^[10-13]。同

样, 凡纳滨对虾也常与罗非鱼、草鱼等搭配养殖^[14-16]。已有试验结果证实, 斑点叉尾鲴与凡纳滨对虾在生态上具备混养的可行性^[17-18]。然而, 目前关于二者混养体系下的水质及微生物群落组成的相关研究仍十分匮乏。因此, 深入探究该混养模式微生物群落的结构与功能, 对构建适宜的混养体系以及保障养殖成功具有重要意义。

本研究依托江苏省盐城市大丰区上海市海丰水产养殖有限公司, 以斑点叉尾鲴主养模式及其与凡纳滨对虾混养模式为研究对象, 系统探究水环境动态变化下池塘微生物的群落组成特征, 以期为推动斑点叉尾鲴产业技术升级、助力水产养殖业可持续发展提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于江苏省盐城市大丰区上海市海丰水产养殖有限公司养殖区 ($33^{\circ}31'03''\text{N}$, $120^{\circ}63'90''\text{E}$), 该区域主要养殖模式为沿海低密度大水面池塘养殖。试验池塘为海丰示范基地养殖 10 区, 主养斑点叉尾鲴并混养少量鲢鱼、鳙鱼的 16 号、19 号、24 号塘, 以及斑点叉尾鲴与凡纳滨对虾混养并搭配少量鲢鱼、鳙鱼的 15 号、20 号、23 号塘。各试验塘的养殖参数见表 1。

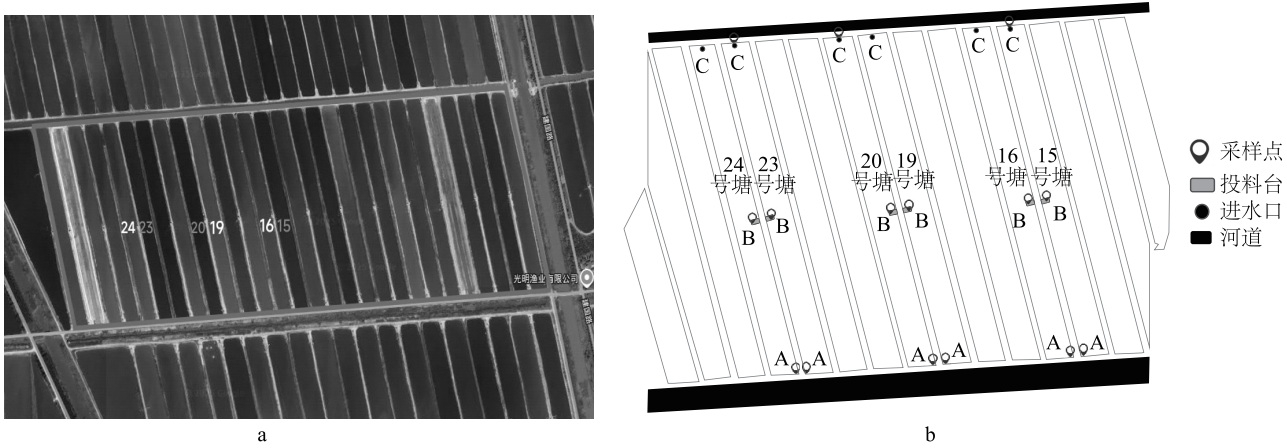
1.2 样品采集

采样点 (图 1) 设置于养殖池塘边缘、投料台和进水口 (分别用 A、B、C 表示)。试验于 2024 年 9 月进行, 养殖区维持正常生产, 每天分 2 次以塘内鱼 (虾) 总体质量 2% 的量进行投喂饵料。采样时间选择在晴天早上, 主养塘每隔 10 d 在 A、B 采样点各采集 1 次水样; 混养塘每隔 20 d 在 A、B、C 采样点各采集 1 次水样。水样采集深度设定为水体透明度对应水层, 每份样品采集量为 500 mL, 样品编号遵循“W+塘号”格式进行标记, 并于 12 h 内完成水质测定。

表 1 本试验所选养殖池塘基本情况

Table 1 Basic information of the aquaculture ponds used in this study

养殖池塘 编号	池塘面积 (hm ²)	养殖模式	斑点叉尾鲷		鳊鱼		鲢鱼		凡纳滨对虾
			密度 (尾,1 hm ²)	规格 (kg,1 尾)	密度 (尾,1 hm ²)	规格 (kg,1 尾)	密度 (尾,1 hm ²)	规格 (kg,1 尾)	密度 (×10 ⁵ 尾,1 hm ²)
W16	2.80	斑点叉尾鲷主养	18 630	0.35	825	0.25	450	0.25	—
W19	2.87	斑点叉尾鲷主养	36 138	0.17	795	0.25	450	0.25	—
W24	2.87	斑点叉尾鲷主养	52 274	0.08	1 200	0.35~1.08	2 308	0.02	—
W15	2.80	斑点叉尾鲷与凡 纳滨对虾混养	10 729	0.35	1 380	0.39~0.80	2 295	0.02	4.605
W20	2.87	斑点叉尾鲷与凡 纳滨对虾混养	11 307	0.38	1 124	0.39~0.80	765	0.35~0.85	4.615
W23	2.80	斑点叉尾鲷与凡 纳滨对虾混养	10 125	0.38	1 060	0.35	738	0.40~0.60	4.285



a:卫星图;b:平面示意图。A、B、C 分别表示采样点位置为池塘边缘、投料台、进水口。

图 1 试验塘卫星图和平面示意图

Fig.1 Satellite map and schematic diagram of the experimental ponds

1.3 池塘水质检测

池塘水质指标主要包括温度 (T)、酸碱度 (pH)、氨态氮 (NH₃-N) 含量、亚硝态氮 (NO₂-N) 含

量、可溶性磷酸盐 (PO₄³⁻-P) 含量、总氮 (TN) 含量、总磷 (TP) 含量、化学需氧量 (COD) 以及水体微生物等 9 项数据。水质指标检测方法见表 2。

表 2 本试验中池塘水质指标的检测方法

Table 2 Determination methods of water quality parameters in the experimental ponds of this study

指标	检测方法	参考标准
温度	美国 YSI6920v2 多功能便携式水质检测仪法	
酸碱度 (pH)	美国 YSI6920v2 多功能便携式水质检测仪法	
亚硝态氮 (NO ₂ -N) 含量	萘乙二胺分光光度法	GB/T 11889-1989《水质 亚硝态氮的测定 分光光度法》
氨态氮 (NH ₃ -N) 含量	纳氏试剂分光光度法	HJ 535-2009《水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》
可溶性磷酸盐 (PO ₄ ³⁻ -P) 含量	离子色谱法	HJ 669-2013《水质磷酸盐的测定 离子色谱法》
总磷 (TP) 含量	钼酸铵分光光度法	GB 11893-1989《水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法》
总氮 (TN) 含量	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636-2012《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》
化学需氧量 (COD)	重铬酸盐法	HJ 828-2017《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》

水体微生物检测流程:取 100 mL 水样预过滤,去除大颗粒杂质,随后采用孔径 0.22 μm 的混合纤维素酯(MCE)水系微孔滤膜(天津市津腾实验设备有限公司产品)进行抽滤富集。将截留了微生物的滤膜转移至 10 mL 离心管中,寄送至上海美吉生物医药科技有限公司,通过 16S *rRNA* 基因高通量测序分析水体微生物的物种多样性。为保证结果的可靠性,每个池塘水样均设置 3 个生物学重复与 3 个技术重复。

1.4 数据分析

水质指标数据采用 Excel 软件进行统计整理,利用 Origin 2024 软件完成分析并制图;通过 SPSS 25 软件进行单因素方差分析,检验各水质指标的差异显著性,以 $P < 0.05$ 作为差异显著的判定标准。通过美吉云平台(<https://www.majorbio.com>)对测序数据进行操作分类单元(OTU)聚类分析;统计门水平和属水平两个分类水平下的微生物群落组成及物种相对丰度;采用 Kruskal-Wallis 秩和检验进行组间微生物群落的差异性分析;通过冗余分析(RDA)探究微生物群落结构与环境因子间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同养殖模式下的池塘水质

斑点叉尾鲟主养及其与凡纳滨对虾混养模式下的水体理化指标检测结果显示,温度范围在 27~32 $^{\circ}\text{C}$,不同池塘间水温无显著性差异($P > 0.05$),同一池塘不同位置水温也无显著性差异($P > 0.05$);pH 值在 7.40~8.18,投料台附近水样 pH 值显著低于同一池塘其他位置($P < 0.05$),具有明显的空间差异性;但是不同养殖模式下的池塘整体温度和 pH 值均无显著性差异($P > 0.05$)。

从图 2a 和图 2b 可知,主养塘间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量存在显著性差异($P < 0.05$),其中,24 号养殖塘(W24)水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量在 2024 年 9 月 24 日异常升高,投喂区超过 0.10 mg/L;各池塘水体 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量 3 次取样均值为 0.32 mg/L,峰值达 0.54 mg/L;从图 2e 和图 2f 可知,各池塘间 TN 含量、TP 含量无显著性差异($P > 0.05$),TN 含量在试验前期和中期基本维持在 3.20 mg/L 以下,后期整体上升,2024 年 9 月 24 日 16 号塘(W16)TN 含量甚至达到 5.22 mg/L;TP 含量前期在 1.20 mg/L 左

右,中后期维持在 0.24~0.48 mg/L; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量始终低于 0.20 mg/L(图 2c),水体富营养化程度低; COD 整体稳定在 15.00 mg/L 左右(图 2d),但投料台附近水体 COD 显著高于其他取样点($P < 0.05$)。

从图 2g、图 2h 和图 2k 可知,各混养池塘间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量、TN 含量均呈现显著性差异($P < 0.05$); $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量整体超过 0.30 mg/L,均值为 0.41 mg/L,其中 23 号塘(W23)最高含量达 0.60 mg/L;在各池塘水体间 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量呈波动趋势; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量均超过 0.35 mg/L(图 2i),但水体富营养化程度仍处于水产养殖适宜范围; COD 整体稳定,20 号塘(W20)和 23 号塘(W23) COD 值相对较高,最高可达 20.47 mg/L(图 2j);TN 含量、TP 含量均值分别为 3.91 mg/L、1.71 mg/L(图 2k、图 2l),表明该混养模式对营养盐具有较好的调控能力。

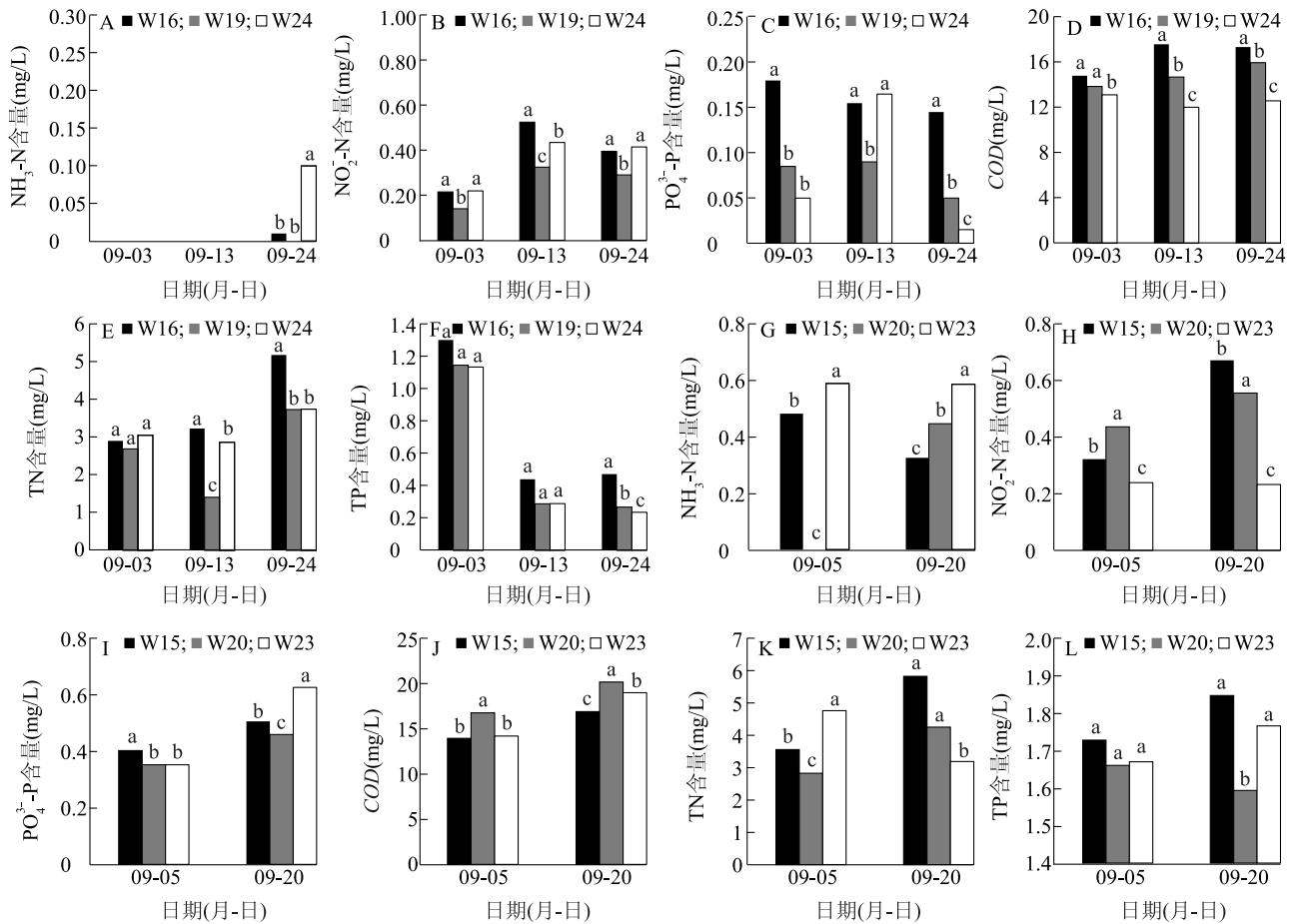
此外,斑点叉尾鲟两种养殖模式在部分水质指标上存在差异性。混养塘 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量显著高于主养塘($P < 0.05$)。投饵区以外其他采样点的水质指标普遍优于投饵区,表明尽管饲料已被摄食,其残留的可溶性有机质含量仍会对局部水质产生一定影响。此外,不同池塘同一垂直深度水质无显著性差异($P > 0.05$)。

2.2 斑点叉尾鲟主养塘和混养塘水体微生物变化

对所有水体样本进行 OTU 聚类分析(97%相似性),结果显示,主养塘共鉴定出微生物 34 门、107 纲、264 目、438 科、752 属、1 299 种、3 246 个 OTU;混养塘鉴定出 36 门、116 纲、278 目、456 科、772 属、1 338 种、3 252 个 OTU。主成分分析(PCoA)结果如图 3 所示,水体 OTU 组成差异显著,微生物群落结构差异较大。

Alpha 多样性指数分析结果如表 3 所示,斑点叉尾鲟与凡纳滨对虾混养塘水体中微生物丰富度普遍高于主养塘,但两种模式之间无显著性差异($P > 0.05$)。斑点叉尾鲟与凡纳滨对虾混养塘水体中微生物多样性指数与主养塘之间也无显著性差异($P > 0.05$)。

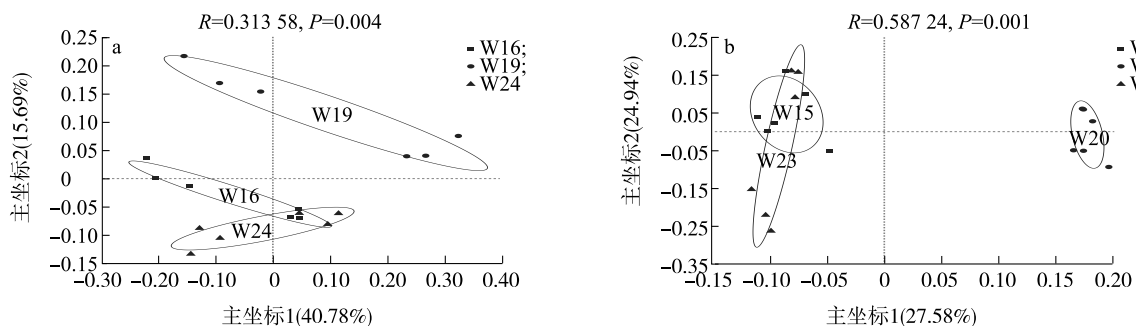
水体中微生物群落丰度组成如图 4 及表 4 所示,在门水平上,斑点叉尾鲟主养塘及其与凡纳滨对虾混养池塘水体中优势菌门均为放线菌门和变形菌门;属水平上,优势菌属均为 *hgcI_clade* 和 *CL500-29_marine_group*。



A~F为斑点叉尾鲷主养塘;G~L为斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘。W16、W19、W24:斑点叉尾鲷主养塘样本;W15、W20、W23:斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘样本。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 TN 、 TP 、 COD 见表2。

图2 斑点叉尾鲷主养塘及其与凡纳滨对虾混养塘水质指标

Fig.2 Water quality parameters in monoculture ponds of *Ictalurus punctatus* and polyculture ponds with *Penaeus vannamei*



a:斑点叉尾鲷主养塘;b:斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘。W16、W19、W24:斑点叉尾鲷主养塘样本;W15、W20、W23:斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘样本。 R 表示各池塘间差异统计量; P 表示各池塘间差异显著性水平。

图3 水体微生物操作分类单元(OTU)的主坐标(PCoA)分析结果

Fig.3 Principal coordinate analysis (PCoA) of operational taxonomic units (OTUs) in the water microbial community

斑点叉尾鲷主养塘及其与凡纳滨对虾混养塘水体中门水平微生物群落间和属水平微生物群落间差

异显著性检验结果如图5所示,其中在门水平斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘水体中浮霉菌门、疣微菌

门、酸杆菌门、硝化螺旋菌门微生物群落丰度均极显著高于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.01$ 、 $P<0.001$); 绿弯菌门、芽单胞菌门、蛭弧菌门微生物群落丰度极显著低于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.01$ 、 $P<0.001$), 拟杆菌门、髌骨细菌门、厚壁菌门微生物群落丰度显著低于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.05$)。在属水平上, 斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘中 *CL500-3*、*norank_o_PeM15*、*norank_f_Vicinamibacteraceae* 微生物群落丰度极显著高于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.01$ 、 $P<0.001$),

norank_f_67-14、*Candidatus_Aquiluna* 微生物群落丰度显著高于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.05$); 鼎湖杆菌属、*norank_f_JG30-KF-CM45*、*norank_f_Methylophilaceae* 微生物群落丰度极显著低于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.01$ 、 $P<0.001$), 噬冷菌属、*norank_f_Mitochondria* 微生物群落丰度显著低于斑点叉尾鲷主养塘 ($P<0.05$)。以上研究结果表明, 不同养殖模式显著影响养殖池塘水体中部分微生物群落的结构组成。

表 3 斑点叉尾鲷主养塘和混养塘水体微生物群落丰富度与多样性

Table 3 Richness and diversity of microbial communities in water of monoculture and polyculture ponds of *Ictalurus punctatus*

养殖模式	样本编号	丰富度指数			覆盖度	多样性指数	
		Ace 指数	Chao 指数	Sobs 指数		Shannon 指数	Simpson 指数
斑点叉尾鲷主养	W16	1 345	1 298	1 011	0.992 6	4.625	0.028 24
	W19	1 214	1 135	851	0.993 4	4.165	0.067 12
	W24	1 293	1 253	1 022	0.993 3	4.642	0.033 18
斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养	W15	1 356	1 329	1 045	0.993 8	4.393	0.050 21
	W20	1 465	1 417	1 153	0.993 7	4.536	0.035 19
	W23	1 225	1 199	954	0.994 3	4.387	0.044 46

斑点叉尾鲷主养塘和斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘主要微生物群落与水体环境因子冗余分析 (RDA) 结果显示, 斑点叉尾鲷主养塘 TN 含量和 TP 含量是驱动水体微生物群落结构变异的关键环境因子, 二者与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量呈显著正相关。在属水平上, *COD* 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量也对水体微生物群落结构有重要影响。斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘中影响最大的因子是 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量, 其与 TP 含量、TN 含量等呈正相关, 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量等呈负相关。不同微生物群落与水体中不同环境因子的相关性有差异, 例如斑点叉尾鲷主养塘中, 放线菌门、分枝杆菌属等与 TN 含量和 TP 含量呈正相关, 蓝藻菌门、*unclassified_f_Co-mamonadaceae* 等与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量等呈正相关。斑点叉尾鲷主养塘门水平微生物群落构成热图 (图 6A) 显示, 放线菌门细菌相对丰度与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量呈极显著负相关 ($P<0.001$), 而斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘 (图 6B) 中, 浮霉菌门细菌相对丰度与 pH、温度呈极显著正相关 ($P<0.01$), 绿弯菌门、芽单胞菌门细菌相对丰度与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量、TP 含量等呈显著正相关 ($P<0.05$)。综上, 不同养殖模式下微生物菌落之间或微

生物菌落与水体环境因子之间呈现一定的相关性。

3 讨论

3.1 斑点叉尾鲷两种养殖模式下水质差异的成因

本研究通过对斑点叉尾鲷两种养殖模式水质指标的比较分析发现, 斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养模式下, 水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量、TN 含量、*COD* 等指标虽略高于斑点叉尾鲷主养模式, 但养殖水体并未出现大规模病害, 表明在高密度混养条件下, 关键水质指标仍处于可控范围。这一结果与盖建军等^[9]的研究结论一致。推测其原因可能与对虾及其他混养鱼类对残饵、浮游生物的摄食作用有关, 该过程有助于维持养殖水体的生态稳定与平衡^[19]。

本研究中养殖池塘不同取样点水质指标波动范围较小, 这可能与水体体积较大、生物缓冲能力较强有关。投料台附近水样 pH 显著低于其他区域 ($P<0.05$), 该现象可能与有机物分解导致 CO_2 积累有关, 与葛培等^[20]关于池塘 CO_2 通量检测的研究结果类似。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量常在投料后、连续阴雨天气或病害发生时出现短暂升高^[21]。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在各池塘中均存在, 这

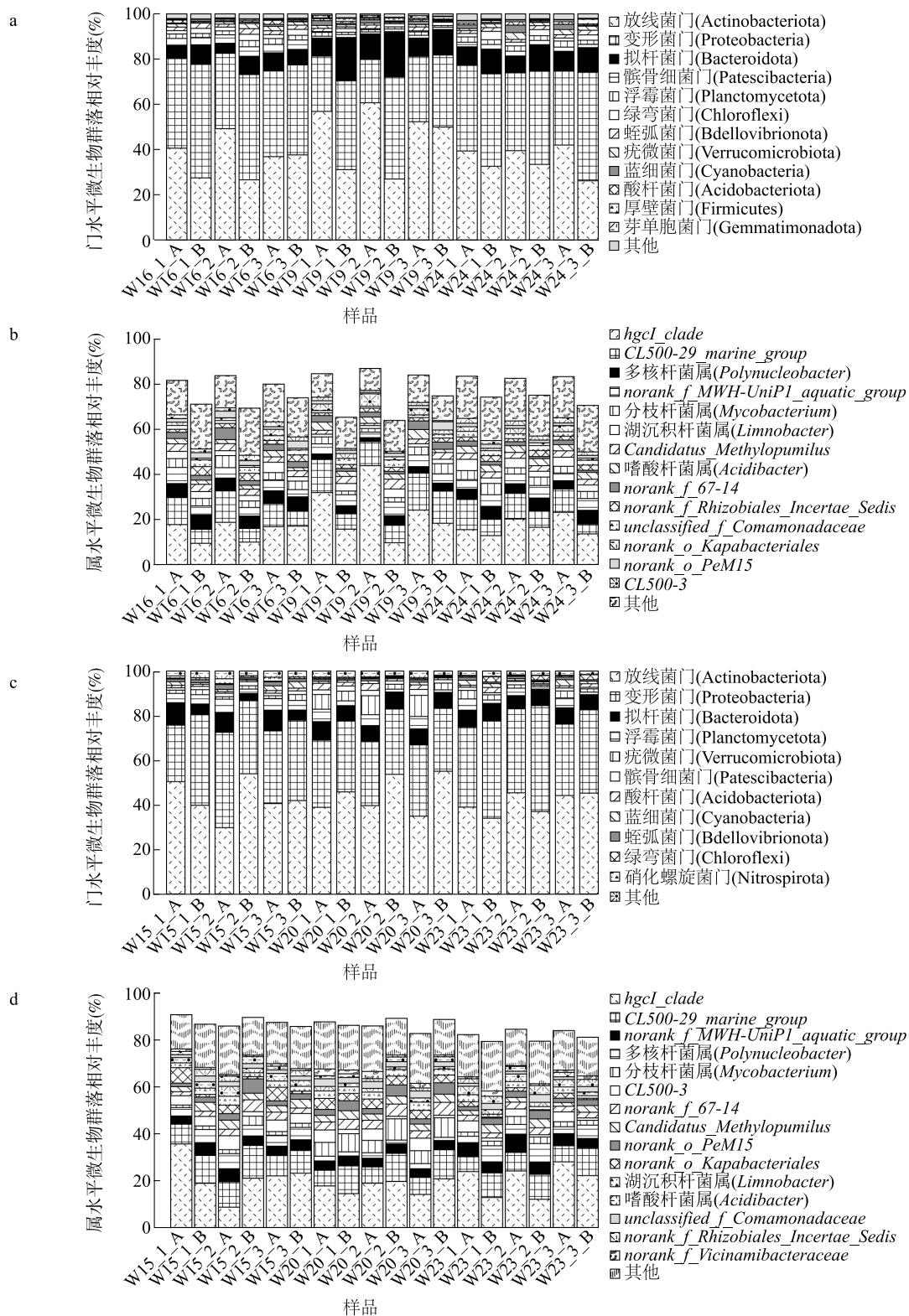


表 4 斑点叉尾鲴两种养殖模式池塘主要水体微生物群落丰度占比

Table 4 Abundance proportions of dominant microbial communities in pond water under two aquaculture models of *Ictalurus punctatus*

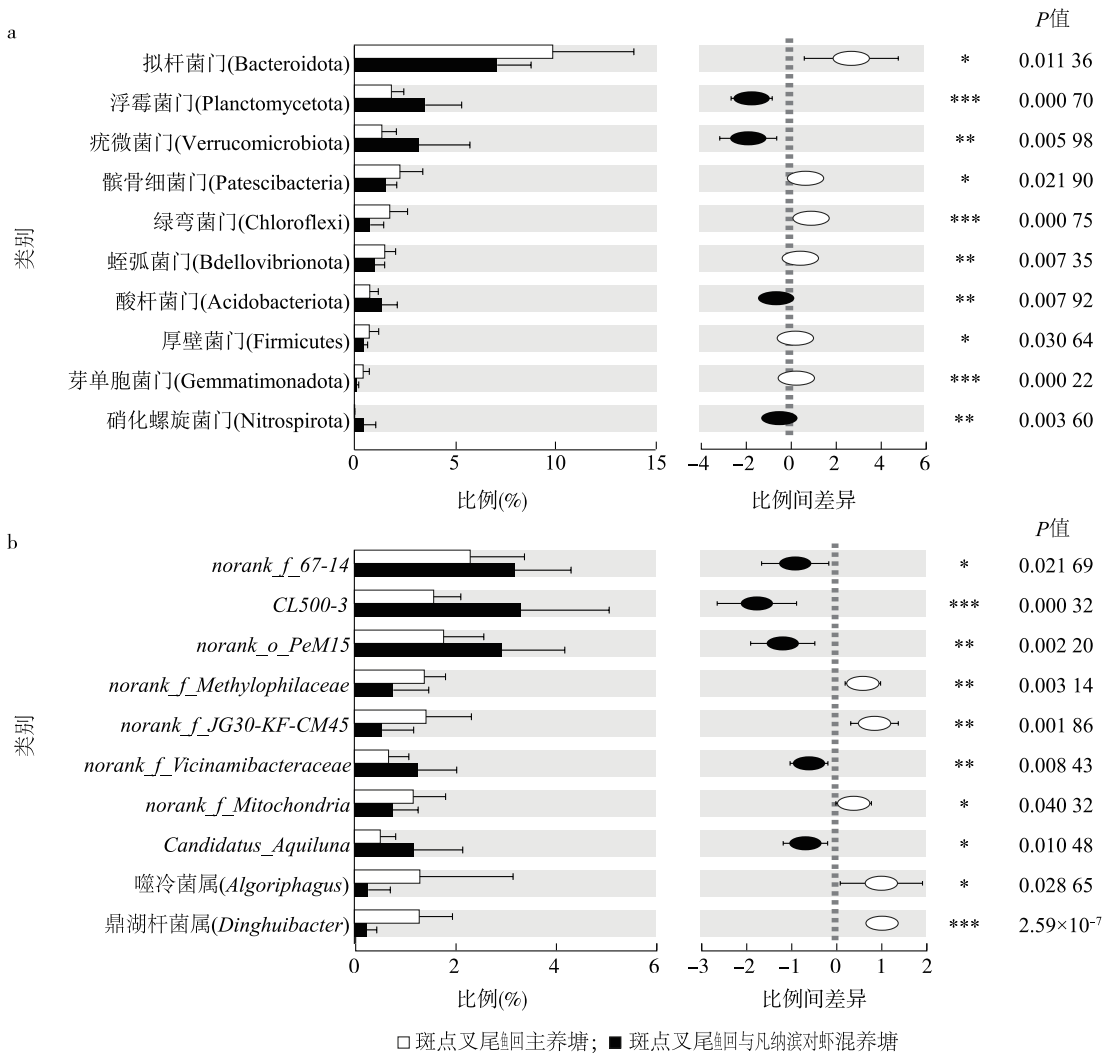
微生物		丰度占比(%)	
		斑点叉尾鲴主养塘	斑点叉尾鲴与凡纳滨对虾混养塘
门水平	放线菌门(Actinobacteriota)	39.44	42.70
	变形菌门(Proteobacteria)	37.26	34.70
	拟杆菌门(Bacteroidota)	9.84	7.09
	酸杆菌门(Patescibacteria)	2.26	1.50
	浮霉菌门(Planctomycetota)	1.84	3.52
	绿弯菌门(Chloroflexi)	1.76	<1.00
	蛭弧菌门(Bdellovibrionota)	1.51	1.02
	疣微菌门(Verrucomicrobiota)	1.36	3.19
	酸杆菌门(Acidobacteria)	<1.00	1.35
	蓝细菌门(Cyanobacteria)	<1.00	1.28
属水平	<i>hgcI_clade</i>	18.48	19.76
	<i>CL500-29_marine_group</i>	9.91	9.65
	多核杆菌属(<i>Polynucleobacter</i>)	4.66	3.99
	<i>norank_f_MWH-UniPI_aquatic_group</i>	4.58	4.57
	分枝杆菌属(<i>Mycobacterium</i>)	3.32	3.72
	<i>CL500-3</i>	—	3.32
	湖沉积杆菌属(<i>Limnobacter</i>)	2.86	—
	<i>Candidatus_Methylophilum</i>	2.68	2.97
	嗜酸杆菌属(<i>Acidibacter</i>)	2.58	—
	<i>norank_f_67-14</i>	2.31	3.19
	<i>norank_f_Rhizobiales_Incertae_Sedis</i>	2.04	—
	<i>norank_o_PeM15</i>	—	2.94
	<i>norank_o_Kapabacteriales</i>	—	2.69

与斑点叉尾鲴养殖密度大等密切相关^[22],对虾的高耗氧特性进一步抑制了NO₂⁻-N的快速分解,所以,为促进氮素转化、改善水质状况,建议采取增设微孔增氧等设备、强化水循环或进行化学药品改善池塘底部环境等措施^[23-24]。斑点叉尾鲴与凡纳滨对虾混养塘中PO₄³⁻-P含量相对较高,可能与投喂量增加或对虾通过摄食藻类调节水质有关,该现象与袁新程等^[16]的研究结果一致,表明鱼虾混养对藻类过度繁殖具有一定抑制作用。COD、TN 含量、TP 含量等水质指标可通过合理投喂控制在合理范围内。此外,混养系统中对虾摄食斑点叉尾鲴残饵可减少有机物的积累,通过生态位互补机制共同改善水质;而斑点叉尾鲴的活动则可促进底泥扰动,有利于提高氮、磷等营养盐的循环效率。

3.2 斑点叉尾鲴两种养殖模式水体微生物群落组成的差异

本研究通过对斑点叉尾鲴两种养殖模式水体

微生物群落结构的系统分析对比发现,二者存在显著差异,这可能与养殖模式的特性、水体理化参数的差异以及生态系统功能的调控密切相关^[25]。放线菌门细菌和变形菌门细菌在两种养殖模式水体微生物群落中均占据优势地位。其中,放线菌门细菌在复杂有机物分解和氮循环过程中发挥重要作用^[26];变形菌门菌则参与包括氮循环在内的多种生态过程,如 α-变形菌纲细菌的固氮共生 β-变形菌纲细菌的硝化作用,以及假单胞菌属(*Pseudomonas*)细菌的降解,该门类细菌丰度与 COD、NO₂⁻-N 含量等水质指标显著相关^[27-28],这一发现从微生物群落功能角度解释了斑点叉尾鲴主养塘NH₃-N 含量、NO₂⁻-N 含量低于斑点叉尾鲴与凡纳滨对虾混养塘的现象,也反映出不同养殖模式对磷利用的微生物学差异。此外 *hgcI_clade* 和 *CL500-29_marine_group* 作为生态系统中常见的高丰度细菌,在寡营养环境中具有竞争优势,并参与污染物降解及氮、磷代谢过程^[29],该结论



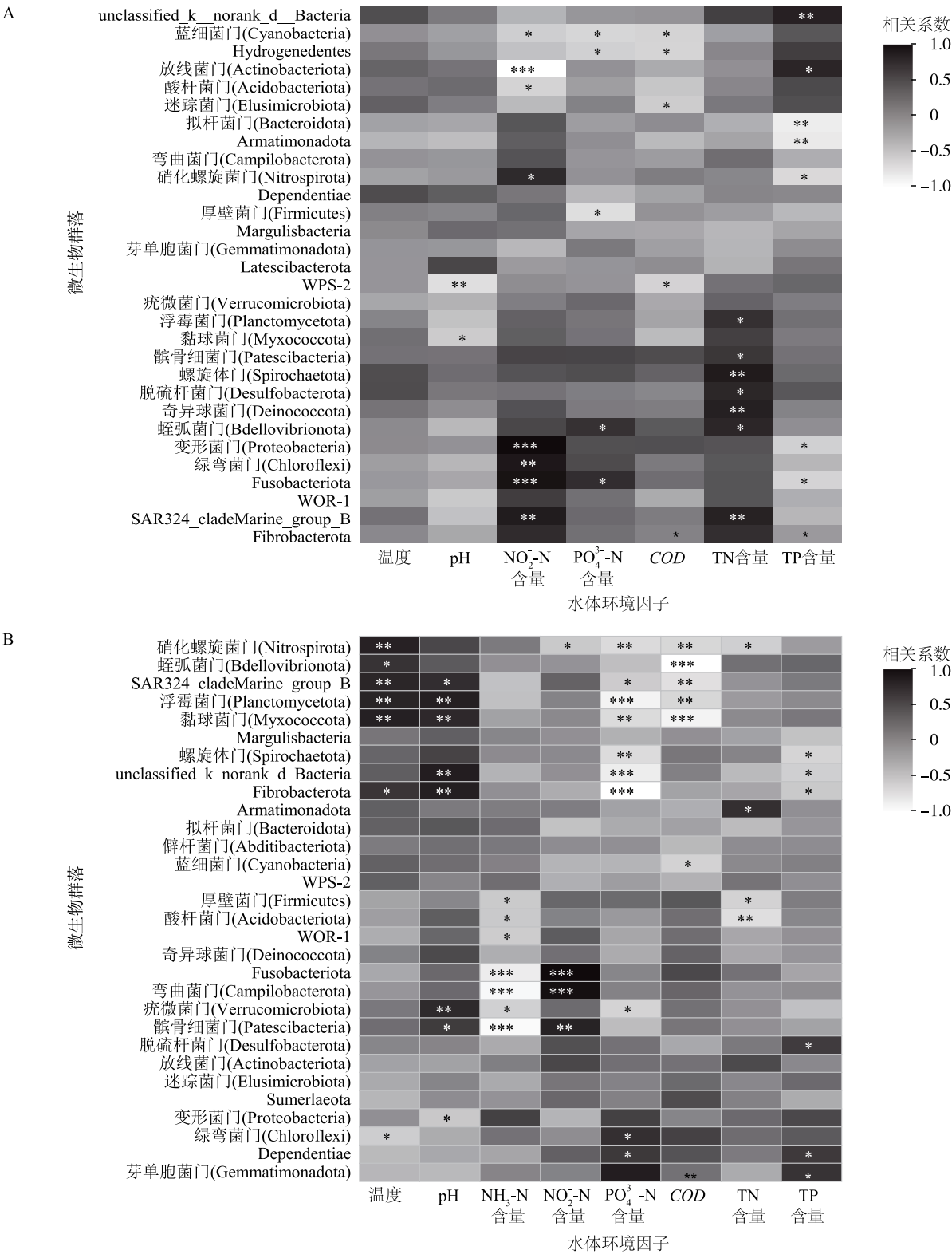
a:养殖池塘门水平微生物种类;b:养殖池塘属水平微生物种类。***表示差异极显著($P<0.001$);**表示差异极显著($P<0.01$);*表示差异显著($P<0.05$)。

图5 斑点叉尾鲷两种养殖模式池塘水体中微生物群落组成差异

Fig.5 Differences in microbial community composition in pond water under two aquaculture models of *Ictalurus punctatus*

在钟立强等^[7]和Liu等^[30]的研究中也得到了验证。本研究中斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘水体中浮霉菌门细菌和疣微菌门细菌的丰度极显著高于斑点叉尾鲷主养塘,可能与其生态功能分化有关。浮霉菌门细菌在厌氧氨氧化和复杂含氮化合物降解过程中具有关键作用^[31],其中CL500-3和norank_o_PeM15等类群的丰度变化可能与虾类活动及复杂有机物的降解过程相关^[32]。此外,斑点叉尾鲷主养塘中检测到蛭弧菌门细菌,该菌群作为条件性病原菌^[33],其存在说明斑点叉尾鲷主养塘中可能存在鱼类病原体,推测或许与上海市海丰水产养殖有限公司养殖区之前发生的鱼类病害事件存在关联。在微

生物多样性方面,与曹煜成等^[34]对罗非鱼混养系统的研究结果类似。冗余分析结果表明,环境因子对两种养殖模式水体微生物群落结构的影响存在差异,斑点叉尾鲷主养塘中微生物群落与环境因子的相关性明显高于斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘,说明斑点叉尾鲷主养塘微生物群落对环境变化更为敏感,而斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘则表现出更强的群落稳定性,推测可能是斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养塘系统中更复杂的生物群落为微生物提供了更强的缓冲能力,可有效应对环境波动,该发现印证了Li等^[35]的研究结果。综上,建议在实际养殖管理过程中,对于斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混



A:斑点叉尾鲟主养塘水体中微生物群落门水平上热图;B:斑点叉尾鲟与凡纳滨对虾混养塘水体中微生物群落门水平上热图。pH、NH₃-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-N、COD、TN、TP 见表 2。* 表示显著相关 ($P<0.05$) ; ** 表示极显著相关 ($P<0.01$) ; *** 表示极显著相关 ($P<0.001$) 。

图 6 斑点叉尾鲟主养塘和斑点叉尾鲟与凡纳滨对虾混养塘水体中主要微生物群落相对丰度与水体环境因子 RDA 分析结果
Fig.6 Redundancy analysis (RDA) of major microbial community relative abundance and water environmental factors in *Ictalurus punctatus* monoculture ponds and polyculture ponds with *Penaeus vannamei*

养系统适当增加有机质输入,以促进功能菌群增殖,对于斑点叉尾鲷主养系统则应注重控制氮、磷等营养盐的输入,以优化微生物群落结构,降低病原菌滋生的风险。

3.3 斑点叉尾鲷生态混养模式的优化策略

在传统单一养殖模式难以满足当前市场需求和生态环境保护要求的背景下,基于鱼虾混养的生态学原理及相关研究成果,本研究提出以下优化策略:一是构建基于生态位互补原理的多营养级复合养殖系统,通过优化物质循环与能量流动,提高资源利用效率^[36], Costa 等^[37]、赵宇曦等^[38]的研究结果均体现了相似的生态学原理;二是在养殖区周边或内部种植莲藕、茭白等水生植物构建生态沟渠,既可提高土地资源利用率,又能有效控制水体富营养化,实现养殖尾水的生态净化^[39-40],同时沟渠植物还可作为养殖动物的补充饲料来源;三是通过科学设计池塘结构以优化养殖环境,包括改造池塘形态,设置循环沟渠与水泵系统以促进水体循环,安装微孔增氧设备以改善底层水体溶氧条件,构建人工湿地以增强水体自净能力等^[41-42];四是应用微生物调控技术,如合理施用 EM 菌等微生态制剂,促进有机物分解与氮素循环,在饲料中添加 β -葡聚糖、壳聚糖等复合酶制剂或免疫增强剂^[43],有助于提高饲料利用率并增强养殖动物的抗病能力。

4 结 论

本研究通过系统比较斑点叉尾鲷主养模式和斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养模式,得出核心结论:高密度斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养模式未对养殖系统产生显著负面影响,反而通过有效利用水体中上层生态位,实现了养殖水质的稳定调控,进而抑制了水体富营养化现象的发生。与此同时,斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养池塘水体较高的物种丰富度,进一步增强了养殖生态系统的稳定性与可持续性,有效降低了突发性水质恶化的潜在风险。然而,本研究仍存在一定的局限性,为进一步优化斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养技术,推动水产养殖业可持续发展,今后需开展全周期对照试验,重点加强极端气候条件下养殖系统生态响应的相关研究,为斑点叉尾鲷与凡纳滨对虾混养模式的推广应用提供更全面、更可靠的理论支撑。

参考文献:

[1] 钟立强,王明华,陈校辉,等. 江苏斑点叉尾鲷产业现状及发展

战略思考[J]. 中国农学通报,2021,37(17):137-143.

- [2] Zhong L Q, Song C, Chen X H, et al. Channel catfish in China: historical aspects, current status, and problems[J]. Aquaculture, 2016, 465:367-373.
- [3] 蔡焰值,杨德忠,雷晓中,等. 斑点叉尾鲷亲鱼池塘培育关键技术的研究[J]. 水生态学杂志,2011,32(1):145-148.
- [4] 蔡焰值,雷晓中,汪 亮,等. 斑点叉尾鲷重要疾病发病原因及预防措施[J]. 湖北农业科学,2010,49(11):2867-2872.
- [5] Zhong L Q, Li D M, Wang M H, et al. Dynamics of the bacterial community in a channel catfish nursery pond with a cage-pond integration system[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2018, 64(12):954-967.
- [6] 张世勇,陈校辉,王明华,等. 斑点叉尾鲷 *Cbx* 基因家族的全基因组鉴定与进化分析[J]. 基因组学与应用生物学,2019,38(4):1488-1496.
- [7] 钟立强,王明华,张世勇,等. 南京地区斑点叉尾鲷养殖池塘水体微生物群落结构研究[J]. 农业环境科学学报,2020,39(7):1594-1604.
- [8] 钟立强,李 冰,王明华,等. 斑点叉尾鲷养殖池塘底泥微生物群落结构特征及其影响因素[J]. 中国水产科学,2020,27(8):893-905.
- [9] 盖建军,郭 闯,陈焕根,等. 3 种不同斑点叉尾鲷养殖模式的水质比较分析(下)[J]. 科学养鱼,2021(2):42-43.
- [10] Kochi K, Kobayashi M, Hirota S. Feeding habits of *Ictalurus punctatus* in the downstream section of Nunome Dam reservoir in Japan[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2021, 17(4):563-569.
- [11] 王明华,姜虎成,陈校辉,等. 斑点叉尾鲷几种健康养殖模式总结[J]. 水产养殖,2020,41(8):61-63.
- [12] 徐文彦,赵永军,张 慧. 斑点叉尾鲷、团头鲂池塘混养高产试验[J]. 水产科学,2004,23(10):22-24.
- [13] Yuan D R, Yi Y, Yakupitiyage A, et al. Effects of addition of red tilapia (*Oreochromis* spp.) at different densities and sizes on production, water quality and nutrient recovery of intensive culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in cement tanks[J]. Aquaculture, 2010, 298(3/4):226-238.
- [14] 徐纪萍,高雪忠,叶军强. 上海市奉贤地区淡水池塘凡纳滨对虾和鱼类混养模式探讨[J]. 水产科技情报,2017,44(3):157-161.
- [15] Wang Y Y, Xu G C, Nie Z J, et al. Growth performance of blunt-nose black bream, channel catfish, yellow catfish, and largemouth bass reared in the In-pond raceway recirculating culture system[J]. North American Journal of Aquaculture, 2019, 81(2):153-159.
- [16] 袁新程,施永海,谢永德,等. 混养凡纳滨对虾对草鱼消化、抗氧化、非特异性免疫及代谢能力的影响[J]. 上海农业学报,2024,40(4):92-98.
- [17] 范秀芬,张光贵,谢德友,等. 斑点叉尾鲷、南美白对虾混养池塘轮茬养殖太湖青虾技术[J]. 水产养殖,2008,29(3):25.
- [18] 樊振中,刘维汉,韩克志,等. 南美白对虾与斑点叉尾鲷、草鱼

- 混养技术试验[J]. 中国水产, 2015(6): 66-68.
- [19] 冯伟业, 赵一杰, 王紫阳, 等. 盐碱水池塘鱼虾混养模式构建与养殖效益分析[J]. 中国水产, 2023(1): 98-100.
- [20] 葛培, 赵佳玉, 张弥, 等. 淡水养殖池塘 CO₂ 通量多时间尺度变化特征及其影响要素[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 190-201.
- [21] Musa M, Mahmudi M, Arsad S, et al. Interrelationship and determining factors of water quality dynamics in whiteleg shrimp ponds in tropical eco-green aquaculture system[J]. Journal of Ecological Engineering, 2023, 24(1): 19-27.
- [22] Chen F D, Qiu T L, Xu J P, et al. Rapid real-time prediction techniques for ammonia and nitrite in high-density shrimp farming in recirculating aquaculture systems[J]. Fishes, 2024, 9(10): 386.
- [23] Nurhasanah A, Rahardja B S, Prayogo. Effect of probiotics in recirculating aquaculture system (RAS) on the concentration of ammonia, nitrite, and nitrate in the aquaculture of catfish (*Clarias* sp.) [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1273(1): 012018.
- [24] Hoang M N, Nguyen P N, Bossier P. Water quality, animal performance, nutrient budgets and microbial community in the biofloc-based polyculture system of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* and gray mullet, *Mugil cephalus* [J]. Aquaculture, 2020, 515: 734610.
- [25] Duan Y F, Tang Y P, Huang J H, et al. Changes in the microbial community of *Litopenaeus vannamei* larvae and rearing water during different growth stages after disinfection treatment of hatchery water [J]. Journal of Microbiology, 2020, 58(9): 741-749.
- [26] Molinas-Vera M, Ferreira-Sanabria G, Peñá P, et al. The Paraguayan gut microbiome contains high abundance of the Phylum Actinobacteriota and reveals the influence of health and lifestyle factors[J]. Gut Microbes Reports, 2024, 1(1): 2332988.
- [27] Wang Z K, Zhang S L, Li C L, et al. Restoration via the aggregate spray-seeding technique affected the soil proteobacteria on an uninhabited island: community structure, metabolic function, nutritional type, and life strategy[J]. Global Ecology and Conservation, 2024, 53: 03009.
- [28] Cao D, Chen W H, Xiang Y P, et al. The efficiencies of inorganic mercury bio-methylation by aerobic bacteria under different oxygen concentrations[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: 111538.
- [29] Liu L M, Wang S S, Chen J F. Anthropogenic activities change the relationship between microbial community taxonomic composition and functional attributes [J]. Environmental Microbiology, 2021, 23(11): 6663-6675.
- [30] Liu Q, Lei X J, Li J N, et al. Microbial communities and nitrogen cycling in *Litopenaeus vannamei* and *Mercenaria mercenaria* polyculture ponds[J]. Aquaculture Reports, 2023, 33: 101769.
- [31] Kündgen M, Jogler C, Kallscheuer N. Substrate utilization and secondary metabolite biosynthesis in the Phylum Planctomycetota [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2025, 109(1): 123.
- [32] 魏亚茹, 王怡静, 马巧丽, 等. 粉粒氮和水分影响浮霉菌门群落的空间分化[J]. 微生物学通报, 2020, 47(9): 2732-2745.
- [33] Zhao Z G, Xu Q Y, Luo L, et al. Effect of bio-floc on water quality and the production performance of bottom and filter feeder carp fed with different protein levels in a pond polyculture system[J]. Aquaculture, 2021, 531: 735906.
- [34] 曹煜成, 文国樑, 李卓佳, 等. 池塘水体微生物群落代谢活性的动态变化及其与水质的关系[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 280-284.
- [35] Li J N, Liu G B, Liu Q, et al. Microbial community dynamics and its correlation with environmental factors in the water of polyculture ponds containing *Penaeus japonicus*, *Portunus trituberculatus* and *Sinonovacula constricta* [J]. Aquatic Ecology, 2023, 57(2): 263-279.
- [36] Alam M M, Jørgensen N O G, Bass D, et al. Potential of integrated multitrophic aquaculture to make prawn farming sustainable in Bangladesh[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1412919.
- [37] Costa J, De Freitas R A, Neto M P N, et al. Integrated multitrophic aquaculture improves the production performance of Amazonian fishes in nursery phase[J]. Aquaculture, 2025, 600: 742240.
- [38] 赵宇曦, 刘兴国, 周润锋, 等. 池塘多营养级养殖水体的初级生产力及影响因子分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(6): 91-99.
- [39] 蒋葛, 黎慧, 沈辉, 等. 基于生态沟渠的凡纳滨对虾小型温棚养殖尾水净化技术效能分析[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 518-524.
- [40] 吕金亮, 李奎, 孙静好, 等. 复合生态沟渠对池塘养殖尾水和稻田退水的净化效果[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 206-213.
- [41] Lu J X, Guo Z Z, Kang Y, et al. Recent advances in the enhanced nitrogen removal by oxygen-increasing technology in constructed wetlands[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205: 111330.
- [42] Roy S M, Choi H, Kim T. Review of state-of-the-art improvements in recirculating aquaculture systems: insights into design, operation, and statistical modeling approaches[J]. Aquaculture, 2025, 605: 742545.
- [43] 熊莹槐, 罗晓春, 钱雪桥, 等. 复合酶制剂和复合菌制剂对凡纳滨对虾生长、体生化组成及能量收支的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(6): 41-48.

(责任编辑: 黄克玲)