



露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系

焦晓亮 尹可敬 毕银丽 李明超 田乐煊

引用本文：

焦晓亮, 尹可敬, 毕银丽, 等. 露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 316–327.

JIAO Xiaoliang, YIN Kejing, BI Yinli. Plant diversity and its relationship with soil enzyme activities and nutrients under different reclamation treatments in open-pit coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 316–327.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

露天矿区周边植物多样性与土壤养分空间变异性特征

Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5683ab9d-1137-430e-aedf-d5f9f2dae352>

土壤微生物及酶活性对露天矿不同土壤重构方式的响应特征

Response characteristics of soil microorganisms and enzyme activities to different soil remodeling modes in open-pit mine

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 249–260 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a8308372-8744-4b78-abd7-7d4297133260>

接种菌根对采煤沉陷区苜蓿生长及土壤改良影响研究

Research on effect of arbuscular mycorrhizal fungi on alfalfa growth and soil improvement in mining subsidence area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3f9bea58-ed47-402a-821e-6a2b3ad717b0>

神东矿区接种AMF对植物土壤生态化学计量及养分回收的影响

Effects of AMF inoculation on plant–soil ecological stoichiometry and nutrient recovery in Shendong mine

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 354–363 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0273>

煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展

Research progress of biological improvement of reclaimed soil in coal mining area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d826881c-0a94-4ffa-813f-243f87a03a9e>

煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系—以灵武矿区生态修复初期为例

Relationship between plant species diversity and soil chemical properties in coal gangue dump: early stage of ecological restoration in Lingwu Mining Area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5a808e39-f649-4d4f-8a7a-ae2eb2463316>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

煤炭加工与环保



焦晓亮, 尹可敬, 毕银丽, 等. 露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 316-327.

JIAO Xiaoliang, YIN Kejing, BI Yinli, et al. Plant diversity and its relationship with soil enzyme activities and nutrients under different reclamation treatments in open-pit coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 316-327.

移动扫码阅读

露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系

焦晓亮¹, 尹可敬², 毕银丽^{2,3}, 李明超², 田乐煊²

(1. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054;
3. 中国矿业大学(北京) 矿山生态修复研究院, 北京 100083)

摘要: 为探究露天采煤区不同复垦处理下植物多样性变化规律及其与土壤酶活性和养分指标间的关系, 以黑岱沟矿区沙棘和紫穗槐复垦地为研究区域, 结合多种分析方法, 研究了 4 种修复措施(接菌 I、接菌+绿肥 IG、接菌+绿肥+风化煤 IDG 与不接种对照 CK)下植物多样性变化规律、土壤养分、土壤酶活性间的差异情况以及三者间的重要关系。研究结果表明: 复垦区植物群落结构和组成较为单一, 不同修复措施样地间普遍存在的植物种主要为早熟禾和披碱草。虽然复垦区整体尚处在植被恢复初期, 但不同修复措施间植物多样性指数存在显著差异, I 处理沙棘和紫穗槐样地的 Shannon-Wiener 指数较对照处理分别显著提高了 81.61% 和 42.70%, IDG 处理则分别显著提高了 54.02% 和 31.46%。综合比较不同复垦措施的土壤修复效果发现, I、IDG 处理对复垦区改良效果最为显著。I、IDG 处理沙棘和紫穗槐复垦区土壤有机质、全氮含量及土壤脲酶、碱性磷酸酶的活性均显著超过了对照处理含量的 1 倍以上。同时, 土壤养分、土壤酶活性与物种多样性间存在显著的正相关关系, 其中有机质、全氮含量、脲酶和磷酸酶活性是影响复垦区植物群落多样性变化的主要因素。综上所述, 煤矿区生态恢复过程中施加一定的复垦措施确实对植物多样性增加和土地改良存在积极作用, 同时这一结果也可为矿区生态修复工作提供更多的理论基础和科学意义。

关键词: 复垦区; 丛枝菌根真菌; 土壤养分; 土壤酶活性; 植物多样性

中图分类号: S154.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)S2-0316-12

Plant diversity and its relationship with soil enzyme activities and nutrients under different reclamation treatments in open-pit coal mining area

JIAO Xiaoliang¹, YIN Kejing², BI Yinli^{2,3}, LI Mingchao², TIAN Lexuan²

(1. Shenhua Group Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300, China; 2. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Area of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Institute of Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the variations in plant diversity and its correlation with soil enzyme activity and nutrient indexes in an open pit coal mining area under different reclamation treatments. The present study focused on the reclamation land of Hippophae rhamnoides and Amorpha fruticosa in the Hedaigou mining area as the research site. By employing various analytical methods, we investigated changes in plant diversity, differences in soil nutrient content and soil enzyme activities, as well as the significant relationships among four restoration treatments (inoculation (I), inoculation + green fertilizer (IG), inoculation + green fertilizer + weathered coal (IDG) and non-inoculation control (CK)). The results showed that the plant community structure and composition in the reclamation area

收稿日期: 2022-12-22 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2224

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF1303300); 国家自然科学基金资助项目(51974326)

作者简介: 焦晓亮(1985—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 工程师。E-mail: 718814511@qq.com

were relatively simple, and the common plant species among the plots with different restoration treatments were mainly *Poa annua* and *Elymus dahuricus*. Although the whole reclamation area was still in the early stage of vegetation restoration, there were significant differences in plant diversity indices among different restoration treatments. Compared with the control treatment, the Shannon-Wiener index of *Hippophae rhamnoides* and *Amorpha fruticosa* samples under I treatment was significantly increased by 81.61% and 42.70%, respectively, and that under IDG treatment was significantly increased by 54.02% and 31.46%, respectively. Comprehensive comparison of the soil restoration effect of different reclamation treatments found that I and IDG treatment had the most significant effect on the improvement of reclamation area. The contents of organic matter and total nitrogen and the activities of urease and alkaline phosphatase in soil of treatments by inoculation and inoculation + green fertilizer + weathered coal were more than one times of those treated with control. At the same time, soil nutrients and soil enzyme activities were positively correlated with species diversity, among which organic matter, total nitrogen content, urease and phosphatase activities were the main factors affecting plant community diversity in reclamation area. In conclusion, The application of certain reclamation measures in the process of ecological restoration in coal mining areas does have a positive effect on the increase of plant diversity and land improvement, and this result can also provide more theoretical basis and scientific significance for ecological restoration in coal mining areas.

Key words: reclamation area; arbuscular mycorrhizal fungi; soil nutrients; soil enzyme activity; plant diversity

0 引言

我国煤炭资源储量丰富,在我国能源结构的生产和消费中占比巨大。当前,煤炭资源开发主要集中在我国西部地区^[1]。据调查,黄河流域煤炭查明储量占全国的45.25%,同时因其具备地质条件好、产煤品质优良等优点,所以黄河流域已成为我国西部矿区煤炭产业最重要的生产基地^[2]。煤炭开采虽然给我国经济和社会发展作出了巨大的贡献,但同时也导致了一系列生态环境问题^[3-8]。李巧刚^[3]对西北黄土高原地区陈家沟煤矿区的调查发现,长期地下开采已造成约518.41 hm²地面发生塌陷,同时造成土地被损毁,损毁面积已达到543.04 hm²。雷少刚^[4]研究发现,受采煤沉陷影响,补连塔采煤区土壤含水量低于非采煤区。赵国平等^[5]通过对塌陷时间1~2年的神府煤田风沙区的研究发现,对照区域土壤颗粒组成中细砂和极细砂的占比超过了60%,而采煤塌陷区的土壤颗粒组成中粗砂和中砂的占比则超过了60%,导致塌陷区被风蚀的可能性大大提高。包玉英等^[6]通过对宝日希勒露天煤矿区土壤微生物和土壤酶活性的调查研究发现,与对照区相比,矿坑周边土壤中微生物如细菌、真菌的数量显著降低,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶的活性则明显受到抑制。此外,也有研究表明,地下采煤作业还可能会造成当地的地下水位降低、地下水补排平衡状态被破坏以及水体遭到污染等问题^[7]。黄河流域煤炭开采区域具有气候干旱、降雨量少、抗扰动能力差等生态环境特点,而长期的大规模露天或井工开采往往会造成当地原始植被被破坏、地表沉陷等问题,最终导致当地环境进一步恶化^[1]。因此,对该区域由于大规模煤炭开采所造成生态环境问题进行及时有效的修复就显得尤为重要和急迫。

通常,矿区的生态修复可分为自然修复和人为修复,自然修复是一个非常缓慢的过程,而在自然修复过程中,施加人工复垦措施,可以大大缩短自然修复的周期,提高自然修复的速率^[9]。如王丽丽等^[10]发现,砒砂岩沙黄土混掺、风化煤黄土混掺对矿区土壤养分改善具有积极作用。刘宇飞等^[11]发现添加豆科绿肥不仅可以有效补充土壤的氮素营养,还对复垦区紫穗槐具有显著的促生效应。利用植物-微生物联合修复受损土壤也是近年来众多学者广泛关注的一个重点^[12-15]。丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)是自然界中普遍存在的一种土壤微生物^[12]。以往研究表明,丛枝菌根真菌具有改善土壤结构,增加土壤肥力,提高土壤生物活性的功能^[13-15]。同时,丛枝菌根真菌能与植物形成良好的共生关系,从而促进植物对水分和矿质养分的吸收,提高植物在逆境环境中的生存能力等^[12]。李少朋等^[13]研究了丛枝菌根真菌对采煤塌陷区紫穗槐的促生效应,发现接种丛枝菌根真菌不仅能显著促进紫穗槐的生长,同时还对紫穗槐根际土壤养分状况具有明显的改善作用。胡晶晶等^[14]通过对采煤沉陷地接菌区文冠果生理指标及土壤理化性质的测定发现,接菌处理显著提高了土壤根外菌丝密度,而根外菌丝密度的增加有助于提高植物对营养元素的吸收能力。同时还发现,接种AM真菌还对于土壤中难溶性营养元素有明显的活化作用。孙金华等^[15]通过对西部采煤沉陷地柠条的生长情况及其根际土壤的养分状况的调查发现,接种丛枝菌根真菌不仅对柠条的生长具有显著的促生作用(株高、冠幅和地径显著提高),同时还能显著提高植物根际土壤微生物的数量和土壤酶的活性。

植物多样性是反映生态系统结构和功能的一大关键指标,多年来学者广泛采用多种方法在不同尺

度上对植物多样性及影响植物多样性的因素等方面开展大量调查研究^[16-18]。如贺金生等^[16]发现,陆地植物物种多样性随着纬度的增加而降低。韩煜等^[17]通过对沉陷区和对照区土壤理化性质和植物群落多样性的调查分析后发现,采煤沉陷不仅造成沉陷区的土壤含水率和土壤养分(总氮、有机质、速效磷等)显著降低,还导致沉陷区植物群落发生退化,其群落丰富度指数、物种多样性指数和物种优势度指数均显著低于对照区。毕银丽等^[18]基于对矿区不同距离的植物群落调查发现,植物多样性指数、群落相似性随着离矿区的距离增加而显著增大,不同距离下植物群落物种的变化明显。土壤和植物是陆地生态系统中密不可分的2部分,当前,关于矿区生态修复方面的研究多集中在恢复过程中的某一特征如植被多样性^[19]或土壤性质沿空间或时间等梯度的动态变化方面^[20-21],而有关矿区生态恢复过程中土壤酶活性和养分与植物多样性之间相互关系的研究仍远远不够。

鉴于此,本文以黑岱沟煤矿紫穗槐和沙棘复垦地为研究区域,研究不同复垦处理下植物物种多样性、土壤养分、酶活性的变化情况,旨在为矿区生态恢复提供最佳的复垦模式,同时阐明矿区生态恢复过程中植物物种多样性的关键影响因素,为矿区土地复垦和生态恢复提供的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗东部黑岱沟煤矿(东经111°13'~111°20',北纬39°43'~39°49'),该煤矿于1999年正式移交生产,2006年经过扩能改造后的黑岱沟露天煤矿年原煤年产量可达2 500万t,成为中国第一大露天煤矿^[22]。矿区气候属于典型的中温带半干旱大陆性气候,冬春季气候寒冷、干燥、多大风,夏季雨量集中,秋季凉爽、短促年均温7.2℃,全年最高温度38.3℃,最低温度则为-30.9℃。年均降水量404 mm,且多集中在7—9月。

1.2 试验设计及样品采集

1.2.1 菌种选择

菌剂由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所微生物室提供,后经本实验室扩繁培养得到的AM真菌摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*, F.m.)。

1.2.2 试验设计

选择同一种植时间的紫穗槐和沙棘种植地为研究区域,每种植物种植地下均有4种不同处理,分别

为接菌(I)、接菌+绿肥(IG)、接菌+绿肥+风化煤(IDG)与不接种对照(CK)。不同处理的试验小区面积均为1 496(34×44)m²,小区间隔为6 m,每个小区种植的紫穗槐或沙棘的株数均为336株。于2018年4月完成紫穗槐和沙棘的栽植,栽植的同时进行菌剂、风化煤及绿肥的添加处理。其中菌剂施用量为每个小区50 kg,风化煤为每个小区100 kg,绿肥的施用方法为在供试植物周围撒紫花苜蓿草籽,待苜蓿出苗45 d后进行翻压,每个小区绿肥的施用量为100 kg。

1.3 土壤样品采集与处理

于2021年6月在每个处理样地中均随机选取3棵长势一致的紫穗槐或沙棘,并在其林下布置一个1 m×1 m的样方用于植物群落调查和土壤取样,为避免边缘效应,每个样方之间间隔不小于10 m,共计12个样方。详细记录每个样方中出现的植物种、物种的盖度、多度、高度等指标,在每个样方中采用S形取样法采集样方内5点的0~20 cm的表层土壤并进行均匀混合。

将采集的土壤样品带回实验室,部分鲜土过2 mm筛后用于测定土壤酶活性,其余部分经自然风干,研磨过0.125 mm筛后用于土壤养分测定。其中脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定^[23];磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定^[23];有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[24];全氮用凯氏定氮法测定^[24];速效磷采用钼锑抗比色法测定^[24];速效钾采用火焰光度计法测定^[24],具体测定方法参照鲍士旦的《土壤农化分析》^[24]。

1.4 植被多样性数据处理

根据植被调查结果,计算物种重要值和群落多样性指数,其中物种重要值公式^[25]如下。

物种重要值:

$$P_i = (H_R + D_R + F_R)/3 \quad (1)$$

其中, H_R 为相对高度; D_R 为相对密度; F_R 为相对频度。

植物群落多样性指数选取Shannon-Wiener多样性指数,Pielou均匀度指数,Simpson指数及物种丰富度指数进行统计和分析,计算公式^[26]分别如下:

Shannon-Wiener多样性指数:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson优势度指数:

$$E = H' / \ln S \quad (3)$$

物种丰富度指数:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中: S 为植物种数; N 为群落中物种总数量之和。

采用 Microsoft Excel 2010 整理和计算数据, 用 SPSS 24.0 对同一供试植物不同修复措施间的物种数、植物多样性指数、土壤养分含量及土壤酶活性进行单因素方差分析, 利用 Duncan 多重比较检验, 在 $P < 0.05$ 水平上表示差异显著。选择 Pearson 相关性探究植物多样性指数与土壤养分及土壤酶活性间的关系, 相关性矩阵图使用 R.v.4.0.3 的 Corr 包实现, 表中所有数据均表示为平均值, 图中所有数据均表示为平均值±标准误。基于 R 软件 vegan 包植物多样性数据进行对应分析(DCA), 计算出第一轴的范围(Axis lengths)为 0.67, 采用冗余分析(RDA)分析植物多样性与土壤养分之间的关系。

2 结 果

2.1 沙棘和紫穗槐不同修复措施样地的植物种组成

通过对不同处理沙棘样地植物群落调查发现(表 1), 共有 9 种植物, 分别属于 5 个科, 8 个属, 其中接菌处理的沙棘样地有 8 种(5 科, 8 属); 接菌+绿肥+风化煤处理的样地有 6 种(4 科, 6 属); 接菌+绿肥处理的样地出现的植物有 7 种(5 科, 6 属); 对照处理的样地有 4 种(4 科, 4 属)。而通过对不同修复措施下紫穗槐样地植物群落调查则发现, 共有 10 种植物, 分别属于 4 个科, 9 个属, 其中接菌处理的样地有 6 种(4 科, 6 属); 接菌+绿肥+风化煤处理的样地有 5 种(4 科, 5 属); 接菌+绿肥处理的样地出现的植物有 6 种(4 科, 5 属); 对照处理的样地有 5 种(3 科, 5 属)。此外还发现, 早熟禾、披碱草这 2 种植物是不同修复措施下紫穗槐和沙棘样地中较为普遍存在的植物。

2.2 沙棘和紫穗槐样地不同修复措施下植物多样性

Shannon-Wiener 指数主要基于物种数量反映群落种类多样性。Simpson 指数反映植物种的优势度, 优势度指数越大, 表明植物群落内不同种类生物数量分布越不均匀。Pielou 指数反映的是各物种个体数目在群落中的分配均匀度。物种丰富度指数反映物种个数在一个群落或生境中的多寡。对不同修复措施下沙棘样地植物群落多样性指数比较发现(图 1), 接菌、接菌+绿肥+风化煤、接菌+绿肥样地的 Shannon-Wiener 指数分别为 1.58、1.34、1.34, 较对照处理分别显著增加了 81.61%、54.02%、54.02%, 接菌处理的物种丰富度指数显著高于对照处理的物种丰富度指数, 为对照处理的 2.47 倍, 而对照处理的 Simpson 指数为 0.71, 显著高于其他 3 种修复措施。相似的结果在不同处理的紫穗槐样地中也可以发现(图 2), 其中接菌处理的 Shannon-Wiener 指数和物种丰富度指数显著高于对照处理的, 分别较对照处理显著增加了 42.70% 和 60.58%, 而对照处理的 Simpson 指数显著高于接菌处理的, 是接菌处理 Simpson 指数的 1.21 倍。此外还可以发现, 2 种植物不同修复措施间的 Pielou 指数均没有显著差异, 可能是由于不同处理间的植被演替均在初期, 群落物种组成少, 导致不同处理间植物群落的均匀度变化不明显。以上结果说明, 与对照处理相比, 接菌、接菌+绿肥、接菌+绿肥+风化煤处理对复垦区植物多样性提高具有明显的作用, 其中接菌处理的效果最为显著。

2.3 沙棘和紫穗槐样地不同修复措施下土壤养分含量和土壤酶活性调查

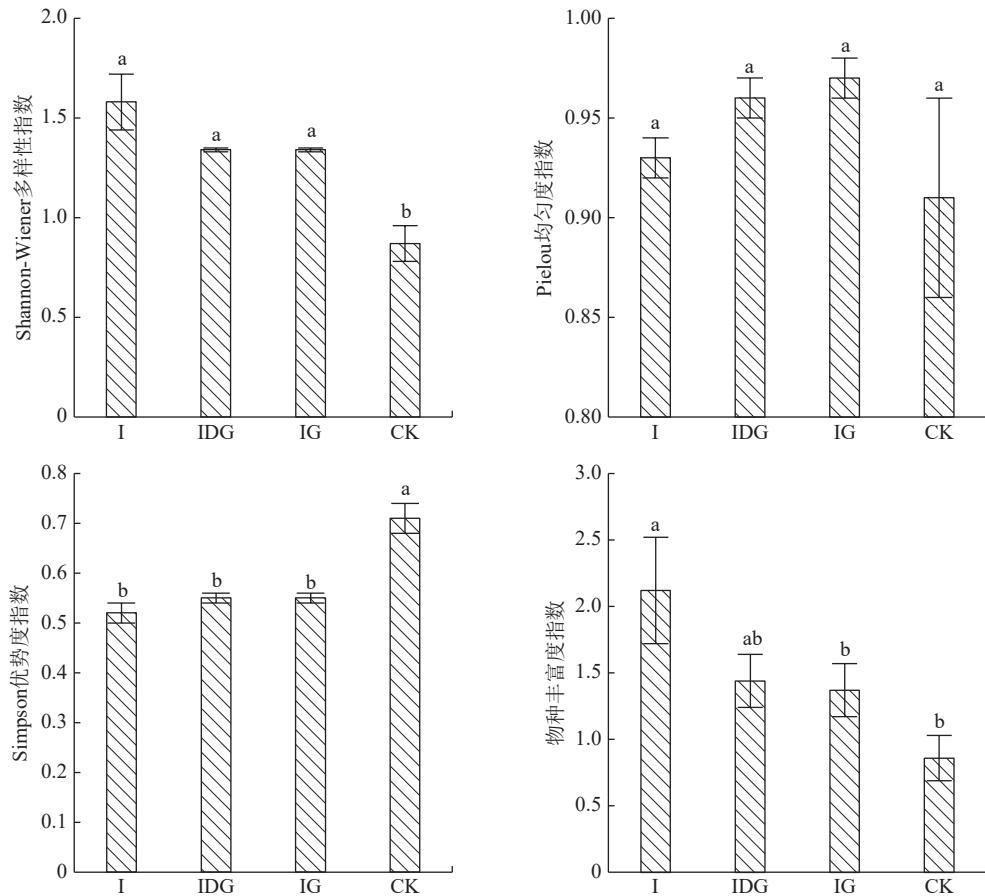
通过对沙棘和紫穗槐样地土壤养分含量及酶活性的测定发现(表 2), 沙棘样地土壤有机质、全氮、

表 1 紫穗槐和沙棘样地的植物组成

Table 1 Vegetation Composition of *Hippophae rhamnoides* and *Amorpha fruticosa* Plots

植物种	修复措施	主要植物种及其重要值	盖度/%
沙棘	I(4.0a)	披碱草(0.301 1)+早熟禾(0.264 2)+委陵菜(0.155 8)+沙棘(0.165 7)+扁蓿豆(0.083 5)+苦荬菜(0.048 2)+茵陈蒿(0.052 8)+苜蓿(0.048 2)	30.0a
	IDG(3bc)	沙棘(0.251 1)+披碱草(0.316 5)+委陵菜(0.307 2)+早熟禾(0.165 0)+茵陈蒿(0.226 8)+苦荬菜(0.125 8)	11.7b
	IG(3.7ab)	沙棘(0.265 1)+早熟禾(0.180 8)+苜蓿(0.225 8)+茵陈蒿(0.355 6)+委陵菜(0.354 1)+披碱草(0.164 9)+南牡蒿(0.161 5)	28.3a
紫穗槐	CK(2.7c)	早熟禾(0.413 6)+沙棘(0.506 9)+委陵菜(0.126 8)+茵陈蒿(0.111 6)	11.7b
	I(5.0a)	披碱草(0.387 4)+早熟禾(0.312 3)+委陵菜(0.248 4)+茵陈蒿(0.120 5)+草木樨(0.120 8)+苜蓿(0.170 2)	25.0a
	IDG(4.0b)	早熟禾(0.396 7)+披碱草(0.432 6)+委陵菜(0.306 4)+苜蓿(0.237 8)+茵陈蒿(0.093 9)	24.7a
<i>Amorpha fruticosa</i>	IG(4.0b)	早熟禾(0.330 8)+披碱草(0.392 1)+苜蓿(0.264 4)+委陵菜(0.165 6)+细叶苦荬(0.060 3)+苦荬菜(0.076 5)	21.7a
	CK(2.7b)	披碱草(0.531 2)+早熟禾(0.412 9)+委陵菜(0.249 5)+糙叶黄芪(0.154 0)+二色棘豆(0.177 1)	8.0b

注: 括号内不同小写字母表示相同种植植物不同修复措施间平均物种数目存在显著差异; 盖度后不同小写字母表示相同种植植物不同处理间平均盖度存在显著差异。



注: 不同小写字母表示同一复垦区域不同处理的同一指标在 0.05 水平上差异显著, 下同。

图 1 不同处理沙棘样地的植物多样性

Fig.1 Vegetation diversity of different treatments on *Hippophae rhamnoides* plots

速效磷、速效钾的变化范围分别为 3.81~12.55 g/kg, 88.17~197.10 g/kg, 1.04~1.30 mg/kg, 21.14~41.88 mg/kg, 接菌和接菌+绿肥+风化煤处理的有机质和全氮含量均显著高于对照处理, 其中接菌处理的有机质和全氮含量分别达到了对照处理的 2.49 和 1.54 倍, 接菌+绿肥+风化煤处理的则分别为对照处理的 3.29 和 2.08 倍。接菌、接菌+绿肥+风化煤和接菌+绿肥处理的土壤脲酶、碱性磷酸酶活性均显著高于对照处理的, 其中接菌处理的脲酶、碱性磷酸酶活性最高, 较对照处理分别增加了 89.29%、350%。紫穗槐样地土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾、的变化范围分别为 2.87~19.02 g/kg, 71.01~233.48 g/kg, 0.70~0.83 mg/kg, 16.22~37.21 mg/kg, 接菌和接菌+绿肥+风化煤处理的有机质和全氮含量也是显著高于对照处理, 其中接菌处理的有机质和全氮含量分别达到了对照处理的 6.63 和 3.29 倍, 接菌+绿肥+风化煤处理的则分别为对照处理的 4.02 和 2.34 倍。接菌、接菌+绿肥+风化煤和接菌+绿肥处理的土壤脲酶、碱性磷酸酶活性均显著高于对照处理的, 其中接菌处理的脲酶、碱性磷酸酶活性最高, 较对照处理分

别增加了 158.33%、208.33%。以上结果说明, 接菌、接菌+绿肥、接菌+绿肥+风化煤处理均不同程度提高了复垦区土壤养分含量和酶活性, 其中接菌、接菌+绿肥+风化煤处理的效果最为显著。

2.4 沙棘和紫穗槐样地不同修复措施下植物多样性与土壤养分和土壤酶活性的关系

相关性分析结果表明(图 3), 沙棘和紫穗槐样地的 Shannon-Wiener 多样性指数和物种丰度指数均与土壤有机质、全氮、脲酶、磷酸酶呈显著正相关关系($P < 0.05$), 同时 2 种植物的 Shannon-Wiener 多样性指数和物种丰度指数也均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。沙棘样地的 Simpson 指数则与土壤有机质、土壤全氮、脲酶、磷酸酶、Shannon-Wiener 多样性指数、物种丰度指数均呈显著负相关关系($P < 0.05$), 而紫穗槐样地的 Simpson 指数则与土壤有机质、脲酶、磷酸酶、Shannon-Wiener 多样性指数、物种丰度指数均呈显著负相关关系($P < 0.05$)。此外还可以发现, 沙棘和紫穗槐样地的土壤速效磷和速效钾含量均与 4 个指数没有显著的相关关系。

冗余分析结果表明(图 4, 表 3), 沙棘样地 RDA

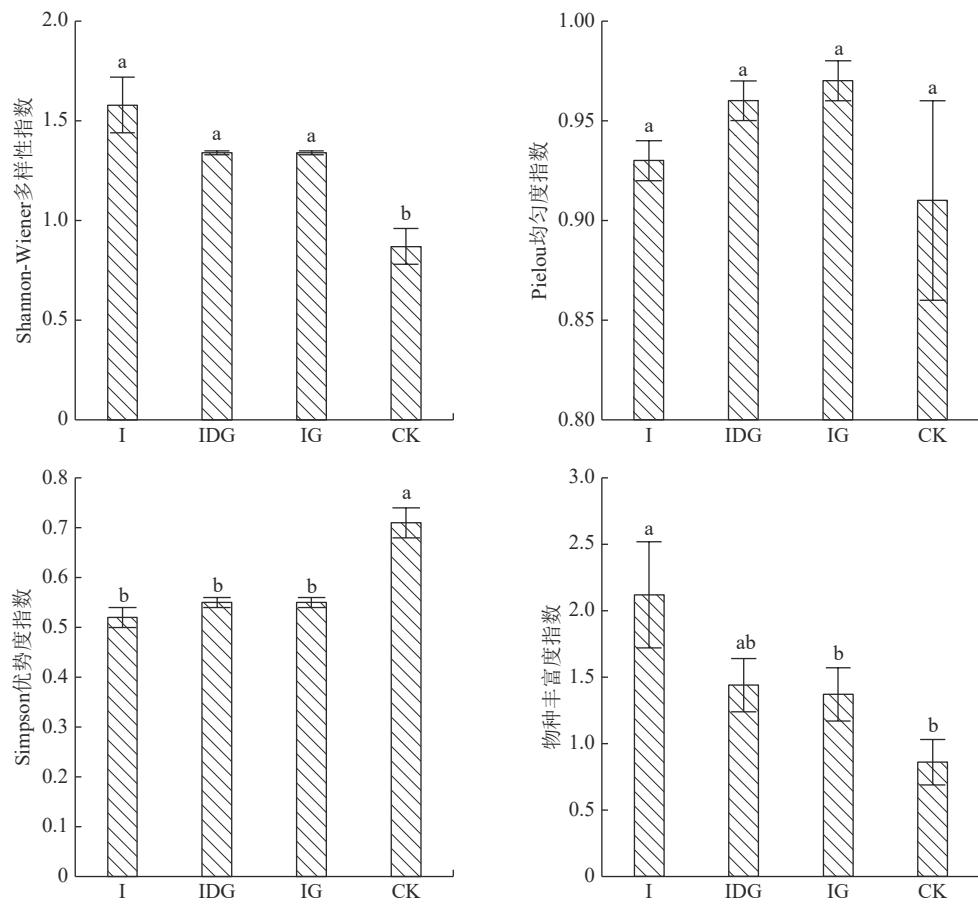


图2 不同处理紫穗槐样地的植物多样性

Fig.2 Vegetation diversity of different treatments on *Amorpha fruticosa* plots

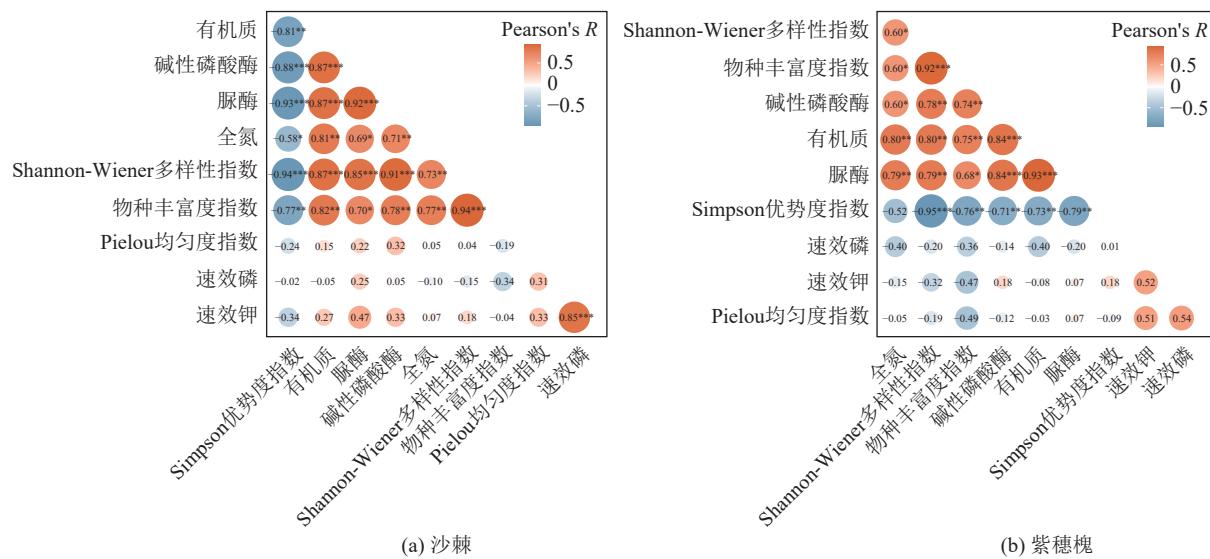
表2 不同处理紫穗槐和沙棘样地的土壤养分含量

Table 2 The soil nutrient content under different treatments of *Hippophae rhamnoides* and *amorpha fruticosa* plots

植物种	处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	碱性磷酸酶/ (mmol·L ⁻¹ ·h ⁻¹ ·g ⁻¹)
<i>H.rhamnoides</i>	I	9.48ab	146.25a	1.30a	41.88a	0.053a	0.045a
	IDG	12.55a	197.10a	1.06a	31.45a	0.041b	0.027b
	IG	8.02bc	88.17b	1.04a	21.14a	0.036b	0.026b
	CK	3.81c	94.89b	1.14a	35.44a	0.028c	0.010c
<i>A.fruticosa</i>	I	19.02a	233.48a	0.83a	18.88ab	0.031a	0.037a
	IDG	11.54b	166.00ab	0.70a	16.22b	0.027b	0.031ab
	IG	4.65c	94.62bc	0.74a	22.68ab	0.022b	0.028b
	CK	2.87c	71.01c	1.00a	37.21a	0.012c	0.012c

排序结果的前2个排序轴解释率分别为52.77%和1.11%,累计解释率为53.88%,紫穗槐样地RDA排序结果的前2个排序轴解释率分别为72.08%和1.96%,累计解释率为74.04%,同时蒙特卡洛检验结果表明,土壤养分与植物多样性排序模型达到显著水平($P<0.05$),以上结果说明第一、二排序轴能够很好地反映土壤养分在一定程度上能较好地解释植物多样性的变化,且主要由第一排序轴决定。从排序

图中可以看出,沙棘和紫穗槐样地的Shannon-Wiener多样性指数和物种丰度指数均与土壤有机质、全氮、脲酶和碱性磷酸酶活性呈正相关关系,而沙棘和紫穗槐样地的Simpson指数均与土壤有机质、全氮、脲酶和碱性磷酸酶活性呈负相关关系。利用RDA分析中的前向选择来筛选土壤养分中对植物群落特征变量影响最强的某一个或几个因子。前向选择结果表明(表4),沙棘和紫穗槐样地的群落多样性变化



注: ***代表在0.001水平上显著相关; **代表在0.01水平上显著相关; *代表在0.05水平上显著相关。

图3 不同处理沙棘和紫穗槐样地的植物多样性和土壤养分的相关关系

Fig.3 Correlation of plant diversity and soil nutrients in *Hippophae rhamnoides* and *Amorpha fruticosa* plots with different treatments

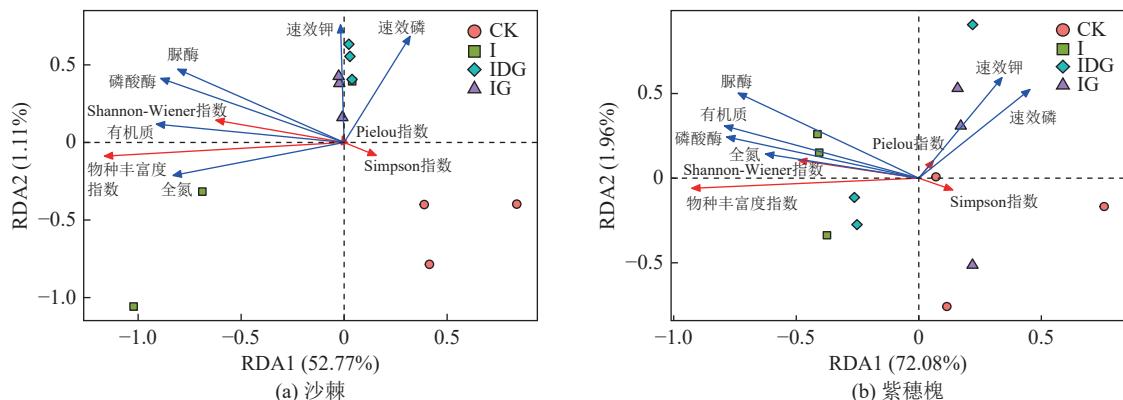


图4 植物群落多样性指数与土壤环境因子RDA排序图

Fig.4 RDA ranking diagram of plant community diversity indexes and soil environmental factors

表3 植物多样性与土壤养分、酶活性的RDA分析结果

Table 3 Results of RDA analysis of plant diversity and soil Nutrients

植物种	排序轴	比例 解释量	累计 解释量	模型整体 解释量	蒙特卡洛检验	
					F	P
<i>H.rhamnoides</i>	轴一	52.77	53.88	53.94	4.31	0.049
	轴二	1.11				
<i>A.fruticosa</i>	轴一	72.08	74.04	74.15	8.87	0.013
	轴二	1.96				

的主要影响因子是有机质、全氮含量和脲酶和碱性磷酸酶活性($P<0.05$)。

3 讨 论

3.1 不同修复措施复垦区内植物多样性的比较

根据不同处理复垦区植被群落物种组成分析结

表4 土壤养分、酶活性与物种多样性前向选择结果

Table 4 Results of forward selection on soil nutrients and species diversity

指标	沙棘		紫穗槐	
	F	P	F	P
有机质	21.46	0.001	12.82	0.001
磷酸酶	18.83	0.002	12.15	0.003
脲酶	11.72	0.005	9.58	0.009
全氮	13.09	0.007	5.36	0.03
速效磷	1.02	0.33	2.34	0.15
速效钾	0.1	0.82	1.25	0.282

果来看,在整个复垦区植被演替过程中,共出现5科11属13种植物。其中,菊科、豆科、禾本科分别占总物种数的38.46%、30.77%、15.38%,这一结果说明这3科植物在复垦后初期的植被恢复演替过程中

发挥着至关重要的作用。同时还发现样方调查中出现的植物种大部分为不同科不同属,仅有少部分植物种为相同科不同属,如早熟禾、披碱草。植被恢复过程中植物群落组成上的变化通常为由先锋种经次先锋种到过渡种最终被次顶极种和顶极种^[27-28]。而在植被恢复的初期,由于受土壤pH值极端、土壤养分严重不足等外部环境因素的制约,植被群落中最先出现的先锋物种往往是一些入侵性强,能快速生长的草本植物^[17,29]。先锋物种的出现则初步改善了生态系统的土壤环境,为其他植物的生长和繁殖营造了适宜条件,进而通过多年的演替过程逐步形成一个具有较强抵抗环境扰动能力、相对稳定的植物群落^[27-28]。与之前研究结果^[27-29]类似的是,本研究中通过对沙棘和紫穗槐不同修复措施样地内植物种的调查发现,由于复垦时间较短(4年),植被演替还在初始阶段,不同处理的样地中植物种类较少且群落组成结构较为单一,普遍存在的植物种主要为早熟禾和披碱草这两种已被证明具有耐极端环境的植物^[30-31]。

通过对不同处理复垦区植被群落多样性的综合分析可以发现,接菌处理的紫穗槐和沙棘样地的Shannon-Wiener和物种丰富度指数均显著高于各自对照处理的两个多样性指数,其中接菌处理紫穗槐样地的Shannon-Wiener和物种丰富度指数是对照处理紫穗槐样地的1.43和1.61倍;接菌处理沙棘样地的Shannon-Wiener和物种丰富度指数是对照处理沙棘样地的1.82和2.47倍,而Shannon-Wiener和物种丰富度指数均是植物群落多样性大小的直接反映,这一结果说明,接种丛枝菌根真菌显著增加了复垦区植物的物种多样性。接菌处理和接菌+绿肥+风化煤处理的紫穗槐和沙棘样地植物的Simpson指数均显著低于相应植物对照处理的Simpson指数,说明接菌样地较对照样地具有更低的物种优势度。通常,较低的物种优势度表明该生境能满足更多的物种生存^[32-33]。而出现这一结果的主要原因与土壤养分有关。土壤养分匮乏,导致群落中对养分需求高的植物的难以生长和繁殖,此时植物群落中占优势地位的主要为一些耐贫瘠的植物。而土壤养分状况的改善,则会为群落中次优势种、伴生种及其他适宜物种的出现提供了机会,并导致群落中原有优势种的优势地位降低,最终出现群落整体的优势度下降这一情况。此外,先前研究表明^[34-35],群落的物种多样性与群落物种优势度呈负相关。而在本研究中也证实了这一点,紫穗槐和沙棘样地的物种多样性指数和

物种优势度指数间均存在显著负相关关系。

3.2 不同修复措施复垦区土壤养分和土壤酶活性的差异分析

煤炭矿区长期露天开采后,不仅会造成当地植被大面积被破坏,还往往会导致土壤养分的大量流失,是限制植被恢复的一大关键因素,因此在植物重建过程中采取一定的修复措施就显得尤为重要^[9,32]。丛枝菌根真菌广泛分布于陆地生态系统,除大量分布于农田和森林土壤中以外,在一些逆境环境,例如:沙漠、河流滩涂、盐碱地等生态系统也发现有丛枝菌根真菌存在^[12]。同时,业已证明,利用丛枝菌根真菌有助于提高植物改善一些脆弱生态系统(如采煤沉陷地等)的土壤功能^[13-15]。孙金华等^[15]通过对西部黄土区采煤沉陷区接菌和非接菌处理的柠条生长地土壤肥力状况的调查研究发现,与对照处理相比,接菌处理的土壤养分显著增加,其中有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别显著提高了2.39, 2.17, 2.09, 1.46倍。胡晶晶等^[14]通过对沉陷地接菌区和非接菌区文冠果生理指标和土壤因子的研究发现,接种丛枝菌根不仅能显著提高文冠果的株高、冠幅等各项生长指标,同时还能显著增加土壤的全氮、碱解氮和有机碳含量。而在本研究中,通过对不同处理紫穗槐和沙棘样地土壤养分含量的调查发现,2种植物的接菌区土壤的有机质、全氮含量显著高于对照区的,表明接种丛枝菌根真菌后已经显著改善了土壤的养分状况,这一结果与前人的研究的结果相类似^[13-15]。此前研究^[36-37]发现风化煤因其富含腐殖酸,有机碳含量高,结构疏松多孔,已被证明其对煤矿区土地复垦具有显著的改良效果。豆科绿肥植物也是矿区土地复垦的常见改良剂^[38-39],一方面可以通过其庞大的根系达到疏松土壤的目的,另一方面其通过与根瘤形成共生体,固定空气中的氮气,从而起到培肥土壤的作用。在本研究中发现,接菌+绿肥+风化煤处理下沙棘和紫穗槐样地的有机质、全氮含量均显著高于对照处理的养分含量,这一结果说明菌剂、风化煤和绿肥联合施用对土壤的养分状况也已起到明显的积极作用。此外,导致接菌区土壤养分发生显著变化的另一原因可能还与复垦区植被恢复过程中豆科植物出现有关。如3个处理的沙棘接菌区发现豆科植物有3种,对照区域则未发现豆科植物。这些豆科植物可以起到固氮作用从而补充土壤氮素。

土壤酶是土壤中不可或缺的重要组成,同时也是联系植物-土壤间物质能量循环的关键桥梁,因此

土壤酶活性也是反映土壤养分变化特性的一大关键指标^[40-41]。土壤酶主要由土壤微生物活动、植物根系分泌产生,所以土壤酶活性受土壤微生物活性、土壤微生物数量等因素影响较大^[40]。如XIAO等^[42]研究发现,接种丛枝菌根真菌能显著提高采煤沉陷区土壤中脲酶和碱性磷酸酶的活性。在本研究中同样也发现,接种丛枝菌根真菌(接菌处理、接菌+绿肥处理、接菌+绿肥+风化煤处理)显著提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶的活性。同时,此前研究发现,土壤酶活性与土壤养分间存在一定的相关性,如安小菲等^[43]研究发现土壤脲酶和碱性磷酸酶活性随土壤全氮含量的增加而显著提高,栗丽等^[44]的研究中也得到相似的结论,这一结果在本研究中也得到印证,复垦区土壤全氮与脲酶、碱性磷酸酶表现出显著的正相关关系,说明土壤养分的改善对土壤酶活性的提高有显著的促进作用。

综合不同处理对复垦区植物-土壤系统的改良结果可以发现,不同接菌处理下植物多样性、土壤养分和酶活性均高于对照处理,其中接菌和接菌+绿肥+风化煤处理的效果最为显著。

3.3 复垦区植物多样性与土壤养分和土壤酶活性的关系

当前,关于土壤养分、土壤酶活性与植物群落多样性的研究已有大量报道^[18,45-47],但研究结果并不尽一致。王兴等^[45]对弃耕恢复地土壤养分与植物群落多样性间的关系调查研究发现,由于弃耕地整体且处于恢复演替的早中期,导致土壤养分与植物群落多样性间无显著的相关关系。王长庭等^[46]研究也指出,土壤养分是决定植物群落初级生产力高低的重要环境因素之一,但受外界其他环境因素的影响,如温度、水分等因素,导致植物群落多样性与土壤养分含量在空间和时间上的变化趋势可能并不一致。李婷婷等^[47]通过对人工林林下植物多样性和土壤养分间的关系调查研究发现,有机质、速效磷是造成不同人工林林下灌木植物种产生差异的主要因素,全磷、速效磷则是造成不同人工林林下草本植物种产生差异的主要因素。毕银丽等^[18]对露天矿区植物多样性的研究也表明矿区周边草地植物多样性指数随土壤有机质、硝态氮、速效磷和速效钾含量的增加而提高。安小菲等^[43]通过对天坑生境下植物多样性与土壤酶活性间的关系研究发现,土壤脲酶、碱性磷酸酶是影响该地区木本植物多样性的主要因素之一。廖全兰等^[48]通过对喀斯特森林生境下植物多样性与土壤酶活性间的关系调查发现,受地形等因素影响导致植物多样性与土壤脲酶、碱性磷酸酶间没有明显的相

关关系。王佳等^[49]通过对退耕地植物多样性和土壤酶活性的研发发现,植物物种数与土壤脲酶、磷酸酶活性呈显著正相关关系,而Shannon指数、Pielou指数和Simpson指数则与这两种酶活性的相关关系均较弱。在本研究中,相关分析和RDA分析结果均表明,影响沙棘和紫穗槐复垦地的Shannon-Wiener和物种丰富度指数的关键因子主要为有机质、全氮、土壤脲酶和碱性磷酸酶活性,这与之前的研究结果相类似^[17-18,50]。有机质是土壤养分循环中必不可少的关键参与者,其含量高低直接影响该地区土壤质量^[51]。植物的枯落物是土壤有机质的一个重要来源,而土壤中全氮含量的95%以上为有机氮,因而有机质含量越高,全氮含量也越高^[52]。复垦地种植的沙棘、紫穗槐及其地面植物多为落叶植物,植被在凋落之后形成枯枝物通过土壤微生物的分解形成腐殖质,从而将营养元素重新归还到土壤中,使土壤肥力提高,而土壤养分的大量提升会促进植物生长,最终在植物-土壤间形成良好的养分循环。复垦区植物群落的物种丰富度指数、Shannon指数均与土壤脲酶和碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系,这一结论与安小菲等^[43]研究结果相一致,但与廖全兰等^[48]和王佳等^[49]的研究结果有所不同,本研究区域为黄土区露天采煤复垦地,与典型干旱区退耕地、喀斯特森林保护地的水文、土壤、地形、气候等区域环境条件有所不同,因此导致结果也不尽相同。

4 结 论

1)在整个复垦区植被演替过程中,目前共出现5科11属13种植物,由于复垦地植被恢复尚处在初期,植被群落结构和组成较为单一,主要表现为大部分为不同科不同属,不同处理样地间普遍存在的植物种主要为早熟禾和披碱草。

2)接菌和接菌+绿肥+风化煤处理的改良效果最为显著,不仅显著提高了沙棘和紫穗槐样地的有机质、全氮含量及土壤脲酶、碱性磷酸酶活性,还显著增加了植物的多样性,降低了植物群落整体优势度。

3)土壤养分和土壤酶活性与植物群落多样性间存在显著的正相关关系,群落的物种多样性与群落物种优势度呈显著负相关关系。其中有机质、全氮含量及土壤脲酶、碱性磷酸酶活性是影响沙棘和紫穗槐样地的植物群落多样性变化的主要因素。

参考文献(References):

[1] 973计划(2013 CB 227900)“西部煤炭高强度开采下地质灾害

- 防治与环境保护基础研究”项目组. 西部煤炭高强度开采下地质灾害防治理论与方法研究进展[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 267–275.
- Research Group of National Key Basic Research Program of China (2013CB227900) (Basic Study on Geological Hazard Prevention and Environmental Protection in High Intensity Mining of Western Coal Area). Theory and method research of geological disaster prevention on high-intensity coal exploitation in the west areas[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 267–275.
- [2] 时光, 任慧君, 乔立瑾, 等. 黄河流域煤炭高质量发展研究[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(8): 36–44.
- SHI Guang, REN Huijun, QIAO Lijin, et al. Research on high-quality development of coal in the Yellow River Basin[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(8): 36–44.
- [3] 李巧刚. 西北地区黄土高原煤矿开采地质环境问题及其对策研究: 以陈家沟煤矿为例[J]. 煤炭科技, 2021, 42(3): 1–5, 21.
- LI Qiaogang. Study on geological environment problems and countermeasures of coal mining in loess plateau of northwest China: Taking Chengjiagou coal mine as an example[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2021, 42(3): 1–5, 21.
- [4] 雷少刚. 荒漠矿区关键环境要素的监测与采动影响规律研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1587–1588.
- LEI Shaogang. Monitoring and analyzing the mining impacts on key environmental elements in desert area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1587–1588.
- [5] 赵国平, 朱建军, 张继平, 等. 神府煤田采煤塌陷引起的生态问题探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 103–107.
- ZHAO Guoping, ZHU Jianjun, ZHANG Jiping, et al. Discussion on the several ecological problems caused by coal mining subsidence in Shengfu coalfield[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(9): 103–107.
- [6] 包玉英, 马晓丹, 赵旭鹏, 等. 露天煤炭开采对矿坑周围土壤生物活性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 89–96.
- BAO Yuying, MA Xiaodan, ZHAO Xupeng, et al. Effect of open-pit coal mining on soil bio-activity around the pit[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 89–96.
- [7] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1355–1364.
- BI Yinli, PENG Suping, DU Shaozhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [8] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
- PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [9] 杨勤学, 赵冰清, 郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152–1157.
- YANG Qinrong, ZHAO Bingqing, GUO Donggang. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1152–1157.
- [10] 王丽丽, 鄂庆, 王颖, 等. 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1525–1533.
- WANG Lili, ZHEN Qing, WANG Ying, et al. Effect of soil amelioration on soil nutrients at mining dumps in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1525–1533.
- [11] 刘宇飞, 范永维, 包全民, 等. 不同处理对不同年限排土场紫穗槐生长特性和光合作用的影响[C]//《环境工程》2019年全国学术年会论文集(下册). 2019: 853–858.
- LIU Yufei, FAN Yongwei, BAO Quanmin, et al. Effects of different treatments on growth characteristics and photosynthesis of *Amorpha fruticosa* in different years of surface mine dump[C]// Proceedings of the 2019 National Annual Conference on Environmental Engineering (Vol. 2), 2019: 853–858.
- [12] HEIJDEN V, KLIRONIMOS N, URSIC M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, osystem variability and productivity[J]. Nature, 1998, 396(5): 69–72.
- [13] 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.
- [14] 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): 341–345, 351.
- 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): 341–345, 351.
- [15] 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 Arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Caragana korshinskii* Kom. and soil improvement of coal mining subsidence in the Loess area of west China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2300–2306.
- [16] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91–99.
- HE Jinsheng, CHEN Weilie. Gradient variation characteristics of species diversity in terrestrial plant communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(1): 91–99.
- [17] 韩煜, 肖能文, 赵伟, 等. 呼伦贝尔草原采煤沉陷对土壤-植物系统的影响及评价[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 687–697.
- HAN Yu, XIAO Nengwen, ZHAO Wei, et al. Evaluation of effects of coal mining subsidence on soil-plant system in Hulunbuir Prairie[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(3): 687–697.
- [18] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 等. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 205–213.

- BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 205-213.
- [19] 姚虹, 马建军, 张树礼. 煤矿复垦地不同恢复阶段植物群落功能群结构与生物多样性变化[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(5): 1013-1020.
- YAO Hong, MA Jianjun, ZHANG Shuli. Structure and biodiversity of functional group in different restoration stages in coal mine reclamation land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 32(5): 1013-1020.
- [20] 刘孝阳, 周伟, 白中科, 等. 平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及微地形对土壤养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 6-12.
- LIU Xiaoyang, ZHOU Wei, BAI Zhongke, et al. Influence of reclamation types and microtopography on soil nutrients in open-cast coal mine dump of Pingshuo mining area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 6-12.
- [21] 李华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1752-1756.
- LI Hua, LI Yongqing, SHEN Chengbin, et al. Physicochemical properties of reclaimed soil with weathered coal in open cast mining areas of Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [22] 戴云仙, 乔光华, 翟正江, 等. 黑岱沟露天煤矿不同复垦模式效益分析与评价[J]. *中国矿业*, 2017, 26(12): 139-142.
- DAI Yunxian, QIAO Guanghua, ZHAI Zhengjiang, et al. Analysis and evaluation on different reclamation system in Heidaigou open cast coal mine area[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(12): 139-142.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 25-28.
- GUAN Songyin. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 25-28.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-11.
- BAO Shidan. Soil Agrochemical Analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: Agriculture Press, 2000: 14-11.
- [25] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-19.
- REN Jizhou. Scientific research methods for pratacultural industry[M]. Beijing: Agriculture Press, 1998: 1-19.
- [26] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: α 多样性的测度方法(下)[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- MA Keping, LIU Mingyu. The measurement method of biological community diversity: the measurement method of α diversity (part 2)[J]. *Biodiversity*, 1994, 2(4): 231-239.
- [27] YANG G J, LU X T, STEVENS C J, et al. Mowing mitigates the negative impacts of N addition on plant species diversity[J]. *Oecologia*, 2019, 189: 769-779.
- [28] CATFORD J A, DAEHLER C C, MURPHY H T, et al. The intermediate disturbance hypothesis and plant invasions: implications for species richness and management[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2012, 14(3): 231-241.
- [29] 马建军, 张树礼, 李青丰. 黑岱沟露天煤矿复垦土地野生植物侵入规律及对生态系统的影响[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 101-106.
- MA Jianjun, ZHANG Shuli, LI Qingfeng. The intrusion rule of wild plant species on reclaimed land of Heidaigou opencast coal mine[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 101-106.
- [30] 栗妍, 魏玮, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域植被恢复驱动下的土壤养分特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 115-121, 128.
- LI Yan, WEI Wei, QIU Yang, et al. Effects of different vegetation restoration types on soil nutrient properties in the hill and gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 115-121, 128.
- [31] 张世珍, 王建国, 柴海瑞. 乐都柳湾沙沟青草哇石英岩矿山地质灾害治理与土地复垦分析[J]. *中国矿业*, 2020, 29(S2): 111-116.
- ZHANG Shizhen, WANG Jianguo, CHAI Hairui. Mine geological disaster therapy and land reclamation analysis of the quartzite mine of Liuwanshagouqingcaowa in Ledu district[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S2): 111-116.
- [32] 张兆彤, 王金满, 张佳瑞. 矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 239-247.
- ZHANG Zhaotong, WANG Jinman, ZHANG Jiarui. Interaction between reclaimed soil and vegetation in mining area: A review[J]. *Soils*, 2018, 50(2): 239-247.
- [33] 张涵丹, 康希睿, 邵文豪, 等. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2118-2128.
- ZHANG Handan, KANG Xirui, SHAO Weihao, et al. Characteristics of herbaceous plant biodiversity in Cunninghamia lanceolata plantations with different community structures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2118-2128.
- [34] 柳小妮, 孙九林, 张德罡, 等. 东祁连山不同退化阶段高寒草甸群落结构与植物多样性特征研究[J]. *草业学报*, 2008, 17(4): 1-11.
- LIU Xiaoni, SUN Jiulin, ZHANG Degang, et al. A study on the community structure and plant diversity of alpine meadow under different degrees of degradation in east Qilian Mountains[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(4): 1-11.
- [35] HECTOR A, SCHMID B, BEIERKUHNLEINC C, et al. Plant diversity and productivity experiments in European grassland[J]. *Science*, 1999, 286: 1123-1127.
- [36] 刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 等. 晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1): 137-143.
- LIU Hongtao, ZHENG Jiyong, LI Gaoliang, et al. Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 137-143.
- [37] 裴浪, 毕银丽, 张延旭, 等. 风化煤用量下覆膜和AM真菌对玉米生长和土壤微环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2210-2219.

- QIU Lang, BI Yinli, ZHANG Yanxu, *et al.* Effect of film mulching and AM fungi inoculation on maize growth and rhizosphere soil properties with the addition of weathered coal[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2210–2219.
- [38] 李子双, 廉晓娟, 王 薇, 等. 我国绿肥的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(7): 1135–1140.
- LI Zishuang, LIAN Xiaojuan, WANG Wei, *et al.* Research progress of green manure in China[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7): 1135–1140.
- [39] 毕银丽, 张家毓, 王 坤, 等. 绿肥翻压接种丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌对玉米生长及氮素利用的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 890–896.
- BI Yinli, ZHANG Jiayu, WANG Kun, *et al.* Nitrogen conversion rate of maize after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 890–896.
- [40] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12–21.
- WANG Lide, WANG Fanglin, GUO Chunxiu, *et al.* Review: Progress of soil enzymology[J]. *Solis*, 2016, 48(1): 12–21.
- [41] 刘善江, 夏 雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1–7.
- LIU Shanjiang, XIA Xue, CHEN Guimei, *et al.* Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 1–7.
- [42] XIAO L, BI Y L, DU S Z, *et al.* Effects of re-vegetation type and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on soil enzyme activities and microbial biomass in coal mining subsidence areas of Northern China *Catena*, 2019, 177: 202–209.
- [43] 安小菲, 余林兰, 陈 铭, 等. 广西天坑森林物种多样性与土壤酶活性和养分的关系[J]. 广西植物, 2023, 43(3): 504–514.
- AN Xiaofei, YU Linlan, CHEN Ming, *et al.* Relationships between species diversity and soil enzymeactivities and nutrient contents in Tiansheng forests, Guangxi[J]. *Guihaia*, 2023, 43(3): 504–514.
- [44] 栗 丽, 李廷亮, 孟会生, 等. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤养分及微生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6): 1156–1160.
- LI Li, LI Tingliang, MENG Huisheng, *et al.* Effects of combined application of microbial agents and fertilizers on soil nutrients and microbial characteristics in reclaimed soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(6): 1156–1160.
- [45] 王 兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 荒漠草原弃耕恢复草地土壤与植被的RDA分析[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 90–97.
- WANG Xing, SONG Naiping, YANG Xinguo, *et al.* Redundancy analysis of soil and vegetation of recovered grassland on abandoned land in the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 90–97.
- [46] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2005, 14(4): 15–20.
- WANG Changting, LONG Ruijun, WANG Qiji, *et al.* Distribution of organic matter nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the Alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(4): 15–20.
- [47] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1168–1177.
- LI Tingting, TANG Yongbin, ZHOU Ruihui, *et al.* Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different artificial forests in Yundingshan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1168–1177.
- [48] 廖全兰, 龙翠玲, 薛 飞, 等. 茂兰喀斯特森林不同地形土壤酶与植物多样性的关系[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(10): 117–121, 126.
- LIAO Quanlan, LONG Cuilan, XUE Fei, *et al.* Effect of different terrains in Maolan karst forest on soil enzyme activity and plant diversity[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(10): 117–121, 126.
- [49] 王 佳, 田 青, 王理德, 等. 青土湖不同年限退耕地植被物种多样性及土壤酶活性研究[J]. 西北植物学报, 2021, 41(11): 1900–1911.
- WANG Jia, TIAN Qing, WANG Lide, *et al.* Study on vegetation succession and soil enzyme activities of abandoned land in different years in Qingtu Lake[J]. *Acta Botanica Sinica of Northwest China*, 2021, 41(11): 1900–1911.
- [50] 余 轩, 王 兴, 吴 婷, 等. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8516–8524.
- YU Xuan, WANG Xing, WU Ting, *et al.* The relationship between plant diversity restoration and soil habitat in desert steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21): 8516–8524.
- [51] HUANG Y F, ZHOU Z Y, YUAN X Y, *et al.* Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2776–2781.
- [52] 杨承栋, 张万儒. 卧龙自然保护区森林土壤有机质的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(1): 30–38.
- YANG Chengdong, ZHANG Wanru. Study on the organic matter of the forest soils in Wolong natural reserve[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(1): 30–38.