

ISSN 1000-3207

水生生物学报

ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA

第45卷

Vol. 45

第6期

No. 6

2 0 2 1

中国科学院水生生物研究所 主办
中国海洋湖沼学会
科学出版社出版

ISSN 1000-3207





水生生物学报

(SHUISHENG SHENGWU XUEBAO)



2021年11月 第45卷 第6期 Vol. 45 No. 6

目次

渔业与生物技术

- 黄颡鱼母本的肠系膜脂肪沉积对繁育性能的影响 胡伟华 熊 阳 郭稳杰 王宇宏 朱晓鸣 梅 洁 (1181)
- 奥尼罗非鱼及其亲本感染无乳链球菌后生理响应变化 祝璟琳 李大宇 邹芝英 肖 炜 喻 杰 杨 弘 薛良义 (1190)
- 唇鳞硬骨蛋白基因克隆及其在肌间刺发生过程中的表达 陈 洁 刘子明 姜 维 吕耀平 (1206)
- 中华鳖组蛋白H2A变体克隆及其在卵母细胞中的表达分析
..... 祝骏贤 陈 辰 刘晓莉 王亚坤 雷 骆 洪孝友 于凌云 徐红艳 李 伟 朱新平 (1207)
- 鱼腥蓝细菌PCC 7120游离DnaA的增加降低异形胞频率 李 静 杨毅玲 张承才 (1214)

水生态与环境

- 饲料中添加杜仲叶粉对黄河鲤鱼成分、肌肉氨基酸组成和生理指标的影响
..... 李海洁 郭国军 郭朝辉 王林枫 王春秀 李 明 李国喜 刘变枝 (1222)
- 哈尼梯田稻-渔共作模式下杂交黄颡鱼肠道微生物研究 朱昊俊 强 俊 徐钢春 陶易凡 包景文 徐 跑 (1232)
- 不同性别和生长阶段对克氏原螯虾肠道菌群多样性的影响 谢梦琪 张诗雨 许荔立 蒋 飞 袁军法 吴志新 陈孝煊 (1243)
- 鲟鲤鱼网箱养殖环境微生物菌群结构及潜在病原菌分析 黄 薇 周华书 刘兰英 罗士炎 宋永康 (1255)
- 外源脱落酸对湿地植物美人蕉抗寒性的影响 陈金梅 褚一凡 谭启洋 刘 伟 杨玲丽 黄 涛 吴振斌 贺 锋 (1264)
- 铅胁迫下轮叶黑藻的吸附水平及生理响应 周 洋 于道德 胡 芯 郑永华 唐洪玉 (1273)
- UV-B对雨生红球藻生长及虾青素积累的影响 许文鑫 朱 琴 朱 梅 季春丽 张春辉 秦 松 李润植 崔红利 (1281)
- 不同外源营养负荷对浮游藻类群落结构特征的影响 李 艳 王洪铸 马硕楠 梁小民 王海军 (1291)
- 刘家峡水库浮游植物群落结构与环境因子的关系 杜岩岩 廖传松 杨濯羽 娄忠玉 张艳萍 王 宏 王 太 (1299)
- 长江宜昌至武汉段岸线1 km近二十年土地利用及景观格局时空变化研究
..... 易斯倚 李前正 武俊梅 徐 栋 吴振斌 周巧红 (1308)

生物多样性与资源

- 倒刺鲃两极虫的宿主新记录及其分子系统学研究 向 瑶 张金叶 赵元君 (1316)
- 链形藻类的中国新记录属——中眼藻属 董晓琪 刘国祥 朱 欢 (1323)
- 聚果蜈蚣藻的修订——基于形态观察、早期发育及分子序列分析 温 馨 卞 瑶 张昕陶 马 跃 王 晨 王宏伟 (1331)
- 中国淡水胭脂藻属植物形态及分子系统发育分析 南芳茹 李 娟 刘旭东 冯 佳 刘 琪 吕俊平 谢树莲 (1341)
- 亚气生球状绿藻一新种——重庆单星藻 王清华 宋会银 刘旭东 胡征宇 刘国祥 (1351)
- 中国伞形蜈蚣藻和亚栉状蜈蚣藻的合种研究——基于形态观察、早期发育及分子分析
..... 马 跃 卞 瑶 温 馨 张昕陶 王宏伟 (1361)
- 重庆地区眉溪小车轮虫及其与近缘种的比较 夏 萍 唐发辉 赵元君 (1371)

长江生态考核指标

- 关于对长江水生态环境状况的评估与考核(序言) 曹文宣 (1381)
- 生态考核指标: 水生动物种类指数 江小蝶 吴俊燕 崔永德 王洪铸 (1382)
- 基于鱼类物种状况的长江生态环境质量评估 林鹏程 高 欣 刘 飞 黎明政 刘焕章 (1385)
- 长江生态考核指标: 基于被动声学监测的长江江豚数量
..... 王克雄 王志陶 梅志刚 郑劲松 郝玉江 韩 玮 段鹏翔 陈宇维 杨依宁 邱建松 范 飞 邓晓君 王 丁 (1390)
- 基于中华鲟繁殖群体数量的长江中、下游生态环境考核指标 高 欣 林鹏程 常 涛 刘焕章 (1396)
- 微生物群落eDNA-PFU监测 姜传奇 熊 杰 黄 洁 冯伟松 龚迎春 缪 炜 (1400)

综述

- 鱼类低温应激反应的调控机制 龙 勇 葛国栋 李西西 崔宗斌 (1405)



ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA

Vol. 45, No. 6, Nov., 2021

CONTENTS

Fishery and Biotechnology

- The effect of mesenteric fat deposition on reproduction performance of female parent fish (*Pelteobagrus fulvidraco*) HU Wei-Hua, XIONG Yang, GUO Wen-Jie, WANG Yu-Hong, ZHU Xiao-Ming and MEI Jie (1189)
- The physiological response of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* ♀ × *Oreochromis aureus* ♂) and its parents infected with *Streptococcus agalactiae* ZHU Jing-Lin, LI Da-Yu, ZOU Zhi-Ying, XIAO Wei, YU Jie, YANG Hong and XUE Liang-Yi (1200)
- Molecular characterization of a sclerostin homologue in barbel steed (*hemibarbus labeo*) and its relationship with intermuscular bone development CHEN Jie, LIU Zi-Ming, JIANG Wei and LÜ Yao-Ping (1201)
- Cloning and expression analysis of histone H2A variant in oocytes of chinese soft-shelled turtle (*Pelodiscus sinensis*) ZHU Jun-Xian, CHEN Chen, LIU Xiao-Li, WANG Ya-Kun, LEI Luo, HONG Xiao-You, YU Ling-Yun, XU Hong-Yan, LI Wei and ZHU Xin-Ping (1213)
- Increased free DnaA decreases the frequency of heterocysts in *Anabaena* sp. PCC 7120 LI Jing, YANG Yi-Ling and ZHANG Cheng-Cai (1221)

Water Ecology and Environment

- Effects of dietary *Eucommia ulmoides* leaf powder on body composition, muscle amino acid composition, physiological indexes of yellow river carp LI Hai-Jie, GUO Guo-Jun, GUO Chao-Hui, WANG Lin-Feng, WANG Chun-Xiu, LI Ming, LI Guo-Xi and LIU Bian-Zhi (1231)
- Microbial community structure of hybrid yellow catfish in rice-fish co-culture system in Hani Terrace ZHU Hao-Jun, QIANG Jun, XU Gang-Chun, TAO Yi-Fan, BAO Jing-Wen and XU Pao (1242)
- The intestinal microbiota diversities of *Procambarus clarkia* at different sexes and growth stages XIE Meng-Qi, ZHANG Shi-Yu, XU Li-Li, JIANG Fei, YUAN Jun-Fa, WU Zhi-Xin and CHEN Xiao-Xuan (1253)
- Analysis of microbial communities structure and potential pathogens in sturgeon cage culture environment HUANG Wei, ZHOU Hua-Shu, LIU Lan-Ying, LUO Tu-Yan and SONG Yong-Kang (1263)
- Study on increase of the cold resistance and overwintering effect of *Canna indica* Linn in constructed wetland by abscisic acid CHEN Jin-Mei, CHU Yi-Fan, TAN Qi-Yang, LIU Wei, YANG Lin-Li, HUANG Tao, WU Zhen-Bin and HE Feng (1272)
- The effects of lead-zinc stress on adsorption and physiological response of *Hydrilla verticillate* ZHOU Yang, YU Dao-De, HU Xin, ZHENG Yong-Hua and TANG Hong-Yu (1280)
- Ultraviolet-B radiation enhances the growth and astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* XU Wen-Xin, ZHU Qin, ZHU Mei, JI Chun-Li, ZHANG Chun-Hui, QIN Song, LI Run-Zhi and CUI Hong-Li (1290)
- Effects of different external nutrient loading on characteristics of phytoplankton community structure LI Yan, Wang Hong-Zhu, MA Shuo-Nan, LIANG Xiao-Min and WANG Hai-Jun (1298)
- Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Liujiaxia Reservoir DU Yan-Yan, LIAO Chuan-Song, YANG Zhuo-Yu, LOU Zhong-Yu, ZHANG Yan-Ping, WANG Hong and WANG Tai (1307)
- Study on spatial-temporal changes of landscape pattern of land use in Yichang-Wuhan section of the Yangtze River in recent 20 years YI Si-Yi, LI Qian-Zheng, WU Jun-Mei, XU Dong, WU Zhen-Bin and ZHOU Qiao-Hong (1315)

Biodiversity and Resources

- New host record and molecular phylogeny of *Myxidium spinibarba* Chen *et al.*, 2020 XIANG Yao, ZHANG Jin-Ye and ZHAO Yuan-Jun (1322)
- Mesostigma*, a new chinese record genus of streptophyta DONG Xiao-Qi, LIU Guo-Xiang and ZHU Huan (1330)
- Research on the revision of *G. sorocarpus* Li et Ding based on morphological observations, early development and molecular analyses WEN Xin, BIAN Yao, ZHANG Xin-Tao, MA Yue, WANG Chen and WANG Hong-Wei (1340)
- Morphology and molecular phylogenetic analysis of freshwater *Hildenbrandia* in China NAN Fang-Ru, LI Juan, LIU Xu-Dong, FENG Jia, LIU Qi, LÜ Jun-Ping and XIE Shu-Lian (1349)
- Coelastrella chongqingensis* sp. Nov., a novel species of the subaerial coccoid green algae within the *Coelastrella* (Scenedesmaceae, Sphaeropleales) WANG Qing-Hua, SONG Hui-Yin, LIU Xu-Dong, HU Zheng-Yu and LIU Guo-Xiang (1360)

Research on the combined species between <i>Grateloupia corymbeladia</i> Li et Ding and <i>G. subpectinata</i> Holmes based on the morphological observations, early development and molecular analyses	MA Yue, BIAN Yao, WEN Xin, ZHANG Xin-Tao and WANG Hong-Wei (1370)
<i>Trichodinella myakkae</i> (Mueller, 1937) Šrámek-Hušek, 1953 in Chongqing area and comparison with its related species	XIA Ping, TANG Fa-Hui and ZHAO Yuan-Jun (1380)

Ecological assessment indicator of the Yangtze River

Evaluation and assessment for water ecological environment of Yangtze River (Preface)	CAO Wen-Xuan (1381)
A simple but reliable ecosystem health indicator: Aquatic Animal Species Index (AASI)	JIANG Xiao-Die, WU Jun-Yan, CUI Yong-De and WANG Hong-Zhu (1384)
Ecological assessment of the Yangtze River environment based on fish species richness	LIN Peng-Cheng, GAO Xin, LIU Fei, LI Ming-Zheng and LIU Huan-Zhang (1389)
Ecological assessment indicator of the Yangtze River: Passive acoustic monitoring based population size of the Yangtze finless porpoise	WANG Ke-Xiong, WANG Zhi-Tao, MEI Zhi-Gang, ZHENG Jin-Song, HAO Yu-Jiang, HAN Yi, DUAN Peng-Xiang, CHEN Yu-Wei, YANG Yi-Ning, QIU Jian-Song, FAN Fei, DENG Xiao-Jun and WANG Ding (1395)
Ecological and environmental assessment index in the middle-lower reaches of the Yangtze River based on the spawning population size of Chinese sturgeon	GAO Xin, CHANG Tao, LIN Peng-Cheng and LIU Huan-Zhang (1399)
Microbial community biomonitoring-eDNA-PFU method	JIANG Chuan-Qi, XIONG Jie, HUANG Jie, FENG Wei-Song, GONG Ying-Chun and MIAO Wei (1404)
Regulation mechanisms for cold stress responses of fish	LONG Yong, GE Guo-Dong, LI Xi-Xi and CUI Zong-Bin (1414)

- ◎ 中国科技核心期刊、中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊
- ◎ 中国期刊全文数据库(CNKI)、万方数据、中文科技期刊数据库(维普网) 收录期刊
- ◎ 《中国科学引文数据库》(CSCD)、《中国科技论文与引文数据库》来源期刊
- ◎ 美国《生物文摘》(BA)、《化学文摘》(CA)、《剑桥科学文摘》(CSA)、《水产科学与渔业文摘》(ASFA) 收录期刊
- ◎ 英国《动物学记录》(ZR)、《农业与生物科学研究中心文摘》(CAB)、CABI 来源期刊

水生生物学报 (SHUI SHENG SHENG WU XUE BAO)		ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA (Bimonthly Since 1955)	
(双月刊 1955 年创刊)			
第 45 卷 第 6 期 2021 年 11 月		Vol. 45 No. 6 Nov., 2021	
编 辑	《水生生物学报》编辑部 武汉市东湖南路 7 号 邮政编码: 430072 E-mail: acta@ihb.ac.cn 电话: 027-68780701	Edited by	Editorial Board of ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA (Wuhan 430072, China) E-mail: acta@ihb.ac.cn Tel: 027-68780701
主 编	桂 建 芳	Editor-in-Chief	GUI Jian-Fang
主 管	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院水生生物研究所 中国海洋湖沼学会	Sponsored by	Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences Chinese Society for Oceanology and Limnology
出 版	科 学 出 版 社 (北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717)	Published by	Science Press (16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China)
印 刷 装 订	北 京 科 信 印 刷 有 限 公 司	Printed by	Beijing Kexin Printing Co., Ltd
总 发 行 处	科 学 出 版 社 地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717 电话: 010-64017032 E-mail: journal@cpm.com.cn	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 010-64017032 E-mail: journal@cpm.com.cn
国外总发行	中国 国际 图书 贸易 总 公 司 (北京 399 信箱 邮政编码: 100044)	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号 ISSN 1000-3207 国内邮发代号: 82-329 国外发行代号: BM856 定价: 80.00 元 Code No. BM856
CN 42-1230/Q

国内外公开发刊

doi: 10.7541/2021.2020.270

铅锌胁迫下轮叶黑藻的吸附水平及生理响应

周洋¹ 于道德² 胡蕊¹ 郑永华^{1,3} 唐洪玉^{1,3}

(1. 西南大学水产学院, 重庆 400715; 2. 山东省海洋生物研究院, 青岛 266104;

3. 西南大学, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为探讨铅锌胁迫下轮叶黑藻(*Hydrilla verticillate*)的吸附水平及生理响应, 分别设置不同 Pb^{2+} (浓度梯度为0、0.01、0.05、0.10和0.20 mg/L)、 Zn^{2+} (浓度梯度为0、0.05、1.00、2.00和4.00 mg/L)浓度单一和复合胁迫轮叶黑藻28d, 测定其对铅锌的吸附量, 叶绿素a、叶绿素b、丙二醛(MDA)和总抗氧化能力(T-AOC)含量, 以及超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性变化。结果显示: 高浓度(≥ 1.00 mg/L)的 Zn^{2+} 可促进轮叶黑藻对 Pb^{2+} 的吸收, 对 Zn^{2+} 的吸附主要受 Zn^{2+} 处理浓度的影响; 低浓度 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 可以促进叶绿素的合成, 高浓度(浓度 ≥ 1.00 mg/L)胁迫则抑制叶绿素的合成; 受到胁迫时其抗氧化系统会迅速作出反应, 但一定浓度的 Pb^{2+} 与 Zn^{2+} 在单一和复合胁迫下, 抗氧化系统受限, 说明抗氧化系统不能正常运转, 机体受到损伤。研究结果为轮叶黑藻在重金属修复中的应用提供一定的理论依据。

关键词: 轮叶黑藻; 铅; 锌; 吸附水平; 生理特征

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)06-1273-08



铅(Pb)和锌(Zn)两种重金属主要存在于人类重金属工业和矿山开采中, 它们可以通过工业废水和雨水冲刷进入水环境, 由食物链富集, 对各种生物造成伤害。2003年有研究表明淮河、黄河和松花江等十大流域重金属超标断面污染程度均为超V类^[1]。并且受矿石开采的影响, 都柳江干流存在锑(Sb)和锰(Mn)超标, 支流存在锑超标的情况^[2], 广西龙江沉积物中存在镉(Cd)、铅和锌等重金属污染现象^[3]。铅是一种广泛存在于自然界的人体非必须元素, 可对各个器官造成伤害^[4]。锌虽然是植物生长的必要元素^[5], 但是过量的锌可对机体产生毒害作用^[6]。铅锌之间有着较为复杂的关系, 铅可降低仔鼠的学习记忆能力, 但高浓度的锌可以降低铅的毒性^[7]; 孔祥英等^[8]认为适当增加锌的摄入便可以抵御铅的毒性; 马迎华等^[9]认为锌对铅的拮抗作用取决于锌的浓度; 付佳佳等^[10]认为铅锌复合胁迫也可加重对植物的伤害。

轮叶黑藻(*Hydrilla verticillate*)是渔业养殖中十

分常见的一种沉水植物, 它作为鱼虾饵料的同时, 也可以改善水质^[11]。目前, 对轮叶黑藻净化水质方面的研究较多^[12, 13]。有关重金属胁迫轮叶黑藻的研究主要集中在短时间(7d和14d)、高浓度且单一的重金属污染, 得到轮叶黑藻在重金属胁迫下对重金属有良好的吸附作用^[14-17], 对抗氧化系统有一定的影响^[18]。低浓度、长时间和多种金属共同作用于轮叶黑藻的研究暂未见报道, 而在自然界的水体中, 重金属的污染通常是相伴、微量且较长时间的存在。因此, 本试验将探讨经过28d较低浓度(Pb^{2+} 浓度 ≤ 0.20 mg/L、 Zn^{2+} 浓度 ≤ 4.00 mg/L)的铅锌胁迫, 轮叶黑藻分别对铅和锌的吸附水平及生理响应, 为轮叶黑藻在重金属修复中的应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用轮叶黑藻采自西南大学水产学院

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-04-11

基金项目: 国家重点研发项目“蓝色粮仓”重点专项(2019YFD0900305-03); 重庆市生态渔产业技术体系项目(4322000112); 重庆市北碚区科学技术委员会项目(202004)资助 [Supported by Technological Innovation of Blue Granary (2019YFD0900305-03); Technical System Project of Ecological Fishery Industry in Chongqing (4322000112); the Project of Science and Technology Committee in Chongqing Beibei (202004)]

作者简介: 周洋(1997—), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为渔业资源。E-mail: 1003506831@qq.com

通信作者: 唐洪玉, 女, 副教授; E-mail: thy1970@163.com

校内实习实训基地。

1.2 轮叶黑藻的培养与驯化

将采集到的轮叶黑藻先用自来水清洗叶片上附着的水体中的杂质。再用曝气后的水将其洗净,移入室内水池,用改良后的10% Hoagland营养液进行培养驯化,温度为 $(25\pm 0.4)^{\circ}\text{C}$, pH为 6.5 ± 0.2 ,光照周期12h:12h (L:D),每2天更换1次培养液,每天用 HNO_3 或 NaOH 调节pH。培养1个月后,选取长势一致的新长茎叶黑藻进行正式试验。

正式试验容器为透明整理箱($400\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 200\text{ mm}$),底部采用固植板将黑藻固定住,试验条件管理同驯化期一致。培养1周后进行铅和锌(分别以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 配制重金属溶液)胁迫,试验采用二因素完全设计,铅和锌各浓度设置参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的I类、III类、V类标准浓度值及超过V类标准的浓度。试验共25组,每组3个平行(每个平行50株),铅和锌浓度皆为4个梯度(表1),胁迫时间参照《淡水水生生物水质基准制定技术指南》(HJ 831-2017)与谢佩君等^[19]、张立娜等^[20]的研究设置为28d。

1.3 试验指标的测定

铅锌含量的测定 轮叶黑藻在胁迫28d后,将各试验组的轮叶黑藻用纯水清洗3次,确保表面无残留后沥干。沥干后放入烘箱,调整温度为 105°C 杀菌30min,随后在 65°C 下烘干,再将烘干后的轮叶黑藻用研钵彻底磨碎。称量样品1 g于50 mL三角瓶中,做好标记,在三角瓶中加入10 mL比例为4:1的 HNO_3 与 HClO_4 的混合液,将三角瓶置于干燥环境下24h。在 95°C 下消解,直至消解液澄清透明,待样品冷却加入10%的盐酸至样品中,使用纯水稀释、过滤,再定容至25 mL。使用原子吸收分光光度计测定铅锌含量。

光合色素含量的测定 光合色素含量使用分光光度法^[21]测定。

取新鲜的黑藻叶片,清洗干净,剪碎后混匀,准确称取0.2 g放入研钵中,加入少量碳酸钙粉末和石英砂。在避光条件下,先加入2 mL 95%乙醇进行充

分研磨至匀浆,移至10 mL离心管中,随后再用3 mL 95%乙醇多次冲洗钵体和钵棒,将叶绿素全部洗入离心管中,摇匀静置3min,在3500 r/min转速下离心10min。提取上清液,摇匀后分别取出2 mL,用95%乙醇定容至10 mL,摇匀。将稀释后的叶绿素提取液倒入光径1 cm比色皿中,以95%乙醇为空白,在波长665和649 nm下测定其吸光度值。将吸光度值代入公式中求叶绿素a和叶绿素b的含量。

生理指标的测定 植物匀浆的制备同样采用研钵法进行研磨,匀浆介质为PBS缓冲液,匀浆过程均在冰浴条件下操作。

MDA和T-AOC含量、SOD和POD活性均严格按照试剂盒(购自中国南京建成生物有限公司)操作步骤进行测定。

1.4 数据分析

使用Excel 2016绘制图表,SPSS 22.0统计学软件进行数据的单因素方差分析,结果用平均数 $\pm$ 标准差($\bar{X}\pm\text{SD}$)表示。其中, $P>0.05$ 为无显著相关; $P\leq 0.05$ 为显著相关; $P\leq 0.01$ 为极显著相关。

2 结果

2.1 轮叶黑藻对铅的吸附

由图1可得,在 Pb^{2+} 单一胁迫下,轮叶黑藻对铅吸附的量与 Pb^{2+} 浓度呈正相关,试验组轮叶黑藻吸附 Pb^{2+} 的量显著高于对照组($P<0.05$)。在复合胁迫时,在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, Pb^{2+} 吸附量随 Zn^{2+} 浓度的增加而增加,除 Zn^{2+} 浓度为0.05 mg/L外,其余与对应的 Pb^{2+} 单一胁迫相比均差异显著;在同一 Zn^{2+} 处理浓度下,轮叶黑藻对铅吸附的量随复合的 Pb^{2+} 浓度升高而增大,除 Zn^{2+} 处理浓度为0.05 mg/L时, $\text{Pb}0.01+\text{Zn}0.05$ 处理与 $\text{Pb}0.05+\text{Zn}0.05$ 处理差异不显著,其余同一 Zn^{2+} 处理浓度下的复合处理组之间均差异显著。

2.2 轮叶黑藻对锌的吸附

由图2可知,在 Zn^{2+} 单一胁迫时,轮叶黑藻对锌吸附的量与 Zn^{2+} 浓度呈正相关, Zn^{2+} 浓度 $\geq 1.00\text{ mg/L}$ 的试验组显著高于对照组。复合胁迫时,在同一 Zn^{2+}

表1 试验处理组设置
Tab. 1 Setting of experimental treatment group

$\text{Pb}^{2+}(\text{mg/L})$	$\text{Zn}^{2+}(\text{mg/L})$				
	0.00	0.05 (I类)	1.00 (III类)	2.00 (V类)	4.00 (> V类)
0.00	CK	Zn0.05	Zn1.00	Zn2.00	Zn4.00
0.01 (I类)	Pb0.01	Pb0.01+Zn0.05	Pb0.01+ Zn1.00	Pb0.01+ Zn2.00	Pb0.01+ Zn4.00
0.05 (III类)	Pb0.05	Pb0.05+Zn0.05	Pb0.05+ Zn1.00	Pb0.05+ Zn2.00	Pb0.05+ Zn4.00
0.10 (V类)	Pb0.10	Pb0.10+Zn0.05	Pb0.10+ Zn1.00	Pb0.10+ Zn2.00	Pb0.10+ Zn4.00
0.20 (> V类)	Pb0.20	Pb0.20+Zn0.05	Pb0.20+ Zn1.00	Pb0.20+ Zn2.00	Pb0.20+ Zn4.00

浓度处理下, Zn^{2+} 浓度为 0.05 和 1.00 mg/L 时, 随着 Pb^{2+} 浓度增加, 吸附的 Zn^{2+} 量先降后升, 同一 Zn^{2+} 浓度处理下的数据之间无显著性差异 ($P < 0.05$); Zn^{2+} 浓度为 2.00 mg/L 时, 轮叶黑藻对锌吸附的量随复合的 Pb^{2+} 浓度的升高而逐渐增加, 只有 $\text{Pb}0.20 + \text{Zn}2.00$ 处理与单一 $\text{Zn}2.00$ 处理相比显著升高; 当 Zn^{2+} 浓度为 4.00 mg/L 时, 复合胁迫组均显著高于单一胁迫组。在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, 黑藻体内的锌含量均随 Zn^{2+} 复合浓度的升高显著增加。

2.3 叶绿素的含量变化

由图 3 和图 4 可得, 在 Zn^{2+} 单一胁迫下, 随着 Zn^{2+} 浓度增加, 叶绿素 a 和叶绿素 b 含量先升后降, 试验组与对照组相比, 除 $\text{Zn}0.05$ 胁迫外均显著降低 ($P < 0.05$)。复合胁迫, 在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, Pb^{2+} 浓度为 0.01 mg/L, 除 $\text{Pb}0.01 + \text{Zn}0.05$ 胁迫组叶绿素含量显著高于单一 $\text{Pb}0.01$ 胁迫组外, 其余复合胁迫

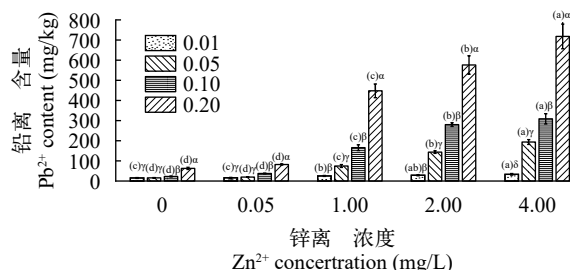


图 1 铅锌胁迫下轮叶黑藻对铅的吸附效果

Fig. 1 Adsorption of lead by *Hydrilla verticillata* under lead and zinc stress

图中不同希腊字母表示 Zn^{2+} 浓度相同, Pb^{2+} 浓度不同处理的处理组之间的显著性差异 ($P < 0.05$); 不同小写英文字母表示 Pb^{2+} 浓度相同, Zn^{2+} 浓度不同的处理组之间显著性差异 ($P < 0.05$)。下图同

In the figure, different Greek letters indicate the significant differences between the treatment groups with the same Zn^{2+} concentration and different Pb^{2+} concentrations ($P < 0.05$); Different lowercase letters after the number indicate the significant difference between the treatment groups with the same concentration of Pb^{2+} and different concentrations of Zn^{2+} ($P < 0.05$). The same applies below

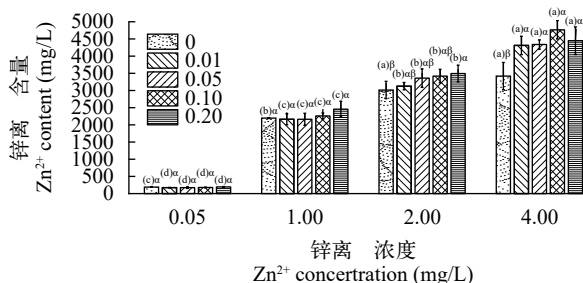


图 2 铅锌胁迫下轮叶黑藻对锌的吸附效果

Fig. 2 Adsorption of zinc by *Hydrilla verticillata* under lead and zinc stress (mg/kg)

组均显著低于单一 $\text{Pb}0.01$ 胁迫组; Pb^{2+} 浓度为 0.05、0.10 和 0.20 mg/L, Zn^{2+} 复合浓度为 0.05 mg/L 时, 复合胁迫组的叶绿素含量比对应的单一铅处理组有所降低, 但差异不显著, 但 Zn^{2+} 浓度 ≥ 1.00 mg/L 的复合处理组与对应的单一铅胁迫相比叶绿素含量显著降低。

在 Pb^{2+} 单一胁迫下, 叶绿素含量先增后降, $\text{Pb}0.05$ 胁迫组与对照组相比显著增加, Pb^{2+} 浓度 ≥ 0.10 mg/L 时显著降低。复合胁迫, 在同一 Zn^{2+} 浓度胁迫下, Zn^{2+} 浓度为 0.05 mg/L 时, 叶绿素先增后降, $\text{Pb}0.01 + \text{Zn}0.05$ 处理组比单一 $\text{Zn}0.05$ 胁迫显著增加, Pb^{2+} 浓度 ≥ 0.10 mg/L 的复合胁迫比单一 $\text{Zn}0.05$ 胁迫显著降低; Zn^{2+} 浓度为 1.00、2.00 和 4.00 mg/L 时, 复合的 Pb^{2+} 浓度为 0.01 mg/L 时与对应的 Zn^{2+} 单一胁迫相比显著升高, 然后随着复合的 Pb^{2+} 浓度增大, 叶绿素含量逐渐降低, 但仍高于对应的 Zn^{2+} 单一胁迫组。

2.4 丙二醛(MDA)含量和总抗氧化能力(T-AOC)的变化

由图 5 可知, 在轮叶黑藻在 Zn^{2+} 单一胁迫下, MDA 的含量先增后降再升, 试验组与对照组相比显著升高 ($P < 0.05$)。复合胁迫, 在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, Pb^{2+} 浓度为 0.01 mg/L 时, 只有 $\text{Pb}0.01 + \text{Zn}0.05$ 比对应的 Pb^{2+} 单一胁迫显著升高, 其余复合胁迫组与 Pb^{2+} 单一胁迫差异不显著; Pb^{2+} 浓度为 0.05 和 0.10 mg/L, 复合的 Zn^{2+} 浓度为 0.05 mg/L 时, 复合胁迫组的 MDA 含量和对应的单一铅处理无显著性差异, 但复合的 Zn^{2+} 浓度 ≥ 1.00 mg/L 时, 复合胁迫组的 MDA

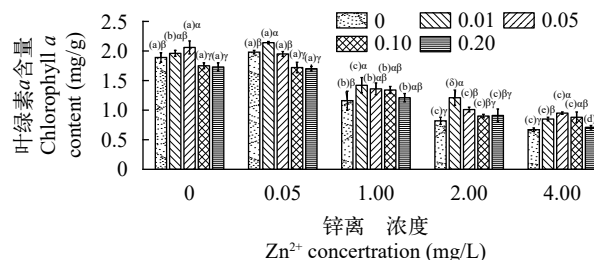


图 3 铅锌胁迫下轮叶黑藻叶绿素 a 的含量

Fig. 3 Chlorophyll a content of *Hydrilla verticillata* under lead-zinc stress

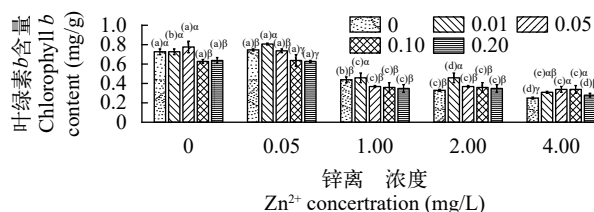


图 4 铅锌胁迫下轮叶黑藻叶绿素 b 的含量

Fig. 4 Chlorophyll b content of *Hydrilla verticillata* under lead-zinc stress

含量比对应的 Pb^{2+} 单一胁迫显著降低; Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时, 复合胁迫组与 Pb^{2+} 单一胁迫相比差异不显著。

轮叶黑藻在 Pb^{2+} 单一胁迫下, MDA含量先增后降, 试验组的MDA含量比对照组均显著升高。复合胁迫, 在同一 Zn^{2+} 浓度处理下, Zn^{2+} 浓度为0.05 mg/L时, 复合胁迫组除 $Pb0.20+Zn0.05$ 比单一 $Zn0.05$ 胁迫MDA含量降低但差异不显著外, 其余复合胁迫组MDA含量均显著升高; Zn^{2+} 浓度为1.00、2.00和4.00 mg/L, 复合的 Pb^{2+} 浓度为0.01 mg/L时, 复合胁迫组比对应的 Zn^{2+} 单一胁迫显著升高, 在复合 Pb^{2+} 浓度为0.05和0.10 mg/L时有所降低, 而 $Pb0.20+Zn2.00$ 和 $Pb0.20+Zn4.00$ 处理组又出现一定的上升趋势。

由图6可知, 在 Zn^{2+} 的单一胁迫下, 轮叶黑藻的T-AOC呈上升趋势, 在 Zn^{2+} 处理浓度 ≥ 1.00 mg/L时比对照组显著升高。复合胁迫, 在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, 当 Pb^{2+} 浓度为0.01和0.05 mg/L, Zn^{2+} 浓度 ≥ 1.00 mg/L时, 轮叶黑藻T-AOC的复合胁迫组比对应的 Pb^{2+} 单一胁迫显著增加; Pb^{2+} 浓度为0.10 mg/L时, 轮叶黑藻T-AOC先降后升, 复合胁迫与 Pb^{2+} 单一胁迫相比无显著性差异, 但 Zn^{2+} 浓度 ≥ 1.00 mg/L的复合胁迫组比 $Pb0.10+Zn0.05$ 显著增加; 当 Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时, 轮叶黑藻的T-AOC除 $Pb0.20+Zn4.00$ 外其他的复合处理组比 Pb^{2+} 单一胁迫均显著增加, $Pb0.20+Zn4.00$ 胁迫组比 Zn^{2+} 的单一胁迫高, 但差异

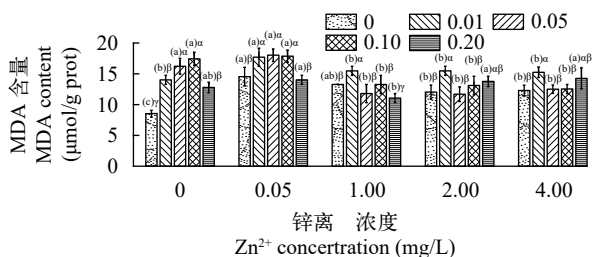


图5 铅锌胁迫下轮叶黑藻MDA的含量

Fig. 5 MDA content of *Hydrilla verticillata* under lead-zinc stress

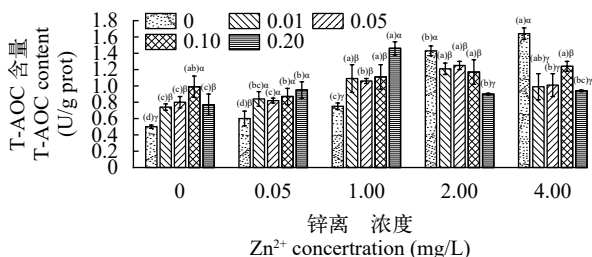


图6 铅锌胁迫下轮叶黑藻T-AOC含量的变化

Fig. 6 Changes of T-AOC of *Hydrilla verticillata* under lead and zinc stress

不显著。

在 Pb^{2+} 的单一胁迫下, 试验组比对照组的轮叶黑藻的T-AOC均显著升高。复合胁迫, 在同一 Zn^{2+} 浓度处理下, Zn^{2+} 浓度为0.05和1.00 mg/L时, 复合胁迫组比 Zn^{2+} 的单一胁迫显著升高, 复合的 Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时, T-AOC急剧上升; Zn^{2+} 浓度为2.00和4.00 mg/L时, 复合胁迫组比对应的 Zn^{2+} 单一胁迫显著降低, 复合的 Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时出现大幅度降低。

2.5 超氧化物歧化酶(SOD)和抗氧化酶(POD)的变化

由图7可知, 在 Zn^{2+} 的单一胁迫下, 各试验组轮叶黑藻的SOD活性均显著高于对照组($P < 0.05$)。复合胁迫, 在同一 Pb^{2+} 浓度处理下, Pb^{2+} 浓度为0.01、0.05和0.10 mg/L时, 复合的 Zn^{2+} 浓度 ≥ 1.00 mg/L时, 复合胁迫组的SOD活性均比对应的 Pb^{2+} 单一胁迫显著升高; Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时, SOD活性随 Zn^{2+} 复合浓度的增高而增加, 但只有 $Pb0.20+Zn4.00$ 胁迫组比单一 $Pb0.20$ 胁迫显著增加。

在 Pb^{2+} 单一胁迫下, 试验组轮叶黑藻的SOD活性比对照组显著升高, 在同一 Zn^{2+} 浓度处理下, Zn^{2+} 浓度为0.05、1.00和2.00 mg/L时, 复合胁迫组的SOD活性比对应的 Zn^{2+} 单一胁迫无显著性差异; Zn^{2+} 浓度为4.00 mg/L时, 只有 $Pb0.01+Zn4.00$ 轮叶黑藻的SOD活性比单一 $Zn4.00$ 胁迫显著升高。此外, Pb^{2+} 浓度为0.20 mg/L时的复合处理与对应的 Zn^{2+} 单一胁迫相比有降低的趋势。

由图8可知, 在 Zn^{2+} 的单一胁迫下, POD的活性逐渐升高, Zn^{2+} 浓度 ≥ 2.00 mg/L时与对照组相比显著升高。在同一 Pb^{2+} 浓度胁迫下, Pb^{2+} 浓度为0.01 mg/L时, $Pb0.01+Zn2.00$ 与 $Pb0.01+Zn4.00$ 复合胁迫组和 $Pb0.01$ 单一胁迫组相比显著降低; Pb^{2+} 浓度为0.05、0.10和0.20 mg/L时, 复合胁迫组与对应的 Pb^{2+} 单一胁迫组相比POD活性均显著降低。

在 Pb^{2+} 的单一胁迫下, 试验组和对对照组相比POD活性均显著升高。在同一 Zn^{2+} 浓度胁迫下, Zn^{2+}

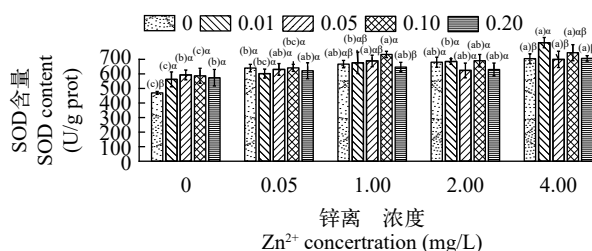


图7 铅锌胁迫下轮叶黑藻SOD活性的变化

Fig. 7 Changes of SOD activity in *Hydrilla verticillata* under lead and zinc stress

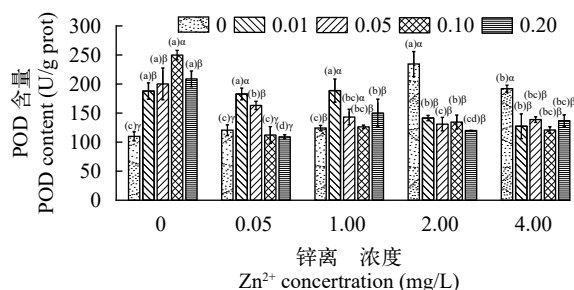


图8 铅锌胁迫下轮叶黑藻POD活性的变化

Fig. 8 Changes of POD activity in *Hydrilla verticillata* under lead and zinc stress

浓度为0.05和1.00 mg/L, 复合的Pb²⁺浓度为0.01 mg/L时, 复合胁迫比对应的Zn²⁺单一胁迫显著升高, 随后在复合Pb²⁺浓度≥0.05 mg/L时均有所降低; Zn²⁺浓度为2.00和4.00 mg/L时, 复合胁迫组与对应的Zn²⁺单一胁迫组相比POD的活性均显著降低。

3 讨论

3.1 铅锌胁迫对黑藻光合作用的影响

轮叶黑藻在水体中对各种营养盐类和重金属都有很强的吸附能力^[22]。本研究结果表明, 随着水体中Pb²⁺、Zn²⁺浓度的增加, 轮叶黑藻体内富集的Pb²⁺、Zn²⁺均增加, 在Zn²⁺存在时, 可促进轮叶黑藻对Pb²⁺的吸收; 在Zn²⁺浓度≥2.00 mg/L时, Pb²⁺的存在也可促进轮叶黑藻对Zn²⁺的吸收。这说明植物吸收重金属离子时, 它们之间存在一定的相互作用^[23], 与周强英等^[24]的研究结果相似。

叶绿素是衡量植物进行光合作用强弱的指标, 在植物受到外界胁迫时, 叶绿素含量也可以作为植物遭受重金属毒害的程度的指标^[25]。本试验结果表明, 在Pb²⁺、Zn²⁺的胁迫下叶绿素a、b出现“低促高抑”的现象, 且受Zn²⁺影响较大, 尤其是Zn²⁺浓度≥1.00 mg/L时, 而Pb²⁺对叶绿素的影响不明显。这之前报道的Pb²⁺可使轮叶黑藻失绿、叶片腐烂的研究结果有所不同^[18], 可能与其使用的Pb²⁺浓度显著大于本试验有关。

3.2 铅锌胁迫对黑藻质膜过氧化的影响

在生物体内, 自由基作用于脂质发生过氧化反应, 反应终产物为丙二醛(MDA), 它是膜脂过氧化最重要的产物之一, 它能加剧膜脂的损伤, 故可以通过MDA了解膜脂过氧化的程度, 以间接测定膜系统受损程度以及植物的抗逆性^[26]。在本试验中, 轮叶黑藻在Pb²⁺单一胁迫下, 随着Pb²⁺浓度的增加, MDA含量逐渐升高, 说明其受到的损伤会增大, 这点与刘朝荣等^[27]的研究结果相似; 在Zn²⁺单一胁迫下, MDA含量在Zn2.00胁迫时开始出现下降的现

象, 可能是机体抗氧化能力增强, 进而清除了大量的活性氧自由基, 说明植物可以通过自身的调节机制以对抗外界的胁迫, 这点与周际海等^[28]的研究结果相似。在铅锌复合胁迫下, Pb²⁺浓度为0.01 mg/L, MDA含量先升后降, 复合胁迫组MDA含量均比对应的Zn²⁺单一胁迫高。其原因可能是低浓度(0.01 mg/L)的铅离子加剧了对轮叶黑藻的胁迫, 导致MDA含量上升。当复合胁迫的Pb²⁺浓度≥0.05 mg/L, Zn²⁺浓度≥1.00 mg/L时, 复合胁迫组的MDA含量均比对应的单一铅胁迫低, 与史雅甜等^[29]的研究结果相似, 说明此时植物抗氧化能力在被诱导后加强。以上均说明轮叶黑藻在受到铅锌胁迫后, 其体内会产生活性氧自由基, 通过过氧化反应生成MDA, 但随着铅锌离子浓度升高, MDA含量出现差异, 可能是与自身的抗氧化机制有关。

3.3 铅锌胁迫对黑藻抗氧化效应的影响

生物机体代谢过程中产生的活性氧, 是一种对生物有害的自由基, 是氧元素的另一种存在形式, 有时自由基可发挥消灭入侵的微生物的作用^[30], 这些自由基可由抗氧化系统清除。T-AOC可以直接反应植物的抗氧化能力的强弱。本试验研究得出, 在单一铅胁迫时, T-AOC先上升后下降, 说明低浓度(≤0.10 mg/L)的铅胁迫可促进轮叶黑藻抗氧化系统的运转, 高浓度(0.20 mg/L)Pb²⁺胁迫时抗氧化系统的运转将会受到抑制。在单一锌胁迫时, Zn²⁺浓度逐渐增加, 轮叶黑藻的T-AOC也不断上升, Zn²⁺浓度≥2.00 mg/L时, T-AOC会急剧上升, 说明高浓度的Zn²⁺(≥2.00 mg/L)胁迫会使轮叶黑藻抗氧化反应更加剧烈。在复合胁迫下, 当复合的Zn²⁺浓度达到1.00 mg/L以上时, T-AOC均比对应的单一铅胁迫显著升高, 说明浓度≥1.00 mg/L的Zn²⁺与Pb²⁺复合后有利于轮叶黑藻抗氧化系统的运作, 其原因有可能是随着Zn²⁺复合浓度的增加, 轮叶黑藻体内铅锌含量均有所增加, 对机体的刺激增大, 导致其抗氧化能力的增强。在同一Zn²⁺浓度胁迫下, 当Zn²⁺浓度为0.05和1.00 mg/L时, 与Pb²⁺进行复合后轮叶黑藻T-AOC比对应的单一锌胁迫高, 说明Pb²⁺可协同促进Zn²⁺(浓度≤1.00 mg/L)对黑藻T-AOC提升的促进作用; 而当Zn²⁺浓度为2.00和4.00 mg/L时, 与Pb²⁺进行复合后黑藻T-AOC反而比对应的单一锌胁迫低, 其原因可能是相比单一锌胁迫, Pb²⁺与浓度≥2.00 mg/L的Zn²⁺复合后, 由于铅锌重金属的含量均有所升高, 对机体内的抗氧化酶和抗氧化物等造成了不同程度的影响, 使得抗氧化系统出现一定程度的紊乱, T-AOC有所下降。

一定浓度的重金属可以激活各种酶促和非酶

促抗氧化^[31, 32]。植物在受到胁迫时, SOD和POD是植物抵御外界胁迫, 抗氧化系统的重要组成, SOD作为金属酶^[33], 也可以吸收部分金属, 增强植物的抗氧化能力。SOD将毒性较强的超氧阴离子自由基 O_2^- 转化为毒性较弱的 H_2O_2 和 O_2 , 随后由POD等酶进一步将 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 。在正常情况下机体产生的活性氧(ROS)浓度低, 机体抗氧化系统可以有效地将其清除, ROS浓度和抗氧化系统的运作处于动态平衡, 避免机体受到损伤^[34]。但随着机体受到外界胁迫加强, 机体会受到一定损害, 体内的抗氧化酶和抗氧化物质可能会受到抑制。Cd处理浓度的增加轮叶黑藻体内的SOD和POD活性呈先升后降的趋势^[35]。本试验的结果表明, 在铅和锌单一或复合胁迫下, 黑藻体内的SOD活性整体上随着处理浓度的增加而增强。POD活性在铅锌单一胁迫时也随着处理浓度的增加而增强, 其中, 在 Pb^{2+} 浓度为0.10 mg/L、 Zn^{2+} 浓度为2.00和4.00 mg/L时出现急剧上升; 而在复合胁迫中, 只有在 Pb^{2+} 浓度为0.01 mg/L且 Zn^{2+} 浓度为0.05和1.00 mg/L时, 铅锌复合胁迫下POD活性比 Zn^{2+} 单一胁迫时强, 其余的铅锌胁迫组合下POD活性均比单一胁迫时弱; 并且MDA与T-AOC此时在整体上略微呈现下降趋势, 这与王婷^[36]的研究结果相似, 说明铅锌的复合在一定程度上可以抑制单一胁迫对植株的危害。

综上所述, 在铅和锌单一胁迫下, 经过28d处理, 低浓度的 Pb^{2+} (浓度 ≤ 0.05 mg/L)和 Zn^{2+} (浓度为0.05 mg/L)均对轮叶黑藻叶绿素的合成有一定的促进作用, 植物产生的活性氧以叶绿素为靶分子, 致使叶绿素结构破坏^[37], 此时机体快速产生叶绿素以抵抗外界胁迫, 而 Pb^{2+} (浓度 ≥ 0.10 mg/L)和 Zn^{2+} (浓度 ≥ 1.00 mg/L)可明显抑制叶绿素的合成; 轮叶黑藻MDA、T-AOC含量和SOD、POD活性在铅和锌单一胁迫下, 均显著高于对照组CK。在铅锌复合胁迫中, 在 Pb^{2+} 同一胁迫浓度下, 当 Zn^{2+} 浓度达到1.00 mg/L以上时, 铅锌复合胁迫组的叶绿素含量、MDA含量和POD活性比相应的 Pb^{2+} 单一处理组低, T-AOC含量和SOD活性比相应的 Pb^{2+} 单一处理组高; 在同一 Zn^{2+} 浓度胁迫下, 当复合的 Pb^{2+} 浓度为0.01 mg/L时, 铅锌复合胁迫组的叶绿素含量和MDA含量比相应的 Zn^{2+} 单一胁迫组高; 在 Zn^{2+} 处理浓度为0.05 mg/L和1.00 mg/L下, 与 Pb^{2+} 进行复合后黑藻T-AOC比相应的 Zn^{2+} 单一胁迫高, 而在 Zn^{2+} 胁迫浓度为2.00 mg/L和4.00 mg/L下, 与 Pb^{2+} 进行复合后黑藻T-AOC和POD活力比相应的 Zn^{2+} 单一处理低。故而, 轮叶黑藻对 Pb^{2+} 的吸附同时受 Pb^{2+} 与 Zn^{2+} 影响, 对 Zn^{2+} 的吸附主要受 Zn^{2+} 处理浓度的影响; 低浓度 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 可

以促进叶绿素的合成, 高浓度的胁迫则会抑制叶绿素的合成; 受到胁迫时其抗氧化系统会迅速作出反应, 但一定浓度的 Pb^{2+} 与 Zn^{2+} 在单一和复合胁迫下, MDA含量依然较高, 但POD活性呈现下降趋势, 说明抗氧化系统受限, 不能正常运转, 机体将受到损伤, 同时T-AOC出现的下降趋势也可印证。

参考文献:

- [1] Hu B B. Status Quo of water pollution and main characteristics in ten watersheds of China [J]. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, **25**(6): 15-17. [胡必彬. 我国十大流域片水污染现状及主要特征 [J]. 重庆环境科学, 2003, **25**(6): 15-17.]
- [2] Dang Y F, Zhao Y L, Deng R, *et al.* Investigation and source analysis of heavy metal pollution of Duliujiang River [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2016, **23**(6): 12-19. [党永锋, 赵彦龙, 邓锐, 等. 都柳江重金属污染现状调查及来源分析 [J]. 广东微量元素科学, 2016, **23**(6): 12-19.]
- [3] Lan X L, Ning Z P, Xiao Q X, *et al.* Spatial distribution, sources and bioavailability of heavy metals in the surface sediments of Longjiang River, Southern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 748-757. [蓝小龙, 宁增平, 肖青相, 等. 广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 [J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 748-757.]
- [4] Wijngaarden E V, Dosemeci M. Brain cancer mortality and potential occupational exposure to lead: findings from the National Longitudinal Mortality Study, 1979-1989 [J]. *International Journal of Cancer*, 2010, **119**(5): 1136-1144.
- [5] Cakmak I. Tansley Review No. 111: Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species [J]. *New Phytologist*, 2000, **146**(2): 185-205.
- [6] Zhang Y B, Liu A R, Dong J G, *et al.* Response of germination and growth of nine *Festuca arundinacea* Schreb varieties to zinc stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(2): 371-376. [张远兵, 刘爱荣, 董建国, 等. 9个高羊茅品种种子萌发和幼苗生长对锌胁迫的响应 [J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(2): 371-376.]
- [7] Gao H M, Dong X F, Hou R L, *et al.* Combined effects of lead and zinc on learning and memory ability of immature rats [J]. *Chinese Journal of School Health*, 2005, **26**(1): 24-25. [高红梅, 董小峰, 侯如兰, 等. 铅锌联合作用对仔鼠学习记忆行为的影响 [J]. 中国学校卫生, 2005, **26**(1): 24-25.]
- [8] Kong X Y, Yang L, Liu L J. Protective effects of zinc on brain in rats exposed to lead before and after birth [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2001(4): 386-389. [孔祥英, 杨龙, 刘力建. 锌对出生前后铅暴露大鼠脑发育的保护作用 [J]. 营养学报, 2001(4): 386-389.]
- [9] Ma Y H, Zhang B, Ye G J, *et al.* Study on the effects of prenatal exposure to low level lead on mice and the interaction between lead and zinc [J]. *Chinese Journal of*

- Public Health*, 2002, **18**(8): 909-910. [马迎华, 张冰, 叶广俊, 等. 母鼠铅暴露对仔鼠的影响及其与锌的相互作用 [J]. *中国公共卫生*, 2002, **18**(8): 909-910.]
- [10] Fu J J, Han Y L, Zhao J Z, *et al.* Effects of lead, zinc and their combined stress on growth and physiological response of *Iris ensata* seedling [J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(2): 198-203. [付佳佳, 韩玉林, 赵九洲, 等. 铅、锌及其复合胁迫对花蔺幼苗生长及生理抗性的影响 [J]. *湿地科学*, 2013, **11**(2): 198-203.]
- [11] Lin L S, Yue C M, Miao W M. *Hydrilla verticillata* and its utilization in aquaculture [J]. *Journal of Hydroecology*, 2005, **25**(5): 33-34. [林连升, 岳春梅, 缪为民. 轮叶黑藻及其在水产养殖上的利用 [J]. *水利渔业*, 2005, **25**(5): 33-34.]
- [12] Ren W J, Tian Z F, Ning G H, *et al.* Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(2): 345-352. [任文君, 田在锋, 宁国辉, 等. 4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(2): 345-352.]
- [13] Dixit S, Dhote S. Evaluation of uptake rate of heavy metals by *Eichhornia crassipes* and *Hydrilla verticillata* [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2010, **169**(1/4): 367-374.
- [14] Han X D, Liu D. Toxicological effect of Pb^{2+} on the growth of *Hydrilla verticillata* [J]. *Sichuan Environment*, 2015, **34**(2): 20-25. [韩晓弟, 刘丹. 铅离子对轮叶黑藻生长的毒性影响 [J]. *四川环境*, 2015, **34**(2): 20-25.]
- [15] Chen G L, Lin Q. Research on accumulation of Cu, Pb, Cd, Zn in different submerged plants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **22**(1): 9-12, 16. [陈国梁, 林清. 不同沉水植物对Cu, Pb, Cd, Zn元素吸收积累差异及规律研究 [J]. *环境科技*, 2009, **22**(1): 9-12, 16.]
- [16] Jiao Z N, Zhu H. Physiological responses of *Hydrilla verticillata* to cadmium and cadmium bioaccumulation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, **30**(5): 249-253. [焦秩男, 朱宏. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)对重金属 Cd^{2+} 的积累及生理响应 [J]. *中国农学通报*, 2014, **30**(5): 249-253.]
- [17] Lin H, Chen S, Dong Y B, *et al.* Phytoremediation on heavy metal-polluted water of Pb, Cd, Cr and V by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, **27**(1): 178-186. [林海, 陈思, 董颖博, 等. 黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬、钒污染水体的修复 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, **27**(1): 178-186.]
- [18] Gao Y. The toxic effects of heavy metal Pb^{2+} stress on *Hydrilla verticillata* [D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 22-23. [高艳. 重金属 Pb^{2+} 胁迫对轮叶黑藻毒性效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 22-23.]
- [19] Xie P J, Li M H, Yan L R, *et al.* Remediation of Cu and Pb co-polluted sediments by three submerged plants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 757-763. [谢佩君, 李铭红, 晏丽蓉, 等. 三种沉水植物对Cu、Pb复合污染底泥的修复效果 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 757-763.]
- [20] Zhang L N, Wang Z Y, An J, *et al.* Ecotoxicological effects of triclosan on *Hydrilla verticillata* in water [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(12): 190-197. [张立娜, 王芷茵, 安婧, 等. 水环境中三氯生残留对轮叶黑藻的生态毒性效应 [J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(12): 190-197.]
- [21] Wang X K, Huang J L. The Philosophy and Technique of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 131-132. [王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 131-132.]
- [22] Cao C H. Effects of aquatic vascular plants on the Taihu lake ecosystem [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1987, **6**(1): 37-39. [曹萃禾. 水生维管束植物在太湖生态系统中的作用 [J]. *生态学杂志*, 1987, **6**(1): 37-39.]
- [23] Xu Y X, Xiu R Q, Zheng J, *et al.* Combined toxic effects of cadmium and Zinc-Ions on two kinds of aquatic organisms [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 1996(1): 24-25. [许永香, 修瑞琴, 郑静, 等. 镉锌离子对两种水生物联合毒性研究 [J]. *中国公共卫生学报*, 1996(1): 24-25.]
- [24] Zhou Q Y, Huang Z M, Chen Y. Growth physiology and absorption characteristics of *Ficus virens* and *Ligustrum lucidum* under combined stress of Pb and Cd [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, **39**(6): 33-40. [周强英, 黄泽梅, 陈瑶. 铅镉复合胁迫下黄葛树和女贞的生长生理及吸收特性研究 [J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, **39**(6): 33-40.]
- [25] Wang Y L, Wang W F, Zhang Y X, *et al.* Responses of leaf morphological structure and physiological characteristics of *Populus euramericana* cv. 'BYu' to drought stress [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(4): 42-50. [王怡霖, 王卫锋, 张芸香, 等. 碧玉杨叶形态结构与生理特性对干旱的响应 [J]. *林业科学*, 2019, **55**(4): 42-50.]
- [26] Li R C. Effects of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000(2): 238-242. [李荣春. Cd, Pb及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响 [J]. *植物生态学报*, 2000(2): 238-242.]
- [27] Liu C R, Zhang L Q, Yang Y, *et al.* Effects of lead and cadmium on physiology indexes of *Davidia involucre* [J]. *Guihaia*, 2020, **41**(9): 1401-1410. [刘朝荣, 张柳青, 杨艳, 等. 珙桐幼苗生理生化指标对重金属铅、镉胁迫的响应 [J]. *广西植物*, 2020, **41**(9): 1401-1410.]
- [28] Zhou J H, Cheng K, Gao R R, *et al.* Photosynthesis and other physiological characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under cadmium stress [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, **56**(6): 193-201. [周际海, 程坤, 郜茹茹, 等. 土壤镉污染对香樟幼苗光合和生理特性的影响 [J]. *林业科学*, 2020, **56**(6): 193-201.]
- [29] Shi Y T, Jian M F, Miao Y J, *et al.* Effects of cadmium and lead pollution in soils on the growth and resistance physiological indexes of *Rumex japonicus* Houtt [J]. *Asian*

- Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(3): 297-306. [史雅甜, 简敏菲, 苗艳娇, 等. 土壤重金属镉、铅及其复合污染对羊蹄(*Rumex japonicus* Houtt)生长及其抗性生理指标的影响 [J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(3): 297-306.]
- [30] Dong M, Zhao Y L, Lei C X. Physiological mechanism of Cd-tolerance of *Artemisia selengensis* grown in Dongting Lake wetland [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(1): 111-120. [董萌, 赵运林, 雷存喜, 等. 洞庭湖湿地Cd富集植物菱蒿(*Artemisia selengensis*)的耐性生理机制研究 [J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(1): 111-120.]
- [31] Malecka A, Piechalak A, Tomaszewska B. Antioxidative system in root cells of pea plants treated with Pb ions: Conference on plant stress reactive oxygen and antioxidants [J]. *Free Radical Research*, 2003, **37**(2): 47.
- [32] Piechalak A, Tomaszewska B, Baralkiewicz D, et al. Accumulation and detoxification of lead ions in legumes [J]. *Phytochemistry*, 2002, **60**(2): 153-162.
- [33] Zhu Y. Superoxide dismutase [J]. *Journal of Zhaowuda Mongolian Teachers College* (Edition of Philosophy and Social Sciences), 2003, **24**(5): 33-35. [朱月. 超氧化物歧化酶 [J]. 昭乌达蒙族师专学报 (汉文哲学社会科学版), 2003, **24**(5): 33-35.]
- [34] Dat J, Vandenabeele S, Vranova E, et al. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses [J]. *Cellular & Molecular Life Sciences*, 2000, **57**(5): 779-795.
- [35] He Y. Phytoremediation of contaminated water with plant materials and characterization of Cd accumulation in the aquatic plant *Hydrilla verticillata* L. [D]. Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2016: 71-73. [贺艳. 植物材料对重金属污染水体的修复和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata* L.)对镉积累特性的研究 [D]. 江苏: 南京农业大学, 2016: 71-73.]
- [36] Wang T. The effect of Pb and Zn compound stress on the physiology and heavy metals accumulation of two kinds of *Medicago* plants [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2016: 25-31. [王婷. Pb、Zn复合胁迫对两种苜蓿属植物生理及重金属富集作用的影响 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2016: 25-31.]
- [37] He C P. Effect of two kinds of heavy metal stress on growth and metabolism of two *Lawn grasses* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005: 25-26. [何翠屏. 两种重金属胁迫对两种草坪草生长与代谢的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2005: 25-26.]

THE EFFECTS OF LEAD-ZINC STRESS ON ADSORPTION AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF *HYDRILLA VERTICILLATA*

ZHOU Yang¹, YU Dao-De², HU Xin¹, ZHENG Yong-Hua^{1,3} and TANG Hong-Yu^{1,3}

(1. College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China; 3. Key Laboratory of Freshwater Fish Resources and Reproductive Development of Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To investigate the adsorption and physiological response of *Hydrilla verticillata* under lead-zinc stress, *H. verticillata* were stressed by lead (Pb^{2+} : 0, 0.01, 0.05, 0.10 and 0.20 mg/L) and zinc (Zn^{2+} : 0, 0.05, 1.00, 2.00 and 4.00 mg/L) with single and composite process for 28 days to measure the adsorption of Pb^{2+} , Zn^{2+} , chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, malondialdehyde (MDA), total antioxidant capacity (T-AOC), superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activity. The result showed that the Zn^{2+} absorption was Zn^{2+} concentration-dependent, and the high concentration of Zn^{2+} (≥ 1.00 mg/L) promoted the Pb^{2+} absorption by *H. verticillata*; The low concentration of Zn^{2+} and Pb^{2+} promoted the synthesis of chlorophyll, while high concentration (≥ 1.00 mg/L) inhibited the synthesis of chlorophyll. Pb^{2+} and Zn^{2+} significantly mediated antioxidant indexes of *H. verticillata* to damage the organism. The results of this study will provide a theoretical basis for application of *H. Verticillata* in heavy metal remediation.

Key words: *Hydrilla verticillata*; Lead; Zinc; Adsorption effect; Physiological characteristics