

doi: 10.3969/j.issn.1673-2227.2010.05.012

· 综述 ·

虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况

彭聪聪^{1,2}, 李卓佳¹, 曹煜成¹, 刘孝竹¹, 胡晓娟^{1,3}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学, 上海 201306;
3. 暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632)

摘要: 在对虾养殖过程中, 虾池中的浮游微藻群落结构和对虾的健康养殖有着密切关系, 一些有益微藻能调节水体溶氧量 (DO) 和酸碱度 (pH), 吸收氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 和亚硝氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$) 等有害物质, 有效地调控养殖环境。但一些能分泌毒素的微藻也会给对虾的健康生长带来危害。数量和生物量占微藻总量比例均较高的浮游微藻优势种对整个虾池微藻群落结构的稳定起着重要作用, 主导着微藻群落的功能发挥。不同养殖模式、养殖季节、养殖地域以及养殖阶段虾池中浮游微藻的优势种类分布、多样性等群落特征有差异。浮游微藻群落中优势种的变动规律和虾池中各种环境因子的动态密切相关, 环境因子的变动会影响浮游微藻群落结构的变动。文章综述了对虾养殖生产实践中浮游微藻群落结构和生态调控特征的研究概况, 并对在养殖中构建优良微藻藻相的方法进行了探讨。

关键词: 浮游微藻; 群落结构; 对虾养殖; 生态调控

中图分类号: S 917.3; S 968.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2227-(2010)05-0074-07

A review of water environment regulation by planktonic microalgae in shrimp ponds

PENG Congcong^{1,2}, LI Zhuojia¹, CAO Yucheng¹, LIU Xiaozhu¹, HU Xiaojuan^{1,3}

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The community structure of planktonic microalgae in shrimp ponds is closely related to the health of shrimp. Some beneficial planktonic microalgae can not only regulate DO and water pH but also assimilate the harmful substances such as $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$, effectively improving the culture environment. However, some can also produce toxins that harm the shrimp's health. The dominant species of planktonic microalgae which have high proportion in quantity and biomass play an important role in maintaining the stability of community structure of planktonic microalgae in shrimp ponds and in affecting the functions of planktonic microalgae communities. Moreover, the distribution and diversity of microalga dominant species have some differences among different regions, culture seasons,

收稿日期: 2010-05-04; **修回日期:** 2010-05-29

资助项目: 现代农业 (虾) 产业技术体系建设专项资金 (NYCYTX-46); 国家科技支撑计划项目 (2006BAD09A07, 2007BAD29B06); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (中国水产科学研究院南海水产研究所) 资助项目 (2007ZD01, 2008YD01, 2010YD05) 国家自然科学基金 (30800851); 公益性行业 (农业) 科研专项 (nyhyzx07-042, 200803012); 广东省科技计划项目 (2009B020201001); 广东省海洋渔业科技推广专项 (A200899A06); 广东省科技计划国家重大科技项目匹配资助项目 (粤科函财字 [2009] 627 号); 广东省鱼病防治专项 (2130108)

作者简介: 彭聪聪 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事养殖生态环境调控工作。E-mail: congcong430@163.com

通讯作者: 李卓佳, E-mail: zhuojiali609@163.com

modes and stages in shrimp ponds. The changing rule of dominant planktonic microalgae species is closely related to the changes of various environmental factors in shrimp ponds which may affect the community structure of planktonic microalgae. The paper reviews the characteristics of community structure and ecological management of planktonic microalgae in shrimp ponds, and discusses how to provide a good microalgae-phase for shrimp culture.

Key words: planktonic microalgae; community structure; shrimp culture; ecological management

养殖水环境的优化是对虾健康生长的前提保证,浮游微藻是养殖水体中的重要组成部分,其群落结构与养殖池塘水体质量、对虾的健康养殖有着密切关系^[1-2],因此,利用微藻的生态调控功能来改善养殖水环境成为目前研究的热点之一。许多学者对不同养殖模式、养殖季节、养殖地域等虾池浮游微藻的群落分布情况做了调查,并对在养殖实践中与对虾健康关联较大的、易形成优势种群的微藻进行了生态位研究,这些研究对建立以优良微藻为基础的生态调控技术奠定了基础。文章从虾池浮游微藻群落结构变动规律及养殖环境因子影响等多个方面,探讨在养殖中构建优良微藻藻相的方法,以期结合养殖生产实践,构建以浮游微藻为核心的藻相调控技术,为提高对虾的养殖效益和减小养殖风险等提供参考。

1 浮游微藻在对虾养殖水体中的作用

在养殖水生态环境中,浮游微藻扮演着初级生产者的角色,是水生态系统中能量供应和物质循环的重要一环,对构建稳健平衡的生态系统起着重要的作用。它可以通过光合作用向系统中源源不断地输送有机物,同时增强水中溶氧量(DO),为虾池中对虾和浮游生物的生长提供氧气,还可加速水体中还原性有害物质的氧化,优化水质。此外,浮游微藻的种群分布还对虾池的水色有着重要的影响,一般认为水色是水产养殖中水体环境质量的外观表现,不同的水色往往能反映出不同的水质营养状况,而微藻的细胞形状、大小、适应性分布和体色均是影响水色的重要内容,如绿藻繁殖较多时水色呈鲜绿色,硅藻大量繁殖时水色呈黄褐色,甲藻大量繁殖时水色呈酱油色,蓝藻大量繁殖时在水面上会浮有一层翠绿色的浮膜,水体透明度低,特别是在下风处表现尤为明显^[3]。

在养殖初期,微型浮游微藻可作为对虾的天然活饵料,故虾池藻相结构可能会影响对虾的成活率和健康状况^[4-6]。同时浮游微藻在维持养殖中、后期环境的稳定与优化方面更起着重要作用。因为随着中、后期投饵量的加大和虾类排泄物的逐渐积累,水体的有机质等逐渐丰富,微藻可吸收水体中各种营养盐,有效预防水体富营养化趋势的发生,减少水中氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)等有害物质。有研究认为绿藻类和硅藻类具有吸收有害物质、保持水质“活、爽”的功能,是可用来构建优良藻相的备选种类^[7]。例如,将绿藻类的波吉卵囊藻(*Oocystis borgei*)和微绿球藻(*Nannochloris oculata*)进行固定化处理后用以养殖生态

优化,对酸碱度(pH)提高有一定作用,水体中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 因被有效吸收而减少,且在一定程度上还促进了对虾免疫酶活性,增强了对虾的抗病力^[8-9]。而不良的微藻大量繁殖会给对虾的健康生长带来胁迫,许多研究表明赤潮和水华类微藻的种类和数量与对虾发病程度有正相关性^[7,10-11]。如赤潮类的甲藻种类,蓝藻类的微囊藻属(*Microcystis*)、鱼腥藻属(*Anabaena*)和颤藻属(*Oscillatoria*)种类等,其分泌的毒素可能会给对虾的健康生长带来危害^[12-13]。

2 虾池中浮游微藻的变动特点

2.1 不同养殖模式的浮游微藻

目前对虾养殖模式较多,按谢立民等^[14]的研究分类,有传统的潮位差纳排水模式,高位池动力提水模式,半封闭淡水添加模式,全封闭生态养殖模式,循环水养殖模式和混养模式等,以上模式所用的池塘类型若按虾池位置及进排水方式,主要又可以分为集约化养殖池和半集约化养殖池2种。集约化养殖池多建于开放性海区,取水便捷,虾池四周砌混凝土或铺设地膜护坡,放养密度大,配套设施完善,具有高效、稳产的特点。而半集约化养殖池多建于河口或近岸的低盐度洼地,排水不变,多为传统土塘,放养密度小,配套设施低。

海水养殖的虾池浮游微藻主要以海生硅藻类为主,盐度对微藻的群落结构影响明显,如张汉华等^[10]对海水集约化高位精养虾池浮游微藻种类的调查显示,调查期间盐度12.28~29.60,养殖前期浮游微藻优势种主要有伏氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)、菱形海线藻(*Thalassionema anitzschoides*)、日本星杆藻(*Asterionella japonica*)、中肋骨条藻(*Skeletonema acostatum*)和洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)等,到了中、后期,随着氮(N)、磷(P)营养盐的丰富,一些耐污性较强的绿藻类等也出现在优势种之列,如绿球藻(*Chlorococcus* sp.)、栅列藻(*Scenedesmus* sp.)、实球藻(*Pandorina* sp.)、直板藻(*Penium* sp.)和盘星藻(*Pediastrum* sp.)。但由于养殖海水盐度仍较高,优势种依然包括许多硅藻类,如中肋骨条藻和柱状小环藻(*Cyclotella stlorum*)等。另外,虾池的养殖海水一般来自于外海,经过滤等处理后引入,但由于虾池具有不同于外海的特殊生态环境,如水体营养丰富、人为干扰性强等特征,所以与外海微藻群落结构相比,虾池的微藻密度一般大于外海,但微藻种类较外海少。

对对虾低盐度集约化养殖池浮游微藻群落结构的研究显示, 虾池微藻的组成中, 绿藻类较为常见, 但蓝藻类常在种类数量上占较大的比例, 且优势种也多为蓝藻类, 如颤藻、假鱼腥藻 (*Pseudanabaena*)、螺旋藻 (*Spirulina*) 和微囊藻属等, 养殖后期优势种的优势度尤其突出, 多样性较低, 两者呈负相关性^[4, 15-16]。后期水体的富营养化是颤藻等蓝藻类大量发生、形成高密度的主要原因, 蓝藻的大量繁殖有可能抑制硅藻和绿藻类等的生长, 且不易调控。一些蓝藻优势种之间也存在相互共存或抑制的关系, 微藻群落的演替有时具有突发性、时间短和速度快等特点。申玉春等^[17]在研究集约化养殖池浮游微藻的演替时指出, 浮游微藻的演替速度快说明虾池浮游微藻群落不稳定, 有可能和水体盐度等理化因子的变化造成水体环境不稳定有关。

对集约化虾池和半集约化养殖土池之间浮游微藻群落结构组成所做的比较研究发现, 半集约化虾池养殖后期的微藻多样性指数一般要高于集约化虾池, 而优势度却相反, 两者具有显著负相关^[15]。由于营养盐对微藻种类的形成有着重要的影响, 半集约化虾池对虾放养密度较低, 投饵较集约化池少, 水体营养盐等理化因子一般低于集约化池, 这可能是造成虾池微藻的密度和优势度等不同于集约化虾池的主要原因。此外, 养殖土池的环境和管理状况一般也较集约化池出现更多复杂因素, 如土池岸边和池底会生有茂密的挺水或沉水植物, 还可能存在着数量丰富的能摄食微藻的底栖螺类等, 池塘清淤的底泥留在岸边也可能被雨水重新冲刷入池, 增氧机的管理和药剂的投放是否科学等, 这些都会直接或间接影响土池环境因子和微藻种类分布的变动。而集约化虾池出现的微藻高优势度特征表明在池塘营养逐渐丰富的条件下, 喜肥耐污的种类如蓝藻类容易滋生。

2.2 不同养殖季节的浮游微藻

浮游微藻普遍具有明显的季节更替现象, 不同的浮游微藻对温度和光照的需求不同, 夏季水温高、光照强、日照时间长、水体 pH 高, 这些气候因素很适合一些喜高温的蓝藻生长, 所以浮游微藻种群中蓝藻类比较常见。而在冬季, 气候环境与夏季相反, 浮游微藻种群常由隐藻、甲藻、小型绿藻、金藻、某些裸藻和硅藻等组成^[18]。而某些广温性微藻在不同的季节都有出现。

对广东省湛江市东海岛的对虾集约化养殖池春、秋季浮游微藻的调查研究显示, 春季检出微藻 28 种, 秋季 21 种, 优势种均较突出, 春季的优势种有旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、窄面角毛藻 (*C. paradoxus*) 和日本角毛藻 (*C. inpponica*), 秋季的优势种有蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*)、波吉卵囊藻、细弱海链藻 (*Thalassiosira subtilis*) 和条纹小环藻 (*Cyclotella striata*)^[19]。而 2 季均出现的优势种有嗜蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*)、颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*)、细小平裂

藻 (*Merismopedia tenuissima*) 和微绿球藻等, 多为绿藻类和蓝藻类, 说明这些微藻具有适应不同季节的广生态位特征。刘孝竹等^[16]对秋、冬季集约化虾池的研究显示, 在养殖中后期蓝藻类大量发生形成优势种, 水体营养盐和盐度等对微藻结构的影响比较大。

另外, 在南方沿海地区夏、秋季经常会出现台风和强降雨等恶劣天气, 降雨会对气温、虾池水温、pH 和 DO 等产生重要影响, 虾池的微藻结构可能也会随之出现变动。查广才和周昌清^[20]报道过在养殖中出现的台风和大雨等恶劣天气对养殖水体环境有显著的影响, 会造成水体不稳定, 对浮游微藻的生长影响明显, 例如在晴好天气, 浮游藻类的种类和密度增加, 而长期阴雨或强降雨, 浮游藻类的种类和密度会显著降低。可见恶劣天气等的干扰也是影响浮游微藻群落结构的重要因素, 需加强对这方面的关注和深入研究, 找出应对措施, 规避养殖风险。

2.3 不同养殖地域的浮游微藻

中国南方气候温暖, 在广东、广西和海南等地区都有大面积养殖凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 或斑节对虾 (*Penaeus monodon*) 等喜温性的虾类。此外, 福建、浙江沿海, 辽宁和山东环渤海湾区域以及青岛地区附近等也大力发展海水、咸淡水等对虾养殖。

黄翔鹤和王庆恒^[21]对湛江和海南高位池浮游微藻的研究结果表明, 在此区域的高位池养殖中后期微藻优势种具有突出性和单一性特征, 主要以喜肥或耐污的绿藻和蓝藻类为主, 并且注意到微藻优势种的变动对水环境的调控有重要影响, 由优良的微藻控制的池塘水质稳定, 养殖良好。

吴斌和廖思明^[22]对广西北海凡纳滨对虾养殖池塘的微藻研究发现, 池水的盐度与微藻的种类关系密切, 绿藻和硅藻类在盐度较高 (盐度密度大于 1.01) 的池塘常形成优势种, 而在盐度较低 (盐度密度小于 1.01) 的池塘中占优势地位往往是颤藻和裸藻类, 提出控制池塘水体盐度是调控藻相的重要因素。

李雪松等^[23]对福建泉州湾虾池浮游微藻的调查显示, 虾池盐度在 16~20, 优势种群以喜高盐的硅藻为主, 在绝对优势种没有出现前, 营养盐含量和微藻的密度呈负相关关系。在硅藻类成为优势种后, 水体硅酸盐的水平成为限制硅藻发展的重要因子。到养殖后期, 检出有许多赤潮性的能分泌毒素的甲藻类, 经调查发现虾池在纳潮换水过程中水源受到自身高强度排污废水的污染, 导致出现养殖水体富营养化现象, 从而使虾池赤潮类微藻爆发, 给对虾的健康养殖带来很大的负面影响。可见, 在养殖实践中针对虾池排泄废水的管理已显得相当重要, 若在养殖过程中造成回流污染会显著改变虾池微藻的群落结构和时空分布, 进而有可能威胁对虾的健康生长。

曾建刚和蒋霞敏^[24]对浙江上虞地区凡纳滨对虾池微藻的动态变化进行了分析, 认为水质的逐渐富营养化引起蓝

藻类的微囊藻大量繁殖, 最终导致水质恶化。且在富营养化基础上形成的过高生物量和数量特征的微藻不利于虾池水环境的优化, 提出调控虾池微藻密度的建议。

杨秀兰等^[25]的研究认为浮游生物在黄河三角洲盐碱地封闭式低盐度池对虾养殖成功中发挥着关键作用, 特别是微藻中一些喜 N 的蓝藻、绿藻和裸藻类, 在大量繁殖的同时对外源性有机质(如残饵和虾排泄物)分解形成的丰富营养盐、总氮等进行利用和转化, 促进了池塘营养链的优化, 有效地维持了高密度对虾的正常生长和封闭式虾池水质的自我调节。

在对莱州湾鱼、虾混养净水围隔中浮游微藻的调查发现, N 和 P 营养盐是浮游微藻的限制因子, N/P 的变化能显著影响微藻结构的变动^[26]。矫晓阳^[27]调查了渤海营城子湾沿岸虾池的微藻, 共检测出微藻有硅藻、甲藻、蓝藻、绿藻、金藻和裸藻类等, 种类在 94 种以上, 其中硅藻达 59 种。虾池与海湾沿岸的浮藻群落物种以及多样性之间存在一些差异, 有些微藻存在于虾池而不见于海湾沿岸水体, 而有些微藻却只见于沿岸水体, 反映了虾池与沿岸生态环境之间的差异, 以及不同微藻对生存环境的要求有所不同。

综上所述, 不同地域之间虾池浮游微藻的分布有一些共性特征, 如随着养殖的进行, 喜肥或耐污性的微藻多会在养殖中逐渐形成优势, 但也会由于地域环境、物候变化、养殖模式和管理模式等不同造成虾池微藻分布有差异, 即便是在同一地域, 不同位置或不同池塘的微藻分布也会由于环境、人为干扰等造成的微藻生态位需求差别而具有不同的特征。

2.4 不同养殖阶段的浮游微藻

虾池不同养殖阶段浮游微藻的群落结构与养殖水体营养盐、盐度等各种理化因子的变化有密切关系。在养殖初期营养盐含量较低, 一般可通过添加一些含有 N 和 P 等营养盐的单胞藻类生长素等来肥水培藻, 以优化健康的微藻藻相, 防止不良微藻在早期滋生而给幼虾生长带来胁迫。对水源的引入进行管理以防引入的外海水源中含有不良微藻等。查广才等^[4]和刘孝竹等^[16]针对低盐度集约化虾池的微藻群落结构研究显示, 在养殖前期微藻的种类主要是绿藻类和硅藻类, 某些种类能较好地适应低营养盐。随着养殖的延续水体有机质等营养的积累、水体中悬浮颗粒物增多和透明度下降, 开始出现中度富营养状况, 一些喜肥耐污的微藻种类, 如颤藻类等, 在养殖中期开始大量繁殖, 常成为优势种或常见种, 且优势度随着后期富营养化程度的升高而增高, 特别是在养殖后期, 优势种容易向单一方向发展, 微藻多样性降低, 最后可能爆发水华或赤潮, 直接给对虾养殖带来严重危害。有研究显示颤藻类水华等还极易引发“倒藻”, 导致大量羟胺、硫化物的释放, 有毒气体的产生, 造成对虾因应激致病而死亡^[28]。因此, 在养殖中期构建优良微藻藻相结构具有重要的意义, 可尝试通过引

入经培育的多种优良微藻等方法, 在中期构建出稳定、优良的藻相, 以期在养殖中后期有效地抑制蓝藻类等不良微藻的繁殖, 增强微藻的多样性。同时, 优良微藻还可通过吸收过剩营养盐等有效地减轻富营养化的趋势, 以保持养殖环境的稳定。

3 浮游微藻与理化因子的关系

浮游微藻优势种群变动还会受到虾池各种理化因子的影响, 探讨理化因子和浮游微藻之间的关系有助于寻找有效解决优化微藻藻相问题的方法, 因此以下就虾池中几种重要的理化因子进行阐述。

温度是影响微藻分布的重要因子, 这主要与不同微藻的最适温度有关。对于大多数微藻来说, 最适温度在 18 ~ 25 °C^[29], 但不同浮游微藻的最适温度不同, 如波吉卵囊藻的最适生长温度是 25 ~ 30 °C, 多在秋季出现^[19]。在粤西海域中, 角毛藻、诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskioldi*)和微小斜纹藻等(*Pleurosigma minutum*)多出现于春季(水温为 23 ~ 24 °C), 波吉卵囊藻、细小平裂藻和蛋白核小球藻等多出现在秋季(水温为 29 ~ 31 °C)^[30]。

光照是影响浮游微藻生长的重要因子。一般而言, 微藻光合作用会随光照强度的变化而变化, 在低光照下, 光合作用速率与光强呈正比, 但当达到饱和光强后, 光合作用速率保持平稳, 如果光照再强, 微藻就会产生光抑制现象, 其光合作用会下降或停止^[29]。不同的微藻对光照的适应强度有所不同, 一般甲藻比硅藻更适应较高的光强, 硅藻又强于绿藻, 而蓝藻较能适应低光强, SCHEFFER 和 RINALDI^[31]报道颤藻在高光强下其光合作用会受到抑制。

盐度是影响水生生物原生质渗透压的一个重要因素, 它对虾池微藻群落结构的分布也具有重要的影响。硅藻类一般较其他种类微藻更适应较高盐度的环境。对某些微藻的比较研究表明, 嗜蚀隐藻表现出广温广盐性质, 具有较宽的生态位幅度, 而蛋白核小球藻喜高温的环境, 并且对盐度的适应性范围也窄于嗜蚀隐藻^[32]。谢立民等^[14]的研究也认为水体中盐度是影响微藻群落组成的主要因素, 在盐度较低的虾池中, 蓝藻会占优势, 当盐度介于 10 ~ 30 时, 舟形藻和桥湾藻类等硅藻会形成优势。

pH 的变化是水中理化因子和生物活动的综合结果。水中浮游微藻进行光合作用, 吸收二氧化碳(CO₂), 放出氧(O₂), 会使 pH 上升。在一定条件下, pH 升高也会使含 N 和 P 等离子部分减少, 微藻一般喜好接近中性而非碱性的 pH 条件^[33]。偏碱性的水体适合于蓝藻的大量繁殖与生长而抑制了绿藻等的生长, 但通常情况下当环境 pH 大于 8.5 ~ 9.0 时, 对浮游微藻的生长是有害的^[34]。

NH₄-N 由非离子氨(NH₃-N)和离子铵(NH₄⁺-N)组成, 其中对虾类有毒性的是 NH₃-N, 当水中 NH₃-N 平均质量浓度达到 0.45 mg·L⁻¹时, 虾的生长速度减慢 50%^[35]。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 的质量浓度一般随着浮游微藻密度的增高而降低。一些微藻具有较强的吸收 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 等除污功能, 如已在工业除污中使用的螺旋藻 (*Spirulina*)、蛋白核小球藻等^[36]。由 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等组成的无机氮 (DIN) 可增加池水的营养, 使微藻大量吸收而迅速生长。而微藻死亡后有机体分解又产生 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等, 所以在养殖水体中 DIN 含量的变动也影响着浮游微藻的种类和生物量等的变化。

浮游微藻的数量、分布及季节变化与水体中可被直接利用的营养盐含量及变化情况密切相关, 如 DIN、无机磷 (DIP) 的含量。营养盐是构成虾池初级生产力的限制因素。不同微藻对营养盐的需求不同, 如微绿球藻在 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 为 $28.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{PO}_4\text{-P})$ 为 $2.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 生长效果较好^[37], 这说明微藻间可能存在竞争或共存的关系, 同时也是维持水体中微藻生物多样性的基础。孙耀等^[38] 研究结果显示, 一些海洋浮游微藻对 DIN 和 DIP 的最适质量浓度下限分别为 79.9 和 $18.0 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。所以, 有必要根据虾池的水质情况和浮游微藻对营养盐等因子的需求进行系统的调查与分析, 为合理构建、优化养殖水体的藻相结构提供适宜的营养参数和生态参数。而针对养殖后期蓝藻经常容易大量繁殖的现象, 有学者认为低 N/P 有利于蓝藻进行固氮作用, 高 N/P 则有利于绿藻繁殖, 由此提出引入某些对蓝藻有拮抗作用的优良藻类进行选择性施肥以控制蓝藻生长^[39]。而对集约化虾池后期出现的高优势度颤藻类和各种环境因子做的多元分析研究显示, 颤藻密度和水中有机质 (COD) 指标呈正相关关系, 即虾池中丰富的有机质为颤藻类提供了优势的生长环境^[40]。通过施用芽孢杆菌 (*Bacillus* sp.) 和光合细菌 (Photosynthetic bacteria) 等有益微生物制剂, 可有效分解和利用有机质^[41-42]。因此, 针对养殖后期常出现与不良微藻大量繁殖相关性很强的有机质丰富的现象, 可探讨在虾池投放微生物制剂的方法降解虾池有机质, 以期能有效地抑制不良微藻的快速繁殖。

由此可见, 浮游微藻的种类分布、数量变动等和虾池中各种环境因子的动态是密切相关的, 环境因子的变动有可能会改变浮游微藻的群落结构。可通过生物统计学等方法深入地研究对微藻影响的关键环境因子, 然后再尝试通过对环境因子的调控来有效改良微藻群落结构、优化微藻藻相, 这将会是一个重要的探索方向。另外, 浮游动物的摄食压力也会影响虾池浮游微藻的密度和种群结构变化, 这也是值得研究的新亮点。

4 浮游微藻与水质调控

对虾的养殖实践证明微藻藻相的变动会影响水环境的稳定和对虾健康的生长, 进而影响养殖效益。其中池塘微藻优势种群的变动不容忽视, 优势种群主导着微藻生态功能的发挥。尝试通过人工干扰的手段在虾池中构建以优良微藻优势种为基础的稳定的藻相结构, 将有益于改善养殖

环境。目前, 一般认为在对虾养殖生产中通常以绿藻类和硅藻类为优势种的池塘为好, 其水质稳定, 水色优良, 病害少, 对虾生长亦较好, 其中裸藻类也能有效构建池塘良好水色, 但其藻相易受环境影响出现不稳定的现象^[7]。而以蓝藻为优势的水体中, 或在甲藻经常出现的环境中, 对虾一般生长缓慢而且容易引发病害。因此认为, 在养殖过程中以培养绿藻类和硅藻类为主的健康水系较好。

绿藻类的许多微藻具有耐污、耐盐等宽生态位的性质, 可用于养殖中、后期逐渐富营养化的水体环境, 形成的藻相也相对稳定, 容易保持池水的“活、爽”, 并且微藻种类数丰富, 对于微藻多样性的增强也有益处。一般认为, 养殖水体中生物多样性较低, 微藻种类单一, 优势度过高, 不利于养殖水体生态系统的稳定, 也不利于加强对虾抵抗胁迫因子的力度。因为提高微藻生物多样性可有效增强虾池生态系统的信息含量, 维持微藻藻相的动态平衡, 有效地应对各种干扰给环境带来的扰动。若微藻种类过于单一, 即使是易保持养殖水体“活、爽”的绿藻类, 当数量达到一定的阈值, 也可形成绿藻水华, 严重破坏水环境生态系统, 导致对虾应激死亡^[16]。有研究认为过低的多样性指数容易导致对虾不同程度地出现病害和死亡症状^[5,11]。因此, 有必要结合微藻的生态位、密度和物种多样性指数等因子的变化, 及其对虾池水质环境的影响等进行系统的研究与分析, 科学筛选出生产性能良好、环境兼容性强的优良藻株, 如一些已在试验和生产中常用到的波吉卵囊藻、微绿球藻、蛋白核小球藻、新月菱形藻 (*Nitzschia closteriu*) 和嗜蚀隐藻等^[8,43-44]。对微藻进行合理配比后再寻求稳定地扩大培养, 检验于养殖实践, 以达到利用优良藻相优化对虾养殖环境的目的, 进而建立以微藻生物技术为核心的池塘藻相调控技术。

5 浮游微藻与对虾养殖

实践已证明虾池微藻藻相结构的分布和变动与对虾健康养殖有密切关系, 在养殖生产中, 如中、后期的高位池, 经常会出现蓝藻类的快速繁殖, 可分泌毒素的颤藻或微囊藻类往往可形成高密度的水华, 显然会增加养殖风险, 是造成对虾应激性发病或死亡的重要原因。一些微藻水华如颤藻水华还可能会因为天气变化或养殖环境变化等因素引发“倒藻”现象的发生, 释放有毒物, 进一步给养殖带来较大危害。因此, 如何控制不良微藻特别是有害藻类的过度繁殖而形成优势是养殖实践中比较突出的问题之一。利用生态位调控来改变适宜不良微藻生长的环境, 利用种间竞争的关系培养优良微藻来抑制有害微藻的大量滋生, 目的都是为了建立适宜对虾生长的健康生态环境, 降低虾类生长胁迫和养殖风险。利用优良微藻来优化养殖环境, 培育良好水色, 保持虾池生态系统的有益平衡和抗干扰能力, 维持稳定、健康的水质环境, 有益于对虾的健康养殖。

6 展望

通过调查掌握养殖池塘浮游微藻种群分布的特征, 了解对微藻群落结构影响较大的环境因子, 建立通过对关键环境因子的调控来优化微藻藻相的技术模型, 对保证对虾的健康生长和养殖效益有重要的实践和科学意义。在面对养殖后期阶段颤藻类等有害微藻容易形成较高优势度且难调控的情况时, 可考虑从营养调控的角度探索在养殖前期和中期培育较高优势度的绿藻类或硅藻类等优良微藻, 并保持优良藻相的延续以达到抑制蓝藻类繁殖的目的, 但这首先需要在弄清各种微藻个体培养营养参数和生态参数的基础上, 筛选出多株生产性能良好和环境兼容性强的优良微藻, 再通过技术手段去构建优良藻相。此外, 从微生物调控的角度来影响微藻结构也是一个重要的研究方向, 利用微生物分解虾池中对蓝藻类等生长有积极影响的丰富有机质或通过微生物的自身分泌物对不同的微藻起着促进或抑制的影响^[45]。从建立优良藻相和利用微生态制剂等多方面出发, 探讨保持对虾养殖环境稳定和健康的养殖技术, 以期实现对虾的高效、健康养殖。

参考文献:

- [1] 曲克明, 李勃生. 对虾养殖生态环境的研究现状和展望 [J]. 海洋水产研究, 2000, 21 (3): 67-71.
- [2] FEUGA A M. The role of microalgae in aquaculture: situation and trends [J]. J Appl Phycol, 2000, 12 (3/5): 527-534.
- [3] 毕永红, 胡征宇. 水色及其与藻类的关系 [J]. 环境科学, 2005, 24 (1): 66-68.
- [4] 查广才, 麦雄伟, 周昌清, 等. 凡纳滨对虾低盐度养殖池浮游藻类群落研究 [J]. 海洋水产研究, 2006, 27 (1): 1-7.
- [5] 郭皓, 于占国. 虾池浮游植物群落特征及其与虾病的关系 [J]. 海洋科学, 1996 (1): 39-45.
- [6] 米振琴, 谢俊, 潘德博, 等. 精养虾池浮游植物, 理化因子与虾病的关系 [J]. 上海水产大学学报, 1999, 8 (4): 304-308.
- [7] 曹煜成, 李卓佳, 杨莺莺, 等. 浮游微藻生态调控技术在对虾养殖应用中的研究进展 [J]. 南方水产, 2007, 3 (4): 70-73.
- [8] 黄翔鹤, 李长玲, 郑莲, 等. 固定化微藻对改善养殖水质和增强对虾抗病力的研究 [J]. 海洋学报, 2005, 24 (2): 57-62.
- [9] 李卓佳, 郭志勋, 张汉华, 等. 斑节对虾养殖池塘藻-菌关系初探 [J]. 中国水产科学, 2003, 10 (3): 262-264.
- [10] 张汉华, 李卓佳, 郭志勋, 等. 有益微生物对海水养殖池浮游生物生态特征的影响研究 [J]. 南方水产, 2005, 1 (2): 7-14.
- [11] 查广才, 周昌清, 黄建容, 等. 凡纳对虾淡化养殖池微型浮游生物群落及多样性 [J]. 生态学报, 2004, 24 (8): 1752-1759.
- [12] 吴玉霖, 周成旭. 甲藻赤潮的海洋危害及其防治 [J]. 海洋环境科学, 1997, 16 (4): 59-63.
- [13] CARMICHAEL W W. Hemagglutination method for detection of freshwater cyanobacteria (bluegreen algae) toxins [J]. Appl Environ Microbiol, 1981, 41 (6): 1383-1388.
- [14] 谢立民, 林小涛, 许忠能, 等. 不同类型虾池的理化因子及浮游植物群落的调查 [J]. 生态科学, 2003, 22 (1): 34-47.
- [15] 张才学, 劳赞, 廖玉莲, 等. 凡纳滨对虾常见养殖模式下养殖后期浮游植物及理化因子的变化 [J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27 (4): 38-44.
- [16] 刘孝竹, 李卓佳, 曹煜成, 等. 低盐度养殖池塘常见浮游微藻的种类组成, 数量及优势种群变动 [J]. 南方水产, 2009, 5 (1): 9-16.
- [17] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 南美白对虾高位池浮游生物和初级生产力的研究 [J]. 水利渔业, 2004, 24 (3): 7-10.
- [18] 麦雄伟. 南美白对虾温棚化养殖水体生态特征研究 [D]. 广州: 中山大学, 2003.
- [19] 梁伟峰, 李卓佳, 陈素文, 等. 对虾养殖池塘微藻群落结构的调查与分析 [J]. 南方水产, 2007, 3 (5): 33-07.
- [20] 查广才, 周昌清. 恶劣天气对凡纳滨对虾低盐度养殖水体的影响 [J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2006, 19 (4): 414-418.
- [21] 黄翔鹤, 王庆恒. 对虾高位池优势浮游植物种群与成因研究 [J]. 热带海洋学报, 2002, 21 (4): 36-44.
- [22] 吴斌, 廖思明. 广西北海凡纳滨对虾养殖池塘中微型藻类组成调查 [J]. 广西科学, 2008, 15 (4): 452-455.
- [23] 李雪松, 梁君容, 陈长平, 等. 泉州湾虾池浮游种类多样性研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45 (增刊): 234-239.
- [24] 曾建刚, 蒋霞敏. 对虾养殖塘浮游植物的动态变化 [J]. 海洋湖沼通报, 2010 (1): 71-81.
- [25] 杨秀兰, 王爱敏, 薄学峰, 等. 浮游生物在盐碱地封闭式对虾养殖中的生态作用 [J]. 齐鲁渔业, 2002, 19 (10): 5-8.
- [26] 卢敬让, 李德尚, 杨红生, 等. 莱州湾虾池养殖罗非鱼的静水围隔生态系统浮游植物的初步研究 [J]. 中国水产科学, 1996, 3 (1): 57-62.
- [27] 矫晓阳. 东小磨虾池及其沿岸浮游植物群落物种多样性 [J]. 生物多样性, 1996, 4 (1): 7-13.
- [28] CREMEN M C, MARTINEZ-GOSS M R. Phytoplankton bloom in commercial shrimp ponds using green-water technology [J]. Aquac Res, 2007, 19 (6): 615-624.
- [29] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物检测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 72-88.
- [30] 蔡文贵, 李纯厚, 林钦, 等. 粤西海域饵料生物水平及多样性研究 [J]. 中国水产科学, 2004, 11 (5): 40-447.
- [31] SCHEFFER M, RINALDI S. On the dominance of filamentous cya-

- nobacteria in shallow, turbid lakes [J]. *Ecol*, 1997, 78 (1): 272 - 282.
- [32] 李卓佳, 梁伟峰, 陈素文, 等. 虾池常见微藻的光照强度, 温度和盐度适应性 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27 (3): 397 - 400.
- [33] 李飞, 邢丽贞, 闫春玲, 等. 环境因素对微藻去除氮磷的影响 [J]. *山东建筑工程学院学报*, 2006, 21 (3): 268 - 272.
- [34] BRUCE E R, PERRY L. *Environmental biotechnology: principles and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 412 - 413.
- [35] 张乃禹. 对虾池中氨氮的成因及防治 [J]. *海洋科学*, 1986 (1): 65.
- [36] 王桂芹, 黄权, 张东鸣, 等. 可利用微藻及其应用研究现状 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 2 (6): 529 - 533.
- [37] 黄翔鸽, 李长玲, 刘楚吾, 等. 微绿球藻对氮和磷营养盐需求的研究 [J]. *海洋科学*, 2002, 25 (8): 13 - 17.
- [38] 孙耀, 李峰, 李健, 等. 虾塘水体浮游植物群落特征及其与营养状况的关系 [J]. *海洋水产研究*, 1998, 19 (2): 45 - 51.
- [39] 胡川, 康升云. 蓝藻发生与控制方法初探 [J]. *江西水产科技*, 2001 (4): 35 - 37.
- [40] 刘孝竹. 凡纳滨对虾高位池养殖后期浮游微藻优势种群变动及其与环境因子的关系 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2009.
- [41] 李卓佳, 张庆. 有益微生物在虾池中的作用 [J]. *中国水产*, 1997 (6): 30 - 31.
- [42] 郑爱榕. 光合细菌及其在对虾养殖中的应用 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2000, 39 (增刊): 64 - 68.
- [43] 梁伟峰, 陈素文, 李卓佳, 等. 虾池常见微藻种群温度, 盐度和氮, 磷含量生态位 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (1): 223 - 227.
- [44] 李奕雯. 虾池常见三种微藻营养生态学研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2009.
- [45] 王少沛, 曹煜成, 李卓佳, 等. 水生环境中细菌与微藻的相互关系及其实际应用 [J]. *南方水产*, 2008, 4 (1): 76 - 80.