



· 综述 ·

益生菌在水产养殖可持续发展中的应用现状及展望

赵勇^{1,2,3*}, 段为旦¹, 王友成⁴, 苏明⁵, 陶倩¹,
张昭寰^{1,2,3}, 潘迎捷^{1,2,3}, 刘智俊^{6*}

- (1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;
2. 农业农村部(上海)水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 上海 201306;
3. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 上海睿婕水产养殖专业合作社, 上海 291715;
5. 上海市青浦区水产技术推广站, 上海 201977;
6. 上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要: 水产养殖在全球粮食安全中发挥着至关重要的作用, 为人类提供优质蛋白源持续稳定供应提供了重要保障。益生菌是一类可用于水产养殖的有益微生物, 不仅能够提高水产动物的生长性能、免疫能力, 而且具有抑制致病菌、改善养殖水质等功效。益生菌在水产养殖中的推广应用可促进水产养殖业的健康可持续发展。因此, 本文首先介绍了水产养殖中益生菌的定义与来源, 详细阐述了益生菌对水产可持续养殖的意义以及益生菌在水产养殖中的实际应用, 并对其未来研究方向进行了展望, 以期益生菌在水产养殖可持续发展中的推广和应用提供可靠的理论依据。

关键词: 水产养殖; 益生菌; 益生功效; 可持续发展

中图分类号: S 917.1; TS 201.4

文献标志码: A

水产养殖为不断增长的世界人口提供了可靠的膳食保障, 水产品中含有丰富的优质蛋白和微量元素等营养物质^[1], 在全球粮食安全和营养安全方面发挥着至关重要的作用^[2-3]。据相关研究报告显示, 全球水产养殖产量已超过捕捞渔业的产量, 占 2020 年水产品消费总量的 52%^[3]。人们对水产品日益增长的需求, 促进了水产养殖业向高密度集约化的方向发展^[4]。集约化的养殖模式在于利用有限的养殖面积, 提高养殖效率和产量, 符合水产养殖业可持续发展的方向^[5]。但是水产集约化养殖依然存在饲料利用率低、水产疾病暴

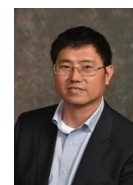
发、养殖环境污染等重点、难点问题^[6-8], 亟需探究一种绿色安全的水产养殖方案^[9], 以保障水产养殖业的健康可持续发展。

益生菌是一种可定植于水产动物肠道或改善养殖水质的有益微生物, 能够提高水产动物的生长性能并维护养殖环境, 且通常不会对消费者产生负面影响^[10]。多项研究表明, 乳酸菌属 (*Lactococcus*)、酵母属 (*Saccharomyces*)、乳杆菌属 (*Lactobacillus*)、肠球菌属 (*Enterococcus*) 等^[11-13] 益生菌常用于水产生态养殖中, 有助于缓解集约化水产养殖的压力, 被视为促进水产养殖业可持续

收稿日期: 2022-07-22 修回日期: 2022-09-29

资助项目: 上海市科技兴农项目 (2021-02-08-00-12-F00783)

通信作者: 赵勇(照片), 从事食品安全控制与营养健康研究, E-mail: yzhao@shou.edu.cn; 刘智俊, 从事食品安全控制与营养健康研究, E-mail: 13764381007@163.com



发展的有效方法。首先, 益生菌能够提升水产动物产生消化酶的能力, 增加水产动物对饲料的利用率, 从而提高养殖效率^[14]。第二, 益生菌可刺激水产动物的免疫系统, 增强其免疫力, 自身还能产生抑菌物质, 增加水产动物对致病菌的抵抗力^[15]。此外, 益生菌还可将养殖水环境中的有机废物进行分解, 减少氨氮和亚硝酸盐等含量, 净化养殖水质, 保障水产动物养殖环境的健康可持续^[16]。

基于益生菌的如上优势, 对其在水产养殖中的应用进行系统地综述, 有助于推动此类技术的全面推广和应用。因此, 本文首先介绍了水产养殖中常用益生菌的定义与来源, 阐述了在水产养殖可持续发展中应用益生菌的意义, 并通过列举益生菌促进水产生态养殖可持续的实际案例, 突出益生菌对可持续水产养殖的重要性, 进一步对其未来在水产养殖业的常态化应用进行了展望, 以期促进水产养殖业的可持续发展。

1 水产养殖中益生菌的定义与来源

1974年, Paker^[17]首次提出了益生菌的概念, 即有助于肠道微生物平衡的生物体。1989年 Afrc^[18]对益生菌做出新的解释, 认为益生菌是养殖产品或活的微生物饲料补充剂, 主要通过改善肠道微生物的平衡而对宿主产生有益的影响。随着益生菌相关研究的不断深入, 粮食及农业组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)在2001年将益生菌重新定义为“一种能够为宿主健康带来益处的活微生物”^[19]。

益生菌可改善水产动物胃肠道内及水环境中的微生物菌群平衡, 且不会对宿主及环境产生负面影响, 能够维持水生动物和养殖环境的健康^[3]。根据来源不同, 益生菌主要分为陆源性益生菌和水源性益生菌, 陆源性益生菌是指来源于陆地环境、人或陆生动物的益生菌。水源性益生菌则是

指来源于水生动物、养殖水体或底泥等环境中的益生菌。在水产养殖中, 相较陆源性益生菌而言, 水源性益生菌因其独特的来源优势, 可更容易地定植于水产动物体内, 并更好地发挥益生功效^[11, 13]。

2 益生菌对水产养殖可持续发展的意义

构建可持续的水产养殖模式能够更好地保护和发展水产养殖业^[20], 其核心是有效利用水、土地和饲料等资源, 减少对环境的污染, 为不断增长的人口提供安全的水产品^[5]。水产病害被认为是影响可持续水产养殖生产的主要因素^[21], 人们通常使用抗生素类药物对疾病进行预防和治疗, 而抗生素类药物的滥用会给水产动物和水环境带来负面影响^[22-24]。相关研究结果显示, 疫苗和益生菌能够有效控制水产养殖中的疾病暴发^[25], 然而部分疫苗只特异性针对一种病原菌, 限制了其在水产养殖中的应用^[26], 而益生菌能够调节水产动物的免疫反应并产生抑菌物质, 可使水产动物免受多种病原菌侵袭, 应用范围较为广泛, 在参与建立水产养殖可持续生态方面具有重要作用。同时, 益生菌还能与肠道细胞及菌群相互作用, 通过改善水产动物的饲料利用率、健康状况和养殖水质, 从而提高养殖效率, 减少疾病发生和环境污染, 进而产生良好的经济效益、生态效益及社会效益^[5]。

2.1 提升水产动物消化能力, 促进饲料资源的可持续利用

可持续水产养殖的目标之一是提高饲料资源的有效利用, 以确保为不断增长的人口持续提供营养健康的水产品^[5]。水产动物受水环境温度和体温较低的影响, 体内的消化酶活性较低, 且胃肠道中具有消化作用的微生物种类和数量有限, 导致其对饲料的吸收能力不足和利用率不高^[27]。而益生菌能够产生脂肪酶、淀粉酶和蛋白酶等消化酶(表1), 可帮助水产动物更好地消化吸收饲料

表1 益生菌提升水产动物消化酶的活性

Tab. 1 Probiotics improved the activities of digestive enzymes in aquatic animals

目标宿主 target host	益生菌种类 species of probiotics	提升活性的消化酶种类 the types of digestive enzymes that promote activity	参考文献 references
银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	脂肪酶, 淀粉酶, 蛋白酶	[28]
仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	海洋酵母菌 <i>Rhodotorula benthica</i>	淀粉酶, 纤维素酶, 海藻素酶	[29]
莫桑比克罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>	芽孢杆菌 MCCB 101 <i>Bacillus</i> MCCB 101	α -淀粉酶, 总碱性蛋白水解酶, 脂肪酶	[30]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	蛋白酶, 淀粉酶	[31]

· 续表 1 ·

目标宿主 target host	益生菌种类 species of probiotics	提升活性的消化酶种类 the types of digestive enzymes that promote activity	参考文献 references
真鲷 <i>Pagrus major</i>	鼠李糖乳杆菌 <i>L. rhamnosus</i>	蛋白酶	[32]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	戊糖片球菌 <i>Pediococcus pentosaceus</i>	蛋白酶, 淀粉酶	[33]
远海梭子蟹 <i>Portunus pelagicus</i>	鼠李糖乳杆菌 <i>L. rhamnosus</i>	蛋白酶, 淀粉酶	[34]
露斯塔野鲮 <i>Labeo rohita</i>	乳酸乳球菌 <i>L. lactis</i>	蛋白酶, 脂肪酶	[35]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	植物乳杆菌 <i>L. plantarum</i>	脂肪酶, 胰蛋白酶, α -淀粉酶	[36]
拟穴青蟹 <i>Scylla paramamosain</i>	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	蛋白酶, 淀粉酶	[37]

中的营养成分, 同时益生菌还能提供额外的营养物质^[38], 部分益生菌如乳酸菌能够分泌有机酸, 有利于胃肠道维持酸性环境, 促进水产动物消化道吸收饲料中的微量元素。益生菌通过在肠道内定植, 调节肠道优势菌群比例, 并增加肠绒毛高度, 提高对营养物质的吸收面积^[39]。此外, 益生菌还可分解饲料中难以消化的成分, 增加饲料的适口性, 改善水产动物的食欲, 提高饲料的利用率, 进而改善水产动物的生长性能和健康状况^[40]。

研究表明, 芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 和梭菌属 (*Clostridium*) 可为水产动物提供脂肪酸、维生素和氨基酸类营养物质, 并产生蛋白酶和脂肪酶等^[41-42], 促进水产动物对饲料的消化和吸收。Amoah 等^[43]在凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 饲料中添加凝结芽孢杆菌 (*B. coagulans*) ATCC 7050, 结果显示, 益生菌能够提高对虾体内脂肪酶、淀粉酶和胰蛋白酶的活性, 使其消化能力增强, 饲料系数显著下降。He 等^[44]在鞍带石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus*) 饲料中添加多种益生菌, 研究发现实验组鞍带石斑鱼的蛋白酶、胰蛋白酶活性显著增强, 且其摄食量、消化率和比生长率也显著提高。Duan 等^[45]用含有丁酸梭菌 (*C. butyricum*) 的饲料饲养凡纳滨对虾 56 d, 结果发现, 与对照组相比, 益生菌组的凡纳滨对虾肠道中短链脂肪酸含量上升, 淀粉酶和蛋白酶均显著增加, 同时降低了饲

料系数。益生菌除了影响消化酶外, 还能增加肠绒毛高度, 调节肠道菌群结构, 促进水产动物的消化能力, 有利于饲料资源的有效利用。Reda 等^[46]在饲料中添加解淀粉芽孢杆菌 (*B. amyloliquefaciens*) 饲养尼罗罗非鱼 (*O. niloticus*), 实验结果显示, 解淀粉芽孢杆菌能增加尼罗罗非鱼的肠绒毛高度, 能显著增加其体重增长率 (WG)、饲料转化率 (FCR)、比生长率 (SGR) 和蛋白质功效比。郝爽等^[47]用添加了复合益生菌的饲料饲养凡纳滨对虾, 结果发现, 益生菌组的厚壁菌门 (Firmicutes) 和放线菌门 (Actinobacteria) 菌群比例高于对照组, 可提高凡纳滨对虾肠道菌群的丰度和多样性, 促进肠道有益微生物的繁殖。

2.2 增强水产动物免疫功能, 促进水产健康的发展

水产动物的免疫系统是保护其免受致病菌感染的重要途径^[48], 益生菌通过调节水产动物的免疫应答机制, 增强其免疫力, 保障水产动物的安全健康。通过益生菌饲料的投喂, 益生菌进入并定植于水产动物消化道内, 调节肠道有益微生物的数量和种类, 并与消化道中的免疫细胞进行相互作用^[49], 调节免疫反应, 同时提高免疫细胞的吞噬活性、呼吸爆发、溶菌酶活性和免疫球蛋白 M (IgM) 等参数^[50] (表 2)。益生菌还能够产生铁载

表 2 益生菌提高水产动物的相关免疫参数

Tab. 2 Related immune parameters of aquatic animals improved by probiotics

目标宿主 target host	益生菌种类 species of probiotics	免疫参数 immune parameters	参考文献 references
秘鲁笛鲷 <i>Lutjanus peru</i>	沙克乳酸杆菌 <i>L. sakei</i>	提高髓过氧化物酶、溶菌酶、碱性磷酸酶等酶活性和免疫球蛋白 M 水平	[51]
莫桑比克罗非鱼 <i>O. mossambicus</i>	地衣芽孢杆菌 <i>B. licheniformis</i>	提高溶菌酶、碱性磷酸酶和髓过氧化物酶等酶活性	[52]
低眼无齿鲢 <i>Pangasianodon hypophthalmus</i>	解淀粉芽孢杆菌 <i>B. amyloliquefaciens</i> 短小芽孢杆菌 <i>B. pumilus</i>	提高吞噬活性和溶菌酶活性	[53]
露斯塔野鲮 <i>L. rohita</i>	嗜气芽孢杆菌 <i>B. aerophilus</i>	提高溶菌酶和超氧化物歧化酶活性、IgM 水平	[54]

· 续表 2 ·

目标宿主 target host	益生菌种类 species of probiotics	免疫参数 immune parameters	参考文献 references
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	南海嗜冷杆菌 <i>Psychrobacter namhaensis</i>	提高溶菌酶活性、IgM水平, 增加吞噬细胞数量	[55]
博氏巨鲈 <i>Pangasius bocourti</i>	空气芽孢杆菌 B81e <i>B. aerius</i> B81e	提高溶菌酶活性、吞噬活性、呼吸爆发	[56]
莫桑比克罗非鱼 <i>O. mossambicus</i>	贝莱斯芽孢杆菌H3.1 <i>B. velezensis</i> H3.1 植物乳杆菌 N11 <i>L. plantarum</i> N11	提高溶菌酶、过氧化物酶等酶活性、吞噬活性、呼吸爆发	[57]
露斯塔野鲮 <i>L. rohita</i>	地衣芽孢杆菌KADR5 <i>B. licheniformis</i> KADR5 短小芽孢杆菌KADR6 <i>B. pumilus</i> KADR6	提高溶菌酶活性和呼吸爆发	[58]
露斯塔野鲮 <i>L. rohita</i>	植物乳杆菌 VSG3 <i>L. plantarum</i> VSG3	提高溶菌酶和超氧化物歧化酶活性、吞噬活性、呼吸爆发	[59]
日本囊对虾 <i>Marsupenaeus japonicus</i>	乳酸菌 Lactobacillales	溶菌酶基因上调	[60]

体、细菌素和溶菌酶等杀菌物质, 对水产动物的典型致病菌具有一定的抑制作用^[61-62]。

研究表明, 通过添加益生菌, 可提高水产动物的免疫参数和促进其免疫基因的表达, 显著增强了免疫力。例如, Liu等^[63]通过在莫桑比克罗非鱼饲料中添加枯草芽孢杆菌和粪肠球菌 (*E. faecalis*), 发现莫桑比克罗非鱼食用含有益生菌饲料后, 其免疫蛋白、溶菌酶等免疫指标均明显提高, 免疫力显著增强。Fernandes等^[64]以复合益生菌 SFSK4 为凡纳滨对虾养殖的水添加剂, 研究发现益生菌 SFSK4 能显著增强凡纳滨对虾免疫力, 使其血液免疫参数、吞噬功能、呼吸爆发等免疫相关反应显著提高, 并促进免疫蛋白表达。Balcázar等^[65]用添加了乳酸乳球菌 (*L. lactis* sp. *lactis*) CLFP 100、肠膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*) CLFP 196 和清酒乳杆菌 (*L. sakei*) CLFP 202 的饲料饲养虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*), 发现在复合益生菌的作用下, 虹鳟体内白细胞的吞噬活性和血清补体活性均显著提高, 超氧阴离子的量也显著增加, 并提升了其对杀鲑气单胞菌 (*Aeromonas salmonicida*) 的抵抗力。Wu等^[66]将枯草芽孢杆菌 DCU、短小芽孢杆菌 BP 添加到拟穴青蟹幼蟹饲料, 发现拟穴青蟹幼蟹体内免疫相关基因的表达水平显著提高, 呼吸爆发活性增强, 且对副溶血性弧菌的抗性也有所增强, 成活率显著上升。

此外, 研究显示, 益生菌进入水产动物消化道内, 可通过产生杀菌物质并与致病菌竞争, 从而减少致病菌在消化道内的定植, 保护水产动物免受致病菌的侵袭^[67-68]。Laloo等^[69]报道了蜡样芽孢杆菌 (*B. cereus*) 通过与嗜水气单胞菌 (*Aeromo-*

nas hydrophila) 竞争铁源和营养物质, 并产生铁载体等抗菌物质来抑制嗜水气单胞菌的活性。Balcázar等^[70]用添加了枯草芽孢杆菌 UTM 126 的饲料饲养凡纳滨对虾, 发现 UTM 126 可抑制多种致病弧菌的生长, 并显著降低对虾的最终死亡率, 这可能是由于芽孢杆菌改变了其生存环境中的 pH 值, 并产生多肽抗生素如多黏菌素等杀菌物质。益生菌的针对性应用能明显提高水产动物的免疫性能, 能够精准结合水产动物自身性能进行可持续化的免疫调控。

2.3 优化水产养殖水体水质, 促进养殖环境的可持续发展

水产养殖业的主体是水产动物和养殖水环境, 水产动物依赖于水环境存活, 而水质的好坏直接影响水产动物的生长和健康状况^[71], 益生菌能够改善养殖水质, 维持养殖生态可持续的良性循环^[5]。饲料残留和排泄物是影响水产养殖生态的 2 个重要因素^[72], 未摄入的饲料残渣、排泄物等有机废物在水中积累, 给养殖水环境带来不小的压力。有机废物在降解过程中需消耗水中的氧气, 导致水环境中氧含量不足, 氮、磷、硝酸盐和亚硝酸盐等含量上升, 且极易滋生大量病原微生物, 进而影响养殖水质, 不利于水产动物的健康。然而, 益生菌能够通过饲料添加或水体添加的方式^[73], 在水环境中可发挥硝化、固氮和分解等作用, 将水产动物的排泄物、饲料残渣等有机物分解, 加快硝化和反硝化速率^[74], 并调节水环境中的有益微生物群落, 抑制养殖水中的致病菌, 从而改善养殖水质, 保障水产动物的健康状况和生态可持续发展^[75-76]。益生菌促使养殖水环境形成良性生

表 3 益生菌对养殖水质的影响

Tab. 3 Effect of probiotics on aquaculture water quality

目标宿主 target host	益生菌种类 species of probiotics	水质指标 water quality indicators	参考文献 references
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	乳酸菌 <i>L. acid bacteria</i>	降低亚硝酸盐含量	[78]
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	蜡样芽孢杆菌 <i>B. cereus</i>	降低总磷含量	[79]
欧鲶 <i>Silurus glanis</i>	乳球菌属 <i>Lactococcus</i> spp.	降低氨氮、亚硝酸盐含量, 增加溶解氧浓度	[80]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	巨大芽孢杆菌 <i>B. megaterium</i>	降低氨氮、亚硝酸盐含量	[81]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i> sp.	降低氨氮含量, 增加溶解氧浓度和pH	[82]
斑点叉尾鲴 <i>Ictalurus punctatus</i>	贝莱斯芽孢杆菌 AP193 <i>B. velezensis</i> AP193	降低氨氮、总氮、总磷含量,	[83]
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	EM菌	降低总氨氮含量	[84]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	紫色无硫细菌 purple non-sulfur bacteria	降低硝酸盐、亚硝酸盐和化学需氧量, 增加溶解氧浓度	[85]

态循环, 有利于水产养殖业的可持续发展^[50]。

益生菌可通过增加有益微生物数量和种类, 减少养殖水环境中的致病菌, 降低有机废物的含量, 为水产动物提供更健康安全的养殖环境^[65,77], 益生菌针对不同宿主改善养殖水质如表 3 所示。研究显示, 当贝莱斯芽孢杆菌 AP193作为鲶 (*Silurus asotus*) 的饲料添加剂应用时, 能够通过降低水中的总磷、总氮和硝酸盐的水平来控制养殖水体的富营养化^[86]。Wu 等^[87] 研究枯草芽孢杆菌 FY99-01 对凡纳滨对虾不同养殖阶段的养殖水环境的影响, 实验结果发现, 添加 FY99-01 可降低水环境中 pH、亚硝酸盐和活性磷的水平, 并增加了有益微藻的丰度, 降低了弧菌的丰度。Gao 等^[88] 从养殖水塘中分离出巨大芽孢杆菌 S379, 通过亚硝酸盐抗性实验, 发现巨大芽孢杆菌 S379 可去除养殖水中的亚硝酸盐离子, 表现出好氧反硝化作用, 具有改善水质的应用潜力。张维娜等^[89] 用添加了解淀粉芽孢杆菌的饲料饲养中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*), 研究发现, 解淀粉芽孢杆菌可显著减少养殖水中致病菌的数量, 降低养殖水中氨氮、总氮、化学需氧量 (COD)、总磷的含量。Nimrat 等^[90] 用掺有混合芽孢杆菌的饲料饲养凡纳滨对虾, 发现混合芽孢杆菌不但显著改善了凡纳滨对虾的生长性能、降低了养殖水中的弧菌丰度, 还降低了氨和亚硝酸盐的含量, 提高了养殖水的 pH 值, 充分改善了养殖水质。李咏梅等^[91] 从鱼肠道内分离鉴定出 4 株益生菌: 融合魏斯氏菌 (*Weissella confusa*)、植物乳杆菌 (*L. plantarum*)、粪肠球菌、乳酸乳球菌, 将菌体或菌液添加于海水鱼类养殖系统中, 结果发现益生菌处理组的氨氮水平显著低于对照组。邓斌^[92] 利用施氏假单胞

菌 SC221M (*Pseudomonas stutzeri* SC221M) 作为草鱼养殖水体添加剂, 经过 9 d 的养殖后, 实验发现施氏假单胞菌 SC221M 能降低水中的亚硝酸盐的含量, 且能够有效降低氨氮、总氮、化学需氧量 (COD)、生物需氧量等水质指标 (BOD)。养殖水环境是水产动物赖以生存的场所, 益生菌的应用充分改善了养殖水环境, 可在未来可持续水产养殖常态化发挥出巨大潜力。

3 益生菌在水产可持续养殖中应用的案例

现阶段, 益生菌在水产可持续养殖中的应用已广泛开展, 本文进一步列举此类研究的典型案例, 以期益生菌在水产生态养殖中的应用提供良好的范式, 促进此类优秀养殖模式的推广和应用, 全面保障我国水产养殖业的健康可持续发展。

EM 菌是由日本琉球大学比嘉照夫教授研发的一种微生物菌制剂, 主要含有光合细菌、乳酸菌和酵母等益生菌, 广泛应用于包括水产养殖在内的多个领域^[93]。陈国军等^[94] 将 EM 菌应用于鱼菜共生循环种养系统中, 通过向养殖水中投放和饲料添加 EM 菌的方式, 观察罗非鱼及养殖水环境的情况。在夏季疾病高发期时, 为鱼菜共生系统中的罗非鱼投喂添加 EM 菌液的饲料, 发现罗非鱼肠道疾病的发生明显减少, 推测是增强了其免疫力。另外, 在天气突变等应激条件下, EM 菌的添加可显著降低罗非鱼的死亡率。此外在养殖过程中, EM 菌调配液可显著降低水环境中的氨氮和亚硝酸盐的浓度, 减少鱼粪、饲料残渣等有机物降解产生的异味, 并提高养殖水体的透明度, 已成为改善养殖水质的有效手段。EM 菌的应用不仅增强了水产动物的免疫力, 还优化了养

殖水环境, 维持了养殖水中的生态平衡和稳定, EM 菌在鱼菜共生循环种养系统中成功应用, 展现出益生菌在水产养殖生态、经济、环境可持续发展方向的强大应用前景。

除 EM 菌之外, 我国目前也有自主研发的水产养殖益生菌产品。何德洲等^[95]从鲫 (*Carassius auratus*) 肠道中分离出的益生菌, 经过选育、驯化和饲料加工等过程, 制成益生菌产品“活水 1 号”, 将益生菌饲料应用于自然养殖池塘环境中, 对鲫进行为期 7 个月的饲养, 同时与当前市面上销售的普通鲫鱼饲料进行对比。在捕捞鲫时, 对其生长指标、产量和饲料系数进行测定, 益生菌饲料喂养的鲫平均体重 352 g/尾, 亩产量 2 026 kg, 饲料系数 1.41。与其他鲫饲料相比, 益生菌饲料喂养的鲫的生长指标、产量和饲料系数均为最优, 具有较为明显的优势, 能够降低养殖成本, 增加养殖效益。此外, 该产品中的益生菌经粪便排出后仍具有活性, 可通过化学作用降低水环境中氨氮和亚硝酸盐等量, 改善养殖水质, 减轻养殖后期水环境污染的压力。投喂益生菌饲料显著提高了该养殖生态中鲫的养殖效益, “活水 1 号”在该自然养殖池塘环境中应用的正向反馈, 为益生菌在水产养殖可持续发展中的应用提供了有力的证据。

4 总结与展望

综上所述, 益生菌在水产养殖可持续发展中发挥着至关重要的作用, 可显著提高水产动物的饲料利用率, 改善其消化和吸收功能, 还可通过刺激水产动物的免疫系统, 增强其免疫力, 对维持水产动物健康的作用效果明显。除此之外, 益生菌还能降低水中污染物的含量, 显著改善养殖水质。从以上研究中可知, 益生菌虽然在水产养殖可持续发展中的基础研究日益广泛, 然而在水源性益生菌的种类选择、相关益生性能的改善及其推广应用等方面仍然存在不足。因此, 基于加强益生菌相关益生特性, 促进水产养殖的可持续发展, 本文对益生菌在可持续水产养殖中的未来发展提出了展望。

4.1 充分挖掘水源性益生菌资源

在可持续水产养殖应用中, 益生菌的来源及其自身性质可能带来的应用功效是可持续化养殖中需要关注的重点问题, 采用更加契合水生动物和养殖环境的益生菌会事半功倍, 减少益生菌功

效与具体养殖生态不匹配的损耗。有研究表明, 同一来源的益生菌在不同的宿主体内可能具有特异性, 如从陆地动物体内分离出来的益生菌, 可能并不适应于鱼类等水产动物的养殖^[96]。2008 年, 中华人民共和国农业部公告第 1 126 号饲料添加剂品种目录仅公布了 15 种可用于水产养殖的益生菌, 2013 年, 该目录新增 16 种益生菌, 可批准用于水产养殖的微生物饲料添加剂共计 31 种, 包含地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、两歧双歧杆菌 (*Bifidobacterium bifidum*)、粪肠球菌、屎肠球菌 (*E. faecium* Anp01)、乳酸乳球菌、嗜酸乳杆菌 (*L. acidophilus*)、干酪乳杆菌 (*L. casei*)、德式乳杆菌乳酸亚种 (原名: 乳酸乳杆菌) (*L. beijerinckii*)、植物乳杆菌、乳酸片球菌 (*Pediococcus acidilactici*)、戊糖片球菌 (*P. pentosaceus*)、产阮假丝酵母 (*Candida utilis*)、酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*)、沼泽红假单胞菌 (*Rhodospseudomonas palustris*)、婴儿双歧杆菌 (*B. infantis*)、长双歧杆菌 (*B. longum*)、短双歧杆菌 (*B. breve*)、青春双歧杆菌 (*B. adolescentis*)、嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophilus*)、罗伊氏乳杆菌 (*L. reuteri*)、动物双歧杆菌 (*B. animalis*)、黑曲霉 (*Aspergillus niger*)、米曲霉 (*A. oryzae*)、迟缓芽孢杆菌 (*B. lentus*)、短小芽孢杆菌、纤维二糖乳杆菌 (*L. cellobiosus*)、发酵乳杆菌 (*L. fermentum*)、德氏乳杆菌保加利亚亚种 (原名: 保加利亚乳杆菌) (*L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*)、凝结芽孢杆菌、侧孢短芽孢杆菌 (虾类) (*Brevibacillus laterosporus*)^[97]。然而多数益生菌是由陆源性益生菌开发而来, 其作用效果并不十分理想, 例如陆源性益生菌在对虾养殖中效果不佳, 可能是因为它们缺乏在水生环境生存的能力^[98]。水生动物的生活环境和肠道微生物区系流动性强, 对食物变化高度敏感, 且易受养殖条件和生态环境因素的影响, 而陆源性益生菌应对水生环境的能力较弱。因此, 充分挖掘来自水生环境或水产动物体内的水源性益生菌, 能够为可持续水产养殖生态提供最优匹配选项, 利于可持续水产养殖的常态化发展。

4.2 结合诱变技术改进益生菌性能

目前应用的大部分益生菌是从自然环境中分离筛选出来的, 这些益生菌往往属于野生型菌株, 产酶、产营养物质等能力可能难以充分满足水产养殖的个性化需求。随着生物技术的发展, 诱变

育种技术可以实现对现有性能不足的益生菌进行改进, 培育出能力更强的菌株。诱变育种包括传统的诱变技术等如紫外光照射物理诱变、化学试剂诱变等, 以及新型的定向诱变技术如基因工程改造^[99]。王晓云等^[100]在养殖凡纳滨对虾的池塘底泥中分离出枯草芽孢杆菌 BC2, 以紫外诱变的方法对其进行诱变育种, 发现突变菌株产蛋白酶含量和降解饲料中可溶性蛋白能力显著高于原始菌株, 且能稳定遗传。Riet 等^[101]利用基因重组技术对枯草芽孢杆菌进行改造, 结果显示, 基因重组后的益生菌组中的凡纳滨对虾面对病毒侵袭时存活率更高。上述两例表明突变株的益生性能高于原始菌株, 且突变株能显著提高水产动物的消化能力、抗病能力和存活率等。因此, 应充分利用诱变技术对益生菌性能进行进一步优化, 增强其益生特性, 使突变株更贴合水产养殖的可持续策略, 进一步提高养殖效率和经济效益, 实现优选益生菌作用下的养殖生态可持续最大化。

4.3 加强推广益生菌的实际应用

目前, 益生菌在水产养殖中被广泛应用于优化养殖水体水质, 其作为饲料改良剂和免疫刺激剂的应用尚处于初步发展阶段, 水产益生菌制品相关技术体系不够成熟, 缺乏统一规范的行业标准, 相关法律法规有待完善。此外, 养殖户对其益生功效了解甚少和专业知识的匮乏, 缺少专业人员指导, 进一步限制了益生菌在水产养殖业中的应用。为将益生菌大规模应用于实际水产养殖中, 促进水产养殖业的持续发展, 带来良好的经济、社会和环境效益。因此建议 ①夯实益生菌研究基础: 坚实的益生菌研究基础是其能推广应用成功的前提, 充分解读各类益生菌的自身益生特性, 研发符合我国水产养殖特色、具有自主知识产权益生菌新品类, 才能充分发挥益生菌的功效, 成为水产养殖可持续的制胜法宝; ②完善益生菌相关生产行业标准: 应用于水产养殖中的益生菌多为饲料类产品, 完善相关行业标准和国家标准, 可保障益生菌产品的安全性、可靠性和适用性; ③拓展科普宣传平台: 充分利用互联网平台, 通过发布益生菌相关短视频或海报等新型宣传方式, 吸引养殖户了解益生菌及其益生效果, 明确益生菌在可持续水产养殖中发挥的关键作用, 吸引养殖户放心使用益生菌产品, 从而实现行业普及, 扩大接受面以推动水产养殖业的可持续发展; ④加强专业人员培训: 培训若干专业技能过硬且具

有高素质和高度责任感的技术人员, 保持和养殖户的密切联系, 深入了解养殖户的需求并对其进行服务和指导, 推动水产养殖业的可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 赵勇, 刘静, 吴倩, 等. “水陆互补”理念下的水产品营养健康功效[J]. 水产学报, 2021, 45(7): 1235-1247.
Zhao Y, Liu J, Wu Q, *et al.* Nutritional and health efficacy of aquatic products for humans with the replenishment of terrestrial resources[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(7): 1235-1247 (in Chinese).
- [2] Boyd C E, McNevin A A, Davis R P. The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply[J]. *Food security*, 2022, 14(3): 805-827.
- [3] Dawood M A O, Koshio S, Abdel-Daim M M, *et al.* Probiotic application for sustainable aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(3): 907-924.
- [4] Tal Y, Schreier H J, Sowers K R, *et al.* Environmentally sustainable land-based marine aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2009, 286(1-2): 28-35.
- [5] Boyd C E, D'Abramo L R, Glencross B D, *et al.* Achieving sustainable aquaculture: historical and current perspectives and future needs and challenges[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2020, 51(3): 578-633.
- [6] Abarike E D, Jian J C, Tang J F, *et al.* Influence of traditional Chinese medicine and *Bacillus* species (TCMBS) on growth, immune response and disease resistance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(7): 2366-2375.
- [7] 石军, 陈安国, 张云刚. 微生态饲料添加剂在水产养殖中的应用[J]. *饲料博览*, 2002(2): 38-41.
Shi J, Chen A G, Zhang Y G. Application of microbiology feed additive in aquaculture[J]. *Feed Review*, 2002(2): 38-41 (in Chinese).
- [8] Carnevali O, Maradonna F, Gioacchini G. Integrated control of fish metabolism, wellbeing and reproduction: the role of probiotic[J]. *Aquaculture*, 2017, 472: 144-155.
- [9] Ushakova N A, Pravdin V G, Kravtsova L Z, *et al.* Complex bioactive supplements for aquaculture—evolutionary development of probiotic concepts[J]. *Probiot-*

- ics and Antimicrobial Proteins, 2021, 13(6): 1696-1708.
- [10] Dawood M A O, Koshio S, Ishikawa M, *et al.* Dietary supplementation of β -glucan improves growth performance, the innate immune response and stress resistance of red sea bream, *Pagrus major*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(1): 148-159.
- [11] Ringø E, Hoseinifar S H, Ghosh K, *et al.* Lactic acid bacteria in finfish—an update[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1818.
- [12] Wang Y B, Xu Z R. Effect of probiotics for common carp (*Cyprinus carpio*) based on growth performance and digestive enzyme activities[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 127(3-4): 283-292.
- [13] He S X, Liu W S, Zhou Z G, *et al.* Evaluation of probiotic strain *Bacillus subtilis* C-3102 as a feed supplement for koi carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 2011, S1.
- [14] Hai N V. The use of probiotics in aquaculture[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2015, 119(4): 917-935.
- [15] Zorriehzakra M J, Delshad S T, Adel M, *et al.* Probiotics as beneficial microbes in aquaculture: an update on their multiple modes of action: A review[J]. *Veterinary Quarterly*, 2016, 36(4): 228-241.
- [16] Kuebutornye F K A, Abarike E D, Lu Y S. A review on the application of *Bacillus* as probiotics in aquaculture[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 87: 820-828.
- [17] Parker R B. Probiotics, the other half of antibiotic story[J]. *Animal Nutrition & Health*, 1974, 29: 4-8.
- [18] Afré R F. Probiotics in man and animals[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1989, 66(5): 365-378.
- [19] Hotel A C P, Cordoba A. Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria[J]. *Prevention*, 2001, 5(1): 1-10.
- [20] Bostock J, McAndrew B, Richards R, *et al.* Aquaculture: global status and trends[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2897-2912.
- [21] Mardones F O, Paredes F, Medina M, *et al.* Identification of research gaps for highly infectious diseases in aquaculture: the case of the endemic *Piscirickettsia salmonis* in the Chilean salmon farming industry[J]. *Aquaculture*, 2018, 482: 211-220.
- [22] Sumithra T G, Reshma K J, Christo J P, *et al.* A glimpse towards cultivable hemolymph microbiota of marine crabs: untapped resource for aquatic probiotics/antibacterial agents[J]. *Aquaculture*, 2019, 501: 119-127.
- [23] Hoseinifar S H, Ringø E, Masouleh A S, *et al.* Probiotic, prebiotic and synbiotic supplements in sturgeon aquaculture: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2016, 8(1): 89-102.
- [24] Ringø E, Olsen R E, Jensen I, *et al.* Application of vaccines and dietary supplements in aquaculture: possibilities and challenges[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2014, 24(4): 1005-1032.
- [25] Assefa A, Abunna F. Maintenance of fish health in aquaculture: review of epidemiological approaches for prevention and control of infectious disease of fish[J]. *Veterinary Medicine International*, 2018, 2018: 5432497.
- [26] Feodorova V A, Sayapina L V, Corbel M J, *et al.* Russian vaccines against especially dangerous bacterial pathogens[J]. *Emerging Microbes & Infections*, 2014, 3(1): 1-17.
- [27] 梁万礼, 王永昌, 王四维. 消化酶、消化吸收与饲料加工[J]. *粮食与饲料工业*, 2021(01): 36-40+43.
- Liang W L, Wang Y C, Wang S W. Digestive enzymes, digestion and absorption and feed processing[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2021(01): 36-40+43 (in Chinese).
- [28] Gao Q X, Xiao C F, Min M H, *et al.* Effects of probiotics dietary supplementation on growth performance, innate immunity and digestive enzymes of silver pomfret, *Pampus argenteus*[J]. *Indian Journal of Animal Research*, 2016, 50(6): 936-941.
- [29] Wang J H, Zhao L Q, Liu J F, *et al.* Effect of potential probiotic *Rhodotorula benthica* D30 on the growth performance, digestive enzyme activity and immunity in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 43(2): 330-336.
- [30] Sankar H, Philip B, Philip R, *et al.* Effect of probiotics on digestive enzyme activities and growth of cichlids, *Etilapia suratensis* (pearl spot) and *Oreochromis mossambicus* (Tilapia)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(4): 852-864.
- [31] Zokaeifar H, Balcázar J L, Saad C R, *et al.* Effects of *Bacillus subtilis* on the growth performance, digestive

- enzymes, immune gene expression and disease resistance of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2012, 33(4): 683-689.
- [32] Dawood M A O, Koshio S, Ishikawa M, *et al.* Effects of dietary supplementation of *Lactobacillus rhamnosus* or/and *Lactococcus lactis* on the growth, gut microbiota and immune responses of red sea bream, *Pagrus major*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 49: 275-285.
- [33] Adel M, Yeganeh S, Dawood M A O, *et al.* Effects of *Pediococcus pentosaceus* supplementation on growth performance, intestinal microflora and disease resistance of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(6): 1401-1409.
- [34] Talpur A D, Memon A J, Khan M I, *et al.* Gut *Lactobacillus* sp. bacteria as probiotics for *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) larviculture: effects on survival, digestive enzyme activities and water quality[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2013, 57(3): 173-184.
- [35] Mohapatra S, Chakraborty T, Prusty A K, *et al.* Use of different microbial probiotics in the diet of rohu, *Labeo rohita* fingerlings: effects on growth, nutrient digestibility and retention, digestive enzyme activities and intestinal microflora[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(1): 1-11.
- [36] Mohammadian T, Monjezi N, Peyghan R, *et al.* Effects of dietary probiotic supplements on growth, digestive enzymes activity, intestinal histomorphology and innate immunity of common carp (*Cyprinus carpio*): A field study[J]. *Aquaculture*, 2022, 549: 737787.
- [37] 董兰芳, 张琴, 许明珠, 等. 饲料中添加枯草芽孢杆菌对拟穴青蟹幼蟹生长性能、消化酶活性和体成分的影响[J]. *水产科技情报*, 2018, 45(6): 317-317,321.
- Dong L F, Zhang Q, Xu M Z, *et al.* Effect of *Bacillus subtilis* in feed on growth performance, digestive enzyme activity and body composition of juvenile *Scylla paramamosain*[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2018, 45(6): 317-317,321 (in Chinese).
- [38] Irianto A, Austin B. Probiotics in aquaculture[J]. *Journal of Fish Diseases*, 2002, 25(11): 633-642.
- [39] El-Haroun E R, Goda A M A S, Chowdhury M A K. Effect of dietary probiotic Biogen® supplementation as a growth promoter on growth performance and feed utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.)[J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37(14): 1473-1480.
- [40] Ray A K, Ghosh K, Ringø E. Enzyme-producing bacteria isolated from fish gut: a review[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(5): 465-492.
- [41] Balcázar J L, De Blas I, Ruiz-Zarzuela I, *et al.* The role of probiotics in aquaculture[J]. *Veterinary Microbiology*, 2006, 114(3-4): 173-186.
- [42] Sanders M E, Morelli L, Tompkins T A. Sporeformers as human probiotics: *Bacillus*, *Sporolactobacillus*, and *Brevibacillus*[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2003, 2(3): 101-110.
- [43] Amoah K, Huang Q C, Tan B P, *et al.* Dietary supplementation of probiotic *Bacillus coagulans* ATCC 7050, improves the growth performance, intestinal morphology, microflora, immune response, and disease confrontation of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 87: 796-808.
- [44] He R P, Feng J, Tian X L, *et al.* Effects of dietary supplementation of probiotics on the growth, activities of digestive and non-specific immune enzymes in hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀)[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(12): 5782-5790.
- [45] Duan Y F, Zhang Y, Dong H B, *et al.* Effect of dietary *Clostridium butyricum* on growth, intestine health status and resistance to ammonia stress in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 65: 25-33.
- [46] Reda R M, Selim K M. Evaluation of *Bacillus amyloliquefaciens* on the growth performance, intestinal morphology, hematology and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture International*, 2015, 23(1): 203-217.
- [47] 郝爽, 张振国, 尤宏争, 等. 复合益生菌对凡纳滨对虾肠道菌群结构的影响[J]. *水产科学*, 2022, 41(4): 597-604.
- Hao S, Zhang Z G, You H Z, *et al.* Effects of compound probiotics on intestinal microflora of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(4): 597-604 (in Chinese).
- [48] 樊丹, 李绍戌, 卢彤岩, 等. 益生菌在虹鳟养殖中的研

- 究与应用[J]. 水产学杂志, 2022, 5(1): 9-15.
- Fan D, Li S W, Lu T Y, *et al.* A review: research and application of probiotics in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) culture[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2022, 5(1): 9-15 (in Chinese).
- [49] Liu W S, Ren P F, He S X, *et al.* Comparison of adhesive gut bacteria composition, immunity, and disease resistance in juvenile hybrid tilapia fed two different *Lactobacillus* strains[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 35(1): 54-62.
- [50] Soltani M, Lymbery A, Song S K, *et al.* Adjuvant effects of medicinal herbs and probiotics for fish vaccines[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(4): 1325-1341.
- [51] Reyes-Becerril M, Angulo C, Estrada N, *et al.* Dietary administration of microalgae alone or supplemented with *Lactobacillus sakei* affects immune response and intestinal morphology of Pacific red snapper (*Lutjanus peru*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 40(1): 208-216.
- [52] Gobi N, Vaseeharan B, Chen J C, *et al.* Dietary supplementation of probiotic *Bacillus licheniformis* Dabhl improves growth performance, mucus and serum immune parameters, antioxidant enzyme activity as well as resistance against *Aeromonas hydrophila* in tilapia *Oreochromis mossambicus*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 74: 501-508.
- [53] Thy H T T, Tri N N, Quy O M, *et al.* Effects of the dietary supplementation of mixed probiotic spores of *Bacillus amyloliquefaciens* 54A, and *Bacillus pumilus* 47B on growth, innate immunity and stress responses of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 60: 391-399.
- [54] Ramesh D, Souissi S, Ahamed T S. Effects of the potential probiotics *Bacillus aerophilus* KADR3 in inducing immunity and disease resistance in *Labeo rohita*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 70: 408-415.
- [55] Makled S O, Hamdan A M, El-Sayed A F M, *et al.* Evaluation of marine psychrophile, *Psychrobacter namhaensis* SO89, as a probiotic in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) diets[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 61: 194-200.
- [56] Meidong R, Khotchanalekha K, Doolgindachbaporn S, *et al.* Evaluation of probiotic *Bacillus aerius* B81e isolated from healthy hybrid catfish on growth, disease resistance and innate immunity of Pla-mong *Pangasius bocourti*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 73: 1-10.
- [57] Van Doan H, Hoseinifar S H, Khanongnuch C, *et al.* Host-associated probiotics boosted mucosal and serum immunity, disease resistance and growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture*, 2018, 491: 94-100.
- [58] Ramesh D, Vinothkanna A, Rai A K, *et al.* Isolation of potential probiotic *Bacillus* spp. and assessment of their subcellular components to induce immune responses in *Labeo rohita* against *Aeromonas hydrophila*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 45(2): 268-276.
- [59] Giri S S, Sukumaran V, Oviya M. Potential probiotic *Lactobacillus plantarum* VSG3 improves the growth, immunity, and disease resistance of tropical freshwater fish, *Labeo rohita*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 34(2): 660-666.
- [60] Maeda M, Shibata A, Biswas G, *et al.* Isolation of lactic acid bacteria from kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*) intestine and assessment of immunomodulatory role of a selected strain as probiotic[J]. *Marine Biotechnology*, 2014, 16(2): 181-192.
- [61] Cruz P M, Ibáñez A L, Hermosillo O A M, *et al.* Use of probiotics in aquaculture[J]. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 2012: 916845.
- [62] Verschuere L, Rombaut G, Sorgeloos P, *et al.* Probiotic bacteria as biological control agents in aquaculture[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2000, 64(4): 655-671.
- [63] Liu Q, Wen L T, Pan X H, *et al.* Dietary supplementation of *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecalis* can effectively improve the growth performance, immunity, and resistance of tilapia against *Streptococcus agalactiae*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27(4): 1160-1172.
- [64] Fernandes S, Kerkar S, D'Costa A, *et al.* Immuno-stimulatory effect and toxicology studies of salt pan bacteria as probiotics to combat shrimp diseases in aquaculture[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2021, 113: 69-78.
- [65] Balcázar J L, De Blas I, Ruiz-Zarzuola I, *et al.* Enhancement of the immune response and protection

- induced by probiotic *lactic acid bacteria* against furunculosis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 2007, 51(1): 185-193.
- [66] Wu H J, Sun L B, Li C B, *et al.* Enhancement of the immune response and protection against *Vibrio parahaemolyticus* by indigenous probiotic *Bacillus* strains in mud crab (*Scylla paramamosain*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 41(2): 156-162.
- [67] Vine N G, Leukes W D, Kaiser H. In vitro growth characteristics of five candidate aquaculture probiotics and two fish pathogens grown in fish intestinal mucus[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2004, 231(1): 145-152.
- [68] Ringø E, Myklebust R, Mayhew T M, *et al.* Bacterial translocation and pathogenesis in the digestive tract of larvae and fry[J]. *Aquaculture*, 2007, 268(1-4): 251-264.
- [69] Laloo R, Moonsamy G, Ramchuran S, *et al.* Competitive exclusion as a mode of action of a novel *Bacillus cereus* aquaculture biological agent[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2010, 50(6): 563-570.
- [70] Balcázar J L, Rojas-Luna T. Inhibitory activity of probiotic *Bacillus subtilis* UTM 126 against *Vibrio* species confers protection against vibriosis in juvenile shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Current Microbiology*, 2007, 55(5): 409-412.
- [71] Sunitha K, Krishna P V. Efficacy of probiotics in water quality and bacterial biochemical characterization of fish ponds[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2016, 5(9): 30-37.
- [72] Nathanailides C, Kolygas M, Choremi K, *et al.* Probiotics have the potential to significantly mitigate the environmental impact of freshwater fish farms[J]. *Fishes*, 2021, 6(4): 76.
- [73] 张美玲, 单承杰, 杜震宇. 益生菌与鱼类肠道健康研究进展[J]. *水产学报*, 2021, 45(1): 147-157.
Zhang M L, Shan C J, Du Z Y. Research advances on probiotics and fish gut health[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(1): 147-157 (in Chinese).
- [74] Soltani M, Ghosh K, Hoseinifar S H, *et al.* Genus *Bacillus*, promising probiotics in aquaculture: aquatic animal origin, bio-active components, bioremediation and efficacy in fish and shellfish[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2019, 27(3): 331-379.
- [75] Akinbowale O L, Peng H, Barton M D. Antimicrobial resistance in bacteria isolated from aquaculture sources in Australia[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 100(5): 1103-1113.
- [76] Antony S P, Philip R. Bioremediation in shrimp culture systems[J]. *Naga The WorldFish Center Quarterly*, 2006, 29(3 & 4): 62-66.
- [77] Banerjee G, Ray A K. The advancement of probiotics research and its application in fish farming industries[J]. *Research in Veterinary Science*, 2017, 115: 66-77.
- [78] 陈丽婷, 吴剑峰, 赵玉兵, 等. 零换水条件下复合益生菌对罗非鱼生长性能、肌肉品质及养殖水体环境的影响[J]. *广东农业科学*, 2022, 49(4): 123-134.
Chen L T, Wu J F, Zhao Y B, *et al.* Effects of compound probiotics on growth performance, muscle quality and aquaculture water of tilapia under zero-water exchange condition[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2022, 49(4): 123-134 (in Chinese).
- [79] Wang M, Yi M M, Lu M X, *et al.* Effects of probiotics *Bacillus cereus* NY5 and *Alcaligenes faecalis* Y311 used as water additives on the microbiota and immune enzyme activities in three mucosal tissues in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* reared in outdoor tanks[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 17: 100309.
- [80] Zibiene G, Zibas A. Impact of commercial probiotics on growth parameters of European catfish (*Silurus glanis*) and water quality in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture International*, 2019, 27(6): 1751-1766.
- [81] Nimrat S, Khaopong W, Sangsong J, *et al.* Improvement of growth performance, water quality and disease resistance against *Vibrio harveyi* of postlarval whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by administration of mixed microencapsulated *Bacillus* probiotics[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(5): 1407-1418.
- [82] Hassan M A, Fathallah M A, Elzoghby M A, *et al.* Influence of probiotics on water quality in intensified *Litopenaeus vannamei* ponds under minimum-water exchange[J]. *AMB Express*, 2022, 12(1): 22.
- [83] Thurlow C M, Williams M A, Carrias A, *et al.* *Bacillus velezensis* AP193 exerts probiotic effects in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and reduces aquaculture pond eutrophication[J]. *Aquaculture*, 2019, 503: 347-

- 356.
- [84] El-Kady A A, Magouz F I, Mahmoud S A, *et al.* The effects of some commercial probiotics as water additive on water quality, fish performance, blood biochemical parameters, expression of growth and immune-related genes, and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 546: 737249.
- [85] Chumpol S, Kantachote D, Nitoda T, *et al.* The roles of probiotic *purple nonsulfur bacteria* to control water quality and prevent acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) for enhancement growth with higher survival in white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during cultivation[J]. *Aquaculture*, 2017, 473: 327-336.
- [86] James G, Das B C, Jose S, *et al.* *Bacillus* as an aquaculture friendly microbe[J]. *Aquaculture International*, 2021, 29(1): 323-353.
- [87] Wu D X, Zhao S M, Peng N, *et al.* Effects of a probiotic (*Bacillus subtilis* FY99-01) on the bacterial community structure and composition of shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone) culture water assessed by denaturing gradient gel electrophoresis and high-throughput sequencing[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(3): 857-869.
- [88] Gao J Q, Gao D, Liu H, *et al.* Biopotentiality of high efficient aerobic denitrifier *Bacillus megaterium* S379 for intensive aquaculture water quality management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 104-111.
- [89] 张维娜, 高亮, 于丹, 等. 解淀粉芽孢杆菌对河蟹养殖水体中致病菌的抑制作用及对水质的调控作用[J]. *水产科技情报*, 2017, 44(4): 169-172.
- Zhang W N, Gao L, Yu D, *et al.* Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* on biosynthesis and biosynthesis of *bacillus amyloliquefaciens*[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2017, 44(4): 169-172 (in Chinese).
- [90] Nimrat S, Suksawat S, Boonthai T, *et al.* Potential *Bacillus* probiotics enhance bacterial numbers, water quality and growth during early development of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Veterinary Microbiology*, 2012, 159(3-4): 443-450.
- [91] 李咏梅, 任贻超, 姜森灏, 等. 渔源乳酸菌降解养殖水体氨氮的效果研究[J]. *水产科学*, 2018, 37(4): 499-504.
- Li Y M, Ren Y C, Jiang S H, *et al.* Effects of *Lactobacillus* derived from fish on degradation of ammonia nitrogen in aquaculture water[J]. *Fisheries Science*, 2018, 37(4): 499-504 (in Chinese).
- [92] 邓斌. 施氏假单胞菌 SC221-M 的反硝化特性及其调节草鱼养殖水体水质的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Deng B. Studies on denitrification characteristics of *Pseudomonas stutzeri* SC221-M and its application to water quality control in grass carp aquaculture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).
- [93] Xu W, Mawolo P Y, Gao J, *et al.* Effects of supplemental effective microorganisms in feed on the growth, immunity, and appetite regulation in juvenile GIFT tilapia[J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: 100577.
- [94] 陈国军, 胡君易, 林晓霞, 等. EM菌在鱼菜共生循环农业生产中的应用[J]. *现代农业研究*, 2022, 28(6): 111-113.
- Chen G J, Hu J Y, Lin X X, *et al.* Application of EM bacteria in fish-vegetable symbiotic cycle agriculture[J]. *Modern Agriculture Research*, 2022, 28(6): 111-113 (in Chinese).
- [95] 何德洲, 李攀榕, 牟成友, 等. 一种用于高产池塘的鲫鱼饲料: 中国, 105166454A[P]. 2015-12-23.
- He D Z, Li P R, Mu C Y, *et al.* A crucian carp feed for high-yield ponds: CN, 105166454A[P]. 2015-12-23 (in Chinese).
- [96] Van Doan H, Hoseinifar S H, Ringø E, *et al.* Host-associated probiotics: a key factor in sustainable aquaculture[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2020, 28(1): 16-42.
- [97] 中国农业部. 中华人民共和国农业部公告第2045号 [J]. *中国饲料添加剂*, 2014(7): 39-42.
- Ministry of Agriculture, China. Bulletin of the ministry of agriculture of the people's republic of China No. 2045[J]. *China Feed Additives*, 2014(7): 39-42 (in Chinese).
- [98] Ninawe A S, Selvin J. Probiotics in shrimp aquaculture: avenues and challenges[J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2009, 35(1): 43-66.
- [99] 严婉荣, 符美英, 肖敏, 等. 芽孢杆菌高产活性物质与诱变育种[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(11): 4600-4607.
- Yan W R, Fu M Y, Xiao M, *et al.* High-yield active substance and mutation breeding of *Bacillus*[J]. *中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries*

- Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(11): 4600-4607 (in Chinese).
- [100] 王晓云, 王慧, 赵燕, 等. 紫外诱变选育高活性蛋白酶枯草芽孢杆菌及其降解饲料能力评价[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1351-1357.
Wang X Y, Wang H, Zhao Y, *et al.* UV-mutated breeding of *Bacillus subtilis* strain with high protease activity and evaluation of its substrate degradation ability[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(6): 1351-1357 (in Chinese).
- [101] Riet J, Costa-Filho J, Dall'Agno L, *et al.* *Bacillus subtilis* expressing double-strand RNAs (dsRNAs) induces RNA interference mechanism (RNAi) and increases survival of WSSV-challenged *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2021, 541: 736834.

Research progress and prospect of probiotics in sustainable aquaculture

ZHAO Yong^{1,2,3*}, DUAN Weidan¹, WANG Youcheng⁴, SU Ming⁵, TAO Qian¹,
ZHANG Zhaohuan^{1,2,3}, PAN Yingjie^{1,2,3}, LIU Zhijun^{6*}

- (1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Products on Storage and Preservation (Shanghai), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China;
4. Shanghai Ruijie Aquaculture Professional Cooperative, Shanghai 291715, China;
5. Aquaculture Technology Promotion Station of Qingpu District, Shanghai 201977, China;
6. Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai Aquatic Technology Promotion Station, Shanghai 200433, China)

Abstract: Aquaculture plays a vital role in global food security and continues to provide a source of high-quality protein for humanity. Probiotics are beneficial microorganisms that can be used in aquaculture. They can not only improve the growth performance and immune capacity of aquatic animals, but also inhibit pathogenic bacteria and improve aquaculture water quality. The application of probiotics in aquaculture helps promote the healthy and sustainable development of aquaculture. Therefore, this article firstly introduces the definition and sources of probiotics in aquaculture, expounds the significance and practical application of probiotics in sustainable aquaculture, and discusses the future research direction in this area, in order to provide reliable technical support for the popularization and application of probiotics in sustainable aquaculture..

Key words: aquaculture; probiotics; efficacy of probiotics; sustainable development

Corresponding author: ZHAO Yong. E-mail: yzhao@shou.edu.cn; LIU Zhijun. E-mail: 13764381007@163.com

Funding projects: Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China (2021-02-08-00-12-F00783)