

丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用

毕银丽, 吴福勇, 武玉坤

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 100083)

摘要:煤炭开采在促进国民经济快速发展的同时, 引发诸多生态环境问题, 分别就矿区生态治理中存在的主要障碍因子进行论述, 结合丛枝菌根对宿主植物的营养吸收和抗逆性能, 综述了丛枝菌根在矿区生态重建中应用的研究进展, 揭示出菌根应用在矿区生态重建中的作用潜力和研究方向, 极大地提高了矿区生态恢复的质量。

关键词:丛枝菌根; 煤矿区; 生态重建

文章编号: 1000-0933(2005)08-2068-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Application of arbuscular mycorrhizas in ecological restoration of areas affected by coal mining in China

BI Yin-Li, WU Fu-Yong, WU Yu-Kun (School of Safety and Resource Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2068~2073.

Abstract: Coal mining has aided economic development but has also caused serious environmental problems. This paper reviews the major soil barriers to successful ecological restoration such as low soil fertility, low or high pH, low water holding capacity, high erodibility and extremely high temperature and poor soil microbial activity. Mining activities have severe deleterious effects on plants and the soil microbial community that must be ameliorated with additional amendments in order to achieve successful re-vegetation. Arbuscular mycorrhizas are the most common underground symbiosis. They are formed in the roots of wide variety of host plants. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can enhance plant nutrition, growth and disease resistance. AM fungal hyphae have an important role in mineral absorption because of their fine diameter ($2\sim7\mu\text{m}$) and their substantial hyphal length. They can therefore absorb much more mineral nutrients than roots alone. Hyphae can exude certain organic compounds which can aggregate soil particles and maintain the structure of macroaggregates. Hyphae can also acquire immobile nutrients, especially phosphorus and certain trace elements, and thereby help plants to tolerate environmental stresses such as low fertility, drought, extreme temperatures and pH, heavy metals and saline-alkali soil condtions. Mycorrhizas have shown great promise in the ecological restoration of mining areas. They can enhance soil fertility, improve soil structure and enhance soil biological activity for the promotion of plant growth. Arbuscular mycorrhizas have great potential for practical application in soil remediation and the re-vegetation of degraded land.

Key words: arbuscular mycorrhizas; coal mining areas; ecological restoration

煤炭作为一次性能源, 在我国能源构成比例中占 74% 左右, 在探明的化石能源中, 煤炭占 94.3%, 其主要能源的地位不会发生变化^[1]。煤炭开采扰动了环境, 所引发的生态环境问题如破坏耕地、水土流失、土地沙化、贫瘠化和盐碱化等成为了矿区亟待解决的问题^[2]。在当前耕地日益减少, 土地复垦逐步得到重视的前提下, 对煤矿区最彻底的生态治理应是生物综合治理即复垦种植, 使其逐步变成可利用的资源, 并改善矿区生态环境, 变废为宝, 为人类服务。因此, 如何在开发矿产资源的同时, 又保护

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40201051, 20377051); 国家“863”青年基金资助项目(2005AA644020)

收稿日期: 2004-02-09; 修订日期: 2004-10-09

作者简介: 毕银丽(1971~), 女, 陕西米脂人, 博士, 副教授, 主要从事微生物在矿区生态重建中应用研究. E-mail: byl@cumtb.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40201051 & No. 20377051) and National “863” Program (No. 2005AA644020)

Received date: 2004-02-09; **Accepted date:** 2004-10-09

Biography: BI Yin-Li, Ph. D, Associate professor, mainly engaged in application of AM fungi in ecological restoration of coal mining areas. E-mail: byl@cumtb.edu.cn

生态环境,实现可持续发展,是一项有战略意义和现实意义的研究内容。

1 煤矿区生态重建的主要进展及存在的主要障碍

近年来,国内外关于矿区土地复垦和生态重建的研究十分活跃,其中矿山开发对立地条件的影响及废弃地的生态和环境综合治理^[2]、适生优良先锋植物种类的筛选和培育^[3]、土壤改良及施肥^[4]、生物复垦技术及抗侵蚀工艺研究^[5]、矿区生态工程复垦^[6]、矿山废弃地土壤的特性和改良^[7]及矿山废弃地复垦与绿化等^[8]方面已取得了许多进展。但是矿区人工植被的覆盖度仍很低,生物种类单一,抗逆性差,植被重建的生态效应仍不明显,往往出现一些生态治理的短期行为,没有真正考虑生态系统的稳定性和可持续性。矿区被破坏的土地生态重建的主要障碍因素为:复垦土地的肥力低且磷是复垦土壤肥力最主要的限制因素^[9];复垦土壤的结构不良,土壤压实现象比较严重^[10];复垦土壤中的微生物区系稀少,生物多样性较少,生态系统的稳定性差,不利于植被的恢复^[11]。生态恢复的关键是生态系统功能的恢复和合理结构的构建,而生态系统的各种功能是靠系统的各组成成分相互作用来实现的。恢复生态系统的功能,必须恢复系统的非生物成分的功能,进行植被的恢复及动物群落和微生物群落的构建^[12]。因而矿区的生态重建应该从多学科、多层次来进行综合治理,既要考虑生态的持续性和稳定性,同时也要考虑该地区的经济发展水平和状况。

2 丛枝菌根的生理生态功能

2.1 丛枝菌根的生理结构

丛枝菌根真菌是自然界中普遍存在的一种土壤微生物(简称AM)。陆地90%以上的有花植物都能够与它形成菌根共生体^[13]。丛枝菌根真菌由菌根孢子(果)、丛枝体、泡囊、菌丝组成,都可以作为繁殖体。其中菌丝的活动性较强。丛枝菌根菌丝非常纤细,其直径为2~7μm,穿透力强,具有吸收养分和水分的能力,并能够穿透土壤中有有机物的颗粒间隙,菌丝的分支伸长能力也很强,大大增加了植物对营养的吸收范围和吸收面积。菌丝无横隔,磷在菌丝里移动的速度为在植物体内运输速率的10倍,保证将在根外吸收的大量磷等营养元素及时运输给植物^[14]。

2.2 丛枝菌根的生态功能

2.2.1 促进植物对矿质营养的吸收 在养分胁迫条件下,丛枝菌根约可向植物生长提供所需的磷、锌^[15-16],提高植物对N的吸收,提高土壤N的有效性^[17]。Barea等^[18]证实AM与根瘤菌之间有互利作用,可以促进豆科植物结瘤和固氮,增加豆科植物根瘤的数目,提高固N的能力。AM菌根还能吸收B、S^[19]、Ca^[20]、K^[21]等中微量元素。此外,AM还能增加植物对Cl、Br、Cs、Co、Mo、Ni、Cd、Pb的吸收^[22]。

2.2.2 提高植物的抗逆性 AM能减轻植物病害,其中主要以减轻土传性病害为主。胡正嘉^[23]、刘润进^[24]等证明,接种VA菌根降低棉花黄萎病的病情指数。*Glomus mosseae*能明显减轻西瓜枯萎病,防治效果在50%以上。

AM能改善植物的水分状况,提高植物的抗旱能力。在正常供水及土壤矿质养分尤其是速效磷含量较低条件下,接种丛枝菌根真菌能显著提高叶片相对含水量和蒸腾速率,降低叶片水势和自然饱和亏,减轻了水分胁迫对植株生长的抑制程度,提高了植株叶片光合强度,增加了干物质积累,提高了水分利用率^[25]。Morte等^[26]研究证明,水分胁迫不影响菌根真菌的侵染,且菌根植物的水势比非菌根植物高26%,蒸腾作用增加92%,气孔导度增加45%,净光合作用增加88%。

丛枝菌根具有提高植物抗盐碱的能力。在盐碱土壤中,甚至在盐湖地区都有AM真菌的孢子被发现^[27]。冯固等^[28]认为接种AM真菌可以提高植物在盐渍土壤上的生产能力并减轻植物因盐害造成的产量损失。在1%和5%NaCl盐胁迫下,花生上接种*Glomus caledonium*表明,菌根植株的根瘤数量和重量分别为对照的2倍多,并提早开花8~15d^[29]。

丛枝菌根具有增强植物抗重金属毒害的能力。申鸿等^[30]在3个锌水平下研究丛枝菌根真菌对玉米苗期生长的影响,结果表明即使在土壤锌施入量达600mg/kg时,菌根真菌对玉米仍有近50%的侵染率,说明菌根真菌对重金属锌具有相当的抗性。黄艺等^[31]研究结果表明,菌根能够通过调节宿主根际中金属形态来影响金属有效性,从而达到阻止过量金属进入植物,提高植物对过量金属污染的抗性。

丛枝菌根具有提高植物抗酸性的能力。Clark等^[32]把8个AMF接种到生长在pH4和pH5环境中的*Panicum virgatum*上,发现在pH4时,菌根化植物干重是非菌根化植物的52倍;在pH5时菌根化植物干重是非菌根化植物的26倍。

丛枝菌根具有增强植物抗极端温度等能力。赵士杰等^[33]发现,接种丛枝菌根的韭菜,在低温下细胞膜受害程度较轻,增强了植物的抗冻性。

以上研究已经表明,植物感染菌根后,可以提高宿主的抗旱性、抗盐碱性、抗重金属毒害、抗酸性和抗极端温度、湿度等能力,增强宿主植物在逆境条件下的生存能力。

3 丛枝菌根在矿区生态重建中应用的研究进展

根据van der Heijden等^[13]最新的研究成果,自然生态系统中菌根真菌影响植物种群的竞争能力,菌根真菌的多样性决定着植物的生物多样性、生态系统的变化以及植物的生产力。因此,针对矿区生态治理中的主要障碍因子,“丛枝菌根”将成为这一

领域的新突破口。

丛枝菌根在矿区生态重建中的应用主要表现为:

(1)改良土壤结构 Frost 等^[34]1983 年在矿区严重扰动土壤中的山艾树上接种丛枝菌根真菌和土著内生真菌,1997 年检测结果表明:土壤环境条件已恢复到扰动前水平,土壤结构得到明显改善,与 1983 年相比土壤有机质增加 1%,可溶性盐和钠的数量大大减少。同时,AMF 的根外菌丝可直接促进土壤团聚体的形成^[35]。

(2)增加土壤肥力 绝大多数矿区退化土壤缺乏有机质及其营养元素如氮素^[36],这是限制复垦土壤植物不能正常生长的关键因素。因此,矿区恢复植被的首要前提是恢复土壤的肥力及提高土壤的生产力。丛枝菌根真菌对土壤养分的吸收及活化具有一定的作用,其在生长繁殖过程中常常会产生一些代谢产物,并分泌到体外,促进土壤难溶性养分的转化,影响植物的生长发育。刘润进等^[37]研究发现,接种 AMF 能够提高砖瓦场破坏地土壤中有效磷、锌、铜和总氮含量,改善土壤肥力。Noyd 等^[38]以铁矿渣为基质,在 *Andropogon gerardii* 上接种丛枝菌根真菌,试验结果表明:在低磷水平下(0.6~5mg/g)未接种植物生长受到抑制,叶片中出现紫色且老叶枯萎;接种植物茎中的磷含量和干重显著高于未接种植物。

(3)提高土壤生物活性 菌根的形成引起植物根系生理代谢活动的变化,从而对菌根根际微生物区系产生以养分需求为介导的选择作用,引起根际微生物区系组成和数量的变化。潘超美等^[39]发现,玉米接种 AM 菌根真菌后,根际土壤中的细菌、放线菌、固氮菌数量明显增加,真菌数量则有所下降。宋福强等^[40]通过对接种 AM 菌根真菌的大青杨根际进行研究发现,AM 菌根虽对根际土壤微生物种群数量没有产生影响,但使根面、根系上的细菌、放线菌、固氮菌的数量增加,同时增加了根际土壤磷酸酶、脲酶、蛋白酶的活性。菌根的形成有利于解磷微生物在根际的生长和繁殖,尤其可以延长解磷微生物在植物根际存活时间。

(4)促进植物生长 国内外学者先后对丛枝菌根在矿区生态重建中的生长效应进行了广泛研究。Daft 和 Hacskey^[41,42]、Call 和 Davies^[43]发现把矿区废弃地中筛选出的内生菌根接种到矿区废弃地植物上,可以提高其存活率、生长量,而且接种比未接种植物地上部分含有更多的 N、P。马彦卿^[18]以矿区生土为基质,筛选出的 VA 菌株对复垦区的多种先锋植物都有中等程度感染,接种植株磷含量显著增加,玉米粒重增加 14.50%~30.52%。郁纪东^[44]在煤矸石、粉煤灰培植条件下,在刺槐、苜蓿、高羊茅上分别接种丛枝菌根真菌,试验结果表明,菌根有效地促进植物生长。中国农业科学院汪洪钢研究员曾将菌根应用于四川绵阳 2000hm² 柑桔、西瓜、药材和小麦,取得明显的增产效果,改善了作物品质,成果在 1992 年获农业部科技进步一等奖,1995 年获得国家科技进步三等奖。

此外,丛枝菌根在矿区生态重建中还起到其它农艺措施不能发挥的作用。Cuenca 等^[45]证实贫瘠受扰动且缺乏菌根的田地上单依靠化学肥料恢复植被是不可能的,而接种 AMF 并施加 P 处理比单施 P 处理显著增加了植被覆盖率、植物生长量和矿质元素的吸收。

(5)益于生态恢复 1967 年 Nicolson^[46]证实接种 AM 真菌可以改善植物在工业废物废物上的生长。Daft 和 Hacskey^[41]观察到生长在煤矿废弃物上的大多数植物侵染了丛枝菌根真菌,并推断丛枝菌根侵染对大多数植物成功定居在煤矿废弃物上是必要的。研究发现生长在美国西北干旱半干旱地区矿区复垦地的大多数植物常常被丛枝菌根侵染^[47]。Noyd 等^[38]把 *Glomus intraradices* 和 *Glomus claroideum* 接种到牧草上,成功地恢复了矿渣地的植被,达到了修复和复垦的目的。张文敏等^[48]把经过实验室盆栽试验筛选出的适生 AM 菌株分别接种到广西平果铝矿、山西孝义铝矿复垦区先锋植被上,结果表明,复垦地接种适宜的 AM 后,可以大幅度提高植物生物学产量,有效地改良复垦土壤基质和加速植物生长,比传统农艺措施更经济、高效、持久且无污染。接种丛枝菌根可明显降低复垦成本。毕银丽等^[49]在温室内证明,丛枝菌根具有抵消复垦土壤覆土少而导致植株产量降低的潜力,估算复垦每公顷土地可以节约 25000 元,极大地降低了复垦费用。

由于丛枝菌根真菌与寄主植物的专一性不强,一种菌根真菌能够同时与多种植物建立共生关系,因此菌丝成了连接不同植株之间的桥梁,称为菌丝桥。菌丝桥的建立对于提高生态系统中自然资源的利用,加速养分的循环,提高养分的利用率,对于植物群落的稳定和演化发挥着重要作用^[50]。

4 丛枝菌根在矿区生态重建中应用的未来研究与展望

丛枝菌根的这些生理生态特性使得菌根技术有可能成为克服矿区生态重建中障碍因素的有效方法。借助菌根技术来提高复垦水平和效益,降低复垦成本,可以增强复垦对矿区生态环境的改善作用,有效推动矿区复垦手段向更高层次发展^[11,38,43,45,47]。在许多实施土地生态恢复技术的矿区,土地生产力得以恢复、生态环境得以改善,获得了良好的经济效益^[51]。

丛枝菌根在矿区生态重建中的应用是一个崭新的领域,对其作用机理和生态效应的研究还很不深入。尤其是在煤矿区不良环境因子(如干旱胁迫、土壤贫瘠化和盐碱化)的作用下,菌根对生态重建的作用效应研究仍然是一个空白。丛枝菌根在自然界中的生存是其长期适应外界环境的结果,是适者生存,优胜劣汰的产物。因而应在矿区有选择地接种多种菌种,持续地维持生态系统的稳定。分离和筛选对矿区逆境适应性强的菌根真菌,建立矿区生态系统的菌种资源库,对优势菌种进行组合,既获得高效抗逆的混合菌种,又能够持续地维持生态系统的稳定。丛枝菌根不能纯培养,极大地限制了菌根菌剂的规模化产生,无菌双重培

养体系的建立^[52~54],将会开创菌根在矿区应用的新局面,无论在理论上还是实际中都是本领域的核心问题。

作者曾在盆栽试验条件下利用粉煤灰与土壤不同的配比,使植株获得 40%以上的菌根侵染率^[55],因而,结合西部矿区经济条件和现有资源状况,充分利用矿山废弃物如粉煤灰等来作为菌种的培养基质,不失是变废为宝的一个好办法。研究逆境条件下丛枝菌根对矿区土壤结构的改良和地力的培肥,进而探讨菌根真菌对复垦土地生态系统中生物多样性、植物群落分布和合理地貌景观构建的作用与效应。21 世纪将是生物学的世纪,发掘利用生物基因资源中适应、抵抗逆境的潜力,不仅可以达到维护和改善土地环境质量的目的,而且也能为西部矿区土地复垦与生态重建提供一条有用的生物技术途径,不仅能够推动复垦的理论研究,而且紧跟国际研究的前沿,填补我国在这一领域的空白,具有重大的理论价值和现实生态意义。

应用微生物技术改良基质,加速植被恢复,是改善矿区生态环境和培肥基质的一个重要途径。通过人为接种微生物,利用微生物和植物根际微生物本身的生命活动,挖掘复垦基质的潜在肥力,加速其向有利于生态重建的方向转化,有益于生态系统的持续发展,是目前提高矿区生态治理质量,加速其生态重建的关键。生物措施是一条经济便捷且安全的途径。

References:

- [1] Tang Y G, Dai S F, Tang Z. *Characteristic of coal quality and its dynamic evaluation in Wuda area of China*. Xuzhou: China University of Mining and Technology publishing house, 1999. 1~8.
- [2] Tu S J, Chen Y X. Study on the influence on environment from coal mining and its countermeasures. *Mining R&D*, 2003, **23**(4): 8~10.
- [3] Li Y C, Ji R G. The ecology restoration study on mining derelict land. *Acta Ecologica Sinaica*, 1995, **15**(3): 339~343.
- [4] Lan C Y, Shu W S. Amelioration soil media during vegetative rehabilitation in the mining waste land. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, **15**(2): 55~59.
- [5] Wang Z G. Discussion about the conception of ecological restoration and problems. *China Soil and Water Conservation*, 2003, **11**: 20~21.
- [6] Li W J, Li S J, Mu L L. Application of ecological engineering in surface soil dump reclamation. *Opencast Mining Technology*, 1996, **47**: 46~49.
- [7] Hu Z Q, Qi, J Z, Si J T. Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil. *Transactions of the CSAE*, 2003, **3**: 214~218.
- [8] Lin Y, Wang T. Afforestation in surface soil dump reclamation and the effects on their ecological environment. *Opencast Mining Technology*, 1996, **47**: 40~42.
- [9] Chen H, Zheng Y and Zhu Y. Phosphorus: a limiting factor for restoration of soil fertility in a newly reclaimed coal mined site in Xuzhou, China. *Land Degradation & Development*, 1996, **9**(2): 176~183.
- [10] Wei Z Y, Hu Z Q, Bai Z K. The loose heaped ground method of soil reconstruction on the stack piles of open pit coal mine. *Journal of China coal Society*. 2001, **26**(1): 18~21.
- [11] Bi Y L, Hu Z Q. Respective of applying VA mycorrhiza to reclamation. In: *Mine Land Reclamation and Ecological Restoration for 21 Century: Beijing International symposium on land reclamation*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. 555~559.
- [12] Ma Y Q. Applied microbiology reclaim technology in restoration of diggings. *Mining technology*, 2001, **1**(2): 66~68.
- [13] Van J, Klironimos N, Ursic M, *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 1998, **396** (5): 69~72.
- [14] Smith S E & Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis* (2nd edition), 1997. 379~408.
- [15] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zinc in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 1991a, **136**: 41~48.
- [16] Li X L, George E, Marschner H. Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover. *Plant and Soil*, 1991b, **136**: 49~57.
- [17] Johansen A. Hyphal transport of ¹⁵N-labelled nitrogen by a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and its effect on depletion of inorganic soil. *New Phytol.*, 1992, **122**: 281~285.
- [18] Barea J M. Interactions between mycorrhizal fungi and rhizosphere micro-organisms within the context of sustainable soil-plant systems. In: Gange Brown ed. *Multitrophic Interactions in Terrestrial systems*. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1997. 196~198.
- [19] Clark R B, Zeto S K. Mineral acquisition by mycorrhizal maize grown on acid and alkaline soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, **28**: 1498~1503.
- [20] Rhodes L H, Gerdemann J W. Translocation of calcium and phosphate by external hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Soil Sci.*, 1978, **126**: 125~126.
- [21] Mosse B. Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apples. *Nature*, 1957, **179**: 992.
- [22] Clark R, Zeto B. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *J. Plant Nutr.*, 2000, **23**(7): 867~902.

- [23] Hu Z J, Wang P. Effect of pretransplant inoculation with VA mycorrhizal fungi on fusarium wilt of cotton. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, **31**(supplement): 212~217.
- [24] Liu R J, Shen C Y, Qiu W F. Competition between VAM fungi and Verticillium Dahliae in their infectivities. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, **31**(supplement): 224~229.
- [25] Bi Y L, Li X L, Ding B J. Influence of VA mycorrhiza on maize resistance to drought. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, **21**(2): 7~12.
- [26] Morte A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association. In: Ulla, A. J eds. 2nd Intl. Conf. on Mycor. Uppsala, Swedn, 1998. 123.
- [27] Wang Y S, Zhang M Q, Zhang C. Selection of salt tolerant isolate of VA mycorrhizal fungi. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, **31**(supplement): 79~83.
- [28] Feng G, Zhang F S. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on salinity tolerance of cotton. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, **11**(2): 21~24.
- [29] Gupta R, Krihnamurthy K V. Response of mycorrhizal and nonmycorrhizal arachis hypogaea to NaCl and acid stress. *Mycorrhiza*, 1996, **6**: 145~149.
- [30] Shen H, Chen B D, Feng G, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth in a zinc polluted soil. *Agro-environmental Protection*, 2002, **21**(5): 399~402.
- [31] Huang Y, Chen Y J, Tao S. Uptake and distribution of Cu, Zn, Pb and Cd in maize related to metals speciation change in rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 859~862.
- [32] Clark R B. Arbuscular mycorrhizal isolates on growth and root colonization of Panicum virgatum in acidic soil. In: Ulla, A. J eds. 2nd Intl. Conf. on Mycor. . Uppsala, Swedn, 1998. 235~238.
- [33] Zhao S J, Li S L. A study on physiological bases of VA mycorrhiza for promoting the yield increase of leeks. *Soils and Fertilizers*, 1993, **4**: 38~40.
- [34] Frost S M, Stahl D D, Williams S E. Long-term reestablishment of arbuscular mycorrhizal fungi in a drastical disturbed semiarid surface mine soil. *Arid Land Research and Management*, 2001, **15**(1): 3~12.
- [35] Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(4): 99~102.
- [36] Wong M H, Luo Y M. Land remediation and ecological restoration of mined land. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(2): 161~169.
- [37] Liu R J, Li M, Liu X Z, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and N P K fertilization on improving spoiled soil in brickfired. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, **17**(3): 46~50.
- [38] Noyd R K, Pflieger F L, Norland M R. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of taconite iron ore tailing. *Plant and Soil*, 1996, **179**: 89~97.
- [39] Pan C M, Guo Q R, Qiu Q J. Effect of VAM fungus on the growth of corn and micro-ecological environment of corn rhizosphere. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(4): 304~306.
- [40] Song F Q, Yang G T, Meng F R. The rhizospheric of seedlings of Populus ussruiensis colonized by arbuscular mycorrhizal(AM) fungi. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(2): 211~216.
- [41] Daft M J, Hacksaylo E. Arbuscular mycorrhizas in the anthracite and bituminous coal wastes of Pennsylvania. *Journal of Applied Ecology*, 1976, **13**: 523~531.
- [42] Daft M J, Hacksaylo E. Growth of endomycorrhizal and non-mycorrhizal red maole seddlings in sand and anthracite spoil. *Forest Science*, 1977, **23**: 207~216.
- [43] Call C A, Davies F T. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizae on survival and growth of perennial grasses in lignite overburden in Texas. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1988, **24**(4): 395~405.
- [44] Yu J D. Primary study of mycorrhiza used for reclamation in northwest. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 2000, **20**(supplement): 77~81.
- [45] Cuenca G, Andrade Z D, Escalante G. Arbuscular mycorrhizae in the rehabilitation of fragile degraded tropical lands. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **26**(2): 107~111.
- [46] Nicolson T H. Vesicular-arbuscular mycorrhiza-a universal plant symbiosis. *Scientific Progress*, 1967, **55**: 561~581.
- [47] Loree M A, Williams S E. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and severe land disturbance. VA Mycorrhizae and Reclamation of Arid and Semi-arid Lands. Williams S E, Allen M R. Wyoming Agriculture Expt, 1984. 1~14.
- [48] Zhang W M, Ma Y Q. Field study on Vesicular-arbuscular mycorrhizae used in mine reclamation. *Mine Metallurgy*, 1996, **5**(3): 17~21, 32.
- [49] Bi Y L, Hu Z Q, Si J T. Effects of Arbuscular Mycorrhizal fungi on nutrient uptake of maize in reclaimed Soil. *Journal of China*

University of Mining & Technology,2002,**19**(3):179~185.

[50] Newmam E I,Devoy C L,Easen N J, *et al.* Plant species that can be linked by VA mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 1994,**126**:691~694.

[51] Bai Z K, Zhao J K. *Land reclamation and ecology restoration in diggings*. Beijing: Chinese Agricultural Science Publish House, 2000. 154~157.

[52] Bi Y L, Wang H G, Li X L. Infection of transformed Ri T-DNA carrot roots by Gigaspora margarita. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, **5**(1): 76~80.

[53] Bi Y L, Wang H G, Li X L. Establishment of dual culture arbuscular mycorrhiza and formation of hyphosphere. *Mycosystema*,2000,**19**(4):517~521.

[54] Bi Y L, Li X L,Wang H G, *et al.* Establishment of dual culture between vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus Sclerocystis sinuosa and transformed Ri T-DNA carrot roots *in vitro*. *Plant Soil*, 2004, **261**: 239~243.

[55] Bi Y L, Li X L ,Christie, P *et al.* Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash. *Chemosphere*,2003,**50**:863~869.

参考文献:

[1] 唐跃刚,代世峰,唐真. 乌达矿区煤质特性及动态评价研究. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999. 1~8.

[2] 屠世浩,陈宜先. 煤矿开采对环境的影响及其对策研究. 矿业研究与开发, 2003,**23**(4):8~10.

[3] 李玉臣,吉日格拉. 矿区废弃地的生态恢复研究. 生态学报,1995,**15**(3):339~343.

[4] 蓝崇钰,束文圣. 矿业废弃地植被恢复中的基质改良. 生态学杂志,1996,**15**(2):55~59.

[5] 王治国. 关于生态修复若干概念与问题的讨论. 中国水土保持, 2003, **11**:20~21.

[6] 李文杰,李淑杰,穆丽玲. 生态工程在排土场复垦中的应用. 露天采煤技术,1996, **47**: 46~49.

[7] 胡振琪,戚家忠,司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价. 农业工程学报,2003,**3**:214~218.

[8] 林鹰, 王涛. 岭北露天矿排土场复垦造林及其对局部生态环境改变作用的研究. 露天采煤技术, 1996,**47**:40~42.

[10] 魏忠义,胡振琪,白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法. 煤炭学报, 2001,**26**(1):18~21.

[12] 马彦卿. 微生物复垦技术在矿区生态重建中的应用. 采矿技术, 2001,**1**(2):66~68.

[23] 胡正嘉,王平. VA 菌根对棉花枯萎病的影响. 土壤学报,1994,**31**(增刊):212~217.

[24] 刘润进,沈崇尧,裴维番. VAM 菌根与黄萎病菌存在侵染中的竞争作用. 土壤学报,1994,**31**(增刊):224~229.

[25] 毕银丽,李晓林,丁保健. 水分胁迫下接种菌根对玉米抗旱性的影响. 干旱地区农业研究, 2003b, **21**(2):7~12.

[27] 王幼珊,张美庆,张弛. VA 菌根真菌抗盐碱菌株的筛选. 土壤学报,1994. **31**(增刊):79~83.

[28] 冯固,张福锁. 丛枝菌根对棉花耐盐性的影响研究. 中国生态农业学报, 2003,**11**(2):21~24.

[30] 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. 农业环境保护, 2002,**21**(5):399~402.

[31] 黄艺,陈有监,陶澍. 污染条件下 VAM 玉米元素积累和分布与根际重金属形态变化的关系. 应用生态学报,2002,**13**(7):859~862.

[33] 赵士杰,李树林. VA 菌根促进韭菜增产的生理基础研究. 土壤肥料,1993,**4**:38~40.

[35] 冯固,张玉凤,李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响. 水土保持学报, 2001,**15**(4):99~102.

[36] 黄铭洪,骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003,**40**(2):161~169.

[39] 潘超美,郭庆荣,邱桥姐. VA 菌根真菌对玉米生长及根际土壤微生态环境的影响. 土壤与环境, 2000,**9**(4):304~306.

[40] 宋福强,杨国亭,孟繁荣,等. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域的研究. 生态环境, 2004,**13**(2):211~216.

[46] 郁纪东. 应用菌根技术进行西北地区土地复垦初探. 西安科技学院学报,2000,**20**(增刊):77~81.

[48] 张文敏,马彦卿. 内生(VA)菌根用于矿山复垦的田间试验研究. 矿冶, 1996,**5**(3):17~21,32.

[49] 毕银丽,胡振琪,司继涛. 接种菌根对复垦土壤营养吸收的影响. 中国矿业大学学报, 2003,**31**(3):252~257.

[51] 白中科,赵景逵. 工矿土地复垦与生态重建. 北京: 中国农业科学出版社, 2000. 154~157.

[52] 毕银丽,汪洪钢,李晓林. *Gigaspora margarita* 对转移 Ri T-DNA 胡萝卜根器官的侵染. 植物营养与肥料学报,1999,**5**(1): 76~80.

[53] 毕银丽,汪洪钢,李晓林. 丛枝菌根双重培养的建立及其菌丝际的形成. 菌物系统(原真菌学报),2000,**19**(4):517~521.