

徐文杰, 韩士群, 周庆, 等. 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼抵抗藻毒素作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 417-422.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.023

饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼抵抗藻毒素作用的影响

徐文杰, 韩士群, 周庆, 巫佳杰, 陈婷

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要: 通过 40 d 的体表暴露试验, 研究了饲料中添加 α -硫辛酸、抗坏血酸(V_c) 对鲫鱼暴露于铜绿微囊藻污染水体的保护作用。试验期间水体中微囊藻毒素-LR(MC-LR) 质量浓度维持在 19.40 $\mu\text{g/L}$ 左右, 试验组饲料中 α -硫辛酸和 V_c 的添加量均为 600 mg/kg, 测定鲫鱼生长性能、MC-LR 解毒效果和肝脏抗氧化能力。结果表明, 与负对照组相比, 饲料中添加 α -硫辛酸组和 V_c 组鲫鱼增质量率显著提高 ($P < 0.05$), 分别提高了 4.91% 和 3.21%; 鲫鱼肌肉中 MC-LR 含量显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 40.72%、14.20%; 肝脏谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px) 活性、超氧化物歧化酶(SOD) 活性、总抗氧化能力(T-AOC) 显著提高 ($P < 0.05$), 分别提高了 79.35% 和 72.53%、79.35% 和 72.53%、34.93% 和 24.43%; 肝脏丙二醛(MDA) 含量显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 57.26% 和 48.86%。可见, 饲料中添加 α -硫辛酸、 V_c 能够显著提高鱼体的抗氧化能力, 减轻 MC-LR 对鱼体的氧化损伤, 进而减少 MC-LR 在鱼体内的积累, 减轻 MC-LR 对鲫鱼的毒害作用。

关键词: α -硫辛酸; 抗坏血酸; 微囊藻毒素; 鲫鱼; 抗氧化能力

中图分类号: S963.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0417-06

Effect of dietary antioxidant on microcystin-induced toxicosis in crucian

XU Wen-jie, HAN Shi-qun, ZHOU Qing, WU Jia-jie, CHEN Ting

(Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In this study, the effects of dietary α -lipoic acid and ascorbic acid (V_c) on microcystin-induced toxicosis in crucian were investigated by 40-day's exposure test. During the test, the mass concentration of microcystin-LR (MC-LR) in water was maintained at about 19.40 $\mu\text{g/L}$. The additions of α -lipoic acid and V_c in the experimental group were 600 mg/kg, and the growth performance, MC-LR detoxification and liver antioxidant capacity of the crucian were investigated. Compared with the negative control group, the weight gain rate increased by 4.91% and 3.21% in crucian fed with α -lipoic acid and ascorbic acid ($P < 0.05$), meanwhile, the MC-LR content in the muscle decreased by 40.72% and 14.20% ($P < 0.05$), respectively. Furthermore, activity of glutathione peroxidase (GSH-Px) increased by 79.35% and 72.53% ($P < 0.05$), the activity of superoxide dismutase (SOD) increased by 79.35% and 72.53% ($P < 0.05$), and the total antioxidant capacity (T-AOC) increased by 34.93% and 24.43% ($P < 0.05$), malondialdehyde (MDA) content decreased by 57.26% and 48.86% ($P < 0.05$) in crucian fed with α -lipoic acid and V_c . In conclusion, dietary α -lipoic acid and V_c can effectively

improve the antioxidant capacity of crucian, reduce the oxidative damage and the accumulation of MC-LR.

Key words: α -lipoic acid; ascorbic acid; microcystin; crucian; antioxidant capacity

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(18)2027]; 国家水专项课题(2017ZX07203001)

作者简介: 徐文杰(1991-), 女, 山东泰安人, 博士, 助理研究员, 主要从事富营养化水体生态修复研究。(E-mail) xuwenjieandbwb@163.com

通讯作者: 韩士群, (E-mail) shqunh@126.com

中国是世界渔业大国, 淡水养殖面积和产量位列世界第一。自 20 世纪 90 年代以来水产养殖业发

展迅速并呈现高密度、集约化、规模化的特点,形成了高生物负载量和高投入量的养殖模式,大量鱼类的排泄物和残留饵料在水体中分解产生大量的氮、磷营养元素,使得水体富营养化日益严重,水华频频暴发^[1-3]。水华藻类可合成多种有毒物质,最典型的是是一类具有生物活性的环状七肽,即微囊藻毒素(Microcystins, MC),微囊藻、项圈藻、念珠藻和颤藻等均可产生微囊藻毒素^[4]。微囊藻毒素有200多种结构类似物,其中微囊藻毒素-LR(Microcystin-LR, MC-LR)是最为常见且毒性最强的一种,其次为微囊藻毒素-RR(Microcystin-RR, MC-RR)和微囊藻毒素-YR(Microcystin-YR, MC-YR)。以往的研究结果表明MC可以积聚在蜗牛、虾以及淡水湖泊中鱼类等水生生物的组织中^[5-7]。MC能影响鱼类生长速度,导致鱼类腮、肝、肾、肠道、心脏等脏器发生病理学改变,影响鱼类行为并能诱发鱼体内相关解毒酶活性的改变^[8-9]。受MC污染鱼类可通过食物链对人体健康构成威胁。因此,有必要开展增强鱼体对抗微囊藻毒素毒害作用的研究。

有研究者指出,污染物胁迫下生物体活性氧的产生及导致的氧化损伤是污染物致毒的重要途径,MC可以诱导细胞内产生活性氧,导致细胞损伤和脂质过氧化,MC的肝脏毒性部分也是由于诱导活性氧的产生所致^[10-11]。 α -硫辛酸不仅能够清除氧自由基、螯合重金属离子,还具有修复氧化损伤的作用^[12]。 V_c 可以为超氧化物自由基和羟基等提供电子来终止自由基活性,从而减轻自由基对机体氧化损伤^[13]。目前,关于MC对鱼类的毒理以及抗氧化剂对鱼解毒的研究中采用的暴露途径主要为腹腔注射或灌喂,而对低浓度长期体表暴露的毒害作用及抗氧化剂的解毒作用研究比较少,体表暴露能更好地模拟真实水华水体中MC对鱼体的影响,目前有关 V_c 在缓解微囊藻毒素对鱼体毒害作用的研究尚无报道。本研究采用将鲫鱼暴露于铜绿微囊藻污染水体中的方式,研究饲料中添加 α -硫辛酸、 V_c 对鲫鱼生长、毒素在体内的积累以及肝脏抗氧化能力的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

产微囊藻毒素铜绿微囊藻(FACHB-912)购于中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库,采用

BG11培养基进行扩大培养。试验饲料原料为成品饲料,饲料原料经过40目筛粉碎,在基础饲料中分别添加 α -硫辛酸、 V_c 使其质量比均为600 mg/kg,混合均匀后用挤压机制成颗粒直径为2.0 mm的饲料,45℃烘干冷却后放入密封袋中于-15℃冰箱中保存待用。试验鱼为鲫鱼,运回实验室后用高锰酸钾溶液浸泡消毒10~15 min,暂养驯化14 d后,挑选体质健康、大小基本一致的试验鱼(平均质量460 g)用于后续试验。

1.2 试验方法

试验鱼随机分为4组(生长在无毒环境中投喂基础饲料的正对照组、生长在铜绿微囊藻污染水体中投喂基础饲料的负对照组、投喂含 α -硫辛酸饲料的试验组1、投喂含抗坏血酸饲料的试验组2),每组设3个重复,每个重复20尾鱼,随机放入周转箱中进行饲养试验,试验期40 d。暴露期间,向水体中加入培养至对数生长期的铜绿微囊藻培养液,每隔2 d换一半水,并补充铜绿微囊藻培养液至预设值。定期采水样检测水体中MC-LR质量浓度,试验期间MC-LR质量浓度基本维持在19.40 μ g/L左右,可认为暴露期内受试鲫鱼始终接触一个恒定的MC-LR暴露质量浓度。每天投饲2次(9:00和16:00),饲料投喂量为鱼体质量的4%,根据鱼体增长情况,在投喂率一定的基础上定期调整投喂量。试验期间水温约25℃,pH 7.5,氨态氮<0.02 mg/L。

试验期间,每隔5 d取水样测定水体中MC-LR质量浓度;每隔10 d从各周转箱分别随机取2尾鱼,称质量后在冰盘上解剖,取背部白肌于-20℃冰箱保存,测定肌肉中MC含量。试验结束后,另取6尾鱼于冰盘上解剖,取肝脏,-20℃保存,用于测定肝组织蛋白质含量、甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、超氧化物歧化酶(SOD)、总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA)含量。

1.3 测定方法

水体中MC-LR含量的测定:取水样,过0.45 μ m的滤膜,取适当体积的滤液注入SPE固相萃取装置中,使滤液流经预活化的C18固相萃取小柱进行富集、淋洗及洗脱。洗脱液经旋转蒸发后用20%的甲醇定容,用于高效液相色谱(HPLC)分析。色谱条件参照GB/T 20466-2006^[14]的方法。

鱼肌肉MC-LR含量的测定:取背部白肌,样品经冷冻干燥后研磨成粉末。肌肉样品MC-LR的提

取参照 GB5009.273-2016^[15] 进行,肌肉组织中 MC-LR 含量的测定采用 HPLC 方法。

肝脏抗氧化能力指标测定:取肝脏组织块(0.1~0.2 g)在冰冷的生理盐水中漂洗,除去血液,滤纸拭干,准确称质量,放入 5 ml 的匀浆管中。按重量(g):体积(ml)=1:9 的比例加入 9 倍体积的 0.86% 的生理盐水于匀浆管中,冰水浴条件下,剪碎组织块,于内切式组织匀浆机中制备成 10% 的组织匀浆备用。肝组织匀浆蛋白质含量、T-AOC、SOD 活性、GSH-Px 活性、MDA 含量的测定均采用相应的试剂盒,试剂盒购于南京建成生物工程研究所,具体操作流程按照说明书要求进行。

1.4 数据分析

采用 SPSS 24 软件进行统计分析,采用单因素方差分析比较处理间差异性。

2 结果

2.1 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼增质量率和存活率的影响

经过 40 d 试验,饲料中添加 α -硫辛酸、V_c 对鲫鱼生长及存活的影响如表 1 所示。从表 1 中可以看出,各组的存活率均为 100%,表明 MC-LR 暴露质量浓度为 19.40 $\mu\text{g/L}$ 时不能直接导致鲫鱼死亡。试验初期,各组鱼平均质量无显著差异,经过 40 d 的试验,负对照组、 α -硫辛酸组和 V_c 组鱼体平均质量 [分别为 (492.78 \pm 9.62) g、(516.33 \pm 10.33) g、(504.72 \pm 6.15) g] 和增质量率 (分别为 6.25% \pm 0.27%、11.16% \pm 0.49%、9.46% \pm 0.20%) 均低于正对照组 [(529.22 \pm 7.91) g、14.37% \pm 0.58%]。说明铜绿微囊藻所释放的 MC-LR 对鱼体有毒害作用,可抑制鱼类的生长。在饲料中添加 α -硫辛酸和 V_c 能够在一定程度上缓解 MC-LR 对鱼体的毒害作用,与负对照组相比,增质量率显著提高 ($P<0.05$),分别提高了 4.91% 和 3.21%。结果说明在饲料中添加一定量的 α -硫辛酸和 V_c 能够缓解 MC-LR 对鲫鱼生长的抑制作用。

2.2 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼肌肉中微囊藻毒素含量的影响

图 1 为暴露于 MC-LR 的各组鲫鱼肌肉组织中微囊藻毒素含量变化。正对照组鲫鱼肌肉组织中未检出 MC-LR。由图 1 可知,经过 40 d 的暴露,MC-LR 在鲫鱼体内出现了不同程度的积累。40 d 后,负

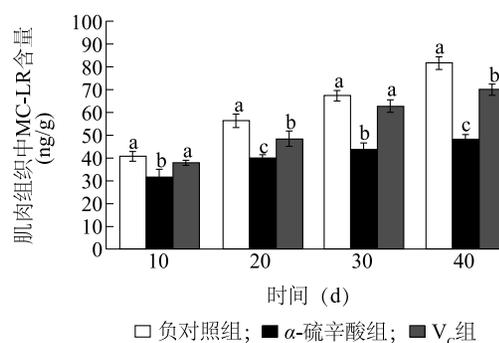
对照组、 α -硫辛酸组和 V_c 组鲫鱼肌肉中 MC-LR 含量分别为 (81.58 \pm 2.78) ng/g、(48.36 \pm 1.77) ng/g、(69.99 \pm 2.41) ng/g。在饲料中添加 α -硫辛酸和 V_c 能显著降低鱼肌肉中 MC-LR 的含量 ($P<0.05$),与负对照组相比分别降低了 40.72%、14.20%,其中 α -硫辛酸的效果优于 V_c。

表 1 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼生长及存活率的影响

Table 1 Effect of dietary antioxidants on the growth and survival rate of crucian

| 组别 | 试验开始时 平均质量 (g) | 试验结束时 平均质量 (g) | 增质量率 (%) | 存活率 (%) |
|------------------|--------------------|----------------------|-------------------|------------|
| 正对照组 | 462.72 \pm 6.36 | 529.22 \pm 7.91a | 14.37 \pm 0.58a | 100 |
| 负对照组 | 463.78 \pm 8.69 | 492.78 \pm 9.62c | 6.25 \pm 0.27b | 100 |
| α -硫辛酸组 | 465.50 \pm 11.02 | 516.33 \pm 10.33ab | 11.16 \pm 0.49c | 100 |
| V _c 组 | 461.11 \pm 4.91 | 504.72 \pm 6.15b | 9.46 \pm 0.20d | 100 |

同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。



不同小写字母表示同一时间不同饲料处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼肌肉组织中 MC-LR 含量的影响

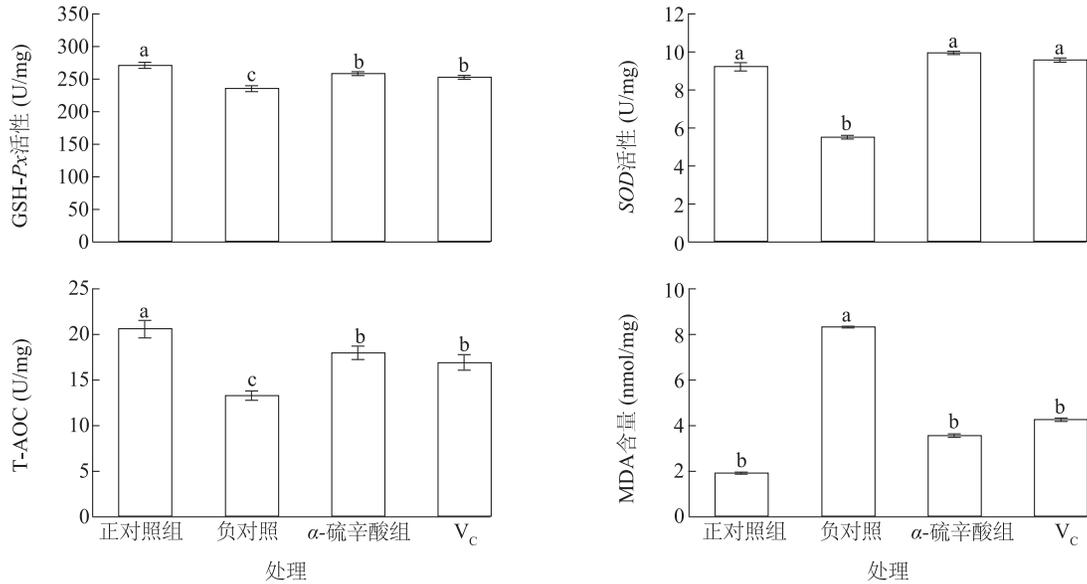
Fig.1 Effect of dietary antioxidants on MC-LR content in muscle of crucian

2.3 饲料中添加 α -硫辛酸、V_c 对鲫鱼抗氧化能力的影响

由图 2 可知,经过 40 d 的暴露试验,各处理组和负对照组鱼体肝脏中 GSH-Px 活性均显著低于正对照组 ($P<0.05$)。与负对照组相比,饲料中添加 α -硫辛酸和 V_c 后,鲫鱼肝脏 GSH-Px 活性均显著升高 ($P<0.05$),分别提高了 79.35% 和 72.53%, α -硫辛酸组和 V_c 组之间无显著差异 ($P=0.064$)。负对照组肝脏 SOD 活性显著低于正对照组 ($P<0.05$), α -硫辛酸组和 V_c 组肝脏 SOD 活性与负对照组相比显著提高 ($P<0.05$),分别提高了 79.35% 和 72.53%。各处理组和负对照组鱼体肝脏中 T-AOC

均显著低于正对照组 ($P < 0.05$)。与负对照组相比,饲料中添加 α -硫辛酸和 V_c 后,鲫鱼肝脏 T-AOC 均显著升高 ($P < 0.05$), 分别提高了 34.93% 和 24.43%, α -硫辛酸的总抗氧化能力与 V_c 组无显

著差异。处理组和负对照组肝脏 MDA 含量均显著高于正对照组 ($P < 0.05$), α -硫辛酸组、 V_c 组肝脏 MDA 含量显著低于负对照组 ($P < 0.05$), 分别比负对照组减少了 57.26% 和 48.86%。



不同小写字母表示不同饲料处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 饲料中添加抗氧化剂对鲫鱼肝脏 GSH-Px 活性、SOD 活性、T-AOC、MDA 含量的影响

Fig.2 Effect of dietary antioxidants on glutathione peroxidase (GSH-Px) activity, superoxide dismutase (SOD) activity, total antioxidant capacity (T-AOC), malondialdehyde (MDA) content in liver of crucian

3 讨论

生长性能是评价鱼类健康的一个重要指标,通常以增质量率来表示。本研究中,负对照组鲫鱼增质量率显著低于正对照组,说明长期暴露于铜绿微囊藻水体中鲫鱼生长受到显著抑制。类似的抑制作用在其他研究中也有报道。Dong 等^[16]发现用含蓝藻的饲料饲喂鲤鱼幼鱼和杂交鲟后,鱼的生长速率显著下降。暴露于 30 $\mu\text{g/g}$ MC-LR 10 d 后,鳙鱼幼鱼的生长受到明显抑制^[17]。以往的研究结果表明,饲料中添加抗氧化剂硫辛酸能显著提高奥尼罗非鱼生长性能和饲料利用率^[18];在饲料中添加适量的 V_c 对石斑鱼、泥鳅幼鱼生长有明显的促进作用^[19]。本研究发现,与负对照组相比,在饲料中添加一定量 α -硫辛酸和 V_c 能够显著提高鲫鱼的平均质量和增质量率,说明 α -硫辛酸和 V_c 能够缓解 MC-LR 对鱼体的毒害作用。

有关微囊藻毒素在鱼体内的累积有许多研究报道。Xie 等^[20]在巢湖鲤鱼的肌肉、肝脏和肠道中均

检出微囊藻毒素,其在肌肉中的含量达到 0.66 $\mu\text{g/g}$ 。姜锦林^[21]研究指出,暴露于低浓度 MC-LR 的鲤鱼肝脏和肌肉中均积累了一定的 MC-LR。本研究中,暴露于 MC-LR 水体中的鲫鱼肌肉中出现 MC-LR 累积,与其他研究结果相吻合。试验期间, α -硫辛酸组和 V_c 组鲫鱼肌肉中微囊藻毒素含量显著低于负对照,说明在饲料中添加 α -硫辛酸和 V_c 能够显著降低 MC-LR 在鲫鱼体内的积累。董桂芳等^[22]研究发现饲料中添加谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 能显著降低黄颡鱼肌肉和肝脏的 MC 含量,引起这一现象的原因可能是 GSH 被鱼组织吸收后与微囊藻毒素结合,更利于 GSH 和 MC 结合物的代谢和排出体外。张丽等^[23]的研究结果表明,添加 α -硫辛酸可降低罗非鱼体肝脏和肌肉中 MC 含量, α -硫辛酸能有效阻止 GSH 在解毒过程中被活性氧 (Reactive oxygen species, ROS) 氧化为 GSSG,并能持续提高 GSH 还原酶的活性,加速解毒过程的完成。

GSH-Px、SOD 是动物体内重要的抗氧化酶,在机体抗氧化应激中起重要作用。GSH-Px 可以使有

毒的过氧化物还原为无毒的羟基化合物,从而保护细胞膜的结构和功能不受过氧化物干扰及损害^[24]。*SOD*对机体的氧化与抗氧化平衡起着至关重要的作用,此酶能清除超氧阴离子自由基(O_2^-),保护细胞免受损伤^[25-27]。*SOD*活性的高低间接反映了机体清除氧自由基的能力。*MC*可以通过多种途径破坏体内自由基的平衡和抗氧化系统的功能,导致机体氧化损伤。这些自由基及其产物在细胞中最具破坏性的作用之一是膜脂的过氧化,*MDA*是膜脂过氧化的最终分解产物,其含量可以反映生物机体受到自由基攻击的程度,是细胞氧化损伤的敏感诊断指标^[28-30]。总抗氧化能力(*T-AOC*)用于衡量生物体抵抗外来刺激的代偿能力以及机体自由基代谢的状态,包括机体抗氧化酶系统和非酶促系统^[31]。*MC*暴露的主要毒性作用是氧化应激。*Zhang*等^[32]报道在12 h试验中注射3次150 g/kg *MC-LR*的鲫鱼肝脏*MDA*含量显著增加。许多研究结果表明使用不同类型的抗氧化剂,可以有效地提高生物的抗氧化能力,进而起到降低污染物毒性的作用。*Amado*等^[33]的研究结果表明, α -硫辛酸可以通过增加鲤鱼肝脏和大脑中谷胱甘肽*S*-转移酶(*GST*)活性或通过修复*GST*抑制刺激解毒,降低*MC*诱导的毒性。*类延菊*等^[34]的研究结果表明,饲料中添加硫辛酸显著提高了铜胁迫下皱纹盘鲍的肝脏*SOD*、*GSH-Px*活性及*GSH*含量,显著降低铜的沉积量,并在一定程度上减轻肝脏蛋白质、DNA损伤以及脂质过氧化。*朱选*等^[35]指出,饲料中添加*GSH*能够促进草鱼肝脏和肌肉中*GSH*的沉积,提高肝脏中*GSH-Px*和*SOD*活性与总抗氧化能力,减少肝脏中*MDA*含量,降低肝脏及血清中*ROS*含量。*彭士明*等^[36]的研究结果表明,增加*V_c*质量分数可显著提高银鲳组织中*SOD*活性及总抗氧化能力。本试验中,处理组和负对照组鱼体肝脏中*GSH-Px*活性、*SOD*活性、总抗氧化能力均显著低于正对照组,*MDA*含量均显著高于正对照组,说明鲫鱼暴露在*MC-LR*水体中会造成鱼体的氧化机能损伤;在饲料中添加 α -硫辛酸、*V_c*后鲫鱼肝脏*GSH-Px*、*SOD*活性及*T-AOC*均显著高于负对照组,*MDA*含量均显著低于负对照组,表明饲料中添加 α -硫辛酸、*V_c*能够有效提高鱼体的抗氧化能力,进而减少*MC-LR*在鱼体内的积累,减轻*MC-LR*对鲫鱼的毒害作用。

参考文献:

- [1] 孙志伟,邱丽华,曹煜成,等. 蓝藻水华对水产养殖业影响的研究进展[J]. 生态科学, 2017(1): 231-235.
- [2] 田娟,余博识,JAMES S D,等. 养殖水体中藻毒素污染问题的研究进展[J]. 水生态学杂志, 2009(5): 99-102.
- [3] 张新农,刘爱民,桑明远,等. 利用小球藻防控养殖水体蓝藻水华的初步研究[J]. 当代水产, 2014(3): 82-83.
- [4] CHEN L, CHEN J, ZHANG X, et al. A review of reproductive toxicity of microcystins[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 301: 381-399.
- [5] CHEN J, XIE P, ZHANG D, et al. In situ studies on the distribution patterns and dynamics of microcystins in a biomanipulation fish-bighead carp (*Aristichthys nobilis*) [J]. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 150-157.
- [6] 贾军梅,罗维,吕永龙. 微囊藻毒素在太湖白鲢体内的累积规律及其影响因素[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(2): 382-390.
- [7] MOHAMED Z A, CARMICHAEL W W, HUSSEIN A A. Estimation of microcystins in the freshwater fish *Oreochromis niloticus* in an Egyptian fish farm containing a *Microcystis* bloom[J]. Environmental Toxicology, 2003, 18(2): 137-141.
- [8] ZHANG D, XIE P, CHEN J, et al. Determination of microcystin-LR and its metabolites in snail (*Bellamya aeruginosa*), shrimp (*Macrobrachium nipponensis*) and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) from Lake Taihu, China [J]. Chemosphere, 2009, 76(7): 974-981.
- [9] GAN N, MI L, SUN X, et al. Sulforaphane protects Microcystin-LR-induced toxicity through activation of the Nrf2-mediated defensive response[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2010, 247(2): 129-137.
- [10] LIVINGSTONE D R. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(8): 656-666.
- [11] GAUDIN J, HUET S, JARRY G, et al. In vivo DNA damage induced by the cyanotoxin microcystin-LR: Comparison of intra-peritoneal and oral administrations by use of the comet assay [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2008, 652(1): 65-71.
- [12] MA H, JIN M, ZHU T, et al. Effect of dietary arachidonic acid levels on growth performance, fatty acid profiles and lipid metabolism of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Aquaculture, 2018, 486: 31-41.
- [13] 陈东星,王立改,楼宝,等. 饲料中维生素C添加量对黄姑鱼体组成成分和组织中抗氧化酶活力的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 472-477.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水体微囊藻毒素测定:GB/T 20466-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 水产品中微囊藻毒素的测定:GB5009.273-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社,

- 2016.
- [16] DONG G, ZHU X, HAN D, et al. Response and recovery of hybrid sturgeon from subchronic oral administration of cyanobacteria [J]. *Environmental Toxicology*, 2011, 26(2): 161-170.
- [17] SUN H, LÜ K, MINTER E J A, et al. Combined effects of ammonia and microcystin on survival, growth, antioxidant responses, and lipid peroxidation of bighead carp *Hypophthalmichthys nobilis* larvae[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 221/222:213-219.
- [18] 熊 达, 张小雪, 刘 学, 等. 茵三硫和硫辛酸对奥尼罗非鱼生长性能和抗氧化能力的影响[J]. *中国饲料*, 2012(23): 28-31.
- [19] 武 迪, 管婷婷, 张思雨, 等. 维生素 C 对泥鳅幼鱼生长和免疫的影响[J]. *水产科学*, 2016, 35(6): 658-662.
- [20] XIE L, XIE P, GUO L, et al. Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic Lake Chaohu, China[J]. *Environmental Toxicology*, 2005, 20(3): 293-300.
- [21] 姜锦林. 微囊藻毒素对典型水生生物的生态毒理效应及分子致毒机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [22] 董桂芳, 朱晓鸣, 杨云霞, 等. 黄颡鱼饲料中添加谷胱甘肽降低藻毒素毒性作用的研究[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(4): 722-730.
- [23] 张 丽, 许国焕, 熊 达, 等. 罗非鱼饲料添加 α -硫辛酸对藻毒素的解毒作用[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(3): 75-79.
- [24] 任胜杰, 郑曙明, 宋 艳, 等. 谷胱甘肽对异育银鲫生长及辛硫磷解毒的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 3009-3014.
- [25] 武晓会, 刘 洋, 狄治朝, 等. 低氧对斑马鱼细胞存活能力的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(8): 1641-1647.
- [26] 张春云, 曹丽萍, 杜金梁, 等. Nrf2 介导姜黄素对四氯化碳诱导鲫鱼肝损伤的保护作用[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 114-121.
- [27] 鲁耀鹏, 陈晓丹, 张秀霞, 等. 饵料锰含量对凡纳滨对虾亚成虾生长及抗氧化活力的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(2): 391-396.
- [28] PINHO G L L, MOURA DA ROSA C, MACIEL F E, et al. Antioxidant responses and oxidative stress after microcystin exposure in the hepatopancreas of an estuarine crab species[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 61(3): 353-360.
- [29] SAYEED I, PARVEZ S, PANDEY S, et al. Oxidative stress biomarkers of exposure to deltamethrin in freshwater fish, *Channa punctatus* Bloch [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, 56(2): 295-301.
- [30] 安贺麟, 范 泽, 王庆奎, 等. 豆粕替代鱼粉对点带石斑鱼生长、消化和抗氧化能力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(16): 128-132.
- [31] 计 勇, 陆光华. 污染水体的总抗氧化能力生物标志物研究[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(3): 395-399.
- [32] ZHANG X, XIE P, LI D, et al. Time-dependent oxidative stress responses of crucian carp (*Carassius auratus*) to intraperitoneal injection of extracted microcystins [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(5): 574-578.
- [33] AMADO L L, GARCIA M L, PEREIRA T C B, et al. Chemoprotection of lipoic acid against microcystin-induced toxicosis in common carp (*Cyprinus carpio*, *Cyprinidae*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2011, 154(3): 146-153.
- [34] 类延菊, 徐 玮, 张彦娇, 等. 水体铜胁迫条件下饲料中硫辛酸对皱纹盘鲍的保护作用[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(7): 39-45.
- [35] 朱 选, 曹俊明, 赵红霞, 等. 饲料中添加谷胱甘肽对草鱼组织中谷胱甘肽沉积和抗氧化能力的影响[J]. *中国水产科学*, 2008(1): 160-166.
- [36] 彭士明, 施兆鸿, 高权新, 等. 增加饲料中 V_c 质量分数对银鲟血清溶菌酶活性及组织抗氧化能力的影响[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(4): 16-21.

(责任编辑:张震林)