

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究

王淑玲¹, 张玉喜¹, 刘汉柱¹, 辛华^{1,2*}

(1. 青岛农业大学生命科学学院, 青岛 266109; 2. 山东省植物生物技术高校重点实验室, 青岛 266109)

摘要: 为阐明氧化铜纳米颗粒(CuO NPs)暴露对植物生长的影响, 分别用 CuO NPs 悬浮液、氧化铜大颗粒(CuO BPs)悬浮液和硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)溶液进行处理, 以蒸馏水($\text{d H}_2\text{O}$)作为对照, 水培水稻幼苗, 研究了 CuO NPs 对水稻幼苗根系相关生理生化行为的影响。结果表明, 不同处理对水稻幼苗根系的影响有很大差异, 经 CuO NPs 悬浮液处理后, 水稻幼根受损较严重, 根系活力明显降低, 根内丙二醛(MDA)含量和过氧化氢(H_2O_2)含量显著升高, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性明显增强。不同处理对水稻幼苗根的影响依次为: CuO NPs > $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ > CuO BPs > $\text{d H}_2\text{O}$ 。说明氧化铜纳米颗粒对水稻根的毒害作用不仅是由于释放离子引起的, 纳米颗粒本身也起着重要作用, 氧化损伤可能是 CuO NPs 的主要致毒机制之一。

关键词: 氧化铜纳米颗粒; 水稻; 根; 代谢; 毒性

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1968-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.048

Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice

WANG Shu-ling¹, ZHANG Yu-xi¹, LIU Han-zhu¹, XIN Hua^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. University Key Laboratory of Plant Biotechnology in Shandong Province, Qingdao 266109, China)

Abstract: To study the toxicity of copper oxide nanoparticles (CuO NPs) on plant growth, the physiological and biochemical activities of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings were detected under different kinds of treatments (CuO NPs suspension, CuO BPs suspension and $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ solution), using distilled water ($\text{d H}_2\text{O}$) culture as contrast. The results showed that the response of rice roots to four treatments was very different. After treated with CuO NPs suspension, the rice roots were seriously damaged, the root activity obviously decreased, the MDA and H_2O_2 content rose, and the activity of SOD and POD apparently increased. The effect of different treatments on rice roots followed the order of CuO NPs > $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ > CuO BPs > $\text{d H}_2\text{O}$. The results demonstrated that CuO NPs had a serious effect on the root growth of rice, the toxicity of nanoparticles on rice root was not only caused by the release of Cu ion, the particles also played an important role, and that oxidative damage might be one of the main toxic mechanisms of copper oxide nanoparticles.

Key words: copper oxide nanoparticles; rice; root; metabolism; toxicity

天然状态下的纳米材料一直存在, 矿物风化、火山爆发等都会产生纳米颗粒, 而且生活中的垃圾焚烧、工业废物和汽车废气排放过程中, 也会伴随纳米颗粒的产生^[1]。随着科技的进步, 纳米技术迅猛发展, 纳米材料在使用过程中不可避免的会流入环境中, 其潜在的生态安全问题也引起了人们的广泛关注。目前, 关于纳米材料毒性效应的研究报道已有不少^[2~5]。多数研究表明, 纳米颗粒对生物体具有明显的毒性效应, 仅有少数几种纳米材料对生物体没有或有轻微的毒性效应; 纳米颗粒的毒性效应因纳米颗粒的种类和供试材料的不同而异^[6,7]。

氧化铜纳米颗粒(CuO NPs)由于具有良好的导热、导电、催化和抗菌性能, 被广泛应用于电子、化工、机械和农业等领域^[8]。在生物体内, 铜作为一种微量元素参与多种代谢活动, 而过量的铜离子将会对机体产生毒害作用; 况且, 纳米氧化铜由于其

独特的性质, 比一般氧化铜更活泼, 更容易与其他物质发生作用。因而, 纳米氧化铜的毒性效应也引起了人们的注意。研究发现, 较低浓度的纳米氧化铜对白菜(*Brassica pekinensis*)根和芽的伸长即具有明显的抑制作用^[9]。纳米氧化铜悬浮液培养后的玉米(*Zea mays*)幼苗叶片明显发黄, 须根减少, 根伸长被抑制, 抑制作用随浓度增加而增强; 而且, CuO NPs 还可以被玉米根部吸收, 并向地上部运输^[10]。

目前, CuO NPs 的毒性机制尚不清楚。它们在水中的几种形态对水稻(*Oryza sativa*)幼根产生的毒性反应鲜见研究报道。本研究以水稻为实验材料, 水培幼苗, 分别用 CuO NPs 悬浮液、氧化铜大颗粒

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2013-11-08

作者简介: 王淑玲(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物学, E-mail: wangshl0309@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hxin@qau.edu.cn

(CuO BPs) 悬浮液和硫酸铜溶液 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 进行处理, 以蒸馏水作为对照, 通过研究不同处理对水稻根系活力、水稻根内丙二醛 (MDA) 含量、过氧化氢 (H_2O_2) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性变化及根部细胞死亡情况的影响, 探讨 CuO NPs 致毒的离子效应和颗粒效应, 以期对纳米颗粒的植物毒理机制研究提供进一步的依据。

1 材料与方法

1.1 颗粒特征和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液浓度的确定

CuO NPs 和 CuO BPs 均购自美国 Sigma-Aldrich 公司, CuO NPs 纯度 $\geq 99.5\%$, 平均粒径小于 50 nm。CuO BPs 纯度为 99.99%, 取部分颗粒经过喷镀后, 在日本电子 JSM-7500F 扫描电子显微镜下观察粒径大小在 0.8 ~ 2.5 μm 之间。分别配制浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超声 30 min 后, 备用。

将 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CuO NPs 悬浮液, 分别静置 6、12、24、48 h 后, 取上层清液 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min, 用 0.22 μm 混合纤维滤膜抽滤, 滤液用石墨炉原子吸收测定其中的 Cu^{2+} 浓度, Cu^{2+} 浓度于 24 h 后基本趋于稳定, 浓度为 0.07 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 据此配制 0.27 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液作为离子对照。

1.2 种子萌发与处理

“中花 11 号”水稻种子由上海水稻研究所提供。将水稻种子 (40 g/份) 充分浸泡, 待其吸水饱胀后, 用 3% 的次氯酸钠消毒 20 min, 蒸馏水清洗 3 遍后铺在带有小孔的塑料筐底, 置于 28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中催芽, 种子萌发后移入光照培养箱中继续培养 (28 $^{\circ}\text{C}$ /16 h 光照、20 $^{\circ}\text{C}$ /8 h 黑暗)。待根生长至 3 ~ 4 cm 长时, 分别用 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CuO NPs、5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

的 CuO BPs 及 0.27 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶液处理, 蒸馏水作对照。分别取处理 6、12 和 24 h 后的水稻根测定各种生理指标。

1.3 各种代谢活动的研究

水稻根系活力的形态观察: 取不同处理的水稻根尖, 分别用氯化苯基四氮唑 (TTC) 和埃文斯蓝 (Evans blue) 染色后, 在 JM Olympus 体视显微镜下观察并拍照。

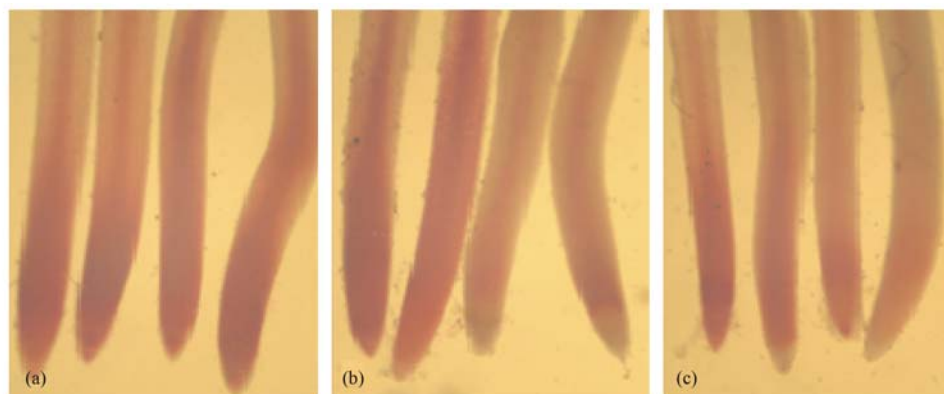
水稻根系各种代谢活动的测定: 水稻根系活力的测定采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法^[11]; H_2O_2 含量的测定采用比色法^[12]; MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 反应法^[13]; SOD 活性的测定采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法^[14]; POD 活性的测定参照 Cakmak 等^[15] 的方法。每个测定设 3 个重复。

实验数据统计分析采用 SPSS 15.0 软件, 用 ANOVA (analysis of variance, LSD 检验法) 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻幼苗根系活力的影响

水稻的根经过 TTC 染色后, 可以看出, 处理 6 h 时, CuO NPs、CuO BPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的水稻根尖染色程度与对照相似, 均呈红色, 没有很明显的差别 [图 1(a)]; 12 h 后, CuO NPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的水稻幼根染色变暗, 特别是根冠区, 几乎变为灰色 [图 1(b)], CuO BPs 处理的根颜色没有很大变化, 更红一些, 分析可能是释放的少量铜离子短时间内有利于提高根的活性; 24 h 后, CuO NPs 处理的根尖除分生区外其他几乎变为灰色, CuO BPs 处理的根尖根冠区也变为灰色 [图 1(c)]。



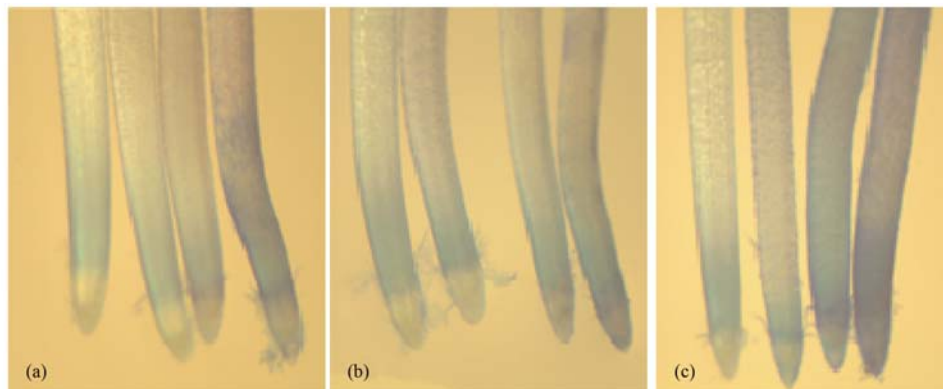
(a) 处理 6 h 的水稻根, (b) 处理 12 h 的水稻根, (c) 处理 24 h 的水稻根
每幅图中从左到右依次为 d H_2O 、CuO BPs、 Cu^{2+} 和 CuO NPs 处理的水稻根

图 1 水稻根系活力的形态观察

Fig. 1 Morphological observation of rice root activity

根系细胞受损伤程度的大小与根系活力有着密切的关系,因此,细胞活力的大小能够从侧面反映根系活力的大小. Evans blue 能够通过损伤后的细胞膜,与胞内蛋白质结合形成蛋白质和 Evans blue 的复合物从而被染上蓝色. 不同处理后,细胞死亡情况的动态检测结果如图 2 所示. 处理 6 h 时, CuO BPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的水稻根尖染色程度与对照相似,除了分生区外侧将要脱落的根冠细胞稍微呈现蓝色外,其它部位几乎不显色,而

CuO NPs 处理的水稻根着色较重[图 2(a)]; 12 h 时,各种处理的根着色较 6 h 时都有所增加,这可能是由于根系新陈代谢、细胞脱落死亡引起的,但是不同处理的着色程度并不相同, CuO BPs 处理与对照相比无明显差别,但 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 CuO NPs 处理的根着色都较对照深,而且分生区顶端的根冠细胞也开始着色[图 2(b)]; 24 h 时, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 CuO NPs 处理的根着色进一步加深[图 2(c)].



(a) 处理 6 h 的水稻根, (b) 处理 12 h 的水稻根, (c) 处理 24 h 的水稻根;
每幅图中从左到右依次为 $\text{d H}_2\text{O}$ 、CuO BPs、 Cu^{2+} 和 CuO NPs 处理的水稻根

图 2 水稻根尖细胞死亡动态检测

Fig. 2 Dynamic detection of dead cells in root tips of rice

不同处理的水稻幼苗根系活力随时间的变化如图 3 所示. 从中可以看出,随着处理时间的延长, CuO BPs 处理的水稻根系活力与蒸馏水处理的几乎没有很大区别, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的根活力明显下降,而 CuO NPs 处理的水稻根系活力急剧下降,这与上面水稻根系活力形态观察的结果基本一致.

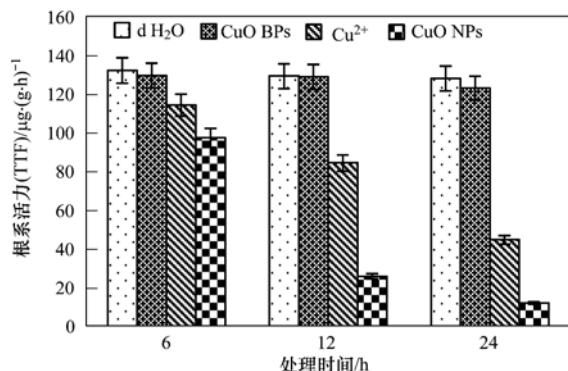


图 3 不同处理水稻幼苗根系活力随时间的变化

Fig. 3 Time-dependent change of rice root activity with different treatments

2.2 不同处理对水稻幼根 H_2O_2 含量的影响

正常生长条件下,植物体内 H_2O_2 的产生和清除

过程基本保持一种精细的平衡状态,这样既保证了植物体内 H_2O_2 具有一定的生理功能,同时也将其对植物的伤害效应降到最低. 从图 4 可以看出,24 h 内,蒸馏水培养的水稻根中几乎检测不到 H_2O_2 . 但是,其他 3 种处理的根均可检测到. 处理 6 h 后, CuO NPs、CuO BPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的水稻幼苗根尖内 H_2O_2 含量已有明显增多,随着处理时间的延长, CuO NPs、CuO BPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的水稻幼苗根尖内 H_2O_2 含量较对照持续增多,其增加量由大到小依次为: CuO NPs > $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ > CuO BPs > $\text{d H}_2\text{O}$. H_2O_2 含量增加说明可能引起了水稻幼根内活性氧代谢的波动和紊乱.

2.3 不同处理对水稻幼苗根系 MDA 含量的影响

不同处理对水稻幼苗根尖 MDA 含量的影响如图 5 所示. MDA 是膜脂过氧化作用的最终分解产物,其含量的多少反映了植物遭受逆境伤害的程度. 从图 5 可以看出,6 h 后, CuO BPs 处理的水稻幼苗根尖内 MDA 含量较对照有稍微增加, CuO NPs 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的根尖内 MDA 含量较对照已显著增加; 12 h 后, CuO NPs 处理的根内 MDA 含量进一步增多,较 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 处理的有明显增多,而 CuO

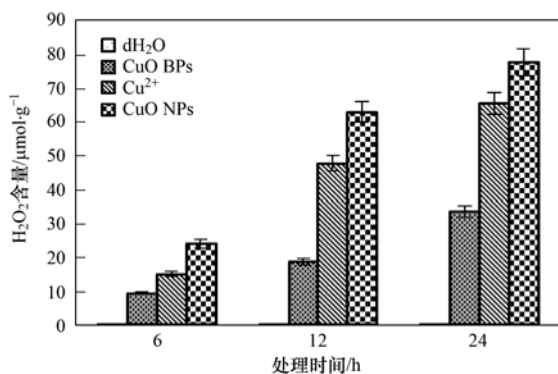
图4 不同处理水稻幼根内H₂O₂含量随时间的变化

Fig. 4 Time-dependent change of H₂O₂ content in rice roots with different treatments

BPs 处理的根内 MDA 含量无明显变化; 处理 24 h 后, CuO BPs、CuSO₄·5H₂O 和 CuO NPs 处理的根内 MDA 含量分别为对照的 114%、220% 和 255%。不同处理水稻幼苗根尖内 MDA 含量的差别说明根部细胞发生膜脂过氧化反应、受损伤的程度不同。

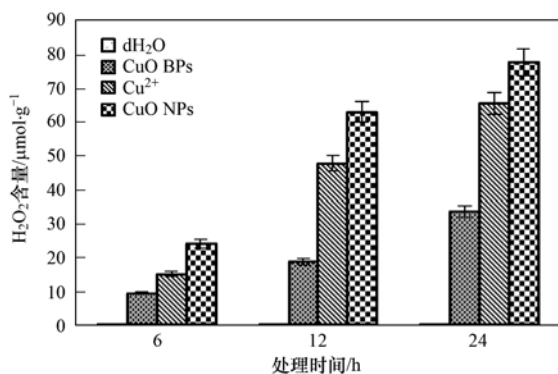


图5 不同处理水稻幼根内 MDA 含量随时间的变化

Fig. 5 Time-dependent change of MDA content in rice roots with different treatments

2.4 不同处理对水稻根内 SOD 和 POD 活性的影响

不同处理水稻幼苗根尖内 SOD 活性随时间变化的结果如图 6 所示。从中可以看出, 6 h 后, CuSO₄·5H₂O 和 CuO BPs 处理的水稻幼苗根尖内 SOD 活性较对照的变化并不明显, 而 CuO NPs 处理的根内 SOD 活性即已显著升高; 12 h 后, CuO NPs 和 CuSO₄·5H₂O 处理的根内 SOD 的活性较对照进一步升高; 24 h 后, CuO BPs 处理的水稻幼苗根尖内 SOD 活性未发生明显变化, 而 CuSO₄·5H₂O 和 CuO NPs 处理的根尖内 SOD 活性再次升高, 分别为对照的 1.36 倍和 1.42 倍。

POD 作为生物体内的活性氧清除剂之一, 与 SOD 等相互配合组成生物体的抗氧化链条, 消除体

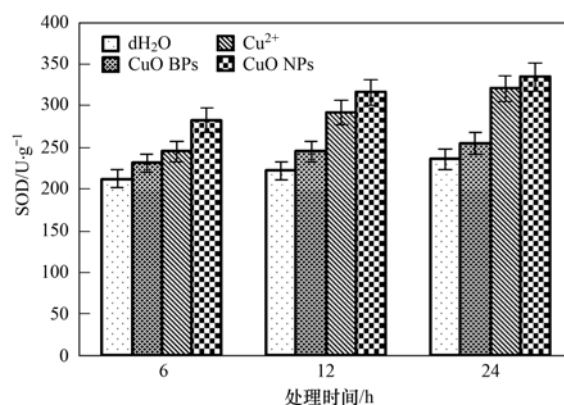


图6 不同处理水稻幼根内 SOD 活性随时间的变化

Fig. 6 Time-dependent change of SOD activity in rice roots with different treatments

内的自由基, 帮助植物抵抗氧化损伤, 在保护机体免受氧化损伤方面发挥重要作用。从图 7 可以看出, 不同处理的 POD 活性与 SOD 活性变化趋势基本一致。

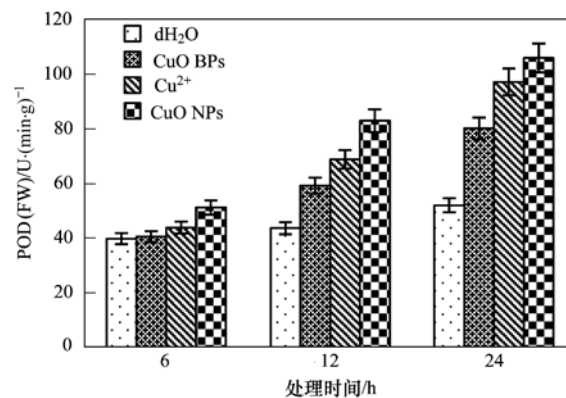


图7 不同处理水稻幼根内 POD 活性随时间的变化

Fig. 7 Time-dependent change of POD activity in rice roots with different treatments

3 讨论

纳米材料的植物毒性不单是由于溶解的重金属离子引起的, 毒性与颗粒自身大小、形态、表面活性和溶解性等因素有很大关系^[16,17]。CuO NPs 在水溶液中会团聚成大颗粒, 也会释放出 Cu²⁺, 因此, 在研究 CuO NPs 的毒性效应时, 既利用 CuO BPs 进行处理, 也测定了相应浓度的 Cu²⁺ 进行处理。Cu²⁺ 是植物生长必需的微量元素之一, 在植物体生长发育及新陈代谢过程中发挥着重要作用, 但如果浓度大于植物生长所需的浓度界限时, 则会产生重金属毒害作用。通过 TTC 法和 Evans blue 染色结果表明, CuO NPs 对水稻幼苗的毒性作用均大于 Cu²⁺ 和 CuO BPs, 而且, 这种方法的结果与根系活力定量测

定的结果一致. 根系活力是反映根系代谢强度大小的重要指标,活力越高,说明根系组织的代谢活动越旺盛. 因此,该种染色方法可以作为定性测定植物根系活力和细胞受损伤程度的快速方法.

根系活力测定结果表明,CuO NPs、 Cu^{2+} 和CuO BPs处理的水稻幼苗根系活力均有一定程度的降低,24 h后,不同处理对根系活力抑制程度的大小依次为:CuO NPs > Cu^{2+} > CuO BPs > d H_2O . 根内的 H_2O_2 含量及MDA含量、POD和SOD活性变化的测定也得出了同样的结果. 不同形态的重金属铜对水稻幼根的影响程度由大到小依次为:CuO NPs > Cu^{2+} > CuO BPs > d H_2O . 这与前人关于不同形态重金属铜对白菜幼苗根伸长的影响的结果不大一致^[9],这可能是由于不同种类的植物材料对纳米颗粒的反应不同引起的. 由于纳米氧化铜具有较大的比表面积,较氧化铜大颗粒更容易与周围的小分子发生反应,在溶液中释放离子的速度较大颗粒更快^[18],这可能是纳米氧化铜毒性效应较大颗粒显著的原因之一. 本实验结果也支持该观点.

目前,已有许多关于纳米颗粒致毒机制的研究,大部分研究提出,氧化损伤可能是纳米颗粒主要的致毒之一. 金盛杨等^[19]研究了纳米氧化铜对小麦(*Triticum aestivum*)根系SOD活性、MDA含量和根系活力的影响,结果表明,在一定浓度范围内,这3种指标随纳米氧化铜浓度增加出现先升高后降低的趋势;王震宇等^[20]的研究结果表明,人工合成纳米 TiO_2 和MWCNTs对玉米幼苗的抗氧化系统均具有较大影响;Sayes等^[21]认为,纳米 C_{60} 主要是通过诱导细胞脂质过氧化而产生毒性的. 由于纳米材料独特的性能,其表面晶格更易遭破坏,产生更多活性位点,与植物细胞点接触会增加体内的过氧化反应,导致体内自由基含量的增加. 有研究表明,少量的CuO NPs进入细胞即能诱导细胞产生大量的活性氧^[22],而溶酶体和线粒体等细胞器参与了活性氧的产生^[23,24]. Wang等^[25]在完整的微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)内检测到了纳米颗粒的存在,并且与富里酸结合的纳米氧化铜能够诱导微囊藻产生更多的活性氧. 本实验中,纳米颗粒处理的水稻幼根中MDA和 H_2O_2 含量较其他处理显著增多,同时,该处理组中SOD和POD的活性均高于其他处理,说明纳米颗粒处理刺激水稻幼根内产生了更多的活性氧,这可能是由于纳米氧化铜已经进入到了水稻根尖细胞内,但是具体的进入和积累途径有待于进一步研究.

4 结论

(1)CuO NPs对水稻幼根具有明显的毒性,导致其根系活力下降,根部细胞大量死亡. 水稻根中 H_2O_2 和MDA的含量显著增高,SOD和POD的活性明显增强,说明CuO NPs可能进入根内,并对细胞造成了伤害.

(2)CuO NPs对水稻幼根的影响明显大于CuO BPs和 Cu^{2+} 处理,说明,纳米氧化铜的毒性效应不单是由溶解的 Cu^{2+} 引起的,纳米颗粒本身也起了很大的作用.

参考文献:

- [1] Biswas P, Wu C Y. Critical review: nanoparticles and the environment [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, **55**(6): 708-746.
- [2] Kumari M, Khan S S, Pakrashi S, et al. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 613-621.
- [3] Yin L Y, Cheng Y W, Espinasse B, et al. More than the Ions: The effects of silver nanoparticles on *Lolium multiflorum* [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(6): 2360-2367.
- [4] López-Moreno M L, De la Rosa G, Hernández-Viezas J A, et al. X-ray absorption spectroscopy (XAS) corroboration of the uptake and storage of CeO_2 nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, **58**(6): 3689-3693.
- [5] Rico C M, Majumdar S, Duarte-Gardea M, et al. Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, **59**(8): 3485-3498.
- [6] 陆长梅, 张超英, 温俊强, 等. 纳米材料促进大豆萌芽、生长的影响及其机理研究 [J]. 大豆科学, 2002, **21**(3): 168-171.
- [7] 王振红, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 纳米氧化锌对绿豆芽生长的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(4): 619-624.
- [8] Griffitt R J, Weil R, Hyndman K A, et al. Exposure to copper nanoparticles causes gill injury and acute lethality in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(23): 8178-8186.
- [9] 向垒, 莫测辉, 卢锡洪, 等. 纳米氧化铜对白菜种子发芽的毒害作用研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(9): 1830-1835.
- [10] Wang Z Y, Xie X Y, Zhao J, et al. Xylem-and phloem-based transport of CuO Nanoparticles in maize (*Zea mays* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(8): 4434-4441.
- [11] 郑坚, 陈秋夏, 金川, 等. 不同TTC法测定枫香等阔叶树容器苗根系活力探讨 [J]. 浙江农业科学, 2008, (1): 39-42.

- [12] 陈惠萍. 活性氧的检测方法[J]. 华南热带农业大学学报, 2000, **6**(2): 14-17.
- [13] Buege J A, Aust S D. Microsomal lipid peroxidation [J]. Methods in Enzymology, 1978, **52**: 302-310.
- [14] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. Analytical Biochemistry, 1971, **44**(1): 276-287.
- [15] Cakmak I, Strbac D, Marschner H. Activities of hydrogen peroxide-scavenging enzymes in germinating wheat seeds [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, **44**(1): 127-132.
- [16] Lin D H, Xing B S. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(15): 5580-5585.
- [17] Asharani P V, Wu Y L, Gong Z Y, *et al.* Toxicity of silver nanoparticles in zebrafish models [J]. Nanotechnology, 2008, **19**(25): 225102.
- [18] Mortimer M, Kasemets K, Kahru A. Toxicity of ZnO and CuO nanoparticles to ciliated protozoa *Tetrahymena thermophila* [J]. Toxicology, 2010, **269**(2-3): 182-189.
- [19] 金盛杨, 王玉军, 汪鹏, 等. 纳米氧化铜对小麦根系生理生化行为的影响 [J]. 土壤, 2011, **43**(4): 605-610.
- [20] 王震宇, 于晓莉, 高冬梅, 等. 人工合成纳米 TiO₂ 和 MWCNTs 对玉米生长及其抗氧化系统的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 480-487.
- [21] Sayes C M, Gobin A M, Ausman K D, *et al.* Nano-C₆₀ cytotoxicity is due to lipid peroxidation [J]. Biomaterials, 2005, **26**(36): 7587-7595.
- [22] Toduka Y, Toyooka T, Ibuki Y. Flow cytometric evaluation of nanoparticles using side-scattered light and reactive oxygen species-mediated fluorescence-correlation with genotoxicity [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(14): 7629-7636.
- [23] Nohl H, Gille L. Lysosomal ROS formation [J]. Redox Report, 2005, **10**(4): 199-205.
- [24] Zhang D X, Gutterman D D. Mitochondrial reactive oxygen species-mediated signaling in endothelial cells [J]. American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology, 2007, **292**(5): 2023-2031.
- [25] Wang Z Y, Li J, Zhao J, *et al.* Toxicity and internalization of CuO Nanoparticles to prokaryotic alga *Microcystis aeruginosa* as affected by dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(14): 6032-6040.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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