

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

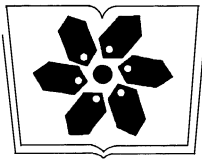
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	方舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张荣, 刘彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄林, 王峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于非, 王吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江鑫, 赛珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109061310

董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 韩冬, 杨云霞. 水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应. 生态学报, 2012, 32(19): 6233-6241.

Dong G F, Xie S Q, Zhu X M, Han D, Yang Y X. Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6233-6241.

水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应

董桂芳^{1,2}, 解绶启², 朱晓鸣^{2,*}, 韩冬², 杨云霞²

(1. 武汉工业学院 动物营养与饲料科学湖北省重点实验室, 武汉 430023;

2. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 水体富营养化导致蓝藻水华的发生已成为全球关注的水环境问题, 很多鱼类处于水生生态系统食物链的最高级, 蓝藻水华的主要次级代谢产物-微囊藻毒素可通过鱼类的摄食活动或生物富集作用在鱼体组织中累积, 并通过食物链危及人类健康。近年来, 微囊藻毒素对鱼类的毒性效应引起众多科学家的关注。在天然水体中不少鱼类可以主动摄食蓝藻, 所以, 水华蓝藻对鱼类来说既具有营养物作用、也具有潜在的毒性作用。鉴于目前机械收获的水华蓝藻生物量资源化利用问题以及水产饲料业亟需大力开发鱼粉替代蛋白源的需要, 从营养学和毒理学这两个角度来研究水华蓝藻对鱼类的营养作用和毒性效应具有较高的理论和现实意义。主要概述了蓝藻粉、蓝藻细胞对鱼类的营养学和毒理学效应, 以期拓展水华蓝藻对鱼类毒性效应的研究视野, 同时也为水华蓝藻的资源化利用提供新的思路。

关键词: 蓝藻粉; 蓝藻细胞; 微囊藻毒素; 营养毒理学; 鱼类

Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish

DONG Guifang^{1,2}, XIE Shouqi², ZHU Xiaoming^{2,*}, HAN Dong², YANG Yunxia²

1 Hubei Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

2 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: Proliferation of cyanobacteria is a global problem in eutrophic freshwater ecosystems, and the associated cyanotoxins are of growing concern with respect to human health and environmental problem. Most of the studies on microcystins (MCs) have only focused on terrestrial mammals, few have been conducted on the effects of MCs on fishes. Actually, many fishes are at the top of the trophic pyramids in aquatic ecosystems. MCs, which are the secondary metabolites of cyanobacteria, may accumulate in fish via feeding or bioaccumulation, and finally harm human health through the food chain. On the other hand, the harmful effects of MCs on fishes were mainly limited to acute toxic experiments based on oral gavaging, intraperitoneal injection, or administration via the dorsal aorta of the toxins, which can't reflect the uptake route under natural environments. In fish, cyanobacterial toxins may ingestion via different routes: direct feeding on toxic cyanobacterial cells, uptake of dissolved toxins via the gill epithelium, or exposure via the foodweb. More importantly, cyanobacteria are an important dietary component for many fishes. Therefore, cyanobacteria is a kind of nutrient. On the other hand, it also has potential poisonousness on fish. Fortunately, the nutri-toxicological effects of microcystins on fish have been recently drawn to scientists's much attention. In recent years, mass cyanobacterial blooms occurred frequently in many freshwater lakes in China, e. g., Lake Dianchi, Lake Taihu, Lake Caohu. In the project of the control of cyanobacteria in Chinese lakes, gathering the cyanobacteria using machine has been used in a large scale. Thus, it's a big

基金项目: “973”项目(2008CB418006); 水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07102-005, 2008ZX07105-006-03); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-46-19); 公益性行业(农业)科研专项(201003020); 公益性行业(农业)科研专项(201303053)

收稿日期: 2011-09-06; **修订日期:** 2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xmzhu@ihb.ac.cn

amount of biomass for the gathered cyanobacteria, and it's an important issue on the comprehensive utilization of the gathered cyanobacteria using machines. Protein is the most expensive component in fish feeds. Due to the scarcity and cost of fish meal in the world market, it is imperative to reduce feed cost by exploring cheaper alternative protein in aquaculture feeds. In addition, cyanobacteria have been reported to contain more than 50% crude protein. Based on cost effectiveness, availability, and crude protein content, cyanobacteria seem to have considerable potential in fish feeds. Considering their contributions to both the basic research and the practice, it is necessary to explore the nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish. In the context of researching alternative protein sources for aquatic animals, growth (weight gain or specific growth rate), feed utilization (feeding rate, feed conversion efficiency, apparent digestibility coefficients of dry, protein and energy), and nutrient retention (protein retention efficiency and energy retention efficiency) are the main parameters for evaluation. More importantly, dietary cyanobacteria may severely influence fish's health and food safety, which would emerge from toxicological indices, such as mortality, antioxidant responses, histological and cytopathology alterations, and accumulation of toxin in tissues. In the present paper, the nutri-toxicological effects of cyanobacterial meal or cyanobacterial cells on fish were summarized, and it focused on both nutritional and toxicological effects of cyanobacteria via oral administration on fish. The present review will help to gain a new insight in the toxic effects of cyanobacteria on fish and provide new solutions for comprehensive utilization of the cyanobacteria.

Key Words: cyanobacterial meal; cyanobacterial cells; microcystins; nutri-toxicology; fish

蓝藻水华的频繁发生已成为全球性的水环境问题。蓝藻水华在爆发生长过程中往往会产生内源性毒素,在已发现的各种蓝藻毒素中,微囊藻毒素(MCs)是发生频率最高、产量最大和造成危害最严重的一类^[1]。MCs是细胞内毒素,在细胞内合成,细胞破裂后释放出来并表现出毒性,MCs结构的变体多达80余种,目前最常见的是MC-LR、MC-RR和MC-YR(L、R、Y分别代表亮氨酸、精氨酸和酪氨酸)。MCs产生于水体,对鱼类等水生生物的影响才是最直接的,并且蓝藻是有些鱼类天然的饵料^[2-4]。因此,MCs对鱼类的生态毒理学效应引起众多科学家的关注和重视^[5]。Malbrouck和Kestemont^[5]指出MCs对鱼类的各个发育阶段均可产生有害的影响。但是,从现有的研究报道来看,多数研究者是将水华蓝藻作为天然水体中的一种毒物的角度来研究的,实际上,水华蓝藻对鱼类来说既具有营养物作用、也具有潜在的毒性作用,所以需要从营养学和毒理学这两个角度进行综合评价。

目前,多数水华蓝藻对鱼类影响的研究结果是通过采用腹腔注射、灌喂、浸泡纯毒素或是粗提物的方法而得到的^[6-8]。在天然水体中,鱼类暴露于水华蓝藻的方式有主动摄食、在鱼类呼吸时经鳃被带入口咽腔或是通过食物链而间接摄入了被MCs污染的其他浮游植物和动物等^[9]。然而,相对于急性暴露,在更接近自然状态下,长期口服摄入蓝藻粉或蓝藻细胞的室内模拟实验下,其对鱼类的营养毒理学效应的相关研究则相对较少。此外,目前我国对一些较大湖泊水华蓝藻的治理工作中,机械收获水华蓝藻是一项已经投入实施的方案。采用机械方法收获蓝藻,其巨大的蓝藻生物量如何进行处置和资源化利用,却是一个亟待解决的难题。有报道指出蓝藻干物质含有30%—50%的蛋白质^[10-12],另一方面,近年来,水产饲料业亟需降低对鱼粉的依赖,而寻找新型鱼粉替代蛋白源是其主要的解决方法之一^[13-14]。如果将这些收获的水华蓝藻制成蓝藻粉,或许可以作为渔用饲料蛋白源。

如上所述,深入研究水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应具有较高的理论与现实意义,本文结合本实验室近几年来在这方面开展的科研工作以及其他学者的相关研究工作,重点阐述蓝藻粉或蓝藻细胞对鱼类的营养毒理学效应,以期系统研究蓝藻粉作为渔用饲料蛋白源的潜在价值,为水华爆发水体中鱼类的食品安全问题提供有效的理论依据,也为解决当前我国水环境中面临的有害水华藻类的归属问题及渔用蛋白资源紧缺问题提供新的思路。

1 蓝藻粉对鱼类的营养学效应(蓝藻粉对鱼类摄食、生长和饲料利用的影响)

异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[15]、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[16]、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[17] 和杂交鲟 (*Acipenser gueldenstaedtii* × *A. baerii* Brandt)^[17] 分别饲喂含 0.23、1.25—4.44、95.82、24.09—44.04 μg MCs/g 干重 蓝藻粉饲料 9—12 周后,发现其摄食率均有所提高,但同时发现其饲料转化效率和表观消化率均有所下降^[15,17]。可见,饲料中加入一定量含低剂量 MCs 的蓝藻粉可提高鱼类的摄食率,可能是蓝藻粉中含有多糖等物质具有促摄食作用所致,也可能是鱼类在摄入蓝藻粉后其能量需求不足,从而通过提高摄食率补偿其摄食蓝藻粉饲料引起的较低饲料的转化率和消化率的一种策略。然而,随着蓝藻粉中 MCs 含量的升高,黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson)^[18]、杂交罗非鱼 (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)^[19] 和杂交鲟 (*Acipenser baeri* Brandt × *Acipenser gueldenstaedtii*)^[20] 的摄食率均呈现下降的趋势,而且摄食率的变化在各个实验的不同处理组 and 不同取样时间之间差异较大,黄颡鱼摄食低藻粉组 (32.3 μg MCs/g 干重) 饲料时,摄食率在整个暴露阶段 (1—60 d) 均显著下降,而高藻粉组 (71.96 μg MCs/g 干重) 的摄食率在第 1—30 天 暴露阶段显著下降,而在第 31—60 天显著升高。杂交罗非鱼摄食低藻粉组 (80.0 μg MCs/g 干重) 和高藻粉组 (410.0 μg MCs/g 干重) 的摄食率均显著高于无蓝藻粉的对照组^[18-20]。在杂交鲟 (Dong 等^[20]) 中,摄食低藻粉组 (26.60 μg MCs/g 干重) 实验鱼的摄食率与对照组无显著性差异,而摄食中 (78.82 μg MCs/g 干重) 和高藻粉组 (201.03 μg MCs/g 干重) 实验鱼的摄食率显著降低。可见,当饲料中蓝藻粉的添加量继续升高 (MCs 也随之升高) 时,在 MCs 的作用下,鱼类的摄食率可能会显著下降,且随着摄食时间的延长,鱼类可能会对饲料中的蓝藻粉产生一定程度的适应性耐受^[18]。

从现有研究报道来看,多数鱼类经直接暴露于 MCs 中或通过食物摄入蓝藻细胞或蓝藻粉可使生长减缓。褐鳟 (*Salmo trutta*) 直接暴露于 41—57 μg MC-LR/L 水体或裂解的蓝藻细胞 (41—68 μg MC-LR/L 水体),其生长均显著低于无 MCs 或蓝藻细胞的对照组^[21]。尽管在天然水体中,拟鲤 (*Rutilus rutilus*) 能以蓝藻作为食物,但是当摄食过量微囊藻时仍可降低其生长率^[22-23]。虹鳟、杂交鲟 (赵敏^[17])、团头鲂和草鱼分别摄入含 54.82—95.82、46.17—44.04、24.15—155.61 和 38.38—288.21 μg MCs/g 干重 蓝藻粉饲料 9—12 周后其特定生长率和饲料转化效率均显著降低^[16-17];同样,黄颡鱼、杂交罗非鱼和杂交鲟 (Dong 等^[20]) 在摄入较高 MCs 剂量 (26.6—410.0 μg MCs/g 干重) 的蓝藻粉饲料 47—60 d 后其特定生长率也显著低于无蓝藻粉的对照组。同时,杂交罗非鱼和杂交鲟的饲料转化效率、蛋白和能量贮积率和消化率均随着饲料中 MCs 含量的升高而显著降低。摄食低藻粉组 (低剂量 MCs) 黄颡鱼特定生长率在 MCs 暴露后期出现了明显的耐受,在杂交罗非鱼中,特定生长率不仅受饲料中 MCs 含量的影响,而且也受不同来源蓝藻粉的影响^[18-20]。Kamjunke 等^[22] 在对拟鲤 (*Rutilus rutilus*) 直接饲喂蓝藻细胞后发现拟鲤对蓝藻细胞的不完全消化是导致其生长下降的主要原因。可见,饲料中蓝藻粉 (含 MCs) 可能是通过降低鱼类的饲料转化效率、蛋白和能量贮积率和消化率,从而间接导致其生长下降。Zhao 等^[16] 发现长期饲喂蓝藻粉饲料的尼罗罗非鱼的特定生长率显著高于对照组,但是,其饲料转化效率未受到显著性影响。可能是尼罗罗非鱼饲料中低剂量的 MCs (1.25—5.46 μg MCs/g 干重) 引起了 Hormesis 现象 (Hormesis 是指低剂量毒素暴露对机体的刺激效应而高剂量毒素暴露对机体的抑制效应)。Calabrese 等^[24] 概述了毒理学中发现的低剂量的毒素可引起一系列的刺激反应,处理组的刺激反应往往比对照组高 40%—60%。在上述尼罗罗非鱼中,特定生长率的最大刺激值比对照高 15.8%,低于在其他毒素中报道的刺激反应的平均值。同时,饲料中加入一定量的蓝藻粉 (低剂量 MCs) 引起鱼类的摄食率的提高也可能部分归因于 MCs 在鱼类中引起的 Hormesis 现象。综合现有研究中有关摄入蓝藻粉或蓝藻细胞对不同鱼类的摄食、生长及饲料利用的影响可见,蓝藻粉或蓝藻细胞中 MCs 含量 (MCs 的暴露剂量) 是降低蓝藻粉或蓝藻细胞营养价值,影响其作为渔用饲料蛋白源的最主要因素,其次,鱼类自身的食性和其天然水体中生活环境也可影响蓝藻粉或蓝藻细胞作为鱼类食物的潜能。可见,如能降低蓝藻粉中 MCs 含量,将蓝藻粉作为渔用饲料蛋白源将具有很大的发展前景。

2 水华蓝藻对鱼类的毒性效应

2.1 水华蓝藻对鱼类死亡率的影响

目前,不同鱼类摄入蓝藻粉(含 MCs)或蓝藻细胞对其死亡率的影响存在较大的分歧。赵敏^[17]和 Zhao 等^[15-16]发现饲喂异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)含 39.12 μg MCs/g 干重 蓝藻粉饲料 12 周就出现了高达 57.5% 的死亡率,而团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)在摄入达到 155.61 μg MCs/g 干重 蓝藻粉饲料 12 周以上仍没有出现实验鱼的死亡;虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)和杂交鲟(*Acipenser baeri* Brandt ♀ × *Acipenser gueldenstaedtii* ♂)死亡率受影响的 MCs 摄入量分别为 95.82 和 24.09 μg MCs/g 干重,由此推断,异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)和杂交鲟死亡率受 MCs 影响较大,其次是虹鳟和尼罗罗非鱼,而其对团头鲂和草鱼的影响较小。但是,黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson)、杂交鲟(*Acipenser baeri* Brandt ♀ × *Acipenser gueldenstaedtii* ♂)和杂交罗非鱼(*Oreochromis niloticus* ♀ × *O. aureus* ♂)在分别饲喂高达 71.96、201.03 和 410.0 μg MCs/g 干重 蓝藻粉饲料 47—60 d 后均没有出现实验鱼的死亡^[18-20],同样, Li 等^[25]将鲤(*Cyprinus carpio*)暴露于含微囊藻浮沫的鱼缸 28 d 后,未观察到鲤的死亡。此外, Qiu 等^[26]对太湖 3 种不同食性的 4 种鱼类(鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*, Hm, 鳙 *Aristichthys nobilis*, An, 鲫 *Carassius auratus*, Ca 和鲮 *Culter ilishaeformis*, Ci)开展为期一年的野外围隔实验发现,肉食性鱼类对水华蓝藻最为敏感,其次是杂食性鱼类,并且整个实验期间各不同食性的鱼类均未出现显著的死亡率。Snyder 等^[27]认为鱼类对 MCs 的敏感性依赖于实验鱼种类,可能受鱼类在天然水体中生活环境的影响。Malbrouch 和 Kestemont^[5]认为鲤科鱼类生活的水体常常是富营养化的,很容易遇到 MCs,这些鱼类对 MCs 的耐受性会较高。而虹鳟等鱼类生活的水体是相对贫营养型的,则会对 MCs 比较敏感。上述报道中,异育银鲫是鲤科鱼类,和鲤的分类地位、生活习性都非常的相近,但是,它对微囊藻毒素的敏感性远高于草食性的草鱼和团头鲂,也高于肉食性的虹鳟和杂交鲟^[17]。可能不同的鱼类对微囊藻毒素的敏感性不同不能单独用天然条件的生活习性来判定^[17]。有些学者认为鲤科鱼类对微囊藻毒素较虹鳟这类鱼类更为敏感^[28]。他们认为微囊藻毒素对鲤科鱼类和虹鳟的致毒机理并不相同。微囊藻毒素对虹鳟的致毒机理是抑制蛋白磷酸酶 1 和 2A 从而导致肝细胞坏死,而其对鲤科鱼类的致毒机理主要是造成鲤科鱼类肝细胞出现程序性死亡(凋亡)。另外,鲤科鱼类的肠道较有胃的虹鳟长,能吸收更多的微囊藻毒素,因此,鲤科鱼类对微囊藻毒素更敏感。然而,同为鲤科鱼类的异育银鲫、团头鲂和草鱼,对微囊藻毒素的敏感性差异非常大。可能鱼类对有害蓝藻中 MCs 的敏感性受该种鱼类消化系统的结构、食性或分类地位以及天然水体的生活习性的共同作用。

2.2 水华蓝藻对鱼体组织抗氧化酶类的影响

许多外源性化学物质可通过产生大量活性氧从而对机体产生氧化损伤。同时,机体会激活自身的氧化防御系统以减少氧化胁迫对其造成的危害。抗氧化防御系统是动物体内重要的活性氧清除系统,主要包括抗氧化酶类以及小分子抗氧化剂。自 Mereish 和 Solow^[29]首先报道氧化损伤也可能是 MCs 所致肝细胞损伤的作用机制后,MCs 导致细胞的氧化损伤一直被学者所关注。MCs 能引起机体的氧化损伤,表现为活性氧(ROS)浓度和氧化损伤产物脂质过氧化物(LPO)的显著增加^[30-35]。用 MCs 处理原代培养肝细胞可使肝细胞内的 ROS 显著增加,进而大量消耗肝细胞内谷胱甘肽(GSH),从而发生脂质过氧化,引起肝实质细胞的氧化损伤,造成细胞膜脂质破坏,膜功能丧失,最终导致细胞崩解死亡^[36]。不少研究表明,鱼类在染毒后其抗氧化酶类的变化趋势主要受毒物浓度的影响,暴露于高剂量毒物会使机体的抗氧化酶遭到破坏而表现为其活力下降,抗氧化酶活性的降低可能是由于酶蛋白来不及再次合成,或者由于氧化损伤使酶蛋白失活^[37-38]。而低剂量的毒物则会使机体经过长时间的诱导产生防御反应,表现为酶活性的短期升高。但 Jos 等^[33]分别用拌有经破碎和未经破碎的微囊藻细胞的商品饲料饲喂罗非鱼(*Oreochromis* sp.), 21 d 后均发现其肝、肾和鳃中的 LPO 含量增加,抗氧化酶如,过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和谷胱甘肽还原酶(GR)活力呈现不同程度的升高。但尼罗罗非鱼在急性灌喂拌有微囊藻细胞的商品饲料 24 h 和 72 h 后,其肝脏、肾脏和鳃中抗氧化酶类(CAT、SOD、GPx 和 GR)均显著降低,且呈现明显的时间-效应关系^[35]。

这可能是由于 MCs 是细胞内毒素,不同实验中采用不同破碎程度的蓝藻细胞释放的 MCs 具有不同的毒性效力,因而鱼类摄入不同破碎程度的蓝藻细胞后其对自身抗氧化酶类产生了不同的生理效应。

2.3 水华蓝藻对鱼类组织的损伤作用

大量的研究表明,MCs 对鱼类的肝、肾、鳃、心脏和脑等组织均有明显的损伤作用^[6-8,39-41]。其中,肝脏为微囊藻毒素作用的主要靶器官^[42]。腹腔注射、灌喂和饲喂均可使鱼类肝细胞大量坏死,并引起死亡。肝脏组织学检查发现的病理变化主要有:肝小叶结构遭到破坏,其水肿和病灶区充血,坏死区域多围绕在肝小管周围;肝细胞固缩、呈空泡样变、细胞核破裂、胞质呈颗粒状;炎性细胞浸润,但以巨噬细胞和嗜中性粒细胞为主,病理变化呈时间-剂量依赖性提高^[39-41,43]。比较现有研究结果发现,MCs 经注射等急性毒性暴露方式对鱼类造成的组织病变程度远大于饲喂蓝藻粉或蓝藻细胞等慢性毒性暴露方式。如,Fournie 和 Courtney^[44]分别给海鲢 (*Arius felis* Linnaeus) 和大底鳉 (*Fundulus grandis*) 注射 45—300 mg MC-LR/kg,仅 6 h 后两种实验鱼均出现大面积的肝细胞坏死。而黄颡鱼在摄食 71.96 μg MCs/g 干重蓝藻粉饲料 60 d 后可观察到部分肝组织的血窦腔发生形变,呈狭长的纺锤形,同时发现大量的肝细胞呈极性分布,肝细胞围绕肝血窦腔形成一簇簇的花环状结构^[18]。可能是急性注射高剂量的 MCs 后,毒素在短期内吸收的效率更高,导致了细胞的迅速坏死^[7]。电镜下可观察到鱼类肝细胞内糖原减少,粗面内质网上附着的核糖体脱离、空泡化、涡旋、线粒体高度水肿,靠近细胞膜处有微丝聚集等^[7,40-41]。鲤灌喂铜绿微囊藻 (400 μg MC-LR/kg) 1 h 后,肾近端小管即出现损伤;随着 MCs 暴露时间的延长,肾近端小管上皮细胞空泡化、细胞核固缩、细胞凋亡,部分上皮细胞溶解、脱落到管腔内,最后在肾皮-髓质连接处出现蛋白质样脱落物^[28]。虹鳟经腹腔注射两种剂量的 MC-LR (400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 后均可观察到 MCs 对其造成肾毒性,并且高剂量组 (1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 的病变程度比低剂量组 (400 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 更严重^[43],可见,MCs 造成鱼类肾毒性的病理变化也呈时间-剂量依赖性升高。

3 微囊藻毒素在鱼体组织的积累和清除

摄入鱼体的 MCs 主要分布于肝脏,肠道和肾脏中,也可通过排泄物排出部分 MCs。Williams 等^[45]用同位素标记 MC-LR 的方法研究了 MC-LR 在鱼体内的分布情况,大西洋鲑 (*Salmo salar*) 经腹腔注射 [³H]-MC-LR (0.1 mg/100g) 2 h 后,肝脏、幽门盲囊和肠道均可检测到 MC-LR,5—22 h 后,MC-LR 主要蓄积于肝脏,肝脏中的最大剂量可达注射剂量的 50%,46 h 后,MC-LR 最终定位在肝脏和肾脏。鲑在摄入微囊藻细胞后,首先在消化道中检测到 MCs,接着可在肌肉、肝脏和排泄物中检测到微囊藻毒素^[46-47]。Ernst 等^[48]在水华爆发期间,对德国 Ammersee 湖中欧洲白鲑 (*Coregonus lavaretus* L.) 组织中的 MCs 检测发现,MCs 首先在消化道中出现,接着在肝脏、肌肉和排泄物中出现。

对于 MCs 在鱼体内的富集规律,目前野外实验与室内饲喂蓝藻粉或藻细胞实验结果相悖,对已有研究结果分析发现,MCs 在鱼体积累量受毒素的摄入方式和剂量,天然水体的生活习性、生活水体营养类型、鱼类的分类地位等多种因素的影响。Ibelings 等^[49]对荷兰 IJsselmeer 湖中的野外研究发现,自然水体中处在不同营养级的鱼类其肝脏和肌肉中富集的 MCs 含量是不同的,其规律是:肉食性鱼类>杂食性鱼类>浮游植食性鱼类>植食性鱼类。但赵敏^[17]和 Zhao 等^[15-16]分别通过 9—12 周的蓝藻粉饲料饲喂实验,系统研究 MCs 在不同食性鱼类(杂食性鱼类:异育银鲫和尼罗罗非鱼;肉食性鱼类:虹鳟和杂交鲟;草食性鱼类:团头鲂和草鱼)肝脏和肌肉中的积累规律,其研究结果发现,上述鱼类肝脏和肌肉中微囊藻毒素积累量的比值分别为 37.6、203.2、433.1、2.2、472.6 和 325;MCs 在肝脏中的积累率大小变化为:草鱼<团头鲂<杂交鲟<虹鳟<异育银鲫<尼罗罗非鱼。肌肉中的积累率大小变化为:草鱼<团头鲂<虹鳟<异育银鲫<尼罗罗非鱼<杂交鲟;除杂交鲟外,其它 5 种鱼类肌肉和肝脏中微囊藻毒素积累量的规律均为:杂食性鱼类>肉食性鱼类>草食性鱼类。此外,Malbrouck 等^[50]比较了 MC-LR 在禁食的和摄食状态下,金鱼 (*Carassius auratus* L.) 的离体肝细胞或在体肝脏中的累积规律,发现 MC-LR 更容易在金鱼禁食状态下的离体肝细胞或在体肝细胞内积累。可见,鱼体的摄食状态与微囊藻毒素的积累也存在显著的关系,鱼体在饥饿状态下更容易积累 MCs。

董桂芳^[18]通过室内饲喂蓝藻粉饲料的实验研究指出,MCs 在不同实验鱼、不同 MCs 摄入剂量和不同组

组织中均表现出不同的积累和清除规律,如 MCs 在摄食低剂量 ($32.3 \mu\text{g MCs/g}$ 干重) 蓝藻粉饲料黄颡鱼肝脏中的积累量表现为随时间依赖性升高,而高剂量组 ($71.96 \mu\text{g MCs/g}$ 干重) 实验鱼则表现为随时间依赖性下降,而肌肉中 MCs 在两个饲料组中的积累量均表现为随时间依赖性下降。黄颡鱼肝脏和肌肉中 MCs 的清除速率为: 肝脏 > 肌肉。MCs 在摄食含不同 MCs 剂量的蓝藻粉饲料的杂交罗非鱼和杂交鲟肝脏和肌肉中的积累量均表现为随时间和剂量依赖性升高,而在恢复阶段,其肝脏中 MCs 的残留量均随时间和剂量显著降低^[19-20]。Xie 等^[51]通过鲢摄食微囊藻细胞的实验发现鲢积累的 MCs 在清除 20 d 后,肝脏中的 MC-RR 从 24.63 降至 $3.21 \mu\text{g/g}$ 干重,肌肉中 MC-RR 从 1.77 降至 $0.8 \mu\text{g/g}$ 干重,进一步证实 MC-RR 在鱼类肝脏中的清除速率要快于肌肉。

世界卫生组织 (WHO) 建议的人可耐受的 MCs 摄入量上限为 $0.04 \mu\text{g/d/kg}$ 体重 (BW)^[52]。Magalhães 等^[53]发现巴西 Sepetib 海湾捕获的不同鱼类肌肉中 MCs 的平均含量为 $39.6 \mu\text{g/kg}$ 干重,同时发现 19% 的水产品中 MCs 的含量超过 WHO 的安全限量。董桂芳^[18]和 Dong 等^[19-20]报道黄颡鱼、杂交罗非鱼和杂交鲟无论在摄入较高 MCs 含量的蓝藻粉饲料 47—60 d 后或经过 43—60 d 饲喂无蓝藻粉饲料的毒素清除阶段后,肌肉中 MCs 含量均超过 WHO 的安全限量。Zhao 等^[16]通过饲喂蓝藻粉的 9—12 周养殖实验指出,即使尼罗罗非鱼每天摄入极低含量的 MCs ($300\text{—}1500 \text{ ng/d}$),其肌肉中积累的 MCs 对人体健康来说仍然不安全。但是,草鱼摄食蓝藻粉饲料(饲料中 MCs 与在天然水体或池塘养殖的鱼类可能摄入的 MCs 含量接近)后肌肉中 MCs 的最高积累量为 16 ng/g 干重,如果体重 60 kg 的人每天摄食 300 g 这种草鱼(干物质重 75 g),那么他每日摄入 MCs 含量为 $0.02 \mu\text{g/kg}$ 体重,未超过 WHO 的安全限量,所以食用蓝藻水华爆发的水体的草鱼肉应该是相对安全的。如果将我国湖泊蓝藻水华治理中机械收获的蓝藻细胞制成蓝藻粉用作草食性鱼类(如草鱼)的部分饲料蛋白源或将蓝藻粉进行脱毒处理,或将其作为其他杂食性鱼类(如尼罗罗非鱼)的饲料蛋白源也具有较大发展潜能。

4 鱼类对微囊藻毒素的解毒机理

目前有关鱼类对摄入体内 MCs 的代谢及解毒机理研究相对较少。在生物体内,包括药物、毒物在内的大多数外源物主要由肝脏代谢,因其含有大部分代谢相关酶类如 P450,大多数药物代谢的 I 相反应及 II 相反应都依赖于肝脏的这些酶系统而发生^[54-55]。还原性谷胱甘肽 (GSH) 是广泛存在于动物细胞中的三肽,它是生物体解毒系统 II 相反应中主要的结合物质之一,对许多毒物的毒性效应具有保护作用^[56]。Kondo 等^[57-58]在大鼠和小鼠肝脏中首次定性检测到了 MCs-GSH-半胱氨酸结合产物。同时 Takenaka^[59]也通过体外实验证实了微囊藻毒素可通过大鼠肝细胞液和微粒体内的谷胱甘肽硫转移酶 (GST) 催化形成 MCs-GSH 结合物。Pflugmacher 等^[60]在大型沉水植物、鱼和水蚤中定性鉴定了体外实验中通过酶催化形成的 MCs-GSH 结合物,并指出 MCs 与 GSH 结合是微囊藻毒素在水生生物体内解毒的第一步,而后进一步提出了 MCs 在水生生物体内可能的代谢途径和可能的代谢产物。Xu 等^[61]采用注射 GSH 进行预保护,初步证明了 GSH 是通过抑制肝脏中蛋白磷酸酶 2A 的活性从而减轻 MCs 对鱼类的毒性的。董桂芳等^[62]发现饲料中添加适宜含量的 GSH 可以有效缓解黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson) 摄入蓝藻粉的毒性,进一步证明了 GSH 可能在鱼类对 MCs 代谢及解毒过程中发挥了关键性的作用。

5 总结与展望

一方面,摄食含低剂量 MCs 的蓝藻粉可提高鱼类的摄食率,而摄入高剂量 MCs 的蓝藻粉则会降低鱼类的摄食率,饲料中蓝藻粉可通过降低鱼类的饲料转化效率和消化率从而间接导致其生长的下降;另一方面,摄入蓝藻粉或蓝藻细胞也可对鱼类造成一系列的毒性效应,包括造成鱼类自身不同程度的死亡,引发鱼体组织器官抗氧化酶类的激活或抑制,引起肝和肾等组织器官的显微和超微病理变化以及造成 MCs 富集于鱼体肝脏和肌肉等组织器官。含 MCs 的蓝藻粉或蓝藻细胞的摄入剂量和方式、鱼类的食性和天然水体的生活习性等均可影响鱼类对蓝藻粉或蓝藻细胞的吸收与利用以及其含有 MCs 的毒性效力。如果将蓝藻粉进行适当的脱毒处理,并进行安全评价,蓝藻粉作为草食性鱼类(如草鱼)甚至杂食性鱼类(如尼罗罗非鱼)的饲料蛋白源将

具有很大的发展前景。综上,鱼类对摄入体内 MCs 的代谢及解毒机理还不清楚,有关 GSH 及 MCs 与 GSH 的结合产物在鱼类对 MCs 代谢及解毒过程中发挥的作用与代谢途径将是未来的研究热点。同时,寻找和筛选对蓝藻粉耐受性较高的鱼类及蓝藻粉的脱毒技术将是蓝藻粉资源化利用研究的热点问题。

致谢:陈洪波博士(H. B. Chen)对本文写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Orr P T, Jones G T, Hunter R A, Berger K, De Paoli D A, Orr C L A. Ingestion of toxic *Microcystis aeruginosa* by dairy cattle and the implications for microcystin contamination of milk. *Toxicon*, 2001, 39(12): 1847-1854.
- [2] Adamek Z, Spittler P. Particle size selection in the food of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix*. *Folia Zoologica*, 1984, 33: 363-370.
- [3] Spataru P, Gophen M. Feeding behaviour of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* Val. and its impact on the food web of Lake Kinneret, Israel. *Hydrobiologia*, 1985, 120(1): 53-61.
- [4] Zurawell R W, Chen H R, Burke J M, Prepas E E. Hepatotoxic cyanobacteria: a review of the biological importance of Microcystins in freshwater environments. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, 2005, 8(1): 1-37.
- [5] Malbrouck C, Kestemont P. Effects of microcystins on fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(1): 72-86.
- [6] Carbis C R, Rawlin G T, Mitchell G F, Anderson J W, McCauley I. The histopathology of carp, *Cyprinus carpio* L., exposed to microcystins by gavage, immersion and intraperitoneal administration. *Journal of Fish Diseases*, 1996, 19(3): 199-207.
- [7] Li L, Xie P, Chen J. In vivo studies on toxin accumulation in liver and ultrastructural changes of hepatocytes of the phytoplanktivorous bighead carp i. p. -injected with extracted microcystins. *Toxicon*, 2005, 46(5): 533-545.
- [8] Zhang X Z, Xie P, Wang W M, Li D P, Li L, Tang R, Lei H H, Shi Z C. Dose-dependent effects of extracted microcystins on embryonic development, larval growth and histopathological changes of southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Toxicon*, 2008, 51(3): 449-456.
- [9] Ibelings B W, Chorus I. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: a review. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1): 177-192.
- [10] Cummins K W, Wuycheck J C. Caloric equivalents for investigations in ecological energetics. *International Association of Theoretical and Applied Limnology. Mitteilungen: Communications*, 1971, 18(18): 1-158.
- [11] De Moor F C, Scott W E. Digestion of *Microcystis aeruginosa* by *Oreochromis mossambicus*. *Journal of Limnological Society of South Africa*, 1985, 11(1): 14-19.
- [12] Shao X M, Minori S, Toshiyasu Y, Masaaki T. Nutritious components analysis on *T. thiebautii*. *Journal of Huazhong Agricultural*, 2001, 20(3): 279-282.
- [13] Naylor R L, Goldburg R J, Primavera J H, Kautsky N, Beveridge M C M, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H, Troell M. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 2000, 405(6790): 1017-1024.
- [14] Barros M M, Lim C, Klesius P H. Effect of soybean meal replacement by cottonseed meal and iron supplementation on growth, immune response and resistance of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) to *Edwardsiella ictaluri* challenge. *Aquaculture*, 2002, 207(3/4): 263-279.
- [15] Zhao M, Xie S, Zhu X, Yang Y, Gan L, Song L. Effect of inclusion of blue-green algae meal on growth and accumulation of microcystins in gibel carp (*Carassius auratus gibelio*). *Journal of Applied Ichthyology*, 2006a, 22(1): 72-78.
- [16] Zhao M, Xie S Q, Zhu X M, Yang Y X, Gan N Q, Song L R. Effect of dietary cyanobacteria on growth and accumulation of microcystins in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 2006b, 261(3): 960-966.
- [17] Zhao M. Comparative studies of the effects of dietary blue-green algae meal inclusion on fishes of different food habits [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. 2006: 43-109.
- [18] Dong G F. Nutri-toxicological effects of dietary cyanobacteria on different fishes and fish recovery [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. 2009: 29-47.
- [19] Dong G F, Zhu X M, Han D, Yang Y X, Song L R, Xie S Q. Effects of dietary cyanobacteria of two different sources on growth and recovery of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*). *Toxicon*, 2009, 54(3): 208-216.
- [20] Dong G F, Zhu X M, Han D, Yang Y X, Song L R, Xie S Q. Response and recovery of hybrid sturgeon from subchronic oral administration of cyanobacteria. *Environmental Toxicology*, 2011, 26(2): 161-170.
- [21] Bury N R, Eddy F B, Codd G A. The effects of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*, the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR, and ammonia on growth rate and ionic regulation of brown trout. *Journal of Fish Biology*, 1995, 46(6): 1042-1054.
- [22] Kamjunke N, Mendonca R, Hardewig I, Mehner T. Assimilation of different cyanobacteria as food and the consequences for internal energy stores of juvenile roach. *Journal of Fish Biology*, 2002a, 60(3): 731-738.

- [23] Kamjunke N, Schmidt K, Pflugmacher S, Mehner T. Consumption of cyanobacteria by roach (*Rutilus rutilus*): useful or harmful to the fish? *Freshwater Biology*, 2002b, 47(2): 243-250.
- [24] Calabrese E J. Evidence that hormesis represents an "Overcompensation" response to a disruption in homeostasis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1999, 42(2): 135-137.
- [25] Li X Y, Chung I K, Kim J I, Lee J A. Subchronic oral toxicity of microcystin in common carp (*Cyprinus carpio* L.) exposed to *Microcystis* under laboratory conditions. *Toxicon*, 2004, 44(8): 821-827.
- [26] Qiu T, Xie P, Ke Z X, Li L, Guo L G. In situ studies on physiological and biochemical responses of four fishes with different trophic levels to toxic cyanobacterial blooms in a large Chinese lake. *Toxicon*, 2007, 50(3): 365-376.
- [27] Snyder G S, Goodwin A E, Freeman D W. Evidence that channel catfish, *Ictalurus punctatus* (Rafinesque), mortality is not linked to ingestion of the hepatotoxin microcystin-LR. *Journal of Fish Diseases*, 2002, 25(5): 275-285.
- [28] Fischer W J, Dietrich D R. Pathological and biochemical characterization of microcystin-induced hepatopancreas and kidney damage in carp (*Cyprinus carpio*). *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2000, 164(1): 73-81.
- [29] Mereish K A, Solow R. Effect of antihepatotoxic agents against microcystin-LR toxicity in cultured rat hepatocytes. *Pharmaceutical Research*, 1989, 7(3): 256-261.
- [30] Ding W X, Shen H M, Zhu H G. Studies on oxidative damage induced by cyanobacteria extract in primary cultured rat hepatocytes. *Environmental Research*, 1998, 78(1): 12-18.
- [31] Pinho G L L, da Rosa M C, Maciel F E, Bianchini A, Yunes J S, Proenca L A O, Monserrat J M. Antioxidant responses and oxidative stress after microcystin exposure in the hepatopancreas of an estuarine crab species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 61(3): 353-360.
- [32] Moreno I, Pichardo S, Jos A. Gómez-Amores L, Mate A, Vázquez C M, Caméan A M. Antioxidant enzyme activity and lipid peroxidation in liver and kidney of rats exposed to microcystin-LR administered intraperitoneally. *Toxicon*, 2005, 45(4): 395-402.
- [33] Jos Á, Pichardo S, Prieto A I, Repetto G, Vázquez C M, Moreno I, Cameán A M. Toxic cyanobacterial cells containing microcystins induce oxidative stress in exposed tilapia fish (*Oreochromis* sp.) under laboratory conditions. *Aquatic Toxicology*, 2005, 72(3): 261-271.
- [34] Prieto A I, Jos Á, Pichardo S, Moreno I, Cameán A M. Differential oxidative stress responses to microcystins LR and RR in intraperitoneally exposed tilapia fish (*Oreochromis* sp.). *Aquatic Toxicology*, 2006, 77(3): 314-321.
- [35] Prieto A I, Pichardo S, Jos Á, Moreno I, Cameán A M. Time-dependent oxidative stress responses after acute exposure to toxic cyanobacterial cells containing microcystins in tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) under laboratory conditions. *Aquatic Toxicology*, 2007, 84(3): 337-345.
- [36] Ding W X, Shen H M, Ong C. Critical role of ROS formation in microcystin-induced cytoskeleton disruption in primary cultured hepatocytes. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2001, 64(6): 507-519.
- [37] St Dimitrova M, Tsinova V, Velcheva V. Combined effect of zinc and lead on the hepatic superoxide dismutase-catalase system in carp (*Cyprinus carpio*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1994, 108(1): 43-46.
- [38] Kaushik S, Kaur J. Chronic cold exposure affects the antioxidant defense system in various rat tissues. *Clinica Chimica Acta*, 2003, 333(1): 69-77.
- [39] Bury N R, McGeer J C, Eddy F B, Codd G A. Liver damage in brown trout, *Salmo trutta* L., and rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), following administration of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR via the dorsal aorta. *Journal of Fish Diseases*, 1997, 20(3): 209-215.
- [40] Tencalla F, Dietrich D. Biochemical characterization of microcystin toxicity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Toxicon*, 1997, 35(4): 583-595.
- [41] Fischer W J, Hitzfeld B C, Tencalla F, Eriksson J E, Mikhailov A, Dietrich D R. Microcystin-LR toxicodynamics, induced pathology, and immunohistochemical localization in livers of blue-green algae exposed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Toxicological Sciences*, 2000, 54(2): 365-373.
- [42] Miura G A, Robinson N A, Lawrence W B, Pace J G. Hepatotoxicity of microcystin-LR in fed and fasted rats. *Toxicon*, 1991, 29(3): 337-346.
- [43] Kotak B G, Semalulu S, Friytz D L, Prepas E E, Hrudey S E, Coppock R W. Hepatic and renal pathology of intraperitoneally administered microcystin-LR in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Toxicon*, 1996, 34(5): 517-525.
- [44] Fournie J W, Courtney L A. Histopathological evidence of regeneration following hepatotoxic effects of the cyanotoxin microcystin-LR in the hardhead catfish and gulf killifish. *Journal of Aquatic Animal Health*, 2002, 14(4): 273-280.
- [45] Williams D E, Kent M L, Andersen R J, Klix H, Holmes C F B. Tissue distribution and clearance of tritium-labeled dihydromicrocystin-LR epimers administered to Atlantic Salmon via intraperitoneal injection. *Toxicon*, 1995, 33(2): 125-131.
- [46] Jang M H, Ha K, Joo G J. Toxin-mediated interaction between cyanobacteria and native fishes in the eutrophic Hoedong Reservoir, South Korea. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, 18(4): 639-646.

- [47] Jang M H, Ha K, Lucas M C, Joo G J, Takamura N. Changes in microcystin production by *Microcystis aeruginosa* exposed to phytoplanktivorous and omnivorous fish. *Aquatic Toxicology*, 2004, 68(1): 51-59.
- [48] Ernst B, Hitzfeld B C, Dietrich D. Presence of *Planktothrix* sp. and cyanobacterial toxins in Lake Ammersee, Germany and their impact on whitefish (*Coregonus lavaretus* L.). *Environmental Toxicology*, 2001, 16(6): 483-488.
- [49] Ibelings B W, Buring K, De Jonge J, Wolfstein K, Pires L M, Postma J, Burger T. Distribution of microcystins in a lake foodweb: no evidence for biomagnification. *Microbial Ecology*, 2005, 49(4): 487-500.
- [50] Malbrouk C, Trausch G, Devos P, Kestemont P. Effect of microcystin-LR on protein phosphatase activity and glycogen content in isolated hepatocytes of fed and fasted juvenile goldfish *Carassius auratus* L. *Toxicon*, 2004, 44(8): 927-932.
- [51] Xie L Q, Xie P, Ozawa K, Honma T, Yokoyama A, Park H D. Dynamics of microcystins-LR and -RR in the phytoplanktivorous silver carp in a sub-chronic toxicity experiment. *Environmental Pollution*, 2004, 127(3): 431-439.
- [52] Chorus I, Mur L. Preventive measure // Chorus I, Bartram J, eds. *Toxic Cyanobacteria in Water-A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. London: E & FN Spon, 1999: 235-273.
- [53] Magalhães V F, Soares R M, Azevedo S M F O. Microcystin contamination in fish from the Jacarepaguá Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil): ecological implication and human health risk. *Toxicon*, 2001, 39(7): 1077-1085.
- [54] Luo W X, Zhang Y D. Hepatic cytochrome P450 involving in drug metabolism. *Progress in Pharmaceutical Sciences*, 1999, 23(1): 27-32.
- [55] Ma J, Qian B L. Research advances in human cytochrome P450s and their application in new drug evaluation. *Chinese Journal of New Drugs*, 2002, 11(1): 36-42.
- [56] Zhang Y Y, Xu L H, Zhou B S, Xu Y, Harada K. Preliminary studies on the role of GSH detoxification of Microcystin-LR in fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, 20(3): 284-286.
- [57] Kondo F, Ikai Y, Oka H, Okumura M, Ishikawa N, Harada K I, Matsuura K, Murata H, Suzuki M. Formation, characterization, and toxicity of the glutathione and cysteine conjugates of toxic heptapeptide microcystins. *Chemical Research in Toxicology*, 1992, 5(5): 591-596.
- [58] Kondo F, Matsumoto H, Yamada S, Ishikawa N, Ito E, Nagata S, Ueno Y, Suzuki M, Harada K. Detection and identification of metabolites of microcystins formed *in vivo* in mouse and rat livers. *Chemical Research in Toxicology*, 1996, 9(8): 1355-1359.
- [59] Takenaka S. Covalent glutathione conjugation to cyanobacterial hepatotoxin microcystin LR by F344 rat cytosolic and microsomal glutathione S-transferases. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2001, 9(4): 135-139.
- [60] Pflugmacher S, Wiegand C, Oberemm A, Beattie K A, Krause E, Codd G A, Steinberg C E W. Identification of an enzymatically formed glutathione conjugate of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR: the first step of detoxication. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1998, 1425(3): 527-533.
- [61] Xu L, Zhou B, Lam P K S, Chen J, Zhang Y, Harada K I. In vivo protein phosphatase 2A inhibition and glutathione reduction by MC-LR in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) // *Proceedings, Ninth International Conference on Harmful Algal Blooms*. Hobart 2000: 399-402.
- [62] Dong G F, Zhu X M, Yang Y X, Han D, Xie S Q. Dietary supplemental glutathione (GSH) could reduce the toxicity of Microcystins on Yellow Catfish (*Pelteobagrus Fulvidraco* Richardson). *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(4): 722-730.

参考文献:

- [12] 邵雪玲, 佐藤实, 山口敏康, 竹内昌昭. 蓝藻 *Trichodesmium* *bautii* 营养成分分析. *华中农业大学学报*, 2001, 20(3): 279-282.
- [17] 赵敏. 饲料中蓝藻粉对不同食性鱼类影响的比较研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006: 43-109.
- [18] 董桂芳. 不同鱼类摄食饲料中蓝藻粉的营养毒理学效应及恢复 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009: 29-47.
- [54] 骆文香, 张银娣. 药物代谢中的肝细胞色素 P450. *药学进展*, 1999, 23(1): 27-32.
- [55] 马璟, 钱蓓丽. 人类细胞色素 P450s 研究概况及其在新药安全性评价中的应用. *中国新药杂志*, 2002, 11(1): 36-42.
- [56] 张甬元, 徐立红, 周炳升, 徐盈, 原田健一. 鱼体中谷胱甘肽对微囊藻毒素的解毒作用的初步研究. *水生生物学报*, 1996, 20(3): 284-286.
- [62] 董桂芳, 朱晓鸣, 杨云霞, 韩冬, 解绶启. 黄颡鱼饲料中添加谷胱甘肽降低藻毒素毒性作用的研究. *水生生物学报*, 2010, 34(4): 722-730.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liyue, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元