

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋铁锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓吟,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响

王芳¹, 郭伟^{1*}, 马朋坤¹, 潘亮¹, 张君²

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学化学化工学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 采用温室盆栽试验的方法, 模拟不同程度的铈 (Ce) 污染土壤 (100、500、1 000 mg·kg⁻¹), 研究接种丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌 *Glomus aggregatum* (GA) 和 *Funneliformis mosseae* (FM) 对玉米 (*Zea mays* L.) 菌根侵染率、生物量、营养元素吸收、C:N:P 生态化学计量比和稀土元素 Ce 吸收、转运的影响, 旨在为稀土污染土壤的治理提供基础数据和技术支持。结果表明, GA 和 FM 均与玉米成功建立了互惠共生关系, 平均菌根侵染率为 7.12% ~ 74.47%; 随着土壤 Ce 污染程度的增加, 玉米菌根侵染率、地上部和根部的生物量、营养元素 N、P、K 的吸收量以及 Ce 从根到叶的转运率均显著降低, 而玉米植株的 C:P 和 N:P、地上部和根部 Ce 含量显著升高。接种 AM 真菌不同程度地促进了玉米的生长, 在重度 Ce 污染土壤接种 FM 对玉米生长的促进作用显著高于 GA, 而在轻度和中度 Ce 污染土壤二者之间无显著性差异; 接种显著改善了玉米的营养状况, 一定程度上显著降低了玉米植株的 C:N:P, 在轻度和中度 Ce 污染土壤 GA 对营养元素吸收的促进作用要显著高于 FM, 而在重度 Ce 污染土壤则反之; 接种也显著增加了轻度 Ce 污染土壤玉米地上部和根部 Ce 含量, 而对中度和重度 Ce 污染土壤上玉米 Ce 的吸收无显著影响, 促进了 Ce 从根部到地上部分的转运。试验初步证明, AM 真菌能够减轻稀土元素 Ce 对植物的毒害作用, 在稀土污染土壤的植物修复中具有潜在的应用价值。

关键词: 丛枝菌根真菌; 铈污染土壤; 玉米; 生长; 铈吸收

中图分类号: X171.5; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0309-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.040

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils

WANG Fang¹, GUO Wei^{1*}, MA Peng-kun¹, PAN Liang¹, ZHANG Jun²

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Glomus aggregatum* (GA) and *Funneliformis mosseae* (FM) on AM colonization rate, biomass, nutrient uptake, C:N:P stoichiometric and Ce uptake and transport by maize (*Zea mays* L.) grown in soils with different levels of Ce-contaminated (100, 500 and 1 000 mg·kg⁻¹). The aim was to provide basic data and technical support for the treatment of soils contaminated by rare earth elements. The results indicated that symbiotic associations were successfully established between the two isolates and maize, and the average AM colonization rate ranged from 7.12% to 74.47%. The increasing concentration of Ce in soils significantly decreased the mycorrhizal colonization rate, biomass, nutrition contents and transport rate of Ce from root to shoot of maize, and significantly increased C:P and N:P ratios and Ce contents in shoot and root of maize. Both AM fungi inoculations promoted the growth of maize, but the promoting role of FM was more significant than that of GA in severe Ce-contaminated soils. There were no significant differences in the growth of maize between two AM fungi in mild and moderate Ce-contaminated soils. Inoculation with AM fungi significantly improved nutritional status of maize by increasing nutrient uptake and decreasing C:N:P ratios. GA was more efficient than FM in enhancing nutrient uptake in mild and moderate Ce-contaminated soils, while FM was more efficient in severe Ce-contaminated soils. Moreover, inoculation with AM fungi significantly increased Ce contents of shoot and root in mild Ce-contaminated soils, but had no significant effect on Ce contents of maize in moderate and severe Ce-contaminated soils, and promoted the transport of Ce from root to shoot. The experiment demonstrates that AM fungi can alleviate toxic effects of Ce on plants and have a potential role in the phytoremediation of soils contaminated by rare earth elements.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; Ce-contaminated soils; maize; plant growth; Ce uptake

近年来,随着稀土需求量的逐年增加和稀土矿藏的大量开采,导致了越来越多的稀土元素迁移到

收稿日期: 2015-07-11; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31200421, 40861018); 内蒙古自然科学基金项目 (2012MS0603); 教育部科学技术研究重点项目 (210032); 中国博士后科学基金项目 (20100471489); 国家科技支撑计划项目 (2011BAC02B03)

作者简介: 王芳 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与治理技术、矿区生态恢复, E-mail: 985260548@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

环境中,造成了严重的生态破坏和环境污染问题^[1].在稀土资源丰富的内蒙古包头和江西赣州地区,稀土矿藏开采导致周边土壤严重污染,使耕地退化、粮食减产甚至绝产^[2].因此,稀土开采带来的土壤环境问题正逐步引起人们的广泛关注^[3].调查显示,包头稀土尾矿区土壤中 Ce 的含量最高可达 23 636.0 mg·kg⁻¹,为内蒙古背景值的 481 倍^[4].王立军等^[5]的研究表明,当外施稀土浓度超过 400 mg·kg⁻¹,水稻 (*Oryza sativa* L.) 生物量明显下降,1 500 mg·kg⁻¹时植株在苗期即全部枯死.另外,多种生物毒理学效应研究表明,长期低剂量摄入稀土对脑、肝、骨、内分泌和免疫功能等都具有损伤,能导致多种毒害和病变^[6].因此,对稀土污染土壤进行治理是当前的迫切需求并具有重要的现实意义.

丛枝菌根 (*Arbuscular mycorrhizal*, AM) 真菌作为一类广泛分布于土壤生态系统中的有益微生物,可与 90% 以上的陆生维管植物根系形成互惠共生体^[7].AM 真菌可以改良土壤结构^[8];增强宿主植物对 N、P、K 等矿质营养元素的吸收^[9];影响植物对重金属的吸收和转运,减轻重金属对植物的毒害^[10];在植物逆境生理及维持群落结构和功能稳定方面具有重要的作用^[11].相对于 AM 真菌减轻植物重金属毒害方面的广泛研究而言,迄今为止有关 AM 真菌对植物吸收稀土元素的影响研究还很少.已有的研究表明,AM 真菌可以有效地减轻稀土元素 La 对于紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 的毒害作用,降低叶和根中 La 的浓度^[12,13].因此,AM 真菌在稀土污染土壤的修复中可能具有较强的作用潜力,应当系统深入地进行研究.

本研究采用温室盆栽试验的方法,模拟不同程度的 Ce 污染土壤 (100、500、1 000 mg·kg⁻¹),通过研究接种 AM 真菌 *Glomus aggregatum* (GA) 和 *Funneliformis mosseae* (FM) 对玉米 (*Zea mays* L.) 菌根侵染率、生物量、营养元素吸收、C:N:P 生态化学计量比和稀土元素 Ce 吸收、转运的影响,评价接种 AM 真菌对增强植物抵抗稀土元素 Ce 毒害作用

的影响,旨在为稀土资源开发利用所造成的土壤污染治理提供基础数据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 供试植物和菌种

供试植物为菌根模式植物玉米 (*Zea mays* L., 高优 1 号),种子采购于内蒙古农牧科学研究院蔬菜研究所.播种前先对种子表面消毒,然后在铺有湿润滤纸的培养皿中进行催芽处理,种子露白后即可播种.供试 AM 真菌为聚丛球囊霉 (*Glomus aggregatum*, GA, BGC HK02D, 1511C0001 BGCAM0043, 790 个孢子·10 g⁻¹) 和摩西球囊霉 (*Funneliformis mosseae*, FM, BGC NM01A, 1511C0001 BGCAM0023, 326 个孢子·10 g⁻¹),菌种由北京市农林科学院营养与资源所微生物室提供,接种菌剂是以玉米和白三叶草 (*Trifolium repens* L.) 为宿主植物进行扩大繁殖而获得的内含真菌孢子、菌丝以及宿主植物根段等繁殖体的根际砂土混合物.

1.2 培养基质

供试的土壤取自内蒙古自治区呼和浩特市苗圃区无污染土壤.土壤的基本理化性质见表 1.采集的供试土壤自然风干后过 2 mm 土壤筛,在 121℃ 的条件下高压蒸汽灭菌 2 h,以杀灭土著的 AM 真菌.

通过向土壤中人工施加硝酸铈 [Ce(NO₃)₃·6H₂O] 溶液模拟轻度、中度和重度的 Ce 污染土壤,使其浓度分别为 100、500、1 000 mg·kg⁻¹ 干土.在不同程度的 Ce 污染土壤中加入相应量的硝酸铵 (NH₄NO₃) 溶液,以弥补因加入硝酸铈时造成的处理间氮素背景差异.为保证植物在生长期能获得充足的养分,以溶液形式向不同程度的 Ce 污染土壤中加入基础肥料^[14]: N 为 60 mg·kg⁻¹, P 为 30 mg·kg⁻¹, K 为 71.5 mg·kg⁻¹, Mg 为 4.5 mg·kg⁻¹, Ca 为 20.4 mg·kg⁻¹, Zn 为 1.23 mg·kg⁻¹, Mn 为 3.42 mg·kg⁻¹, Cu 为 0.54 mg·kg⁻¹, Mo 为 0.009 35 mg·kg⁻¹.加入肥料后混合均匀,平衡两周后使用.

表 1 供试土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physico-chemical properties of the test soils

项目	总铈 Ce /mg·kg ⁻¹	pH	有机质 /%	全 N /%	全 P /%	全 K /%	速效 N /mg·kg ⁻¹	速效 P /mg·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹
土壤	54.06	7.44	1.39	0.079 95	0.073 5	1.825	40.5	3.925	76.0

1) 表中数据为 3 个样本的算术平均值

1.3 试验设计

试验采用生物学盆栽法,设置 3 种程度的 Ce

污染土壤 (100、500、1 000 mg·kg⁻¹) 和 3 种接种处理 (不接种处理 CK、接种 GA、FM),每个处理

设 6 个重复, 共计 54 盆, 随机排列. 每盆装灭菌风干土壤 2 kg, AM 真菌接种处理采用混接法, 每盆加菌剂 50 g, 与土壤基质充分混合后装盆, 不接种处理采用相同方法加入等量的灭菌菌剂. 以圆形塑料花盆(上口径 16.5 cm × 下口径 10.5 cm × 高度 13 cm) 作为培养容器, 内衬塑料自封袋. 选择颗粒饱满的玉米种子, 每盆播种 8 颗, 出苗 7 d 后间苗, 每盆保留 3 株长势相近的植物. 试验在内蒙古大学温室内进行. 试验期间自然采光, 采用称重法每天定时为植物补水, 维持土壤基质含水量为田间最大持水量的 80%. 自出苗之日起植物生长 9 周后收获.

1.4 样品制备及分析测定

收获时, 将植物地上部分自茎基部剪下, 蒸馏水洗净, 70℃ 烘干, 称重. 先用自来水洗净玉米根系砂粒和土壤, 然后用蒸馏水冲洗 3 次, 70℃ 烘干, 称重. 在收获时随机选取 0.7 g 新鲜根段保存于 50% 的乙醇中, 用于测定菌根侵染率. 测定时, 将根系样品用 0.05% 台盼蓝于乳酸甘油溶液染色, 保存、制片^[15], 利用根段频率法计算菌根侵染率^[16].

植物样品烘干称重后粉碎, 每个样品称取 2~3 mg 利用元素分析仪 (Vario EL III, CHNOS Elemental Analyzer, Elemental Co Germany) 对植物样品地上和根部的 C 和 N 元素含量进行测定. 称取 0.5 g 左右的植物样品加入 5 mL BV-III 级 HNO₃ 于 120℃ 条件下开放式消煮, 制备待测溶液. 利用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer USA) 测定消煮液中 P 和 K 的浓度, 利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, ELAN DRC-

e, PerkinElmer USA) 测定植物样品中稀土元素 Ce 的浓度.

1.5 数据分析

Ce 从地下部向地上部的转运率等于地上部吸收的 Ce 的量除以该盆中玉米植株吸收的 Ce 的总量(地下部 + 地上部).

所有试验数据利用 Excel 2003 进行平均值和标准误差的计算, SPSS 17.0 软件进行统计分析, 邓肯氏新复极差检验法 (Duncan's multiple range test, DMRT) 检验各处理平均值之间的差异显著性, 差异显著水平为 $P < 0.05$, 而呈现非正态分布的数据(菌根侵染率) 经过反正弦转换后再以同样方法进行.

2 结果与分析

2.1 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米菌根侵染率和生物量的影响

不接种处理的玉米根系中未观察到菌根真菌的侵染, 而接种 GA 和 FM 均与玉米成功建立了菌根共生关系(表 2). 随着土壤 Ce 污染程度的增加, 接种 GA 和 FM 玉米根系的侵染率显著降低 ($P < 0.001$), 与轻度 Ce 污染土壤相比, 重度 Ce 污染土壤玉米根系平均菌根侵染率下降了 90%. 在轻度 Ce 污染土壤, 接种 FM 处理的玉米菌根侵染率显著高于接种 GA ($P < 0.05$); 在中度和重度 Ce 污染土壤, 接种 GA 和 FM 处理之间菌根侵染率无显著性差异. 土壤中 Ce 污染的程度以及接种处理均对菌根侵染率有显著影响 ($P < 0.001$), 但二者交互作用下未达到显著水平.

表 2 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米菌根侵染率和生物量的影响¹⁾

Table 2 Effects of inoculation with AM fungi on mycorrhizal colonization and biomass of maize grown in Ce-contaminated soils

Ce 污染程度/mg·kg ⁻¹	接种处理	菌根侵染率/%	地上部干重/g·pot ⁻¹	根部干重/g·pot ⁻¹
100	CK	0.00 ± 0.00 c	4.84 ± 0.30 b	1.18 ± 0.09 a
	GA	70.16 ± 7.36 b	7.27 ± 0.26 a	1.50 ± 0.08 a
	FM	78.79 ± 1.95 a	6.33 ± 0.61 a	1.33 ± 0.13 a
500	CK	0.00 ± 0.00 b	2.15 ± 0.14 b	0.67 ± 0.10 a
	GA	31.41 ± 3.31 a	2.92 ± 0.21 a	0.71 ± 0.12 a
	FM	42.19 ± 9.83 a	2.39 ± 0.24 ab	0.69 ± 0.09 a
1000	CK	0.00 ± 0.00 b	1.75 ± 0.04 b	0.51 ± 0.05 b
	GA	5.29 ± 1.40 ab	1.85 ± 0.17 b	0.40 ± 0.05 b
	FM	8.94 ± 3.19 a	2.67 ± 0.12 a	0.82 ± 0.05 a
显著性分析	Ce 含量 (Ce)	***	***	***
	接种 (I)	***	***	NS
	Ce × I	NS	**	**

1) 表中数据为 6 次重复的平均值 ± 标准误差, 同一列中对于同一基质不同字母表示差异显著, 显著水平为 $P < 0.05$; * 为 $P < 0.05$, 表示差异显著; ** 为 $P < 0.01$, 表示差异非常显著; *** 为 $P < 0.001$, 表示差异极显著; NS 表示无显著性差异, 下同

由表 2 可知,随着土壤 Ce 污染程度的增加,玉米地上部和根部的生物量都显著降低($P < 0.001$). 在轻度 Ce 污染土壤,接种 GA 和 FM 处理显著增加了玉米地上部干重($P < 0.05$); 在中度 Ce 污染土壤,接种 GA 显著增加了玉米地上部干重($P < 0.05$),而接种 FM 无显著影响; 在重度 Ce 污染土壤,接种 FM 显著增加了玉米地上部和地下部干重($P < 0.05$),而接种 GA 无显著影响. 在重度 Ce 污染水平下接种 FM 地上部和根部干重显著高于接种 GA 处理($P < 0.05$),而在轻度和中度 Ce 污染水平下 2 种接种处理间对生物量的影响差异不显著. 土壤中 Ce 污染程度的增加显著降低了玉米植株地上部及根部生物量($P < 0.001$),而接种 AM 真菌仅对玉米植株地上部生物量有显著影响($P < 0.001$). 双因素分析表明,土壤中 Ce 污染程度与接种 AM 真菌的交互作用对玉米植株地上部以及根部生物量均有显著影响($P < 0.01$).

2.2 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米植株 N、P 和 K 吸收量的影响

随着土壤 Ce 污染程度的增加,玉米地上部和地下部 N、P 和 K 的吸收量显著降低($P < 0.001$, 表 3). 在轻度 Ce 污染土壤,与对照相比,接种 GA 和

FM 显著增加了玉米地上部 N、P 和 K 的吸收量($P < 0.05$),接种 GA 显著增加了地下部 N 和 P 的吸收量($P < 0.05$),接种 FM 显著增加了地下部 P 的吸收量($P < 0.05$). 在中度 Ce 污染土壤,接种 GA 仅显著增加了玉米地上部 P 的吸收量($P < 0.05$),接种 FM 显著降低了地上部 N 的吸收量($P < 0.05$). 在重度 Ce 污染土壤,接种 FM 显著增加了玉米地上部 P、K 的吸收量和地下部 N、K 的吸收量($P < 0.05$). 在轻度 Ce 污染土壤,接种 GA 对玉米 P 吸收的促进作用要显著的高于 FM 处理($P < 0.05$). 在中度 Ce 污染土壤,接种 GA 对玉米地上部 N 和 P 吸收的促进作用要显著的高于 FM($P < 0.05$). 在重度 Ce 污染土壤,接种 GA 对玉米 P 和 K 吸收的促进作用要显著的低于 FM($P < 0.05$). 数据分析表明(表 3),土壤中 Ce 污染程度的增加显著降低了玉米地上部和根部 N、P 和 K 的吸收量($P < 0.001$),接种 AM 真菌显著地促进了玉米地上部 N、P 和 K 的吸收量以及根部 N、P 的吸收量($P < 0.01$). 双因素分析表明,土壤中 Ce 污染程度与接种 AM 真菌的交互作用显著地影响了玉米地上部 N、P 和 K 的吸收量以及根部 N、P 的吸收量($P < 0.01$).

表 3 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米地上部和根部 N、P 和 K 吸收量的影响

Ce 污染程度 /mg·kg ⁻¹	接种处理	地上部			根部		
		N/mg·pot ⁻¹	P/mg·pot ⁻¹	K/mg·pot ⁻¹	N/mg·pot ⁻¹	P/mg·pot ⁻¹	K/mg·pot ⁻¹
100	CK	149.99 ± 10.54 b	3.38 ± 0.19 c	43.00 ± 2.88 b	33.91 ± 2.17 b	0.63 ± 0.03 c	9.56 ± 1.10 a
	GA	225.27 ± 1.83 a	11.30 ± 0.09 a	58.84 ± 0.77 a	50.53 ± 2.29 a	2.11 ± 0.13 a	9.57 ± 0.36 a
	FM	204.67 ± 13.87 a	8.14 ± 0.55 b	53.66 ± 3.32 a	41.70 ± 4.97 ab	1.41 ± 0.09 b	8.32 ± 0.58 a
500	CK	93.48 ± 4.74 a	1.40 ± 0.09 b	17.24 ± 1.64 a	20.81 ± 3.91 a	0.35 ± 0.05 a	3.15 ± 0.78 a
	GA	106.69 ± 5.73 a	2.25 ± 0.12 a	22.63 ± 3.16 a	23.78 ± 4.12 a	0.44 ± 0.07 a	3.11 ± 0.63 a
	FM	77.53 ± 4.31 b	1.73 ± 0.16 b	20.78 ± 2.70 a	20.72 ± 2.00 a	0.43 ± 0.06 a	2.53 ± 0.28 a
1000	CK	78.03 ± 1.51 a	1.11 ± 0.06 b	12.73 ± 1.14 b	13.53 ± 1.65 b	0.33 ± 0.05 a	1.48 ± 0.30 b
	GA	76.04 ± 6.27 a	1.12 ± 0.08 b	12.79 ± 1.85 b	11.71 ± 1.88 b	0.24 ± 0.03 a	1.60 ± 0.25 b
	FM	84.58 ± 2.86 a	1.46 ± 0.07 a	23.23 ± 1.23 a	23.20 ± 1.36 a	0.36 ± 0.04 a	2.66 ± 0.17 a
显著性分析	Ce 含量 (Ce)	***	***	***	***	***	***
	接种 (I)	***	***	***	**	***	NS
	Ce × I	***	***	**	**	***	NS

2.3 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米 C:N:P 生态化学计量比的影响

接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米植株地上部和根部 C:N:P 比的影响如表 4 所示. 从中可知,随着 Ce 污染程度的增加,玉米植株的 C:P 和 N:P 显著增加($P < 0.001$). 在轻度 Ce 污染土壤,与对照处理相比,接种 GA 和 FM 显著降低了玉米地上部和根部的 C:P 和 N:P($P < 0.05$); 在中度 Ce 污

染土壤,接种 GA 和 FM 显著增加了玉米地上部 C:N($P < 0.05$),显著降低了玉米地上部 C:P 和 N:P 比($P < 0.05$); 在重度 Ce 污染土壤,接种 FM 显著增加了地上部 C:N、C:P 以及根部 C:P、N:P,显著降低了地上部 N:P($P < 0.05$). 数据分析表明,土壤中 Ce 污染的程度显著影响了玉米地上部和根部的 C:N:P($P < 0.01$),而接种处理显著影响了玉米地上部 C:N:P 和根部 C:N、C:P($P < 0.01$). 双因素

表 4 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米地上部和根部 C:N:P 比的影响

Table 4 Effects of inoculation with AM fungi on shoot and root C:N:P ratios of maize grown in Ce-contaminated soils

Ce 污染程度 /mg·kg ⁻¹	接种处理	地上部			根部		
		C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
100	CK	12.90 ± 0.26 a	570.68 ± 10.17 a	44.24 ± 0.62 a	12.98 ± 0.37 a	692.70 ± 29.69 a	53.35 ± 1.50 a
	GA	13.09 ± 0.62 a	260.77 ± 10.55 c	19.94 ± 0.24 c	11.28 ± 0.31 a	271.20 ± 6.49 c	24.07 ± 0.69 c
	FM	12.45 ± 0.42 a	313.22 ± 13.96 b	25.15 ± 0.48 b	12.23 ± 0.76 a	354.90 ± 11.52 b	29.40 ± 2.21 b
500	CK	8.97 ± 0.24 b	600.15 ± 26.84 a	66.94 ± 2.77 a	12.60 ± 0.95 a	733.77 ± 48.8 a	59.73 ± 6.94 a
	GA	10.68 ± 0.63 a	505.14 ± 14.64 b	47.61 ± 1.86 b	11.13 ± 0.34 a	589.31 ± 26.11 a	52.91 ± 1.48 a
	FM	12.07 ± 0.62 a	545.81 ± 30.67 b	45.37 ± 2.39 b	12.49 ± 0.94 a	618.39 ± 84.52 a	49.85 ± 6.47 a
1 000	CK	8.41 ± 0.43 b	592.02 ± 18.39 b	70.90 ± 3.99 a	14.87 ± 0.65 a	617.25 ± 73.67 b	42.04 ± 6.03 b
	GA	9.28 ± 0.25 b	631.28 ± 43.14 b	67.79 ± 3.0 ab	13.32 ± 0.64 a	657.17 ± 78.51 b	50.43 ± 8.16 ab
	FM	12.41 ± 0.10 a	722.89 ± 31.95 a	58.23 ± 2.21 b	13.53 ± 1.12 a	885.27 ± 39.38 a	66.97 ± 6.83 a
显著性分析	Ce 含量 (Ce)	***	***	***	**	***	***
	接种 (I)	***	***	***	**	**	NS
	Ce × I	***	***	**	NS	***	**

分析表明,土壤中 Ce 污染程度与接种 AM 真菌的交互作用显著影响了玉米地上部 C:N:P 和根部 C:P、N:P 比($P < 0.01$)。

2.4 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米吸收和转运稀土元素 Ce 的影响

由表 5 可知,随着土壤 Ce 污染程度的增加,玉米植株地上部和根部 Ce 的吸收量都呈显著上升趋势($P < 0.001$),Ce 从根到叶的转运率显著降低($P < 0.001$)。在轻度 Ce 污染土壤,与对照处理相比,接种 GA 显著增加了玉米地上部和根部 Ce 的吸收量,而接种 FM 显著增加了地上部 Ce 的吸收量和 Ce 的转运率($P < 0.05$)。在中度和重度 Ce 污染土壤,接种 GA 和 FM 对玉米植株 Ce 的吸收

量均没有显著影响。在重度 Ce 污染土壤,接种 GA 显著增加了 Ce 的转运率($P < 0.05$)。2 种 AM 真菌接种处理之间,在轻度 Ce 污染土壤,接种 GA 根部 Ce 的吸收量显著高于接种 FM,而接种 FM 处理 Ce 从根到叶的转运率显著高于 GA; 在重度 Ce 污染土壤,接种 FM 根部 Ce 的吸收量显著高于 GA,接种 GA 处理 Ce 的转运率显著高于 FM ($P < 0.05$)。数据分析表明,土壤中 Ce 浓度的增加显著增加了玉米地上部和根部对 Ce 的吸收,显著降低 Ce 从根到叶的转运率($P < 0.001$)。双因素分析表明,土壤中 Ce 污染程度与接种 AM 真菌的交互作用对玉米根部 Ce 的吸收量和 Ce 的转运率有显著影响($P < 0.05$)。

表 5 接种 AM 真菌对 Ce 污染土壤上玉米植株 Ce 的吸收量和转运率的影响

Table 5 Effects of inoculation with AM fungi on Ce contents and transport rate of maize grown in Ce-contaminated soils

Ce 污染程度/mg·kg ⁻¹	接种处理	地上部 Ce 吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	根部 Ce 吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	Ce 的转运率/%
100	CK	2.01 ± 0.15 b	23.82 ± 3.77 b	8.06 ± 1.37 b
	GA	3.74 ± 0.59 a	39.84 ± 5.68 a	8.68 ± 1.64 b
	FM	3.33 ± 0.19 a	25.26 ± 3.29 b	11.93 ± 1.72 a
500	CK	4.81 ± 0.56 a	108 ± 24.36 a	4.99 ± 2.62 a
	GA	5.61 ± 0.65 a	122 ± 12.71 a	4.54 ± 1.53 a
	FM	4.04 ± 0.50 a	75 ± 7.53 a	5.18 ± 1.24 a
1 000	CK	9.39 ± 0.72 a	407 ± 45.45 ab	2.31 ± 0.49 b
	GA	10.05 ± 1.59 a	278 ± 44.90 b	3.65 ± 1.02 a
	FM	10.10 ± 0.40 a	433 ± 46.74 a	2.35 ± 0.49 b
显著性分析	Ce 含量 (Ce)	***	***	***
	接种 (I)	NS	NS	NS
	Ce × I	NS	**	*

3 讨论

侵染率是表示 AM 真菌与宿主之间亲和力的重

要指标,衡量其生态适应性^[17]。研究结果显示,在不同程度的 Ce 污染土壤,接种 AM 真菌 GA 和 FM 均与玉米成功建立了互惠共生关系,平均侵染率为

7.12% ~ 74.47%。然而,随着土壤 Ce 污染程度的增加,菌根侵染率显著降低,重度 Ce 污染土壤玉米根系平均菌根侵染率仅为轻度 Ce 污染土壤的 9.6%。Chen 等^[12]的研究发现当外源添加 La 的浓度小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,接种 *Gigaspora margarita* 和 *Glomus intraradices* 对紫云英的菌根侵染率没有显著影响;而当添加 La 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,2 种 AM 真菌平均菌根侵染率降低了 45%。众多研究表明,土壤中有毒元素污染程度的增加会显著抑制 AM 真菌的活性和对根系的侵染^[18]。另外,在不同程度的 Ce 污染土壤,FM 接种处理的菌根侵染率均高于 GA,表明 FM 对 Ce 污染土壤的适应性较强。研究也发现,在 La 胁迫下接种 *Gigaspora margarita* 的紫云英根系侵染率显著高于接种 *Glomus intraradices*^[12]。Bedini 等^[19]认为不同的 AM 真菌菌种无论是在菌丝直径、壁厚、分支模式和分隔,还是形成外延菌丝网络的范围和密度及产生球囊霉素相关土壤蛋白的量都有所不同,这使得它们表现出不同的生态适应性。

本研究结果显示,随着土壤 Ce 污染程度的增加,玉米植株的生物量呈显著降低的趋势。王学等^[20]的研究发现当培养基中 Ce 的浓度从 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,白菜 (*Brassica campestris* L.) 幼苗鲜重降低了 76%。叶亚新等^[21]在研究 Ce 对萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 幼苗生长发育的影响后也得出了类似的结论。Ce 在环境中的积累会对植物的生长产生明显的抑制作用,其原因可能是稀土元素 Ce 能破坏植物的膜系统,改变细胞膜电位,诱导植物产生大量的活性氧物质,加剧了膜脂过氧化程度,影响植物抗氧化系统酶活性,导致植物细胞死亡和生长发育迟缓^[22]。研究表明,在重金属胁迫条件下,AM 真菌可以通过多种机制减轻重金属对植物的毒害作用,促进植物的生长^[23]。本研究发现,AM 真菌对不同程度 Ce 胁迫下玉米的生长均具有一定的促进作用。目前,研究显示在 La 污染土壤上接种 AM 真菌能显著促进紫云英的生长,提高其抗逆性;与 *Glomus intraradices* 相比,接种 *Gigaspora margarita* 的紫云英有较高的生物量^[12]。因此,AM 真菌也能减轻稀土元素对植物的毒害,改善植物的生长。在重度 Ce 污染土壤,接种 FM 对玉米生长的促进作用显著高于 GA,而在轻度、中度 Ce 污染土壤,二者之间无显著差别。Gaur 等^[24]认为不同 AM 菌种对相同重金属元素表现出不同的抗耐能力,可能受其生长的环境和菌株自身生物学特性的共同影响。因

此,AM 真菌对于稀土元素污染土壤上植物生长效应的影响可能由菌种、稀土元素种类和污染程度等共同决定。

土壤中的 N、P、K 元素是生命物质的重要组成部分,是植物生长发育所必须的大量元素,以多种形式参与植物生长发育和新陈代谢等不同生理生化过程^[25]。研究显示,土壤中 Ce 浓度的增加显著抑制了玉米对 N、P、K 的吸收。这可能是因为当土壤中的稀土元素浓度过高时,稀土元素聚集在植物细胞的表面,从而改变其显微结构及膜的渗透性,甚至破坏细胞膜,进而抑制营养的吸收^[26]。接种 AM 真菌能够显著改善生长在 Ce 污染土壤上玉米的营养状况。相关研究也表明,AM 真菌能显著促进 La 胁迫下紫云英对 P、K、Ca 和 Mg 等矿质营养元素的吸收,提高抗逆性^[12, 13]。AM 真菌可以显著促进植物对 N、P、K 等营养元素的吸收,尤其是 P 的吸收^[27]。其主要机制可能是,菌根真菌的菌丝扩大了植物根系范围和根的吸收面积,增强了植物对营养的吸收能力^[27]。在不同程度的 Ce 污染土壤,接种 2 种 AM 真菌对玉米吸收营养元素的促进作用也表现出了一定的差异。在 La 胁迫下,接种不同 AM 真菌在改善植物营养状况方面表现出了明显不同的菌根效应^[12, 13]。AM 真菌对植物生长以及养分吸收贡献的不同,这与真菌种属以及菌丝发育及分布有关,AM 真菌的功能受真菌种类、宿主植物种类和土壤生态环境条件等多种因素共同决定^[28]。

生态化学计量学是指生态过程和生态相互作用中多种化学元素和能量平衡的科学,它主要研究 3 种元素 C、N 和 P 之间的关系^[29]。生长速率假设是生态化学计量学的核心思想,认为随着生长速率的加快,植物体内 N 和 P 含量逐渐增加,而 P 增加的更快,C:P 比与 N:P 比会随之降低^[30]。本研究结果显示,随着 Ce 污染程度的增加,显著增加了玉米植株的 C:P 和 N:P,说明土壤 Ce 污染对玉米 P 吸收的抑制程度更大。同时,接种 2 种 AM 真菌均在一定程度上显著降低了玉米植株的 C:P 和 N:P,表明 AM 真菌可以调节 Ce 污染土壤上玉米植株的 C:N:P 生态化学计量比,符合生长速率假设。郭伟等^[31]研究了稀土尾矿上接种 *Glomus versiforme* 对大豆 (*Glycine max*) C:N:P 的影响,也得到了相应的变化趋势。

本研究结果显示,玉米植株 Ce 的含量与土壤 Ce 含量呈显著正相关,明显抑制玉米的生长。随着土壤中 La 水平升高,紫云英地上和根部 La 浓度也

显著增加^[12]。外源稀土进入土壤后,会导致植株稀土含量明显增加,对植株产生毒害作用,影响其生长发育,而且可通过食物链进入人体,对人体健康产生危害^[32]。在不同程度的 Ce 污染土壤上,接种 AM 真菌对玉米植株中 Ce 含量的影响不同,促进了 Ce 向玉米地上部的转运。有研究发现,在重金属污染条件下,AM 真菌侵染宿主植物后会增加植株对重金属的吸收,但是同时也提高了植株对重金属的耐受性,从而帮助植物在较高浓度重金属水平下存活^[33]。可能的机制是,AM 真菌共生体的形成能调节植物体内某些与重金属吸收及转运相关基因的表达,从而增强宿主对重金属元素的耐受性^[34]。植物螯合肽合成酶(PCs)是植物体重金属解毒机制中的一个关键酶,能够催化合成 PCs 螯合细胞质中重金属离子,并将其转运至液泡中^[35]。Christophersen 等^[36]研究证实 *Glomus intraradices* 和 *Glomus mosseae* 双接种显著提高了蒺藜苜蓿 (*Medicago truncatula* Gaertn.) 编码植物螯合肽合成酶 (MtPCS) 的表达量。在重金属毒害下,AM 真菌也能减少植物对重金属的吸收^[37]。AM 真菌可以通过球囊霉素的螯合作用和菌丝的过滤与固持作用,对进入宿主植物的重金属离子具有“过滤效应”^[38]。AM 真菌还可能不影响植物对重金属的吸收^[39],但可以通过增强植物对营养元素和水分的吸收,增加植物体内叶绿素含量、改变叶片气孔传导率和蒸腾速率,提高净光合速率等,来促进植物生长,增强对重金属毒害作用的抵抗能力^[40]。另外,AM 真菌也可以通过改变重金属地上地下部分之间的转运来减轻重金属毒害对植物的危害^[41]。总之,AM 真菌对植物的保护作用,可能因 AM 真菌、植物、重金属、土壤性状等因素而异^[42]。AM 真菌提高植物重金属耐受性的机制是多方面的,也可能是多种机制协同作用的结果。但是,有关 AM 真菌对植物吸收稀土元素的影响以及相关作用机制的研究还很少,有必要对其进行深入研究,探明 AM 真菌影响植物吸收、转运和积累稀土元素的可能机制。

4 结论

(1)在不同程度的 Ce 污染土壤,接种 AM 真菌 GA 和 FM 均与玉米成功建立了互惠共生关系,平均侵染率为 7.12% ~ 74.47%,FM 菌种表现出更好的生态适应性。

(2)随着土壤 Ce 污染程度的增加,玉米菌根侵染率、生物量和营养元素的吸收显著降低,玉米植

株 C:N:P 显著增加。

(3)接种 AM 真菌显著促进 Ce 胁迫下玉米的生长和对营养元素 N、P、K 的吸收,一定程度上显著降低了玉米植株的 C:N:P,改善了玉米的营养状况;总的来说,接种 FM 处理对玉米生长和营养元素吸收的促进作用要好于 GA。

(4)玉米植株体内 Ce 的含量随着土壤 Ce 污染程度的增加而增加,Ce 从根部到叶的转运率显著降低;接种 AM 真菌显著促进了轻度 Ce 污染土壤上玉米植株对 Ce 的吸收,而在中度和重度 Ce 污染土壤上无显著影响,显著增加了 Ce 从根到叶的转运。

参考文献:

- [1] 高志强,周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2915-2922.
- [2] 邹国良,陈富生. 赣州矿产资源开发利用现状及对策研究[J]. 山西冶金, 2006, 29(4): 50-52.
- [3] 李小飞,陈志彪,张永贺,等. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 835-843.
- [4] 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,等. 内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1895-1900.
- [5] 王立军,胡霁堂,周权锁,等. 稀土元素在土壤-水稻体系中的迁移与吸收累积特征[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(1): 91-97.
- [6] 陈祖义,朱旭东. 稀土元素的肝脏蓄积性及毒性危害[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(4): 98-102.
- [7] 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.
- [8] Hallet P D, Feeney D S, Bengough A G, et al. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport[J]. Plant and Soil, 2009, 314(1-2): 183-196.
- [9] Grunwald U, Guo W B, Fischer K, et al. Overlapping expression patterns and differential transcript levels of phosphate transporter genes in arbuscular mycorrhizal, P-i-fertilised and phytohormone-treated *Medicago truncatula* roots [J]. Planta, 2009, 229(5): 1023-1034.
- [10] Karimi A, Khodaverdiloo H, Sepehri M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal contaminated soils [J]. African Journal of Microbiology Research, 2011, 5(13): 1571-1576.
- [11] Cameron D D. Arbuscular mycorrhizal fungi as (agro) ecosystem engineers[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1-2): 1-5.
- [12] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of lanthanum in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) [J]. Chemosphere, 2007, 68(8): 1548-1555.
- [13] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of nutrient elements by Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) grown in lanthanum spiked soil [J]. Biology and

- Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 675-678.
- [14] 肖雪毅, 陈保冬, 朱永官. 丛枝菌根真菌对铜尾矿上植物生长和矿质营养的影响[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(2): 312-317.
- [15] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, **55**(1): 158-161.
- [16] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization [J]. New Phytologist, 1981, **87**(1): 63-67.
- [17] 王晓英, 王冬梅, 陈保冬, 等. 丛枝菌根真菌群落对白三叶草生长的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(6): 1456-1462.
- [18] 王发园, 林先贵, 尹睿. 丛枝菌根真菌对海州香薷生长及其 Cu 吸收的影响[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 174-180.
- [19] Bedini S, Pellegrino E, Avio L, *et al.* Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(7): 1491-1496.
- [20] 王学, 徐恒戩, 刘涛. 白菜对铈、铅胁迫响应的比较研究[J]. 核农学报, 2010, **24**(3): 634-638.
- [21] 叶亚新, 金璁, 朱凤, 等. 稀土 Ce³⁺ 对萝卜幼苗生长发育的影响[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2008, **25**(2): 44-48.
- [22] Wang C R, Luo X, Tian Y, *et al.* Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk [J]. Chemosphere, 2012, **86**(5): 530-537.
- [23] Bano S A, Ashfaq D. Role of mycorrhiza to reduce heavy metal stress[J]. Natural Science, 2013, **5**(12A): 16-20.
- [24] Gaur A, Adholeya A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Current Science, 2004, **86**(4): 528-534.
- [25] 孙丽范. 利用耐盐碱解磷, 解钾, 固氮菌发酵菌糠制备菌肥的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. 1-76.
- [26] 姜照伟, 翁伯琦, 黄元仿, 等. 施用稀土元素镧对南非马唐生长及若干生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(4): 713-720.
- [27] Miransari M. Plant, Mycorrhizal Fungi, and Bacterial Network [A]. In: Hakeem K R, Rehman R U, Tahir I, *et al.* (eds.). Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk [M]. India: Springer, 2014. 315-325.
- [28] Kahiluoto H, Ketoja E, Vestberg M. Plant-available P supply is not the main factor determining the benefit from arbuscular mycorrhiza to crop P nutrition and growth in contrasting cropping systems[J]. Plant and Soil, 2012, **350**(1-2): 85-98.
- [29] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 等. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 1980-1986.
- [30] Elser J J, Acharya K, Kyle M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. Ecology Letters, 2003, **6**(10): 936-943.
- [31] 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 等. 丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1915-1921.
- [32] 李金霞, 红梅, 殷秀琴. 包钢尾矿坝下风位土壤外源稀土累积及地球化学特征[J]. 稀土, 2008, **29**(6): 57-62.
- [33] Jamal A, Ayub N, Usman M, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi enhance zinc and nickel uptake from contaminated soil by soybean and lentil[J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, **4**(3): 205-221.
- [34] 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.
- [35] Shim D, Kim S, Choi Y I, *et al.* Transgenic poplar trees expressing yeast cadmium factor 1 exhibit the characteristics necessary for the phytoremediation of mine tailing soil [J]. Chemosphere, 2013, **90**(4): 1478-1486.
- [36] Christophersen H M, Smith F A, Smith S E. Unraveling the influence of arbuscular mycorrhizal colonization on arsenic tolerance in *Medicago*: *Glomus mosseae* is more effective than *G. intraradices*, associated with lower expression of root epidermal Pi transporter genes[J]. Frontiers in Physiology, 2012, **3**: 91.
- [37] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3142-3148.
- [38] Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance[J]. Phytochemistry, 2006, **68**(1): 139-146.
- [39] Chen B D, Zhu Y G, Smith F A. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on uranium and arsenic accumulation by Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) from a uranium mining-impacted soil[J]. Chemosphere, 2006, **62**(9): 1464-1473.
- [40] Madejón E, Doronila A I, Sanchez-Palacios J T, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and biosolids enhance the growth of a native Australian grass on sulphidic gold mine tailings [J]. Restoration Ecology, 2010, **18**(s1): 175-183.
- [41] 徐丽娟, 刁志凯, 李岩, 等. 菌根真菌的生理生态功能[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 285-292.
- [42] 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.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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	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