

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

锯齿新米虾对 Cu^{2+} 和毒死蜱毒性的生理响应

李典宝¹, 张玮^{1,2}, 王丽卿^{1*}, 张瑞雷¹, 季高华¹

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海水生环境工程有限公司, 上海 200090)

摘要: 为研究水生生物对水体中重金属和有机磷农药毒性的生理响应, 以锯齿新米虾为试验生物, 采用半静止毒性试验方法, 分别研究了 Cu^{2+} 和毒死蜱 5 d 暴露时间对锯齿新米虾肌肉组织生理指标的影响。结果表明, 锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下, 随着暴露时间的延长, 肌肉组织蛋白浓度均有不同程度的降低。 Cu^{2+} 溶液较低浓度组 ($0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.172 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和毒死蜱较高浓度组 ($0.0060 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.0120 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 中, 总 SOD 活性表现抑制效应; Cu^{2+} 溶液较高浓度组 ($0.344 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.688 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 表现为“抑制-诱导-抑制”的变化趋势, 而毒死蜱较低浓度组 ($0.0015 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.0030 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 表现为“抑制-诱导”的变化趋势; 暴露在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下, MDA 含量变化相似, 且在一定浓度范围内, 随着 Cu^{2+} 和毒死蜱浓度增加, MDA 含量呈逐渐上升的趋势, 说明 Cu^{2+} 和毒死蜱加快了锯齿新米虾肌肉组织脂质过氧化作用; AChE 活性在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液中表现为抑制效应, 且在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液的较高浓度组中, 其活性随浓度的增加而呈逐渐降低的趋势, 说明 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾肌肉组织的正常生理功能产生了影响, 其浓度越高, 产生的损伤效应越大。研究表明, 鉴于不同浓度的 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液对锯齿新米虾肌肉组织的损伤程度不同, 总 SOD、MDA 和 AChE 可以作为评价重金属和有机磷农药对锯齿新米虾急性毒性效应的生理指标。

关键词: 锯齿新米虾; Cu^{2+} ; 毒死蜱; 蛋白质; 总超氧化物歧化酶 (总 SOD); 丙二醛 (MDA); 乙酰胆碱酯酶 (AChE)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0727-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.047

Physiological Response of *Neocaridina denticulate* to the Toxicity of Cu^{2+} and Chlorpyrifos

LI Dian-bao¹, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Li-qing^{1*}, ZHANG Rui-lei¹, JI Gao-hua¹

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Aquatic Environmental Engineering Corporation Limited, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to study the physiological response to heavy metals and organic-phosphorus pesticide toxicity of aquatic organisms, *Neocaridina denticulate* was used as a test organism to investigate the impact of physiological indices of *N. denticulate* muscle tissues when they were exposed to Cu^{2+} and chlorpyrifos for 5 days respectively with the test methods of semi-static toxicity. The results showed that: when exposed to different concentrations of Cu^{2+} and chlorpyrifos solutions, the protein concentrations in muscle tissues were significantly lower with the extension of time to varying degrees. In the lower concentration groups of Cu^{2+} ($0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.172 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and the higher concentration groups of chlorpyrifos ($0.0060 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.0120 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), the total SOD activity showed inhibitory effect; the trend of the higher concentration group of Cu^{2+} ($0.344 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.688 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) showed "inhibition-promotion-inhibition", however, the lower concentration groups of chlorpyrifos ($0.0015 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.0030 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) showed the "inhibition-promotion" changes in trends; MDA contents changed similarly, and within a certain range of concentrations, MDA contents presented a gradually rising trend with increasing Cu^{2+} and chlorpyrifos concentration, which indicated that Cu^{2+} and chlorpyrifos accelerated lipid peroxidation in muscle tissues of *N. denticulate*. In addition, AChE activity in Cu^{2+} and chlorpyrifos solutions showed inhibitory effect, and in the solutions with higher concentration of Cu^{2+} and chlorpyrifos, the activity was gradually decreased with the increase of concentration, indicating that Cu^{2+} and chlorpyrifos impacted the normal physiological functions of *N. denticulate*, and the higher the concentration, the greater the damage effect. Based on the analysis results, we confirmed that the total SOD, MDA and AChE played significant roles as physiological indicators in evaluating toxic effect of heavy metals and organic-phosphorus pesticide on *N. denticulate*.

Key words: *Neocaridina denticulate*; Cu^{2+} ; chlorpyrifos; protein; TSOD; MDA; AChE

近年来,随着我国工农业化进程的加快,各种各样的水污染问题不断发生^[1,2],使得水质安全受到了不同程度的威胁,而在这些污染问题当中,重金属和有机磷农药的污染占有较大的比重^[3,4]。铜是机体维持正常生命活动所不可缺少的元素,但当其进入水体中达到一定浓度时就会对水生生物产生毒害

作用,成为水体中一种典型的重金属污染物^[5],会被生物富集并沿食物链转移,最终影响人体健

收稿日期: 2014-08-21; 修订日期: 2014-09-21

基金项目: 上海市水务局“十二五”项目 (沪水科 2011-07)

作者简介: 李典宝 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态修复和水生态毒理, E-mail: liberty0117@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lqwang@shou.edu.cn

康^[6]. 毒死蜱(chlorpyrifos, $C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$)是我国使用面较广的一种有机磷杀虫剂,会通过雨水径流进入水体,进而在水生生物体内富集、残留^[5]. 尽管毒死蜱在农药系列分类中属于中等毒性农药,但研究中发现其对大多数生物属于高毒性物质,从而造成生物多样性的降低^[8,9]. 因此,毒死蜱在水环境中安全效应的评价也逐渐成为人们关注的重点^[10].

生物体在受到毒物胁迫后,除了死亡这一外在表现,机体内部也会出现一些生理生化的改变,如蛋白浓度发生变化,一些酶的活性受到抑制,器官组织发生病理损伤等^[11,12]. 目前,斑马鱼、大型蚤等应用于毒物的致毒机制研究较多^[13,14],而像米虾类等小型虾类研究相对不足. 锯齿新米虾(*Neocaridina denticulate*),又称多齿新米虾,隶属甲壳动物匙指虾科新米虾属,是一类暖水性小型经济虾类,其生殖活力强,繁殖较快,幼体成活率高. 它们常栖息于溪流、沼泽、沟渠、河流等淡水水体中,尤其喜爱水生植物繁茂处,常在水底爬行或攀援于水生植物上. 米虾处于水域生态系统食物链的中间环节,它们在溪流和河流中具有类群和生境的多样性,在水环境监测和评价中具有较大的潜力. 在我国,其主要分布在太湖到上海间的苏南地区^[15,16]. 目前对锯齿新米虾的研究主要集中在内外性征分化,生殖系统腺发育及生殖生物学特征等方面^[17~19],而其对水体污染状况的生理响应方面的研究还未见报道. 作者在之前的研究中发现 Cu^{2+} 对锯齿新米虾为高毒,而毒死蜱为剧毒,在此基础上,本文以锯齿新米虾为试验生物,采用半静止毒性试验方法,研究不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾蛋白浓度、丙二醛(MDA)含量、总超氧化物歧化酶(总SOD)和乙酰胆碱酯酶(AChE)活力的影响,探讨锯齿新米虾对 Cu^{2+} 和毒死蜱毒性的生理响应状况,以期为锯齿新米虾对 Cu^{2+} 和毒死蜱毒性响应效应评价和物种多样性保护以及水质基准的制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验生物来源与驯养

试验所采用的锯齿新米虾来自于淀山湖周边水草区. 选取生长状况良好,体长 1.9~2.3 cm,每只体重 0.10~0.13 g 的锯齿新米虾置于长、宽、高为 60 cm×40 cm×45 cm 玻璃水族缸中,每天以普通虾粮喂食 1 次,并及时清除排泄物. 驯养用水条件为:曝气 48 h 以上的自来水, pH 为 7.2~7.7,硬度在 205.95 $mg \cdot L^{-1}$ (以 $CaCO_3$ 计)左右,水温 ($23 \pm$

1) $^{\circ}C$,溶解氧(DO) 5.80 $mg \cdot L^{-1}$ 以上. 试验前 24 h 停止喂食,驯养两周,驯养期间锯齿新米虾未出现死亡,符合 OECD 试验法准则^[20]. 驯化后锯齿新米虾的选用标准为:行动活泼、外观正常、个体均匀的个体.

1.2 受试污染物及母液配制

硫酸铜($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)、二甲基亚砜、吐温 80 购于国药集团化学试剂有限公司,均为分析纯. 毒死蜱(chlorpyrifos, $C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$)有效成分含量为 480 $g \cdot L^{-1}$ 的乳油,产自于浙江威尔达化工有限公司. 母液配制:将一定量的毒死蜱用助溶剂二甲基亚砜和乳化剂吐温 80 配置成 4.8 $g \cdot L^{-1}$ 母液备用,其中助溶剂和乳化剂的体积分数不超过 100 $\mu L \cdot L^{-1}$ ^[21];把一定量的硫酸铜溶于少量蒸馏水,按离子浓度配置成 5.0 $g \cdot L^{-1}$ 母液备用;试验时将母液用曝气 48 h 以上自来水稀释到所需浓度.

1.3 毒性试验设计

试验采用半静止式试验方法,试验周期为 5 d. 试验用水为曝气 48 h 以上的自来水,其水质条件和驯养用水一样. 具体试验采用水浴法,即用 5 个 60 cm×40 cm×45 cm 玻璃水族缸,缸中放置加热棒与温度计控制恒温,同时定期以曝气装置使缸内水温均匀;每个水族缸上放有日光灯,试验期间保持 12 h 光照 12 h 黑暗;每个缸中放置 8 个 2 000 mL 烧杯.

由 Cu^{2+} 和毒死蜱单一毒性试验所得 96 h 的 LC_{50} 值 (Cu^{2+} 对锯齿新米虾 96 h 的 LC_{50} 为 3.44 $mg \cdot L^{-1}$,毒死蜱对锯齿新米虾 96 h 的 LC_{50} 为 0.06 $\mu g \cdot L^{-1}$) 的 1/40、1/20、1/10 和 1/5 设 4 个浓度梯度,即 Cu^{2+} 浓度组 $\rho(Cu^{2+})$ 为 0.086、0.172、0.344 和 0.688 $mg \cdot L^{-1}$;毒死蜱浓度组 $\rho(\text{毒死蜱})$ 为 0.001 5、0.003 0、0.006 0 和 0.012 0 $\mu g \cdot L^{-1}$,同时设置曝气自来水空白对照组以及溶剂(助溶剂+乳化剂)最高浓度对照组,每个浓度组设 3 个平行. 试验中将 Cu^{2+} 溶液 0.086 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.172 $mg \cdot L^{-1}$ 、毒死蜱溶液 0.001 5 $\mu g \cdot L^{-1}$ 和 0.003 0 $\mu g \cdot L^{-1}$ 定义为较低浓度, Cu^{2+} 溶液 0.344 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.688 $mg \cdot L^{-1}$ 、毒死蜱溶液 0.006 0 $\mu g \cdot L^{-1}$ 和 0.012 0 $\mu g \cdot L^{-1}$ 定义为较高浓度. 每个烧杯中加入试验药液 2 000 mL,投入经过驯养并做过筛选的锯齿新米虾 20 只. 试验期间不投饵,定期监测 pH,溶氧等,防止溶氧不足以及毒死蜱挥发影响试验,24 h 更换一次试验液. 本研究进行预试验,一直到第 5 d,各试验组锯齿新米虾均未出现死亡. 其死亡判断标准为:

虾体静置于烧杯底部并用玻璃棒多次碰触完全无反应即判定为死亡。

1.4 样品处理、蛋白浓度和酶活性测定

在试验后的第 1、2、3、4、5 d 结束时从各试验组随机取 3 只锯齿新米虾,用纱布擦拭干体表,迅速取其机体肌肉组织置于冰冷的 0.86% 生理盐水中漂洗干净,滤纸拭干,称重,放入 10 mL 的小烧杯中。加入 0.86% 的冷生理盐水(生理盐水的体积为肌肉组织块重量的 9 倍),用剪刀剪碎肌肉组织(此过程小烧杯置于冰水中)。将剪碎的肌肉组织转入匀浆器中,在冰水浴中研磨 8 min,使组织匀浆化。将制备好的 10% 肌肉组织匀浆用普通离心机 2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min,取上清液进行酶活分析。蛋白浓度、MDA 含量、总 SOD 和 AChE 活力测定参照购自南京建成生物研究所的蛋白质、丙二醛(MDA)、总超氧化物歧化酶(总 SOD)和乙酰胆碱酯酶(AChE)测试盒说明书进行。

1.5 数据处理

试验所得数据以 3 个平行组的平均值 $\pm$ 标准差表示;在 IBM SPSS Statistics 20.0 中采用 t 检验和单因子方差分析(One-way ANOVA)对浓度组与对照组、各浓度组之间进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。暴露时间与酶活性的关系作图在 Origin 9.0 中完成(在以下各柱形图中, * 表示:与对照组相比, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Cu^{2+} 对锯齿新米虾蛋白浓度、MDA 含量、总 SOD 和 AChE 活力的影响

锯齿新米虾暴露于不同浓度 Cu^{2+} 溶液下,随着暴露时间的延长,肌肉组织蛋白浓度基本呈下降趋势。试验第 5 d 与第 1 d 相比,除 0.172 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组外,其余各浓度组蛋白浓度均显著降低($P < 0.05$),见图 1。在暴露同一时间,空白对照组、较低浓度 0.086 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.172 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组蛋白浓度差异不显著($P > 0.05$);但较高浓度 0.344 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.688 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组蛋白浓度显著低于另外 3 个浓度组($P < 0.05$),且 0.344 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组蛋白浓度显著高于 0.688 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组。

图 2 反映了在不同浓度 Cu^{2+} 溶液暴露下,锯齿新米虾肌肉组织 MDA 含量变化。在整个试验阶段,除较低浓度 0.086 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组,其它浓度组中锯齿新米虾肌肉组织 MDA 含量均显著高于空白对照组($P < 0.05$),即在试验的第 1 d,随着 Cu^{2+} 溶液浓

度的升高,MDA 含量呈不断上升的趋势。在试验的第 2~5 d,不同浓度 Cu^{2+} 溶液中,随着时间的延长,不同浓度组中 MDA 含量变化不同。较高浓度 0.344 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.688 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组中,随着暴露时间的延长,MDA 含量逐渐降低,且在暴露同一时间,0.344 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 MDA 含量显著高于 0.688 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组($P < 0.05$);较低浓度 0.086 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组中,随着暴露时间的延长,锯齿新米虾肌肉组织 MDA 含量呈上升-下降-上升趋势,且在试验结束时达最大值。

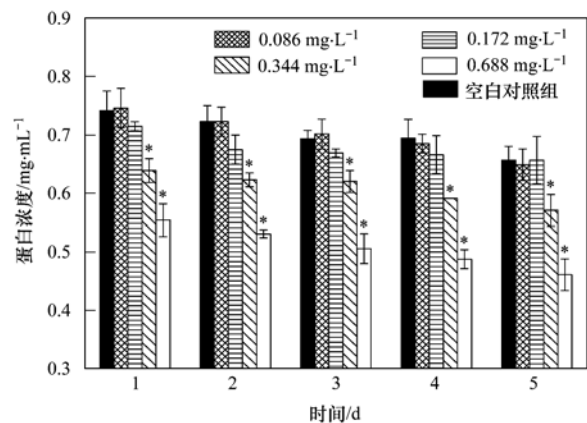


图 1 Cu^{2+} 对锯齿新米虾蛋白质浓度的影响

Fig. 1 Effects of Cu^{2+} on the protein concentration of *N. denticulate*

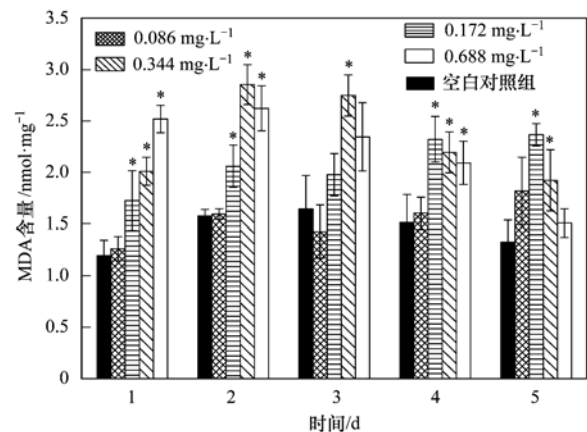


图 2 Cu^{2+} 对锯齿新米虾 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effects of Cu^{2+} on the MDA activity of *N. denticulate*

由图 3 可知,锯齿新米虾暴露在较低浓度 Cu^{2+} 溶液下,其肌肉组织总 SOD 活力受到抑制,而较高浓度总 SOD 活性先是被激活,再被抑制,最后又有所回升。表现为较低浓度 0.086 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.172 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组中其肌肉组织总 SOD 活力基本均低于空白对照组(第 4 d 时 0.172 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组有所

升高)。较高浓度 $0.344 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.172 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组总 SOD 活力在试验的第 1 d 达最大值,即此时肌肉组织总 SOD 活性被激活;在第 2 d 总 SOD 活力显著低于空白对照组;而第 3 d 和第 4 d 均有不同程度的回升且显著高于空白对照组 ($P < 0.05$)。在试验结束时, Cu^{2+} 对锯齿新米虾肌肉组织总 SOD 活性表现为抑制效应。

锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 溶液下肌肉组织 AChE 活力变化见图 4。在整个试验阶段,浓度组肌肉组织 AChE 活力与空白对照组相比基本较低(第 3 d 和第 4 d 较低浓度 $0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组 AChE 活力高于空白对照组),即肌肉组织 AChE 活性受到抑制。空白对照组从试验第 1 d 到试验结束, AChE 活力显著降低 ($P < 0.05$)。随着暴露时间的延长,较高浓度 $0.344 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.688 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 AChE 活力呈逐渐降低的趋势,且试验结束时和试验第 1 d 相比显著降低 ($P < 0.05$);较低浓度 $0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.172 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组在试验结束时, AChE 活力显著降低 ($P < 0.05$)。

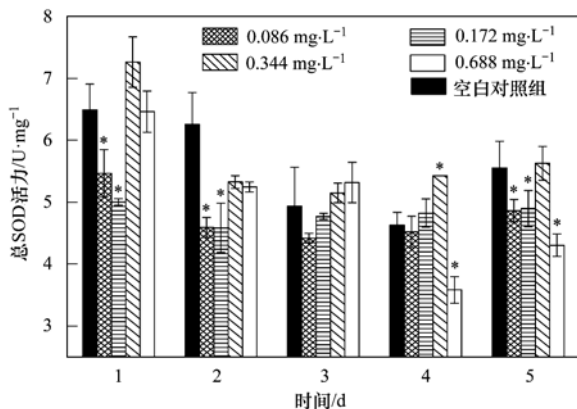


图 3 Cu^{2+} 对锯齿新米虾总 SOD 活力的影响

Fig. 3 Effects of Cu^{2+} on the total SOD of *N. denticate*

2.2 毒死蜱对锯齿新米虾蛋白质浓度、MDA 含量、总 SOD 和 AChE 活力的影响

锯齿新米虾暴露于不同浓度毒死蜱溶液下,随着时间的延长,肌肉组织蛋白浓度呈下降趋势,且试验第 5 d 与第 1 d 相比,各浓度组中蛋白浓度均显著降低 ($P < 0.05$),见图 5。在试验第 1 d,随着毒死蜱浓度的增大肌肉组织蛋白浓度呈逐渐降低趋势,而在第 2 ~ 5 d,毒死蜱浓度与蛋白浓度之间无规律性的变化。在整个试验阶段,助溶剂对照组中蛋白浓度除第 2 d 高于空白对照组外,其他时间段均低于空白对照组 ($P > 0.05$),高于其它浓度组 ($P >$

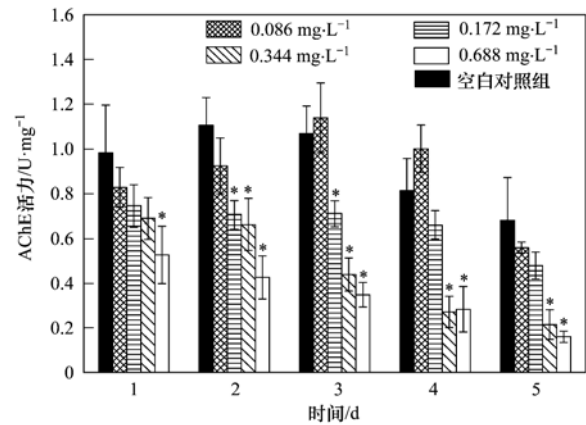


图 4 Cu^{2+} 对锯齿新米虾 AChE 活力的影响

Fig. 4 Effects of Cu^{2+} on the AChE activity of *N. denticate*

0.05);空白对照组中蛋白浓度除第 2 d 低于助溶剂对照组和低浓度 $0.0015 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组外,其余时间段均高于助溶剂对照组和其他浓度组。

在一定浓度毒死蜱溶液暴露下,锯齿新米虾脂质过氧化程度严重。表现为在整个试验阶段,浓度组中锯齿新米虾肌肉组织 MDA 含量均显著高于空白对照组 ($P < 0.05$),见图 6。在试验的第 1 d,随着毒死蜱溶液浓度的升高,MDA 含量呈不断上升的趋势,助溶剂对照组 MDA 含量介于空白对照组和浓度组之间。在试验的第 1 ~ 5 d,较高浓度 $0.006 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组中,随着时间的延长,MDA 含量呈逐渐上升趋势,而 $0.012 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 MDA 含量则先上升后下降。较低浓度 $0.0015 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 MDA 含量随着时间的延长保持着持续升高的趋势,到第 5 d 略有下降,而 $0.003 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 MDA 含量在第 2 d 上升后基本保持着平稳状态。助溶剂对肌肉组织也产生了一定的损伤作用,整个试验过程中,助溶剂对照组 MDA 含量高于空白对照组,但小于浓度组,且与空白对照组保持着相同的变化趋势。

由图 7 可知,锯齿新米虾暴露在不同浓度毒死蜱溶液下,肌肉组织总 SOD 活力在试验开始后的第 1 ~ 2 d 受到抑制,但随着时间的延长,活性逐渐被激活。助溶剂对照组和浓度组中锯齿新米虾肌肉组织总 SOD 活力在试验开始后的第 1 ~ 2 d 低于空白对照组 ($P > 0.05$),在第 3 ~ 5 d 逐渐有所回升,且在试验的第 5 d,空白对照组总 SOD 活力也有所回升,此时总 SOD 活力显著高于最高浓度组 $0.012 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 ($P < 0.05$),但与助溶剂对照组和另外 3 个浓度组无显著差异 ($P > 0.05$)。

图 8 反映了锯齿新米虾暴露在不同浓度毒死蜱

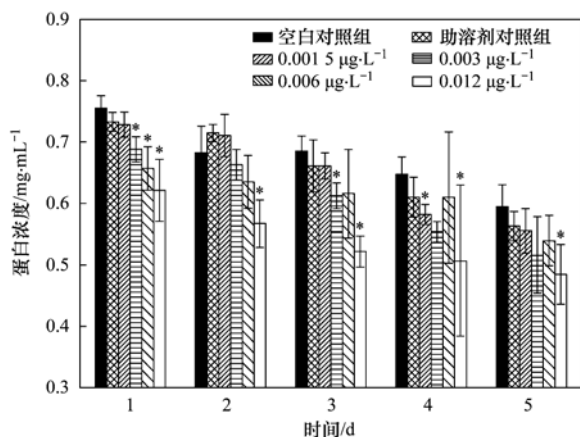


图5 毒死蜱对锯齿新米虾蛋白质浓度的影响

Fig. 5 Effects of chlorpyrifos on the protein concentration of *N. denticate*

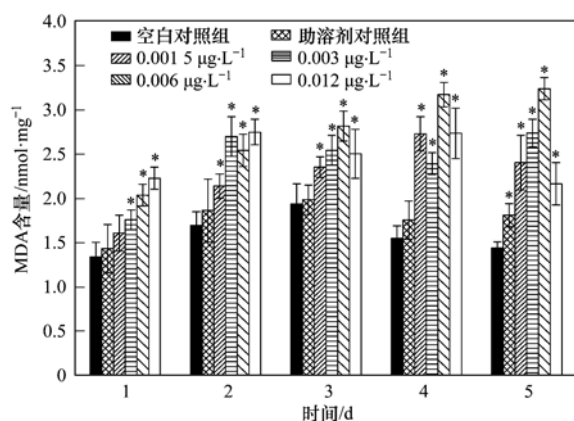


图6 毒死蜱对锯齿新米虾 MDA 含量的影响

Fig. 6 Effects of chlorpyrifos on the MDA activity of *N. denticate*

溶液下肌肉组织 AChE 活力受到抑制。所有浓度组在试验结束时与第 1 d 相比,肌肉组织 AChE 活力显著降低 ($P < 0.05$),而助溶剂对照组无显著变化。在试验的第 2 ~ 5 d,在相同时间下,较低浓度 $0.0015 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组与溶剂对照组 AChE 活力无显著差异 ($P > 0.05$); 另外 3 个浓度组随着时间的延长,AChE 活力逐渐降低,且除 $0.006 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组在试验的第 3 d AChE 活力略高于 $0.003 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组外,AChE 活力随浓度的升高逐渐降低。

3 讨论

3.1 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾蛋白质浓度影响

蛋白质作为生物体生命过程中重要结构和功能分子之一,它不仅是构建生物体的重要组成部分,同时也是作为生物体的能源物质,还有一些酶、激素、

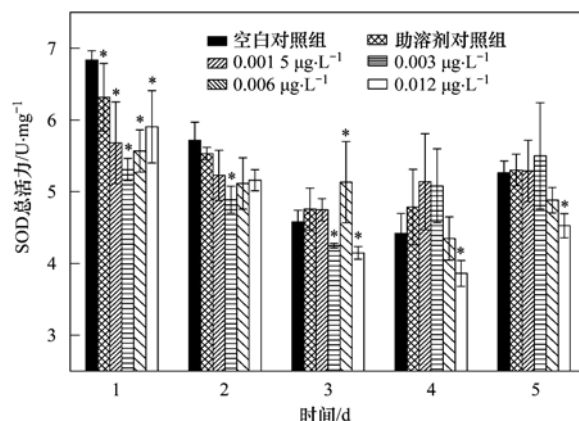


图7 毒死蜱对锯齿新米虾总 SOD 活力的影响

Fig. 7 Effects of chlorpyrifos on the total SOD activity of *N. denticate*

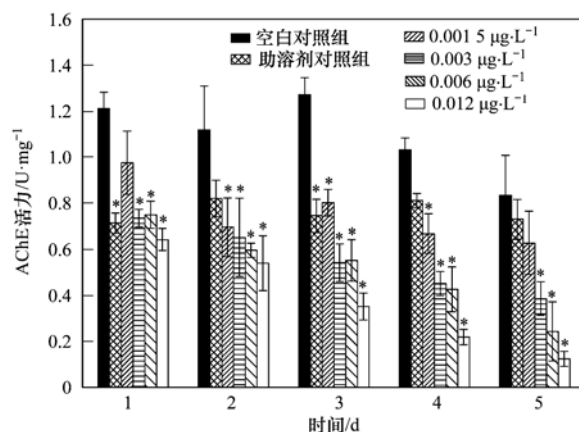


图8 毒死蜱对锯齿新米虾 AChE 活力的影响

Fig. 8 Effects of chlorpyrifos on the AChE activity of *N. denticate*

抗体类的蛋白质对机体的生理生化作用起着重要作用^[22]。当生物体受到胁迫时,其体内蛋白浓度会发生相应的变化。有研究发现,在一定浓度的重金属胁迫下,重金属元素可与生物体蛋白质等高分子物质结合,影响蛋白质的分解与合成^[23]。也有研究指出有机磷农药进入生物体内,也会与机体内蛋白质结合,从而影响着蛋白质含量、结构与功能^[24,25]。

本研究中,锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下,随着时间的延长,肌肉组织蛋白浓度均有不同程度的降低,说明在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液的胁迫下,肌肉组织蛋白质的合成与分解受到了影响。在 Cu^{2+} 较低浓度 $0.086 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组,试验开始后的第 3 d,锯齿新米虾肌肉组织蛋白浓度高于空白对照组,即此浓度的 Cu^{2+} 溶液在此时促进了锯齿新米虾组织细胞合成代谢,促进了蛋白质的合成。在毒死蜱试验中,助溶剂对照组和较低浓度 $0.0015 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组在第 2 d 也有相似的现象。从试验第

1 d 到试验结束时,暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下锯齿新米虾肌肉组织蛋白浓度降低程度不同,可能是因为 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾致毒作用机制不同,从而对机体的致毒效应不同. 而在整个试验过程中,随着时间的延长, Cu^{2+} 和毒死蜱溶液中空白对照组的蛋白浓度呈降低趋势,可能是由于试验过程中没有喂食,形成了饥饿胁迫,导致蛋白含量降低. 这与周凡等^[26]和武玉琮等^[27]分别对莫桑比克草虾和多刺裸腹蚤的研究结果一致.

3.2 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾总 SOD 活力和 MDA 含量影响

当环境污染物进入机体后,机体内生物化学改变是毒物引起生物体损伤的最早、最灵敏的改变,而且生化改变是其他各种水平和层次(器官、个体和种群等)改变的基础,因而生物化学水平的生物效应可以作为生态毒理学损伤的生物标志物^[28]. 抗氧化防御系统各成分和脂质过氧化物作为生化改变的效应成分,对污染物胁迫极其敏感,其活性或含量的变化可以反映机体氧化应激情况,从而对机体损伤情况有一定的指示作用^[29]. SOD 是生物体内抗氧化系统中的一种重要的酶,是机体清除超氧自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)的首要物质,生成歧化产物 H_2O_2 再被其他酶(过氧化物酶和过氧化氢酶)分解为 H_2O 和 O_2 ,从而减轻毒物对机体的损伤作用,维持机体氧化和抗氧化平衡,其活力的大小间接反映了机体清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的能力^[30,31]. 超氧自由基还能攻击生物膜中的多不饱和脂肪酸,引发脂质过氧化作用,形成脂质过氧化物,如丙二醛(MDA)、酮基等^[32]. 因此笔者通过测定机体中 MDA 含量的高低可以反映出机体内脂质过氧化损伤的程度^[33].

在本研究中,锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 溶液下,在较低浓度 $0.086 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.172 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组中其肌肉组织总 SOD 活力基本上均低于空白对照组,说明在此浓度下,产生的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 等相对较少,机体受到的损伤相对较弱,总 SOD 处于抑制状态. 而较高浓度 $0.344 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.172 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组中,在试验开始后的第 1 d 总 SOD 活性随自由基的增多而被诱导增加,此时 SOD 酶保护系统打开,刺激了 SOD 的合成,是生物对污染物胁迫的适应性反应^[34]. 到第 2 d,总 SOD 活力显著降低,机体内积累了过量的 $\text{O}_2^{\cdot-}$,从而使锯齿新米虾机体受到损伤. 到试验的第 3 和 4 d,总 SOD 活力均有所回升,可能原因是 Cu^{2+} 溶液暴露引起体内自由基积累,使得 SOD 活性代偿性增强以清除体内产生的过量的

$\text{O}_2^{\cdot-}$ 自由基,保护机体免受氧化损伤. 这和文献^[35,36]报道的结果相一致. 在毒死蜱溶液暴露下,在试验开始后的第 1 ~ 2 d,锯齿新米虾肌肉组织总 SOD 活力受到抑制,但其活力总体较暴露在 Cu^{2+} 溶液中要高,说明此浓度组下,毒死蜱对锯齿新米虾肌肉组织产生的氧化损伤较 Cu^{2+} 严重. 到试验的第 3 d,一些浓度组中 SOD 活力高于空白对照组,说明毒死蜱的侵入造成了锯齿新米虾肌肉组织活性氧自由基的增多,启动了机体的应激反应,诱导产生了大量的 SOD 以清除自由基,陈琳琳等对紫贻贝的研究中也得出相似结论^[37].

一些研究指出, Cu^{2+} 、毒死蜱的胁迫会使水生生物脂质过氧化水平提高^[38,39]. 本研究中也发现,锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下,肌肉组织内 MDA 含量变化相似,即都有不同程度的提高. 且在一定浓度范围内,随着 Cu^{2+} 和毒死蜱浓度增加,MDA 含量呈逐渐上升的趋势,说明 Cu^{2+} 和毒死蜱加快了锯齿新米虾肌肉组织脂质过氧化作用. 这一结果和刘浩明等对缢蛏稚贝的研究结果相一致^[40]. 杨涛等^[41]研究了菲胁迫对红鳍笛鲷的不同组织 MDA 含量的影响,虽然胁迫均会使脂质过氧化水平增高,但在相同的胁迫时间下,鳃的脂质过氧化程度要高于肝脏,说明即使是同一污染物对生物体产生的胁迫,不同部位脂质过氧化水平也不一样. 因而锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下,除了本研究中肌肉组织,对其他组织的脂质过氧化水平有待进一步研究.

3.3 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾 AChE 活力影响

AChE 是生物神经传导中的一种关键的神经递质酶,它能水解神经递质乙酰胆碱保证神经信号在机体的正常传导,当 AChE 活性受到抑制时,神经递质在神经突触和神经肌肉节点中不能进行正常的水解作用,这样就使神经递质在突触中积累,从而对机体中枢神经系统产生一定的影响^[42,43]. AChE 较多用于评价水体中有机磷农药和氨基甲酸酯类的毒性,它们的结构与神经递质乙酰胆碱的结构相似,能竞争性地结合 AChE 活性位点,从而抑制 AChE 活性^[44~46].

有机磷农药的重要作用途径之一是通过抑制 AChE 活性使神经递质乙酰胆碱不能降解而大量聚积^[47],也有一些报道中指出 AChE 也可以用于指示重金属离子污染状况研究^[48,49]. 本研究中,锯齿新米虾暴露在 Cu^{2+} 溶液下,浓度组肌肉组织 AChE 活力低于空白对照组,且在较高浓度下,随着浓度的增

加而降低,表明此浓度范围内 Cu^{2+} 对肌肉组织 AChE 活性呈抑制效应,与 Cu^{2+} 浓度呈剂量-效应关系。在试验结束时,这种抑制效应达到最高;在较高浓度组,随着暴露时间的延长,AChE 活性的抑制效应呈升高趋势。笔者的研究中 Cu^{2+} 浓度组对锯齿新米虾肌肉组织 AChE 活性的影响与王晶等^[50]和贾秀英等^[51]的研究结果基本一致,但在试验的第 3~4 d,较低浓度 $0.086 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 对 AChE 有一定的诱导作用,因而, Cu^{2+} 在锯齿新米虾肌肉 AChE 的诱导或抑制机制还需进一步探讨。通过以上研究结果,笔者也可以得出:AChE 作为 Cu^{2+} 胁迫锯齿新米虾的生理生化分析时,应同时考虑到胁迫浓度和胁迫时间,从而提高其可靠性。

AChE 是有机磷农药常用的作用靶标,已有研究将之用于特异性生物标志物来监测该类有机化合物^[52]。毒死蜱作为一种有机磷农药,其对生物的神经系统具有一定的损伤作用。本试验中,试验结束时与试验第 1 d 结束时相比,锯齿新米虾的肌肉组织 AChE 活性显著受到抑制($P < 0.05$);试验第 1 d 结束后,较低浓度 $0.0015 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组在时间上的抑制效果不显著,但其他较高浓度组中 AChE 活性随着时间的延长而呈降低趋势。以上说明,毒死蜱对锯齿新米虾肌肉组织的正常生理功能产生了影响,其浓度越高,产生的损伤效果越大,这与在本试验中所观察到的,高浓度的毒死蜱中锯齿新米虾表现出的异常兴奋的状态一致。一些学者研究了毒死蜱对水生动物不同部位的神经损伤作用,发现毒死蜱对水生动物不同部位组织 AChE 活力的影响是不同的,这样能更加合理准确地探讨其对水生动物的中枢神经系统的损伤作用,其依据是不同部位组织 AChE 分布不同,且酶的比活力高低不同^[53]。而本文由于一些实际性问题,如虾体太小等,仅取其肌肉组织作了研究,因而毒死蜱对锯齿新米虾神经中枢更加详尽的损伤作用还应对虾体其他组织部位(脑组织、肝脏和鳃组织等)进行更加精细的研究。

4 结论

(1) 锯齿新米虾暴露在不同浓度 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液下,随着时间的延长,肌肉组织蛋白浓度均有不同程度的降低。饥饿胁迫,也导致蛋白含量有所降低。

(2) Cu^{2+} 溶液较低浓度组和毒死蜱较高浓度组中,总 SOD 活性表现抑制效应; Cu^{2+} 溶液较高浓度组表现为“抑制-诱导-抑制”的变化趋势,而毒死蜱

较低浓度组表现为“抑制-诱导”的变化趋势。两种污染物溶液中 MDA 含量变化相似,且在一定浓度范围内,随着 Cu^{2+} 和毒死蜱浓度增加,MDA 含量呈逐渐上升的趋势,说明 Cu^{2+} 和毒死蜱加快了锯齿新米虾肌肉组织脂质过氧化作用。

(3) AChE 活性在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液中表现为抑制效应,且在 Cu^{2+} 和毒死蜱溶液的较高浓度组中,其活性随浓度的增加而呈逐渐降低的趋势,说明 Cu^{2+} 和毒死蜱对锯齿新米虾肌肉组织的正常生理功能产生了影响,其浓度越高,产生的损伤效果越大。因而,对这两种污染物的含量应该加强监控。

参考文献:

- [1] 王小钢. 我国水污染事故信息披露回顾与展望[J]. 环境保护, 2014, 42(5): 44-46.
- [2] 戚平平, 刘亮, 苏乃洲, 等. 我国水体突发性污染事故不完全统计分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(5): 335-341.
- [3] 李林. 论水环境中的重金属监测方法[J]. 资源节约与环保, 2014, (1): 106-107.
- [4] 雷昌文, 曹莹, 周腾耀, 等. 太湖水体中 5 种有机磷农药混合物生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6): 937-944.
- [5] 郑桂红, 王菲, 孙建梅, 等. 重金属铜对红鲫组织的氧化损伤作用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 238-240.
- [6] Zhai S J, Xiao H, Shu Y, et al. Countermeasures of heavy metal pollution[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2013, 32(4): 446-450.
- [7] 王川, 周巧红, 吴振斌. 有机磷农药毒死蜱研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 123-127.
- [8] 李亚楠, 刘晶晶, 陈少华, 等. 毒死蜱的应用现状及降解研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 38(6): 92-96.
- [9] Rosa N, Julià S, Francisco C, et al. Measurement of pollution levels of organochlorine and organophosphorus pesticides in water, soil, sediment, and shrimp to identify possible impacts on shrimp production at Jiquilisco Bay[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2012, 19(8): 3547-3555.
- [10] 朱光艳. 美国对毒死蜱采取限制使用措施[J]. 农药科学与管理, 2012, 33(12): 64-64.
- [11] 问华肖, 魏晨曦, 陈绍恢, 等. 苯和甲醛联合染毒对小鼠脾脏的损伤[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 571-576.
- [12] Krumschnabel G, Ebner H L, Hess M W, et al. Apoptosis and necroptosis are induced in rainbow trout cell lines exposed to cadmium[J]. Aquatic Toxicology, 2010, 99(1): 73-85.
- [13] 史慧勤, 张利军, 苑晓燕, 等. 氯化镉暴露对斑马鱼幼鱼神经行为毒性作用[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(3): 374-380.
- [14] 熊勤犁, 史雅娟, 吕永龙, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴二苯醚(BDE-47)对大型溞(*Daphnia magna*)的毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(1): 97-104.
- [15] Huang D J, Chen H C. Oxygen consumption, ammonia-n excretion, and growth rate in juvenile green-neon shrimp

- (*Neocaridina denticulata*) exposed to chlordane and lindane[J]. *Acta Zoologica Taiwanica*, 2004, **14**(2): 65-76.
- [16] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志·无脊椎动物(第三十六卷)甲壳动物亚门、十足目、匙指虾科[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1-12, 74-77.
- [17] 甄胜涛, 穆淑梅, 刘涛, 等. 中华锯齿米虾内外性征分化时间与特征[J]. *淡水渔业*, 2012, **42**(2): 72-75.
- [18] 赵梦然, 康现江, 穆淑梅, 等. 中华锯齿米虾卵母细胞卵黄发生的超微结构[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2009, **29**(3): 318-323, 328.
- [19] 王战芳, 崔晓东, 巩海雪, 等. 中华锯齿米虾生物学零度及有效积温的研究[J]. *河北渔业*, 2014, (2): 10-12.
- [20] 宫本纯之, 泷本善之, 沈俭. OECD 化学品试验法准则介绍(上)[J]. *农药译丛*, 1982, (4): 10-18, 45.
- [21] OECD. OECD guidelines for the testing of chemicals. Section 2: Effects on Biotic Systems Test No. 203: Acute Toxicity for Fish [C]. Organization for Economic Cooperation and Development, 1992. 1-9.
- [22] 郇托娅, 林玉锁, 贺静. 土壤中 Cu 和 Pb 单一及复合污染对蚯蚓体内蛋白含量和 SOD 活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(5): 1985-1990.
- [23] 周文彬, 邱保胜. 藻类对重金属的耐性与解毒机理[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(3): 265-272.
- [24] 谢后雨, 陈海水, 孙军, 等. 血液灌流治疗重度有机磷农药中毒 82 例[J]. *中国危重病急救医学*, 2005, **17**(10): 610.
- [25] 程冕, 刘莉, 史有松. 血液灌流联合血必净注射液治疗重度有机磷农药中毒疗效分析[J]. *中国医药*, 2010, **5**(1): 44-45.
- [26] 周凡, 肖金星, 陆静, 等. 饥饿对莫桑比克草虾幼虾生存、肌肉组成、消化酶活力及免疫因子的影响[J]. *水产科技情报*, 2013, **40**(2): 67-71.
- [27] 武玉珑, 姜美玲, 杨惠珍, 等. 饥饿胁迫对多刺裸腹蚤与蛋白质代谢的影响[J]. *四川动物*, 2011, **30**(5): 721-723, 727.
- [28] 孟紫强. 生态毒理学原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 54-62.
- [29] Livingstone D R. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, **42**(8): 656-666.
- [30] 徐风凤, 朱丽岩, 巩文静, 等. 四溴联苯醚(BDE-47)对两种海洋桡足类动物的毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(5): 737-747.
- [31] 陈艳珍. 蜂王浆冻干粉对衰老小鼠抗氧化能力的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2014, **41**(5): 255-258.
- [32] 朱松, 马朝阳, 艾连中, 等. 酶促乙酰化 EGCG 清除自由基及抗脂质过氧化活性研究[J]. *现代食品科技*, 2014, **30**(1): 22-27, 37.
- [33] Zhang J H, Zhang H, Wang L, *et al.* Antioxidant activities of the rice endosperm protein hydrolysate: identification of the active peptide[J]. *European Food Research and Technology*, 2009, **229**(4): 709-719.
- [34] 赵元凤, 吕景才, 宋晓阳, 等. 镉污染对鲢鱼超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性的影响[J]. *农业生物技术学报*, 2002, **10**(3): 267-271.
- [35] 孙娜, 王宇佳, 柳郁滨, 等. Hg^{2+} 对水丝蚓的急性毒性及超氧化物歧化酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, **28**(17): 143-146.
- [36] 陈家长, 杨光, 马晓燕, 等. 低浓度阿维菌素对鲤鱼超氧化物歧化酶(SOD)的影响[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(6): 823-828.
- [37] 陈琳琳, 张高生, 陈静, 等. 汞、硒暴露对紫贻贝(*Mytilus edulis*)抗氧化酶系统的影响[J]. *生态毒理学报*, 2011, **6**(4): 383-388.
- [38] Vlahogianni T H, Valavanidis A. Heavy-metal effects on lipid peroxidation and antioxidant defence enzymes in mussels *Mytilus galloprovincialis* [J]. *Chemistry and Ecology*, 2007, **23**(5): 361-371.
- [39] Papadimitriou E, Loumbourdis N S. Exposure of the frog *Rana ridibunda* to copper: impact on two biomarkers, lipid peroxidation, and glutathione [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **69**(6): 885-891.
- [40] 刘浩明, 董迎辉, 霍礼辉, 等. Cu^{2+} 对缢蛏稚贝的急性毒性及对抗氧化酶活力和丙二醛含量的影响[J]. *中国水产科学*, 2012, **19**(1): 182-187.
- [41] 杨涛, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 菲胁迫对红鳍笛鲷急、慢性毒性效应的研究[J]. *水产学报*, 2011, **35**(2): 298-304.
- [42] 李世凯, 张健龙, 江敏, 等. 伊维菌素对斑马鱼(*Danio rerio*)生理生化特性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2014, **14**(1): 300-305.
- [43] Dutta H M, Arends D A. Effects of endosulfan on brain acetylcholinesterase activity in juvenile bluegill sunfish [J]. *Environmental Research*, 2003, **91**(3): 157-162.
- [44] 张丹, 陈增菊, 李谨谨, 等. 3 种农药对花翅摇蚊毒力和 AChE 活性影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(12): 3565-3567.
- [45] Jebali J, Banni M, Guerbej H, *et al.* Effects of malathion and cadmium on acetylcholinesterase activity and metallothionein levels in the fish *Seriola dumerilli* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2006, **32**(1): 93-98.
- [46] Min S K, Kim J H, Kim S, *et al.* Various biomarker and bioindicator responses in muddy loach (*Misgurnus anguillicadatus*) exposed to endosulfan for 21 days [J]. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 2010, **2**(2): 125-131.
- [47] 张宇童, 杨兆娜, 谢飞, 等. 有机磷农药神经发育毒性作用机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(12): 3561-3564.
- [48] Dellali M, Gnassia Barelli M, Romeo M, *et al.* The use of acetylcholinesterase activity in *Ruditapes decussatus* and *Mytilus galloprovincialis* in the biomonitoring of bizerta lagoon [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2001, **130**(2): 227-235.
- [49] 冯磊, 戴昕鹏, 张军, 等. 重金属污染条件下花背蟾跳跃能力与骨骼肌 ATP 酶和 AChE 活性变化研究[J]. *四川动*

- 物, 2012, **31**(4): 553-557.
- [50] 王晶, 周启星, 张倩茹, 等. 沙蚕暴露于石油烃、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 毒性效应及乙酰胆碱酯酶活性的响应[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1796-1801.
- [51] 贾秀英, 董爱华. Cd、Cr(VI) 及其复合污染对鲫鱼脑组织乙酰胆碱酯酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(3): 337-339.
- [52] 陈仪取, 郭祥群. 利用 AChE 活性作生物标记监测水环境污染的研究进展[J]. 福建化工, 2003, (2): 30-34.
- [53] 仪美芹, 于彩虹, 杨明, 等. 鲫鱼 (*Carassius auratus*) 体内胆碱酯酶的组织分布及其对氨基甲酸酯类杀虫药剂的敏感度[J]. 安全与环境学报, 2006, **6**(3): 57-60.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行