

神东矿区采煤沉陷地微生物复垦动态监测与生态效应

岳辉, 毕银丽, 刘英

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 利用环境减灾小卫星(HJ-CCD)产品,通过归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(F_g)和叶面积指数(LAI)数据动态监测神东矿区采煤沉陷地微生物复垦的效果,与同期现场统计数据(株高、地径和冠幅)的对比分析表明,接菌提高了植被覆盖度和地上植物生物量,有效恢复了地表植被。对接种丛枝菌根真菌紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)根际土壤采样进行试验分析,结果表明接菌改良了植物根际微环境,扩大了根系吸收营养的范围,有利于矿区植被的恢复和重建。

关键词 环境减灾小卫星;微生物复垦;动态监测;生态恢复

中图分类号 S154

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.004

Dynamic Monitoring and Ecological Effect of Microbial Reclamation on Subsided Land in Area of Shendong Coal Mine Area

YUE Hui, BI Yinli, LIU Ying

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract By taking the result of remote sensing on subsided land in the area of Shendong coal mine as an example, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), vegetation fraction (F_g), and Leaf Area Index (LAI) data from environment and disaster reduction small satellites (HJ-CCD) images were applied to dynamically monitor mining subsidence land reclamation effects of microbial ecological in the area of Shendong mining. The remote sensing data were compared with the sampling experimental data in the same period; they were plant height, ground diameter, and crown width. It is discovered that the microbial reclamation improves vegetation fraction and ground biomass, and recovers the vegetation effectively. The microbe of microbial reclamation in the area of Shendong mining is Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) which inoculated in *Amorpha fruticosa* L. Through rhizosphere sampling experimental analysis, the results show that AMF inoculation could improve the plant micro environment, enlarge the root of the nutrient range, and is able to help on the vegetation restoration and reconstruction of mining area.

Keywords HJ-CCD; microbial reclamation; dynamic monitoring; ecological restoration

0 引言

中国的能源消费构成中,煤炭所占比例超过70%。煤炭开采扰动了自然环境,特别是矿区开采引起的土地沉陷、水土流失、土壤贫瘠等是亟待解决的问题。目前,针对采煤沉陷主要采用工程复垦,而矿区土壤普遍存在土壤肥力低且压实严重、生物多样性小且土壤微生物含量低等特征,这导致植被在矿区土壤较难生长,植被重建的生态效应不明显,生态恢复过程较为缓慢^[1-3]。

微生物复垦是利用微生物的接种优势,对矿区土壤进行综合治理与改良的一项生物技术。该技术指向新建植的植物接种微生物(AMF),利用植物根际微生物的生命活动改善植物营养条件,促进植物生长发育,使失去微生物活性的矿区土壤重新建立土壤微生物体系,改良矿区土壤的基质,提高土壤肥力,加速植被恢复,进而实现生态系统功能的恢复^[3]。丛枝菌根真菌具有促进植物吸收营养元素,提高植物抗逆性,增强土壤肥力和决定生态系统基础生产力的特性,在矿

收稿日期:2012-03-26;修回日期:2012-06-01

基金项目:教育部博士点基金项目(20090023110009);国家科技支撑计划(2012BAC10B03);中央高校基本科研业务费(2009KD01)

作者简介:岳辉,博士研究生,研究方向为菌根修复矿区生态环境,电子信箱:milan19830928@163.com;毕银丽(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:E382450003M),教授,研究方向为土地复垦及微生物复垦技术,电子信箱:byl@cumtb.edu.cn

区沉陷地微生物复垦中起了重要作用^[4-5]。Noyd等^[6]把根内球囊霉菌 (*Glomus intraradices*) 和近明球囊霉菌 (*Glomus claroideum*) 接种到牧草上,成功重建矿渣地的植被;杜善周等^[7]将摩西球囊霉菌 (*Glomus mosseae*) 和幼套球囊霉菌 (*Glomus etunicatum*) 接种在矿区杨树和白蜡上,发现6个月后接种杨树、白蜡的株高和胸围显著增加,接种植株根际菌丝长度和孢子数也显著增加,植被适应矿区复杂环境的能力得到提高。

本文以神东矿区采煤沉陷地微生物复垦试验区为例,利用遥感(Remote Sensing,RS)动态监测2009—2011年接种菌根对地面植被的影响,并与现场统计数据 and 土壤采样试验数

据作对比分析,进一步研究接种菌根对采煤沉陷地生态环境的恢复作用和根际微环境的改良作用。

1 试验区介绍与RS数据处理

1.1 试验区概况

神东矿区塌陷地微生物复垦关键技术开发与示范试验基地建于大柳塔东山塌陷区沙地沟壑区三道梁上(图1),属典型的干旱半干旱大陆性季风气候,年平均降水量362mm,年平均蒸发量2297.4—2838.7mm,年平均气温7.3℃,年平均风速3.2m/s。试验区土壤最大饱和持水量16.7%,pH=8.60,土壤肥力较低,保水性较差。

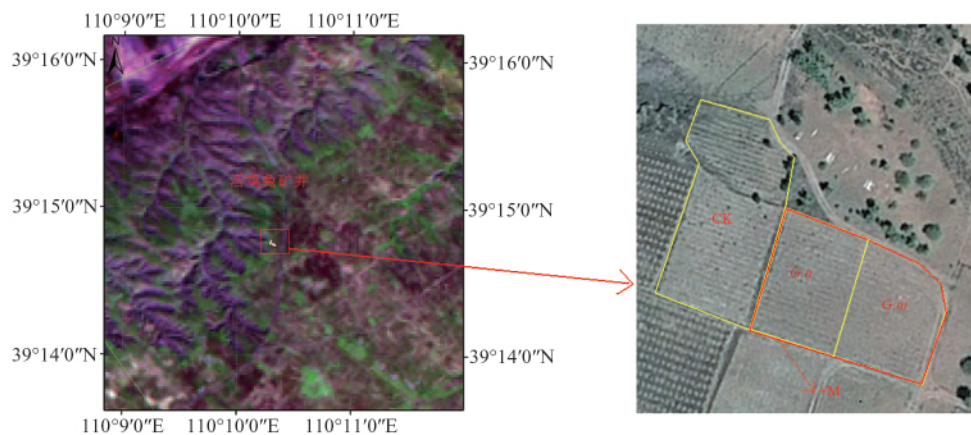


图1 研究区域位置图与局部细节图

Fig. 1 Location map and detail drawing of the study area

1.2 RS 图像下载

遥感图像采用环境卫星 HJ-1A/1B CCD1/2 2 级数据,成像时间分别为2009年9月26日、2010年6月27日、2010年9月27日、2011年6月28日和2011年9月30日。

1.3 RS 数据处理

遥感图像经过辐射定标、大气纠正、几何精校正后得到4个波段的地表反射率,计算得到研究区域归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(F_g)、叶面积指数(LAI)^[8-11],植被参数模型见表1。

表1 植被参数模型

Table 1 Model of vegetation parameters

参数	参数模型
归一化植被指数 NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$ (其中, ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率; ρ_R 为红波段反射率)
植被覆盖度 F_g	$F_g = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$ ($NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为区域内 NDVI 的最大值和最小值)
叶面积指数 LAI	$LAI = -2.3849 \ln(1 - F_g)$

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验植物为紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.), 接种菌根由北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室提供,后经中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室增殖培养得到内生菌根真菌摩西球囊霉菌 (*Glomus mosseae*, *G.m*) 和白色球囊霉菌 (*Glomus albidus*, *G.a*)。

2.2 试验设计

试验设接种(+M)与对照(CK)2个处理,接种区分为 *G.m* 和 *G.a*,其+M和CK区面积各为3000m²。2008年5月开始栽植,株高20cm,种植间距为1m×2m,菌剂随植苗一起接入,每株20g;浇水达土壤最大饱和持水量,以后每周浇水1次,1个月后免水分自然管理。

采样时间分别为2009年9月16日、2010年6月10日、2010年9月13日、2011年6月15日和2011年9月25日,统计各个采样时间的植株地径、冠幅和株高,计算紫穗槐成活率。2011年6月19日在3个试验区各选取长势均一的10株紫穗槐,在根际埋入根管,于2011年7月15日进行第1次扫描根系,2011年9月25日进行第2次扫描根系。

2.3 样品采集和测定

采用S型法随机在3个试验区各选定15个样点,采集新

鲜根际土壤并带回实验室测定菌根侵染率和菌丝长度^[12-13]。通过根系图像分析软件(WinRHIZO)定量分析得到根长(L)、根投影面积(PA)、根表面积(SA)、根直径(AD)、根体积(V)和根尖数($Ntips$)。

2.4 试验数据处理

采用 SPSS 和 EXCEL 进行数据分析。

3 RS 数据与现场监测数据对比分析

3.1 2009—2011 年 $NDVI$ 、 LAI 和 F_g 与实地监测结果对比

植被观测因子(如植被覆盖度、植物生物量等)的动态变化是植被生产力变化的重要反映,而植物生物量主要通过植被覆盖度 F_g (水平密度)和植被叶面积指数 LAI (垂直密度)表

示^[14]。由于+M 和 CK 区面积相等,为了便于遥感图像像元处理,仅对接菌和对照进行植被观测因子分析。

通过对 2009—2011 年 5 期遥感影像的分析得知, $NDVI$ 、 LAI 和 F_g 均呈 W 型变化,即每年的 6 月份处在波谷,9 月份上升至波峰,+M 试验区植被覆盖度和植物生物量普遍大于 CK 区(图 2)。对同步现场采样结果的分析表明,冠幅的变化趋势与 $NDVI$ 、 LAI 和 F_g 较为一致(图 3),这也在一定程度上验证了 RS 数据的可靠性,即 $NDVI$ 、 LAI 和 F_g 在一定程度上能反映地表植被的变化情况。每年的 6—9 月是神东矿区雨季,资料表明神木县雨季自 6 月下旬开始,至 9 月上旬结束,雨季降水量 277.8mm,占全年降水量 64%,这是造成植被观测因子规律变化的主要原因^[15]。

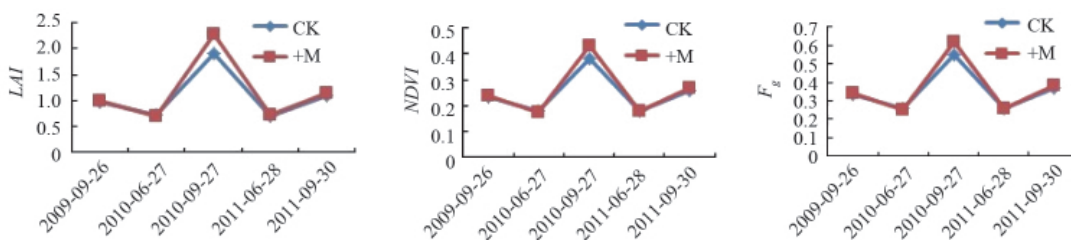


图 2 不同紫穗槐试验区 $NDVI$ 、 LAI 和 F_g 比较

Fig. 2 Comparisons among $NDVI$, LAI and F_g for *Amorpha fruticosa* L. in different experimental areas

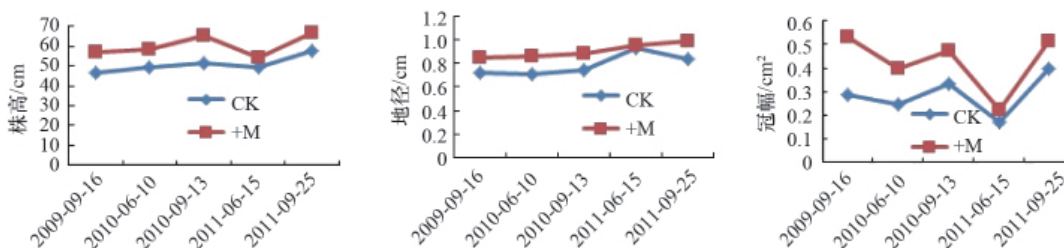


图 3 不同紫穗槐试验区株高、地径和冠幅比较

Fig. 3 Comparisons among height, ground diameter and canopy for *Amorpha fruticosa* L. in different experimental areas

3.2 RS 动态监测结果分析

神东矿区采煤沉陷地生态重建存在的问题是土地肥力低、土壤压实严重、微生物区系少及生态系统稳定性差^[16],而生态恢复的关键是生物成分功能的恢复,即植被的恢复和重构,植被的恢复和微生物群落的构建相辅相成。微生物复垦基地紫穗槐试验区于 2008 年建立后,经过 RS 动态监测和 3 年的实地监测发现,+M 区植被覆盖和地上植物生物量好于 CK 区,这与菌根真菌能够提高宿主植物耐受性,改善宿主植物营养和土壤基质有直接关系。

4 微生物复垦的生态效应

4.1 接菌对紫穗槐成活率和菌根侵染率的影响

紫穗槐成活率和菌根侵染率如图 4 所示。紫穗槐成活率

在 2009—2011 年的 5 次监测中呈波动趋势, $G.m$ 和 $G.a$ 成活率的波动比 CK 小,3 种处理均呈 6 月份较低,9 月份上升的规律,这与紫穗槐越冬能力存在差异有关。 $G.m$ 和 $G.a$ 侵染率在 5 次监测中始终高于 CK,尽管土壤中存在土著菌根真菌,但是接种菌根显著增强了菌根真菌侵染紫穗槐根系的能力,稳固了紫穗槐-菌根真菌互惠共生的关系。

4.2 接菌对紫穗槐根际菌丝密度的影响

菌根真菌通过菌根联接和菌丝网络影响植物水分和营养代谢,菌丝密度则反映了植物根际菌丝网络的发达程度^[17]。由图 5 可见,2009—2011 年 5 次监测中接菌和对照菌丝密度总体上均呈上升趋势, $G.m$ 、 $G.a$ 与 CK 菌丝密度存在显著差异($G.a>G.m>CK$),但 $G.m$ 和 $G.a$ 差异不明显,这表明 2 种菌种的适应能力差别不大,均能与植物形成稳定的互惠互利的共

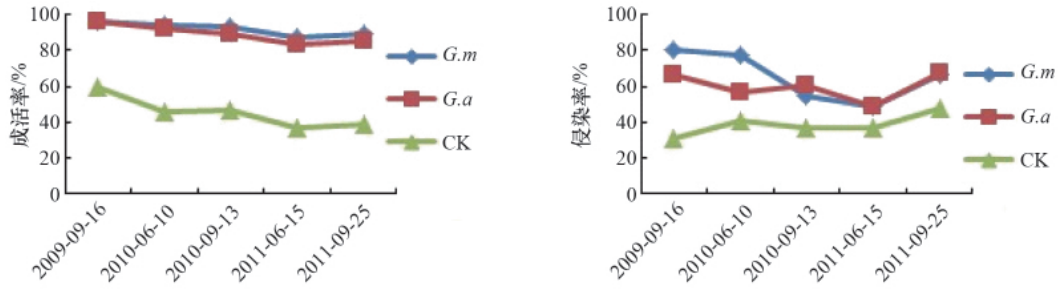


图 4 不同紫穗槐试验区成活率和菌根感染率对比

Fig. 4 Comparisons between survival rate and infection rate for *Amorpha fruticosa* L. in different experimental areas

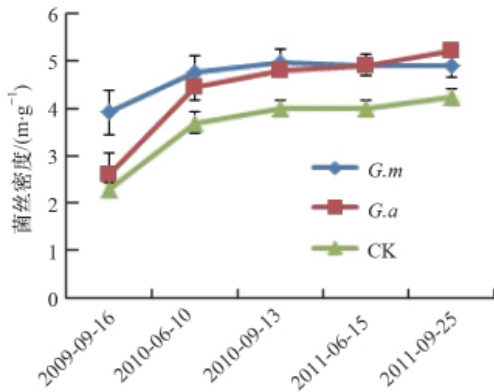


图 5 接菌对不同处理菌丝密度的影响

Fig. 5 Effects of AMF on hyphae density with different treatments

生关系。与植物地上生物量呈增加趋势作对照,可以发现植物根际菌丝密度的逐渐增大能够增加根系吸收的空间范围,优化根际营养配置,有利于植被恢复和重建。

4.3 接菌对紫穗槐根系形态的影响

不同处理后的紫穗槐根系形态见表 2。2 次监测结果表明接菌植株根长显著大于对照,这与根际菌丝密度和菌根感染率规律一致,说明接菌促进了植物根系发育,使植物根系能够延伸至更深更广的范围吸收水分和营养;根尖数和根平均直径接菌紫穗槐比对照要多,说明接菌植物根系生命活动更为活跃;根投影面积、根体积和根表面积在 2 次监测中差别不大。可见,接种菌根真菌对紫穗槐根系形态产生了影响,菌根真菌通过菌丝的直接作用来影响植物水分代谢,改善植物营养状况,增加了根系长度和深度^[18]。

表 2 不同处理对紫穗槐根系形态的影响

Table 2 Effects of different treatments on the root morphology of *Amorpha fruticosa* L.

监测时间	不同处理	根长 L/cm	根投影面积 PA/cm^2	根表面积 SA/cm^2	根平均直径 AD/cm	根体积 V/cm^3	根尖数 $Ntips$
2011-07-15	<i>G.m</i>	118.42±14.14 ^{bc}	20.68±0.71 ^a	68.38±7.07 ^b	8.09±0.71 ^a	5.71±0.71 ^{ab}	56±7.07 ^{bc}
	<i>G.a</i>	130.68±28.28 ^{bc}	23.17±2.12 ^a	73.08±7.07 ^b	7.38±0.71 ^{ab}	6.43±1.41 ^a	60±7.07 ^{bc}
	CK	82.08±49.49 ^c	21.33±10.61 ^a	48.44±7.07 ^c	4.15±1.41 ^c	2.99 ^b	42±21.21 ^c
2011-09-25	<i>G.m</i>	209.18±7.07 ^a	25.59±0.71 ^a	83.82±7.07 ^b	5.18±0.71 ^{bc}	4.68±2.12 ^{ab}	79 ^{ab}
	<i>G.a</i>	213.86±7.07 ^a	31.74±0.71 ^a	103.14±7.07 ^a	7.00±1.41 ^{ab}	7.28±1.41 ^a	96±7.07 ^a
	CK	167.69±14.14 ^{ab}	31.09±7.07 ^a	81.97 ^b	6.03±0.70 ^{abc}	3.04 ^b	68±2.83 ^b

注:a,b,c表示同一列显著性差异组别($P<0.05$)。

Note: a, b, c represent significant difference groups in the same column ($P<0.05$).

5 讨论

土壤肥力和植被恢复是神东矿区采煤沉陷区生态恢复的关键。菌根技术是土壤肥力恢复的主要技术之一,它通过人为接种微生物,利用微生物在植物根际的生命活动,挖掘复垦土壤的潜在肥力,加速植被恢复,改善矿区生态环境。生态恢复未来的发展趋势是把 3S 技术、采矿技术、土壤重构技术、废弃物资源化利用技术等结合起来,而 RS 具有实时、动态和快速的特点,可以用来动态监测微生物复垦的效果。

目前对矿区微生物复垦效果的监测主要采用传统的现场统计和采样分析的方法,耗工费事且不及时。随着 3S 技术的发展,未来 RS 除了可以直观获取地表植被覆盖度和植物生物量外,还可以与探地雷达(GPR)相结合来获取复垦土壤的质地、层次、含水率等土壤理化特性^[19],以及与 GIS 的空间分析相结合以建立复垦土壤质量的评价指标体系^[20],做到动态监测复垦土壤质量的变化,建立微生物复垦从地上植物到地下土壤的立体监测系统。

6 结论

(1) 对 2009—2011 年现场采样和相对应同期 RS 影像的对比分析表明, 接种菌根将紫穗槐成活率提高了 30% 以上, 植被覆盖度和地上植物生物量接菌好于对照, 矿区植被得到了恢复和重建。

(2) 接菌加速了菌根和植物形成稳定共生体, 扩大了植物根系吸收水分和营养元素的范围, 对植物根际微环境的改良作用明显, 对矿区生态系统稳定起了重要作用。

参考文献 (References)

- [1] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2068-2073.
Bi Yinli, Wu Fuyong, Wu Yukun. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2068-2073.
- [2] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280.
Li Xinju, Hu Zhenqi, Li Jing, et al. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(6): 276-280.
- [3] 杜善周, 毕银丽, 王义, 等. 丛枝菌根对神东煤矿区塌陷地的修复作用与生态效应[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 41-44.
Du Shanzhou, Bi Yinli, Wang Yi, et al. *Science & Technology Review*, 2010, 28(7): 41-44.
- [4] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. 2nd ed. San Diego and London: Academic Press, 1997: 379-408.
- [5] Van J, Klironimos N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. *Nature*, 1998, 396: 69-72.
- [6] 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[J]. *Plant and Soil*, 1996, 179(1): 89-97.
- [7] 杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等. 丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 113-116.
Du shanzhou, Bi Yinli, Wu Wangyan, et al. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 113-116.
- [8] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS [C]//Stanley C F, Enrico P M, Margaret A B. Proceedings of the Third Earth Resource Technology Satellite -1 Symposium. Green-belt: NASA SP-351, 1973: 309-317.
- [9] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction

- from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [10] Hasegawa K, Matsuyama H, Tsuzuki H, et al. Improving the estimation of leaf area index by using remotely sensed NDVI with BRDF signatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 514-519.
- [11] Han L J, Wang P X, Yang H, et al. Study on NDVI-Ts space by combining LAI and evapotranspiration [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(7): 747-754.
- [12] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Trans Br Mycol Soc*, 1970, 55(1): 158-161.
- [13] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*[J]. *New Phytol*, 1984, 97(3): 437-446.
- [14] 何春阳, 周海丽, 于章涛, 等. 区域土地利用/覆盖变化信息处理分析 [J]. 资源科学, 2002, 24(2): 64-70.
He Chunyang, Zhou Haili, Yu Zhangtao, et al. *Resources Science*, 2002, 24(2): 64-70.
- [15] 穆兴民. 神木县农业气候资源及灾害天气分析 [J]. 水土保持研究, 1993(18): 24-35.
Mu Xingmin. *Research of Soil and Water Conservation*, 1993 (18): 24-35.
- [16] Chen H, Zheng Y, Zhu Y. Phosphorus: A limiting factor for restoration of soil fertility in a newly reclaimed coal mined site in Xuzhou, China [J]. *Land Degradation & Development*, 1996, 9(2): 176-183.
- [17] Simard S W, Perry D A, Jones M D, et al. Net transfer for carbon between ectomycorrhizal trees species in the field[J]. *Nature*, 1997, 388: 579-582.
- [18] Alizadeh O. Evaluation effect of water stress and nitrogen rates on amount of absorption some macro and microelements in corn plant mycorrhizae and non-mycorrhizae [J]. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2010, 4(2): 153-158.
- [19] 胡振琪, 陈宝政, 陈星彤. 应用探地雷达检测复垦土壤的分层结构[J]. 中国矿业, 2005, 14(3): 73-75.
Hu Zhenqi, Chen Baozheng, Chen Xingtong. *China Mining Magazine*, 2005, 14(3): 73-75.
- [20] 陈龙乾, 邓喀中, 徐黎华, 等. 矿区复垦土壤质量评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 449-452.
Chen Longqian, Deng Kazhong, Xu Lihua, et al. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1999, 28(5): 449-452.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)



《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章, 被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主, 兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿, 择优刊登。每篇书评以 2100 字左右为宜, 需配书影, 并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑: 陈广仁, 投稿邮箱: chenguangren@cast.org.cn。