

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 ..... 施禅臻,于兴娜,周斌,项磊,聂皓浩 (4139)

秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 ..... 张岩,张洪海,杨桂朋 (4146)

中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 ..... 杨毅红,陶俊,高健,李雄,施展,韩保新,谢文彰,曹军骥 (4152)

改进的大气 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO 在线观测 FTIR 系统 ..... 夏玲君,刘立新,周凌晔,方双喜,王红阳,张振波 (4159)

长沙市郊大气 CH<sub>4</sub> 浓度变化特征 ..... 刘鲁宁,王迎红,徐小娟,王卫东,王跃思 (4165)

麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 ..... 刘刚,李久海,徐慧,吴丹 (4171)

过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 ..... 杨世迎,王雷雷,冯琳玉,赵腊娟,石超 (4178)

污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 ..... 钟佳,魏源送,赵振凤,应梅娟,周国胜,熊建军,刘培财,葛振,丁刚强 (4186)

长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 ..... 顾丽军,杨毅,刘敏,聂明华,李涛,侯立军 (4195)

海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 ..... 吕书丛,张洪,单保庆,李立青 (4204)

汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 ..... 东口朋宽,史江红,张晖,刘晓薇 (4211)

基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 ..... 李凯,曾凡棠,房怀阳,林澍 (4218)

合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 ..... 戴梅红,李田,张伟 (4226)

微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 ..... 随伟伟,丁海兵,杨桂朋,陆小兰,李文娟,孙立群 (4231)

太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 ..... 马久远,王国祥,李振国,许宽,周锋,张佳 (4240)

表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 ..... 秦晶,高甫威,谢慧君 (4251)

带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 ..... 王亚,张春华,王淑,申连玉,葛滢 (4257)

镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 ..... 李佳,林建伟,詹艳慧 (4266)

底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 ..... 任朝亮,宋进喜,杨小刚,薛健 (4275)

铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成:氯化化和溴化比较 ..... 田川,郭婷婷,刘锐平,William Jefferson,刘会娟,曲久辉 (4282)

天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 ..... 徐磊,俞文正,梁亮,王彤 (4290)

DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 ..... 丰桂珍,董秉直 (4295)

零价铁去除废水中的汞 ..... 周欣,张进忠,邱昕凯,王定勇 (4304)

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 ..... 周红艺,梁思,雷思思,雷双健 (4311)

不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 ..... 李政剑,石宝友,王东升 (4319)

氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 ..... 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,方巧,杨孟娟,王虹 (4325)

改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 ..... 吴艳,罗汉金,王侯,张子龙,王灿,王雨微 (4333)

经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 ..... 朱健,吴庆定,王平,李科林,雷明婧,张伟丽 (4341)

硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 ..... 刘妍妍,龙焰,尹华,叶锦韶,何宝燕,张娜 (4349)

硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 ..... 张丽,黄勇,袁怡,李祥,刘福鑫 (4356)

硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 ..... 袁怡,黄勇,李祥,张春蕾,张丽,潘杨,刘福鑫 (4362)

UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 ..... 赵健慧,张百惠,李宁,王兵,李永峰 (4370)

响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 ..... 李华楠,徐冰冰,齐飞,孙德智 (4376)

高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 ..... 刘炎,石小荣,崔益斌,李梅 (4386)

NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 ..... 李慧颖,杜晓明,杨宾,伍斌,徐竹,史怡,房吉敦,李发生 (4392)

近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 ..... 章明奎,常跃畅 (4399)

浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 ..... 黄春雷,宋明义,魏迎春 (4405)

黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 ..... 孙文广,甘卓亭,孙志高,李丽丽,孙景宽,孙万龙,牟晓杰,王玲玲 (4411)

崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 ..... 孙阳昭,王学彤,张媛,孙延枫,李梅,马中 (4420)

福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征 ..... 瞿程凯,祁士华,张莉,黄焕芳,张家泉,张原,杨丹,刘红霞,陈伟 (4427)

电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 ..... 邵科,尹文华,朱国华,巩宏平,周欣,王玲,刘劲松 (4434)

外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 ..... 蔡荟梅,彭传燧,陈静,侯如燕,宛晓春 (4440)

丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 ..... 赵仁鑫,郭伟,付瑞英,赵文静,郭江源,毕娜,张君 (4447)

丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 ..... 李少朋,毕银丽,孔维平,王瑾,余海洋 (4455)

超积累植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 吸收锰机制的初步探讨 ..... 徐向华,李仁英,刘翠英,施积炎,林佳 (4460)

*Shewanella oneidensis* MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 ..... 陈艳,王卉,司友斌 (4466)

基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 ..... 蒋宝,崔晓勇 (4473)

不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征 ..... 柳飞,张延一,严玉鹏,刘凡,谭文峰,刘名茗,冯雄汉 (4482)

煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 ..... 熊金钰,李寒旭,董众兵,张颂,钱宁波,武成利 (4490)

植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 ..... 杨新萍,赵方杰 (4495)

《环境科学》征订启事 (4239) 《环境科学》征稿简则 (4369) 信息 (4225, 4265, 4303, 4375)

# 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用

赵仁鑫<sup>1</sup>, 郭伟<sup>1\*</sup>, 付瑞英<sup>1</sup>, 赵文静<sup>1</sup>, 郭江源<sup>1</sup>, 毕娜<sup>1</sup>, 张君<sup>2</sup>

(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, 研究了接种丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)、真菌 *Glomus etunicatum*(GE) 和 *Glomus versiforme*(GV) 对新排、风化和自燃这 3 种类型煤矸石上玉米(*Zea mays* L.) 生长、矿质营养吸收、C:N:P 生态化学计量比、重金属吸收的影响, 旨在为草原生态系统煤矸石废弃地的生态重建和植被恢复提供技术依据。结果表明, 在 3 种煤矸石上 2 种 AM 真菌均与玉米成功建立了互惠共生关系, 平均菌根侵染率为 36% ~ 54%。接种 GE 和 GV 均显著增加了新排和风化煤矸石上玉米植株的干重, 接种 GV 显著增加了自燃煤矸石上玉米植株的干重; 接种 AM 真菌不同程度促进了玉米对 N、P 和 K 的吸收, 降低了 C:N:P 计量比, 符合生长速率假设; 接种对植株地上部和根部重金属 Cu、Fe、Mn、Zn 浓度的影响存在显著的差异。结果表明, GE 和 GV 在 3 种类型的煤矸石上表现出了不同的菌根效应, GV 更适于新排煤矸石和风化煤矸石的植被恢复, GE 更适于自燃煤矸石的植被恢复。试验初步证明 AM 真菌对于增强玉米适应不同类型煤矸石复合逆境, 以及在草原生态系统不同类型煤矸石废弃地上重建植被均具有一定潜在的作用, 应进一步验证野外自然条件下 AM 真菌对不同类型煤矸石山的实际作用效果。

**关键词:** 丛枝菌根真菌; 不同类型煤矸石; 玉米; 植被恢复; 草原生态系统

中图分类号: X171; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4447-08

## Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks

ZHAO Ren-xin<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, FU Rui-ying<sup>1</sup>, ZHAO Wen-jing<sup>1</sup>, GUO Jiang-yuan<sup>1</sup>, BI Na<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>

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

**Abstract:** A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Glomus etunicatum* (GE) and *Glomus versiforme* (GV) on the plant growth, nutrient uptake, C:N:P stoichiometric, uptake of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoil banks. The aim was to provide a technical basis for the revegetation of coal mine spoil banks in grassland ecosystem. The results indicated that the symbiotic associations were successfully established between two isolates and maize grown in the three substrates, with an average mycorrhizal colonization rate ranging from 36% to 54%. The colonization of two AM fungi significantly increased the dry weight of maize grown in recent discharged and weathered coal mine spoils and GE increased those grown in weathered coal mine spoil. Inoculation with AM fungi promoted the uptake of N, P and K by maize to varying degrees. In addition, inoculation with GE and GV also decreased C:N:P ratios, supporting the growth rate hypothesis, and had significantly differences on concentrations of Cu, Fe, Mn and Zn in shoots and roots of maize. The results indicated that GE and GV had different mycorrhizal effects on maize in the three types of substrates. GV was more suitable for the revegetation of recent discharged coal mine spoil and weathered coal mine spoil, while GE was more suitable for the revegetation of spontaneous combusted coal mine spoil. The experiment demonstrates that AM fungi have a potential role for maize to enhance the ability to adapt the composite adversity of different types of coal mine spoil and play a positive role in the revegetation of different coal mine spoil banks. Further field experiments should be conducted to evaluate the practical effects of AM fungi on the vegetation restoration of different types of coal mine spoil under field conditions.

**Key words:** arbuscular mycorrhizal fungi; different types of coal mine spoil; maize; vegetation restoration; grassland ecosystem

煤矸石是煤炭生产及加工过程中产生的固体废物, 在各种工业废渣中排放量最大、占地最多、污染环境较为严重<sup>[1]</sup>。我国 2011 年生产煤炭 34.7 亿 t, 煤矸石积存已达 70 亿 t, 而且以年排放量 1.5 亿 t 的速度增长。目前, 全国有规模较大的煤矸石山 1 600 多座<sup>[2]</sup>, 占用土地约 1.5 万 hm<sup>2</sup>。2011 年内蒙古煤炭产量达到 9.79 亿 t, 煤矸石排放量超过 15 000 万 t<sup>[3]</sup>。但由于受资源性质、经济条件、技术

设备等因素影响, 内蒙古地区煤矸石利用率较低, 剩余的

收稿日期: 2013-02-03; 修订日期: 2013-06-20

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面上项目(20100471489); 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B03)

作者简介: 赵仁鑫(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为矿区生态恢复、土壤污染控制与治理技术, E-mail: renxinzhao09@163.com

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

大量煤矸石长期裸露堆存侵占了大面积的草地资源<sup>[4]</sup>；破坏了草原自然景观和环境功能<sup>[5]</sup>；污染了土壤、水体及大气环境<sup>[6]</sup>；加速了生态环境脆弱敏感的草原生态系统的退化,已经成为草原煤矿区的一大公害,阻碍了当地社会经济及草原生态系统的可持续健康发展. 因此,对草原生态系统煤矸石废弃地进行治理是当前的迫切需求并具有重要的现实意义.

在综合治理中,植被重建是解决煤矸石生态破坏与环境污染最经济有效的途径,是目前国内外主要采取的措施<sup>[7, 8]</sup>. 煤矸石作为一种特殊的立地环境,通常具有物理结构不良、营养物质缺乏、微生物区系稀少且活性极低、重金属浓度高等不利特征,严重制约了煤矸石山植被恢复过程<sup>[9, 10]</sup>. 陆地上 80% 的植物物种可以和丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌形成互惠共生体<sup>[11]</sup>. AM 真菌可以改良土壤结构<sup>[12]</sup>, 提高土壤微生物的活性<sup>[13]</sup>, 通过多种途径影响植物的矿质营养吸收<sup>[14]</sup>, 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<sup>[15]</sup>. 这些特征使得 AM 真菌常被用于退化生态系统和污染环境的生态恢复中, 例如金属尾矿<sup>[16]</sup> 和煤矸石废弃地<sup>[17]</sup> 等. 目前, 菌根技术在煤矸石山生态恢复中的研究主要集中于通过表层覆土或混合河沙<sup>[18, 19]</sup>, 添加污泥或堆肥<sup>[8]</sup> 和接种其他微生物<sup>[20]</sup> 等对风化煤矸石基质进行改良, 提高植物成活率等方面. 在内蒙古草原地区, 气候干燥, 常年多风, 夏季白天温度高, 煤矸石山极易发生风化或者自燃现象, 风化时间不同或自燃都会导致煤矸石基质的理化性质产生较大的变化. 而在煤矸石山的植被恢复研究中, 并未考虑到风化程度和自燃与否对 AM 真菌在煤矸石山植被恢复中所发挥作用的影响, 相关的研究也鲜有报道.

本研究主要针对煤矸石山立地环境恶劣, 植被难以建植以及不同类型煤矸石基质的特征差异等特点, 利用 AM 真菌本身的生理生态特性, 采用温室盆栽试验的方法, 研究接种丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌 *Glomus etunicatum* 和 *Glomus versiforme* 对新排、风化和自燃这 3 种类型煤矸石上玉米 (*Zea mays* L.) 生长、矿质营养吸收、C:N:P 生态化学计量比、重金属吸收的影响. 评价接种不同 AM 真菌对不同类型煤矸石基质植被恢复的生态效应, 旨在为草原生态系统煤矸石废弃地的生态恢复提供理论依据和技术支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 培养基质

供试的 3 种类型煤矸石基质和表层覆盖土壤均取自内蒙古包头市石拐煤矿区. 石拐煤矿区具有 300 多年的开采历史, 有较大的煤矸石山 7 处, 存量约为 2100 万 t. 本试验依据排矸年限、自燃与否, 选取新排放的煤矸石 (S1: N 40°39'01.2", E 110°23'03.6", 排矸年限 1 a, 未发生自燃)、已风化煤矸石 (S2: N 40°39'15.9", E 110°18'00.1", 排矸年限 10 a, 未发生自燃) 与自燃过的煤矸石 (S3: N 40°41'39.8", E 110°17'19.6", 排矸年限 40 a, 已发生自燃) 作为研究对象. 表层覆土及煤矸石基本理化性质见表 1. 试验采用电位法测定 pH 值 (基质与水的质量比为 1:2.5), 采用重铬酸钾-油浴法测定有机质含量, 凯氏定氮法测定全氮, 氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定全磷, 火焰光度法测定全钾, 碱性扩散法测定速效氮, 碳酸氢钠法测定速效磷, 醋酸铵-火焰光度计法测定速效钾. 煤矸石和土壤过 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.

表 1 表层覆土及 3 种类型煤矸石基本理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Physical and chemical properties of three types of coal mine spoil and topsoil

基质	表层覆土	新排煤矸石 (S1)	风化煤矸石 (S2)	自燃煤矸石 (S3)
pH	6.97	5.99	7.21	7.15
有机质/%	0.42	19.72	3.95	0.99
全 N/%	0.031	0.40	0.14	0.042
全 P/%	0.045	0.028	0.053	0.075
全 K/%	0.36	1.47	0.89	1.22
速效 N/mg·kg <sup>-1</sup>	53.3	25.7	13.5	47.8
速效 P/mg·kg <sup>-1</sup>	13.74	12.56	6.02	8.09
速效 K/mg·kg <sup>-1</sup>	71.53	185.6	128.4	146.2

1) 表中数据为 3 个样本的算术平均值

### 1.2 供试植物和菌种

供试宿主植物为禾本科玉米 (*Zea mays* L., 高

优 1 号), 玉米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, 然后在播

有湿润滤纸的培养箱中进行催芽处理, 种子露白后即可播种. 试验用 AM 真菌为幼套球囊霉 (*Glomus etunicatum*, 简写 GE, BGC HEB07A, 1511C0001BGCAM0048, 572 个孢子/10 g) 和地表球囊霉 (*Glomus versiforme*, GV, BGC NM04B, 1511C0001BGCAM0008, 438 个孢子/10 g), 菌种由北京市农林科学院营养与资源所微生物室提供, 接种菌剂为以玉米和白三叶草 (*Trifolium repens* L.) 为宿主扩大繁殖获得内含真菌孢子、菌丝以及被侵染宿主植物根段等繁殖体的根际砂土混合物.

### 1.3 试验设计

试验采用生物学盆栽法在温室内进行, 设置不接种对照 (CK)、接种 GE 和接种 GV 共 3 种处理, 每个处理设 6 个重复, 3 种煤矸石基质共计 54 盆. 以圆形塑料花盆 (上口口径 18 cm × 下口径 12 cm × 高度 13 cm) 作为培养容器, 内衬自封塑料袋. 每盆装厚度约为 7 cm 的灭菌煤矸石基质, 新排煤矸石、风化煤矸石及自燃煤矸石的质量分别为 1 250、1 400 和 1 000 g, 其上覆盖灭菌土壤 600 g, 厚度约为 3 cm, 采用层接方法将 50 g 菌剂均匀撒施在土壤表面, 再在其上覆土 400 g, 厚度约为 2 cm. 不接种处理采用相同方法加入等量的灭菌菌剂. 为保证植物能获得充足的养分, 在种植前以溶液形式向煤矸石和土壤中加入基础肥料<sup>[21]</sup>: N 为 60 mg·kg<sup>-1</sup>, P 为 30 mg·kg<sup>-1</sup>, K 为 71.5 mg·kg<sup>-1</sup>, Mg 为 4.5 mg·kg<sup>-1</sup>, Ca 为 20.4 mg·kg<sup>-1</sup>, Zn 为 1.23 mg·kg<sup>-1</sup>, Mn 为 3.42 mg·kg<sup>-1</sup>, Cu 为 0.54 mg·kg<sup>-1</sup>, Mo 为 0.009 35 mg·kg<sup>-1</sup>.

选择颗粒饱满的玉米种子, 每盆播种 6 粒, 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, 维持煤矸石及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 60 d 后收获.

### 1.4 样品制备及分析测定

收获时, 将玉米地上部自茎基部剪下, 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 1.0 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, 利用根段频率法计算菌根侵染率<sup>[22]</sup>.

植物样品烘干称重后粉碎处理, 每个样品称取 2 ~ 3 mg 利用元素分析仪 (Vario EL III, CHNOS

Elemental Analyzer, Elementar Co Germany) 测定 C 和 N 元素含量. 称取 0.5 g 左右的植物样品加入 5 mL 优级纯 HNO<sub>3</sub> 于 120℃ 条件下开放式消解, 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) 测定消解液中 P、K、Fe、Zn、Cu 和 Mn 的浓度.

### 1.5 数据分析

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, 差异显著性水平为  $P < 0.05$ , 并采用双因子方差分析煤矸石类型和接种 AM 真菌的作用及二者之间的交互作用.

## 2 结果与分析

### 2.1 接种 AM 真菌对菌根侵染率和生物量的影响

试验结果表明 (表 2), 3 种煤矸石基质上未接种处理根系中均没有发现菌根的侵染. 对于接种处理, 接种 GE 和接种 GV 后均检测到较高的菌根侵染率, 在基质 S1 和 S3 上 2 种接种处理对玉米的菌根侵染差异不显著, 而在基质 S2 上 GE 对玉米的侵染显著高于 GV ( $P < 0.05$ ). 双因子分析结果表明煤矸石基质对菌根侵染率无显著影响, 而接种处理对菌根侵染率有极显著影响 ( $P < 0.001$ ).

在基质 S1 上, 与对照处理相比, 2 种接种处理均显著增加了玉米地上部和植株总干重 (表 2,  $P < 0.05$ ), 接种 GE 显著增加了玉米根部干重 (表 2,  $P < 0.05$ ), 而 2 种接种处理间玉米地上部、根部和总干重差异不显著. 对于基质 S2, 2 种接种处理均显著增加了玉米地上部和植株总干重 (表 2,  $P < 0.05$ ), 但对根部干重均无显著影响, 2 种接种处理间玉米地上部、根部和总干重差异不显著. 对于基质 S3, 与对照处理和接种 GV 处理相比, 接种 GE 显著增加了玉米地上部、根部和植株总干重 (表 2,  $P < 0.05$ ), 与对照处理相比, 接种 GV 对玉米地上部、根部和总干重影响不显著. 同一接种处理下, 基质 S3 上玉米生物量均最低 (表 2). 在 3 种煤矸石基质上尽管部分接种处理未显著增加玉米植株干重, 但均表现出了增加的趋势. 双因子分析结果表明 (表 2), 煤矸石基质和接种处理对玉米地上部干重和总干重均有极显著影响 ( $P < 0.001$ ), 对根部干重有非常显著影响 ( $P < 0.01$ ), 而在二者交互作用下未达到显著水平.

表 2 接种 AM 真菌对 3 种煤矸石基质上玉米菌根侵染率和生物量的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of inoculation with AM fungi on mycorrhizal colonization and biomass of maize

基质	接种处理	菌根侵染率/%	地上部干重/g·pot <sup>-1</sup>	根部干重/g·pot <sup>-1</sup>	总干重/g·pot <sup>-1</sup>
新排煤矸石 (S1)	CK	0.00 ± 0.00 b	4.51 ± 0.29 b	1.29 ± 0.23 b	5.80 ± 0.14 b
	GE	37.06 ± 9.67 a	7.61 ± 1.46 a	2.21 ± 0.39 a	9.82 ± 1.84 a
	GV	53.85 ± 5.57 a	7.34 ± 0.30 a	1.83 ± 0.18 ab	9.17 ± 0.45 a
风化煤矸石 (S2)	CK	0.00 ± 0.00 c	5.19 ± 0.33 b	1.15 ± 0.19 a	6.34 ± 0.52 b
	GE	49.23 ± 1.97 a	7.48 ± 0.25 a	1.32 ± 0.13 a	8.80 ± 0.33 a
	GV	38.17 ± 2.61 b	7.89 ± 0.37 a	1.59 ± 0.11 a	9.48 ± 0.33 a
自燃煤矸石 (S3)	CK	0.00 ± 0.00 b	3.05 ± 0.33 b	0.86 ± 0.22 b	3.91 ± 0.54 b
	GE	44.71 ± 6.03 a	6.02 ± 0.49 a	1.64 ± 0.18 a	7.66 ± 0.59 a
	GV	36.65 ± 6.60 a	4.13 ± 0.24 b	1.13 ± 0.06 ab	5.26 ± 0.28 b
基质 (S)		NS	** *	**	** *
显著性 接种 (I)		** *	** *	**	** *
S × I		NS	NS	NS	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在  $P < 0.05$  显著水平差异显著; \* 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

## 2.2 接种 AM 真菌对植株 N、P 和 K 吸收量的影响

接种 AM 真菌对 3 种煤矸石基质上玉米植株中 N、P 和 K 的吸收量影响如表 3 所示. 对于基质 S1, 与对照处理相比, 接种 GE 和 GV 显著增加了玉米地上部 P、K 及根部 P 的吸收量 ( $P < 0.05$ ); 接种 GV 也显著增加了玉米地上部 N 的吸收量 ( $P < 0.05$ ), 但接种 GE 没有造成显著影响; 2 种接种处理没有显著影响玉米根部 N 和 K 的吸收量. 对于基质 S2, 接种 2 种 AM 真菌均显著增加了玉米地上部 N、P 和 K 的吸收量及根部 P 和 K 的吸收量 ( $P < 0.05$ ), 而对根部 N 的吸收量没有显著影响. 对于生长在基质 S3 上的玉米, 2 种 AM 真菌接

种处理均显著增加了其地上部 N 和 P 的吸收量 ( $P < 0.05$ ); 接种 GE 使得玉米地上部及根部 P 和 K 的吸收量均显著高于对照处理及接种 GV 处理 ( $P < 0.05$ ); 对于玉米植株内 N 吸收量的影响, 2 种接种处理间差异不显著. 同一接种处理下, 基质 S3 上玉米地上部和根部 P 及根部 N 和 K 的吸收量均较基质 S1 和 S2 低 (表 3). 双因子分析结果表明 (表 3), 基质类型和接种处理极显著影响了玉米地上部 N、P 和 K 及根部 P 的吸收量 ( $P < 0.001$ ), 接种处理也显著影响了根部 N 的吸收量 ( $P < 0.05$ ), 二者交互作用下只有地上部 N 和 P 的吸收量达到了显著水平 ( $P < 0.05$ ).

表 3 接种 AM 真菌对 3 种煤矸石基质上玉米地上部和根部 N、P 和 K 吸收量的影响/mg·pot<sup>-1</sup>Table 3 Effects of inoculation with AM fungi on shoot and root N, P and K contents of maize/mg·pot<sup>-1</sup>

基质	接种处理	地上部			根部		
		N	P	K	N	P	K
新排煤矸石 (S1)	CK	79.34 ± 8.49 b	4.23 ± 0.21 c	161.1 ± 13.0 b	13.86 ± 1.19 a	0.81 ± 0.16 b	20.77 ± 1.34 a
	GE	94.39 ± 11.88 ab	7.72 ± 1.28 b	244.1 ± 34.1 a	18.74 ± 1.87 a	1.40 ± 0.23 a	30.46 ± 5.16 a
	GV	116.1 ± 1.4 a	10.38 ± 0.50 a	244.7 ± 17.6 a	18.57 ± 2.01 a	1.54 ± 0.14 a	30.67 ± 2.69 a
风化煤矸石 (S2)	CK	110.1 ± 3.7 b	6.63 ± 1.29 b	202.0 ± 12.8 b	16.62 ± 2.49 a	0.77 ± 0.11 b	15.29 ± 3.50 b
	GE	140.8 ± 1.9 a	13.03 ± 0.27 a	300.4 ± 20.3 a	15.44 ± 1.70 a	1.32 ± 0.13 a	29.13 ± 3.99 a
	GV	129.9 ± 6.9 a	13.38 ± 0.42 a	287.3 ± 8.6 a	17.87 ± 0.50 a	1.65 ± 0.12 a	37.53 ± 3.00 a
自燃煤矸石 (S3)	CK	67.91 ± 4.12 b	1.96 ± 0.17 c	116.5 ± 12.9 b	12.47 ± 3.08 b	0.45 ± 0.13 b	9.49 ± 3.68 b
	GE	122.6 ± 8.4 a	6.44 ± 0.71 a	272.5 ± 24.1 a	22.46 ± 2.99 a	1.12 ± 0.10 a	26.26 ± 3.20 a
	GV	101.9 ± 6.3 a	4.70 ± 0.31 b	165.3 ± 11.7 b	18.31 ± 1.68 ab	0.76 ± 0.10 b	15.40 ± 2.87 b
基质 (S)		** *	** *	** *	NS	** *	**
显著性 接种 (I)		** *	** *	** *	*	** *	** *
S × I		*	*	NS	NS	NS	NS

## 2.3 接种 AM 真菌对植株 C:N:P 生态化学计量比的影响

对于 3 种煤矸石基质, 与对照处理相比, 除接种

GE 对生长在基质 S1 上玉米地上部 C:P 比没有显著影响外, 接种 GE 和 GV 均显著降低了地上部和根部 C:P 比和 N:P 比 (表 4,  $P < 0.05$ ). 另外, 2 种 AM

真菌接种处理均未显著影响基质 S1 和 S3 上玉米地上部和根部 C: N 比, 显著增加了基质 S2 上玉米地上部和根部 C: N 比(表 4,  $P < 0.05$ )。结果表明, 基质 S3 上玉米植株 C: N 比整体低于基质 S1 和 S2, 植株 C: P 比和 N: P 比则高于其他两种基质。双因子分析结果表明(表 4), 基质类型和接种处理均极显

著影响了地上部和根部 C: P 比和 N: P 比( $P < 0.001$ ), 地上部和根部 C: N 比在不同基质之间分别为非常显著水平( $P < 0.01$ )和极显著水平( $P < 0.001$ ), 基质类型和接种处理二者交互作用显著影响了地上部 C: P 比( $P < 0.01$ )和根部 N: P 比( $P < 0.05$ ), 但对其他指标无显著影响。

表 4 接种 AM 真菌对 3 种煤矸石基质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

基质	接种处理	地上部			根部		
		C: N	C: P	N: P	C: N	C: P	N: P
新排煤矸石(S1)	CK	25.14 ± 5.25 a	441.8 ± 30.2 a	19.10 ± 2.73 a	39.40 ± 3.71 a	672.6 ± 11.8 a	17.97 ± 1.58 a
	GE	36.26 ± 8.32 a	417.2 ± 48.2 a	12.79 ± 1.93 b	50.91 ± 8.72 a	542.9 ± 36.0 b	13.74 ± 0.87 b
	GV	26.50 ± 0.95 a	296.8 ± 5.9 b	11.25 ± 0.54 b	41.74 ± 1.55 a	506.0 ± 39.7 b	12.09 ± 0.68 b
风化煤矸石(S2)	CK	18.81 ± 1.11 c	388.9 ± 32.0 a	19.17 ± 4.61 a	28.81 ± 1.28 b	624.9 ± 44.8 a	21.85 ± 2.00 a
	GE	22.39 ± 1.05 b	241.5 ± 6.2 b	10.83 ± 0.36 b	35.82 ± 2.48 a	415.2 ± 3.2 b	11.75 ± 0.76 b
	GV	25.73 ± 0.96 a	248.9 ± 7.5 b	9.73 ± 0.58 b	36.16 ± 1.72 a	393.1 ± 3.4 b	10.94 ± 0.46 b
自燃煤矸石(S3)	CK	17.82 ± 0.98 a	620.9 ± 34.8 a	34.95 ± 1.63 a	28.39 ± 0.50 a	821.1 ± 37.9 a	28.90 ± 1.06 a
	GE	20.61 ± 2.47 a	389.5 ± 18.1 b	19.76 ± 2.45 b	29.88 ± 2.71 a	586.0 ± 12.1 b	20.08 ± 1.74 b
	GV	16.22 ± 0.21 a	352.4 ± 10.8 b	21.72 ± 0.41 b	25.67 ± 1.49 a	633.7 ± 61.3 b	24.56 ± 1.18 b
基质(S)		**	***	***	***	***	***
显著性 接种(I)		NS	***	***	NS	***	***
S × I		NS	**	NS	NS	NS	*

## 2.4 接种 AM 真菌对植株中重金属含量的影响

对于基质 S1, 与对照处理相比, 接种 GE 未对玉米植株 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量的变化造成显著影响(表 5); 接种 GV 显著增加了玉米根部 Mn 的含量而降低了根部 Zn 的含量(表 5,  $P < 0.05$ )。对于基质 S2, 与对照处理相比, 接种 GE 显著降低了地上部 Cu、根部 Mn 和 Zn 的含量, 显著增加了地上部 Zn 和根部 Cu 的含量(表 5,  $P < 0.05$ ); 接种 GV 显著降低了地上部 Cu 和 Mn 的含量(表 5,  $P < 0.05$ ), 而对其他重金属没有显著影响。对于基质 S3, 与对照处理相比, 接种 GE 只对玉米体内 Cu 的含量有显著影响(表 5), 显著降低了地上部 Cu 的

含量而增加了根部 Cu 的含量( $P < 0.05$ ); 接种 GV 显著增加了地上部 Zn 的含量( $P < 0.05$ ), 对其他重金属没有显著影响。双因子分析结果表明(表 5), 在不同基质之间, 玉米地上部 Cu、Mn 含量及根部 Mn、Zn 含量差异极显著( $P < 0.001$ ), 地上部 Fe 和根部 Cu 含量差异显著( $P < 0.05$ ), 地上部 Zn 和根部 Fe 含量差异不显著; 在接种处理之间, 地上部 Cu 含量差异非常显著( $P < 0.01$ ), 根部 Cu 和 Mn 含量差异极显著( $P < 0.001$ ); 二者交互作用对地上部 Mn 和根部 Zn 含量有显著影响( $P < 0.05$ ), 对根部 Mn 有极显著影响( $P < 0.001$ ), 对其他重金属无显著影响。

表 5 接种 AM 真菌对 3 种煤矸石基质上玉米地上部和根部重金属 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量的影响/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Effects of inoculation with AM fungi on concentrations of Cu, Fe, Mn, Zn in shoots and roots of maize/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

基质	接种处理	地上部				根部			
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cu	Fe	Mn	Zn
新排煤矸石(S1)	CK	12.34 ± 0.99a	82.50 ± 6.77a	180.3 ± 21.1a	41.56 ± 10.35a	25.78 ± 0.51a	963.1 ± 91.7a	191.7 ± 3.2b	29.80 ± 2.39a
	GE	10.09 ± 1.52a	98.63 ± 7.15a	175.5 ± 10.6a	41.37 ± 12.07a	35.33 ± 4.92a	913.8 ± 141.7a	130.2 ± 20.1b	22.98 ± 6.37ab
	GV	9.85 ± 0.21a	101.8 ± 3.7a	206.9 ± 15.0a	48.42 ± 5.25a	33.25 ± 2.19a	861.8 ± 114.5a	312.4 ± 33.1a	13.06 ± 0.99b
风化煤矸石(S2)	CK	10.59 ± 0.46a	115.8 ± 2.3a	120.4 ± 7.2a	39.70 ± 1.07b	30.13 ± 2.93b	1211.5 ± 433.3a	77.34 ± 9.63a	14.76 ± 3.24a
	GE	9.20 ± 0.41b	137.7 ± 23.7a	116.9 ± 5.7a	48.74 ± 3.82a	43.77 ± 1.58a	594.8 ± 138.6a	34.99 ± 7.23b	3.54 ± 1.29b
	GV	8.80 ± 0.43b	104.7 ± 10.2a	88.79 ± 5.33b	33.86 ± 2.83b	31.26 ± 1.54b	796.5 ± 129.3a	67.06 ± 4.60a	9.05 ± 1.84ab
自燃煤矸石(S3)	CK	18.83 ± 0.58a	118.9 ± 9.0a	122.6 ± 5.1a	30.33 ± 2.37b	23.94 ± 1.59b	809.8 ± 139.2a	57.10 ± 5.72a	10.04 ± 2.36a
	GE	17.25 ± 0.22b	116.4 ± 7.5a	116.1 ± 3.8a	34.62 ± 0.48ab	36.58 ± 3.49a	1173.7 ± 239.0a	61.32 ± 11.46a	17.46 ± 1.53a
	GV	18.26 ± 0.31ab	120.2 ± 12.0a	118.2 ± 1.6a	36.79 ± 1.19a	25.85 ± 1.63b	685.8 ± 128.1a	74.98 ± 6.63a	14.20 ± 2.90a
基质(S)		***	*	***	NS	*	NS	***	***
显著性 接种(I)		**	NS	NS	NS	***	NS	***	NS
S × I		NS	NS	*	NS	NS	NS	***	**

### 3 讨论

菌根侵染率是评价 AM 真菌与植物建立共生关系与否的重要指标,是讨论菌根对植物抗逆性影响的前提<sup>[23]</sup>. 一般认为菌根侵染率越高,植物菌根化程度越高,对促进植物生长、增强植物抗逆能力的可能性也就越大<sup>[24]</sup>. 本试验中,煤矸石因排放年限不同其风化程度存在显著的差异,新排煤矸石 pH 较低,自燃又使得其有机质的含量显著降低,理化性质差异较大(表 1). 因此,3 种类型煤矸石基质立地条件明显不同,但接种 GE 和 GV 后玉米均具有较高的菌根侵染率,不同类型煤矸石基质之间菌根侵染率的差异也不显著(表 2),表明玉米与 GE 和 GV 均建立了良好的共生关系,2 种菌种对 3 种煤矸石均具有较好的生态适应性. Püschel 等<sup>[8]</sup>的研究也表明在改良与未改良的煤矸石基质之间,宿主植物的菌根侵染率差异不显著. 但也有研究表明菌根与基质间有一定的选择性,基质不同,AM 真菌的侵染率有差异,这种差异可能是由于菌种对不同基质的生态适应性不同而产生的<sup>[25]</sup>.

煤矸石基质上 AM 真菌与植物共生关系的建立显著增加了玉米植株的干重(表 2),表现出明显的菌根生态效应,这与其他学者的研究结果相似<sup>[17, 26]</sup>. 在新排和自燃煤矸石上,菌根侵染率低时 AM 真菌对植物生长的促进效果更好(表 2). Enkhtuya 等<sup>[27]</sup>的研究结果表明接种 AM 真菌后菌根侵染率低能显著促进植物生长,菌根侵染率高反而促进效果不明显,这表明菌根对宿主植物的作用并不能完全由侵染率表现,可能与菌根共生关系中的成本效益不平衡有关<sup>[28]</sup>. 相反,在自燃煤矸石上 GE 对玉米的菌根侵染率较 GV 高,对植物的生长促进作用更明显(表 2),这可能是因为自燃煤矸石中营养元素极度贫瘠,所以需要 AM 真菌对植物有更高的侵染才能更有效吸收营养物质,以明显促进植物的生长,达到成本效益的平衡. 另外,接种 GE 和 GV 对 3 种基质上玉米的生长也具有不同的促进作用,这是由于基质本身理化性质的差异所导致. 由此看来,植物在煤矸石上的生长效应是由菌种、基质类型和基质条件等共同决定的.

在 3 种煤矸石上,接种 GE 和 GV 不同程度地促进了玉米对营养元素的吸收,尤其是对 P 的吸收(表 3),改善了植物的矿质营养状况,增强了玉米对煤矸石基质不利环境条件的适应能力,有利于煤矸石山的植被恢复. 相对于未接种基质,接种 AM 真

菌对 3 种煤矸石基质上玉米吸收营养元素的促进程度明显不同,对自燃煤矸石上玉米吸收营养元素的促进程度最高,对新排煤矸石上促进程度最低(表 3). 在本试验中,新排煤矸石营养物质含量最高,自燃煤矸石中最低,这说明 AM 真菌对植物吸收营养物质的影响与生长基质中营养物质含量高低可能有一定的相关性. 研究表明基质中营养元素尤其是 P 浓度高时可以降低宿主植物对 AM 真菌的依赖性,缩短菌丝的伸长长度和减少孢子的数量,也有可能改变真菌的群落结构,影响对营养元素的吸收<sup>[11, 29]</sup>. Prasad 等<sup>[30]</sup>研究表明在不同磷水平土壤中(20、40 和 80 kg·hm<sup>-2</sup>),接种 *G. mosseae* 对野菊花(*Chrysanthemum indicum* L.) 中 P 含量的影响程度不同,以低磷水平下的影响最显著,认为接种对植物的菌根效应在不同磷水平下不同. 然而,N、P、K 是植物生长的必需营养元素,尤其是在营养缺乏的条件下,AM 真菌可通过根外菌丝增加根系的吸收面积,活化基质中难溶性营养物质,也可以通过菌丝体释放出的一些特殊有机物改变植物根际效应,最终以直接吸收同化或者间接运输的作用达到吸收营养元素的目的<sup>[31, 32]</sup>. 本试验中接种 2 种菌种对玉米营养吸收的促进效果也表现出了一定的差异(表 3),一些研究也表明在进行煤矸石废弃地恢复时不同 AM 真菌在改善植物的营养状况方面表现出了明显不同的菌根效应<sup>[33]</sup>. 这些研究结果表明植物对营养元素的吸收可能与煤矸石基质类型、基质中营养物质含量及菌种等多种因素有关,因此应充分考虑基质及菌种之间的差异,合理筛选适合不同煤矸石类型的菌种进行植被恢复.

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<sup>[34]</sup>. 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,生物体需要向富含 P 的核糖体和 rRNA 投资更多的 P 元素以促进蛋白质的合成,这样植物体内 N 和 P 浓度逐渐增加,而 P 增加的更快,C:P 与 N:P 比会随之降低<sup>[35]</sup>. 本研究结果表明接种 AM 真菌显著改变了植物的 C:N:P 生态化学计量比,除新排煤矸石上接种 GE 对玉米地上部 C:P 比没有显著影响外,其他基质和接种处理均表现出了 C:P 与 N:P 的显著降低(表 4),试验结果符合生长速率假设,在相同的生长周期内,菌根植物比非菌根植物具有更大的生物量. Chen 等<sup>[36]</sup>研究了不同 N、P 水平下接种 *G. mosseae* 对三叶草 C:N:P 比的影响,也得到了相

应的变化趋势. 在自燃煤矸石上, 同一接种处理下植物 C: P 与 N: P 比高于其他两种煤矸石(表 4), 说明尽管接种处理也有效地促进了自燃煤矸石基质中玉米对 P 的吸收, 但促进程度明显低于其他两种煤矸石基质, 而使得在相同的生长周期内植物在自燃煤矸石上的生长速率最慢. 另外, 试验中 GE 和 GV 对植物 C: N: P 比所表现出的不同的调节作用也与基质类型有很大关系, 菌种本身的生理生态特征也可能起到了一定的作用. 本研究结果表明接种 AM 真菌能够调节煤矸石基质中玉米植株 C: N: P 比, 对玉米生长具有明显的促进作用; 但针对自燃煤矸石中营养元素极度贫瘠的现象, 可通过添加有机质或有机肥等, 再结合 AM 真菌的积极作用, 改善其营养状况, 有效调节植物 C: N: P 比, 达到加速煤矸石山植被恢复过程的目的.

重金属 Cu、Fe、Mn 和 Zn 是植物生长必需的微量元素, 对植物的作用表现出一定的浓度效应, 它们在土壤中浓度低时, 会作为植物生长的有益元素, 接种 AM 真菌可以显著增加植物地上部浓度; 浓度过高时, 它们会表现出毒害作用, 接种 AM 真菌可以降低植物地上部浓度以缓解毒害效应<sup>[37]</sup>. 本研究结果表明, 接种 AM 真菌对 3 种基质上玉米体内重金属浓度变化的影响程度表现为: 风化煤矸石 > 自燃煤矸石 > 新排煤矸石; 不同接种处理之间元素浓度也表现出不同的变化趋势, 接种 GE 对风化煤矸石上玉米体内重金属元素浓度变化影响最为显著; 同一种接种处理对同一煤矸石基质中玉米体内不同重金属元素浓度的影响也不同, 如接种 GE 处理显著降低了自然煤矸石玉米地上部 Cu 的浓度, 同时显著增加了地下部 Cu 的浓度, 而对于其他重金属浓度均没有显著影响(表 5). 这说明 AM 真菌对玉米体内重金属浓度的影响可能与煤矸石基质类型、AM 真菌菌种、元素种类及煤矸石中元素浓度等因素有关. Jankong 等<sup>[38]</sup>对 As 污染土壤的研究也表明植物体内重金属元素浓度的变化与多种因素有关. 因此, 应该针对不同的煤矸石基质类型, 筛选能够明显减轻重金属毒害作用的 AM 真菌菌种, 使得接种 AM 真菌更能有效地增强植物对不同煤矸石基质复合逆境的适应能力, 促进植物的定植, 以更有利于煤矸石山的植被恢复.

AM 真菌对煤矸石山植被恢复的影响由多种因素共同决定, 应充分考虑单个因素以及多个因素之间的相互作用, 以充分发挥 AM 真菌在煤矸石山植被恢复中的作用. 本试验结果证明 AM 真菌对于草

原生态系统不同类型煤矸石山的植被重建均具有潜在的应用价值, 但是应结合相应的工程措施进一步通过野外实地试验探讨菌根技术在不同类型煤矸石山植被恢复中的实际作用效果.

#### 4 结论

(1) 在 3 种煤矸石基质上, 2 种 AM 真菌均与玉米建立了良好的共生关系; 接种 GE 对新排煤矸石和自燃煤矸石上玉米生长的促进作用优于接种 GV, 风化煤矸石上 GV 对玉米生长的促进作用更明显.

(2) 接种 GV 对新排煤矸石和风化煤矸石上玉米植株矿质营养吸收的促进作用及 C: N: P 比的调节作用更明显, 接种 GE 对自燃煤矸石营养特征的改善效果更好.

(3) 接种 AM 真菌对 3 种煤矸石上玉米体内重金属 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量变化具有不同的影响, AM 真菌对植物吸收重金属的影响与多种因素有关.

(4) 综合分析 2 种 AM 真菌对植物生长状况、营养特征和重金属吸收的影响, 表明 GV 更适于新排煤矸石和风化煤矸石的植被恢复, 而 GE 更适于自燃煤矸石的植被恢复.

#### 参考文献:

- [1] 徐晓军, 张良林, 白荣林, 等. 矿业环境工程与土地复垦 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 96-97.
- [2] 连增增, 谭志祥, 李培现, 等. 老矿区煤矸石山的综合治理与利用研究[J]. 煤炭工程, 2010, (8): 86-88.
- [3] 内蒙古煤炭网 [EB/OL]. <http://www.nmgmt.gov.cn/hydt1.aspx?id=16924&classid=86>, 2012-11-23.
- [4] 郭伟, 赵仁鑫, 孙文惠, 等. 草原煤矸石堆放的生态环境问题及其治理措施综述[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 71-76.
- [5] Bian Z F, Dong J H, Lei S G, et al. The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland [J]. Environmental Geology, 2009, 58(3): 625-634.
- [6] Silva L F O, Wollenschlager M, Oliveira M L S. A preliminary study of coal mining drainage and environmental health in the Santa Catarina region, Brazil [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(1): 55-65.
- [7] 张成梁. 山西阳泉自然煤矸石山生境及植被构建技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [8] Püschel D, Rydlová J, Sudová R, et al. The potential of mycorrhizal inoculation and organic amendment to increase yields of *Galega orientalis* and *Helianthus tuberosus* in a spoil-bank substrate [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(4): 664-672.
- [9] Gryndler M, Sudová R, Püschel D, et al. Cultivation of high-

- biomass crops on coal mine spoil banks: Can microbial inoculation compensate for high doses of organic matter? [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6391-6399.
- [10] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review[J]. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, **3**(2): 1-20.
- [11] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal symbiosis*[M]. (3rd ed.). London, UK: Academic Press, 2008.
- [12] Hallett P D, Feeney D S, Bengough G A, *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.
- [13] Toljander J F, Lindahl B D, Paul L R, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizal mycelial exudates on soil bacterial growth and community structure [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **61**(2): 295-304.
- [14] Miransari M. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress [J]. *Plant Biology*, 2010, **12**(4): 563-569.
- [15] Daisog H, Sbrana C, Cristani C, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi shift competitive relationships among crop and weed species [J]. *Plant and Soil*, 2012, **353**(1-2): 395-408.
- [16] Solís-Domínguez F A, Valentín-Vargas A, Chorover J, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant biomass and the rhizosphere microbial community structure of mesquite grown in acidic lead/zinc mine tailings [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(6): 1009-1016.
- [17] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. *生态学报*, 2007, **27**(9): 3738-3743.
- [18] 毕银丽, 胡振琪, 司继涛, 等. 接种菌根对充填复垦土壤营养吸收的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, **31**(3): 252-257.
- [19] 毕银丽, 吴福勇, 全文智. 菌根与豆科植物组合在煤矿区废弃物的生态效应[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, **35**(3): 329-335.
- [20] Wu F Y, Bi Y L, Wong M H. Dual inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and rhizobium to facilitate the growth of alfalfa on coal mine substrates[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, **32**(5): 755-771.
- [21] 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.
- [22] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization [J]. *New Phytologist*, 1981, **87**(1): 63-67.
- [23] 李建华, 郜春花, 卢朝东, 等. 丛枝菌根和根瘤菌双接种对矿区土地复垦的生态效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (5): 77-80.
- [24] 毕银丽. 丛枝菌根培养新技术及其对土地复垦生态效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [25] 毕银丽, 吴福勇, 柳博会. AM 真菌在煤矿废弃物中生态适应性的初步研究[J]. *菌物学报*, 2005, **24**(4): 570-575.
- [26] Rydlová J, Püschel D, Sudová R, *et al.* Interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia: Effects on flax yield in spoil-bank clay[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, **174**(1): 128-134.
- [27] Enkh TUYA B, Pöschl M, Vosátka M. Native grass facilitates mycorrhizal colonisation and P uptake of tree seedlings in two anthropogenic substrates [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, **166**(1-4): 217-236.
- [28] Koide R, Elliott G. Cost, benefit and efficiency of the vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. *Functional Ecology*, 1989, **3**(2): 252-255.
- [29] Ahmed F R S, Alexander I J, Mwinyihija M, *et al.* Effect of superphosphate and arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on phosphorus and arsenic uptake in lentil (*Lens culinaris* L.) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2011, **221**(1-4): 169-182.
- [30] Prasad K, Aggarwal A, Yadav K, *et al.* Impact of different levels of superphosphate using arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* on *Chrysanthemum indicum* L. [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, **12**(3): 451-462.
- [31] Bolan N S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants [J]. *Plant and Soil*, 1991, **134**(2): 189-207.
- [32] Evelin H, Giri B, Kapoor R. Contribution of *Glomus intraradices* inoculation to nutrient acquisition and mitigation of ionic imbalance in NaCl-stressed *Trigonella foenumgraecum* [J]. *Mycorrhiza*, 2012, **22**(3): 203-217.
- [33] Janoušková M, Seddas P, Mrnka L, *et al.* Development and activity of *Glomus intraradices* as affected by co-existence with *Glomus claroideum* in one root system [J]. *Mycorrhiza*, 2009, **19**(6): 393-402.
- [34] 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.
- [35] Matzek V, Vitousek P M. N:P stoichiometry and protein: RNA ratios in vascular plants: an evaluation of the growth-rate hypothesis [J]. *Ecology Letters*, 2009, **12**(8): 765-771.
- [36] Chen M M, Yin H B, O'Connor P J, *et al.* C:N:P stoichiometry and specific growth rate of clover colonized by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Plant and Soil*, 2010, **326**(1-2): 21-29.
- [37] Prasad A, Kumar S, Khaliq A, *et al.* Heavy metals and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can alter the yield and chemical composition of volatile oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(8): 853-861.
- [38] Jankong P, Visoottiviset P. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on plants growing on arsenic contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(7): 1092-1097.

## CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing .....	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn .....	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China .....	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR .....	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH <sub>4</sub> in the Suburb of Changsha City, China .....	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution .....	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost .....	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem .....	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin .....	..... LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province .....	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model .....	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method .....	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area .....	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu .....	..... MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland .....	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i> .....	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River .....	..... LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River .....	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination .....	..... TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Floes Formed .....	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes .....	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron .....	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Stabilized Nanoscale Pd/Fe .....	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes .....	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent .....	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater .....	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems .....	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse .....	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions .....	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction .....	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH .....	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation .....	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i> .....	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow .....	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years .....	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors .....	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary .....	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island .....	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China .....	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites .....	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil .....	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks .....	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas .....	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L. ....	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 .....	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China .....	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides .....	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction .....	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants .....	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行