

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖乔翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响

景新新¹, 苏志忠¹, 邢红恩¹, 王发园^{1*}, 石兆勇¹, 刘雪琴²

(1. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003; 2. 洛阳师范学院生命科学学院, 洛阳 471022)

摘要: 纳米 ZnO 颗粒是应用最为广泛金属型纳米颗粒(nanoparticles, NPs)之一, 对作物和土壤微生物的影响值得关注. 丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)是自然界中普遍存在的植物-真菌共生体, 对各种环境胁迫具有一定的抵御能力, 但菌根效应受土壤和植物磷含量的影响. 分别设置 0、20、50、100 mg·kg⁻¹ 这 4 个磷水平, 在接种或不接种 AM 真菌 *Funneliformis mosseae*、添加或不添加纳米 ZnO (500 mg·kg⁻¹) 条件下在温室中利用玉米进行土壤盆栽试验. 结果表明, 纳米 ZnO 没有显著影响玉米生长, 但不利于菌根侵染和磷素吸收, 并引起锌在植物体内的积累. 纳米 ZnO 和高磷降低玉米菌根侵染, 但 AM 真菌在所有磷水平下均显著促进植物生长. 施磷和接菌均可使土壤 pH 升高、降低纳米 ZnO 源锌的生物有效性, 从而降低锌向玉米地上部分的转运和积累, 体现出一定保护作用. 接菌在多数情况下显示出积极的菌根效应, 尤其在低磷、添加纳米 ZnO 条件下更为显著. 结果首次表明, AM 真菌、磷肥均有助于减轻纳米 ZnO 引起的土壤污染及其所产生的生态和健康风险.

关键词: 纳米氧化锌; 丛枝菌根; 磷; 玉米; 植物毒性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3208-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.049

Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization

JING Xin-xin¹, SU Zhi-zhong¹, XING Hong-en¹, WANG Fa-yuan^{1*}, SHI Zhao-yong¹, LIU Xue-qin²

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. College of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract: ZnO nanoparticles (NPs) are widely used in many applications, such as plastics, ceramics, glass, cement, rubber, lubricants, paints, pigments, batteries, fire retardants, catalysts, and anti-microbial agents. They directly or indirectly enter aquatic and terrestrial environments through application, accidental release, contaminated soil/sediments, or atmospheric fallouts. When present in excess, ZnO NPs can induce phytotoxicity and reduce plant growth and yields. ZnO NPs can also cause Zn accumulation in edible parts of food crops, and then subsequently enter human bodies and pose a significant health risk. Arbuscular mycorrhizae are ubiquitous symbiotic associations in nature formed between arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and most higher plants in terrestrial ecosystems. In addition to their well-known contribution to plant nutrient acquisition and growth, AM fungi can improve plant tolerance to various environmental stresses, but mycorrhizal effects vary with environmental conditions such as phosphorus status in both soil and plants. AM fungi have been shown to alleviate the negative effects of ZnO NPs and zinc accumulation in plants, however, the role of phosphorus fertilization has been neglected. A greenhouse pot culture experiment was conducted using maize as the test plant inoculated with or without AM fungus *Funneliformis mosseae*. Four levels of phosphorus (0, 20, 50 or 100 mg·kg⁻¹) and two levels of ZnO NPs (0 or 500 mg·kg⁻¹) were applied to pots. Shoots and roots were harvested separately after two months of growth. Mycorrhizal infection, plant biomass, P and Zn concentrations and uptake in plants, and soil DTPA-extractable zinc and pH were determined. The results showed that ZnO NPs did not significantly affect the growth of maize, but inhibited root mycorrhizal infection and plant phosphorus uptake, and led to the accumulation of zinc in plants. ZnO NPs and high phosphorus supply decreased root mycorrhizal infection, but AM inoculation significantly promoted plant growth under all phosphorus supply levels. Phosphorus application and AM inoculation increased soil pH, but reduced the bioavailability of Zn derived from ZnO NPs, decreased the translocation and accumulation of zinc in maize shoots, and thus produced beneficial effects on plants. In general, AM inoculation showed positive mycorrhizal effect, especially under low phosphorus conditions and addition of ZnO NPs. Our results showed for the first time that both AM fungi and phosphate fertilizer could help to mitigate soil pollution and the ecological and health risks posed by ZnO NPs.

Key words: ZnO nanoparticles; arbuscular mycorrhizae; phosphorus; maize; phytotoxicity

收稿日期: 2016-01-30; 修订日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471395, 41171369); 河南科技大学研究生创新基金项目(CXJJ-ZR19); 河南科技大学大学生研究训练计划(SRTP)项目(2015137); 河南科技大学创新团队项目(2015TTD002)

作者简介: 景新新(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为丛枝菌根与植物营养, E-mail: jxin3390@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wfy1975@163.com

纳米 ZnO 颗粒在防晒霜、纺织品、工业涂料、抗菌剂等领域得到广泛应用^[1], 会随生产、运输、储存、使用、泄漏及废物处理等途径向环境中释放^[2], 而土壤是纳米颗粒污染物的最终归宿之一^[3]. 纳米 ZnO 具有比较特殊的表面特性和环境行为, 可能释放出重金属离子, 具有植物毒性, 主要表现在抑制种子的萌发、抑制植物的生长、导致营养元素的缺乏、甚至枯萎死亡^[2], 因此其生物效应受到广泛关注^[1,4].

丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌与大多数植物根系共生, 不仅能改善植物磷素营养, 还能降低污染物对植物的毒害作用, 用于污染土壤的生物修复^[5,6]. 已经证实, AM 真菌分布于铜、锌、铅、镉、砷、铬、镍等重金属污染土壤, 以及农药、石油、多环芳烃等有机污染土壤, 多数情况下, 接种 AM 真菌有利于植物生存和土壤修复^[5,6]. 人工纳米颗粒是潜在的污染物^[7], 土壤盆栽试验表明, AM 真菌能有效抑制玉米对纳米 ZnO 源锌的吸收及其向植株地上部分的转移, 提高宿主植物对纳米 ZnO 的耐性^[8,9]. 但是菌根效应受纳米 ZnO 水平的影响, AM 真菌仅在纳米 ZnO 500 mg·kg⁻¹ 时显著促进大豆生长, 浓度过高时则没有显著作用^[10].

菌根效应受土壤磷水平的影响已广被人们所熟知, 磷水平过高往往对菌根侵染不利, 菌根对植物的生长、营养元素的吸收利用等促进作用也会降低^[11]. 因此在研究纳米 ZnO 对丛枝菌根的毒性效应时, 应关注土壤肥力状况尤其是磷对菌根效应的影响. 据作者所知, 尚没有研究关注不同磷水平下 AM 真菌对纳米 ZnO 生物效应的影响. 鉴于此, 本试验通过研究不同磷、纳米 ZnO 水平下接种 AM 真菌对植物生长及磷、锌吸收的影响, 以期了解纳米 ZnO 在不同磷含量土壤中的环境行为以及其与丛枝菌根的相互关系提供一些参考.

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 958. 供试菌剂选用 *Funneliformis mosseae* (旧名为 *Glomus mosseae*), 菌剂接种物为扩繁的菌剂宿主植物根系及根际土壤. 纳米 ZnO 颗粒购自南京埃普瑞纳米材料有限公司, 纯度为 99.9%, 平均粒径为 30 nm, 平均表面积为 110 m²·g⁻¹. 供试基质采用沙土 (2:3) 混合物, 这样便于控制供试土壤磷养分含量, 也便于收获时取细根. 其中土壤采自河南科技大学

周山校区, 为沙壤土, 取耕层 10 cm 土壤, 过 2 mm 筛, 在 121℃、105 kPa 高温高压下连续灭菌 2 h, 风干备用. 土壤基本理化性质如下, pH 为 8.02 (水土比 2.5:1), 有机质含量为 2.10%、全氮 1.22 g·kg⁻¹、全磷 0.51 g·kg⁻¹、全钾 10.14 g·kg⁻¹、全锌 33.99 mg·kg⁻¹、碱解氮为 11.73 mg·kg⁻¹、速效磷为 9.73 mg·kg⁻¹、DTPA 提取态 Zn 为 1.36 mg·kg⁻¹. 测定方法参见文献[12].

1.2 试验设计

试验设置共 4 个磷 [磷源为 Ca(H₂PO₄)₂] 水平, 分别为 0、20 (低)、50 (中)、100 (高) mg·kg⁻¹ (以纯磷计), 2 个纳米 ZnO 水平, 分别为 0、500 mg·kg⁻¹ (以 ZnO 计). 接菌处理 (+M) 每盆混施法接种风干菌剂 100 g, 不接菌处理 (-M) 每盆加入等量灭菌菌剂, 并加入等量菌剂过 500 目筛的菌剂滤液, 以保证不接菌处理与接菌处理微生物群落尽量一致^[9]. 试验共 3 因素 16 个处理, 每个处理重复 4 次.

1.3 试验方法

选用塑料花盆, 每盆装 1.4 kg 风干土壤, 采用逐级混匀的方法添加纳米 ZnO 颗粒、磷, 并施氮 (尿素)、钾 (KNO₃) 各 150 mg·kg⁻¹ 作为底肥. 2015 年 5 月 10 日播种, 每盆均匀播种 10 颗玉米种子, 出苗后每盆定苗 6 株, 在日光温室中培养 2 个月后收获. 生长过程中进行通风、遮阳等管理, 土壤含水量维持在 70%~80%.

收获植株时用剪刀贴土壤表面剪去地上部分植株, 然后从土壤中取出根系, 分别用自来水、去离子水清洗, 再用吸水纸擦干、称重. 选取新鲜毛细根, 用 10% 的 KOH 溶液脱色后用醋酸墨水染色液进行染色^[13], 在显微镜下观察, 用根段频率法^[14]测定菌根侵染率. 植株地上部分及剩余根系在 105℃ 杀青 30 min 后, 在 70℃ 烘干至恒重、并称重. 将烘干的植株样品粉碎、H₂SO₄-H₂O₂ 消化后, 磷含量用钼锑抗比色法测定, 锌含量用原子吸收分光光度计 (Varian AA240) 测定, 同时用标准物质 (灌木枝叶 GBW07603, GSV2) 以校准测定的准确性. 取收获后土壤 200 g, 风干后过筛, 测定土壤 pH 及 DTPA 提取态锌含量. 测定方法参见文献[12].

1.4 数据分析

根据植物干重和锌含量计算出植物锌吸收量. 试验数据用 SPSS 17.0 进行方差分析和样本平均数的显著性分析, 用 Duncan 法进行多重比较 ($P < 0.05$), 然后用三因素方差分析磷水平、纳米 ZnO 和接菌处理之间的交互作用.

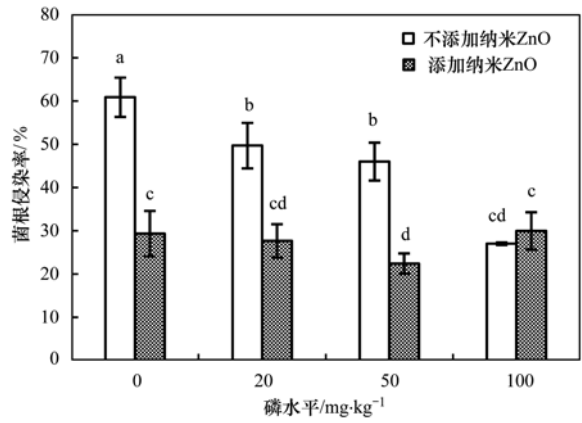
2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

不接菌各处理下植物根系均没有菌根侵染. 接菌条件下各处理的菌根侵染率如图 1 所示. 无纳米 ZnO 时菌根侵染率随着磷水平的增加而降低, 磷水平 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时仅为不施磷时的一半左右; 添加纳米 ZnO 时菌根侵染率均低于 30%. 与不添加纳米 ZnO 相比, 添加纳米 ZnO 菌根侵染率显著降低 (高磷水平时除外). 双因素方差分析结果显示, 磷和纳米 ZnO 之间存在显著交互作用 (表 1).

2.2 玉米生物量

在所有处理中接菌均显著增加地上部分和根系生物量, 促进植株生长 (图 2). 在接菌和不接菌条件下, 地上部分及根系生物量均随磷水平的升高而



图中竖棒标准偏差,不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同

图1 植株收获后不同磷和纳米 ZnO 水平下各处理的菌根侵染率

Fig. 1 Root colonization rate at harvest of inoculated maize plants under different levels of phosphorus and ZnO NPs

表1 菌剂、磷、纳米 ZnO 对菌根侵染率和生物量的方差分析结果 (F 值)¹⁾

Table 1 Significance levels (F -values) of AM inoculation, phosphorus, ZnO NPs, and their interactions on root mycorrhizal colonization rate and plant biomass based on a three-way ANOVA analysis

变量	菌剂	磷	纳米 ZnO	菌剂 × 磷	菌剂 × 纳米 ZnO	磷 × 纳米 ZnO	菌剂 × 磷 × 纳米 ZnO
菌根侵染率	—	28.45 **	199.85 **	—	—	32.06 **	—
地上部分生物量	190.85 **	258.67 **	0.18ns	1.01ns	8.24 **	3.89 *	1.21ns
根系生物量	157.13 **	105.52 **	0.00ns	3.95 *	13.87 **	0.63ns	0.34ns

1) 三因素方差分析结果: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, ns 表示差异不显著, “—” 表示无此项分析结果

逐渐增加,并在磷水平 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到显著水平. 多数处理中添加纳米 ZnO 没有显著影响地上部分和根系生物量 (不接菌低磷处理、接菌高磷处理除外). 由表 1 可知, 纳米 ZnO 对植物生长无显著作用, 菌剂、磷作用极显著, 两两之间的交

互作用不显著或较弱.

2.3 玉米植株磷吸收量

由表 2 可知, 接菌显著提高植株地上部分磷吸收量, 但仅在添加纳米 ZnO 时对根系磷吸收量有显著作用. 与不施磷相比, 地上部分磷吸收量在低磷

表2 不同磷和纳米 ZnO 水平下玉米地上部分和根系磷吸收量¹⁾

Table 2 Phosphorus uptake in maize shoots and roots under different levels of phosphorus and ZnO NPs

纳米 ZnO / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部分磷吸收量/ $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$		根系磷吸收量/ $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$		植株磷总吸收量/ $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$	
		− M	+ M	− M	+ M	− M	+ M
0	0	3.51 ± 0.91 f	7.11 ± 1.53 d	2.26 ± 0.41 ghi	2.77 ± 0.84 fgh	5.77 ± 0.85 ef	9.88 ± 2.29 d
	20	3.73 ± 0.67 f	6.85 ± 2.29 d	3.73 ± 0.15 cde	2.93 ± 0.26 efg	7.46 ± 0.78 def	9.77 ± 2.25 d
	50	4.28 ± 1.07 ef	6.42 ± 1.25 de	3.96 ± 0.18 cd	3.36 ± 0.36 def	8.24 ± 1.08 de	9.79 ± 1.41 d
	100	22.74 ± 1.59 a	23.00 ± 3.29 a	6.53 ± 0.20 b	6.95 ± 0.13 ab	29.27 ± 1.40 a	29.95 ± 3.43 a
500	0	4.09 ± 0.44 ef	12.17 ± 1.07 c	1.02 ± 0.37 j	2.69 ± 0.14 fgh	5.11 ± 0.58 f	14.86 ± 0.99 c
	20	4.20 ± 1.29 ef	11.13 ± 2.57 c	1.66 ± 0.85 ig	2.58 ± 0.69 fgh	5.87 ± 1.77 ef	13.71 ± 2.68 c
	50	5.56 ± 1.08 def	11.04 ± 2.06 c	2.07 ± 0.50 hi	4.32 ± 0.68 c	7.64 ± 1.28 def	15.35 ± 2.04 c
	100	17.09 ± 1.46 b	22.08 ± 0.67 a	3.37 ± 0.32 def	7.44 ± 1.19 a	20.46 ± 1.78 b	29.62 ± 0.51 a
菌剂		119.94 **		63.04 **		154.04 **	
磷		339.36 **		168.37 **		425.30 **	
纳米 ZnO		9.63 **		47.59 **		0.52ns	
菌剂 × 磷		3.07 *		11.65 **		1.45ns	
菌剂 × 纳米 ZnO		26.89 **		78.13 **		55.27 **	
纳米 ZnO × 磷		14.24 **		2.47ns		14.47 **	
菌剂 × 磷 × 纳米 ZnO		0.18ns		4.38 **		0.63ns	

1) 不同小写字母表示所有处理在 $P < 0.05$ 显著; 三因素方差分析结果: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, ns 表示差异不显著

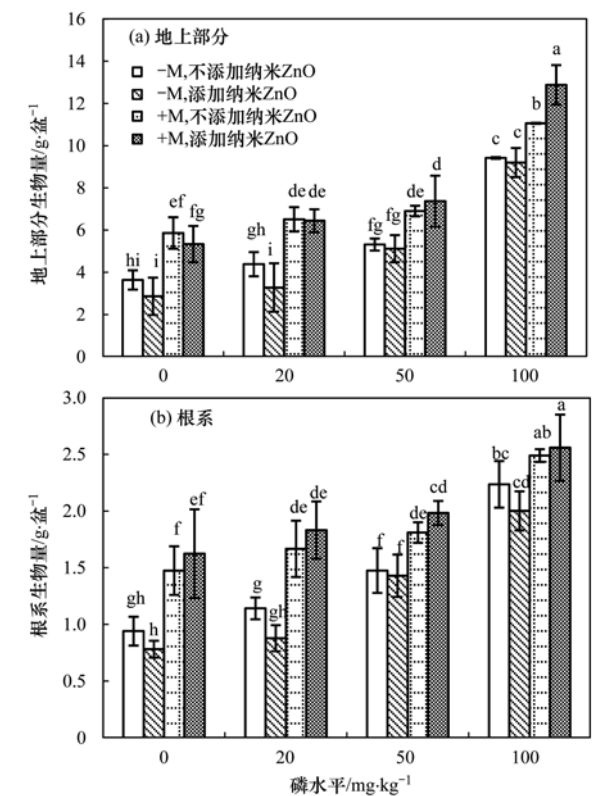


图2 不同磷和纳米 ZnO 水平下玉米地上部分和根系干重
Fig. 2 Dry weights of maize shoots and roots under different levels of phosphorus and ZnO NPs

和中磷处理时没有显著变化,在高磷处理中显著增加;而根系磷吸收量则随着施磷水平升高有逐渐增加的趋势.总体上,添加纳米 ZnO 在接菌时增加地上部分磷吸收量(高磷处理除外),但不接菌时降低根系磷吸收量,并在高磷时降低地上部分磷吸收量.

2.4 玉米植株锌含量及吸收量

添加纳米 ZnO 均显著增加植株地上部分及根系锌含量(表3)和吸收量(表4).在不添加纳米 ZnO 时,施磷、接菌多数情况下降低植株地上部分和根系中锌含量或没有显著影响.添加纳米 ZnO 时,地上部分锌含量随磷水平的增加而降低,接菌降低地上部分锌含量,并在高磷处理中降低根系锌含量.三因素方差分析结果显示,纳米 ZnO、施磷、接菌对地上部分锌含量有显著影响,且三者之间存在显著交互作用.

由表4可知,不添加纳米 ZnO 时,高磷处理增加地上部分和根系锌吸收量;接菌仅在高磷时增加地上部分锌吸收量.添加纳米 ZnO 时,地上部分和根系锌吸收量总体上随磷水平的升高而逐渐增加;接菌增加根系锌吸收量,但在高磷时降低地上部分锌吸收量.三因素方差分析结果显示,纳米 ZnO、施磷、接菌对地上部分锌吸收量有显著影响,三者之间存在显著交互作用.

表3 不同磷和纳米 ZnO 水平下玉米地上部分和根系锌含量¹⁾

Table 3 Zn concentrations in maize shoots and roots under different levels of phosphorus and ZnO NPs								
纳米 ZnO /mg·kg ⁻¹	磷 /mg·kg ⁻¹	地上部分锌含量/mg·kg ⁻¹		根系锌含量/mg·kg ⁻¹		地上部分锌含量/根系锌含量		
		- M	+ M	- M	+ M	- M	+ M	
0	0	52.79 ± 4.03a	39.23 ± 4.41bc	36.73 ± 3.12a	31.13 ± 5.07ab	1.45 ± 0.24a	1.30 ± 0.31ab	
	20	48.12 ± 8.56ab	34.22 ± 2.31c	32.12 ± 0.12a	24.93 ± 1.27b	1.50 ± 0.27a	1.37 ± 0.03ab	
	50	40.92 ± 7.60bc	32.59 ± 4.32c	32.51 ± 4.35a	33.49 ± 0.74a	1.26 ± 0.19ab	0.97 ± 0.14b	
	100	32.75 ± 0.57c	35.70 ± 2.78c	33.50 ± 4.84a	30.05 ± 9.18ab	0.99 ± 0.16b	1.30 ± 0.49ab	
500	0	1 065.09 ± 92.37a	508.74 ± 15.39cd	658.61 ± 29.95a	717.85 ± 88.90a	1.62 ± 0.07a	0.72 ± 0.08d	
	20	1 007.70 ± 75.37a	475.56 ± 24.68d	695.60 ± 53.56a	647.49 ± 77.52a	1.45 ± 0.11b	0.74 ± 0.06d	
	50	700.46 ± 33.85b	488.92 ± 13.69d	736.02 ± 72.82a	656.10 ± 89.53a	0.96 ± 0.10c	0.71 ± 0.09d	
	100	570.67 ± 47.76c	299.23 ± 23.90e	713.05 ± 19.00a	546.45 ± 56.79b	0.80 ± 0.05d	0.56 ± 0.10e	
菌剂		516.65 **		5.24 *		37.23 **		
磷		86.46 **		2.70ns		15.07 **		
纳米 ZnO		4 625.09 **		3 207.16 **		44.88 **		
菌剂 × 磷		26.75 **		4.07 *		6.24 **		
菌剂 × 纳米 ZnO		475.22 **		3.82ns		22.44 **		
纳米 ZnO × 磷		76.47 **		2.46ns		1.29ns		
菌剂 × 磷 × 纳米 ZnO		23.53 **		4.19 *		3.09 *		

1) 不同小写字母表示同一纳米 ZnO 水平时在 P < 0.05 显著;三因素方差分析结果: ** 表示 P < 0.01, * 表示 P < 0.05, ns 表示差异不显著

2.5 收获后土壤 DTPA-Zn 含量、pH

由表5可知,施磷总体上对 DTPA-Zn 含量没有显著影响,但在添加纳米 ZnO 非接菌条件下,中、高磷使 DTPA-Zn 含量显著降低.随施磷水平的增加,

土壤 pH 有升高的趋势,并在高磷条件下达到显著水平.不添加纳米 ZnO 时,接菌对 DTPA-Zn 含量没有显著影响,并在不施磷时降低土壤 pH;添加纳米 ZnO 时,接菌降低 DTPA-Zn 含量,并在中、高磷时使

表 4 不同磷和纳米 ZnO 水平下玉米地上部分和根系锌吸收量¹⁾

Table 4 Zn uptake in maize shoots and roots under different levels of phosphorus and ZnO NPs							
纳米 ZnO /mg·kg ⁻¹	磷 /mg·kg ⁻¹	地上部分锌吸收量/mg·盆 ⁻¹		根系锌吸收量/mg·盆 ⁻¹		地上部分锌吸收量/根系锌吸收量	
		- M	+ M	- M	+ M	- M	+ M
0	0	0.19 ± 0.02 cd	0.23 ± 0.02 c	0.03 ± 0.01 d	0.04 ± 0.01 cd	5.87 ± 1.01 a	5.43 ± 0.77 ab
	20	0.19 ± 0.04 cd	0.23 ± 0.03 c	0.03 ± 0.00 d	0.04 ± 0.01 cd	5.89 ± 0.99 a	5.83 ± 0.65 a
	50	0.17 ± 0.06 d	0.21 ± 0.02 cd	0.04 ± 0.02 cd	0.06 ± 0.01 bc	4.42 ± 1.78 ab	3.83 ± 1.01 b
	100	0.31 ± 0.00 b	0.39 ± 0.03 a	0.08 ± 0.01 a	0.07 ± 0.01 ab	3.75 ± 0.50 b	6.01 ± 1.65 a
500	0	3.02 ± 0.81 cd	2.71 ± 0.37 d	0.44 ± 0.19 c	1.15 ± 0.22 b	7.22 ± 1.38 a	2.40 ± 0.40 b
	20	3.23 ± 0.33 bcd	3.06 ± 0.22 cd	0.61 ± 0.30 c	1.19 ± 0.22 b	6.49 ± 3.35 a	2.62 ± 0.33 b
	50	3.59 ± 0.51 bc	3.60 ± 0.56 bc	1.20 ± 0.02 b	1.79 ± 0.18 a	2.98 ± 0.40 b	2.02 ± 0.33 b
	100	5.23 ± 0.04 a	3.84 ± 0.03 b	1.43 ± 0.04 b	1.78 ± 0.19 a	3.67 ± 0.07 b	2.17 ± 0.24 b
菌剂		7.00 *		71.85 **		17.12 **	
磷		25.68 **		41.22 **		10.12 **	
纳米 ZnO		1 771.98 **		1 205.32 **		22.46 **	
菌剂 × 磷		3.74 *		1.41ns		4.84 **	
菌剂 × 纳米 ZnO		10.95 **		69.63 **		25.96 **	
纳米 ZnO × 磷		18.12 **		35.41 **		0.62ns	
菌剂 × 磷 × 纳米 ZnO		4.38 **		1.07ns		2.29ns	

1) 不同小写字母表示同一纳米 ZnO 水平时 $P < 0.05$ 显著; 三因素方差分析结果: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, ns 表示差异不显著

表 5 植株收获后不同磷和纳米 ZnO 水平下土壤 DTPA-Zn 含量和 pH 值¹⁾

Table 5 Soil DTPA-extractable Zn concentration and pH after plant harvest under different levels of phosphorus and ZnO NPs					
纳米 ZnO /mg·kg ⁻¹	磷 /mg·kg ⁻¹	土壤 DTPA-Zn/mg·kg ⁻¹		土壤 pH	
		- M	+ M	- M	+ M
0	0	0.85 ± 0.08 d	0.93 ± 0.06 d	8.25 ± 0.11 cde	8.01 ± 0.18 f
	20	0.73 ± 0.09 d	0.86 ± 0.06 d	8.26 ± 0.14 cde	8.08 ± 0.13 ef
	50	0.71 ± 0.04 d	0.73 ± 0.03 d	8.21 ± 0.10 cde	8.20 ± 0.08 cde
	100	1.57 ± 0.08 d	1.82 ± 0.05 d	8.58 ± 0.03 a	8.54 ± 0.23 ab
500	0	68.07 ± 5.40 a	52.41 ± 4.52 c	8.17 ± 0.14 def	8.16 ± 0.02 def
	20	70.28 ± 5.81 a	51.76 ± 5.07 c	8.26 ± 0.12 cde	8.31 ± 0.20 cd
	50	62.22 ± 3.71 b	53.67 ± 4.83 c	8.30 ± 0.05 cd	8.52 ± 0.12 ab
	100	62.87 ± 6.35 b	54.45 ± 0.32 c	8.39 ± 0.05 bc	8.71 ± 0.04 a
菌剂		64.17 **		0.22ns	
磷		0.74ns		33.90 **	
纳米 ZnO		5 463.36 **		8.38 **	
菌剂 × 磷		2.62ns		4.46 **	
菌剂 × 纳米 ZnO		66.65 **		19.63 **	
纳米 ZnO × 磷		1.02ns		2.39ns	
菌剂 × 磷 × 纳米 ZnO		2.59ns		0.27ns	

1) 不同小写字母表示在所有处理在 $P < 0.05$ 显著; 三因素方差分析结果: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, ns 表示差异不显著

土壤 pH 显著升高. 添加纳米 ZnO 导致 DTPA-Zn 含量显著增加,但对土壤 pH 的效应较复杂,受磷水平和接菌条件的影响.

2.6 菌根效应

在相同处理条件下,植株各指标接菌与不接菌条件下的差值主要源于 AM 真菌的作用,该差值与不接菌处理的百分比即为菌根效应^[15]. 菌根效应正值表示 AM 真菌对植株生物量或吸收量的促进作用,负值表示抑制作用. 由表 6 可知,AM 真菌促进玉米植株生物量的增加,促进地上部分磷、锌的吸

收及部分根系中的磷、锌吸收,但在添加纳米 ZnO 条件下,多降低地上部分锌吸收量、而增加根系锌吸收量. 总体上看,菌根效应在低磷、添加纳米 ZnO 条件下较为显著.

3 讨论

本研究发现,随着磷、纳米 ZnO 水平的升高,菌根侵染率降低. 这与已有研究结果一致,在不施磷、不添加锌或者低锌条件下,菌根侵染率较高^[16]. 利用菌根缺陷型和野生型西红柿研究发现,高磷、高

表 6 不同磷和纳米 ZnO 水平下的菌根效应

Table 6 AM feedback percentage under different levels of P and ZnO NPs

纳米 ZnO /mg·kg ⁻¹	磷 /mg·kg ⁻¹	生物量/%		P 吸收量/%		Zn 吸收量/%	
		地上部分	根系	地上部分	根系	地上部分	根系
0	0	61	57	103	23	21	26
	20	48	46	84	-21	21	13
	50	30	23	50	-15	24	6
	100	17	11	1	6	26	-21
500	0	86	108	197	164	-10	161
	20	96	108	165	55	-5	94
	50	44	39	98	109	0	44
	100	40	28	30	121	-27	13

锌水平抑制 AM 真菌侵染^[17]. 磷水平对菌根侵染率影响的研究已经较多,高磷水平改变植物磷营养状况^[18]及植物根细胞壁结构^[19],从而抑制 AM 真菌菌丝侵染及伸长,植物菌根依赖性降低,侵染率下降. 而纳米 ZnO 具有抗真菌活性^[20],在土壤环境也容易释放出 Zn²⁺,从而对 AM 真菌产生一定毒性^[21]. 纳米颗粒对 AM 真菌的影响颇为复杂,在沙培条件下,纳米 FeO (0.032 ~ 3.2 mg·kg⁻¹)、纳米银 (0.01 ~ 1 mg·kg⁻¹) 没有降低甚至促进白三叶的菌根侵染率^[22],但在土培条件下,纳米零价铁 (270 μg·g⁻¹) 会减少土壤中革兰氏阳性菌和 AM 真菌的生物量^[23]. 纳米 ZnO 对 AM 真菌侵染率的影响与纳米 ZnO 添加量、菌种、栽培基质等密切相关^[8~10].

土壤中纳米颗粒的植物效应与浓度密切相关,高浓度时绝大多数是抑制作用^[24,25],而在较低浓度时往往作用不显著甚至是促进作用^[26]. 笔者前期研究发现 500 mg·kg⁻¹ 的纳米 ZnO 抑制玉米植株生长^[8],而 500 mg·kg⁻¹ (Zn) 的纳米 ZnO 或 ZnCl₂ 并没有显著影响豇豆的生长^[27],500 mg·kg⁻¹ 的纳米 ZnO 甚至略促进大豆植株的生长^[28]. 本研究发现在所有磷水平下,500 mg·kg⁻¹ 的纳米 ZnO (30 nm) 没有显著影响玉米生长. 显然,除了浓度,纳米颗粒的植物毒性高低也受粒径大小、植物种类和土壤环境因素 (如 pH、有机质含量等) 等影响,已有研究表明这些因素对金属纳米颗粒的生物效应能够产生影响^[2,29].

AM 真菌对植物最常见的有益作用就是改善磷营养、促进植物生长,尤其是在低磷或各种胁迫条件下. 本研究再次证实,AM 真菌在多数情况下能够体现出正的菌根促生效应 (表 6),尤其是在不施磷、添加纳米 ZnO 条件下. 尽管纳米 ZnO 没有显著影响玉米生长,但仍可能产生某些不利影响. 例如,在

不接菌条件下,添加纳米 ZnO 抑制根系对磷的吸收 (表 2),此时接菌有显著改善作用,但是菌根效应受磷水平的影响而有改变. 在本研究中,AM 真菌在高磷条件下没有显著影响植物磷吸收量,但仍显著促进植物生长,这可能是 AM 真菌的其他有益作用所致,除了磷,AM 真菌也能影响其他营养元素的吸收,如氮、钾和其他微量营养元素^[8,30].

大多关于植物磷、锌交互作用的研究表明,磷、锌之间存在拮抗作用,大量施磷会诱发缺锌^[31,32]. 但也有研究表明磷能促进锌的吸收,这与根介质的特性有关^[33,34]. 土壤环境复杂多变,因此关于磷、锌交互作用的结论也不尽相同. 本研究表明,纳米 ZnO 导致植物锌含量显著增加,但施磷可以显著降低地上部分锌含量 (表 3) 以及锌在地上部分的分配比例 (表 4). 过量施磷并不影响植株根系对锌的吸收,但引起了锌在植株根系的积累,抑制锌向地上部分的转移^[35]. 纳米 ZnO 在水溶液中溶解并释放出 Zn²⁺,磷酸根与 Zn²⁺ 形成磷酸锌^[36]. 纳米 ZnO 在土壤中也容易释放出 Zn²⁺,推测磷酸锌的形成可能是施磷降低锌吸收及向地上部分转运的重要原因之一,同时这也可以解释纳米 ZnO 为何不利于磷的吸收.

在锌污染条件下,AM 真菌一般降低植物体内 (尤其是地上部分) 锌含量及锌在地上部分的分配比例,从而对宿主植物起到保护作用,促进植物生长^[5]. 本研究证实,接种 AM 真菌的作用与施磷类似,也降低玉米地上锌含量和锌在地上部分的分配比例. 这再次说明菌根效应多与改善植物磷营养有关,在低磷条件下中往往比较显著. 释放 Zn²⁺ 是纳米 ZnO 的生物毒性机制之一,施磷和接种 AM 真菌均使土壤 pH 升高、锌的生物有效性降低,这是它们的保护机制之一. 纳米 ZnO 和磷在玉米地上部分磷吸收、锌吸收之间存在显著交互作用,但是 AM 真

菌能改变二者在土壤和植物中的行为。此外,三者相互之间可能同时存在直接作用和间接作用,尚值得深入研究。

纳米 ZnO 污染往往引起土壤肥力下降以及锌在粮食作物可食部分中的累积^[28],从而对土壤环境和生物产生一定风险^[37]。施磷、AM 真菌均可降低土壤纳米 ZnO 中锌的生物有效性及其向玉米地上部分的转运,这对于降低锌污染而引起的生态和健康风险也有一定意义。同时,AM 真菌可以减少磷肥的施用,对于节约成本、降低大量施用磷肥所带来的负面影响有一定积极意义。

4 结论

(1)尽管纳米 ZnO 和施磷不利于玉米菌根侵染,但是接种 AM 真菌在所有磷水平下均显著促进植物生长。

(2)500 mg·kg⁻¹ 纳米 ZnO 没有显著影响玉米生长,但抑制菌根侵染和磷营养吸收,并引起锌在土壤和植株体内的积累,仍显示出一定生物毒性和生态风险。

(3)施磷和接菌均可使土壤 pH 升高、降低纳米 ZnO 源锌的生物有效性,从而降低锌向玉米地上部分的转运和积累,体现出积极作用。

(4)接种 AM 真菌在多数情况下显示出积极的菌根效应,尤其在低磷、添加纳米 ZnO 条件下更为显著。

参考文献:

- [1] Ma H B, Williams P L, Diamond S A. Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles-a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **172**: 76-85.
- [2] 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.
- [3] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, *et al.* Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different regions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9216-9222.
- [4] Shen Z Y, Chen Z, Hou Z, *et al.* Ecotoxicological effect of zinc oxide nanoparticles on soil microorganisms [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, **9**(5): 912-918.
- [5] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根与土壤修复[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [6] Cabral L, Soares C R F S, Giachini A J, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, **31**(11): 1655-1664.
- [7] Thomaidis N S, Asimakopoulos A G, Bletsou A A. Emerging contaminants: a tutorial mini-review [J]. *Global NEST Journal*, 2012, **14**(1): 72-79.
- [8] 王卫中, 王发园, 李帅, 等. 丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3135-3141.
- [9] Wang F Y, Liu X Q, Shi Z Y, *et al.* Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants-a soil microcosm experiment [J]. *Chemosphere*, 2016, **147**: 88-97.
- [10] 王丽华, 王发园, 景新新, 等. 纳米氧化锌和接种丛枝菌根真菌对大豆生长及营养吸收的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(15): 5254-5261.
- [11] 冯海艳, 冯固, 王敬国, 等. 植物磷营养状况对丛枝菌根真菌生长及代谢活性的调控[J]. *菌物系统*, 2003, **22**(4): 589-598.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 杨亚宁, 巴雷, 白晓楠, 等. 一种改进的丛枝菌根染色方法[J]. *生态学报*, 2010, **30**(3): 774-779.
- [14] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization [J]. *New Phytologist*, 1981, **87**(1): 63-67.
- [15] Audet P, Charest C. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: meta-analytical and conceptual perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(3): 609-614.
- [16] Bi Y L, Li X L, Christie P. Influence of early stages of arbuscular mycorrhiza on uptake of zinc and phosphorus by red clover from a low-phosphorus soil amended with zinc and phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 831-837.
- [17] Watts-Williams S J, Cavagnaro T R. Arbuscular mycorrhizas modify tomato responses to soil zinc and phosphorus addition[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(3): 285-294.
- [18] Nagahashi G, Douds Jr D D, Abney G D. Phosphorus amendment inhibits hyphal branching of the VAM fungus *Gigaspora margarita* directly and indirectly through its effect on root exudation[J]. *Mycorrhiza*, 1996, **6**(5): 403-408.
- [19] Nelsen C E, Safir G R. Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition [J]. *Planta*, 1982, **154**(5): 407-413.
- [20] Lipovsky A, Nitzan Y, Gedanken A, *et al.* Antifungal activity of ZnO nanoparticles-the role of ROS mediated cell injury [J]. *Nanotechnology*, 2011, **22**(10): 105101.
- [21] 李帅, 刘雪琴, 王发园, 等. 纳米氧化锌、硫酸锌和 AM 真菌对玉米生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4615-4622.
- [22] 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 & Technology*, 2013, **47**(16): 9496-9504.
- [23] Pawlett M, Ritz K, Dorey R A, *et al.* The impact of zero-valent iron nanoparticles upon soil microbial communities is context

- dependent[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(2): 1041-1049.
- [24] Ma X M, Geiser-Lee J, Deng Y, *et al.* Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3053-3061.
- [25] Zhao L J, Hernandez-Viezcas J A, Peralta-Videa J R, *et al.* Zn nanoparticle fate in soil and zinc bioaccumulation in corn plants (*Zea mays*) influenced by alginate[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(1): 260-266.
- [26] Liu X Q, Wang F Y, Shi Z Y, *et al.* Bioavailability of Zn in ZnO nanoparticle-spiked soil and the implications to maize plants [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, **17**(4): 175.
- [27] Wang P, Menzies N W, Lombi E, *et al.* Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13822-13830.
- [28] Priester 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.
- [29] Watson J L, Fang T, Dimkpa C O, *et al.* The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties [J]. *BioMetals*, 2015, **28**(1): 101-112.
- [30] 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.
- [31] Loneragan J F, Grove T S, Robson A D, *et al.* Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interactions in plants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, **43**(5): 966-972.
- [32] Loneragan J F, Webb M J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants [A]. In: Robson A D (Ed.). *Zinc in Soils and Plants*[M]. Netherlands: Springer, 1993. 119-134.
- [33] de Iorio A F, Gorgoschide L, Rendina A, *et al.* Effect of phosphorus, copper, and zinc addition on the phosphorus/copper and phosphorus/zinc interaction in lettuce[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, **19**(3-4): 481-491.
- [34] Marschner P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.) [M]. Waltham, MA: Academic Press, 2011.
- [35] 张富仓, 康绍忠, 龚道枝, 等. 不同磷浓度对玉米生长及磷、锌吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(5): 903-906.
- [36] Lv J T, Zhang S Z, Luo L, *et al.* Dissolution and microstructural transformation of ZnO nanoparticles under the influence of phosphate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(13): 7215-7221.
- [37] 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.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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