

海马主要弧菌病及其防治技术研究进展

杨子涵

天津农学院水产学院, 天津

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

海马具有较高的药用及观赏价值, 随着海马养殖产业的规模化发展, 弧菌病已成为制约其可持续发展的关键病害, 相关病害具有感染范围广、传播速度快、种类繁多、致死率高等特点, 严重威胁养殖效益与种质资源安全。本文旨在系统梳理海马主要致病弧菌的生物学特性、临床病症、致病机理、免疫响应机制及综合防治技术的最新研究进展。为海马集约型养殖预防及治疗弧菌病害提供参考。

关键词

海马, 细菌性疾病, 病原菌, 防治

Recent Advances in Research on Major Vibrio Diseases in Seahorses and Their Control Techniques

Zihan Yang

College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin

Received: May 25, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

Seahorses possess significant medicinal and ornamental value. With the large-scale development of the seahorse aquaculture industry, vibriosis has become a key disease limiting its sustainable development. These diseases are characterized by a wide range of infection, rapid transmission, a large number of species, and high mortality rates, posing a serious threat to aquaculture profitability and the security of genetic resources. This paper aims to systematically review the latest research progress on the biological characteristics, clinical symptoms, pathogenic mechanisms, immune response mechanisms, and integrated control technologies of the major Vibrio pathogens affecting

seahorses. It is intended to provide a reference for the prevention and treatment of *Vibrio* diseases in intensive seahorse aquaculture.

Keywords

Seahorses, Bacterial Diseases, Pathogenic Bacteria, Prevention and Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海马(*Hippocampus*)作为海龙科的重要经济物种,在海洋生物资源开发、传统医药应用及生态观赏领域具有极高的价值,近年来其人工养殖规模在全球范围内持续扩大,已成为沿海地区渔业经济的新增长点[1]。然而,随着养殖密度的增加和集约化程度的提高,病害频发已成为制约海马养殖产业可持续发展的核心瓶颈,由弧菌引起的细菌性感染尤为突出,常导致海马出现大规模死亡,造成严重的经济损失[2]。当前,关于海马弧菌病的病原多样性、致病机理及特异性免疫响应机制的研究已取得一定进展,本文系统梳理海马主要弧菌病的病原菌种类、生物学特性、临床病症、防治技术等方面进行综述,为线纹海马集约型养殖防治弧菌病害提供理论参考。

2. 种类及生物学特性

弧菌属(*Vibrio*)隶属于γ-变形菌纲(Gammaproteobacteria)弧菌目(Vibrionales)弧菌科(Vibrionaceae),是一类革兰氏阴性、兼性厌氧,弯曲成弧状,菌体短小,单极毛运动,广泛分布于浅海域的海水中[3]。目前有效弧菌属种类有158种[4],目前报道有关海马相关病原菌包括溶藻弧菌(*V. alginolyticus*) [5]、哈维氏弧菌(*V. harveyi*) [6]、副溶血弧菌(*V. parahaemolyticus*) [7]、创伤弧菌(*V. vulnificus*) [8]、轮虫弧菌(*V. rotiferianus*) [9]、强壮弧菌(*V. fortis*) [10]、灿烂弧菌(*V. splendidus*) [11]、塔式弧菌(*V. tubiashii*) [12]等,有些弧菌也能引起人类疾病如:溶藻弧菌、副溶血弧菌、创伤弧菌等[13]。

根据《伯杰氏手册》[14]及《常见细菌系统手册》[15],弧菌属菌株为化能有机营养型,代谢通路兼具需氧呼吸型与发酵型。最适生长温度在18℃~37℃区间,生长pH范围多为6.0~8.5;绝大多数菌株有嗜盐特性,最适生长NaCl浓度一般为3.0%。常规生化鉴定共性特征:氧化酶反应阳性,菌落大多无色,部分菌株仅产生淡黄色色素;V-P反应通常呈阳性,绝大多数菌株可将硝酸盐还原为亚硝酸盐;葡萄糖发酵仅产酸不产气,脲酶反应为阴性。

3. 临床病症

弧菌是目前海马细菌性疾病中种类最多、流行最广的一类致病菌属,通常会引起来体病变和内脏损伤等常见病症。夏季是弧菌感染的高发期[16]。海马感染病原弧菌来源(见图1)。

哈维氏弧菌的感染可导致海马爆发性死亡,1998年,Alcaide等报道在西班牙养殖与热带对虾(*Stenopus hispidus*)共饲养的大海马超90%的死亡率,病鱼体表出血、腹水积聚,出现病症后3~5天死亡,从病害海马中分离出哈维氏弧菌[17];1999年,菲律宾SEAFDEC养殖的3~4月龄海马出现皮肤褪色、腹部凹陷、虚弱等症状并伴随死亡。从养殖水及饵料中采集了样本检测到养殖水体弧菌数 1.5×10^3 cfu/mL;饲料(*Aschetes sp.*)中冷冻饲料弧菌数量 2.74×10^4 cfu/3尾,揭示了海马感染哈维氏弧菌的可能来源于饵料

及养殖水体[18]; 2009年 Raj 等经腹腔注射感染实验证实了哈维氏弧菌在引发大海马体外白斑和厌食症的同时具有高致死率, 其对平均体重为 6.2 g 海马的致死浓度为 4×10^4 CFU/尾[19]; 2017年, Qin 等对我国沿海八地共 85 家海马养殖场中哈维氏弧菌引发的疫情状况进行了调查评估, 发现受哈维氏弧菌重度侵袭的比例介于 33.3%至 72.7%之间[20]。李莹等从患有表皮溃疡综合征的线纹海马的皮肤和肠道组织分离出哈维氏弧菌, 通过腹腔注射回归感染 2.34 g 左右的海马 LD_{50} 约为 2.89×10^8 CFU/mL。患病海马游动失常、皮肤色素缺失并溃烂, 腮部受损, 肝脏淤血等典型症状[6]。

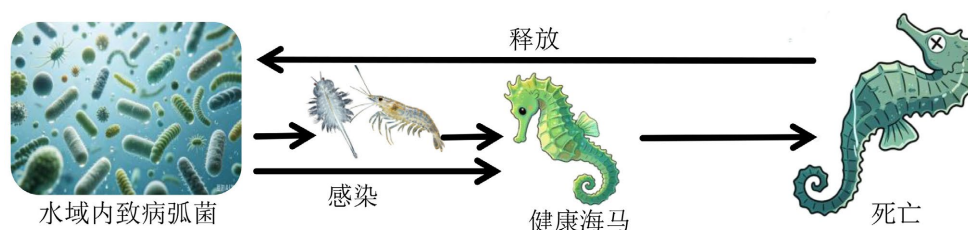


Figure 1. Schematic diagram of vibrio infection in seahorses

图 1. 海马感染病原弧菌示意图

溶藻弧菌(*Vibrio alginolyticus*)为海马腐皮病的常见病原, 从西班牙海洋研究所的水族箱中收集了 8 尾嗜睡、食欲不振、表皮具白斑、某些具尾部坏死性病变的海马。发现其黏膜表面的主要优势菌群是溶藻弧菌和灿烂弧菌(*Vibrio splendidus*) [11]; 而从巴西南部圣卡塔琳娜州养殖吻海马分离出溶藻弧菌则可使海马鳃片出现增生、移位、融合, 肾脏有白细胞浸润和局部坏死, 肝脏组织增生、肝窦变形, 皮肤多处病灶, 在 1.0×10^7 CFU/mL 溶藻弧菌的溶液中浸泡 15 分钟, 养殖 24 小时后全部死亡[5]; 患病海马皮肤组织细胞变性且不规则排列, 后呈溃烂状, 腹部注射 72 h 后 LD_{50} 为 2.799×10^6 CFU/g [21]。

副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)已被证实为海马细菌性肠炎的重要病原菌。福建省东山县养殖线纹海马暴发大规模死亡, 患病个体典型症状为: 肛门发白外突、肝出血、肠道梗阻、腹水淤积、后肠糜烂, 发病后 3~5 天死亡。从患病个体分离到病原菌为副溶血弧菌, 回归感染测定其 10 天半致死剂量(LD_{50})为 1.3×10^3 CFU/尾[22]。大海马感染后出现了腹部发白肿胀积水、肝脏充血、内脏含有脓液的典型肠炎病症[23]。

除以上常见弧菌之外, Wang 等发现强壮弧菌(*Vibrio fortis*)会引起线纹海马肠道组织结构被严重破坏、粘膜充血, 致死性极强[24]; 轮虫弧菌(*Vibrio rotiferianus*)被确定为福建地区养殖线纹海马尾部溃烂症的病原, 患病海马尾部不能正常弯曲、末端表皮脱落溃烂甚至露骨, 肝脏红肿或发黄, 肠道白浊[9]。Jiang 等从海南省养殖场头部患有溃疡的海马样本中分离出创伤弧菌(*Vibrio vulnificus*), 染病海马头部初始出现黄色斑点, 而后迅速蔓延至整个头颈部, 最终导致个体死亡[8]; Shao 等从患病幼年海马分离获得一株塔式弧菌(*Vibrio tubiashii*), 经回归感染测定其半数致死量(LD_{50})为 5.81×10^5 CFU/g。组织病理观察到肝细胞溶解坏死, 形成典型坏死灶; 肾脏呈现肾小管塌陷、上皮细胞脱落特征, 同时可见大量炎性细胞浸润肠、肾组织[12]。对三斑海马、线纹海马、棘海马出现白色突起肛门、腹部狭窄, 且停止进食的海马与健康海马的肠道菌群进行比对发现优势菌群黑河弧菌与海洋弧菌为潜在的肠道致病菌[25]。

4. 防治技术

鱼类常见的细菌性疾病包括药物防治、免疫防治以及生物防治(如图 2)。

4.1. 药物防治

药物防治是在疾病发生或高风险时期采取的干预措施, 要求科学、精准、规范, 以最大限度减少对

环境和产品安全的负面影响[26]。抗生素应在农业或水产养殖环境中谨慎使用，然而随着抗生素的滥用，耐药问题亦日渐突出[27]，世界卫生组织(WHO)将抗生素耐药性列为“全球十大公共卫生威胁” [28]。研发高效、安全的抗生素替代品已成为水产养殖业可持续发展的核心议题[29]。

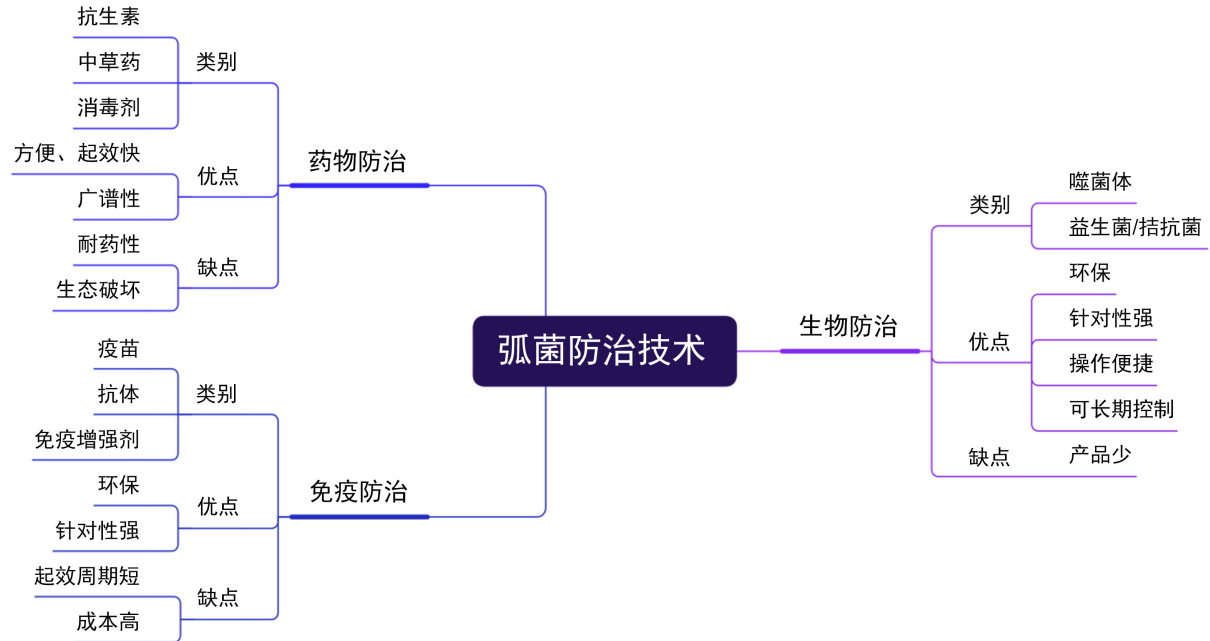


Figure 2. Diagram of vibrio control methods and their advantages and disadvantages
图 2. 弧菌防治技术类别及优缺点示意图

中草药具有天然性、活性成分多样、不易引致耐药性等优势，是替代或减少抗生素使用的理想选择之一[30]。王玉娥等采用 MIC、MBC 法从 10 种中草药中筛选抗弧菌药物发现：五倍子抑菌杀菌能力最强，对溶藻弧菌、副溶血弧菌、河流弧菌、麦氏弧菌的 MIC、MBC 均为 1.56 mg/mL，对哈维氏弧菌为 3.125 mg/mL；黄连次之；白头翁无抑菌杀菌作用；五味子五味子、乌梅、马齿苋、地榆、木瓜、公丁香、大黄仅对河流弧菌抑菌作用较强，对其余 4 种致病菌效果一般[31]。由五倍子、诃子、大黄等组成的复方制剂，也被证实对哈维氏弧菌、溶藻弧菌等具有良好的抑制效果[32]。

针对海马弧菌病的药物防治研究较少，大多停留于病原弧菌对抗生素药物敏感性的研究，例如：杨求华等鉴定的线纹海马尾部溃烂病原轮虫弧菌，显示其对氨基糖苷类、青霉素类、头孢类、酰胺醇类及多肽类等 17 种药物敏感[9]。姜芳燕等针对哈维氏弧菌及副溶血弧菌进行生物活性物质的抑菌实验表明，茶多酚、乳酸、没食子酸、大蒜素和聚赖氨酸 5 种活性物质有抑菌效果[23]。刘文军等从天津某养殖场分离的线纹海马副溶血弧菌对亚胺培南、头孢噻肟、四环素等 22 种药物敏感[33]。冯春明和王淑君报道了引起膨腹海马鳃肿大的嗜环弧菌，该菌株对恩诺沙星、复方新诺明高度敏感，但对青霉素和氨苄西林耐药，并采用恩诺沙星粉治疗 4 天后，患病海马状态明显好转，摄食与活力恢复，死亡停止[34]。Lin 等经利福平处理桡足类幼虫喂养幼年海马具有更高的生存能力和免疫能力，其胃肠道内的致病菌丰度也较低[35]。

4.2. 免疫防治

免疫防治包括旨在通过激活和增强养殖动物自身的免疫防御系统，使其获得对特定病原的抵抗力，是病害防控中具有前瞻性和持久性的策略。

疫苗接种是免疫防治最直接有效的方式, 针对细菌的疫苗主要包括灭活全菌苗、减毒疫苗、亚单位疫苗以及核酸疫苗等[36]。灭活疫苗通过物理或化学方法使病原物失活制备而成, 甲醛、氯仿和苯酚是灭活细菌常用的灭活剂[37]。自 1942 年应用于水产养殖以来, 其制备方法不断优化, 人们对灭活试剂的选择更倾向于健康安全环保[38]。目前已针对鱼类弧菌病的各类注射疫苗研发成功, 可精准控制接种剂量, 但存在工作量大、易致鱼体损伤与应激反应的局限[39]; 而口服疫苗[40]、浸泡疫苗[39]等新兴免疫治疗方式为弧菌病防控提供新方向。

目前海马弧菌病免疫防控相关研究较为有限: 疫苗方面, 李营等研制的哈维氏弧菌、副溶血弧菌灭活疫苗, 对海马的免疫保护率仅为 42%和 28% [41]; 免疫机制方面, 黄伟等发现海马辜丸可合成天然免疫因子 β -防御素(HeBD), 其具备内毒素中和与广谱细菌凝集能力, 既能阻止有毒物质引发辜丸免疫反应, 又可抵御外源微生物入侵, 有助于平衡免疫豁免与局部防御[42]; Jiyeon 等则从大腹海马中鉴定出溶菌酶(ShLysG), 该蛋白可能具有潜在的抗病原体免疫防御功能[43], 为研制针对海马养殖弧菌病害防治相关免疫增强剂奠定基础。

4.3. 生物防治

生物防治利用一种生物或其代谢产物来控制病原, 具有高度特异性和环境友好性等优点, 益生菌制剂在弧菌防控中应用广泛, 常见种类主要包括芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)、乳酸菌属(*Lactobacillus* spp.)及肠球菌属(*Enterococcus* spp.)等[44], 其拮抗机制主要包括竞争性排斥、分泌细菌素、有机酸或酶类等抗菌物质以及激活宿主免疫应答等[45]。蔡怡山等研究了不同配比复合益生菌对线纹海马幼苗养殖效果的影响, 结果表明, 枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌和粪肠球菌按 2:3:1 或 3:2:1 配比混合使用效果最佳[46]。Liu 等通过高浓度植物乳杆菌处理海马幼鱼存活率从 20%提升至 45%以上, 肠道乳酸菌丰度从 0.15%升高至 2.91%, 证实高浓度植物乳杆菌对幼鱼肠炎具有治疗效果[47]。

5. 小结

弧菌属(*Vibrio*)是海马细菌性疾病的主要致病菌, 本文系统综述了海马主要弧菌病的研究进展, 已报道的种类包括溶藻弧菌、哈维氏弧菌、副溶血弧菌等 8 种, 未来需进一步明确养殖水体中弧菌的致病阈值, 优化疫苗、噬菌体与益生菌等环境友好应用方案, 深入探索海马-弧菌互作的分子机制, 为海马集约型养殖的病害防控提供更精准的理论与技术支撑。

参考文献

- [1] 王诗成, 李博, 俞兰良. 海马野生资源保护与海马产业发展路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(4): 748-754.
- [2] 袁怡然, 蒋艳, 孟耀文, 等. 我国海马养殖现状及存在的主要问题[J]. 广西中医药大学学报, 2025, 28(6): 93-97.
- [3] 吴后波, 潘金培. 弧菌属细菌及其所致海水养殖动物疾病[J]. 中国水产科学, 2001(1): 89-93.
- [4] Göker, M., Christensen, H., Fingerle, V., et al. (2026) LPSN Genus *Vibrio*. <https://www.bacterio.net/genus/vibrio>
- [5] Martins, M.L., Mouriño, J.L.P., Fezer, G.F., et al. (2010) Isolation and Experimental Infection with *Vibrio alginolyticus* in the Sea Horse, *Hippocampus Reidi* Ginsburg, 1933 (Osteichthyes: Syngnathidae) in Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, **70**, 205-209. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842010000100028>
- [6] Li, Y., Wang, Z., Zheng, F., Wang, B., Liu, H., Zhang, P., et al. (2020) Identification and Characterization of the Pathogen Associated with Skin Ulcer Syndrome in Lined Seahorse, *Hippocampus erectus*. *Aquaculture Research*, **51**, 989-999. <https://doi.org/10.1111/are.14445>
- [7] 杨弘诣, 杨为东, 程刚, 等. 一种海马肠道疾病病原体的鉴定及其对抗生素的敏感性研究[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2006, 29(4): 232-234.
- [8] Jiang, F., Yang, N., Huang, H., Feng, H., Li, Y. and Han, B. (2020) Short Communication: Recovery of *Vibrio vulnificus* from Head Ulceration in Seahorse (*Hippocampus kuda*). *Aquaculture International*, **28**, 653-660.

- <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00486-z>
- [9] 杨求华, 郑乐云, 黄种持, 等. 线纹海马尾部溃烂病原体轮虫弧菌的分离鉴定及特性分析[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 1131-1140.
- [10] Evans, D., Millar, Z., Harding, D., Pham, P.H., LePage, V. and Lumsden, J.S. (2022) Lipoid Liver Disease in *Hippocampus erectus* Perry with *Vibrio fortis*-Induced Dermatitis and Enteritis. *Journal of Fish Diseases*, **45**, 1225-1229. <https://doi.org/10.1111/jfd.13618>
- [11] Balcázar, J.L., Gallo-Bueno, A., Planas, M. and Pintado, J. (2010) Isolation of *Vibrio alginolyticus* and *Vibrio splendidus* from Captive-Bred Seahorses with Disease Symptoms. *Antonie van Leeuwenhoek*, **97**, 207-210. <https://doi.org/10.1007/s10482-009-9398-4>
- [12] Shao, P., Yong, P., Wang, X., Xie, S., Fan, Y., Zang, L., et al. (2019) Isolation, Identification, and Histopathological Analysis of *Vibrio tubiashii* from Lined Seahorse *Hippocampus erectus*. *Diseases of Aquatic Organisms*, **133**, 195-205. <https://doi.org/10.3354/dao03350>
- [13] Mohamad, N., Amal, M.N.A., Yasin, I.S.M., Zamri Saad, M., Nasruddin, N.S., Al-Saari, N., et al. (2019) Vibriosis in Cultured Marine Fishes: A Review. *Aquaculture*, **512**, Article 734289. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734289>
- [14] Bergey, D.H. (1994) Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. Lippincott Williams & Wilkins.
- [15] 车秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 陈梅. 弧菌(Vibrio)与渔业生物及与人类病害评述[J]. 海洋湖沼通报, 1999(1): 62-68.
- [17] Alvarez, J., Austin, B., Alvarez, A.M., et al. (1998) *Vibrio harveyi*: A Pathogen of Penaeid Shrimps and Fish in Venezuela. *Journal of Fish Diseases*, **21**, 313-316. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2761.1998.00101.x>
- [18] Tendencia, E.A. (2004) The First Report of *Vibrio harveyi* Infection in the Sea Horse *Hippocampus Kuda* Bleekers 1852 in the Philippines. *Aquaculture Research*, **35**, 1292-1294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01109.x>
- [19] Raj, S.T., Lipton, A.P. and Chauhan, G.S. (2010) Characterization and Infectivity Evaluation of *Vibrio harveyi* Causing white Patch Disease among Captive Reared Seahorses, *Hippocampus kuda*. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, **39**, 151-156.
- [20] Qin, G., Wang, X., Tan, S. and Lin, Q. (2017) A Bacterial Infection by *Vibrio harveyi* Causing Heavy Reduction of Cultured Lined Seahorse *hippocampus Erectus*. *Journal of Fish Diseases*, **40**, 601-605. <https://doi.org/10.1111/jfd.12533>
- [21] Xie, J., Bu, L., Jin, S., Wang, X., Zhao, Q., Zhou, S., et al. (2020) Outbreak of Vibriosis Caused by *Vibrio harveyi* and *Vibrio Alginolyticus* in Farmed Seahorse *Hippocampus kuda* in China. *Aquaculture*, **523**, Article 735168. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735168>
- [22] Lin, T., Zhang, D., Liu, X. and Xiao, D. (2016) Variations of Immune Parameters in the Lined Seahorse *Hippocampus erectus* after Infection with Enteritis Pathogen of *Vibrio parahaemolyticus*. *Fish & Shellfish Immunology*, **50**, 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.01.039>
- [23] 姜芳燕, 杨宁, 冯慧敏, 等. 大海马肠炎病原菌分离、鉴定及生物防治[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(12): 5317-5324.
- [24] Wang, X., Zhang, Y., Qin, G., Luo, W. and Lin, Q. (2016) A Novel Pathogenic Bacteria (*Vibrio fortis*) Causing Enteritis in Cultured Seahorses, *Hippocampus erectus* Perry, 1810. *Journal of Fish Diseases*, **39**, 765-769. <https://doi.org/10.1111/jfd.12411>
- [25] Li, F., Wang, K., Luo, W., Huang, L. and Lin, Q. (2015) Comparison of the Intestinal Bacterial Flora in Healthy and Intestinal-Diseased Seahorses *Hippocampus trimaculatus*, *Hippocampus erectus*, and *Hippocampus spinosissimus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, **46**, 263-272. <https://doi.org/10.1111/jwas.12189>
- [26] 张春明. 水产养殖密度与药残控制关系及规范用药措施[J]. 科学养鱼, 2025(7): 27-28.
- [27] 杨泽禹, 黎慧, 吴志强, 等. 水产动物致病菌耐药性研究现状与防控对策[J]. 中国渔业质量与标准, 2023, 13(5): 39-45.
- [28] Murray, C.J.L., Ikuta, K.S., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles Aguilar, G., Gray, A., et al. (2022) Global Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance in 2019: A Systematic Analysis. *The Lancet*, **399**, 629-655. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)02724-0)
- [29] 李爱华, 林茂. 水产养殖抗生素替代品的研究现状及发展趋势[J]. 水生生物学报, 2025, 49(10): 158-173.
- [30] 韦小清, 林家春. 中草药在水产养殖鱼类疾病绿色防控中的应用策略[J]. 中国动物保健, 2025, 27(10): 118-119.
- [31] 王玉娥, 邢晨光, 王国良. 5种海洋致病弧菌对34种中草药敏感性的测定[J]. 水产科学, 2008, 27(5): 221-225.
- [32] 陈琛, 王发秀, 张赛乐, 等. 中草药对4种南美白对虾致病菌的抑制效果筛选[J]. 山东畜牧兽医, 2015, 36(1): 11-12.

- [33] 刘文军, 尚东维, 于小涵, 等. 线纹海马副溶血弧菌的分离鉴定及药物筛选[J]. 天津农学院学报, 2022, 29(1): 52-56.
- [34] 冯春明, 王淑君. 膨腹海马嗜环弧菌的分离鉴定、药敏分析及治疗案例[J]. 黑龙江水产, 2026, 45(1): 15-20.
- [35] Lin, T., Wang, C., Liu, X., Gao, F., Xiao, D., Zhang, D., *et al.* (2017) Survival, Growth Performance and Immune Capacity of the Juvenile Lined Seahorse *Hippocampus erectus* Fed with Rifampicin-Treated Copepods. *Diseases of Aquatic Organisms*, **125**, 45-52. <https://doi.org/10.3354/dao03135>
- [36] 王璐瑶, 李宁求, 张鹏, 等. 渔用疫苗灭活剂研究进展[J]. 中国生物制品学杂志, 2018, 31(12): 1402-1408.
- [37] 王启要. 中国鱼类疫苗技术研发及应用研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 1-9.
- [38] Zeng, Q., Sun, Y., Lai, P., Chen, Q. and Wang, H. (2024) Advancements in *Vibrio* Vaccines for Aquaculture. *Aquaculture International*, **32**, 3331-3356. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01325-y>
- [39] Huang, Y., Yang, X., Liu, W., Wang, P. and Huang, M. (2026) Advances in Aquatic Immersion Vaccines: Technological Evolution, Strategies for Overcoming Mucosal Barriers, and Future Prospects. *Aquaculture International*, **34**, Article No. 62. <https://doi.org/10.1007/s10499-026-02471-9>
- [40] De Stefano, M., Barletta, G.D.G., Morgera, S., De Luca, Y., Belaeff, C., Power, K., *et al.* (2025) Probiotic Spore-Based Antigen Delivery: A Novel Oral Vaccine Strategy against *Vibrio* Infections in Aquaculture. *Microbial Cell Factories*, **24**, Article No. 96. <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02725-w>
- [41] 李营. 线纹海马(*Hippocampus erectus*)肠道微生物与其疾病关系的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2019.
- [42] Huang, W., Xiao, W., Qin, G., Lu, Z., Peng, X., Liu, Y., *et al.* (2024) The Antibacterial Defence Role of B-Defensin in the Seahorse Testis. *Fish & Shellfish Immunology*, **155**, Article 110022. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.110022>
- [43] Ko, J., Wan, Q., Bathige, S.D.N.K. and Lee, J. (2016) Molecular Characterization, Transcriptional Profiling, and Antibacterial Potential of G-Type Lysozyme from Seahorse (*Hippocampus abdominalis*). *Fish & Shellfish Immunology*, **58**, 622-630. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.10.014>
- [44] 杜为宇, 刘云凤, 丛玉婷, 等. 益生菌在水产养殖中的应用与研究进展[J]. 河北渔业, 2026(3): 1-5.
- [45] 唐曼玉, 王晚晴, 强敬雯, 等. 益生菌与肠道菌群、免疫调节的相互作用与机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 486-493.
- [46] 蔡怡山, 张东, 刘鑫, 等. 不同配比复合益生菌对灰海马幼苗存活, 生长及免疫的影响[J]. 海洋渔业, 2020, 42(3): 365-374.
- [47] Lin, T., Liu, X., Xiao, D., Zhang, D., Cai, Y. and Zhu, X. (2019) *Lactobacillus* spp. as Probiotics for Prevention and Treatment of Enteritis in the Lined Seahorse (*Hippocampus erectus*) Juveniles. *Aquaculture*, **503**, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.083>