

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究

王艳, 马泽民, 吴石金*

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014)

摘要: 以赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 为受试生物, 通过滤纸接触法和自然土壤法研究邻苯二甲酸二甲酯 (Dimethyl Phthalate, DMP)、邻苯二甲酸二乙酯 (Diethyl Phthalate, DEP) 和邻苯二甲酸二正丁酯 (Di-*n*-butyl Phthalate, DBP) 的急性毒性效应。结果表明, DEP 和 DMP 对赤子爱胜蚓毒性显著, 滤纸接触法染毒 48 h 时, DMP 和 DEP 的半数致死剂量 (LD_{50}) 分别为 $129.603 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $145.336 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。自然土壤法染毒 14 d 时, DMP 和 DEP 的 LC_{50} 分别为 $1560.120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1516.186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。DBP 的 LD_{50} 尚无确切数据。自然土壤法研究 DMP、DEP 与 DBP 对蚯蚓组织超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和乙酰胆碱酯酶 (AChE) 活性的影响。结果表明, SOD、CAT 和 AChE 活性对 DMP、DEP 和 DBP 的毒性响应各不相同, 其中, DMP、DEP 和 DBP 的浓度对 SOD、CAT 和 AChE 活性呈显著性影响。SOD 活性被 DMP 和 DEP 诱导增加。CAT 的活性在 DEP 和 DBP 低浓度下诱导高浓度作用下抑制, 而 AChE 活性在 DEP 和 DBP 低浓度下抑制高浓度下诱导。处理时间对 SOD、AChE 活性无显著性影响。

关键词: 邻苯二甲酸酯类; 赤子爱胜蚓; 污染胁迫; 急性毒性; 抗氧化酶

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0770-10

Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on *Eisenia foetida*

WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The acute toxic effects of DMP, DEP and DBP to earthworms (*Eisenia foetida*) were examined in this study. The two pollutants are tested by filter paper contact method and natural soil method, results indicated that they were both poisonous to earthworms. Earthworms were exposed to DMP and DEP for 48 h by filter paper contact method, LC_{50} (DMP) is $129.603 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ and LC_{50} (DEP) is $145.336 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Earthworms were exposed to DMP and DEP for 14 d by natural soil method, LC_{50} (DMP) is $1560.120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and LC_{50} (DEP) is $1516.186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. While non-calculatable for the LC_{50} of DBP due to its low water solubility, penetrating into the skin and cells of earthworm is not easy. The natural soil test method was used to study the effects of DMP, DEP and DBP on enzyme activities of earthworms, activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and acetylcholinesterase (AChE) were measured. SOD activity was induced by DMP and DEP, CAT is the most sensitive and the activity was induced by DEP and DBP at the low concentration and inhibited at the high concentration. AChE activity was inhibited by DEP and DBP at the low concentration and induced at the high concentration, finally exhibited a tendency to recover to the control level at 28 d.

Key words: phthalate acid esters; *Eisenia foetida*; pollution threat; acute toxicity; antioxidant enzymes

邻苯二甲酸酯类化合物 (phthalate esters, PAEs), 包括邻苯二甲酸二甲酯 (DMP)、邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、邻苯二甲酸二正丁酯 (DBP)、邻苯二甲酸二正辛酯 (DOP)、邻苯二甲酸二异辛酯 (DEHP) 和邻苯二甲酸丁基苄酯 (BBP), 广泛应用于塑料工业、医用产品、化妆品中, 常作为塑化剂来提高塑料制品的柔韧性。邻苯二甲酸酯类化合物对动物有致癌、致畸和致突变性以及具有较强的内分泌干扰性效应、生殖毒性等^[1,2]。近年来, 由于各类水体、土壤和大气中都检测出较高浓度的 PAEs, 在水生和陆生动物及人体中均有报道检测出 PAEs, 对生态环境和人体健康构成了极大危害, PAEs 的环境污染问题已成为国际环境化学优先研

究领域。

蚯蚓是土壤生态系统中类群最大的生物, 是陆生生物与土壤生态环境信息传递的桥梁。由于蚯蚓在土壤中普遍存在并且能积累大量有机和无机污染物^[3,4], 因此, 蚯蚓在土壤污染的生态毒理学研究中承担着重要角色^[5]。赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 在标准土壤毒理试验中常作为一种模式生物, 是陆地

收稿日期: 2013-03-13; 修订日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20977087); 浙江省自然科学基金项目 (LY13B070008); 浙江省高校中青年学科带头人资助计划项目 (2013); 浙江省公益技术研究社会发展项目 (2010C33G2020078)

作者简介: 王艳 (1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态毒理及环境生物技术。

* 通讯联系人, E-mail: wujan28@zjut.edu.cn

生态毒理学的优先物种^[6], 其中 LD₅₀ 的测定是蚯蚓生态毒理学研究常见的方法, 污染物对蚯蚓组织酶活力的影响能更早地指示污染物的毒害水平, 因此, 蚯蚓组织酶活力的变化常作为土壤早期预警指标对土壤生态风险进行监测. 李文英等^[7]的研究发现 DBP 对斑马鱼肝脏、鳃中 SOD 酶活有明显影响. DEHP 对赤子爱胜蚓的细胞具有抗氧化损伤继而改变了组织酶的活性^[8]. 由此, 开展 PAEs 物质对土壤生物生长作用的毒理学研究, 对监测 PAEs 类有机污染物的污染风险预测和诊断有着十分重要的意义.

本研究测定了 DMP、DEP 和 DBP 对赤子爱胜蚓的急性毒性效应, 探讨了 DMP、DEP 和 DBP 对蚯蚓组织超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和乙酰胆碱酯酶(AChE)活性指标的影响, 旨在为此类有机物的环境安全性评价、探索监测土壤生态系统有机物污染的生态指标以及为揭示该类化合物对土壤生物的毒性机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 受试蚯蚓

赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)购置于浙江省金华市的蚯蚓养殖场. 试验选择体重在 300~400 mg, 环带明显, 大小相近的成年蚯蚓.

1.1.2 供试土壤

试验使用的自然土壤采自浙江工业大学屏峰校区后山, 采集 0~20 cm 的表层土壤. 其中该土壤的 pH 值为 6.8, 粗砂含量 5%, 细沙含量 10.4%, 粉砂含量 66.9%, 黏土含量 4.7%, 土壤含水率为 20%.

1.1.3 药品与试剂

邻苯二甲酸酯类 DMP、DEP、DBP 和丙酮均为分析纯. 超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒、过氧化氢酶(CAT)试剂盒和乙酰胆碱酯酶(AChE)试剂盒均由南京建成生物研究所提供.

1.1.4 仪器

台式高速冷冻离心机(Labofuge 400R, 德国), 分光光度计(UV1000, 上海天美科学仪器有限公司), 酶标仪(SpectraMax M2, 美国), 数显恒温水浴锅(H. H. S21-4, 金坛市万华实验仪器厂).

1.2 试验方法

1.2.1 滤纸法急性毒性试验浓度设计

预试验将蚯蚓(*Eisenia foetida*)分别经 DMP 和 DEP 染毒暴露 48 h 后, 找出最小致死浓度 MLD 和

最大致死浓度 LD₁₀₀, 在此区间内设置一系列浓度梯度进行试验. DMP 浓度: 0、60、100、140、180、220、260 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; DEP 浓度: 0、40、80、120、160、200、240 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

1.2.2 土壤法急性毒性试验浓度设计

根据预试验结果设置试验浓度. DMP 浓度: 0、600、1 400、2 200、3 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; DEP 浓度: 0、1 000、1 800、2 600、3 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2.3 土壤法亚急性毒性试验浓度设计

本试验采用自然土壤法, 根据蚯蚓暴露在 DMP、DEP、DBP 污染土壤中的急性毒性效应结果设置浓度, DMP 浓度: 0、50、250、1 250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; DEP 浓度: 0、40、200、1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. DBP 浓度: 0、30、150、750 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2.4 滤纸法蚯蚓染毒

参考中华人民共和国国家标准发布的蚯蚓对化学品急性毒性试验^[9]中所描述的方法, 进行滤纸法急性毒性试验. 试验用直径为 15 cm 的培养皿, 每个培养皿的底部垫有一张直径为 15 cm 的滤纸, 用丙酮溶解暴露物配成系列浓度梯度的溶液, 均匀洒在滤纸上(3 mL 的溶液可以将直径为 15 cm 的滤纸均匀地润湿), 空白对照组直接将 3 mL 丙酮均匀地洒在滤纸上. 在通风橱中待丙酮挥发干后加入蒸馏水打湿滤纸, 将清肠 1 d 的蚯蚓放入培养皿中, 用扎了洞的保鲜膜封口, 置于空调房中培养, 温度控制在为(22±2)℃、湿度约为 75% 的条件下培养, 并定期补水保湿. 每一处理组 3 个平行, 每个平行分别加入 10 条体重、大小相近的蚯蚓(约 350 mg), 以溶剂丙酮污染为空白对照. 每隔 12 h 观察一次, 记录蚯蚓的死亡数, 并记录蚯蚓的病理症状和行为, 试验中以机械刺激蚯蚓的头部和尾部, 均无反应则视为死亡. 在暴露期间注意清除死掉的蚯蚓, 防止污染对其他蚯蚓的影响.

1.2.5 土壤法蚯蚓染毒

土壤法急性毒性试验方法参照中华人民共和国国家标准发布的蚯蚓对化学品急性毒性试验^[9]的方法, 蚯蚓的培养基质为无 PAEs 污染的自然土壤. 试验用 1 L 的烧杯, 丙酮溶解暴露物配成系列浓度梯度的溶液, 在通风橱中将不同浓度的暴露物溶液加入 200 g 已自然风干的土壤, 空白对照组直接加入与处理组相同体积(约 5 mL)的溶剂丙酮, 充分混匀后置于通风橱中挥发 12 h, 然后加入 125 mL 的蒸馏水充分混匀后平衡 24 h, 将在湿润滤纸上清肠 1 d 的蚯蚓放入土壤中, 然后用扎了洞的保鲜膜将烧杯

封口,防止蚯蚓逃逸,定期补充水分保持培养基质的湿度,并每周添加 8 g 牛粪(养料).将蚯蚓置于空调房中培养,温度控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,光暗比为 12 h/12 h,于第 2、7、14 和 28 d 取出蚯蚓,测定蛋白含量和酶活.

1.2.6 样品的制备

先将研钵,研棒和蚯蚓匀浆缓冲液放于冰上预冷.将第 2、7、14、28 d 从试验组中取出的蚯蚓清肠 1 d 后称重,加入 9 倍体积的蚯蚓匀浆缓冲液($50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris, $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTT, $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA, $250 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖, pH 7.6),在冰上研磨,制成 10% 的组织匀浆液.将匀浆液转入 1.5 mL 的 EP 管,于已预冷至 4°C 的离心机中 $9\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,吸取上清液至一新的 EP 管立即测定蛋白含量和酶的活性,或在 -80°C 冰箱保存备用.以上操作均在 4°C 下进行.

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件的单因素方差分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著,多重比

较分析采用 LSD 法.

1.4 酶活力单位

SOD 酶活单位定义为:每 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所反应的 SOD 量为一个 SOD 活力单位(U);CAT 酶活单位定义为:每 g 血红蛋白中或每 g 组织蛋白中过氧化氢酶(CAT)每 s 分解吸光度为 0.50~0.55 的底物中的过氧化氢相对量为一个过氧化氢酶的活力单位(U);AChE 酶活单位定义为:每 mg 组织蛋白在 37°C 保温 6 min,水解反应体系中 $1 \mu\text{mol}$ 基质为一个活力单位(U).

2 结果与分析

2.1 滤纸法 DMP 和 DEP 单一污染对蚯蚓急性毒性效应

如图 1 所示,当处于培养皿中污染暴露(浓度 $\geq 180 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)24 h 后蚯蚓机械刺激反应迟缓,对光照的敏感度减弱,蚯蚓活动的周围有黄色体液的痕迹,部分蚯蚓体色加深,身体出血,生殖环带肿大,尾部呈现串珠状,还有断尾现象.



(a) 空白组正常蚯蚓; (b) 黄色体液渗出; (c) 蜷缩; (d) 生殖环带肿大; (e) 体色变黑; (f) 断尾; (g) 尾部串珠状; (h) 身体肿大并出血

图 1 DMP 通过滤纸法接触对蚯蚓形态学的影响

Fig. 1 Effects of DMP on morphology of earthworms by paper contact method

如图 2 所示,DEP 对蚯蚓的中毒症状与 DMP 相同(浓度 $\geq 160 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$),24 h 后蚯蚓身体松软,机械刺激时反应迟缓,对光照的敏感度也减弱,蚯蚓活动的周围有黄色体液的痕迹,部分蚯蚓体色变黑,身体出血,生殖环带明显肿大,尾部呈现串珠状,还有断尾现象.

如图 3 所示,随着浓度的升高和暴露时间的延长,蚯蚓的死亡率相应地升高.用 SPSS 软件分析,在 12、24、36 和 48 h 时 DMP 的 LD_{50} 分别为

214.612、160.213、141.810、129.603 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.空白对照组的蚯蚓培养 48 h 后仍没有出现死亡现象,浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的培养皿中培养 12 h 后,蚯蚓开始出现死亡现象,死亡率为 16.67%,浓度为 $260 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的培养皿中培养 48 h 后,蚯蚓的死亡率达到了 100%.用 SPSS 软件分析,在 12、24、36 和 48 h 时 DEP 的 LD_{50} 为 241.367、186.107、162.475、145.336 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.空白对照组的蚯蚓培养 48 h 后仍没有出现死亡现象,当把

蚯蚓放入浓度为 $40 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 DEP 中培养 12 h 后, 蚯蚓开始出现死亡现象, 死亡率为 3.33%, 当

DEP 的浓度为 $240 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时培养 36 h 后, 死亡率达到 100%.



(a) 空白组正常蚯蚓; (b) 黄色体液渗出; (c) 蜷缩; (d) 生殖环带肿大; (e) 体色变黑; (f) 断尾; (g) 尾部串珠状; (h) 身体肿大并出血

图 2 DEP 通过滤纸法接触对蚯蚓形态学的影响

Fig. 2 Effects of DMP on morphology of earthworms by paper contact method

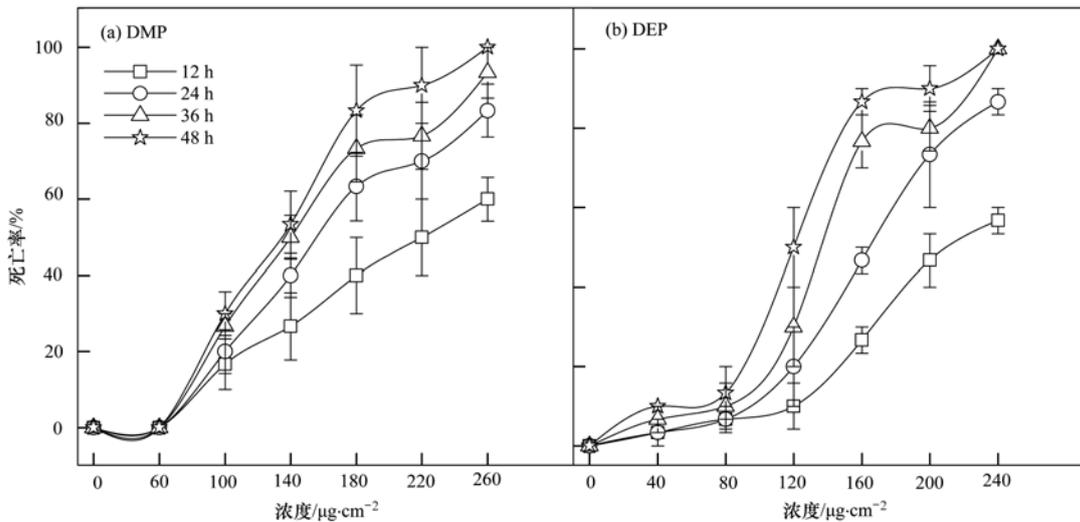


图 3 蚯蚓暴露于不同浓度的 DMP 和 DEP 时在 12、24、36 和 48 h 的死亡率

Fig. 3 Relationship between the mortality of *E. fetida* and their exposure to different concentrations of DMP and DEP after 12, 24, 36, 48 h exposures

2.2 土壤法 DMP 和 DEP 单一污染对蚯蚓急性毒性效应

如图 4 所示, 随着浓度的升高和暴露时间的延长, 蚯蚓的死亡率明显相应地升高, 活着的蚯蚓身体变软, 行动迟缓, 有的蚯蚓出血、断尾. 用 SPSS 软件分析, DMP 污染蚯蚓 7 d 和 14 d 时的 LD_{50} 为 $2\ 221.785$ 和 $1\ 560.120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 空白对照组的蚯蚓培养 14 d 后仍没有死亡现象; 蚯蚓在浓度为 $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的烧杯中培养 14 d 后开始出现死亡现象. 用 SPSS 软件分析, DEP 污染时蚯蚓 7 d 和 14 d 的

LD_{50} 为 $3\ 272.014$ 和 $1\ 516.186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 空白对照组的蚯蚓培养 14 d 后仍没有死亡现象; 蚯蚓在浓度为 $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的烧杯中培养 7 d 后开始出现死亡现象.

2.3 DMP、DEP 和 DBP 单一污染对蚯蚓体内 SOD、CAT、AChE 活性的影响

如图 5(a) 所示, 在不同 DMP 暴露浓度下 SOD 酶的活性先升高再降低, 部分处理组酶的活性变化显著 ($P < 0.05$). 从图 5(b) 中可以看出, DEP 单一污染的土壤中, 相对于空白对照组, 各处理组中蚯蚓

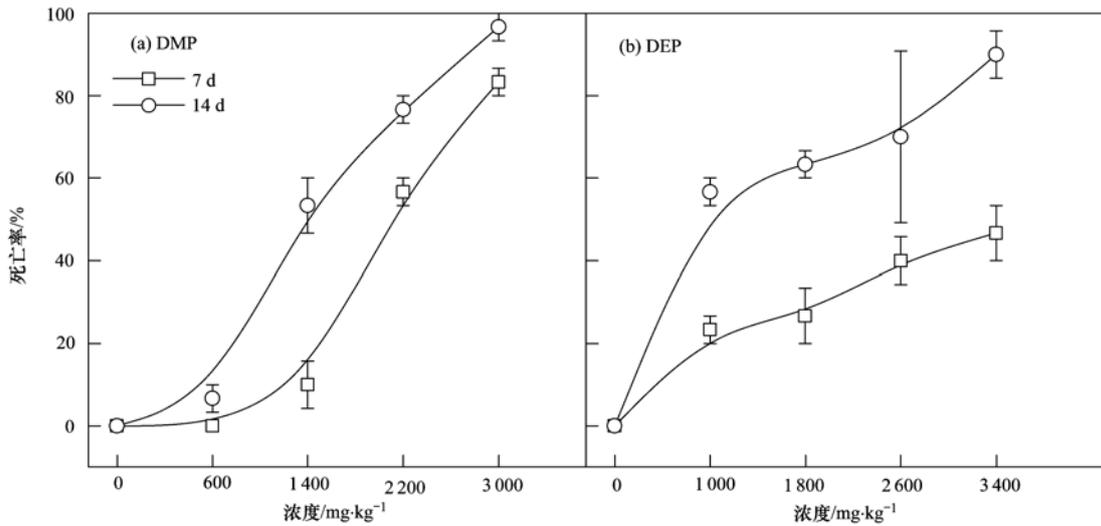
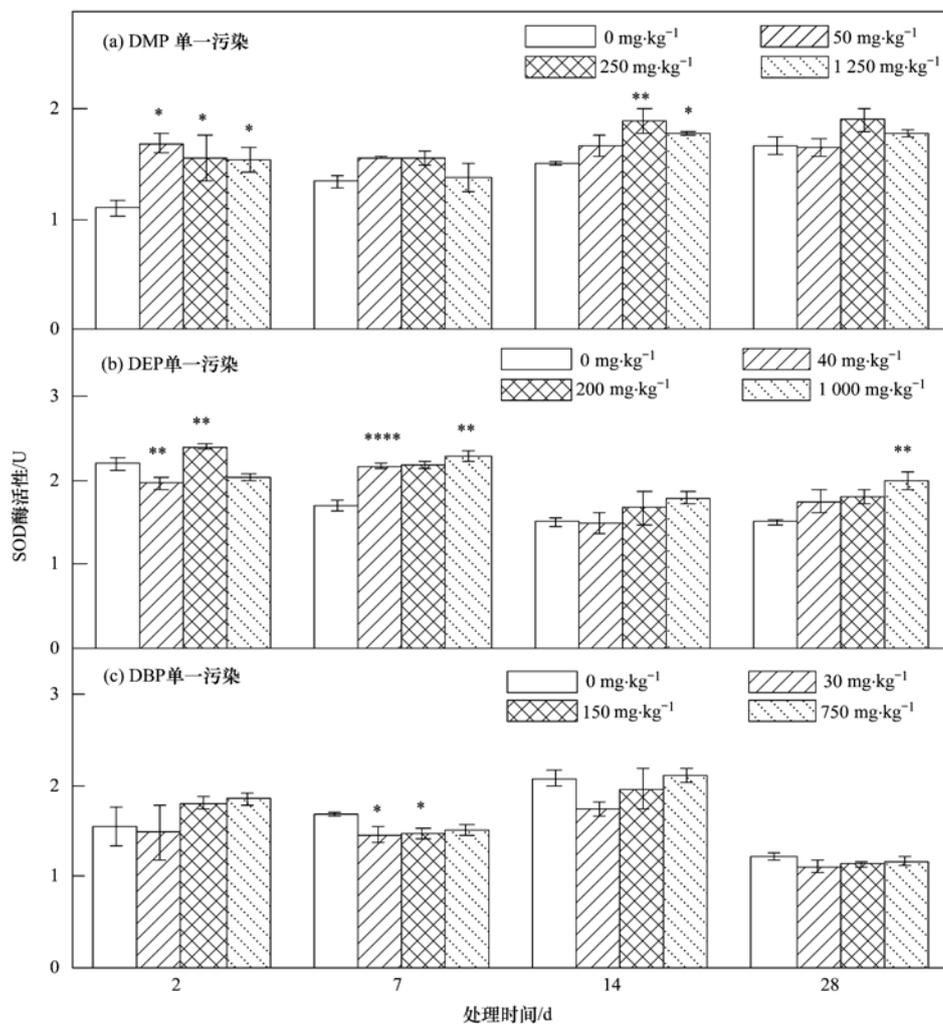


图 4 蚯蚓暴露于不同浓度 DMP 和 DEP 在 7 d 和 14 d 的死亡率

Fig. 4 Relationship between the mortality of *E. fetida* and their exposure to different concentrations of DMP and DEP after 7 d and 14 d exposures



*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$,下同

图 5 DMP、DEP 和 DBP 对蚯蚓体内 SOD 酶活性的影响

Fig. 5 Effects of DMP, DEP and DBP on the SOD activity of earthworms

体内 SOD 酶活性总体均被激活,且活性的变化与污染物的浓度具有相关性,SOD 活性随着 DEP 浓度的增加而逐渐升高. DBP 单一污染土壤中各浓度处理组中,蚯蚓体内 SOD 酶活性出现明显波动,部分处理组与对照组活性相比差异性显著($P > 0.05$). 如图 5(c)所示,在整个试验过程中,SOD 酶活性均表现为低浓度抑制,且随着浓度的升高,SOD 酶活性逐渐升高,暴露 28 d 时各处理组与空白组 SOD 酶活性基本持平.

如图 6(a)所示,在整个试验过程中,DMP 各处理组的 CAT 活性较空白对照组均表现为先抑制后升高,且 t 为 14、28 d 时抑制效应比 t 为 2、7 d 时强. 如图 6(b)所示,在不同 DEP 暴露浓度下,蚯蚓体内的 CAT 酶活性有显著变化,当 t 为 2、7 d 时,相对空白对照组 CAT 酶活性均表现为抑制现象,且随着浓度的增加,酶的活性逐渐降低;当 t 为 14、28 d 时,相对空白对照组,CAT 酶活性表现为先激活后抑制. DEP 处理组的 CAT 活性于 14 d 时活性达到

最大诱导,污染暴露持续到 28 d 时 CAT 活性又有所降低. DBP 单一污染对蚯蚓体内 CAT 酶活性的影响如图 6(c)所示,在整个试验过程中,与空白对照组相比,各处理组 CAT 活性均表现为低浓度激活,随着 DBP 浓度的增加,CAT 活性逐渐降低,部分处理组的酶活性变化显著($P < 0.05$). CAT 活性随暴露时间的延长呈先上升后降低的趋势,在第 7 和 14 d 时激活效应最大.

蚯蚓暴露在 DMP 单一污染土壤中,体内 AChE 酶活性变化如图 7(a)所示,在整个试验过程中,相对于空白对照组,AChE 酶活性表现为低浓度激活高浓度抑制的变化趋势. 如图 7(b)所示,在不同 DEP 暴露浓度下 AChE 酶活性有显著变化,在整个试验过程中,各处理组 AChE 酶活性相对于空白对照组,表现出低浓度抑制且随着 DEP 浓度的增加酶活性逐渐升高的变化趋势,到 28 d 时活性有恢复至对照组水平的趋势. 蚯蚓在不同 DBP 暴露浓度下,在整个试验过程中 AChE 酶活性先降低再升高,如

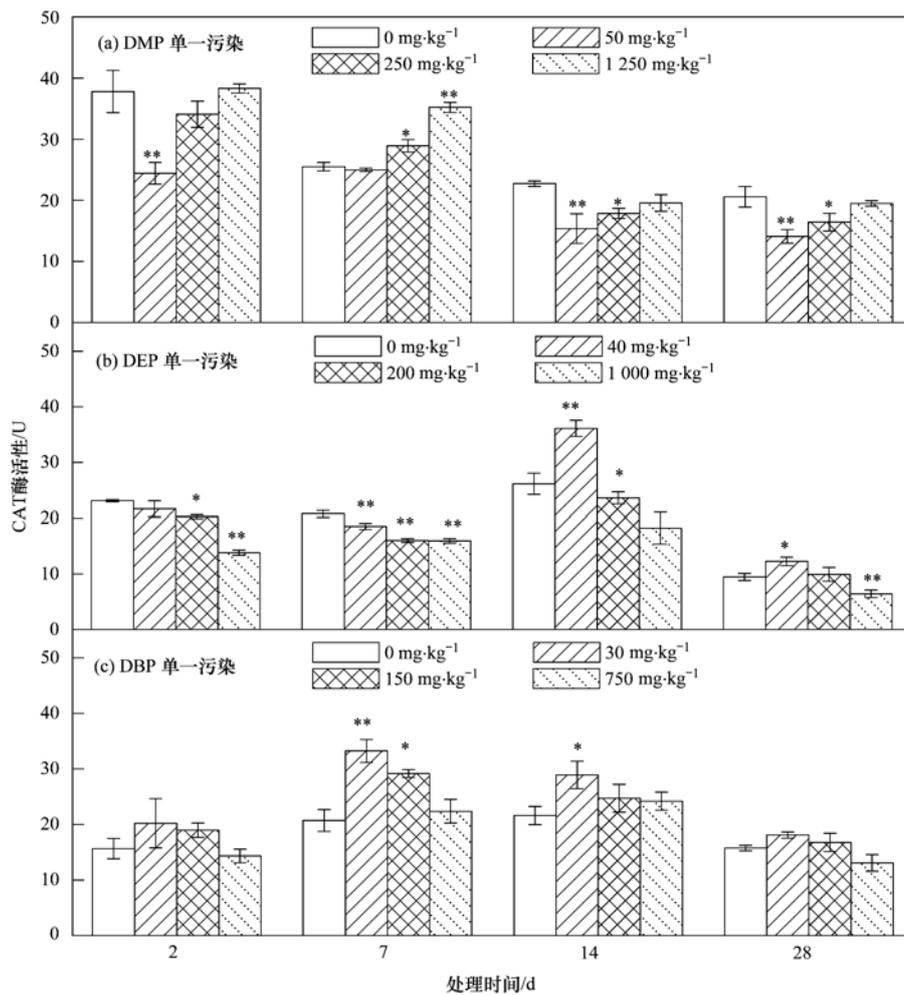


图 6 DMP、DEP 和 DBP 对蚯蚓体内 CAT 酶活性的影响

Fig. 6 Effects of DMP, DEP and DBP on the CAT activity of earthworms

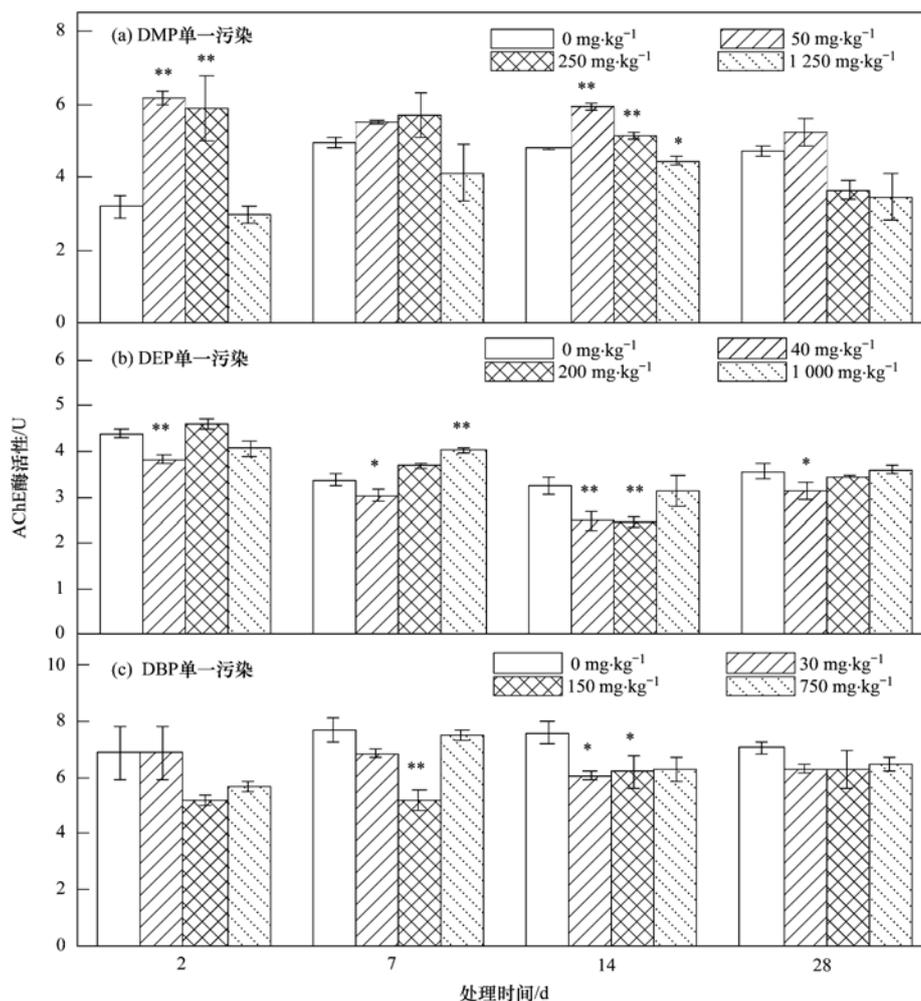


图7 DMP、DEP和DBP对蚯蚓体内AChE酶活性的影响

Fig. 7 Effects of DMP, DEP and DBP on the AChE activity of earthworms

图7(c)所示,随着暴露时间的增加,酶活性逐渐得以恢复,至28 d时各处理组与空白对照组均无显著差异。

3 讨论

滤纸接触法染毒能快速、简便地给出污染物的毒性信息,然而在实际环境中,污染物对蚯蚓的毒性不仅与其固有毒性有关,还与其在土壤中的环境化学行为及生物有效性密切相关,因此,用土壤染毒来模拟蚯蚓生活的真实环境可真实地反映污染物在环境中的实际影响。本研究通过滤纸接触法测得DMP对蚯蚓的毒性大于DEP,这可能与两者的化学结构有关,DMP的皮肤渗入效应比DEP强,该结果与Annette等^[10]的报道相一致。本研究通过自然土壤法测得DMP和DEP对蚯蚓的急性毒性效应结果与Annette等^[10]的报道相一致,他们报道了土壤法BBP、DOP等4类PAEs的LC₅₀值均在1 064~3 335

mg·kg⁻¹之间。滤纸接触法和自然土壤法均未得出DBP的LC₅₀,这可能是由于DBP侧链较DMP和DEP长,水溶性较低,难以渗透进入蚯蚓的皮肤和细胞内,因此没有表现出急性毒性效应。通常,PAEs类化合物的毒性大小随着其碳链的加长而增大,而对于烷基链长至少6个碳的高分子量PAEs,结果显示毒性随着分子量的增大而降低,在水生生物和部分陆生生物的毒性试验研究中,已有大量的研究结果都证实了这种相同的毒性效应^[11~13]。目前,国内外就PAEs类物质对蚯蚓的毒性研究较少,对于采用滤纸法的研究更是鲜见,本研究的结果为DMP、DEP和DBP对蚯蚓急性毒性的剂量响应关系提供了数据基础。

在正常的生理条件下产生,生物体内活性氧的产生和抗氧化防御系统酶之间存在动态平衡机制,当生物体受到逆境胁迫时,可引起生物体的氧化应激反应,产生超氧阴离子自由基O₂⁻。超氧阴离子自

由基具有极强的氧化能力,是生物氧毒害的重要因素之一. 生物体的抗氧化防御系统酶有 SOD、CAT 和 POD,其中 SOD 天然存在于生物体内,是一种能清除细胞中超氧自由基的金属酶类,可以催化过氧化物歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,其催化反应为 $\text{O}_2^- + \text{O}_2^- + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$ ^[14],歧化反应的产物 H_2O_2 是代谢过程中产生的一种活性氧废物,它仍能够对机体造成损害,为了避免这种损害, H_2O_2 必须被快速地转化为其他无害或毒性较小的物质,而 CAT 就是常被细胞用来催化 H_2O_2 分解的工具^[15],其催化转化反应为: $2\text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. SOD 活力对氧化压力有敏感的指示作用^[16,17],在存在氧化压力时, SOD 和 CAT 可有效清除生物体内过量的活性氧,维持活性氧代谢平衡,共同作用完成保护机体的功能,使生物体在一定程度上可以忍耐、减缓或抵抗逆境胁迫,因此,研究抗氧化酶活性变化是生物体在逆境胁迫下很重要的一项生理指标.

PAEs 在生物体内的代谢过程可诱发活性氧自由基的大量产生,由此引起的氧化胁迫已在不同生物体内得到了证实. 秦洁芳等^[18]研究 DBP 对翡翠贻贝体内 SOD 活性的影响,表明 SOD 活性变化符合生物免疫机能的作用规律:在较低浓度和暴露中期酶活性被诱导,随着 DBP 浓度升高和胁迫时间的延长导致酶活性下降. 本试验对于 SOD 的研究有类似的结果,如图 5(a) 所示, SOD 酶活性较空白组先升高,这是因为蚯蚓在遭受逆境胁迫时,产生的氧自由基数量增多, SOD 保护系统打开,刺激了 SOD 的合成来清除氧自由基,减少细胞膜的过氧化作用,这是生物体对污染的适应性反应^[19],而随着暴露浓度的升高, SOD 合成的速度不能跟上机体内氧自由基增加的速度,自由基产生和消除之间的平衡已经被破坏,最终导致机体细胞膜系统过氧化,使 SOD 酶活性降低,丁草胺和乙草胺对蚯蚓 SOD 酶活性的影响也表现为先诱导后抑制的趋势^[20]. 蚯蚓在 DEP 的逆境胁迫过程中,产生超氧阴离子自由基 O_2^- ,因为要清除体内的氧自由基 O_2^- , SOD 活性随着自由基的增多而被诱导增加,且活性的变化与污染物的浓度具有正相关性,说明暴露物 DEP 浓度在其耐受性限度内,高浓度 DEP 胁迫产生数量更多的氧自由基 O_2^- ,刺激更多的 SOD 合成. 蚯蚓暴露在 DBP 低浓度处理组中, SOD 活性受到抑制,原因可能是 DBP 胁迫初期蚯蚓抗氧化应激作用的延迟:在低浓度暴露下,尚不足以诱导 SOD 产生,却先对酶蛋白产生了破坏或消耗所致. 刘文丽等^[21]研究异

丙甲草胺对蚯蚓酶活性的影响,发现 SOD 活性有相同的变化,秦洁芳等^[18]研究 DBP 对翡翠贻贝体内 SOD 活性的变化也发现了这种抗氧化应激作用延迟的现象. 随着 DBP 浓度的升高,胁迫程度增加, SOD 被诱导合成,在第 28 d 时 SOD 活性回升至空白对照水平,表明此时机体已对暴露物的逆境胁迫表现出了一定的耐受性.

蚯蚓暴露于低浓度 DMP 时,也表现出了抗氧化应激作用的延迟现象,低浓度组 CAT 活性被显著 ($P < 0.05$) 抑制,蚯蚓体内 CAT 活性尚未被诱导而酶蛋白被破坏或消耗,从而导致 CAT 酶活性降低,随着 DMP 浓度的升高,暴露胁迫造成蚯蚓体内 H_2O_2 产生并含量增加,从而诱导 CAT 活性逐渐增加. CAT 参与调控细胞内的 H_2O_2 ,其中一部分来自 PAEs 在蚯蚓体内的转化过程,另一部分来自 SOD 的歧化产物,由图 5(b) 可知 DEP 暴露前期(2 d 和 7 d) 细胞内来自 SOD 的歧化的 H_2O_2 含量高,细胞中 H_2O_2 过量, CAT 活性受到抑制,随着 DEP 浓度的增加,使细胞受到胁迫加重, CAT 活性抑制程度增加,在暴露后期(14 d 和 28 d) SOD 的激活效应减弱,低浓度组中蚯蚓可以通过提高 CAT 活性来清除机体内的 H_2O_2 ,能够维持体内平衡,但随着 DEP 浓度的增加,来自 SOD 的歧化的 H_2O_2 含量逐渐升高, CAT 活性逐渐降低甚至抑制. 蚯蚓受到 DBP 污染胁迫时,细胞中产生的 H_2O_2 增多, CAT 被诱导合成来清除 H_2O_2 以减轻和阻断脂质过氧化反应,但在高浓度 DBP 污染下产生的 H_2O_2 含量升高,使 CAT 活性降低或抑制^[22],这可能与污染因素使 CAT 与 H_2O_2 相互作用而降低酶的活性,直至某一临界浓度使其活性受到抑制有关. 由图 5(c) 可知 DBP 低浓度作用下,细胞内来自 SOD 歧化的 H_2O_2 含量低, CAT 活性被诱导,随着 DBP 浓度的增加, SOD 歧化的 H_2O_2 含量增加,细胞受到胁迫加重, CAT 活性降低或抑制.

AChE 是一种重要的神经系统酶,它在神经信号传导中起着重要作用,当污染物扰乱机体正常功能时, AChE 是评价污染物对神经系统毒害作用有效、快速的方法. Venkateswara 等^[23]发现当蚯蚓暴露于久效磷时 AChE 被抑制,且抑制与其浓度呈正相关. Venkateswar 等^[24]也发现农药毒死蜱在其 LC_{50} 浓度暴露时可引起蚯蚓体内 AChE 活性降低,并随着时间的延长对 AChE 的活性抑制率逐渐增高. 此外, Yamin 等^[25]发现杀虫剂(OP)对不同动物的 AChE 活性也表现出抑制效应. 这与本试验结果并不完全一致,与空白对照相比,在低浓度的 DMP

暴露时 AChE 活性被诱导,在高浓度时被抑制. 污染物对生物体的 AChE 活性影响还有受抑制后再被诱导的情况, Kavitha 等^[26] 研究毒死蜱对食蚊鱼脑组织 AChE 酶活性的影响,发现暴露胁迫 96 h 后酶活性受到抑制,但暴露胁迫持续 16 ~ 18 d 时,酶活性恢复到对照组水平. 秦洁芳等^[27] 的研究也发现不同浓度的 DEHP 对红鳍笛鲷幼鱼脑组织 AChE 的胁迫效应相似,都表现为先抑制后诱导,在 96 h 内 AChE 活性恢复到对照组水平. 本研究的结果与文献^[26,27] 的研究类似,如图 7(b) 和 7(c) 所示, AChE 活性较空白对照组均表现出低浓度抑制,产生脂质过氧化作用,增加浓度时酶活性逐渐升高,随着暴露时间延长至 28 d 时,酶活性逐渐得以恢复至对照组水平或有恢复的趋势,表明本研究中 DEP 和 DBP 的剂量并没有超出蚯蚓自我代偿的浓度范围. 本研究与文献^[24,25] 的结果不同,原因可能是:从酶学指标变化的时间-效应关系看,不同的化合物种类对生物体 AChE 活性的影响效应具有较大差异性,这可能与污染物在生物体内的代谢途径和能否通过组织血液屏障的机制有很大联系,有待后续试验证实.

生物体的酶系统比较复杂,以酶活性指标作为污染胁迫的生物标记物应考虑多种因素的影响,在进行检测时应将几种酶结合起来进行分析. 自然环境中存在的 PAEs 类物质含量远低于本研究中设定的剂量,从蚯蚓的酶活性指标变化可知其对土壤生物的毒性较低,但其产量逐年递增,对土壤生态系统中的生物存在潜在危害,对生活在底栖的生物毒害应密切关注. 本研究探讨了 DMP、DEP 和 DBP 对生活在食物链底层的陆生生物蚯蚓抗氧化系统和神经的损伤,这些指标为土壤毒理学研究和 PAEs 类物质的污染风险预测提供了理论依据.

4 结论

(1) DMP 和 DEP 对蚯蚓的毒害效应均表现出浓度和时间相关性. 滤纸接触法染毒 48 h 时, DMP 的毒性大于 DEP, 自然土壤法染毒 14 d 时, DEP 的毒性大于 DMP. 滤纸接触法和自然土壤法染毒, DBP 对蚯蚓表现出的毒性均小于 DMP 和 DEP.

(2) DMP、DEP 和 DBP 对蚯蚓组织抗氧化酶 SOD、CAT 和 AChE 响应各不相同, CAT 活性影响最大, SOD 和 AChE 次之. DEP 和 DBP 对 SOD 和 CAT 的变化影响表现出一定同步性, DEP 和 DBP 诱发的 H_2O_2 和 SOD 的歧化产生的 H_2O_2 , 共同诱导

和抑制 CAT 活性. AChE 活性变化表现为先抑制后诱导,在 28 d 时酶活性有恢复的趋势.

参考文献:

- [1] Foster P M D, Mylchreest E, Gaido K W, *et al.* Effects of phthalate esters on the developing reproductive tract of male rats [J]. *Human Reproduction Update*, 2001, **7**(3): 231-235.
- [2] Wang L X, Zhao B, Liu C, *et al.* Indoor SVOC pollution in China: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(15): 1469-1478.
- [3] Corp N, Morgan A J. Accumulation of heavy metals from polluted soils by the earthworm, *Lumbricus rubellus*: can laboratory exposure of 'control' worms reduce biomonitoring problems? [J]. *Environmental Pollution*, 1991, **74**(1): 39-52.
- [4] Becquer T, Dai J, Quantin C, *et al.* Sources of bioavailable trace metals for earthworms from a Zn-, Pb- and Cd-contaminated soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(8): 1564-1568.
- [5] Sturzenbaum S R, Kille P, Morgan A J. Heavy metal-induced molecular responses in the earthworm, *Lumbricus rubellus* genetic fingerprinting by directed differential display [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, **9**(1): 495-500.
- [6] Spurgeon D J, Weeks J M, Van Gestel C A M. A summary of eleven years progress in earthworm ecotoxicology [J]. *Pedobiologia*, 2003, **47**(5-6): 588-606.
- [7] 李文英, 熊丽, 刘荣, 等. 邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 对斑马鱼 (*Brachydanio rerio*) 生理生化特性的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(1): 117-122.
- [8] Zeng Q, Cai F Y, Wang J, *et al.* A study on the oxidative damage of *Esisenia foelide* cells induced by DEHP [A]. In: *Proceedings of the 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)* [C]. Chengdu, China: IEEE, 2010. 1-4.
- [9] GB/T 21809-2008, 中华人民共和国国家标准 [S].
- [10] Aldrich A, Daniel O. Literature based ecotoxicological risk assessment [A]. In: *Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture. Ecole Polytechnique Federale de lausanne* [C]. Swiss, 2003. 1-36.
- [11] Staples C A, Adams W J, Parkerton T F, *et al.* Aquatic toxicity of eighteen phthalate esters [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(5): 875-891.
- [12] Calley D, Autian J, Guess W L. Toxicology of a series of Phthalate Esters [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1966, **55**(2): 158-162.
- [13] Defoe D L, Holcombe G W, Hammermeister D E, *et al.* Solubility and toxicity of eight phthalate esters to four aquatic organisms [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, **9**(5): 623-636.
- [14] Dhainaut A, Scaps P. Immune defense and biological responses induced by toxics in Annelida [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2001, **79**(2): 233-253.
- [15] Gaetani G F, Ferraris A M, Rolfo M, *et al.* Predominant role of catalase in the disposal of hydrogen peroxide within human

- erythrocytes [J]. *Blood*, 1996, **87**(4): 1595-1599.
- [16] Sun F H, Zhou Q X. Oxidative stress biomarkers of the polychaete *Nereis diversicolor* exposed to cadmium and petroleum hydrocarbons [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **70**(1): 106-114.
- [17] Wang C R, Wang X R, Tian Y, *et al.* Oxidative stress and potential biomarkers in tomato seedlings subjected to soil lead contamination [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **71**(3): 685-691.
- [18] 秦洁芳, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对翡翠贻贝抗氧化酶及脂质过氧化水平的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(7): 1878-1884.
- [19] 方展强, 张凤君, 郑文彪, 等. 多氯联苯对剑尾鱼超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. *中国实验动物学报*, 2004, **12**(2): 96-99.
- [20] 刘嫦娥, 段昌群, 王旭, 等. 丁草胺和乙草胺对蚯蚓 CAT 和 SOD 活性的影响 [J]. *环境化学*, 2008, **27**(6): 757-760.
- [21] 刘文丽, 徐冬梅, 刘惠君, 等. 异丙甲草胺对蚯蚓体重及酶活性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(12): 2025-2037.
- [22] Geret F, Serafim A, Barreira L, *et al.* Effect of cadmium on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in the gills of the clam *Ruditapes decussatus* [J]. *Biomarkers*, 2002, **7**(3): 242-256.
- [23] Venkateswara Rao J, Kavitha P. Toxicity of azodrin on the morphology and acetylcholinesterase activity of the earthworm *Eisenia foetida* [J]. *Environmental Research*, 2004, **96**(3): 323-327.
- [24] Venkateswara Rao J, Surya Pavan Y, Madhavendra S S. Toxic effects of chlorpyrifos on morphology and acetylcholinesterase activity in the earthworm, *Eisenia foetida* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **54**(3): 296-301.
- [25] Qadri Y H, Swamy A N, Rao J V. Species differences in brain Acetylcholinesterase response to Monocrotophos *in vitro* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1994, **28**(1): 91-98.
- [26] Kavitha P, Venkateswara Rao J. Toxic effects of chlorpyrifos on antioxidant enzymes and target enzyme acetylcholinesterase interaction in mosquito fish, *Gambusia affinis* [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, **26**(2): 192-198.
- [27] 秦洁芳, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 邻苯二甲酸二乙基己酯 (DEHP) 胁迫下红鳍笛鲷不同组织生化指标的变化 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(3): 409-415.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行