

养殖水体中微囊藻毒素的产生及危害研究进展

张玟萱^{1,2} 虞功亮² 许叶伟^{1,2} 柏静^{1,2} 乔之怡¹

1. 天津农学院水产学院; 2. 中国科学院水生生物研究所

DOI: 10.12238/ems.v6i4.7336

[摘要] 池塘养殖和工厂集约化养殖生产中,藻类饵料培育是养殖培水技术中十分重要的技术环节。然而传统的藻类饵料培育主要是依靠经验进行判断,因此,培育过程中,往往出现藻类生物量不足或过量的情形,甚至出现大量非定向培养的藻类。藻类是水生态系统中重要的初级生产者,能量流动的关键环节,但一些藻类产生的藻毒素对水生生物及其水环境产生了严重影响。和产生蓝藻水华的湖泊相比,养殖水体中的藻毒素污染却并未得到重视。本文以藻毒素中最常见、影响最大的微囊藻毒素(MCs)为主线,对养殖水体中MCs的来源、类型、浓度以及危害进行了综述,并比较了养殖水体中MCs与自然水体中MCs的含量差异,认为养殖水体的MCs浓度差异与养殖活动密切相关,不同的养殖对象及规模,对水体中藻类组成及藻毒素起到了筛选作用。

[关键词] 微囊藻毒素; 蓝藻水华; 富营养化; 养殖水体; 研究进展;

Research progress on the production and harm of microcystins in aquaculture water bodies

Zhang Wenxuan^{1,2} Yu Gongliang² Xu Yewei^{1,2} Bai Jing^{1,2} Qiao Zhiyi¹

1. College of Aquaculture, Tianjin Agricultural University;

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences

[Abstract] In pond aquaculture and factory intensive aquaculture production, algae feed cultivation is a very important technical link in aquaculture and water cultivation technology. However, traditional algae feed cultivation mainly relies on experience for judgment. Therefore, during the cultivation process, there are often situations where the biomass of algae is insufficient or excessive, and even a large number of non directional cultured algae may appear. Algae are important primary producers in aquatic ecosystems and play a crucial role in energy flow. However, some algal toxins produced by algae have serious impacts on aquatic organisms and their aquatic environment. Compared with lakes that produce blue-green algae blooms, the pollution of algal toxins in aquaculture water has not been given enough attention. This article focuses on the most common and influential microcystins (MCs) in algal toxins, and reviews the sources, types, concentrations, and hazards of MCs in aquaculture water. The differences in MCs content between aquaculture water and natural water are compared, and it is believed that the differences in MCs concentration in aquaculture water are closely related to aquaculture activities. Different aquaculture objects and scales play a screening role in the composition of algae and algal toxins in water.

[Key words] Microcystin, blue-green algae blooms, eutrophication, aquaculture water bodies, research progress;

藻类是水生态系统中重要的初级生产者和能量流动的关键类群,某些藻类产生的藻毒素常常会对水生生物及其水环境产生严重影响。相比于产生蓝藻水华的湖泊,养殖水体中的藻毒素污染目前研究偏少。微囊藻毒素(MCs)是最常见、

分布最广、影响最大的藻毒素。MCs是肝毒素,是一类基因簇编码的多酶复合体催化合成的环状七肽化合物。目前已发现200多种MCs同分异构体^[1]。MCs具有肝肾细胞毒性、生殖毒性、心脏毒性和免疫系统毒性,会引起细胞凋亡和机体免

疫系统功能紊乱^[2]。本文以 MCs 为主线, 对养殖水体中 MCs 的来源、类型、浓度以及危害进行综述, 为以后的养殖水体出现富营养化以及蓝藻水华暴发提供一定的参考价值。

1、MCs的来源及污染状况

1.1 自然水体 MCs 含量及其分布

藻类生物量和 MCs 的种类是影响水体中 MCs 含量的两个重要因素。水体中的有 200 多种 MCs 异构体, 以 MC-LR、MC-RR 和 MC-YR 的分布最为普遍, 其中 MC-LR 因具有疏水性基团所以毒性最强, 而 MC-RR 具有亲水性基团毒性最弱^[15]。这些不同异构体的平均含量趋势表现为 MC-LR>MC-YR>MC-RR^[16]。在太湖、巢湖、滇池洱海等富营养化湖泊中均检测到了 MC-LR, 其含量可高达 $12\sim 50\mu\text{g/L}$ ^[13]。通常, 水体中不同藻类的生物量也会影响其 MCs 含量, MCs 的含量一般随着藻类生物量的增加而增加的, 而这可能与藻类的藻毒素合成与代谢有关。

1.2 水产养殖中 MCs 的来源、分布及种类

传统养殖方式通过人为控制环境条件、投放无疫病苗种和投喂全价饲料, 促进水产生物生长和发育, 实现无公害和绿色生产。但这种方式导致养殖水难及时排放, 引发环境污染和蓝藻水华等问题。

MCs 的产生与养殖水体的营养状况密切相关。蓝藻因其极强的适应机制和快速的繁衍速度, 极易成为养殖水体中的优势种。所以养殖水体中藻密度越高, MCs 浓度相对来说就越高。此外, 在养殖水体中, 藻类种群种类及生物量也是影响 MCs 产生的重要因素^[21]。此外, 当水体中存在一定数量的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 时, 养殖水体中也会产生更多的 MCs^[22]。根据养殖水体中 MCs 的来源不同, 可将其分为 3 种类型: 一是天然产生型; 二是生物积累型; 三是化学合成型^[23]。

水产养殖水体中 MCs 的污染状况可以从 MCs 含量和种类两个方面来考察, MCs 含量与养殖水体的营养状况有关^[8]。研究表明, 随着养殖水体中藻类生物量的增加, MCs 含量也随之增加, 其浓度范围在 $0.005\sim 1\mu\text{g/L}$ 之间。微囊藻毒素在我国养殖水体中的分布特征是南多北少, 局部地区甚至已出现高污染水平^[9]。除了水体中的 MCs 含量外, 养殖鱼类对其富集作用也不容忽视。研究表明, 在温度为 $(33\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、pH 值为 $7.5\sim 8.5$ 时, 鲫鱼摄食微囊藻后可在 24h 内累积高达 $50\mu\text{g/kg}$ 体重的微囊藻毒素^[10]。MCs 还存在于鱼体组织中, 这可能是由于鱼类肠道菌群通过将水体中的有机氮转化为甲烷、氨或乙酸等微生物降解产物来影响微囊藻毒素的水平^[11]。短期内高剂量 (以每公斤体重计) 饲喂含有 $50\mu\text{g/kg}$ MCs 的鲫鱼可导致肝胰腺病变; 研究表明, 草鱼在摄入 $50\mu\text{g/kg}$ MCs 后 3~4 天可出现中毒症状, 而草鱼摄食 $100\mu\text{g/kg}$ MCs 时死亡

^[12]。

2、MCs对养殖水生生物的危害

浮游动物广泛接触水华藻类, MCs 危害其生长繁殖, 严重时致种群消亡, 加剧种间竞争, 破坏食物链和水生态平衡。贝类生物虽耐毒性强, 但繁殖期与水华暴发期重合, 易受损, 如田螺出现肝胰腺组织损伤。对鱼类而言, MCs 影响其生长, 导致器官病理学影响, 早期发育受损表现为器官水肿、头部缩小等^[19]。MCs 作为新型环境污染物质, 通过食物链在水体积累。养殖水体中, 其毒性主要影响鱼类, 与水产养殖的集约化和规模化有关。低浓度 MCs 促进水生生物生长与存活, 但高浓度则增加毒性。MCs 一定程度上保护养殖生物免受环境变化影响, 但其毒性效应仍存在不确定性。光照条件影响 MCs 释放, 未来需深入研究其毒性效应和存在状态^[17-19]。同时, MCs 作为环境风险物质, 通过食物链对水生生物产生长期影响。养殖水体中常发现 MCs, 尤其在天然淡水水域浓度较高。在养殖池塘中, 水华蓝藻释放的 MCs 作为水产动物饵料, 因其在体内蓄积而对水产动物产生毒性。投喂含 MCs 饲料易导致水体富营养化和蓝藻水华。MCs 对不同水生生物毒性各异, 如引起鲤鱼肝肾损伤甚至死亡。MCs 在海水与淡水中的含量差异导致其毒性反应原因尚不明。

3、养殖水体理化环境因子对MCs产生的影响

水体理化因子如 pH 变化对 MCs 产生、积累均有影响。不同的养殖水体中, 水温、pH 值等对 MCs 的产生有显著影响。水温升高, MCs 含量也升高; pH 值越低, MCs 含量越高。氨氮浓度高是引起 MCs 在养殖水体中积累的主要原因, 会引起藻类爆发。

水体温度与 MCs 的产生有密切联系。不同种类的藻类在不同温度条件下, 对其反应程度不同, 如蓝藻喜高温, 蓝藻形成水华时, 一般出现在 $5\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间。由于水体中的水温、pH 等条件变化都会对 MCs 产生有影响, 所以当水温超过某一临界值时, 会引起藻类爆发。在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 条件下, MCs 浓度有所升高; 但当水体水温超过 12°C 时, MCs 浓度反而有所下降。

4、MCs的生物降解途径

藻类的生物降解是指藻细胞通过自身的代谢途径将 MCs 从藻类中降解并排出。目前研究表明, MCs 的生物降解途径主要包括以下 3 个方面: (1) 直接被藻细胞内的酶催化水解为毒性较小的 MCs; (2) 通过脱毒作用和再循环途径降解为无毒的 MCs; (3) 由环境中的微生物群进行代谢转化为无毒且易于降解的产物。其中, 脱毒机制和再循环途径是最主要、最常用的途径。

4.1 脱毒机制

关于 MCs 的脱毒机制, 目前尚未完全阐明, 不同藻种对

MCs 代谢路径上产生差异, 例如蓝藻细胞中只有 MC-LR 被认为是活性最强和最主要的脱毒基因, 而绿藻中则产生更多不参与生物降解的毒素基因。这可能与不同藻细胞系统以及不同环境条件下产生酶系和基因表达差异有关。

4.2 再循环途径

MCs 在水体中的浓度随着光照强度和温度等条件变化, 当浓度达到一定程度时, 藻细胞就会被消耗。同时, 研究表明 MCs 在藻类中分布具有明显的时空异质性。在阳光充足、氧气充足的环境中, MCs 的浓度较高; 在光照不足、缺氧等环境中, MCs 则不容易被藻细胞内酶系统降解。因此, 光照、氧气充足的环境产生的 MCs 更容易被藻细胞内降解酶降解。藻类生长过程也可以看成是一种自养生物降解过程。水面是藻类生长和繁殖的重要场所之一。达到一定程度时, 藻类会受到光照、温度等条件变化而死亡或增殖。藻细胞内的酶系统会根据环境变化来调控自身代谢活动和生长状态。MCs 的降解又被称为自养生物降解过程。

5、展望

养殖水体富营养化是导致 MCs 污染的主要原因之一。池塘养殖是淡水养殖产业的主要形式, 其健康发展对我国淡水养殖业具有重要意义。因此, 加强池塘养殖水体 MCs 污染治理尤为迫切。已有不少研究报道了 MCs 对水产动物的毒害作用, 但从现有文献来看, MCs 对不同养殖模式造成毒害机制尚不清楚。如何通过降低水体中 MCs 浓度来减少毒性效应是今后研究工作的重点, 为淡水养殖业健康发展提供理论依据。

【参考文献】

- [1]王铎, 陈龙飞, 陈广洲. 铜绿微囊藻和微囊藻毒素的去除研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51 (11): 3404-3408.
- [2]李娜, 陈文麟, 黄成, 等. 基于高效液相色谱法测定水中微囊藻毒素-LR 的研究[J]. 安徽农学通报, 2022, 28 (10): 139-140+149.
- [3]张盼伟, 郎杭, 丁相毅, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定水中 8 种微囊藻毒素[J]. 人民珠江, 2022, 43 (07): 131-136.
- [4]邹万生, 王智, 宋齐生, 等. 青鱼和鲇肠道排泄物对养殖水体铜绿微囊藻休眠体复苏的影响及作用途径[J]. 水产学报, 2021, 45 (04): 563-577.
- [5]舒秀波, 谢丽强, 万翔, 等. 太湖梅梁湾水体及沉积物中微囊藻毒素含量垂向分布特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (04): 976-987.
- [6]贾军梅, 罗维, 吕永龙. 太湖鲫鱼和鲤鱼体内微囊藻毒素的累积及健康风险[J]. 环境化学, 2014, 33 (02): 186-193.

[7]杨静东, 胡梁斌, 周威, 等. 微囊藻毒素在鲇鱼体内生物富集及其体内的抗氧化反应[J]. 生态环境学报, 2009, 18 (06): 2044-2050.

[8]隗黎丽. 微囊藻毒素-LR 对草鱼肝脏超微结构的亚急性毒性影响[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31 (05): 812-817.

[9]Oberemm A, Fastner J, Steinberg C. Effects of MC-LR and cyanobacterial crude extracts on embryonic larval development of zebrafish[J]. Water Research, 1997, 31 (11): 2918-2921.

[10]魏代春. 太湖流域微囊藻毒素的时空分布及叶绿素 a 标准阈值研究[D]. 兰州交通大学, 2014.

[11]余丽, 朱广伟, 孔繁翔等. 巢湖微囊藻毒素异构体组成的时空分布特征及影响因子[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (03)

[12]邱雨, 马增岭, 张子怡等. 水生态系统中微囊藻毒素的分布及其生态毒理效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (01): 277-288.

[13]舒秀波, 谢丽强, 万翔等. 太湖梅梁湾水体及沉积物中微囊藻毒素含量垂向分布特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (04): 976-987.

[14]Kozłowski-Suzuki B, Ferrão-Filho S D A. Cyanotoxins: Bioaccumulation and Effects on Aquatic Animals[J]. Marine Drugs, 2011, 9 (12): 2729-2772.

[15]Jia J, Luo W, Lu Y, et al. Bioaccumulation of microcystins (MCs) in four fish species from Lake Taihu, China: Assessment of risks to humans[J]. Science of the Total Environment, 2014, 487224-232.

[16]Wu F, Kong H, Shang Y, et al. Histopathological alterations in triangle sail mussel (*Hyriopsis cumingii*) exposed to toxic cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) under hypoxia[J].

Aquaculture, 2016, 467182-189.

[17]Talamini L, Zanato N, Zapp E, et al. Direct Electrochemical Nano-immunosensor for Microcystin-LR in Seawater[J]. Electroanalysis, 2018, 30 (5).

[18]毛敬英, 陈志明, 莫招育, 等. 巢湖和太湖微囊藻毒素差异性研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36 (12): 21-26+30.

[19]邓永强, 黄小丽. 淡水养殖中微囊藻水华的控制研究[J]. 中国水产, 2005 (03): 72-74.

作者简介: 张玟萱 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 主要从事微囊藻类菌胞素氨基酸的研究;

通信作者: 乔之怡 (1977-), 女, 天津农学院副教授, 研究方向: 水生生物学研究。