

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

**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

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O<sub>3</sub>来源识别 ..... 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华( 1 )

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 ..... 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊( 11 )

近10年海南岛大气NO<sub>2</sub>的时空变化及污染物来源解析 ..... 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔( 18 )

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 ..... 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹( 25 )

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H<sub>2</sub>)浓度 ..... 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根( 34 )

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO<sub>2</sub>特征及扩散通量 ..... 张永领, 杨小林, 张东( 40 )

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 ..... 李江萍, 张洪海, 杨桂朋( 49 )

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 ..... 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠( 56 )

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 ..... 马小雪, 王腊春, 廖玲玲( 64 )

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 ..... 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞( 72 )

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 ..... 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇( 80 )

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 ..... 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞( 87 )

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 ..... 李艳利, 李艳粉, 徐宗学( 94 )

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 ..... 刁晓君, 李一葳, 王曙光( 107 )

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 ..... 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹( 114 )

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 ..... 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅( 121 )

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟( 130 )

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 ..... 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇( 136 )

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 ..... 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法( 143 )

三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 ..... 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮( 151 )

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 ..... 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇( 163 )

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 ..... 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮( 172 )

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 ..... 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋( 179 )

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 ..... 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真( 186 )

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 ..... 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光( 194 )

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 ..... 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军( 202 )

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 ..... 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华( 209 )

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 ..... 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊( 215 )

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 ..... 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷( 221 )

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 ..... 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧( 227 )

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 ..... 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋( 237 )

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 ..... 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江( 244 )

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 ..... 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜( 252 )

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 ..... 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全( 259 )

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 ..... 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉( 266 )

四川凉山彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 ..... 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静( 274 )

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 ..... 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维( 280 )

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 ..... 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体( 286 )

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 ..... 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲( 295 )

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 ..... 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚( 301 )

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 ..... 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超( 309 )

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 ..... 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯( 314 )

华南某市生活垃圾组成特征分析 ..... 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德( 325 )

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 ..... 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印( 333 )

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 ..... 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌( 338 )

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 ..... 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国( 343 )

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 ..... 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩( 349 )

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 ..... 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲( 357 )

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 ..... 李曼璐, 姜玥璐( 365 )

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

# 铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用

徐冬梅<sup>1</sup>, 王彦华<sup>2</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 饶桂维<sup>1</sup>

(1. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310015; 2. 浙江省农业科学院农产品质量标准研究所, 杭州 310021)

**摘要:** 土壤环境中重金属-农药复合污染已经对土壤生态和人类生存环境构成严重威胁。其中重金属铜和有机磷农药毒死蜱作为土壤环境中两类常见的污染物, 其复合污染的环境效应值得关注。本文采用 OECD 标准滤纸接触法、人工土壤法研究了铜-毒死蜱单一及复合暴露对蚯蚓急性致死作用及回避行为的影响。结果表明, 滤纸法和人工土壤法 Cu 对蚯蚓急性毒性的 48 h-LC<sub>50</sub> 和 14 d-LC<sub>50</sub> 分别为 2.23  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 496.05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 而毒死蜱对蚯蚓急性毒性的 48 h-LC<sub>50</sub> 和 14 d-LC<sub>50</sub> 分别为 5.94  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 186.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。滤纸法和人工土壤法铜、毒死蜱浓度单位配比 1:1 时, 铜、毒死蜱对蚯蚓急性毒性联合作用类型均近似表现为相加作用, 而毒性单位配比 1:1 的滤纸法和人工土壤法试验结果分别为协同作用和拮抗作用。回避行为试验结果表明, 铜、毒死蜱对蚯蚓回避行为的联合作用类型为拮抗作用。

**关键词:** 铜; 毒死蜱; 复合暴露; 蚯蚓; 毒性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0280-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.037

## Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm

XU Dong-mei<sup>1</sup>, WANG Yan-hua<sup>2</sup>, WANG Nan<sup>1</sup>, RAO Gui-wei<sup>1</sup>

(1. College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China; 2. Institute of Quality Standards for Agricultural Products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** Combined pollution of heavy metal and pesticide had posed a serious threat to soil ecology and human living environment. As two common types of pollutants in soil environment, the environmental effects of combined pollution of Cu and chlorpyrifos are worth for attention. The acute lethal effects and avoiding behavior of single and co-exposure of Cu and chlorpyrifos on earthworms were analyzed by using the methods of standard OECD filter paper test and artificial soil test. Results showed that the LC<sub>50,48 h</sub> and LC<sub>50,14 d</sub> of the acute toxicity of Cu on earthworm in filter paper test and in artificial soil test were 2.23  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  and 496.05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. The LC<sub>50,48 h</sub> and LC<sub>50,14 d</sub> of the acute toxicity of chlorpyrifos on earthworm in filter paper test and in artificial soil test were 5.94  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  and 186.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. In filter paper test and artificial soil test, the joint acute toxicity of Cu and chlorpyrifos showed an additive effect while the concentration was 1:1. The type of combined effects of co-exposure of Cu and chlorpyrifos was synergistic effect and antagonistic effect in filter paper test and artificial soil test, respectively, while the toxicity was 1:1. The results of avoidance behavior test showed that the joint effect of Cu and chlorpyrifos on the avoidance behavior of earthworms was antagonistic.

**Key words:** Cu; chlorpyrifos; co-exposure; earthworm; toxicity

当前,土壤重金属-农药复合污染已经对生态环境和人类生存构成严重威胁。重金属铜是植物生长和人体生命活动必需的微量元素,然而铜在环境中的过量累积不仅会导致暴露生物的毒性效应<sup>[1]</sup>,还会对人体健康造成不良影响<sup>[2]</sup>。近年来由于含铜矿物的开采、冶炼厂三废排放、含铜杀菌剂(波尔多液等)的长期大量使用和城市污泥堆肥利用等原因,使土壤含铜量达到原始土壤的几倍甚至几十倍,远远超出了土壤的环境承载力<sup>[3,4]</sup>。不仅如此,土壤环境中的重金属还往往与农药等污染物同时共存,形成复合污染。有机磷杀虫剂毒死蜱作为甲胺磷、对硫磷等高毒有机磷农药的主要替代品,在我国的应用日益广泛。尽管毒死蜱比已禁止使用的有机磷农药对人畜的毒性要低,但对于多数水生生物

而言,毒死蜱仍属于高毒性物质并且可以通过生物积累和生物放大作用对水体食物链产生影响<sup>[5-7]</sup>。2000年6月,美国环境保护署宣布禁止在美国家庭和庭院内使用毒死蜱杀虫剂,并减少毒死蜱在其他方面的使用。因此,对于毒死蜱的残留危害,尤其是毒死蜱与重金属等污染物复合暴露的毒性评价,成为该领域的热点问题。

蚯蚓作为土壤中生物量最大的动物类群,其自身生理特性、数量和种群的变化与土壤中污染物的污染程度存在一定的相关性<sup>[8,9]</sup>。同时由于蚯蚓生

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-08-11

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY13B070010, LY13C030006)

作者简介: 徐冬梅(1974~),女,博士,教授,主要研究方向为生态毒理学, E-mail: dm25xu@163.com

态毒理试验具有操作简单、成本低廉、易于观察、反应灵敏度高、测试终点具有生态毒理相关性等优点,其在污染土壤生态风险评价中日益受到关注<sup>[10]</sup>。目前国内外关于重金属、农药单一暴露对蚯蚓的生态毒理效应研究已有许多报道,而对土壤中农药和重金属复合污染的研究还不够深入,许多方面仍有待于完善和发展<sup>[11]</sup>。本研究以蚯蚓生态毒理试验中广泛采用的赤子爱胜蚓为模式生物,考察铜-毒死蜱单一及复合暴露对蚯蚓急性致死及回避行为的影响,以期揭示毒死蜱-铜对土壤生态系统的影响、全面评估复合污染的生态风险提供必要的基础数据,为土壤有机-无机复合污染的监测预警及修复治理提供科学依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选用由浙江某蚯蚓养殖场提供的赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),挑选2月龄以上,体重为0.3g左右,环带明显的健康成蚓,试验前放于人工气候箱中驯服7d;毒死蜱原药由南京红太阳集团有限公司提供(纯度>95%),其结构式见图1。试验所用硫酸铜等试剂均为分析纯;供试人工土壤根据OECD Guideline No. 207标准方法配制。

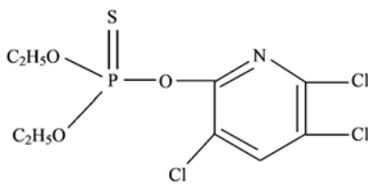


图1 毒死蜱结构式

Fig. 1 Molecular structure of chlorpyrifos

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 铜、毒死蜱单一暴露对蚯蚓急性毒性及回避行为试验

铜-毒死蜱复合暴露对蚯蚓急性毒性和回避行为影响的试验方法参照文献<sup>[12]</sup>的方法。根据预试验结果确定滤纸法 $[Cu^{2+}]$ 分别为0、1、2、4、6、8  $\mu g \cdot cm^{-2}$ ;农药毒死蜱浓度为0、1、2、4、8、16、32  $\mu g \cdot cm^{-2}$ 。人工土壤法重金属铜浓度范围设置0、100、200、400、600、800、1000  $mg \cdot kg^{-1}$ 共7个梯度;毒死蜱浓度为0、80、120、160、200、240、280  $mg \cdot kg^{-1}$ ,同时设不含铜、毒死蜱的蒸馏水对照组。回避行为试验重金属铜、农药毒死蜱浓度分别设置为25、50、100、200  $mg \cdot kg^{-1}$ 和6、12、24、48

$mg \cdot kg^{-1}$ 这4个浓度梯度。滤纸法急性毒性试验每一浓度设10个重复;人工土壤法急性毒性及回避行为试验每一浓度均设置3个重复。

#### 1.2.2 铜、毒死蜱复合暴露对蚯蚓急性毒性及回避行为试验

参照修瑞琴等<sup>[13]</sup>的水生毒理联合效应相加指数法,分别以单一化合物滤纸法48 h-LC<sub>50</sub>和人工土壤法14 d-LC<sub>50</sub>值为一个毒性单位,按照毒性1:1和浓度1:1的混合比例以等对数间距(参照毒性较大的物质设计)设置4个不同的试验浓度,试验方法及其LC<sub>50</sub>值计算方法同单一急性毒性试验。铜-毒死蜱复合暴露的蚯蚓回避行为试验设计见表4,试验方法和条件控制同单一暴露回避行为试验。滤纸法急性毒性复合试验每一浓度组合设10个重复;人工土壤法急性毒性及回避行为试验每一浓度组合设置3个重复。

### 1.3 数据分析及联合毒性评价方法

试验数据用SPSS 17.0统计软件进行统计分析,回避行为数据结果采用means  $\pm$  SD的形式表示。回避率计算如下:

$$NR = [(C - T) / N] \times 100\%$$

式中,NR为净回避率,C为洁净土壤中蚯蚓的数目,T为污染土壤中蚯蚓数目,N为加入土壤中的蚯蚓总数)。

铜、毒死蜱对蚯蚓联合毒性采用Marking水生毒理联合效应相加指数法进行评价。用式 $S = A_m / A_1 + B_m / B_1$ 求得生物毒性相加作用之和S。式中,A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>分别为A、B毒物的毒性(LC<sub>50</sub>);A<sub>m</sub>、B<sub>m</sub>分别为混合物毒性中各毒物的毒性(LC<sub>50</sub>),然后用以下公式将S转换成相加指数(AI)。当S $\leq$ 1时:AI = (1/S) - 1.0;当S > 1时:AI = S(-1) + 1.0,最后用相加指数AI评价毒物的联合效应。AI > 0时为协同作用;AI < 0则为拮抗作用;AI = 0为相加作用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铜、毒死蜱单一暴露对蚯蚓的急性毒性

土壤重金属污染因其隐蔽性、潜伏性、污染长期性和不可逆性等特点,被环境学界喻为“化学定时炸弹”<sup>[14, 15]</sup>。重金属单一及复合污染对蚯蚓健康状况的影响是评价重金属土壤生态危害的重要手段。由本研究铜对蚯蚓急性毒性的影响(图2)可见,滤纸法染毒24h后,1  $\mu g \cdot cm^{-2}$ 和2  $\mu g \cdot cm^{-2}$ 处理组蚯蚓全部存活,铜浓度增至4、6和8  $\mu g \cdot cm^{-2}$

时,蚯蚓死亡率分别达到 30%、70% 和 100%;而随着染毒时间的延长,48 h 后相同浓度 Cu 暴露组蚯蚓死亡率较 24 h 显著升高. 人工土壤法试验结果(图 3)表明,在重金属铜的整个试验浓度范围内,暴露 7 d 的蚯蚓死亡率较低,其中 600、800 和 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cu 暴露组的蚯蚓死亡率分别为 6.7%、13.3% 和 23.3%;相同浓度的 14 d 暴露组蚯蚓死亡率均有增加,其中 1 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  最大暴露组蚯蚓死亡率达到 100%.

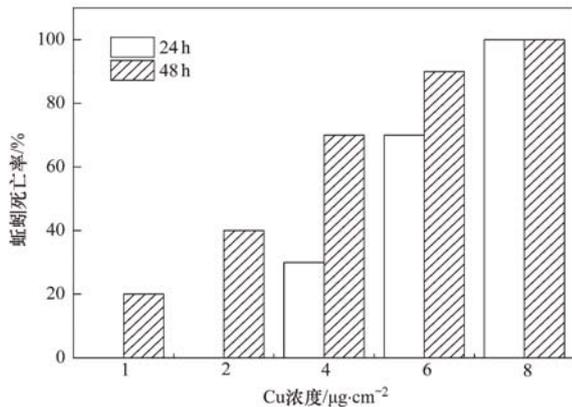


图 2 Cu 对蚯蚓的急性致死作用(滤纸法)

Fig. 2 Lethal toxicity of Cu on earthworm (filter paper method test)

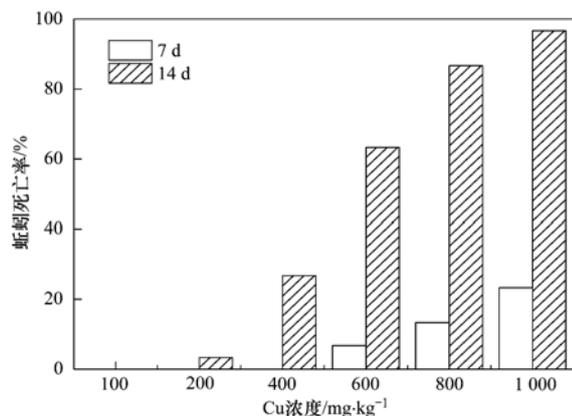


图 3 Cu 对蚯蚓的急性致死作用(人工土壤法)

Fig. 3 Lethal toxicity of Cu on earthworm (artificial soil test)

图 4 滤纸法获得的毒死蜱对蚯蚓急性致死作用同样有随毒死蜱浓度增大和暴露时间延长而增大的趋势,其中最大浓度毒死蜱暴露组 24 h 和 48 h 死亡率分别为 40% 和 100%. 由图 5 毒死蜱对蚯蚓急性毒性的人工土壤试验结果可见,在农药毒死蜱的整个试验浓度范围内,暴露 7 d 的蚯蚓死亡率均较低(其中最大暴露浓度 240  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 280  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  组蚯蚓死亡率仅 3.3%),但至暴露时间终点 14 d 时,蚯蚓死亡率急剧增加. 这可能是随着暴露时间的延

长,毒死蜱和其主要降解产物 3,5,6-三氯-2-吡啶酚(3,5,6-TCP)共同作用于蚯蚓的结果. 已有研究表明,3,5,6-TCP 对土壤中微生物的毒性远高于母体农药毒死蜱<sup>[16]</sup>.

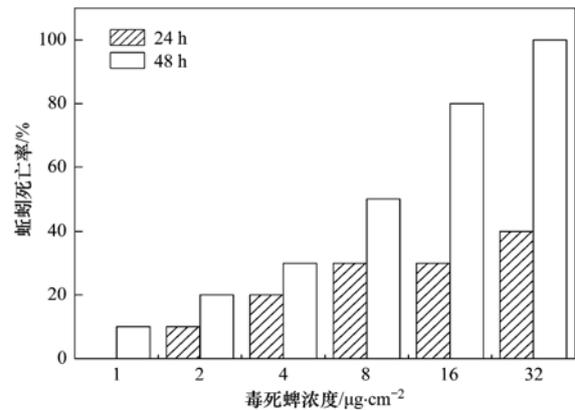


图 4 毒死蜱对蚯蚓的急性致死作用(滤纸法)

Fig. 4 Lethal toxicity of chlorpyrifos on earthworm (filter paper method test)

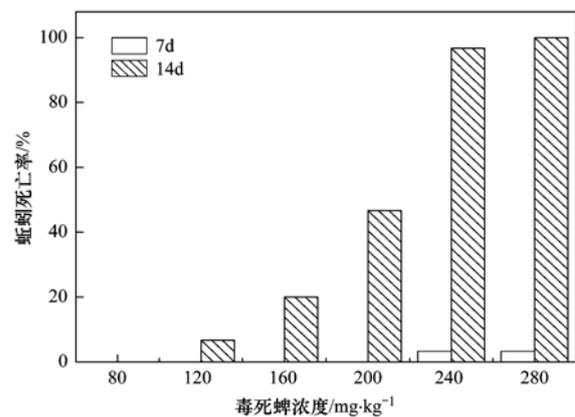


图 5 毒死蜱对蚯蚓的急性致死作用(人工土壤法)

Fig. 5 Lethal toxicity of chlorpyrifos on earthworm (artificial soil test)

蚯蚓形态学变化显示,滤纸暴露法观察到的蚯蚓中毒症状较人工土壤法更为明显. 在本研究的暴露浓度下,蚯蚓对重金属铜的毒性反应更快,但毒死蜱暴露蚯蚓的中毒症状更为明显. 表现为高浓度 8  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  铜与蚯蚓接触几分钟后即有弹跳、扭动反应等中毒症状,伴有脓包和体液渗出;而毒死蜱在暴露前期对蚯蚓的毒性反应并不明显,至暴露终点 48 h,高浓度毒死蜱处理组蚯蚓表现出环带肿大、环带糜烂出血等症状. 应用 SPSS 软件中的 Probit 模块求得铜、毒死蜱对蚯蚓急性毒性  $\text{LC}_{50}$  值及置信区间(表 1). 铜对蚯蚓急性毒性滤纸法 48 h- $\text{LC}_{50}$  和人工土壤法 14 d- $\text{LC}_{50}$  分别为 2.23  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 496.05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 毒死蜱对蚯蚓急性毒性滤纸法 48 h- $\text{LC}_{50}$  和

人工土壤法 14 d-LC<sub>50</sub> 分别为 5.94  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 186.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与刘伟等<sup>[17]</sup>应用滤纸法和自然土壤法获得的毒死蜱对赤子爱胜蚓 LC<sub>50</sub> 相近. 根据文献[18], 可以判断毒死蜱对蚯蚓的毒性为低毒级<sup>[17]</sup>.

表 1 铜、毒死蜱对蚯蚓急性毒性统计分析结果<sup>1)</sup>

Table 1 Statistical analysis of Cu and chlorpyrifos acute toxicity on earthworm

污染物	染毒方式	时间/d	拟合方程	LC <sub>50</sub>	95% 置信限
铜	滤纸法	1	$y = -5.53 + 8.12x$	4.80	3.76 ~ 5.67
		2	$y = -1.03 + 2.97x$	2.23	1.41 ~ 3.11
	人工土壤法	7	/	/	/
		14	$y = -14.52 + 5.39x$	496.05	435.84 ~ 554.31
毒死蜱	滤纸法	1	/	/	/
		2	$y = -1.57 + 2.03x$	5.94	3.74 ~ 9.70
	人工土壤法	7	/	/	/
		14	$y = -24.93 + 10.98x$	186.07	156.58 ~ 216.49

1) 滤纸法 LC<sub>50</sub> 单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; 自然土壤和人工土壤 LC<sub>50</sub> 单位为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

## 2.2 铜-毒死蜱复合暴露对蚯蚓的急性毒性作用

在单一暴露试验结果基础上进行铜-毒死蜱对蚯蚓的滤纸法和人工土壤法复合毒性试验结果分别见表 2、表 3. 采用“水生毒理联合效应相加指数法”对铜-毒死蜱联合毒性试验结果评价表明, 当采用浓度 1:1 进行试验时, 滤纸法和人工土壤法铜、毒死蜱对蚯蚓的联合毒性近似于相加作用; 而当采用毒死蜱和铜单一毒性 LC<sub>50</sub> 值为一个毒性单位, 进行毒性 1:1 的联合毒性试验时, 滤纸法和人工土壤法铜-毒死蜱对蚯蚓的联合作用类型则分别表现为协同和拮抗作用, 这可能是由于铜与毒死蜱浓度比例差异引起的. 参考已有的毒死蜱与重金属复合暴露的水生和土壤生态毒性的研究结果, 证明了有机磷农药毒死蜱与重金属联合作用机制的复杂性. Tilton 等<sup>[19]</sup>通过系统考察毒死蜱、铜复合暴露对斑马鱼嗅觉功能的影响, 发现重金属、农药相互作用产生的独特转录信号通过抑制鱼类嗅觉调解行为从

而影响了斑马鱼的嗅觉功能, 二者的联合作用类型为协同作用; 而在毒死蜱、镍共存的土壤中, 二者对土壤跳虫 (*Folsomia candida*) 的联合作用类型则为拮抗作用, 作用机制表现为毒死蜱通过竞争重金属 Ni 与氨基酸的结合点位从而降低 Ni 的结合点位, 降低 Ni 对土壤跳虫的毒性作用<sup>[20]</sup>; Steevens 等<sup>[21,22]</sup>证明甲基汞与毒死蜱形成的复合物对低等片脚类水生生物 (*hyalella azteca*) 的毒性大于单个污染物, 并且这种毒性不能用单个污染物的毒理学效应来解释, 而是一种叠加/复合毒性. 相对而言, 目前重金属、农药复合暴露对蚯蚓联合毒性作用机制的研究涉及不多. 周垂帆等研究证明, 在草甘膦和重金属铜共存的污染土壤中, 草甘膦能够控制铜的生物有效性和毒性<sup>[23]</sup>; 而重金属汞和农药溴苯腈复合暴露条件下, 溴苯腈是复合毒性效应的主要贡献因子, 并且其浓度显著影响汞对白线蚓的急性毒性作用<sup>[24]</sup>.

表 2 铜-毒死蜱复合暴露对蚯蚓急性毒性试验设计及结果 (滤纸法)

Table 2 Experimental design and results of combined pollution of Cu and chlorpyrifoson (filter paper method test)

试验设计	[Cu <sup>2+</sup> ] / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	毒死蜱 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	LC <sub>50</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$		S	AI	联合作用类型
			Cu	毒死蜱			
浓度单位 配比 1:1	0.50	0.50					
	1.00	1.00					
	2.00	2.00	1.63	1.63	≈1.00	0	相加作用
	4.00	4.00					
毒性单位 配比 1:1	0.50	1.33					
	1.00	2.66					
	2.00	5.32	1.04	2.76	0.93	0.08	协同作用
	4.00	10.64					

## 2.3 铜-毒死蜱单一和复合暴露对蚯蚓回避行为的影响

蚯蚓回避试验以蚯蚓行为为检测终点, 用以评价土壤生态功能和污染物对蚯蚓的行为效应. 自

2005 年国际标准化组织 ISO 制定了化合物对蚯蚓行为效应的测试方法草案后<sup>[25]</sup>, 蚯蚓对污染土壤的回避反应及其在土壤生态功能诊断上的意义已得到广泛应用<sup>[26]</sup>. 由表 4 回避行为试验结果可见, 单一

表 3 铜-毒死蜱复合暴露对蚯蚓急性毒性试验设计及结果(人工土壤法)

Table 3 Experimental design and results of combined pollution of Cu and chlorpyrifoson(artificial soil test)

试验设计	[Cu <sup>2+</sup> ] /mg·kg <sup>-1</sup>	毒死蜱 /mg·kg <sup>-1</sup>	LC <sub>50</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>		S	AI	联合作用类型
			Cu	毒死蜱			
	25.00	25.00					
浓度单位	50.00	50.00					
配比 1:1	100.00	100.00	136.68	136.68	≈1.00	0	相加作用
	200.00	200.00					
	106.64	40					
毒性单位	213.28	80					
配比 1:1	319.92	120	388.07	145.56	1.56	-0.56	拮抗作用
	426.56	160					

暴露下重金属铜、农药毒死蜱分别在浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup>和 48 mg·kg<sup>-1</sup>时表现出回避反应,即回避率大于 80%;蚯蚓对铜、毒死蜱表现出回避反应的浓度分别相当于人工土壤法急性毒性试验 14 d 半数致死浓度 LC<sub>50</sub>的 1/5 和 1/4。通过比较铜、毒死蜱单一及复合暴露对蚯蚓回避行为的影响,发现 25 mg·kg<sup>-1</sup>铜分别与 6、12、24、48 mg·kg<sup>-1</sup>毒死蜱复合暴露的回避行为试验结果与相应浓度毒死蜱单一暴露的结果近乎相同;而 50 mg·kg<sup>-1</sup>铜与上述浓度毒死蜱复合暴露的蚯蚓回避率较毒死蜱单独作用结果稍有增大,据此可初步判断铜、毒死蜱对蚯蚓回避行为的联合作用类型为拮抗作用。这一结果与人工土壤法铜、毒死蜱毒性单位配比 1:1 的急性毒性联合作用类型相同。

表 4 铜-毒死蜱单一及复合暴露对蚯蚓回避行为的影响

Table 4 Avoidance behavior of combined pollution of Cu and chlorpyrifos on earthworm

暴露类型	污染物浓度/mg·kg <sup>-1</sup>		回避率/%
	Cu	毒死蜱	
单一	25	0	13.3 ± 11.5
	50	0	20.0 ± 20.0
	100	0	86.7 ± 11.5
	200	0	100.0 ± 0.0
	0	6	40.0 ± 20.0
	0	12	46.7 ± 23.1
	0	24	66.7 ± 30.6
	0	48	93.3 ± 11.5
复合	25	6	40.0 ± 20.0
	25	12	53.3 ± 11.5
	25	24	66.7 ± 23.1
	25	48	93.3 ± 11.5
	50	6	46.7 ± 11.5
	50	12	60.0 ± 40.0
	50	24	80.0 ± 20.0
	50	48	100.0 ± 0.0

### 3 结论

(1) Cu、毒死蜱单一因素暴露对蚯蚓急性毒性

作用结果表明:滤纸法和人工土壤法 Cu 对蚯蚓急性毒性的 48 h-LC<sub>50</sub> 和 14 d-LC<sub>50</sub> 分别为 2.23 μg·cm<sup>-2</sup>和 496.05 mg·kg<sup>-1</sup>;而毒死蜱对蚯蚓急性毒性的 48 h-LC<sub>50</sub> 和 14 d-LC<sub>50</sub> 值分别为 5.94 μg·cm<sup>-2</sup>和 186.07 mg·kg<sup>-1</sup>。

(2) 铜-毒死蜱复合暴露的试验结果表明:滤纸法和人工土壤法铜、毒死蜱浓度单位配比 1:1 时,铜、毒死蜱对蚯蚓急性毒性联合作用类型均近似表现为相加作用;而毒性单位配比 1:1 的滤纸法和人工土壤法试验结果分别为协同作用和拮抗作用。

(3) 铜、毒死蜱对蚯蚓回避行为的联合作用类型为拮抗作用。

#### 参考文献:

- [1] Klok C, Goedhart P W, Vandecasteele B. Field effects of pollutants in dynamic environments. A case study on earthworm populations in river floodplains contaminated with heavy metals [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(1): 26-31.
- [2] Chen J X, Myerburg M M, Passero C J, *et al.* External Cu<sup>2+</sup> inhibits human epithelial Na<sup>+</sup> channels by binding at a subunit interface of extracellular domains [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2011, **286**(31): 27436-27446.
- [3] Besnard E, Chenu C, Robert M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **112**(3): 329-337.
- [4] Schramel O, Michalke B, Ketrup A. Study of the copper distribution in contaminated soils of hop fields by single and sequential extraction procedures [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **263**(1-3): 11-22.
- [5] Varó I, Serrano R, Pitarch E, *et al.* Bioaccumulation of chlorpyrifos through an experimental food chain: study of protein HSP70 as biomarker of sublethal stress in fish [J]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **42**(2): 229-235.
- [6] Daam M A, Van Den Brink P J, Nogueira A J A. Impact of single and repeated applications of the insecticide chlorpyrifos on tropical freshwater plankton communities [J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**(8): 756-771.

- [ 7 ] Levin E D, Swain H A, Donerly S, *et al.* Developmental chlorpyrifos effects on hatchling zebrafish swimming behavior[J]. *Neurotoxicology and Teratology*, 2004, **26**(6): 719-723.
- [ 8 ] Garcia M, Scheffczyk A, Garcia T, *et al.* The effects of the insecticide lambda-cyhalothrin on the earthworm *Eisenia fetida* under experimental conditions of tropical and temperate regions [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 398-400.
- [ 9 ] Li M, Liu Z T, Xu Y, *et al.* Comparative effects of Cd and Pb on biochemical response and DNA damage in the earthworm *Eisenia fetida* (Annelida, Oligochaeta) [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(5): 621-625.
- [ 10 ] Wang DS, Xu Z Z, Zhao Y M, *et al.* Change of genotoxicity for raw and finished water: Role of purification processes [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(1): 14-20.
- [ 11 ] Lemarchand C, Rosoux R, Bery P. Organochlorine pesticides, PCBs, heavy metals and anticoagulant rodenticides in tissues of Eurasian otters (*Lutra lutra*) from upper Loire River catchment (France) [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(10): 1120-1124.
- [ 12 ] 徐冬梅, 文岳中, 李立, 等. PFOS 对蚯蚓急性毒性和回避行为的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(1): 215-220.
- [ 13 ] 修瑞琴, 傅迎春, 许永香. 硒与氟离子对美丽猛水蚤的联合毒性[J]. *环境科学*, 1995, **16**(1): 26-28.
- [ 14 ] Rahman M A, Molla A H, Saha N, *et al.* Study on heavy metals levels and its risk assessment in some edible fishes from Bangshi River, Savar, Dhaka, Bangladesh [J]. *Food Chemistry*, 2012, **134**(4): 1847-1854.
- [ 15 ] Flyhammar P, Hakansson K. The release of heavy metals in stabilised MSW by oxidation [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **243-244**: 291-303.
- [ 16 ] Sardar D, Kole R K. Metabolism of chlorpyrifos in relation to its effect on the availability of some plant nutrients in soil [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(9): 1273-1280.
- [ 17 ] 刘伟, 朱鲁生, 王军, 等. 毒死蜱、马拉硫磷和氰戊菊酯对赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 的急性毒性[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(4): 597-601.
- [ 18 ] 中国国家农业部农药检定所. 化学农药环境安全评价试验准则(草稿)[S]. 北京: 中国国家农业部农药检定所, 2005. 31-33.
- [ 19 ] Tilton F A, Tilton S C, Bammler T K, *et al.* Transcriptional impact of organophosphate and metal mixtures on olfaction: Copper dominates the chlorpyrifos-induced response in adult zebrafish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, **102**(3-4): 205-215.
- [ 20 ] Broerse M, van Gestel C A M. Mixture effects of nickel and chlorpyrifos on *Folsomia candida* (Collembola) explained from development of toxicity in time [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(9): 953-957.
- [ 21 ] Steevens J A, Benson W H. Toxicological interactions of chlorpyrifos and methyl mercury in the amphipod *Hyaella azteca* [J]. *Toxicological Sciences*, 1999, **52**(2): 168-177.
- [ 22 ] Steevens J A, Benson W H. Interactions of chlorpyrifos and methyl mercury: a mechanistic approach to assess chemical mixtures [J]. *Marine Environmental Research*, 2000, **50**(1-5): 113-117.
- [ 23 ] 周垂帆, 王玉军, 俞元春, 等. 铜和草甘膦对蚯蚓的毒性效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(8): 1077-1082.
- [ 24 ] Yang D L, Zhu J, Fu R B, *et al.* Enchytraeidae *Fridericia bulbosa* as a new test species for soil ecotoxicity assessment [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(4): 501-506.
- [ 25 ] ISO. Soil Quality-Avoidance test for testing the quality of soils and effects of chemicals on behaviour. Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*) [Z]. ISO/DIS 17512-1. Geneva; International Organization for Standardization, 2008.
- [ 26 ] Antunes S C, Castro B B, Pereira R, *et al.* Contribution for tier I of the ecological risk assessment of Cunha Baixa uranium mine (Central Portugal); II. Soil ecotoxicological screening [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **390**(2-3): 387-395.

## CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	( 1 )
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	( 11 )
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO <sub>2</sub> over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	( 18 )
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	( 25 )
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H <sub>2</sub> ) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	( 34 )
Partial Pressure of CO <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	( 40 )
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	( 49 )
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	( 56 )
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	( 64 )
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	( 72 )
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	( 80 )
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	( 87 )
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	( 94 )
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	( 107 )
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	( 114 )
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	( 121 )
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	( 130 )
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	( 136 )
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	( 143 )
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	( 151 )
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	( 163 )
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	( 172 )
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	( 179 )
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	( 186 )
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	( 194 )
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	( 202 )
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	( 209 )
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	( 215 )
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	( 221 )
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	( 227 )
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	( 237 )
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	( 244 )
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	( 252 )
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	( 259 )
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	( 266 )
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	( 274 )
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	( 280 )
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber( <i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	( 286 )
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	( 295 )
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	( 301 )
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	( 309 )
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	( 314 )
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	( 325 )
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	( 333 )
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	( 338 )
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	( 343 )
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	( 349 )
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	( 357 )
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	( 365 )

# 《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1月15日 第36卷 第1期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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