毕银丽,郭晨,肖礼,等. 微生物复垦后土壤有机碳组分及其高光谱敏感性识别效应[J]. 煤炭学报,2020,45(12):4170-4177.
BI Yinli,GUO Chen,XIAO Li,et al. Identification of soil organic carbon components and hyperspectral sensitivity in microbial reclamation area[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(12):4170-4177.

移动阅读

微生物复垦后土壤有机碳组分及其高光谱敏感性识别效应

毕银丽[1,2],郭 晨[2],肖 礼[2],杜善周[3],王 义[3]

(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 3. 国家能源集团神东煤炭集团,内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘 要:微生物复垦技术是矿区环境治理的重要手段之一,对改善矿区的生态环境具有举足轻重的意义,而矿区微生物修复是一个生态持续演变过程,科学评价微生物复垦多年后采煤塌陷区的土壤质量和生态效应是目前亟待解决问题。为了探明接种丛枝菌根真菌(AMF)复垦多年后对采煤沉陷区土壤改良的生态效应,科学评价微生物复垦技术在矿区环境修复中的重要作用,以陕西神东采煤沉陷地 2012 年种植的紫穗槐复垦地为研究区,分析了接菌区和对照区 2 种不同处理下土壤基本理化性质、土壤活性有机碳、高光谱特征及其相互影响关系。研究结果表明:接种 AM 真菌 7 a 后土壤质地发生明显变化,土壤中全氮、有效磷和有机碳含量分别显著提高了 48.3%,17.7% 和 31.2%,增加了土壤的含水率;土壤酶活性在不同处理区表现出一定的差异,接菌区土壤脲酶和磷酸酶高于对照区,分别显著提高 28.6% 和 50.0%;土壤光谱反射率明显降低,变化最明显的为可见光 655 nm 波段,敏感波段为 630~680 nm;土壤光谱反射率的降低主要受土壤有机碳的影响;土壤碳组分中微生物生物量碳与有机碳及土壤各相理化指标存在很高的相关性,拟合度 R^2 均高于 0.7,显著性检验概率 P 均远低于 0.01,达到显著水平,可作为一项指标用来分析光谱特征。

关键词:土壤活性有机碳;光谱反射率;微生物复垦技术;丛枝菌根真菌

中图分类号:X171.4;S153.6 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2020)12-4170-08

Identification of soil organic carbon components and hyperspectral sensitivity in microbial reclamation area

BI Yinli[1,2],GUO Chen[2],XIAO Li[2],DU Shanzhou[3],WANG Yi[3]

(1. *College of Geology and Environment,Xi' an University of Science and Technology,Xi' an* 710054,*China*; 2. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,China University of Mining and Technology (Beijing),Beijing* 100083,*China*; 3. *CHN Energy Shendong Coal Group Co.,Ltd.,Ordos* 017209,*China*)

Abstract:Microbial reclamation technology is one of the important means of environmental management in mining areas,and it is of great significance for improving the ecological environment of mining areas. Microbial restoration in mining areas is a continuous ecological evolution process. The ecological effect is an urgent problem to be solved. In order to prove the ecological effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on soil improvement in coal mining subsidence areas after many years of reclamation,scientifically evaluate the important role of microbial reclamation

收稿日期:2019-11-09 **修回日期**:2020-05-14 **责任编辑**:黄小雨 **DOI**:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1553
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974326);首都科技领军人才资助项目(Z181100006318021)
作者简介:毕银丽(1971—),女,陕西米脂人,教授,博士生导师。E-mail:ylbi88@126.com

technology in the environmental restoration of mining areas, the cultivated area of Amorpha fruticosa was planted at the research area in 2012. The basic physical and chemical properties, soil active organic carbon, hyperspectral characteristics of the soil and the control area under two different treatments were analyzed. The results of the study showed that the soil texture changed significantly after 7 years of inoculation with AM fungi. Total nitrogen, available phosphorus and organic carbon in the soil were significantly increased by 48.3%, 17.7% and 31.2%, respectively, increasing the soil moisture content. Different treatment areas showed some differences. Soil urease and phosphatase in the inoculated area were higher than the control area, which were significantly increased by 28.6% and 50.0%, respectively. The spectral reflectance of the soil was significantly reduced. The most obvious change was the visible light 655 nm band, and the sensitive band was 630-680 nm. The decrease of soil spectral reflectance was mainly affected by soil organic carbon. The microbial biomass carbon in the soil carbon component was highly correlated with organic carbon and soil physical and chemical indicators, and the fitting degree R^2 was higher than 0.7, the significance test probability P was far below 0.01, reaching a significant level, and could be used as an indicator to analyze the spectral characteristics. After microbial reclamation, the ecological effects have been continuously improved.

Key words: soil active organic carbon; hyperspectral reflectance; microbial reclamation technology; arbuscular mycorrhizal fungi

煤炭是我国的主要能源和重要工业原料。“十二五”以来,在国家相关政策的支持下,我国煤炭工业取得了长足的发展,为我国经济社会平稳健康发展提供了有力的能源支撑[1],但同时也使大量土地遭到破坏并造成严重的生态环境问题,直接威胁我国保有耕地 1.2 亿 hm^2 的红线。土地复垦作为矿区环境修复和污染控制的一个有效手段,对改善矿区的生态环境具有十分重要的意义。植被恢复被认为是矿区生态重建最有效的措施,且恢复植被具有较高的林分生产力和满足碳库等养分的封存[2]。研究发现,植被恢复改善了矿区土壤结构和养分,促进了土壤酶活性,影响了矿区微生物群落结构,加速了矿区的可持续发展[3-4]。此外,微生物复垦可以加速矿区植被和土壤的修复效果,且菌根真菌可以与陆地上 80% 以上的植物形成菌根共生体,促进植物在逆境的生长[5]。接种丛枝菌根真菌(AMF)能够提高复垦区植物成活率[6],增加根系和地上生物量[7],同时加速根际周围土壤养分[8]。矿区微生物生态修复是一个持续过程,经过微生物复垦后能否在采煤沉陷地加速土壤有机质累积,促进土地高效利用是目前关注的主要问题之一。

土壤有机碳是评价土壤肥力的重要指标之一,是土壤肥力诊断、生产力评估、土地规划等工作的重要依据[9]。同时,土壤中的活性碳组分如溶解性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)等指标虽然在有机碳中所占的比例较小,但这些组分对不同农业管理措施如施肥、秸秆还田及耕作方式等的变化更敏感,常被用作评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标[10]。DOC 是氮、磷和硫元素的基本来源[11],在维持土壤肥力方面起着重要作用[12],其在土壤活性有机碳组分中最易于发生改变的部分,可以与其他碳组分相互转化[13]。MBC 是衡量土壤碳库的重要指标,在评价土壤质量方面发挥着指导作用[14]。因此,研究接种 AMF 对矿区土壤有机碳及其活性组分的变化,有利于揭示矿区重建植被对土壤有机碳的影响机制,具有重要生态学意义。此外,土壤有机碳的传统检测方法具有费时、费力、检测过程污染环境等缺点,高光谱遥感技术的出现则以高效、安全、实时的特点为解决这一难题提供了新途径[15],为土壤有机碳的高光谱定量反演奠定了基础。BENDOR 等[16]认为土壤有机碳对整个可见光、近红外和短波红外的土壤反射率都会产生影响,其中可见光区域影响最大。BARTHOLOMEUS 等[17]研究发现,不同母质类型土壤中的有机碳与近红外长波波段都有很好的相关性。张运林等[18]研究发现,红光波段与绿光波段反射率的对数值能较好的估计水体 DOC 浓度,而国内外对于土壤 DOC 和 MBC 却鲜有研究。由于土壤有机碳是具有某一特性的一类化合物的混合物,存在高度异质性,分析微生物复垦区土壤有机碳的高光谱特征,探讨不同碳组分与光谱特征之间关系,可为矿区微生物复垦区长期土壤养分累积提供指导价值。

笔者以我国首个微生物复垦长期监测示范基地中紫穗槐区为研究对象,比较了接菌和对照 2 个不同处理区域土壤基本理化性质、养分含量和有机碳组分特征,分析经过 7 a 微生物复垦后接菌区与对照区土壤的光谱特征差异,研究有机碳组分、高光谱特征与土壤因子的关系,以期为土壤微生物生物量碳在高光谱相应特征的研究提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省神木县大柳塔镇东山煤矿开采沉陷区国家水土保持示范园区(109.22°~111.17°E,38.83°~39.78°N),2012 年在园区内建立起微生物(菌根)复垦示范基地,研究微生物复垦长效生态效应。该地属典型的干旱半干旱区大陆性季风气候,年平均降水量 441 mm,主要集中在 7~9 月,年际与年内降水分配极不均匀;年均蒸发量为 1 337 mm,是降水量的 3 倍多,年平均气温 8.9 ℃,年极端最高气温 38.9 ℃,年极端最低气温-28.1 ℃;平均日照 2 875.9 h,日照率为 65%;塌陷区盛行偏西和西北大风,全年平均大风日数 14 d。土壤类型主要为风沙土,土质疏松,养分贫瘠,蓄水保肥、抗蚀力差[19]。土壤本底的基本理化性质是:pH = 8.35,电导率 164.36 μS/cm,速效磷 8.16 mg/kg,速效钾 66.20 mg/kg,碱解氮 32.12 mg/kg,全氮 0.601 g/kg,有机质 12.69 g/kg。供试植物紫穗槐(*Amorpha fruticosa L.*)为豆科(*Leguminosae*)紫穗槐属(*Amorpha L.*)的多年生落叶灌木,根系发达,适应性强,是干旱区生态恢复的先锋树种[20]。接种的供试菌株是摩西球囊霉(*Glomus mosseae*,*G. m*),菌根接种剂是经本实验室采用玉米盆栽扩繁的含有玉米根段相应菌根真菌孢子及根外菌丝体的根际土壤,菌丝密度为 4.66 m/g 风干土,孢子密度为 61 个/g 风干土。

1.2 土壤样品采集与制备

供试土壤取自该微生物复垦试验区中种植 7 a 的紫穗槐试验地,该区地势平坦,在种植前植被稀疏,零星油蒿和禾草分布。种植紫穗槐 7 a 后接种 AM 真菌区的植物株高和冠幅仍显著大于对照区,紫穗槐人工灌木林样地内的林下植被以菊科、乔本科、豆科、黎科和萝藦科为主,接种 AM 真菌提高了紫穗槐人工林灌木层物种多样性,降低了草本层物种多样性[21]。复垦区表土层由黏土、亚黏土、中细粉砂土组成。土样采集分别在接菌区和对照区设置 1 m×1 m 的样方,该样方内采用“S”形布点法,采集 7 个 0~20 cm 的表层土,充分混合作为一个样品。接菌区和对照区分别随机布设 10 个样方作为重复点。将上述土壤样品分为 2 部分:一部分自然风干,去除植物残体和杂物后,过 1 mm 和 0.15 mm 筛分别用于高光谱和有机质测定;另一部分冷藏在 4 ℃的环境下,用于硝态氮、铵态氮和微生物生物量氮的测定。

1.3 土壤参数测定

土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤 pH 和土壤有效磷(AP)均参照土壤农化分析[9]。土壤铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)采用连续流动分析仪,土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶采用分光光度计,土壤微生物生物量碳和溶解性活性有机碳采用氯仿熏蒸-K_2SO_4 浸提-TOC 测定。菌根侵染率和菌丝密度均采用常规方法[22]。土壤机械组成采用激光粒度分析仪(测试粒径为 0.012 8~2 000 μm)进行测定,参考国际制分级标准对土壤质地进行分级:砂粒(20~2 000 μm)、粉粒(2~52 μm)、黏粒(<2 μm)。

1.4 光谱测定及反射率变化量的计算

高光谱数据的测量采用美国 SVC 公司生产的 SVC HR-1024I 高性能地物光谱仪在暗室内进行,源为 50 W 卤化灯,探头视场角为 25°,将过筛的土壤样品装入直径 10 cm,深 2 cm 的盛样器中,并用直尺将样品表面刮平,每个土样重复测 10 次,取其算术平均值作为该土样的反射率光谱值。

采用反射率差值(Reflectance difference,R_D)和反射率相对变化量(Relative variation of reflectance,R_{VR})这 2 个统计指标比较接菌处理和对照土壤反射率的变化情况,其计算公式为

$$R_D = \rho_B(\lambda) - \rho_A(\lambda) \tag{1}$$

$$R_{VR} = \rho(\lambda)/\rho_A(\lambda) \times 100 \tag{2}$$

式中,$\rho_B(\lambda)$为接菌处理土壤各波段的光谱反射率;$\rho_A(\lambda)$为对照处理土壤各波段的光谱反射率;$\rho(\lambda)$为接菌处理和对照处理的光谱反射率的差值。

1.5 数据处理

数据处理采用 Excel 2013 和 SPSS18.0,并采用 Origin2018 进行画图。

2 结果与分析

2.1 长期微生物复垦后的菌根效应

菌根侵染率和根外菌丝密度是评价接菌效应的重要指标。由表 1 可知,紫穗槐人工样地接菌区的菌根侵染率和根外菌丝密度均显著大于对照区,表明人工接菌 7 a 后菌根真菌仍持续发挥作用,对照区植物根系中存在一定的土著菌根真菌。人工接菌后菌群仍然维持较高的侵染能力。

2.2 长期微生物复垦后对土壤理化性状的影响

丛枝菌根真菌在改良土壤性状方面具有重要作用[23]。氮是评价土壤肥力的重要指标,表 2 结果表明,接种 AM 真菌的根际土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量显著高于对照组。与 CK 处理相比,接种 AM 真菌土壤有效磷显著提高了 17.7%,土壤全磷含量的高

表 1　接种 AM 真菌对菌丝密度和菌根侵染率的影响

Table 1　Effect of inoculation of AM fungi on mycelial density and mycorrhizal infection rate

处理方法	侵染率/%	菌丝密度/($m \cdot g^{-1}$)
FM	70.23±0.98a	2.87±0.69a
CK	26.45±1.77b	1.82±0.69b

注:FM 为接菌处理;CK 为对照组;不同小写字母表示在 5% 水平上有显著差异(P<0.05)。

低虽通常不能直接表明土壤供应磷素的能力,但它是一个潜在的肥力指标,在土壤缺磷的状况下,土壤有效磷可为评价土壤肥力提供参考。土壤酶活性在不同处理区表现出一定的差异,接菌区土壤脲酶和磷酸酶含量高于对照区,分别显著提高 28.6% 和 50.0%,这是因为土壤脲酶活性与土壤的微生物数量、有机物质含量、全氮和速效磷含量呈正相关,在土壤缺磷条件下,通过接种丛枝菌根真菌可以释放磷酸酶。接菌土壤的 pH 较对照略呈碱性。

由表 3 中可以看出,接菌和对照处理的土壤粒径组成总体情况相同:沙粒(粗沙粒、细沙粒)>粉粒>黏粒。无论接菌处理还是对照处理,黏粒质量分数最高在 1% 左右,粉粒质量分数也明显低于沙粒。接菌处理的土壤构成中细沙粒、粉粒和黏粒所占比重均高于对照处理,而只有粗沙粒所占比重低于对照处理。在接菌处理的土壤粒径组成中,细沙粒、粉粒和黏粒所占比例总和超全部的 60%,接菌有利于团聚体的聚合形成。此外,接菌区土壤含水率显著高于对照组,这可能与接种 AM 真菌的植物生长大,降低地表水分蒸腾,保水能力强有关。

表 2　接种 AM 真菌对土壤化学特性的影响

Table 2　Effects of inoculation with AM fungi on soil chemical properties

处理方法	化学成分质量分数/($mg \cdot kg^{-1}$)							pH
	全氮	有效磷	NO_3^--N	NH_4^+-N	脲酶	蔗糖酶	磷酸酶	
FM	0.43±0.04a	27.21±2.15a	7.74±0.65a	16.08±0.55a	0.45±0.02a	6.27±1.45a	0.30±0.01a	7.53±0.08a
CK	0.29±0.02b	23.12±1.25b	2.71±0.72b	7.12±0.43b	0.35±0.04b	7.17±0.49a	0.20±0.05b	7.34±0.04b

表 3　接种 AM 真菌对土壤物理性质的影响

Table 3　Effects of inoculation with AM fungi on soil physical properties　%

处理方法	不同粒径质量分数				土壤含水率
	粗沙粒(0.2~2.0 mm)	细沙粒(0.02~0.20 mm)	粉粒(0.002~0.020 mm)	黏粒(<0.002 mm)	
FM	39.13	48.35	11.29	1.23	5.41±0.59a
CK	46.34	45.30	7.48	0.88	2.60±0.35b

2.3　长期微生物复垦后对土壤有机碳及碳组分的影响

大柳塔微生物复垦区紫穗槐土壤有机碳(SOC)及其组分溶解性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)质量分数的变化,如图 1 所示。图中不同小写字母表示在 5% 水平上有显著差异(P<0.05)。由图 1 可知,土壤有机碳质量分数表现为接菌区高于对照区,显著提高 31.2%。接种 AM 真菌对土壤溶

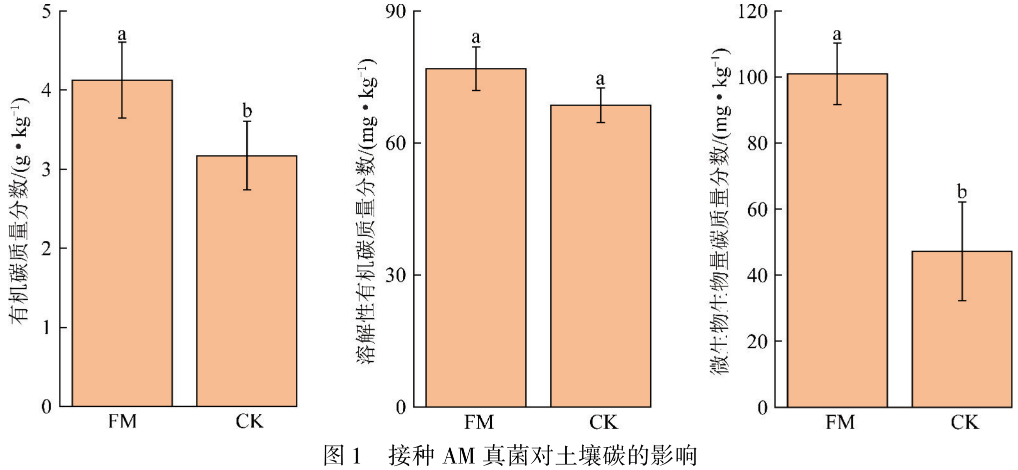


图 1　接种 AM 真菌对土壤碳的影响

Fig. 1　Effects of AM fungi inoculation on soil carbon

解性碳无显著影响,但呈上升趋势。接菌区的微生物生物量碳质量分数显著高于对照区,接菌促进了微生物生物量碳的积累,与接菌促进植物快速生长有关[8]。

2.4 复垦土壤光谱反射率特征

有机碳是影响土壤反射率的主要因素之一,研究有机碳的敏感波段可为其光谱定量反演提供重要的理论依据。KISHNAN 等[24]研究发现 564,623 nm 波段是诊断土壤有机碳含量的敏感波段,利用可见光波段估测土壤有机碳的效果要优于近红外波段。GALVO 等[25]研究发现有机碳引起的吸收峰的波段为 550~700 nm。徐明星等[26]利用可见光波段、以 1 400 nm 为中心和 1 900~2 450 nm 的红外波段确定为估算土壤有机质含量的最佳波段。本试验通过接菌技术引起土壤有机碳的变化,从而影响反射率的变化,分析有机碳敏感波段。

从试验区接菌处理和对照处理土壤的光谱曲线(图 2)可以看出,接菌区土壤反射率随整体要比对照区低,光谱曲线在可见光范围内差异较大。接菌区土壤光谱与对照区土壤光谱除在光谱反射率强度不同外,一些特征吸收带出现的位置近似相同。具体表现为,2 种土壤光谱反射率曲线在 400~600 nm 斜率较陡,在 600~800 nm 斜率趋于平缓,在 800~1 350 nm 斜率更趋于平缓,在 1 400~1 900 nm 光谱曲线近似一条直线,在 1 900~2 100 nm 曲线变化平缓,在 2 100~2 500 nm 光谱曲线可由 2 150 nm 和 2 400 的连线段表示,且光谱曲线单调递减;在 560,900,1 400,1 900,2 150,2 340 nm 附近出现不同程度的特征吸收带,所以该范围内的光谱形状特征可大致由 400,600,800,1 350 nm 所构成的折线和 560,900,1 400 nm 处的特征吸收来确定。本研究选取 400,600,800,1 350,1 800,2 100,2 400 nm 处的反射率(分别记为 R400,R600,R800,R1350,R1800,R2100,R2400)和 400~600,600~800,800~1 350,1 350~1 800,1 800~2 100,2 100~2 400 nm 光谱段的趋势斜率(分别记为 SA,SB,SC,SD,SE,SF)作为光谱反射率曲线控制点参数,并将其列于表 4 中。

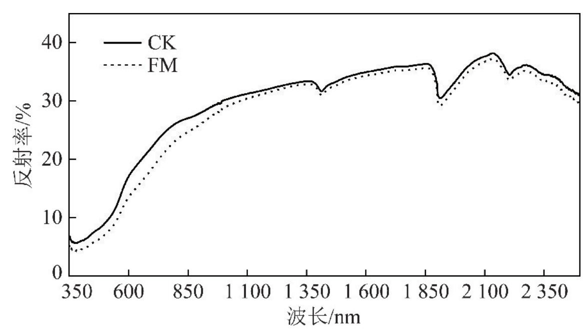


图 2 接菌处理和对照处理土壤光谱曲线

Fig. 2 Soil spectral curves of inoculation treatment and control treatment

表 4 光谱曲线控制点的特征参数

Table 4 Characteristic parameters of spectral curve control points

处理	光谱反射率/%							光谱趋势斜率					
	R400	R600	R800	R1350	R1800	R2100	R2400	SA×100	SB×100	SC×100	SD×100	SE×100	SF×100
FM	5.981	17.060	26.183	33.654	36.187	37.608	33.961	5.540	4.562	1.358	0.563	0.474	−1.216
CK	5.320	14.297	23.085	33.352	36.065	37.504	33.644	4.489	4.394	1.867	0.603	0.480	−1.287

注:用各光谱段的趋势斜率乘数值 100 是为了更直观反映光谱反射率曲线控制点参数情况。

土壤的光谱特征是土壤理化性质的综合反映,为了解接菌处理对土壤反射率的影响程度,笔者采用差值运算的方法来提取一些隐含的信息。对同一地物进行不同处理,差值运算通过相减的数值来反映同一地物接菌处理和对照处理光谱反射率之间的差异,且该差值能够将接菌处理所引起的光谱反射率的差异信息凸显出来。根据土壤接菌处理和对照处理在各个波段反射率的变化做出图 3。由图 3 可以看出,土壤接菌处理后在 350~2 500 nm 波段内,反射率均有明显降低,可不同波段反射率的变化幅度却有所不同,可见光波段的变化幅度要比紫外波段和近红外波段的大,整体情况是以 655 nm 为中心,在 630~680 nm 的变化幅度最大,近红外波段的变化幅度最小,初步将土壤有机碳的敏感波段确定为可见光波段 650 nm 附近。

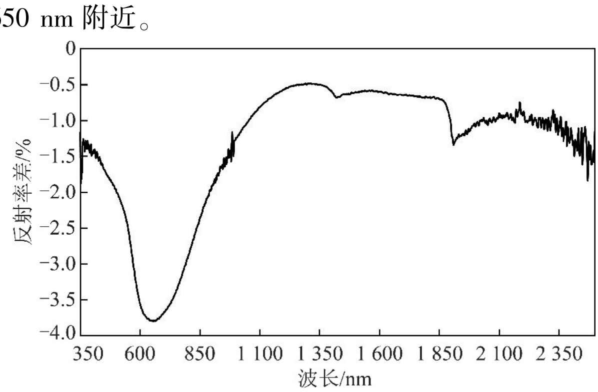


图 3 接菌处理与对照处理土壤反射率差值

Fig. 3 Difference between soil reflectance and inoculation treatment

除此以外,进一步统计了紫外波段、可见光波段、近红外波段接菌后有机碳增加的反射率相对变化量(表 5)。由表 5 可知,在紫外波段、可见光波段和近红外波段 3 个波段中,就其平均相对变化量而言,变化最大的为可见光波段,为-13.20%,与差值分析的结果相一致。其次为紫外波段,为-10.54%。红外波段的变化情况最小,只有-0.81%,表明土壤有机碳对可见光波段的反射率有较大影响,进一步证实了上述内容。其中,紫外波段反射率相对变化量也非常高,原因就在于虽然紫外波段接菌处理与对照处理的差值较小,但同时该波段土壤反射率一般也很低,将差值除以土壤反射率后,该相对变化量得到了放大。

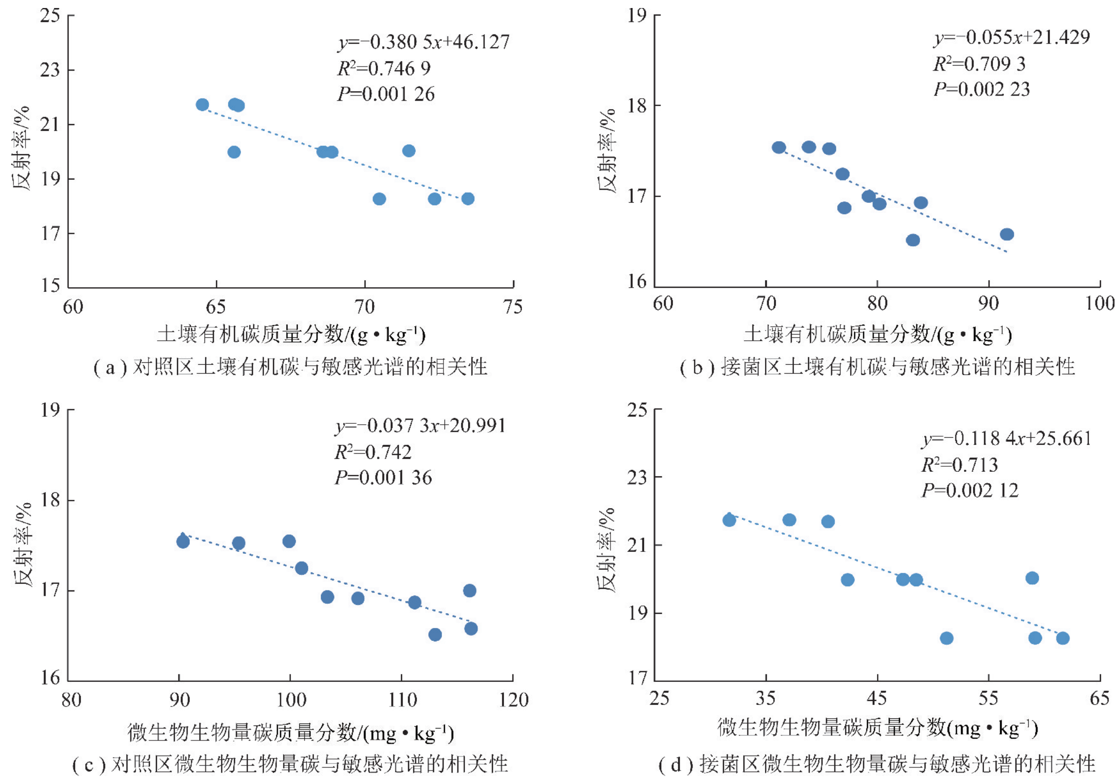
表 5　接菌处理有机碳在紫外、可见光、近红外波段反射率的相对变化量

Table 5　Relative changes in reflectance of organic carbon in the ultraviolet, visible, and near-infrared bands　%

紫外波段 (350～380 nm)	可见光波段 (380～760 nm)	近红外波段 (760～2 500 nm)
-10.54	-13.20	-0.81

2.5　复垦土壤有机碳组分与敏感光谱的相关性分析

由于接菌区土壤有机碳含量及微生物量碳含量显著高于对照区,光谱在 655 nm 处表现出极高的敏感性,为了比较微生物复垦区土壤有机碳及微生物生物量碳与敏感光谱之间的相互作用,进行了相关性分析如图 4 所示。其中,图 4(a),(c)为对照区土壤,图 4(b),(d)为接菌区土壤。结果表明,无论是接菌区还是对照区,土壤有机碳和微生物生物量碳均与敏感光谱 655 nm 处的反射率表现出负相关关系,对照区拟合度 R^2 略高于接菌区,但均高于 0.7,显著性检验概率 P 均远低于 0.01,达到显著水平,说明土壤有机碳和微生物生物量碳均与敏感光谱 655 nm 处的反射率之间存在显著负相关。



(a)对照区土壤有机碳与敏感光谱的相关性

(b)接菌区土壤有机碳与敏感光谱的相关性

(c)对照区微生物生物量碳与敏感光谱的相关性

(d)接菌区微生物生物量碳与敏感光谱的相关性

图 4　土壤有机碳组分与敏感光谱的相关性

Fig. 4　Correlation between soil organic carbon components and sensitive spectra

3　讨　　论

人工林下植被的重要功能就是涵养水源和保持水土,促进森林生态系统的物质和能量循环、维持群落的物种多样性和系统的稳定性[27]。研究发现,接种 AM 真菌能够促进人工林林下植物结构的的演替过程,土壤会出现碳差异[21]。研究还发现,林下植被越丰富,地表凋落量越充足,土壤有机碳含量和有机碳密度在土壤表层具有很强的表聚性[28]。大柳塔采煤沉陷地经过多年微生物复垦,土壤出现碳累积效应,这可能与林下植被的生长和多样性有关。土壤呼吸的影响对碳循环非常关键,而土壤温度对呼吸速率作用很大。在本研究中,AM 接菌区林下植被长势良好,土壤含水率显著高于对照区,为矿区复垦地土壤呼吸创造了良好

条件,加速对有机质分解。此外,地上部分的碳输入对土壤呼吸影响非常大,地表凋落物可为微生物提供碳源,AM 真菌利用丰富的地表凋落物通过微生物作用改变地表环境,进而影响土壤呼吸和碳循环。

土壤粒径分布是最基本的土壤物理性质之一,它强烈地影响着水力热力性质等重要的土壤物理特性。土壤中各种粒径的颗粒所占的比例使得土壤质地不同,可将其分为砂土、壤土、黏土。赵明松等[29]研究发现,粉粒含量的增加会间接使土壤有机碳含量得到提高。彭杰等[30]研究发现,对土壤做去有机质处理后,土壤的光谱反射率明显提高。本研究结果表明,接菌区土壤光谱反射率低于对照区土壤光谱反射率,这可能与接菌区土壤粉粒含量占比和有机碳含量均高于对照区有关。土壤反射光谱特征是受土壤类型、土壤有机碳含量、土壤质地、土壤湿度等的综合响应。本研究所选样品土壤均为大柳塔复垦地紫穗槐区林下土壤,经过筛、风干处理后,基本消除了土壤类型和土壤湿度对土壤光谱的影响。本研究中,接菌处理使得土壤颗粒粒径变小,粉粒和黏粒所占比重增加,结构更加稳定,将土壤风干去除土壤含水率这一影响因素,理论上光谱反射率应该提高,而受有机碳的影响实际呈现降低的情况,说明土壤有机碳对光谱反射率的影响要比土壤粒径的大。此外,土壤微生物生物量碳是土壤有机碳和土壤养分转化与循环的重要驱动,而国内外学者对土壤有机碳的碳组分对光谱特征的影响却鲜有研究,本研究通过对土壤有机碳组分的测定和相关分析,发现微生物生物量碳与 655 nm 处的反射率之间存在显著负相关,为土壤微生物生物量碳在高光谱相应特征的研究提供了新思路。

4 结 论

(1)在接菌 7 a 后,土壤质地发生了明显变化,粉粒比重增加,增强了土壤保水能力;土壤养分得到明显改善,土壤有机碳、全氮、有效磷、硝态氮及铵态氮含量明显提高。

(2)土壤接菌处理后,在 350～2 500 nm 波段内的各个波段反射率均有所降低,在可见光范围内更为显著。通过对反射率相对变化量和相关性分析,将 630～680 nm 波段确定为有机碳的敏感波段,最敏感的为可见光 655 nm 波段。

(3)土壤有机碳和微生物生物量碳与敏感光谱处的反射率存在显著负相关性,是引起光谱变化的重要因素。本文对微生物复垦区土壤碳组分的光谱特性进行了初步研究,其影响程度与影响机制还有待进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 王显政. 能源革命和经济发展新常态下中国煤炭工业发展的战略思考[J]. 中国煤炭,2015,41(4):10-13.
WANG Xianzheng. Strategic consideration of China coal industry development during energy revolution and new normal of economic development[J]. China Coal,2015,41(4):10-13.

[2] YUAN Ye,ZHAO Zhongqiu,BAI Zhongke,et al. Reclamation patterns vary carbon sequestration by trees and soils in an opencast coal mine,China[J]. Catena,2016,147:404-410.

[3] BI Yinli,WANG Kun,WANG Jin. Effect of different inoculation treatments on AM fungal communities and the sustainability of soil remediation in Daliuta coal mining subsidence area in northwest China[J]. Applied Soil Ecology,2018,132:107-113.

[4] PETRA F,KATJA K,KATRIN K,et al. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump[J]. Soil Biology and Biochemistry,2013,56:87-89.

[5] SMITH S E,READ D J. Mycorrhizal symbiosis[J]. Quarterly Review of Biology,2008,3(3):273-281.

[6] 岳辉,毕银丽. 基于野外大田试验的接菌紫穗槐生态修复效应研究[J]. 水土保持通报,2017,37(4):1-5,19.
YUE Hui,BI Yinli. Field experiment ofecological restoration application of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on Amorpha fruticosa[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,37(4):1-5,19.

[7] 孙金华,毕银丽,王建文,等. 接种 AM 菌对西部黄土区采煤沉陷地柠条生长和土壤的修复效应[J]. 生态学报,2017,37(7):2300-2306.
SUN Jinhua,BI Yinli,WANG Jianwen,et al. Effects of inoculation with AM bacteria on the growth and soil remediation of Caragana korshinskii in coal mining subsidence in western loess area[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2300-2306.

[8] 胡晶晶,毕银丽,龚云丽,等. 接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):344-348,354.
HU Jingjing,BI Yinli,GONG Yunli,et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth of Xanthoceras sorbifolia and soil properties in coal mining subsidence area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(5):344-348,354.

[9] 鲍士旦,秦怀英,劳家柽,等. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社,1990.

[10] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. 生态学报,2015,35(11):3733-3742.
LI Jianlin,JIANG Changsheng,HAO Qingju. Distribution characteristics of soil organic carbon and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(11):3733-3742.

[11] POWLSON D S,JENKINSON D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—II. Gamma irradiation,autoclaving,air-drying and fumigation[J]. Soil Biology & Biochemistry,1976,8(3):179-188.

[12] 张华渝,王克勤,宋娅丽,等. 滇中尖山河小流域不同土地利用

类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 水土保持研究,2019,26(3):22-27.
ZHANG Huayu,WANG Keqin,SONG Yali,et al. Distribution characteristics of soil active organic carbon in different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(3):22-27.

[13] 肖烨,黄志刚,武海涛,等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报,2015,35(23):42-50.
XIAO Ye, HUANG Zhigang, WU Haitao, et al. Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(23):42-50.

[14] 蓝兴福,王晓彤,许旭萍,等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的影响[J]. 生态学报,2018,39(21):7968-7976.
LAN Xingfu, WANG Xiaotong, XU Xuping, et al. Subsequent effects of slag and biochar application on soil carbon pools and soil microoganisms in paddy fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,39(21):7968-7976.

[15] 沈强,张世文,葛畅,等. 矿业废弃地重构土壤重金属含量高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析,39(4):224-230.
SHEN Qiang,ZHANG Shiwen,GE Chang,et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in soils reconstituted by mining wasteland[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,39(4):224-230.

[16] BENDOR E,INBAR Y,CHEN Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region(400-2500 nm) during a controlled decomposition process[J]. Remote Sensing of Environment,1997,61(1):1-15.

[17] BARTHOLOMEUS H M,SCHAEPMAN M E,KOOISTRA L,et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification[J]. Geoderma,2008,145(1):28-36.

[18] 张运林,黄群芳,马荣华,等. 基于反射率的太湖典型湖区溶解性有机碳的反演[J]. 地球科学进展,2005,20(7):772-777.
ZHANG Yunlin,HUANG Qunfang,MA Ronghua,et al. Retrieving of dissolved organic carbon based on irradlance reflectance in typicai lake zones of lake Taihu[J]. Advances in Earth Science,2005, 20(7):772-777.

[19] 李少朋,毕银丽,孔维平,等. 丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果[J]. 环境科学,2013,34(11):4455-4459.
LI Shaopeng,BI Yinli,KONG Weiping,et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas[J]. Environmental Science, 2013, 34 (11): 4455-4459.

[20] 岳辉,毕银丽. 基于主成分分析的矿区微生物复垦生态效应评价[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(4):113-117.
YUE Hui,BI Yinli. Evaluation on ecological effect of microbial reclamation in coal mining area based on principal component analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(4):113-117.

[21] 毕银丽,申慧慧. 西部采煤沉陷地微生物复垦植被种群自我演替规律[J]. 煤炭学报,2019,44(1):307-315.
BI Yinli, SHEN Huihui. Effect of micro-reclamation on different planted forest on the vegetation self-succession in the western mining subsidence area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):307-315.

[22] 裘浪,全文智,毕银丽,等. 覆膜与接种微生物对半干旱区玉米生长特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2017, 36(10):7-13.
QIU Lang,QUAN Wenzhi,BI Yinli,et al. Impact of mulching with plastic film and microbial inoculation on growth and water use efficiency of maize in semiarid regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2017,36(10):7-13.

[23] 毕银丽. 丛枝菌根真菌在煤矿区沉陷地生态修复应用研究进展[J]. 菌物学报,2017,36(7):800-806.
BI Yinli. Research advance of application of arbuscular mycorrhizal fungi to ecological remediation in subsided land of coal mining areas[J]. Mycosystema,2017,36(7):800-806.

[24] KRISHNAN P, ALEXANDER J D, BUTLER B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter1[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(6):1282.

[25] GALVAO L S,VITORELLO I. Variability of laboratory measured soil lines of soils from Southeastern Brazil[J]. Remote Sensing of Environment,1998,63(2):166-181.

[26] 徐明星,周生路,丁卫,等. 苏北沿海滩涂地区土壤有机质含量的高光谱预测[J]. 农业工程学报,2011,27(2):219-223.
XU Mingxing,ZHOU Shenglu,DING Wei,et al. Hyperspectral reflectance models for predicting soil organic matter content in coastal tidal land area,northern Jiangsu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(2):219-223.

[27] 刘世荣,杨予静,王晖. 中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报,2018,38(1):1-10.
LIU Shirong, YANG Yujing, WANG Hui. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China:transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(1): 1-10.

[28] 秦嘉海,张勇,赵芸晨,等. 黑河上游冰沟流域 4 种土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系[J]. 干旱地区农业研究,2013, 31(5):200-206.
QIN Jiahai,ZHANG Yong,ZHAO Yunchen,et al. Characteristics of organic carbon and soil properties in Binggou valley at upstream of Heihe river[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2013, 31(5):200-206.

[29] 赵明松,张甘霖,李德成,等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究[J]. 地理科学,2013,33(1):83-89.
ZHAO Mingsong,ZHANG Ganlin,LI Decheng,et al. Spatial variability of soil organic matter and factor analysis in the south of middle Jiangsu Plain[J]. Scientia Geographica Sinica,2013,33(1): 83-89.

[30] 彭杰,周清,张杨珠,等. 有机质对土壤光谱特性的影响研究[J]. 土壤学报,2013,50(3):517-524.
PENG Jie,ZHOU Qing,ZHANG Yangzhu,et al. Effect of soil organic matter on spectral characteristics of soil[J]. Acta Pedologica Sinica,2013,50(3):517-524.