

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)
基于优质碳源提供的CMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)
蜈蚣草中砷与砷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录	(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)
信息(4463,4530,4573,4581)	

纳米氧化锌、硫酸锌和 AM 真菌对玉米生长的影响

李帅¹, 刘雪琴^{2,3}, 王发园^{1*}, 苗艳芳¹

(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; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 纳米氧化锌 (ZnO) 是应用最为广泛但具有一定生物毒性的金属型纳米颗粒 (nanoparticles, NPs) 之一, 而丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌能改善宿主植物矿质营养和增强宿主植物抗逆性, 但纳米 ZnO 和其他锌污染物之间的关系以及 AM 真菌对其生物效应的影响目前尚不清楚。通过温室盆栽试验, 研究了单一或复合施加纳米 ZnO、ZnSO₄ (500 mg·kg⁻¹) 时接种 AM 真菌 *Funneliformis mosseae* BEG 167 对玉米生长的影响。结果表明, 纳米 ZnO 对 AM 真菌侵染和玉米植株生长有一定抑制作用, 表现出植物毒性, 且与同浓度 (500 mg·kg⁻¹) 下的 ZnSO₄ 作用类似。与非菌根对照相比, 接种 AM 真菌降低了玉米植株的 Zn 含量或 Zn 吸收量, 且在复合处理中对玉米生长表现出较好的促生作用。结果首次表明, 纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 在生物毒性上存在复杂的交互作用, 而接种 AM 真菌在二者复合污染时对玉米具有一定的保护作用。

关键词: 纳米氧化锌; 重金属; 丛枝菌根真菌; 植物毒性; 人工纳米颗粒

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2015) 12-4615-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.038

Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize

LI Shuai¹, LIU Xue-qin^{2,3}, WANG Fa-yuan^{1*}, MIAO Yan-fang¹

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

Abstract: As one of the most widely used metal-based nanoparticles (NPs), ZnO NPs have been shown to be toxic to organisms. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can improve mineral nutrition and increase the resistance of host plants. However, little is known on the interaction between ZnO NPs and other Zn pollutants, as well as the effect of AM fungi on their biological effects. The present greenhouse pot culture experiment studied the effects of inoculation with or without AM fungus *Funneliformis mosseae* BEG 167 on the growth of maize in soil supplemented with ZnO NPs and ZnSO₄ (500 mg·kg⁻¹) separately or in combination. The results showed that ZnO NPs inhibited mycorrhizal colonization and the growth of maize plants, showing similar phytotoxicity and effects to ZnSO₄ at the same concentration (500 mg·kg⁻¹). Compared with the nonmycorrhizal controls, AM fungal inoculation decreased Zn concentrations or uptake in maize plants, and showed a better growth-promoting effect in the combination treatment. Our results showed for the first time that there was a complex interaction in their biological toxicity between ZnO NPs and ZnSO₄, while AM fungal inoculation exhibited a protective effect under combined pollution of ZnO NPs and ZnSO₄.

Key words: ZnO nanoparticles; heavy metal; arbuscular mycorrhizal fungi; phytotoxicity; engineered nanoparticles

人工纳米颗粒 (nanoparticles, NPs) 因其具有小尺寸效应、大比表面等特殊的理化特性而被广泛应用。其中, 纳米 ZnO 是最常见的金属型纳米颗粒之一, 广泛用于塑料、陶瓷、玻璃、水泥、橡胶、润滑剂、油漆、涂料、食品 (锌源营养)、电池、防火阻燃剂、化妆品、防晒产品等领域^[1]。在其生产、使用及处理等过程中, 纳米 ZnO 不可避免地会进入水体和土壤等环境中。更值得重视的是, 纳米 ZnO 不仅会对植物和土壤微生物产生毒性, 而且可以被植物吸收并随食物链进行传递和富集, 对环境和人畜健康产生潜在风险^[1,2]。研究表明纳米 ZnO 具有细菌毒性^[3]、可降低土壤呼吸和土壤微生物总 DNA、

改变微生物群落结构^[4]。纳米 ZnO 对紫花苜蓿^[5]、小麦^[6]、油菜^[7]、玉米和黄瓜^[8] 均有一定植物毒性, 同时可对大豆产生遗传毒性^[9], 并可以导致 Zn 在大豆可食部分中富集^[10]。因此, 其生物效应和生态毒理受到广泛关注^[1,11,12]。

丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌是与植物关系最为密切的土壤微生物之一, 能够与陆

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471395, 41171369); 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (2012HASTIT014); 河南科技大学创新团队项目 (2015TTD002)

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

* 通讯联系人, E-mail: wfy1975@163.com

地 80% 以上高等植物的根系形成互惠共生体^[13]. AM 真菌不仅可以改善宿主植物矿质营养、增强宿主植物抗逆性、利于宿主植物生存,而且可以改善土壤结构、用于修复污染土壤. 已经证实,AM 真菌对重金属 Zn 等污染物具有一定耐性,影响其生物有效性和毒性,并通过多种机制对宿主植物起到保护作用,这方面研究较多且比较深入^[14~16].

纳米 ZnO 作为潜在新型污染物^[17],其自身又含有重金属组分,在某些方面与重金属 Zn 类似,因此 AM 真菌很可能会影响纳米 ZnO 的生物毒性及植物中的吸收、转运和积累等过程. Feng 等^[18]首次发现纳米 FeO 和纳米 Ag 影响白三叶草的 AM 真菌侵染及其促生效应. 王卫中等^[19]研究发现纳米 ZnO 也可以影响 AM 真菌侵染,AM 真菌则可减轻纳米 ZnO 的生物毒性,对玉米生长起到一定保护作用. 目前关于金属纳米颗粒和丛枝菌根的研究较少^[18],对二者关系值得深入研究. Navarro 等^[20]指出,纳米颗粒具有巨大的比表面积,可能会吸附其它污染物,改变纳米颗粒和污染物在环境中的迁移和生物有效性,并改变其毒性效应. 当纳米 ZnO 和重金属 Zn 共存时,两者的毒性效应可能会有所改变,同时将会影响到 AM 真菌的效应. 但是目前未有相关研究报告,基于此,本试验以常见的作物玉米为供试植物,在温室盆栽条件下研究纳米 ZnO 与离子态 Zn (ZnSO_4) 共存时对玉米生长的影响以及接菌下对两者共存时的响应,以期了解纳米 ZnO 与重金属共存时的环境行为以及其与丛枝菌根的相互关系提供一些支持.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为玉米 (*Zea mays* L.), 品种为郑单 958. 供试 AM 真菌为 *Funneliformis mosseae* (旧名为 *Glomus mosseae*) BEG 167, 以河沙为培养基质、玉米和苏丹草为宿主植物盆栽扩繁, 去除宿主植物地上部, 把根剪碎, 将含有寄主植物根段、菌根真菌孢子 (每克菌剂约含 30 个孢子), 及根外菌丝的根际土为接种剂. 供试纳米 ZnO 购自南京埃普瑞纳米材料有限公司 (白色单晶, 纯度为 99.9%, 平均粒径为 30 nm, 平均表面积为 $110 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 购自天津博迪化工股份有限公司. 供试土壤采自河南科技大学开元校区农场, 过 20 目筛, 用高温高压蒸汽灭菌法 (121°C , 105 kPa) 连续灭菌 4 h 后风干备用. 土壤基本理化性质如下, pH 8.46 (水土比 2.5:1),

有机质 2.06%, 全氮 $1.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $11.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $79.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $22.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $285.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 Zn $39.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, DTPA 提取态 Zn $0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

试验设置 2 个纳米 ZnO 水平 (0、 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以锌含量计算), 两个 ZnSO_4 水平 (0、 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以锌含量计算), 分别为对照 (CK)、纳米 ZnO、 ZnSO_4 、纳米 ZnO 与 ZnSO_4 复合处理, 然后设置接菌处理 (M) 和不接菌处理 (N) 对照, 每个处理重复 4 次. 选用双色花盆 (上口直径 170 mm, 高 150 mm), 每盆装 1.5 kg 土壤, 基质分装采用逐级混匀的方法施加纳米 ZnO 和 ZnSO_4 , 接菌处理每盆施加 100 g 风干菌剂, 不接菌处理加入等量灭菌菌剂, 并浇一定量过 500 目筛的菌剂滤液, 以保证不接菌处理与接菌处理在其它微生物区系尽量一致.

选取形状大小一致的玉米种子, 放置自来水中催芽, 于 2014 年 10 月 8 日播种, 每盆均匀播种 6 棵, 深度为 2~3 cm. 玉米在日光温室中生长, 期间精细管理, 适当调整各盆的位置和通风, 并用称重法浇自来水, 维持土壤含水量在 70% 左右, 生长 8 周后收获. 生长期浇 1/3 强度的 Hoagland 营养液 2 次, 每次 200 mL.

1.3 测定指标和方法

植株地上部和根系分开收获, 自来水冲洗后用去离子水清洗, 擦干后称取鲜重, 选取毛细根段 (也测定鲜重, 通过计算最后加入根系总干重) 用 KOH 溶液脱色、派克牌黑色墨水染色, 然后用方格交差法测定菌根侵染率. 将植株地上部和剩余根系装入信封于烘箱内 70°C 烘干至恒重, 用万分之一电子天平称取干重. 植株地上部和根系粉碎, 优级纯 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4:1) 消煮后, 原子吸收分光光度计 (Varian AA240, 美国) 测定 Zn 含量. 同时用标准物质 (灌木枝叶 GBW07603, GSV2) 以校准测定的准确性. 把整盆土壤混匀, 取 200 g 风干, pH 计法测定土壤 pH.

1.4 数据分析

根据植物干重和 Zn 含量计算出植物 Zn 吸收量. 生物富集系数 (BCF) = 植物体内的某元素含量/土壤中该元素含量.

利用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 等统计软件对所测指标的数据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 ($P < 0.05$), 然后用三因素方差分析纳米 ZnO、 ZnSO_4 和接菌处理之间的

交互作用。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌侵染率

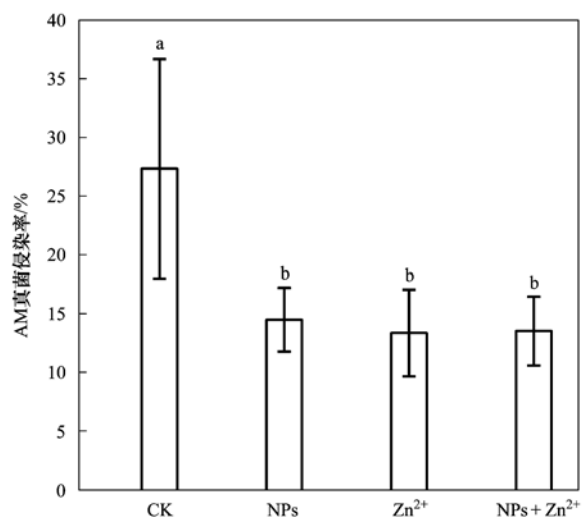
不接菌处理玉米根系未被侵染。接菌条件下施锌处理玉米根系 AM 真菌侵染率与不施锌 (CK) 相比均显著降低 (图 1)。但是 ZnSO_4 处理、纳米 ZnO 处理以及复合处理之间无显著差异, 这说明纳米 ZnO 与 ZnSO_4 的菌根毒性类似, 且二者共存时其毒性没有显著增加。

2.2 玉米植株生物量

由图 2(a) 可知, 与不施锌相比, ZnSO_4 处理、纳米 ZnO 处理以及复合处理 (接菌处理除外) 均降低玉米地上部干重。不接菌时, 复合处理中地上部干重低于纳米 ZnO 和 ZnSO_4 处理; 接菌时, 3 个施锌处理之间没有显著差异。接种 AM 真菌仅在复合处理中显著增加了地上部干重, 在不施锌时反而起到抑制作用, 在 ZnSO_4 处理、纳米 ZnO 处理中没有显著作用。三因素方差分析显示, 3 个因素两两之间存在显著交互作用, 但是 3 个因素之间并无显著交互作用 (表 1)。

由图 2(b) 可知, 与不施锌相比, ZnSO_4 处理、纳米 ZnO 处理以及复合处理均降低玉米根系干重。接菌或不接菌时, 3 个施锌处理之间均没有显著差异。接种 AM 真菌在 CK、 ZnSO_4 处理中降低根系干重。三因素方差分析显示, 纳米 ZnO 与接菌处理、 ZnSO_4 处理存在显著交互作用 (表 1)。

以上可以说明, 纳米 ZnO 处理与 ZnSO_4 处理对玉米有类似的生物毒性, 抑制其生长, 且纳米 ZnO



CK: 对照处理; NPs: $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ZnO NPs; Zn^{2+} : $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ZnSO_4 ; NPs + Zn^{2+} : $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ZnO NPs + $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ZnSO_4 ; 图中竖棒表示标准偏差, 不同字母表示单因素 Duncan 分析结果在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同

图 1 不同处理对玉米根系 AM 真菌侵染率的影响

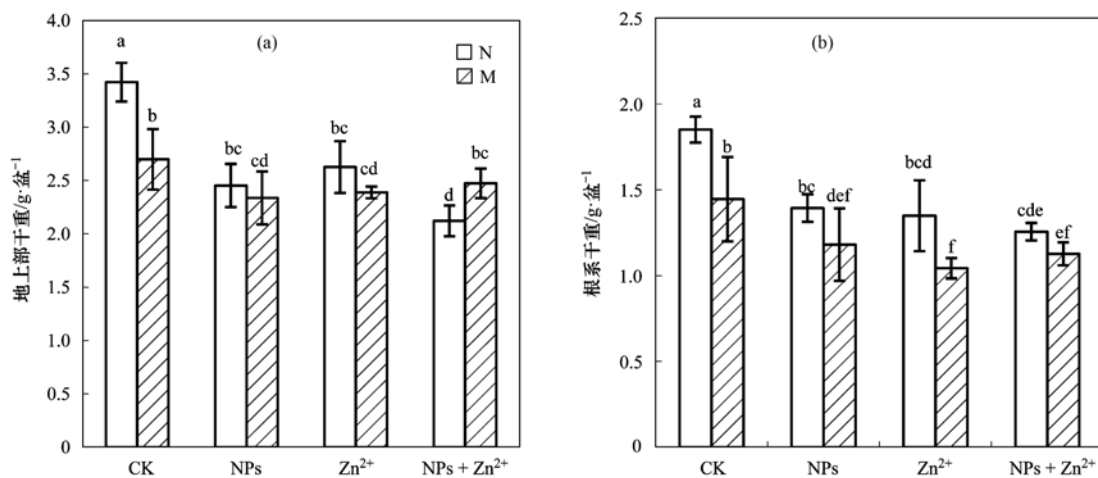
Fig. 1 Effects of different treatments on AM fungal colonization rate of maize roots

与 ZnSO_4 共存时存在显著交互作用, 但仅在不接种处理中毒性有一定程度增加。接菌处理与复合处理之间并没有显著交互作用 (表 1)。

2.3 玉米植株 Zn 含量和吸收量

由图 3 可知, 与不施锌处理相比, 无论接菌与否, 纳米 ZnO 、 ZnSO_4 处理均显著增加了玉米地上部和根系 Zn 含量; 复合处理时玉米地上部和根系 Zn 含量达到最高, 但是与土壤总 Zn 量并不呈线性关系。

与不接菌处理相比, 在不施锌和纳米 ZnO 处理



N 表示不接菌处理, M 表示接菌处理, 下同

图 2 不同处理对玉米地上部和根系干重的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on dry weights of maize shoots and roots

时,接菌没有显著影响玉米地上部和根系 Zn 含量;施加 ZnSO₄ 时,接菌降低玉米地上部 Zn 含量;复合处理时,接菌显著降低玉米地上部和根系中 Zn 含量. 三因素方差分析显示,接菌处理和 ZnSO₄ 处理之间、纳米 ZnO 和 ZnSO₄ 处理之间对地上 Zn 含量存在显著交互作用(表 1).

表 1 接菌(M)、纳米 ZnO、ZnSO₄ 对各变量的三因素方差分析结果(F 值)¹⁾

Table 1 Three-way ANOVA analysis on significance levels (F values) of AM inoculation (M), ZnO NPs, ZnSO₄ and their interactions on measured variables

变量	M	NPs	Zn ²⁺	M × NPs	M × Zn ²⁺	NPs × Zn ²⁺	M × NPs × Zn ²⁺
菌根感染率	—	7.14 *	9.90 *	—	—	7.51 *	—
地上部干重	7.75 *	45.34 **	25.04 **	21.23 **	13.48 **	12.28 **	0.00ns
根系干重	46.63 **	22.48 **	50.42 **	5.73 *	1.40ns	21.36 **	0.01ns
地上部 Zn 含量	16.69 **	239.85 **	504.60 **	0.13ns	7.62 *	121.40 **	2.47ns
根系 Zn 含量	3.38ns	98.33 **	212.40 **	1.96ns	0.50ns	2.96ns	1.75ns
地上部 Zn 吸收量	19.56 **	208.10 **	576.77 **	8.76 **	3.31ns	185.40 **	21.35 **
根系 Zn 吸收量	23.90 **	102.13 **	186.53 **	1.58ns	2.84ns	2.96ns	0.27ns
土壤 pH	643.72 **	17.04 **	63.98 **	0.27ns	11.25 **	23.02 **	7.57 *

1) 显著性结果: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, ns 表示不显著, “—” 表示无此项分析结果; M、NPs、Zn²⁺ 分别代表接菌处理、施加纳米 ZnO 处理、施加 ZnSO₄ 处理

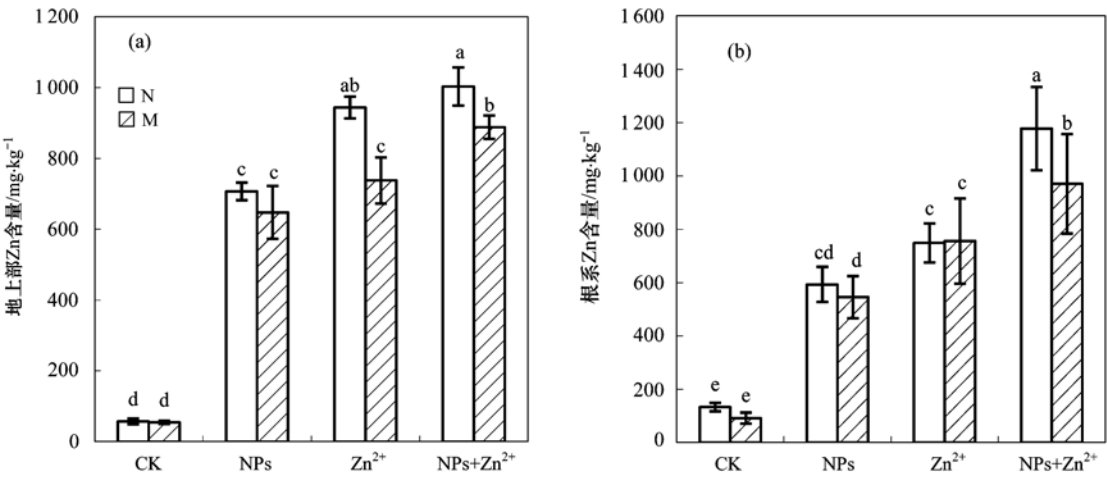


图 3 不同处理对玉米地上部和根系 Zn 含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on concentrations of Zn in maize shoots and roots

根据玉米干重和相应的 Zn 含量可以计算出玉米 Zn 吸收量. 由图 4 可知,与不施锌相比,施加纳米 ZnO、ZnSO₄ 均显著增加了玉米地上部和根系 Zn 吸收量,且地上部吸收量都是 ZnSO₄ 处理高于纳米 ZnO 处理,但是两处理之间根系 Zn 吸收量无显著差异. 复合处理时,玉米根系 Zn 吸收量显著高于单一纳米 ZnO、ZnSO₄ 处理,地上部 Zn 吸收量受接菌处理影响较大.

与不接菌处理相比,接菌在不施锌时没有显著影响玉米地上部和根系 Zn 吸收量. 接菌没有显著影响纳米 ZnO 处理中的根系 Zn 吸收量,以及复合处理中的地上部 Zn 吸收量,其他情况下均是显著抑制作用.

三因素方差分析显示,纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 处理

之间、接菌和纳米 ZnO 之间,以及三因素之间对地上部 Zn 吸收量存在显著交互作用(表 1). 三因素之间对根系 Zn 吸收量没有显著交互作用.

表 2 不同处理下玉米地上部和根系中 Zn 的 BCF¹⁾

Table 2 BCF of Zn in maize shoots and roots under different treatments

项目	处理	不接菌处理(N)	接菌处理(M)
地上部	CK	1.45(0.20) b	1.39(0.11) b
	NPs	1.31(0.05) bc	1.20(0.14) cd
	Zn ²⁺	1.75(0.06) a	1.37(0.12) bc
	NPs + Zn ²⁺	1.04(0.05) d	0.85(0.03) e
根系	CK	3.37(0.41) a	2.32(0.52) b
	NPs	1.10(0.12) cd	1.01(0.15) cd
	Zn ²⁺	1.39(0.14) cd	1.40(0.30) c
	NPs + Zn ²⁺	1.13(0.15) cd	0.93(0.18) d

1) 表内数据为平均值(标准偏差),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

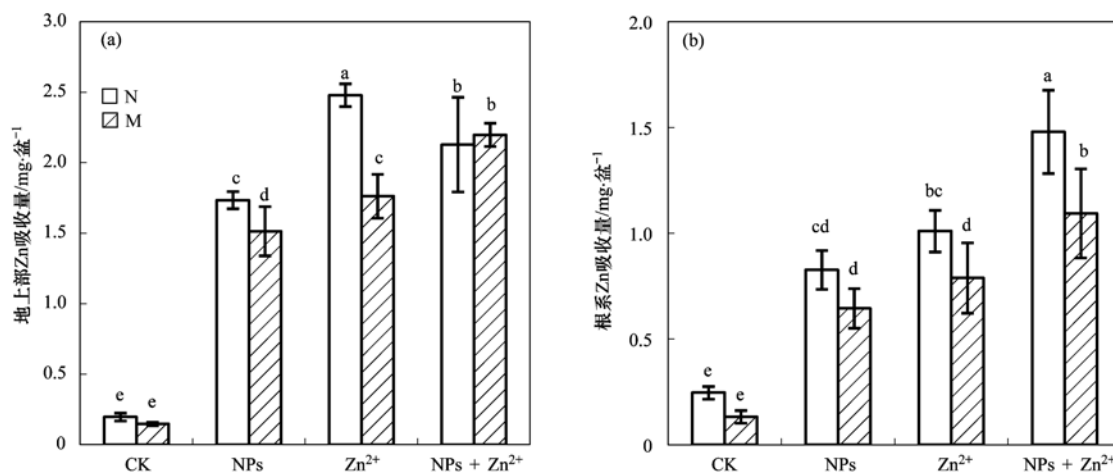


图 4 不同处理对玉米地上部和根系 Zn 吸收量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on uptake of Zn in maize shoots and roots

2.4 Zn 的生物富集系数 (BCF)

由表 2 可知,与不施锌相比,施加纳米 ZnO 或 ZnSO₄ 后根系 Zn 的 BCF 均显著较低,而地上部则比较复杂,复合处理中 BCF 最低. 施加 ZnSO₄ 时地上部 Zn 的 BCF 高于纳米 ZnO 处理(在不接菌处理中差异显著),根系 Zn 的 BCF 没有显著差异.

与不接菌处理相比,接菌处理在施加 ZnSO₄ 和复合处理中降低地上部 Zn 的 BCF,而根系 Zn 的 BCF 仅在对照处理中差异显著,其他处理中均没有显著变化.

2.5 土壤 pH

由图 5 可知,与不施锌相比,纳米 ZnO 处理中玉米收获后土壤 pH 均升高,而 ZnSO₄ 处理和复合处理中没有显著变化(不接菌处理)或显著降低(接菌处理). 与不接菌相比,接菌在所有处理中均使土

壤 pH 显著升高.

三因素方差分析显示,除接菌与纳米 ZnO 处理之间外,纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 处理之间、接菌和 ZnSO₄ 之间,以及三因素之间对土壤 pH 均存在显著交互作用.

3 讨论

锌污染往往对 AM 真菌侵染不利^[21, 22]. 本研究进一步证实,施加离子态或纳米颗粒态的锌均抑制菌根侵染. 已有研究证实纳米 ZnO 具有抗真菌活性^[23],土壤中纳米 ZnO 对丛枝菌根具有一定毒性,浓度越高,毒性越强^[19]. 金属纳米颗粒的微生物毒性一方面可能是其颗粒巨大的比表面积和活性造成的,另一方面可能是其更容易转换为离子态^[11]. 从菌根侵染和玉米植株干重来看,纳米 ZnO 和 ZnSO₄ 的毒性类似. 这意味着纳米 ZnO 的毒性很大程度上可能是由释放出 Zn²⁺ 引起的,与笔者的另外一项研究结果类似^[24].

本研究显示,纳米 ZnO 和 ZnSO₄ 均显著降低玉米菌根侵染率,但是仍有 10% 以上的玉米根系被侵染,这表明 AM 真菌对纳米 ZnO 和 ZnSO₄ 有一定程度的耐性. 土壤中纳米 ZnO 含量高达 3 000 mg·kg⁻¹ 时仍然具有一定的侵染能力(高达 29%)^[19],但在沙培条件下,2 000 mg·kg⁻¹ 的纳米 ZnO 则几乎完全抑制大豆根系的菌根侵染^[25]. Feng 等^[18] 研究发现沙培条件下纳米 FeO(0.032 ~ 3.2 mg·kg⁻¹) 和纳米 Ag(0.01 ~ 1 mg·kg⁻¹) 没有降低甚至增加了 *Glomus caledonium* 对白三叶草的菌根侵染. 纳米颗粒对菌根的效应可能与纳米颗粒(种类、性质、剂量等)、

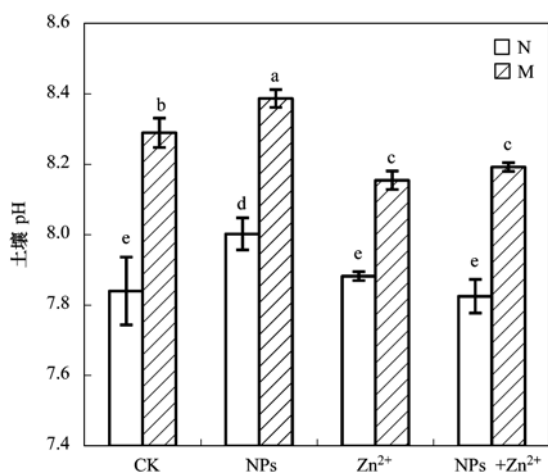


图 5 不同处理对玉米植株收获后土壤 pH 的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil pH after harvest of maize plants

植物、AM 真菌、基质性质等因素有关。

土壤中较高含量的金属纳米颗粒对植物生长绝大多数是抑制作用^[26, 27],而在较低浓度时往往不影响植物生长甚至体现出促进作用^[24]。500 mg·kg⁻¹的纳米 ZnO 抑制玉米植株生长^[19],而 500 mg·kg⁻¹ (Zn)的纳米 ZnO 或 ZnCl₂ 并没有显著影响豇豆的生长^[28],500 mg·kg⁻¹的纳米 ZnO 甚至略促进大豆植株的生长^[29]。Liu 等^[24]采用一系列浓度的纳米 ZnO 研究发现,土壤中 100 ~ 200 mg·kg⁻¹的纳米 ZnO 对玉米生长有促进作用,400 mg·kg⁻¹时无显著作用,而 800 mg·kg⁻¹以上则显著抑制玉米生长。本试验结果再次证实,500 mg·kg⁻¹ (Zn)的纳米 ZnO 已经显示出植物毒性。显然,无论纳米 ZnO 还是 ZnSO₄,都存在一个产生生物毒性的临界浓度,其高低可能主要取决于纳米 ZnO 粒径大小、植物种类和土壤环境因素(如 pH、有机质含量等)等,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^[6, 11]。

污染条件下,菌根侵染和植物生长一般会随土壤 Zn 含量的增加而降低,而植物体内 Zn 含量往往会增加^[21],但令人意外的是,本研究发现,与其单一处理相比,纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 复合处理(土壤锌含量是单一处理的 2 倍)时并没有显著抑制玉米菌根侵染和植株生长,植物体内 Zn 含量和 Zn 吸收量也没有成倍增加,尤其是地上部,Zn 含量与 ZnSO₄ 处理差异不显著,Zn 吸收量甚至降低。这表明纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 共存时可能存在复杂的共环境行为和交互作用,其生物毒性并非简单的拮抗作用、加和作用或协同作用。在土壤中,生物毒性较强的 Zn 形态往往是可溶态和易交换态的部分。纳米 ZnO 释放 Zn²⁺ 是其毒性机制之一^[24],但是在土壤 Zn²⁺ 较多时,其释放的离子态锌可能会减少。同时,纳米 ZnO 颗粒比表面积较大,吸附能力强,对 ZnSO₄ 释放的 Zn²⁺ 可能具有吸附固定作用,从而也降低了其生物有效性。已有研究表明,纳米 ZnO 对水环境中的 Cd²⁺、Cu²⁺、Ni²⁺、Pb²⁺ 等具有一定的吸附去除能力^[30],因此土壤环境中纳米 ZnO 对 Zn²⁺ 可能也有一定吸附能力,尚需进一步研究。

绝大多数研究表明,植物体内 Zn 含量与生长基质中的 ZnSO₄ 含量^[22]或纳米 ZnO 含量^[24]呈正相关,而且纳米 ZnO 的生物有效性也较高,容易被植物利用^[24]。本研究发现,总体来看,与纳米 ZnO 相比,玉米更容易吸收 ZnSO₄ 中的 Zn(其 *F* 值较高,见表 1),这显然与 ZnSO₄ 溶解性好、更容易释放 Zn²⁺

有关。生物富集系数(BCF)也能证实了这一点。一般认为植物体内正常 Zn 含量在 8 ~ 400 mg·kg⁻¹之间,高于 400 mg·kg⁻¹时植物就会出现中毒症状。本研究结果显示,单一纳米 ZnO、ZnSO₄ 处理玉米地上部和根系 Zn 含量均高于 400 mg·kg⁻¹,这表明纳米 ZnO 和 ZnSO₄ 已经对玉米植株产生了毒害。同时,纳米 ZnO 处理下玉米地上部 Zn 含量均低于 ZnSO₄ 处理,但是两处理之间玉米生物量却无显著差异,这表明 Zn²⁺ 的释放仅是纳米 ZnO 的生物毒性机制之一。

AM 真菌对植物抵御重金属毒害的贡献已被广泛证实^[16]。在 Zn 污染条件下,AM 真菌一般降低植物体内 Zn 含量和 Zn 吸收量,从而对宿主起到保护作用,促进植物生长。本研究证实多数处理中接种 AM 真菌降低了玉米体内 Zn 含量或 Zn 吸收量,但是仅在复合处理中增加了地上部干重(ZnSO₄ 处理中甚至降低根系干重)。菌根促生效应往往与改善植物磷营养有关,一般在低磷土壤中比较显著,本研究发现植物磷营养没有得到显著改善(数据未列出),显然这可能与土壤肥力(尤其是磷含量)较高、菌根侵染率较低有关。同时,这证实 AM 真菌可能直接影响植物锌含量,并非是由于生物量改变而产生的间接作用。纳米 ZnO 污染往往引起土壤肥力下降以及 Zn 在作物可食部分中的累积^[29],可能对环境 and 生物产生一定风险。在纳米 ZnO 或 ZnSO₄ 污染条件下,AM 真菌均可降低玉米对 Zn 的吸收量,体现出一定程度的积极作用,同时对于降低锌污染引起的健康风险也有一定意义。

土壤 pH 是影响 Zn 生物有效性及毒性的一个重要环境因素,也是影响纳米 ZnO 溶解性和植物毒性的关键因素之一^[6]。纳米 ZnO 溶解后会释放 OH⁻,导致土壤 pH 升高。接种 AM 真菌后,无论是纳米 ZnO、ZnSO₄ 还是复合处理,土壤 pH 均显著增加,这是丛枝菌根降低 Zn 生物毒性的途径之一^[16, 31]。锌污染和土壤 pH 升高往往会导致植物磷等矿质营养不良,AM 真菌改善植物矿质营养也是帮助植物抵御纳米 ZnO 胁迫的机制之一^[19, 25]。本研究发现,AM 真菌在促生效应不显著的情况下也能在减轻纳米 ZnO 毒性方面发挥积极作用。但纳米 ZnO 除了类似 ZnSO₄ 的毒性之外,也可能具有非纳米污染物所不具有的纳米毒性,而且受土壤中的复杂因素影响,丛枝菌根与纳米 ZnO、离子态锌之间的关系值得深入探讨。

4 结论

(1) 纳米 ZnO 对 AM 真菌有一定毒性, 抑制菌根侵染和玉米植株生长, 表现出菌根毒性和植物毒性, 与同浓度的 ZnSO₄ 相比无显著差异。

(2) 与纳米 ZnO 相比, 土壤中施加 ZnSO₄ 中的 Zn 更容易被玉米吸收。

(3) 纳米 ZnO 与 ZnSO₄ 二者共存其生物毒性并没有相应增加, 说明二者间存在复杂的共环境行为和交互作用。

(4) 与 ZnSO₄ 的效应不同, 施加纳米 ZnO 使玉米收获后的土壤 pH 升高。

(5) AM 真菌对纳米 ZnO、ZnSO₄ 单一及复合污染均具有一定的耐性, 接种 AM 真菌使土壤 pH 升高、降低玉米体内 Zn 含量或 Zn 吸收量, 在复合处理中增加地上部干重, 具有一定的保护作用。

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] 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.
- [3] Dinesh R, Anandaraj M, Srinivasan V, *et al.* Engineered nanoparticles in the soil and their potential implications to microbial activity[J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**: 19-27.
- [4] Ge Y, Schimel J P, Holden P A. Evidence for negative effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1659-1664.
- [5] Bandyopadhyay S, Plascencia-Villa G, Mukherjee A, *et al.* Comparative phytotoxicity of ZnO NPs, bulk ZnO, and ionic zinc onto the alfalfa plants symbiotically associated with *Sinorhizobium meliloti* in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 60-69.
- [6] Watson J L, Fang T, Dimkpa C O, *et al.* The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties [J]. *Biomaterials*, 2015, **28**(1): 101-112.
- [7] Kouhi S M M, Lahouti M, Ganjeali A, *et al.* Comparative phytotoxicity of ZnO nanoparticles, ZnO microparticles, and Zn²⁺ on rapeseed (*Brassica napus* L.); investigating a wide range of concentrations [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2014, **96**(6): 861-868.
- [8] Zhang R C, Zhang H B, Tu C, *et al.* Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn(II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during germination [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(14): 11109-11117.
- [9] López-Moreno M L, de la Rosa G, Hernández-Viezas J A, *et al.* Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO₂ nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7315-7320.
- [10] Hernandez-Viezas J A, Castillo-Michel H, Andrews J C, *et al.* *In situ* synchrotron X-ray fluorescence mapping and speciation of CeO₂ and ZnO nanoparticles in soil cultivated soybean (*Glycine max*) [J]. *ACS Nano*, 2013, **7**(2): 1415-1423.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Smith S E, Smith F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, **62**: 227-250.
- [14] Meier S, Borie F, Bolan N, *et al.* Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(7): 741-775.
- [15] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. *生态学报*, 2013, **33**(13): 3898-3906.
- [16] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根与土壤修复[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] Thomaidis N S, Asimakopoulos A G, Bletsou A A. Emerging contaminants: a tutorial mini-review[J]. *Global NEST Journal*, 2012, **14**(1): 72-79.
- [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 & Technology*, 2013, **47**(16): 9496-9504.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 申鸿, 陈保东, 冯固, 等. 锌污染土壤接种丛枝菌根真菌对玉米苗期生长的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(5): 399-402.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Mahdavi S, Jalali M, Afkhami A. Removal of heavy metals from aqueous solutions using Fe₃O₄, ZnO, and CuO nanoparticles [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, **14**(8): 846.
- [31] Christie P, Li X L, Chen B D. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc[J]. Plant and Soil, 2004, **261**(1-2): 209-217.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行