



王 凡,曹银贵,王玲玲,等.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[J].煤炭科学技术,2022,50(9):249-260.  
WANG Fan, CAO Yingui, WANG Lingling, *et al.* Response characteristics of soil microorganisms and enzyme activities to different soil remodeling modes in open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 249-260.

# 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

王 凡<sup>1</sup>,曹银贵<sup>1,2</sup>,王玲玲<sup>1</sup>,闫 石<sup>3</sup>,张振佳<sup>1</sup>,白中科<sup>1,2</sup>

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083;2.自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035;  
3.神华北电胜利能源有限公司,内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘 要:**煤炭资源开发满足了社会经济发展的需要,但同时也带来了地表土壤的挖损所造成的表层土壤稀缺的问题。利用采矿固废重构土壤是草原露天矿区土地复垦的重要措施,使其达到可供植被恢复的状态,复垦后的土地与未被破坏的土壤相比,土壤微生物的群落结构特征发生了变化,导致复垦后的土地质量受到影响。土壤细菌群落结构特征和变化规律能够反映矿区复垦土壤微生物群落多样性和生态功能,以及土地复垦水平和质量。目前学界研究重点主要集中于复垦土壤的理化性质,针对土壤重构对微生物及酶活性影响的相关研究较为缺乏。本研究通过采集土壤与植被样品,采用单因素方差分析法,对内蒙古自治区锡林浩特市胜利煤矿的不同土壤重构方式下各复垦田块土壤微生物和酶活性进行了分析,结果表明:在 3 种重构方式下的复垦田块中,不同重构方式下均表现为土壤微生物的数量比例细菌占 99.00% 以上,放线菌占比约 0.70%,真菌数量比例最少,约为 0.10%。不同重构方式下田块之间的微生物数量的差异表现为:岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)的细菌和真菌数量均高于其他 2 种重构方式的田块,岩土田块(S)中的放线菌数量高于其他 2 种重构方式的田块。岩土田块(S)与岩土煤矸石混合田块(SG)中相同种类酶的含量差异较小,但与岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中蔗糖酶含量与前 2 种复垦方式差异较小,脲酶含量较前 2 种复垦方式低 10.00%、磷酸酶含量较前 2 种复垦方式高 10.00%。相同构造方式下田块内的微生物与酶活性表现为随着植被等级的增高而降低。总体上来看,3 种重构方式下的田块内,当植被等级不同时,微生物数量和酶活性存在差异性,这可能是由于位于表层 0~20 cm 的矸石所具有的良好保水性能和粉煤灰较强的吸水性给土壤微生物提供了水分充裕的生存环境,利用采矿固废解决东部草原矿区土地复垦表土稀缺的问题可能是较理想的土壤重构模式。

**关键词:**露天矿;土地复垦;土壤重构;酶活性;土壤微生物

**中图分类号:**X752      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2022)09-0249-12

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

WANG Fan<sup>1</sup>, CAO Yingui<sup>1,2</sup>, WANG Lingling<sup>1</sup>, YAN Shi<sup>3</sup>, ZHANG Zhenjia<sup>1</sup>, BAI Zhongke<sup>1,2</sup>

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences-Beijing, Beijing 100083, China;2.Key Laboratory of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China;3.Shenhua Nortel Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026000, China)

**Abstract:** The development of coal resources meets the needs of social and economic development, but it also brings about the problem of

收稿日期:2021-12-02      责任编辑:朱恩光      DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021-0438

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501105-2);国家自然科学基金资助项目(41701607);中央高校基本科研业务费创新型研究生科研能力培养资助项目(2-9-2019-307)

作者简介:王 凡(1996—),男,河北邢台人,硕士研究生。E-mail:1057567969@qq.com

通讯作者:曹银贵(1982—),男,湖南常德人,教授,博士生导师。E-mail:caoyingui1982@126.com

surface soil scarcity caused by surface soil excavation. The use of mining solid waste to reconstruct the soil is an important measure for land reclamation in open-pit grassland mining area to make it available for vegetation restoration. Compared with the undamaged soil, the community structure characteristics of soil microorganisms in the reclaimed land have changed, resulting in affected land quality after reclamation. The structural characteristics and change rules of soil bacterial community can reflect the diversity and ecological function of soil microbial community in the mining area, and reflect the level and quality of soil reclamation. At present, researches mainly focus on the physical and chemical properties of reclaimed soil, and the effects of soil remodeling on microbial and enzyme activities are relatively lacking. In this study, soil and vegetation samples were collected and one-way ANOVA was used to analyze soil microorganisms and enzyme activities of each reclaimed field under different soil reconstruction methods in Shengli Coal Mine, Xilinhot City, Inner Mongolia Autonomous Region. The results showed that: Among the reclaimed fields under the three reconstruction methods, the number of soil microorganisms under different reconstruction methods is bacteria which accounts for more than 99.00%, actinomycetes account for about 0.70%, and fungi accounts for the least, about 0.10%. The differences in the number of microorganisms among the fields under different reconstruction methods are as follows: the number of bacteria and fungi in the mixed field of rock and soil, coal gangues and fly ash (SGA) are higher than those of the other two reconstruction methods. The number of actinomycetes in (S) is higher than that of the other two reconstituted fields. Geotechnical field (S) mixed with geotechnical gangue field (SG) of the same type of enzyme concentration difference is small, but the content of invertase in the field mixed with the mixed field of geotechnical coal gangue and fly ash (SGA) is different from that of the former two. The difference of reclamation methods is small, the content of urease is 10.00% lower than that of the first two reclamation methods, and the content of phosphatase is 10.00% higher than that of the first two reclamation methods. Under the same structure pattern, the microbial and enzyme activities in the field generally decreased with the increase of vegetation level. In general, when the vegetation level is different in the fields under the three reconstruction methods, there are certain differences in the number of microorganisms and enzyme activities. This may be due to the good water retention performance of the gangue located 0–20 cm in the surface layer. The strong water absorption of fly ash provide a suitable living environment for soil microorganisms. It may be an ideal soil reconstruction model to use solid waste to solve the problem of scarce topsoil for land reclamation in the eastern grassland mining area.

**Key words:** open pit coal mine; land reclamation; soil reconstruction; enzyme activity; soil microorganism

## 0 引言

内蒙古锡林浩特草原区土壤以砂壤土为主,表土层薄且贫瘠,是制约草原生产力的重要因素。东部草原区现有大量以露天开采为主的大型煤电基地,高强度的煤炭开采给原本就存在表土稀缺问题的草原带来了土地破坏、水土流失、土壤沙化等一系列问题。同时,煤电基地的开发还产生了大量的工业固废,例如岩土剥离物、煤顶板、粉煤灰等工业固废,固废的大量堆积对脆弱的草原环境产生了较大的潜在危害。随着经济的高速发展和矿产资源高强度的开发,矿区已成为当今世界退化最为严重的生态系统之一<sup>[1-3]</sup>,矿区开采和利用煤炭过程中对地表土壤和植被的破坏以及固体废弃物堆积造成的污染,在占用大量的土地资源的同时还破坏了矿区土壤系统生物多样性,导致土壤微生物群落的结构特征受到了极大的干扰和破坏,土壤质量也受到影响。土壤细菌群落结构特征和变化规律能够反映矿区复垦地土壤微生物群落多样性和生态功能,反应土壤复垦水平和质量。但由于矿区采矿活动产生的岩土剥离物尚未熟化,营养贫瘠,其微生物活性也减弱<sup>[1-5]</sup>,为恢复矿区生态环境和遏制土地锐减的趋势,大力开展矿区土地复垦工作已成为当今之

重<sup>[1-3,6]</sup>。植被的恢复与重建是矿区土地复垦与生态修复的主要工作内容之一<sup>[7]</sup>,且与土壤微生物、酶活性等土壤因子关系密切<sup>[8]</sup>。土壤微生物在生态系统中至关重要,土壤微生物作为土壤微生物的重要组成部分,在改善土壤质量方面具有重要作用<sup>[9]</sup>,探索不同植被恢复条件下土壤微生物群落特征可为生态恢复提供重要信息。土壤微生物作为土壤中的分解者,不仅能够分解土壤中的有机物,还能够分解植物残体中的木质素和纤维素,对陆地系统中的碳循环至关重要<sup>[10-11]</sup>,除此之外,部分土壤微生物在提高植物抗逆性方面发挥着重要作用<sup>[12]</sup>。植物和微生物产生的酶在土壤养分循环和能量流动中起着重要作用。例如,蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶与土壤中的碳、氮、磷循环密切相关<sup>[13]</sup>。土壤酶在许多土壤生态过程中发挥着重要作用,与土壤微生物群落密切相关,可以快速响应植被恢复下微生物群落的变化。

土壤是生态系统中的重要组成部分,土壤微生物和养分在有机物质分解转化过程中起主导作用,影响着土壤生态系统中能量流动和物质循环,反映出土壤质量和健康状况等<sup>[14-15]</sup>;土壤酶能参与多种反应,是有机质代谢及污染物降解的驱动力,是土壤环境质量评价不可缺少的重要生物学指标<sup>[16-18]</sup>。

在国内外学者对矿区复垦土壤中的微生物进行研究,包含了针对复垦后土壤微生物的生物量及其数量进行研究,主要研究区域有加拿大阿尔伯塔省的半干旱草原区,中国安徽的低山丘陵区 and 山西的黄土高原区,以及 PALMER 等对山区采矿区的土壤微生物,但对于草原露天煤矿区土壤重构对微生物及酶活性影响缺乏研究。研究分析内容主要包括对复垦前后不同复垦年限、不同植被模式下土壤细菌、真菌、放线菌的生物量及其数量变化<sup>[35-38]</sup>。研究土壤养分和酶活性以及微生物数量对复垦的响应,对于采取合理的复垦方式以加快恢复矿区生态具有重要意义<sup>[1-3,6]</sup>。国外的复垦工作研究起步较早,主要集中在土壤重构及其基本特性等方面<sup>[1-5]</sup>,而我国土地复垦工作起步较晚,大量的学者在土地复垦与土壤重构的研究方面取得了较大的进展,初步建立了利用煤矸石、粉煤灰等固体废弃物进行土壤重构的原理和方法<sup>[6,19-20]</sup>,以及不同重构方式与固体废弃物不同配比下复垦植被恢复的效果研究<sup>[32-33]</sup>,并且进行了植被构建、土壤养分和防治水土流失等的研究<sup>[6,19-20]</sup>,但对于适合于东部草原区矸石风化物以及粉煤灰混合形成的重构土壤的植被恢复状况和酶活性以及微生物数量等方面的研究较少。因此,针对东部草原区露天煤矿开采以及煤电基地生产所带来的工业固废以及表土稀缺等问题,探究以煤电基地工业固废为材料开展土地复垦工作,并探究不同土壤重构方式对微生物及酶活性影响。

1 研究区概况

胜利煤田位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市西北部胜利苏木境内。南东边界距市区约 2 km,其地理坐标为:东经 115°30'~116°26',北纬 43°57'~44°14'。本区属半干旱草原气候,冬寒夏炎,年温差较大。降雨在时间上较为集中,每年 6—8 月份降水占全年降水量的 71%。冻结期为 10 月初至 12 月上旬,解冻期为翌年 3 月末至 4 月中旬,冻土深度 2.40~2.89 m。露天矿区土壤类型主要包含栗钙土、草甸栗钙土、草甸土等,该部分土壤有机质含量较高,土壤肥力较好;而部分地段由于草场退化,以形成沙化、砾石化栗钙土,植被覆盖率低,形成强烈侵蚀的生态脆弱草原区,对环境改变较为敏感。随着煤炭开采工作的进行,植被遭到严重的破坏,草原生态系统功能不断退化。胜利露天煤矿内排土场重构土壤区在 2019 年进行了有效的土地复垦与植被重建,自然植物组成有克氏针茅、大针茅、糙隐子草、冷蒿、羊草、洽草、冰草、锦鸡儿等,而人工复垦与

植被重建先锋植被为紫花苜蓿。研究区位置如图 1 所示。

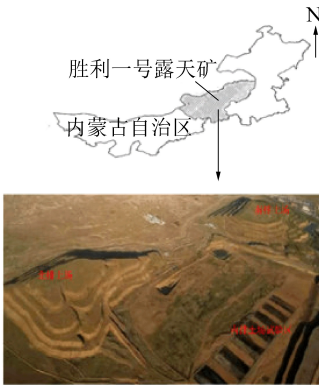


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

2 材料与方法

位于内排土场的研究区内,采用了 3 种不同的重构方式重构土壤:第 1 种为表层 50 cm 采矿剥离的原地貌表层土壤,下面全部为采矿剥离物自然堆积体;第 2 种为表层 50 cm 的采矿剥离原地貌表层土壤(表土)、煤矸石(煤顶板)的混合物,配比为 2:3,下面全部为采矿剥离物自然堆积体;第 3 种为表层 50 cm 的采矿剥离的原地貌表层土壤(表土)、煤矸石(煤顶板)、粉煤灰的混合物,配比为 3:4:3,下面全部为采矿剥离物自然堆积体。试验区设置方式为 3 种重构方式的 3 个小田块构成一个大田块,共 4 个大田块。重构土壤剖面如图 2 所示。

为了研究排土场重构土壤的不同重构方式田块之间以及同种重构方式田块内的植被恢复差异性与土壤微生物和酶活性之间的关系,以及对引起差异性的相关因素进行探究。在研究中采用了单因素方差分析法,利用 SPSS Statistics 25 的方差分析功能,针对选取的田块,根据已划分不同长势等级的植被及对应的土壤微生物含量、酶活性等进行分析。对露天矿区重构土壤微生物及酶活性与重构方式之间的变量关系进行探究,以揭示土地复垦与生态修复过程中微生物活性与不同重构方式之间的相关关系。

2.1 参数测定

土壤微生物数量测定的显微计数法是由 MARTILAINEN 等<sup>[39]</sup>在 1990 年提出的,土壤酶和微生物的测定指标包括:蔗糖酶、磷酸酶、脲酶,细菌、真菌、放线菌等 6 个指标。土壤微生物主要类群数量的测定采用稀释涂布平板法。细菌使用牛肉膏蛋白胨培养基;真菌使用孟加拉红培养基;放线菌使用高氏一



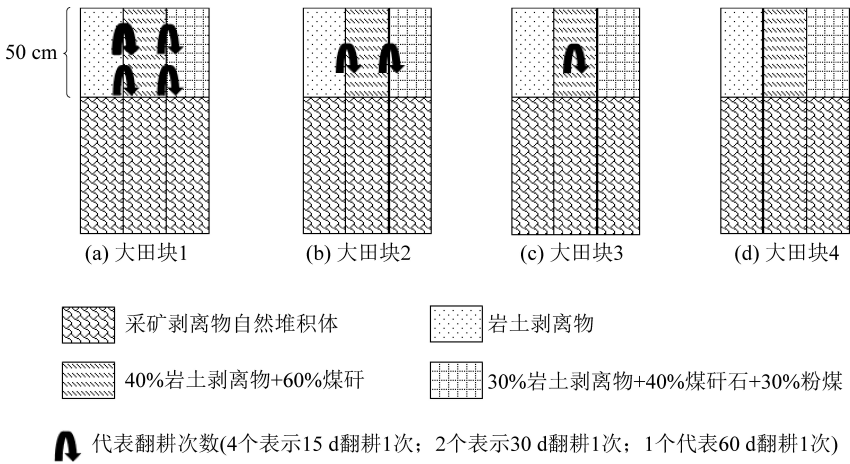


图 2 重构土壤剖面

Fig.2 Reconstruct soil profile

号培养基。蔗糖酶的测定使用 DNS 试剂并与标准葡萄糖曲线进行比对的方法,脲酶的测定使用苯酚钠比色法,磷酸酶的测定使用磷酸苯二钠比色法。

对采集的草本样品放入烘箱内进行恒温烘干处理,烘箱内温度保持在 65 ℃,烘干 48 h,直至将草样烘干至恒重,利用草样干重数值代表地上生物量。

2.2 统计分析方法

对于研究区内不同长势等级的植被及对应的土壤微生物含量、酶活性等的数使用 SPSS Statistics 25 软件的方差分析功能进行数据处理,并使用 origin 2019 软件对数据进行绘图。首先针对不同植被长势等级下对应的草样干重使用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 以及最小显著差数法 (LSD),以确定对植被长势等级定性分级的正确性,分析过程中将显著性水平 (sig) 设置为 0.05。在此基础上,分别对同等植被长势—不同复垦方式、不同植被长势—相同复垦方式下的土壤微生物和酶活性进行差异显著性分析,即分析岩土田块 (S)、岩土煤矸石混合田块 (SG) 以及岩土煤矸石粉煤灰混合田块 (SGA) 中植被长势等级 I、II、III、IV 的差异性。

3 结果与分析

3.1 田块选取与采样

2019 年 5 月,内蒙古锡林浩特胜利露天煤矿内排土场的重构土壤试验区经过复垦后播种紫花苜蓿,土地复垦标准参考《土地复垦质量控制标准》TD/T 1036—2013 以及《高标准基本农田建设标准》TD/T 1033—2012,紫花苜蓿种植管理标准参考 DB51/T 406—2004。2019 年 8 月对当年复垦后的复垦区进行了田块调查和取样,对位于内排土场的具有相同土壤重构方式的 4 个大田块所种植苜蓿的

大田块采集土壤样本以及植被样本。为了使田块中被选定的各样点代表不同的植被恢复水平,在取样的田块内对各样点的植被长势进行了定量的分级,同时考虑到不同构建田块内植被恢复的整体水平具有差异性,实际的分级是在 3 个不同构建田块内分别进行的,因此本次样点的选定能够代表田块内的不同植被恢复水平。在每个单独的田块内基于样线法,在田块内分别设置 12 个样点,植被恢复水平根据植被的长势由优至劣定义为 I、II、III、IV 四个等级,每个等级下设置 3 个草本样方 1 m×1 m,3 个土样样点,采样深度 20 cm,将 3 个样点采集到的土样混合。

在选取的草本样方内,收割所有草本地面以上的部分,装入保鲜袋内带回实验室烘干称重。每个样方中使用土钻取表层土样 (0~20 cm) 设置 3 个重复,并将相同等级土样混合均匀并去除植物根系后放入无菌密封袋保存,并放入加冰袋的保温箱内送至检测单位测定微生物数量以及酶活性。

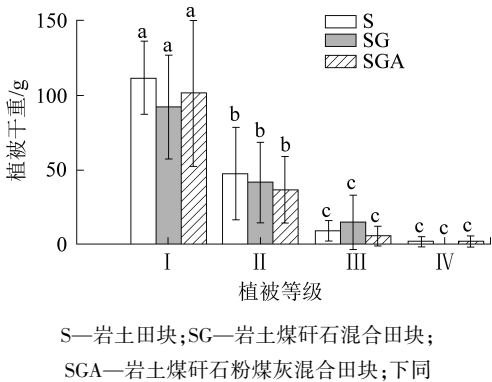


图 3 不同植被等级下地表植被干重特征

Fig.3 Dry weight characteristics of surface vegetation under different vegetation grades



3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下 12 个小田块内各等级植被等级(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)样点的植被干重均值如图 3 所示,从图 3 可以看出,各复垦方式下的田块内,不同植被等级样点的植被干重均值的数值特征表现为除等级Ⅲ、Ⅳ差异不显著外( $P>0.05$ ),其它各个植被等级之间均两两差异极显著( $P<0.01$ ),这可能是由于等级Ⅲ样点发生烧苗现象之后,植被没有得到后续恢复所导致的。

针对 3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下 12 个小田块内植被等级Ⅲ、Ⅳ样点的植被干重单因素方差分析差异不显著,进一步对 2 种等级进行独立样本 t 检验,不同复垦方式下的田块内,等级Ⅲ、Ⅳ样点的植被干重均值的数值特征表现为岩土田块(S)内两等级间差异显著外( $P<0.05$ ),岩土矸石田块(SG)内两等级之间差异极显著( $P<0.01$ ),岩土矸石粉煤灰田块(SGA)内两等级间差异不显著( $P>0.05$ )。

3.2 不同重构方式下复垦田块土壤微生物特征

3.2.1 不同重构方式下复垦田块土壤微生物数量特征

3 种不同重构方式下重构土壤的土壤微生物数量及总体特征见表 1,不同复垦方式之间以及不同植被等级下各类别土壤微生物的数量特征存在差异。从各植被等级所对应样点的微生物数量均值来看,不同复垦方式的各植被等级下,随着植被等级的降低微生物数量呈下降的趋势;根据微生物数量的均值进行分析可以得到,不同重构方式下的田块之

间,土壤微生物数量最多的田块为岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA),岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中细菌数量的总体均值  $77.20\times10^5$  cfu/g 是岩土田块(S)总体均值  $64.75\times10^5$  cfu/g 的 1.19 倍,是岩土煤矸石混合田块(SG)总体均值  $60.55\times10^5$  cfu/g 的 1.27 倍;岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中真菌数量的总体均值  $0.088\ 3\times10^5$  cfu/g 是岩土田块(S)总体均值  $0.041\ 9\times10^5$  cfu/g 的 2.11 倍,是岩土煤矸石混合田块(SG)总体均值  $0.067\ 9\times10^5$  cfu/g 的 1.30 倍;岩土田块(S)中放线菌数量的总体均值  $0.557\ 0\times10^5$  cfu/g 是岩土煤矸石混合田块(SG)总体均值  $0.345\ 6\times10^5$  cfu/g 的 2.11 倍,是岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)总体均值  $0.452\ 0\times10^5$  cfu/g 的 1.30 倍。

从变异系数均值分析,不同复垦方式之间以及不同植被等级下各类别土壤微生物的数量特征均存在一定变异,且均表现为强变异程度。岩土田块(S)中不同植被等级下各类别土壤微生物中真菌的变异系数均值最高,为 59.55%,放线菌最低,为 45.91%;岩土煤矸石混合田块(SG)中不同植被等级下各类别土壤微生物中的变异系数均值差别较小,变化范围为 36.84%~38.01%;岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中不同植被等级下各类别土壤微生物中细菌的变异系数均值最高,为 52.74%,真菌最低,为 30.74%。

表 1 不同重构方式下土壤微生物数量及总体特征

| Table 1 Quantity and overall characteristics of soil microorganisms under different reconstruction methods |      |                         |         |         |                         |          |          |        |       |       |
|--|------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|----------|----------|--------|-------|-------|
| 田块信息   | 植被等级 | 微生物数量均值/( $10^5$ cfu/g) |         |         | 微生物标准差值/( $10^5$ cfu/g) |          |          | 变异系数/% |       |       |
|  |      | 细菌                      | 真菌      | 放线菌     | 细菌                      | 真菌       | 放线菌      | 细菌     | 真菌    | 放线菌   |
| 岩土田块(S)  | Ⅰ    | 22.825                  | 0.015 0 | 0.163   | 7.701 7                 | 0.004 63 | 0.063 26 | 33.74  | 30.78 | 38.81 |
|  | Ⅱ    | 18.900                  | 0.010 6 | 0.137   | 9.381 2                 | 0.005 73 | 0.069 39 | 49.64  | 54.34 | 50.74 |
|  | Ⅲ    | 13.750                  | 0.008 6 | 0.128   | 4.709 2                 | 0.005 46 | 0.060 69 | 34.25  | 63.51 | 47.51 |
|  | Ⅳ    | 9.275                   | 0.007 7 | 0.129   | 6.884 5                 | 0.006 90 | 0.059 95 | 74.23  | 89.57 | 46.56 |
| 岩土煤矸石田块(SG)  | Ⅰ    | 21.350                  | 0.020 0 | 0.085 7 | 10.84 8                 | 0.008 07 | 0.025 19 | 50.81  | 39.21 | 29.39 |
|  | Ⅱ    | 16.525                  | 0.018 0 | 0.102 0 | 4.044 2                 | 0.006 22 | 0.046 46 | 24.47  | 34.41 | 45.33 |
|  | Ⅲ    | 11.425                  | 0.015 5 | 0.080 7 | 5.416 3                 | 0.005 80 | 0.030 72 | 47.41  | 37.93 | 38.05 |
|  | Ⅳ    | 11.250                  | 0.014 4 | 0.077 2 | 3.303 0                 | 0.005 50 | 0.026 73 | 29.36  | 38.20 | 34.60 |
| 岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)  | Ⅰ    | 22.175                  | 0.024 1 | 0.118   | 14.484 6                | 0.008 40 | 0.060 73 | 65.32  | 35.14 | 51.36 |
|  | Ⅱ    | 19.525                  | 0.023 3 | 0.128   | 9.995 1                 | 0.008 15 | 0.059 33 | 51.19  | 34.91 | 46.27 |
|  | Ⅲ    | 20.850                  | 0.022 5 | 0.116   | 7.709 1                 | 0.004 50 | 0.052 44 | 36.97  | 19.95 | 45.12 |
|  | Ⅳ    | 14.650                  | 0.018 4 | 0.090   | 8.418 0                 | 0.006 07 | 0.039 82 | 57.46  | 32.94 | 43.76 |

3.2.2 不同植被等级下土壤微生物数量变化特征

3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下各等级植被等级(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)样点的重构土壤的土壤微生物

数量差异分析结果如图 4 所示,细菌数量在 3 种微生物中占有绝对优势,其次是放线菌,真菌的数量最少。研究表明,土壤微生物与土壤质量的关系十分

紧密,土壤微生物不但能分解动植物残体、矿化有机质,还对腐殖质和团聚体的形成、维持土壤生态系统的平衡发挥作用<sup>[21]</sup>。同时,土壤微生物生物量较大程度上代表着土壤活性以及有机质的储量<sup>[22]</sup>。

从图 4 可以看出,不同植被等级下,各类土壤微生物在数量上均呈现出随着植被等级的降低而减少的趋势。各复垦方式下,微生物总量表现为重构土壤岩土田块(S)各植被等级下差异显著( $P<0.05$ ),重构土壤岩土煤矸石田块(SG),岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA)各植被等级下差异不显著( $P>0.05$ ),这

一结果是由占微生物整体数量 99% 以上的细菌所导致的;真菌在各复垦方式以及各植被等级下差异不显著( $P>0.05$ ),但其数量特征表现为随着植被等级的降低,真菌数量均呈现出下降的趋势;放线菌在各复垦方式下,SG 的植被等级 I、II、III 下差异不显著( $P>0.05$ ),SGA 的各植被等级下差异不显著( $P>0.05$ ),岩土田块(S)的等级 I 与其他 3 个等级差异显著( $P<0.05$ ),且异常表现为小于其他 3 个植被等级下的微生物数量,这可能是由于此处样方内植被的侵入物种单株重量较大所导致的。

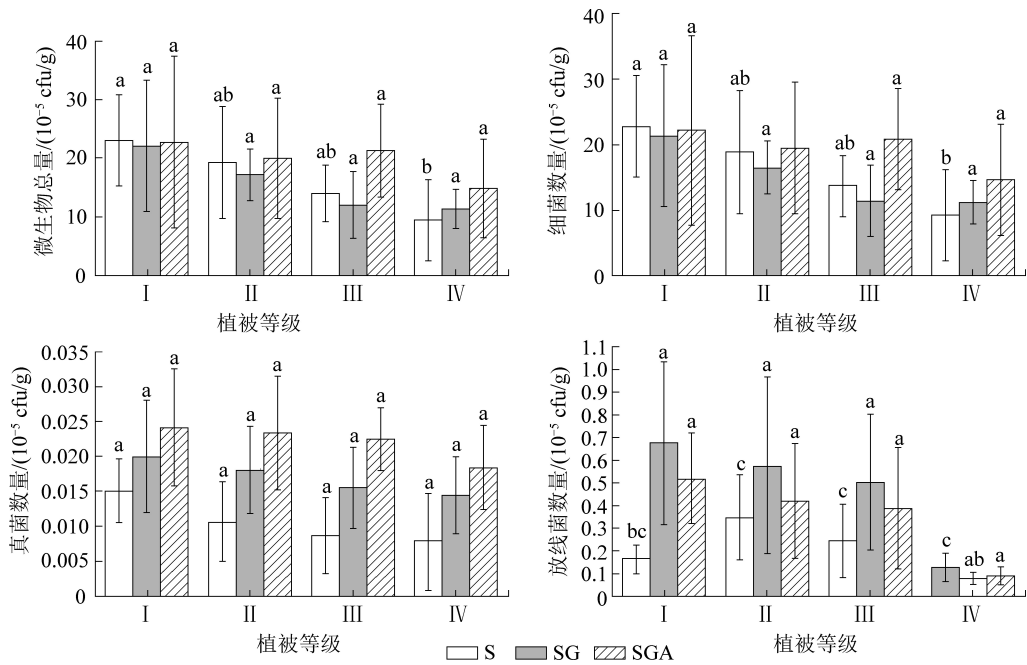


图 4 不同植被等级下微生物数量变化特征

Fig.4 Variation characteristics of microbial quantity under different vegetation grades

3.2.3 不同重构方式土壤微生物数量变化特征

3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下各相同植被等级的土壤微生物数量差异分析结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,不同重构方式下,各类土壤微生物均呈现出细菌在数量上占绝对的优势。等级 I 的各复垦方式下,各种微生物数量均表现为差异不显著( $P>0.05$ );等级 II、III、IV 的各复垦方式下,细菌和放线菌数量均表现为差异不显著( $P>0.05$ ),真菌在 3 种复垦方式下表现为差异显著( $P<0.05$ )。

3.3 不同重构方式下复垦田块土壤酶活性特征

3.3.1 不同重构方式下复垦田块土壤酶活性特征

3 种不同重构方式下重构土壤的土壤酶活性总体特征见表 2,从表 2 可知,不同复垦方式之间以及不同植被等级下各类别土壤酶的活性存在差异。从各植被等级所对应样点的土壤酶浓度均值来看,不

同复垦方式的各植被等级下,随着植被等级的降低土壤酶浓度呈下降的趋势;根据土壤酶浓度的均值进行分析可以得到,不同重构方式下的田块之间,土壤酶浓度最高的田块为岩土煤矸石混合田块(SG)。岩土煤矸石混合田块(SG)中脲酶浓度的总体均值  $2.451 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 是岩土田块(S)总体均值  $1.566 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 的 1.57 倍,是岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)总体均值  $1.440 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 的 1.70 倍;岩土煤矸石混合田块(SG)中蔗糖酶浓度的总体均值  $2.049 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 是岩土田块(S)总体均值  $1.339 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 的 1.53 倍,是岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)总体均值  $1.589 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 的 1.29 倍;岩土田块(S)中磷酸酶浓度的总体均值  $2.296 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 是岩土煤矸石混合田块(SG)总体均值  $1.641 \times 10^{-2}$  mg/(g·h) 的 1.40 倍,是岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)

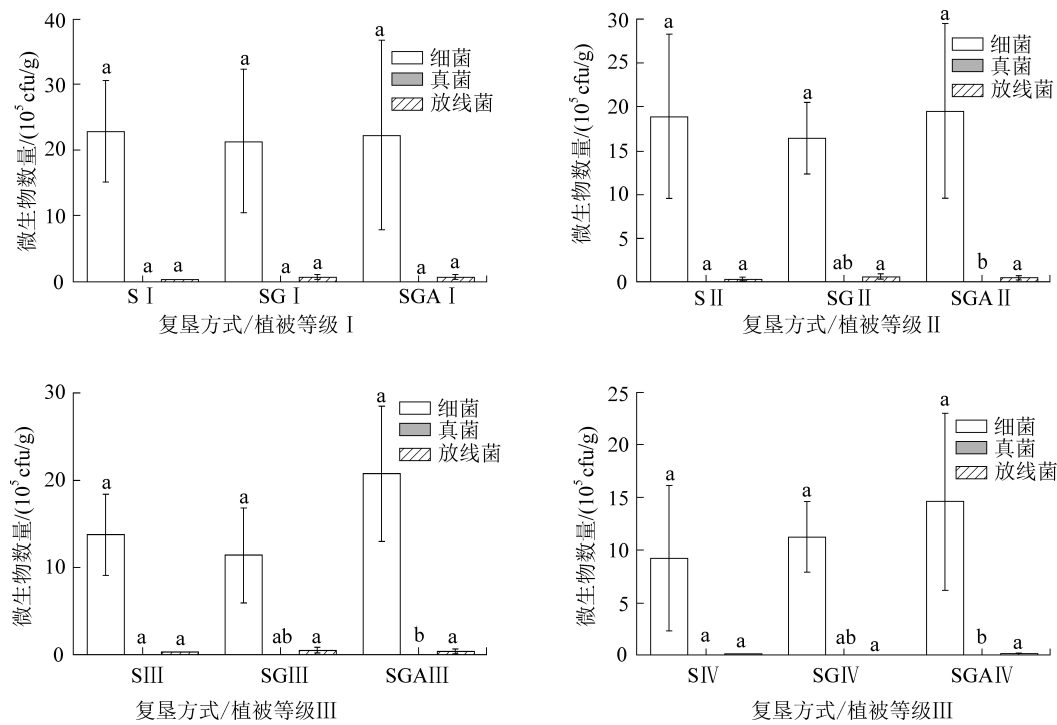


图 5 不同土壤重构方式下微生物数量变化特征

Fig.5 Variation characteristics of microbial quantity under different soil reconstruction methods

总体均值  $1.868 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$  的 1.23 倍。

从变异系数均值分析,不同复垦方式之间以及不同植被等级下各类别土壤酶活性的酶浓度数量特征均存在一定变异,且均表现为强变异程度。岩土田块(S)中不同植被等级下各类别土壤酶活性中的脲酶变异系数均值最高,为 71.71%,磷酸酶最低,为 45.91%;岩土煤矸石混合田块(SG)不同植被等级下各类别土壤酶活性中的蔗糖酶变异系数均值最高,为 63.83%,脲酶最低,为 41.29%;岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中不同植被等级下各类别土壤微生物中脲酶和蔗糖酶的变异系数均值均相对较高,为 56.69%和 56.07%,磷酸酶最低,为 29.77%。

3.3.2 不同植被等级下土壤酶浓度变化特征

3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下各等级植被等级(I、II、III、IV)样点的重构土壤的土壤酶浓度差异分析结果如图 6 所示,3 种酶的浓度均值由高到低依次表现为磷酸酶、脲酶、蔗糖酶。土壤酶由微生物与作物根系等共同作用而产生,是土壤最重要活性成分之一<sup>[23]</sup>,它参与土壤所有的生物化学过程,其活性的高低既能反映土壤中生化过程的相对强度,又能迅速响应复垦措施以及复绿方式对重构的复垦土壤质量的影响,反映土壤质量的变化<sup>[24-25]</sup>。

从图 6 可以看出,不同土壤重构方式下,各类土

壤酶浓度均呈现出随着植被等级的降低而减少的趋势。各复垦方式下,土壤酶浓度总量表现为各植被等级下差异显著( $P < 0.05$ ),且均呈现出下降趋势,S 的等级 I、II、III 土壤酶浓度均表现为下降趋势,等级 III 到等级 IV 表现为突然的上升,这是由于脲酶在岩土田块(S)中的浓度由等级 III 到等级 IV 的突增所导致的;磷酸酶在 3 种不同的重构均表现为等级 I 与其它等级差异显著( $P < 0.05$ ),但等级 II、III 之间差异不显著( $P > 0.05$ );脲酶在 3 种不同的重构表现为,在岩土田块(S)中的浓度等级 I、II、III 之间差异不显著( $P > 0.05$ ),等级 IV 与前 3 个等级差异显著( $P < 0.05$ ),且浓度值突增,这种现象可能是由于等级 IV 的样方内较为干燥,使得尿素的水解过程( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$ )由于缺少水分无法进行,脲酶无法通过催化尿素水解产生消耗,从而使得脲酶的浓度升高;蔗糖酶在不同重构方式下的各植被等级 I、II、III、IV 之间均表现为差异显著( $P < 0.05$ ),且酶浓度的数值特征均表现为随着植被等级的降低而降低。

3.3.3 不同重构方式土壤酶活性变化特征

3 种不同重构方式(S、SG、SGA)下各相同植被等级土壤酶浓度数量差异分析结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,在等级 I 的各复垦方式下,磷酸酶在 3 种重构方式下差异显著( $P < 0.05$ ),且在岩土田块(S)



表 2 不同重构方式下土壤酶活性及总体特征

Table 2 Soil enzyme activities and overall characteristics under different reconstruction methods

| 田块信息              | 植被等级 | 酶浓度均值/ $10^{-2} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ |       |       | 酶浓度标准差值/ $10^{-2} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ |         |         | 变异系数/% |       |       |
|-------------------|------|--|-------|-------|--|---------|---------|--------|-------|-------|
|                   |      | 磷酸酶  | 脲酶    | 蔗糖酶   | 磷酸酶  | 脲酶      | 蔗糖酶     | 磷酸酶    | 脲酶    | 蔗糖酶   |
| 岩土田块(S)           | I    | 0.833  | 0.485 | 0.513 | 0.124 2  | 0.384 8 | 0.313 6 | 14.92  | 79.35 | 61.19 |
|                   | II   | 0.650  | 0.408 | 0.348 | 0.161 9  | 0.289 9 | 0.188 4 | 24.90  | 71.13 | 54.21 |
|                   | III  | 0.430  | 0.383 | 0.243 | 0.132 4  | 0.282 4 | 0.160 7 | 30.79  | 73.83 | 66.27 |
|                   | IV   | 0.383  | 0.290 | 0.235 | 0.143 1  | 0.181 3 | 0.211 7 | 37.42  | 62.51 | 90.09 |
| 岩土煤矸石田块(SG)       | I    | 0.560  | 0.783 | 0.673 | 0.188 5  | 0.146 4 | 0.360 7 | 33.66  | 18.71 | 53.63 |
|                   | II   | 0.453  | 0.655 | 0.575 | 0.185 5  | 0.244 2 | 0.387 0 | 41.00  | 37.28 | 67.30 |
|                   | III  | 0.430  | 0.575 | 0.503 | 0.253 6  | 0.237 3 | 0.299 8 | 58.99  | 41.27 | 59.67 |
|                   | IV   | 0.198  | 0.438 | 0.298 | 0.150 6  | 0.297 1 | 0.222 3 | 76.27  | 67.92 | 74.73 |
| 岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA) | I    | 0.598  | 0.490 | 0.518 | 0.160 7  | 0.323 7 | 0.196 7 | 26.90  | 66.07 | 38.01 |
|                   | II   | 0.535  | 0.370 | 0.420 | 0.165 8  | 0.213 1 | 0.253 2 | 31.00  | 57.59 | 60.30 |
|                   | III  | 0.435  | 0.310 | 0.388 | 0.134 8  | 0.170 5 | 0.265 4 | 30.98  | 55.00 | 68.48 |
|                   | IV   | 0.300  | 0.270 | 0.263 | 0.090 6  | 0.129 9 | 0.150 9 | 30.18  | 48.10 | 57.47 |

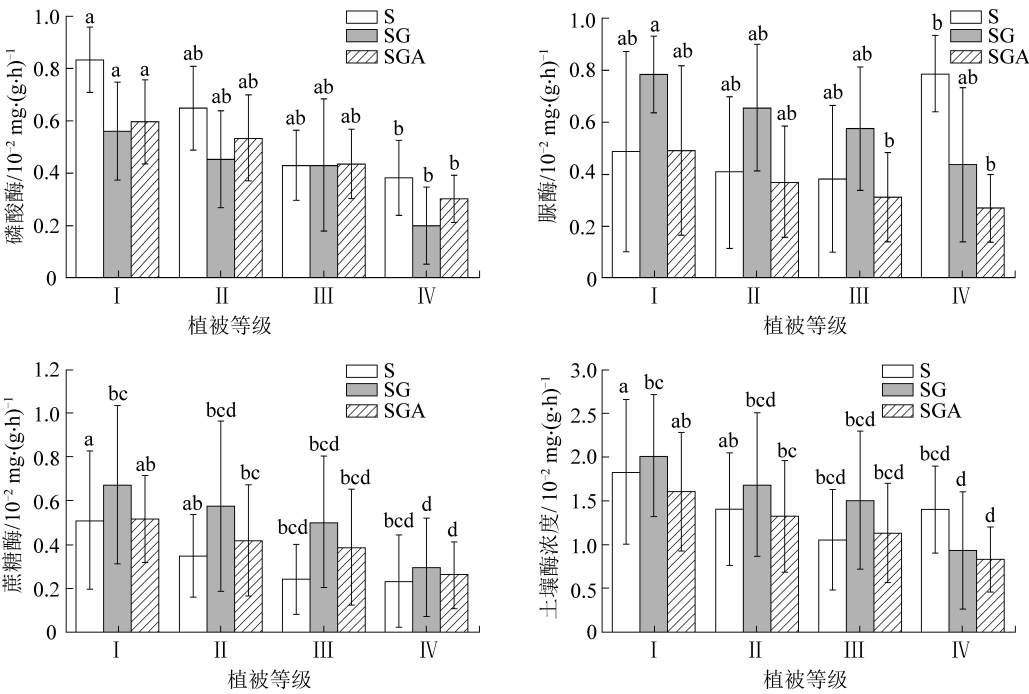


图 6 不同植被等级下土壤酶浓度变化特征

Fig.6 Variation characteristics of soil enzyme concentration under different vegetation grades

中的浓度高于岩土煤矸石田块(SG)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA)。脲酶和蔗糖酶在 3 种重构方式下差异不显著( $P>0.05$ ),且在岩土煤矸石田块(SG)中的浓度高于岩土田块(S)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA);在等级 II 的各复垦方式下,3 种酶的浓度差异特征均表现为在 3 种重构方式下差异不显著( $P>0.05$ ),数值特征表现为磷酸酶在 S 中的浓度高于岩土煤矸石田块(SG)、岩土煤矸石粉煤灰田块

(SGA),脲酶和蔗糖酶均表现为在岩土煤矸石田块(SG)中的浓度高于岩土田块(S)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA);在等级 III 的各复垦方式下,3 种酶的浓度差异特征均表现为在 3 种重构方式下差异不显著( $P>0.05$ ),数值特征表现为磷酸酶在 3 种复垦方式下浓度数值较为均一,脲酶和蔗糖酶均表现为在岩土煤矸石田块(SG)中的浓度高于岩土田块(S)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA);在等级 IV 的各复垦

方式下,3 种酶的浓度差异特征均表现为在 3 种重构方式下差异不显著( $P>0.05$ ),数值特征表现为磷酸酶在岩土田块(S)中的浓度高于岩土煤矸石田块(SG)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA),但数值差异较小,脲酶在岩土田块(S)中的浓度高于岩土煤矸石田

块(SG)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA),在岩土煤矸石田块(SG)中的浓度高于岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA)。蔗糖酶在 3 种重构土壤中的浓度在数值上差异较小,且表现为在岩土田块(S)中的浓度略低于岩土煤矸石田块(SG)、岩土煤矸石粉煤灰田块(SGA)。

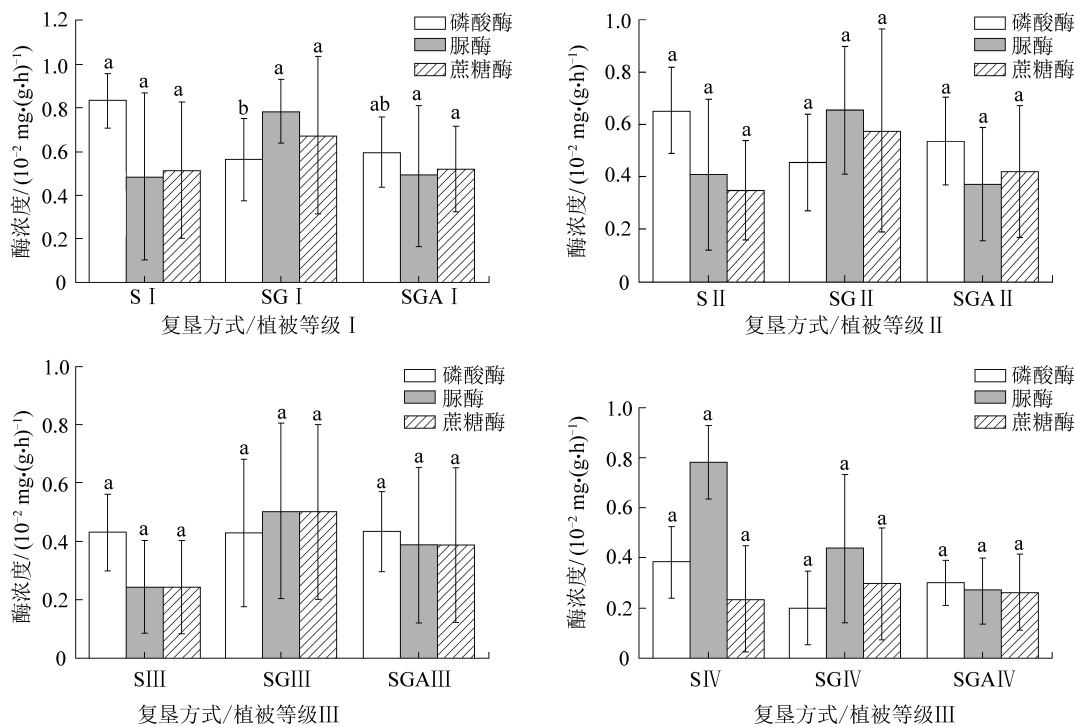


图 7 不同土壤重构方式下土壤酶浓度变化特征

Fig.7 Variation characteristics of soil enzyme concentration under different soil reconstruction methods

4 讨 论

植被在土地复垦与生态修复过程中有着重要的作用,植被是改善复垦田块和重构土壤的质量的重要因素。在土壤生物组分中,土壤微生物和土壤酶在土壤物质和能量的转化过程中起着至关重要的作用,土壤微生物群落的变化能够迅速反映外来异生物质对土壤环境质量的影响,以及植被的恢复过程。土壤微生物数量增多,使得复垦田块对有机物的分解能力得到增强,进而提高复垦田块的物质循环能力。土壤酶活性的增强,能够促进土壤中有机质的转化、将有机质分解为植物可以直接利用的矿质元素。微生物数量与酶活性状况的改善,同样会提高植被群落的地上生物量以及地表的植被覆盖度。

1)当年复垦的 3 种重构土壤,相同重构方式下,长势较好的植被,其根际土壤微生物数量较多( $P<0.05$ )。土壤微生物的数量均表现为细菌最多,且占到的数量比例均在 99.00%以上;放线菌和真菌含量极少,分别为 0.70%与 0.10%。这与樊文华等<sup>[26]</sup>和王艳超等<sup>[27]</sup>研究成果基本一致。在不同的

重构方式下,岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)的细菌和真菌数量均高于其它 2 种重构方式的田块,这与胡振琪等<sup>[28-29]</sup>研究基本一致,这是由于重构土壤中粉煤灰的加入可以降低煤矸石的酸性和重金属污染,同时煤矸石中的大量含碳化合物和腐殖酸类化合物可以为土壤微生物的生存提供生存的养分。因此,岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中的微生物数量总体优于其他 2 种重构方式下的田块。岩土田块(S)中的放线菌数量高于其他 2 种重构方式的田块,这可能是由于煤矸石吸热这一特性,导致在日照强度较大的时间内,地温快速升高并维持在相对较高的水平<sup>[42]</sup>。添加煤矸石的重构土壤,其地温在每天内都呈现出相较于未添加煤矸石田块更大的波动,放线菌在较高的波动范围内受到高温胁迫,导致数量维持在较低的水平,而细菌和真菌的温度耐受性较高。未添加煤矸石田块的低温相对较低,低温变化较小,适宜真菌生存,这与 Barcenas 等<sup>[30]</sup>的研究结果基本保持一致。因此,在植被自然恢复的基础上增加一定程度的人工干预调控地温等因素,可以降低高温等对土壤微生物的生存胁迫。

2) 土壤酶是由土壤微生物产生的,具有催化作用的一类蛋白质,控制其他变量不变的条件下,土壤微生物数量与土壤酶活性成正比。3 种重构土壤,在相同重构方式下,长势较好的植被,其根际土壤酶活性较强( $P<0.05$ )。脲酶与蔗糖酶在岩土煤矸石混合田块(SG)中的浓度均值均高于其他 2 种复垦方式的田块,脲酶的活性是土壤有机氮向土壤有效氮转化能力和土壤无机氮的供应能力<sup>[31]</sup>,且岩土煤矸石混合田块(SG)的土壤的孔隙度较其他 2 种重构方式的较大,持水能力较强,土壤水可以增加水溶性的营养物质,在增加土壤微生物数量的同时也使得土壤酶的活性较强,蔗糖酶也可以增加土壤中易溶性营养物质;磷酸酶在岩土田块(S)中浓度高于其他 2 种复垦方式的田块,土壤磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯的酶,它能将有机磷酯分解为无机磷酸,土壤有机磷可以在它的作用下才可以转变为可供植物吸收的无机磷<sup>[40-41]</sup>,岩土田块(S)中磷酸酶浓度较高可能是由于有机磷酸酯较少,磷酸酶得不到消耗所导致,在土地复垦工作的后期管护和之后的复垦工作中,可以在岩土(S)重构方式下的田块中适当补充磷肥,增加土壤中的有机磷酸酯,以充分发挥磷酸酶的催化作用,改善植被的恢复水平。

3) 岩土煤矸石混合田块(SG)与岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)的土壤微生物数量与土壤酶活性要高于岩土田块(S),这可能是由于矸石的良好保水性能和粉煤灰较强的吸水性给土壤微生物提供了适宜的生存环境<sup>[43]</sup>,利用采矿固废解决东部草原矿区土地复垦表土稀缺的问题可能是较理想的土壤重构模式。草原区露天煤矿开采区的植被恢复过程中,土壤微生物、酶活性与植被的恢复生长互相作用,共同推动植被恢复演替进展,同时也推动土壤微生物、酶活性与土壤质量的改善提高,二者之间表现为正向互作效应。

## 5 结 论

1) 在 3 种重构方式下的复垦田块中,不同重构方式下均表现为土壤微生物的数量比例细菌占 99.00% 以上,放线菌占到约 0.70%,真菌数量比例最少,约为 0.10%。不同重构方式下田块之间的微生物数量的差异表现为:岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)的细菌和真菌数量均高于其他 2 种重构方式的田块,岩土田块(S)中的放线菌数量高于其他 2 种重构方式的田块。

2) 岩土田块(S)与岩土煤矸石混合田块(SG)

中相同种类酶的含量差异较小,但与岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)中蔗糖酶含量与前 2 种复垦方式差异较小,脲酶含量较前 2 种复垦方式低 10.00%、磷酸酶含量较前 2 种复垦方式高 10.00%。

3) 不同重构方式下田块之间的酶浓度的差异表现为:磷酸酶在岩土田块(S)中浓度高于其他 2 种复垦方式的田块,脲酶与蔗糖酶在岩土煤矸石混合田块(SG)中的浓度均高于其他 2 种复垦方式的田块;相同构造方式下田块内的微生物与酶活性表现为随着植被等级的增高而降低。

4) 总体上来看,岩土煤矸石混合田块(SG)与岩土煤矸石粉煤灰混合田块(SGA)的土壤微生物数量与土壤酶活性要高于岩土田块(S),这可能是由于位于表层 0~20 cm 的矸石所具有的良好保水性和粉煤灰较强的吸水性给土壤微生物提供了水分充裕的生存环境,利用采矿固废解决东部草原矿区土地复垦表土稀缺的问题可能是较理想的土壤重构模式。

## 参考文献(References):

- [1] ROONEY R C, BAYLEY S E, SCHINDLER D W. Oil sands mining and reclamation cause massive loss of peatland and stored carbon [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109 (13): 4933-4937.
- [2] DONG Jihong, YU Min, BIAN Zhengfu, *et al.* The safety study of heavy metal pollution in wheat planted in reclaimed soil of mining area sin Xuzhou, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(2): 673-682.
- [3] LI Hua, SHAO Hongbo, LI Weixiang, *et al.* Improving soil enzyme activities and related quality properties of reclaimed soil by applying weathered coal in opencast- mining areas of the Chinese Loess Plateau [J]. *Clean Soil, Air, Water*, 2012, 40(3): 233-238.
- [4] YAO Duoxi, MENG Jun, ZHANG Zhiguo. Heavy metal pollution and potential ecological risk in reclaimed soils in Huainan mining area [J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2010, 16(3): 316-319.
- [5] PALMER M A, BERNHARDT E S, SCHLESINGER W H, *et al.* Mountaintop mining consequences [J]. *Science*, 2010, 327(5962): 148-149.
- [6] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 等. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化 [J]. *农业工程学报*, 2009, 24(12): 205-209.  
SUN Haiyun, LI Xinju, HU Zhenqi, *et al.* Variance of reclamation soil quality in Majiata opencast mine region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12): 205-209.
- [7] 王洪丹, 王金满, 曹银贵, 等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5098-5108.  
WANG H D, WANG J M, CAO Y G, *et al.* Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5098-5108.



- [8] WARING B G, WEINTRAUB S A, SINSABAUGH R. Relationships among climate, soil nutrients, and enzyme stoichiometry in low-latitude ecosystems: A pan-tropical analysis [C]. Minneapolis: 98th ESA Annual Meeting, 2013.
- [9] 肖 礼, 黄懿梅, 赵俊峰, 等. 土壤真菌组成对黄土高原梯田种植类型的响应 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3151-3158.  
XIAO Li, HUANG Yimei, ZHAO Junfeng, *et al.* High-throughput sequencing revealed soil fungal communities under three terrace agrotypes on the loess plateau [J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3151-3158.
- [10] BARBI F, PRUDENT E, VALLON L, *et al.* Tree species select diverse soil fungal communities expressing different sets of lignocellulolytic enzyme-encoding genes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 100: 149-159.
- [11] CUI Yongxing, BING Haijian, FANG Linchuan, *et al.* Diversity patterns of the rhizosphere and bulk soil microbial communities along an altitudinal gradient in an alpine ecosystem of the Eastern Tibetan Plateau [J]. Geoderma, 2019, 338: 118-127.
- [12] 张树萌, 黄懿梅, 倪银霞, 等. 宁南山区人工林草对土壤真菌群落的影响 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1449-1458.  
ZHANG Shumeng, HUANG Yimei, NI Yinxia, *et al.* Effects of artificial forest and grass on soil fungal community at southern Ningxia mountain [J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1449-1458.
- [13] BURKE D J, WEINTRAUB M N, HEWINS C R, *et al.* Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 795-803.
- [14] WARING B G, WEINTRAUB S A, SINSABAUGH R. Relationships among climate, soil nutrients, and enzyme stoichiometry in low-latitude ecosystems: A pantropical analysis [C]. Minneapolis: 98th ESA Annual Meeting, 2013.
- [15] ERWIN A C, GEBER M A, AGRAWAL A A. Specific impacts of two rooter bivore sand soil nutrient on plant performance and insect insecticide reactions [J]. Oikos, 2013, 122(12): 1746-1756.
- [16] TIAN Lei, DELL E, SHI Wei. Chemical composition of dissolved organic matter in a grassland ecosystem: Correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(3): 426-435.
- [17] ALLISON S D, WEINTRAUB M N, GARTNER T B, *et al.* Evolutionary economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function [J]. Soil Enzymology, 2011, 22: 229-243.
- [18] BELL T H, KLIRONOMOS J N, HENRY H AL. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 820-828.
- [19] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地田块植被恢复过程多样性变化 [J]. 生态学报, 2005, 25(4): 763-770.  
GUO XiaoYu, ZHANG JinTun, GONG HuiLi, *et al.* Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 763-770.
- [20] 董雪红, 于 敏, 程 伟, 等. 矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 280-286.  
DONG Jihong, YU Min, CHENG Wei, *et al.* Safety of heavy metals pollution for wheat planted in reclaimed mining soil [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 280-286.
- [21] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 131-134.  
ZHENG Zhaopei, LIU Zuoxin. Soil quality and its evaluation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 131-134.
- [22] 崔晓晓, 罗惠宁, 俞元春, 等. 喀斯特峡谷区不同恢复阶段土壤微生物量及呼吸熵 [J]. 水土保持学报, 2011, 10(5): 117-120.  
CUI Xiaoxiao, LUO Huining, YU Yuanchun, *et al.* Soil microbial biomass, respiration, and metabolic quotient under different vegetation restoration stages in karsts gorge district [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 10(5): 117-120.
- [23] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1785-1792.  
ZHAO Yalil, GUO Haibin, XUE Zhiwei, *et al.* Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [24] 隋鹏祥, 张心昱, 温学发, 等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2038-2045.  
SUI Pengxiang, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, *et al.* Effects of tillage and straw management on nutrient contents and enzyme activities of brown soil [J]. Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2038-2045.
- [25] 陈 闯, 吴景贵, 杨子仪. 不同有机肥及其混施对黑土酶活性动态变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 245-250.  
CHEN Chuang, WU Jinggui, YANG Zirui. Effects of different manures and their mixed application on the dynamic changes of soil enzymes activity for black soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 245-250.
- [26] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 330-336.  
FAN Wenhua, BAI Zhongke, LI Huifeng, *et al.* Effects of different vegetation restoration patterns and reclamation years on microbes in reclaimed soil [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 330-336.
- [27] 王艳超, 李玉灵, 王 辉, 等. 不同植被恢复模式对铁尾矿微生物和酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2008(10): 1826-1829.  
WANG Yanchao, LI Yuling, WANG Hui, *et al.* Effects of vegetation restoration pattern on microbial quantity and enzyme activity in iron tailings [J]. Journal of Ecology, 2008(10): 1826-1829.
- [28] 胡振琪, 张明亮, 马保国, 等. 粉煤灰防治煤矸石酸性及重金属复合污染 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 79-83.  
HU Zhenqi, ZHANG Mingliang, MA Baoguo, *et al.* Fly ash for control pollution of acid and heavy metals from coal refuse [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 79-83.
- [29] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及

- 苜蓿增产效果[J].农业工程学报,2007,23(11):120-124.
- HU Zhenqi, KANG Jingtao, WEI Xiuju, *et al.* Experimental research on improvement of reclaimed soil properties and plant production based on different ratios of coal-based mixed materials [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 120-124.
- [30] BCR CENAS M, GEMA, GCMEZ B, *et al.* Adaptation of soil microbial communities to temperature; comparison of fungi and bacteria in a laboratory experiment [A]. Global Change Biology, 2009, 15(12): 2950-2957.
- [30] 焦志勇.土壤脲酶的研究进展及发展前景[J].江西农业, 2016(17): 84.
- JIAO Zhiyong. Research progress and prospect of soil urease [J]. Jiangxi Agriculture, 2016(17): 84.
- [32] KUANG Xinyu, CAO Yingui, LUO Gubai, *et al.* Responses of *Melilotus officinalis* growth to the composition of different topsoil substitute materials in the reclamation of open-pit mining grassland area in Inner Mongolia [J]. Materials, 2019, 12(23): 3888.
- [33] 况欣宇,曹银贵,罗古拜,等.基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J].农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 453-461.
- KUANG Xinyu, CAO Yingui, LUO Gubai, *et al.* Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4): 453-461.
- [34] 黄雨晗,况欣宇,曹银贵,等.草原露天矿区复垦田块与未损毁地土壤物理性质对比[J].生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 940-946.
- HUANG Yuhan, KUANG Xinyu, CAO Yingui, *et al.* Comparison of soil physical properties between reclaimed land and undamaged land in grassland opencast mining area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 940-946.
- [35] 张瑞娟,李 华,王爱英,等.不同复垦方式对铝矿废弃地土壤微生物多样性的影响研究[J].农业环境科学学报, 2013, 32(10): 2012-2019.
- ZHANG Ruijuan, LI Hua, WANG Aiyong, *et al.* Effects of different reclamation patterns on soil microbial diversity in abandoned aluminum mining land [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 2012-2019.
- [36] LI J, ZHENG Y, YAN J, *et al.* Effects of different regeneration scenarios and fertilizer treatments on soil microbial ecology in reclaimed opencast mining areas on the Loess Plateau, China [J]. PLoS One, 2013, 8(5): e63275.
- [37] ZORNOZA R, ACOSTA J A, FAZ A, *et al.* Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation [J]. Geoderma, 2016, 272: 64-72.
- [38] 樊文华,白中科,李慧峰,等.不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J].农业工程学报, 2011, 27(2): 330-336.
- Fan Wenhua, Bai Zhongke, Li Huifeng, *et al.* Effects of different vegetation restoration patterns and reclamation years on microbes in reclaimed soil [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 330-336.
- [39] MARTIKAINEN P J, PALOJARVI A. Evaluation of the fumigation-extraction method for the determination of microbial C and N in a range of forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22: 797-802.
- [40] 王亚茹,林鑫宇,惠 昊,等.杨树人工林类型对土壤磷组分的影响[J/OL].生态学杂志: 1-9 [2021-06-05]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202106.015>.
- Wang Yaru, Lin Xin-yu, HUI Hao, *et al.* Effects of poplar plantation types on soil phosphorus fractions [J/OL]. Chinese Journal of Ecology: 1-9 [2021-06-05]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202106.015>.
- [41] 刘彦伶,李 渝,张 艳,等.长期施用磷肥和有机肥黄壤微生物量磷特征[J].中国农业科学, 2021, 54(6): 1188-1198.
- LIU Yanling, LI Yu, ZHANG Yan, *et al.* Characteristics of microbial biomass phosphorus in yellow soil under long-term application of phosphorus and organic fertilizer [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(6): 1188-1198.
- [42] 贾鲁涛,吴倩云.煤矸石特性及其资源化综合利用现状[J].煤炭技术, 2019, 38(11): 37-40.
- JIA Luta, WU Qianyun. Properties and comprehensive utilization status of coal gangue resource [J]. Coal Technology, 2019, 38(11): 37-40.
- [43] 李梦刚.覆土模式对煤矸石填埋土壤水分动态及聚合草生长的影响[D].银川:宁夏大学, 2020.