

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

**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

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 ..... 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 ..... 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 ..... 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO<sub>2</sub> 数据筛分及浓度特征研究 ..... 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 ..... 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 ..... 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 ..... 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈浩, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 ..... 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 ..... 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 ..... 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 ..... 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 ..... 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 ..... 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 ..... 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 ..... 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 ..... 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 ..... 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解邻苯二甲酸二甲酯 ..... 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 ..... 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 ..... 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 ..... 鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 ..... 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 ..... 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 ..... 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 ..... 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 ..... 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 ..... 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 ..... 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 ..... 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 ..... 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 ..... 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 ..... 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 ..... 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 ..... 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 ..... 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的关系 ..... 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N<sub>2</sub>O 产生的不同过程及贡献 ..... 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及其全球增温潜势的影响 ..... 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 ..... 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 ..... 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 ..... 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 ..... 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 ..... 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B<sub>12</sub> 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 ..... 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 ..... 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 ..... 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 ..... 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 ..... 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 ..... 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 ..... 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 ..... 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 ..... 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 ..... 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

# 丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应

王卫中<sup>1</sup>, 王发园<sup>1\*</sup>, 李帅<sup>1</sup>, 刘雪琴<sup>2,3</sup>

(1. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003; 2. 洛阳师范学院生命科学系, 洛阳 471022; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

**摘要:** 人工纳米颗粒(engineered nanoparticles, ENPs)能被植物吸收、积累,随食物链进入人体而引起健康风险.丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌可与陆地生态系统中绝大多数高等植物互惠共生,可能影响 ENPs 的生物效应.在温室土壤盆栽条件下研究了施加不同水平纳米 ZnO(0、500、1 000、2 000、3 000 mg·kg<sup>-1</sup>)和接种 AM 真菌 *Acaulospora mellea* 对玉米生长和营养状况的影响.结果表明,随土壤中纳米 ZnO 施加水平的增加,菌根侵染率和玉米生物量均呈降低趋势,根系总长、总表面积及总体积降低,植株体内 Zn 含量和吸收量逐渐增加,地上部分 P、N、K、Fe、Cu 吸收量逐渐降低.与对照相比,接种 AM 真菌均促进玉米的生长,改善 P、N、K 营养,根系总长、总表面积及总体积增加,并在施加纳米 ZnO 时增加 Zn 在玉米根系中的分配比例.本结果首次表明,土壤中纳米 ZnO 对丛枝菌根具有一定毒性,而接种 AM 真菌能够减轻其毒性,对宿主植物起到保护作用.

**关键词:** 纳米颗粒; 丛枝菌根真菌; 植物毒性; 纳米毒性; 纳米污染

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3135-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.042

## Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize

WANG Wei-zhong<sup>1</sup>, WANG Fa-yuan<sup>1</sup>, LI Shuai<sup>1</sup>, LIU Xue-qin<sup>2,3</sup>

(1. School of Agriculture College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Department of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Engineered nanoparticles (ENPs) can be taken up and accumulated in plants, then enter human bodies via food chain, and thus cause potential health risk. Arbuscular mycorrhizal fungi form mutualistic symbioses with the majority of higher plants in terrestrial ecosystems, and potentially influence the biological effects of ENPs. The present greenhouse pot culture experiment studied the effects of inoculation with or without arbuscular mycorrhizal fungus *Acaulospora mellea* on growth and nutritional status of maize under different nano-ZnO levels (0, 500, 1 000, 2 000 and 3 000 mg·kg<sup>-1</sup>) artificially added into soil. Results showed that with the increasing nano-ZnO levels in soil, mycorrhizal colonization rate and biomass of maize plants showed a decreasing trend, total root length, total surface area and total volume reduced, while Zn concentration and uptake in plants gradually increased, and P, N, K, Fe, and Cu uptake in shoots all decreased. Compared with the controls, arbuscular mycorrhizal inoculation improved the growth and P, N and K nutrition of maize, enhanced total root length, total surface area and total volume, and increased Zn allocation to roots when nano-ZnO was added. Our results firstly show that nano-ZnO in soil induces toxicity to arbuscular mycorrhizae, while arbuscular mycorrhizal inoculation can alleviate its toxicity and play a protective role in plants.

**Key words:** nanoparticles; arbuscular mycorrhizal fungi; phytotoxicity; nanotoxicity; nanopollution

人工纳米颗粒(engineered nanoparticles, ENPs)在被广泛应用的同时,会随纳米产品的运输、储存、泄露、使用及废物处理等途径进入水体、大气和土壤等环境,并对各生态系统和健康产生潜在的影响. ENPs 进入土壤环境后会进行迁移和转化,不仅影响植物和土壤生物,而且能够被植物吸收、富集和累积,从而随食物链进入人畜体内,产生健康风险<sup>[1-5]</sup>. 因此,ENPs 对于植物(尤其是农作物)的生物效应、吸收和累积值得重视.

纳米 ZnO 是用途最广泛的 ENPs 之一,有研究发现它对萝卜、油菜、黑麦草<sup>[6,7]</sup>、拟南芥<sup>[8]</sup>、绿豆

芽<sup>[9]</sup>等均表现出一定的植物毒性,同时可能对洋葱<sup>[10]</sup>具有致畸变特性、基因毒性和细胞毒性,甚至使大豆不能产生籽粒<sup>[11]</sup>,并引起 Zn 在大豆叶片、籽粒等器官中的积累<sup>[12]</sup>. 因此,其生物效应也受到广泛关注<sup>[2,13,14]</sup>.

丛枝菌根是自然界中分布最广的一类菌根,大

收稿日期: 2014-01-03; 修订日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171369); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(2012HASTT014); 河南省高校青年骨干教师计划项目(2012GGJS-079)

作者简介: 王卫中(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为丛枝菌根与植物营养学, E-mail: wangweizhonggood@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wfy1975@163.com

量存在于农田、森林、菜地土壤以及各种逆境环境中,能与陆地上绝大多数的高等植物共生,能够增强宿主植物的抗逆性,缓解环境胁迫,利于植物的生存<sup>[15]</sup>.同时,丛枝菌根能够影响植物对污染物的吸收、积累和运输,对农产品质量安全具有重要意义<sup>[16]</sup>.有研究发现丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌有助于芦苇和黄菖蒲在根土界面形成Cu纳米颗粒<sup>[17]</sup>,这意味着AM真菌可能对植物的解毒机制有重要影响.Feng等<sup>[18]</sup>首次发现纳米FeO和纳米银影响三叶草的菌根侵染和促生效应,但显然,ENPs作为潜在的污染物,其与丛枝菌根之间的关系值得深入研究.本试验的目的是在温室盆栽条件下模拟不同水平纳米ZnO污染土壤,研究接种AM真菌和施加纳米ZnO对玉米生长和营养状况的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物为玉米(*Zea mays* L.),品种为郑单17.供试AM真菌为*Acaulospora mellea* ZZ,宿主植物为玉米、苏丹草等,基质为河沙.去掉植物地上部分,把根剪碎,以含有真菌孢子、菌丝、侵染根段等繁殖体和根际土壤的菌剂为接种物.纳米ZnO粒径为 $90\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ .土壤采自河南科技大学新区农场,过2 mm筛,基本理化性质如下,pH 8.12,有机质2.08%,全氮0.12%,全磷0.22%,全钾2.27%,碱解氮 $79.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $8.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $304.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全Zn $53.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,DTPA-Zn $0.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 试验设计

试验设置5个纳米ZnO施加水平(0、500、1000、2000、3000 $\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),每个水平下设置接种AM真菌(M)和不接种(N)处理,每个处理重复4次,共40盆.土壤经过高压蒸汽灭菌,混合均匀,风干备用.使用A:260型塑料花盆,每盆装入3 kg土壤,按 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施入N肥( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ),使用逐级混匀法施加纳米ZnO.接种处理每盆施加180 g菌剂,与土壤混匀,不接种处理加入等量灭菌菌剂,并浇上菌剂滤液,使其它微生物群落尽量一致.

2013年3月17日播种,每盆播种催芽玉米种子6颗.玉米在日光温室中生长,期间精细管理,经常调整各盆的位置,定期用称重法浇水,使土壤含水量保持在70%左右.玉米生长11周后收获.

### 1.3 测定项目及方法

玉米收获前用直尺测株高.地上部分与根系分开收获,收获后地上部分用自来水冲洗干净,再用蒸馏水润洗,在烘箱中先在 $105^\circ\text{C}$ 下杀青30 min,再在 $70^\circ\text{C}$ 下烘干至衡重.根系部分洗干净后暂时放入冰箱中冷冻保存,使用Epson-10000XL扫描仪(日本)测定根系总长度、根系总表面积、根系总体积及根直径.挑出部分细根,使用KOH消煮后品红染色-加权法<sup>[19]</sup>测菌根侵染率.其余根系烘干后用百分之一天平称重.地上部分和根系烘干后粉碎,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,然后用凯氏定氮仪测N,用钼锑抗比色法测P,用原子吸收分光光度计(Varian AA240,美国)测K、Zn、Cu、Fe含量.以上方法均参照文献<sup>[20]</sup>进行,同时用标准物质(灌木枝叶GBW07603,GSV-2)进行质量控制.

### 1.4 数据分析

数据用Excel 2003和SPSS 17.0进行单因素方差分析,Duncan多重比较各处理之间的差异显著性,双因素方差分析接种纳米ZnO施加水平和接种AM真菌之间的交互作用.

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌根侵染率

由表1可知,不接种处理玉米根系没有被AM真菌侵染,接种处理后对玉米侵染较好,菌根侵染率随土壤纳米ZnO施加水平升高呈降低趋势,这说明高施加水平下纳米ZnO对菌根有一定生物毒性.多数ENPs具有一定的真菌毒性<sup>[21]</sup>,纳米Ag/Ti降低向日葵的菌根侵染率<sup>[22]</sup>.但即使在 $3000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米ZnO水平下,玉米根系依然能够被侵染,这说明AM真菌对纳米ZnO存在一定耐性.纳米FeO、纳米Ag没有降低甚至增加了*Glomus caledonium*对三叶草的菌根侵染率<sup>[18]</sup>,这说明不同种类的ENPs对菌根的毒性不同,可能与ENPs的性质和施用量、植物和AM真菌种类等有关,尚需深入探讨.

### 2.2 玉米生物量和根系形态

随着土壤中纳米ZnO施加水平的升高,接种与不接种处理的地上部分干重、根系干重、株高都呈现下降趋势,而根冠比逐渐增加(表1),总根长、总表面积、总体积逐渐降低,根平均直径无显著变化(表2).接种处理的玉米地上部分干重、根系干重和株高在较低纳米ZnO施加水平下显著高于不接种处理,而在 $3000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下接种效果不显著.接种对根冠比没有显著影响.多数纳米ZnO施

加水平下接菌处理显著增加总根长、总表面积和总体积. 双因素方差分析显示, 纳米 ZnO 施加水平对地上部分干重、根系干重、根冠比、株高均有显著

影响, 接菌对地上部分干重、根系干重和株高有显著影响, 纳米 ZnO 施加水平和接菌处理对地上部分和株高有显著交互作用.

表 1 不同处理下玉米干重、根冠比、株高和菌根侵染率<sup>1)</sup>

Table 1 Dry weight, root/shoot ratio, plant height and mycorrhizal colonization of maize under different treatments

纳米 ZnO/mg·kg <sup>-1</sup>	接菌处理	干重/g·pot <sup>-1</sup>		根冠比	株高/cm	菌根侵染率/%
		地上部分	根系			
0	M	16.13(1.69)a	2.03(0.24)a	0.126(0.009)e	77.1(1.71)a	52(1.4)a
	N	10.79(1.31)b	1.71(0.24)b	0.159(0.011)cde	63.8(6.17)b	0
500	M	7.91(1.47)c	1.29(0.18)c	0.164(0.012)cde	65.3(2.62)c	45(2.5)ab
	N	4.46(0.60)e	0.63(0.15)d	0.141(0.018)de	51.6(4.26)d	0
1 000	M	5.91(0.57)d	1.18(0.128)c	0.201(0.025)bc	57.0(4.28)d	43(3.8)ab
	N	3.67(0.42)ef	0.66(0.15)d	0.183(0.051)bcd	49.6(2.60)d	0
2 000	M	3.99(0.45)ef	1.02(0.17)c	0.256(0.037)a	53.3(2.76)d	32(2.5)bc
	N	3.03(0.51)ef	0.70(0.23)d	0.224(0.048)ab	46.1(2.77)de	0
3 000	M	2.60(0.49)f	0.65(0.08)d	0.255(0.045)a	41.8(2.94)f	29(9.4)c
	N	2.48(0.75)f	0.55(0.22)d	0.218(0.036)ab	41.2(6.37)ef	0
施加水平		169.4***	54.1***	15.2***	110.1***	5.3**
接菌		66.0***	41.8***	2.0ns	14.5**	—
施加水平 × 接菌		9.6***	2.6ns	1.4ns	4.5**	—

1) M 和 N 代表 AM 真菌接种处理和不接种处理, 表内数据为平均值 (标准偏差), 同列括号后不同字母表示单因素 Duncan 分析结果在  $P < 0.05$  水平差异显著; 双因素方差分析结果: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ , ns 表示差异不显著, — 表示无双因素分析结果, 下同

表 2 不同处理下玉米根系总长度、总表面积、总体积、平均直径

Table 2 Root total length, total surface area, total volume and average diameter of maize roots under different treatments

纳米 ZnO/mg·kg <sup>-1</sup>	接菌处理	总长/cm·pot <sup>-1</sup>	总表面积/cm <sup>2</sup> ·pot <sup>-1</sup>	总体积/cm <sup>3</sup> ·pot <sup>-1</sup>	平均直径/mm
0	M	25 863(3 980)a	2 223(300)a	15.6(1.74)a	0.281(0.006)bc
	N	25 443(6 047)a	1 975(443)ab	12.6(2.63)b	0.252(0.008)c
500	M	16 392(885)b	1 633(123)bc	13.1(1.37)b	0.322(0.010)ab
	N	10 672(3 246)cde	1 002(230)de	7.6(1.20)c	0.306(0.021)ab
1 000	M	15 312(1 769)bc	1 536(125)c	12.3(0.82)b	0.323(0.014)ab
	N	10 095(4 234)de	941(314)def	7.2(1.88)c	0.317(0.075)ab
2 000	M	12 533(2 779)bed	1 283(245)cd	10.5(1.72)b	0.331(0.014)ab
	N	8 975(3 131)de	847(248)ef	6.4(1.53)cd	0.306(0.027)ab
3 000	M	8 335(1 200)de	869(59)ef	7.3(0.92)c	0.335(0.035)a
	N	6 084(2 264)e	590(240)f	4.6(2.07)d	0.308(0.030)ab
施加水平		35.7***	31.4***	25.2***	4.7**
接菌		10.8**	29.4***	61.0***	4.5*
施加水平 × 接菌		0.9ns	0.9ns	1.1ns	0.2ns

有研究表明, 纳米 ZnO 使黑麦草根尖缩窄, 表皮和皮层细胞空泡化甚至崩解, 从而降低了生物量<sup>[7]</sup>. 纳米 ZnO 的植物毒性甚至强于同等浓度的 Zn<sup>2+</sup><sup>[8]</sup>. 随着纳米 ZnO 浓度的升高, 洋葱的有丝分裂指数降低、染色体畸变指数增加、细胞微核率增加, 并伴有膜脂过氧化现象和细胞内化作用<sup>[10]</sup>. 本结果也证明纳米 ZnO 对玉米存在植物毒性, 且随施加水平升高而增加. 根冠比增加表明纳米 ZnO 抑制玉米干物质在地上部分的积累. 根冠比增加

可能是植物适应 Zn 毒害的一个机制, 根系生物量增加有利于植物吸收更多的营养元素 (如 P)<sup>[23]</sup>. 纳米 ZnO 对接菌处理植株也有显著抑制作用, 且随施加水平增加其抑制作用更强, 这说明纳米 ZnO 的植物毒性具有一定的剂量效应. Feng 等<sup>[18]</sup>发现菌根三叶草的生长受到高剂量纳米 FeO 的抑制, 但高剂量纳米 Ag 反而促进其生长, 这说明不同 ENPs 的毒性与剂量的关系较为复杂, 并非单一正相关或负相关.

### 2.3 玉米地上部分与根系 N、P、K、Fe、Cu 吸收量

在探讨 AM 真菌对营养和有害元素的作用时,吸收量比含量更能比较接菌与对照的作用,因为其克服了接菌而引起生物量变化而造成的影响<sup>[24]</sup>. 由表 3 可以看出,随纳米 ZnO 施加水平的增加,植株地上部分 N、P、K、Fe、Cu 吸收量均呈降低趋势. 与对照处理相比,纳米 ZnO 0 水平时,接菌处理地上部分 N、P、K、Fe、Cu 吸收量均显著增加;在 500~2 000 mg·kg<sup>-1</sup>时,地上部分 P 吸收量显著增加;在 500 和 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>时,地上部分 N、K 吸收量显著增加;而 Fe、Cu 吸收量在施加纳米 ZnO 时均没有显著变化. 双因素方差分析显示,纳米 ZnO 施加水平对 5 种元素地上部分吸收量作用显著,接菌对 N、P、K 作用显著,其交互作用对 5 种元素均作

用显著.

由表 4 可以看出,玉米根系 N、P、K、Fe 吸收量在纳米 ZnO 0 水平时最高,但在 500~3 000 mg·kg<sup>-1</sup>范围内没有呈现规律性降低;而根系 Cu 吸收量在 3 000 mg·kg<sup>-1</sup>时显著降低. 与对照处理相比,在纳米 ZnO 0 水平时,接菌处理根系 N、P、K、Fe、Cu 吸收量均没有显著变化;在 500~2 000 mg·kg<sup>-1</sup>水平时,根系 P 吸收量显著增加;在 500 mg·kg<sup>-1</sup>时,根系 N、K 吸收量显著增加;而 Fe、Cu 吸收量在所有纳米 ZnO 水平均没有显著变化. 双因素方差分析显示,纳米 ZnO 施加水平对 5 种元素根系吸收量作用显著,接菌对 N、P、K 作用显著,其交互作用对 P、K 作用显著.

表 3 不同处理下玉米地上部分 N、P、K、Fe、Cu 吸收量

Table 3 N, P, K, Fe and Cu uptake of maize shoots under different treatments

纳米 ZnO/mg·kg <sup>-1</sup>	接菌处理	N/mg·pot <sup>-1</sup>	P/mg·pot <sup>-1</sup>	K/mg·pot <sup>-1</sup>	Fe/mg·pot <sup>-1</sup>	Cu/mg·pot <sup>-1</sup>
0	M	422.6(43.3)a	18.2(3.1)a	626.8(65.7)a	3.95(1.10)a	0.144(0.016)a
	N	289.3(42.2)b	10.1(1.7)c	411.1(53.0)b	2.60(0.36)b	0.122(0.013)b
500	M	228.7(45.4)c	14.4(2.9)b	289.0(57.8)c	1.42(0.34)c	0.058(0.013)c
	N	160.0(21.0)de	4.4(0.4)de	120.0(21.8)e	1.15(0.38)c	0.058(0.007)c
1 000	M	183.9(11.2)cd	11.9(0.6)c	192.9(39.8)d	1.35(0.15)c	0.044(0.007)cde
	N	136.0(16.0)def	4.2(0.8)de	92.4(17.8)ef	1.81(1.06)c	0.053(0.007)cd
2 000	M	132.0(7.7)efg	6.0(2.5)d	105.9(24.6)ef	0.71(0.20)c	0.033(0.006)ef
	N	109.8(24.7)fgh	3.1(0.5)e	66.0(17.7)ef	0.93(0.27)c	0.043(0.009)de
3 000	M	85.5(16.1)gh	3.0(0.7)e	53.0(19.2)f	0.62(0.17)c	0.020(0.002)f
	N	83.8(28.9)h	2.3(0.5)e	45.6(18.1)f	0.57(0.11)c	0.030(0.008)ef
施加水平		90.4***	53.8***	195.0***	23.9***	151.0***
接菌		36.8***	116.7***	78.5***	0.0ns	0.2ns
施加水平×接菌		3.8*	10.2***	10.4***	5.7**	4.2**

表 4 不同处理下玉米根系 N、P、K、Fe、Cu 吸收量

Table 4 N, P, K, Fe and Cu uptake of maize roots under different treatments

纳米 ZnO/mg·kg <sup>-1</sup>	接菌处理	N/mg·pot <sup>-1</sup>	P/mg·pot <sup>-1</sup>	K/mg·pot <sup>-1</sup>	Fe/mg·pot <sup>-1</sup>	Cu/mg·pot <sup>-1</sup>
0	M	2.14(0.26)a	0.32(0.06)a	12.9(2.85)a	6.09(1.81)a	0.039(0.006)ab
	N	1.86(0.27)ab	0.28(0.08)ab	12.3(0.59)a	6.22(2.03)a	0.046(0.011)a
500	M	1.44(0.25)bed	0.26(0.03)bc	11.9(2.99)ab	1.45(0.19)b	0.034(0.005)abc
	N	0.79(0.19)f	0.10(0.03)d	3.0(0.81)e	0.59(0.20)b	0.030(0.004)bc
1 000	M	1.37(0.20)cde	0.21(0.03)c	7.9(2.22)bcd	1.11(0.19)b	0.039(0.008)ab
	N	0.92(0.37)ef	0.13(0.03)d	6.3(2.90)cde	1.16(0.52)b	0.027(0.006)bc
2 000	M	1.48(0.24)bc	0.20(0.03)c	9.4(3.73)abc	1.01(0.39)b	0.034(0.006)abc
	N	1.23(0.36)cdef	0.12(0.05)d	9.2(4.69)abcd	0.86(0.48)b	0.039(0.016)ab
3 000	M	1.08(0.17)cdef	0.12(0.01)d	5.0(2.10)de	0.68(0.37)b	0.027(0.006)bc
	N	1.00(0.56)def	0.10(0.06)d	6.3(1.45)cde	1.63(0.33)b	0.024(0.011)c
施加水平		14.6***	23.3***	7.9***	70.5***	4.6**
接菌		13.9**	31.3***	5.6*	0.0ns	0.4ns
施加水平×接菌		1.1ns	3.0*	4.5**	1.4ns	1.8ns

纳米 ZnO 具有 ENPs 的通性,粒径小、比表面积大、吸附能力强,附着在细胞壁后会聚集在一起,附着在根系表面抑制营养元素吸收,从而影响植物生长<sup>[7, 13]</sup>. 本研究再次证实这是纳米 ZnO 的植物毒性机制之一. 值得深入研究的是,纳米 ZnO 不仅影响根系对营养元素的吸收,而且也影响这些营养元素向地上部分的转运(吸收量根冠比发生变化). 此外,ENPs 毒性与剂量之间的关系颇为复杂,因为 ENPs 毒性与表面积密切相关,而在大剂量的情况下,ENPs 可能会凝聚成大的颗粒,反而导致其生物有效性和毒性降低,因此 ENPs 毒性与剂量之间的关系并不总是线性相关<sup>[25]</sup>. 但本研究证实纳米 ZnO 对玉米生长有剂量效应,与他人结果类似<sup>[7]</sup>.

在重金属胁迫条件下,AM 真菌对宿主植物的营养改善作用(尤其是 P)是 AM 真菌增加植物生长和耐性的重要机制之一<sup>[15]</sup>. 除了 P,某些条件下 AM 真菌对宿主植物的 N、K、Ca、Mg、Fe、Zn、Mn、Cu 等营养元素也具有一定的改善作用<sup>[26]</sup>. 本研究首次证实,在纳米 ZnO 胁迫条件下,接菌显著促进玉米生长,并能够改善 P、N、K 等矿质营养,说明 AM 真菌能够降低 ZnO 的植物毒性、增加玉米的耐性. 此外,接种 AM 真菌能够改变抗氧化酶活性、缓解纳

米 ZnO 产生的氧化胁迫(数据本文未列出),这也是其中一个保护机制.

#### 2.4 玉米地上部分和根系 Zn 含量、Zn 吸收量

由表 5 可知,随着纳米 ZnO 施加水平的升高,所有处理植株地上部分和根系 Zn 含量均呈现显著上升趋势,但从 2 000 ~ 3 000 mg·kg<sup>-1</sup> 时,根系 Zn 含量不再增加. 由生物量和 Zn 含量可计算得知,在施加纳米 ZnO 时,根系 Zn 吸收量呈增加趋势(除最高水平时),而地上部分 Zn 吸收量则没有显著变化. 有研究发现,水培条件下黑麦草根系 Zn 含量随纳米 ZnO 浓度升高而增加,但是地上部分 Zn 含量很低(仅 0.25 ~ 1.36 mg·kg<sup>-1</sup>),认为纳米 ZnO 很难被运输到地上部分<sup>[7]</sup>. 但在土培条件下,笔者发现玉米地上部分 Zn 含量很高,且与纳米 ZnO 施加水平显著相关,一种原因可能是纳米 ZnO 颗粒易于被玉米吸收并转运到地上部分,另一种可能是纳米 ZnO 易于释放出 Zn<sup>2+</sup>,被玉米吸收并转运,也可能二者兼而有之,需要利用同位素等试验进一步明确植物体内 Zn 的形态和来源. 此外,土壤栽培与水培条件不同,土壤 pH、有机质、矿物、微生物等均可能影响到纳米 ZnO 的形态、吸收和运输.

表 5 不同处理下玉米地上部分和根系 Zn 含量

Table 5 Zn concentration in shoots and roots of maize under different treatments

纳米 ZnO/mg·kg <sup>-1</sup>	接菌处理	Zn 含量/g·kg <sup>-1</sup>		地上部分与根系 Zn 含量之比
		地上部分	根系	
0	M	0.092(0.003)f	0.111(0.056)d	0.82(0.04)efg
	N	0.093(0.012)f	0.116(0.031)d	0.81(0.10)fg
500	M	0.392(0.021)e	0.603(0.028)bc	0.65(0.04)g
	N	0.680(0.079)d	0.494(0.088)c	1.41(0.37)ab
1 000	M	0.735(0.051)d	0.765(0.038)b	0.96(0.05)def
	N	1.049(0.098)c	0.793(0.123)b	1.33(0.18)bc
2 000	M	1.176(0.100)c	1.071(0.088)a	1.10(0.09)ede
	N	1.404(0.083)b	1.256(0.266)a	1.13(0.17)bcd
3 000	M	1.403(0.085)b	1.153(0.135)a	1.26(0.27)bc
	N	1.949(0.138)a	1.232(0.086)a	1.63(0.22)a
施加水平		267.3***	121.7***	13.7***
接菌		58.4***	1.9ns	31.7***
施加水平 × 接菌		11.7***	2.8*	6.67***

与对照处理相比,纳米 ZnO 0 水平时,接菌处理地上部分 Zn 含量没有显著变化,地上部分 Zn 吸收量显著增加,而根系 Zn 含量和 Zn 吸收量均没有显著变化. 在其他施加水平时,接菌处理地上部分 Zn 含量显著降低,Zn 吸收量没有显著变化,根系 Zn 含量没有显著变化,但 Zn 吸收量在 500 mg·kg<sup>-1</sup>、1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 时显著增加. 双因素方差分析显示,

纳米 ZnO 施加水平和接菌对地上部分和根系 Zn 含量有显著交互作用.

一般认为植物体内正常 Zn 含量在 8 ~ 400 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,高于 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时植物就会出现中毒症状<sup>[27]</sup>. 在施加纳米 ZnO 条件下,除 500 mg·kg<sup>-1</sup> 接菌处理,其他处理中的植物 Zn 含量均已经超过 400 mg·kg<sup>-1</sup>,结合生物量等指标,说明纳米

ZnO 已经引起植物毒害. 释放  $Zn^{2+}$  是纳米 ZnO 的生物毒性机制之一<sup>[28]</sup>, 因此纳米 ZnO 可能会造成 Zn 胁迫. 诸多研究表明, 接种 AM 真菌在缺 Zn 土壤中能够改善植物 Zn 营养, 但在 Zn 毒害条件下, 能够降低植物中 Zn 含量以减轻其毒害作用, 而且往往增加 Zn 在根系中的分配比例<sup>[15,23,29]</sup>. 本研究结果类似, 土壤中不施加纳米 ZnO 时, 接菌对玉米地上部分 Zn 营养有改善作用(地上部分吸收量增加), 而在土壤中施加纳米 ZnO 时, 接菌能增加 Zn 在根系中的分配比例(表 5), 降低 Zn 向玉米地上部分的转运, 从而减轻 Zn 胁迫. 其原因可能是 Zn 积累于 AM 真菌组织结构中, 并降低其在植物体内的移动性<sup>[15,30]</sup>. 同时, 生物量增加而引起的“生物稀释效应”也减轻了 Zn 的毒害作用.

### 3 结论

(1) 纳米 ZnO 具有一定的菌根毒性, 施加水平越高, 越不利于菌根侵染, 同时 AM 真菌对纳米 ZnO 具有一定的耐性, 在  $3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  纳米 ZnO 水平时依然能够侵染玉米根系.

(2) 土壤中施加纳米 ZnO 对玉米有植物毒性, 且有一定的剂量效应.

(3) 纳米 ZnO 抑制玉米对 N、P、K、Fe、Cu 等营养元素的吸收, 这是其引起植物毒性的重要机制之一.

(4) AM 真菌改善玉米 P、N、K 矿质营养, 增加 Zn 在根系中的分配比例、降低 Zn 向玉米地上部分的转运, 是 AM 真菌增加玉米抵御纳米 ZnO 毒害的一个重要机制.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Nel A, Xia T, Mädler L, *et al.* Toxic potential of materials at the nanolevel [J]. *Science*, 2006, **311**(5761): 622-627.
- [ 2 ] Klaine S J, Alvarez P J, Batley G E, *et al.* Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(9): 1825-1851.
- [ 3 ] Judy J D, Unrine J M, Bertsch P M. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **45**(2): 776-781.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 杨新萍, 赵方杰. 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4495-4502.
- [ 6 ] Lin D H, Xing B S. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **150**(2): 243-250.
- [ 7 ] Lin D H, Xing B S. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(15): 5580-5585.
- [ 8 ] Lee C W, Mahendra S, Zodrow K, *et al.* Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, **29**(3): 669-675.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Yoon S J, Kwak J I, Lee W M, *et al.* Zinc oxide nanoparticles delay soybean development: A standard soil microcosm study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **100**: 131-137.
- [ 12 ] Priestler J H, Ge Y, Mielke R E, *et al.* Soybean susceptibility to manufactured nanomaterials with evidence for food quality and soil fertility interruption [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(37): E2451-E2456.
- [ 13 ] 王发园. 人工纳米颗粒的植物毒性及其在植物中的吸收和累积 [J]. *生态毒理学报*, 2012, **7**(2): 140-147.
- [ 14 ] 张海, 彭程, 杨建军, 等. 金属型纳米颗粒对植物的生态毒理效应研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(3): 885-892.
- [ 15 ] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 793-801.
- [ 16 ] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根真菌对污染土壤中农产品质量安全的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1142-1147.
- [ 17 ] Manceau A, Nagy K L, Marcus M A, *et al.* Formation of metallic copper nanoparticles at the soil-root interface [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(5): 1766-1772.
- [ 18 ] Feng Y Z, Cui X C, He S Y, *et al.* The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(16): 9496-9504.
- [ 19 ] 盛萍萍, 刘润进, 李敏. 丛枝菌根观察与侵染率测定方法的比较 [J]. *菌物学报*, 2011, **30**(4): 519-525.
- [ 20 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [ 21 ] Navarro E, Baun A, Behra R, *et al.* Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi [J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**(5): 372-386.
- [ 22 ] Dubchak S, Ogar A, Mielinski J W, *et al.* Influence of silver and titanium nanoparticles on arbuscular mycorrhiza colonization and accumulation of radiocaesium in *Helianthus annuus* [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2010, **8**: 103-108.

- [23] Watts-Williams S J, Patti A F, Cavagnaro T R. Arbuscular mycorrhizas are beneficial under both deficient and toxic soil zinc conditions [J]. *Plant and Soil*, 2013, **371**(1-2): 299-312.
- [24] Smith S E, Christophersen H M, Pope S, *et al.* Arsenic uptake and toxicity in plants; integrating mycorrhizal influences [J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1-2): 1-21.
- [25] Bernhardt E S, Colman B P, Hochella M F, *et al.* An ecological perspective on nanomaterial impacts in the environment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39** (6): 1954-1965.
- [26] Miransari M. Arbuscular mycorrhizal fungi and uptake of nutrients[A]. In: Aroca R (Ed.). *Symbiotic Endophytes, Soil Biology*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013. 253-270.
- [27] Allaway W H. Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements [J]. *Advances in Agronomy*, 1968, **20**: 235-274.
- [28] Franklin N M, Rogers N J, Apte S C, *et al.* Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and ZnCl<sub>2</sub> to a freshwater microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): the importance of particle solubility [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(24): 8484-8490.
- [29] Cavagnaro T R, Dickson S, Smith F A. Arbuscular mycorrhizas modify plant responses to soil zinc addition [J]. *Plant and Soil*, 2010, **329**(1-2): 307-313.
- [30] Lee Y J, George E. Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply [J]. *Plant and Soil*, 2005, **278**(1-2): 361-370.

## CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM <sub>10</sub> ) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China .....	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou .....	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou .....	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO <sub>2</sub> Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China .....	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China .....	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin .....	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter .....	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency .....	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management .....	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period .....	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing .....	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet .....	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China .....	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China .....	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures .....	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Under Acidic Conditions .....	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron .....	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution .....	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor .....	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration .....	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies .....	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor .....	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane .....	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling .....	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular .....	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB .....	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application .....	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing .....	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks .....	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China .....	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil .....	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil .....	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil .....	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emission .....	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N <sub>2</sub> O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China .....	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping .....	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China .....	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize .....	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings .....	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice .....	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI) .....	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B <sub>12</sub> on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2 .....	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp. ....	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake .....	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol .....	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 .....	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon .....	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment .....	CUI Yan-nui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD .....	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China .....	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH <sub>4</sub> Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak .....	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

# 《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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