



推荐阅读：

[我国土地复垦与生态修复 30 年：回顾、反思与展望](#)

[我国采煤沉陷区治理实践与对策分析](#)

[中国煤炭资源高效清洁利用路径研究](#)

[水煤浆制备与应用技术及发展展望](#)

[我国煤基活性炭的应用现状及发展趋势](#)

[煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新](#)

[现代煤化工废水处理研究进展及展望](#)

[煤气化废水处理技术研究进展](#)

[低阶煤热解关键技术问题分析及研究进展](#)

[煤加氢热解及热解焦气化特性试验研究](#)

[煤炭地下气化理论与技术研究进展](#)



移动扫码阅读

毕银丽,郭晨,王坤.煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(4):52-59. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.04.004

BI Yinli, GUO Chen, WANG Kun. Research progress of biological improvement of reclaimed soil in coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 52-59. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.04.004

## 煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展

毕银丽<sup>1,2</sup>, 郭晨<sup>1</sup>, 王坤<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2.西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**煤炭开采造成了大量的沉陷区及废弃地,亟待进行土地复垦,而土壤改良是土地复垦的关键和基础。我国煤炭开采大多集中于西部干旱半干旱区域,经过采煤扰动后土地极度退化,自然恢复困难,通过人工手段恢复是目前土地复垦主要的研究方向。人工恢复的关键点是对土壤的改良,提高土壤肥力,改善土壤结构,丰富微生物功能群,进而提高人工恢复的效率。综述了生物改良内涵,分析了矿区土壤改良的影响因素,植被恢复和微生物修复对土壤改良的影响,介绍了现代监测方法高光谱遥感对复垦土壤和植被的监测应用情况。总结了目前自然演替及人工演替下土壤性状的变化、影响因素、作用机制,植被、微生物在随复垦时间延长而对土壤改良的贡献,微生物复垦新技术在土地复垦中的应用以及高光谱遥感在土壤和植被的快速无损监测中的应用方法。归纳出植被恢复、微生物群落功能增强与土壤改良是相互促进的,人工复垦能加快植被恢复速率,增加土壤结构优化及养分积累,促进微生物及土壤酶活性。以丛枝菌根真菌为代表的微生物对复垦区植物的生长发育性状有显著的促进作用。微生物技术的应用是高效、低成本人工生态修复的有效手段,高光谱监测已经在土壤质量和植被长势等方面取得广泛应用,对于矿区生态环境的可持续发展具有深远的现实意义。

**关键词:**生物改良;土地复垦;土壤改良;植物生长;微生物修复

中图分类号:TD88 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)04-0052-08

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

BI Yinli<sup>1,2</sup>, GUO Chen<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Coal mining activities have caused serious environmental problems, and a large number of subsidence areas and abandoned areas are in urgent need of reclamation. Soil improvement is the key and basis of land reclamation. Most of China's coal mining is concentrated in the arid and semi-arid regions of western China. After the coal mining disturbance, the land is extremely degraded and the natural recovery is difficult. The recovery by artificial means is the main research direction. The key points of artificial restoration are the improvement of soil, the improvement of soil fertility, the improvement of soil structure, and the enrichment of microbial functional groups, thereby improving the efficiency of artificial recovery. The article reviews the biological amelioration connotation and the influencing factors of soil improvement in the mining area, the effects of vegetation restoration and microbial restoration on soil improvement, and the monitoring research of soil and vegetation by hyperspectral remote sensing. The authors summarize the current soil changes, influencing factors, and mechanism under natural succession and artificial succession, the changes of vegetation and microorganisms with reclamation and their contribution to soil improvement, the application of microbial technology in land reclamation, and hyperspectral remote sensing application of technology in rapid non-destructive monitoring of soil and vegetation. The results show that the relationship between vegetation restoration, microbial community function, and soil improvement is mutually reinforcing. Artificial reclamation can accelerate the rate of vegetation restoration, thereby increasing the optimization of soil structure and nutrient accumulation, and promoting the activity of microorganisms and soil enzymes. Arbuscular mycorrhizal fungi represented by mycorrhizal fungi can significantly promote the growth and physiological characteristics of plants in the reclamation area. The application of microbial technology is an effective and efficient means of artificial ecological

收稿日期:2020-02-20;责任编辑:代艳玲

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(Z18110006318021)

作者简介:毕银丽(1971—),女,陕西米脂人,教授,长江学者,博士。E-mail:yibi88@126.com

restoration. Hyperspectral technology has been widely used in soil quality and vegetation growth, which has far-reaching practical significance for the sustainable development of the ecological environment in mining areas.

**Key words:** biological amelioration; land reclamation; soil improvement; plant growth; micro-reclamation

## 0 引言

煤炭开采对土地、植被、生态和人居环境造成了巨大破坏,产生了大量的沉陷区及废弃地。虽然我国矿区土地复垦工作开展时期较早,但目前我国的土地复垦率仍明显低于欧美发达国家。目前,中国煤炭开采量持续增加,开采对植被、土壤和当地生态系统造成的损伤尤为严重<sup>[1]</sup>。井工开采造成了地表沉陷,水土流失,而露天开采造成原始地形、地貌被破坏,地表剥离物堆积形成大量废弃地,因而亟需对煤矿区进行土地复垦与生态修复。

土地复垦与生态修复简单说就是人类有目的地启动或促进退化的生态系统的正向演替,使其成为一个健康、稳定的整体。恢复生态学就是研究和揭示生态系统退化、生物多样性丧失的原因与机制以及与人类活动的关系,并制定生态系统恢复与重建应遵循的原理和有效措施,进而服务于区域的可持续发展<sup>[2]</sup>。矿区植被的恢复过程可分自然演替和人工演替,自然演替非常缓慢,而辅助施加人工复垦措施,可以提高植被演替的速率并缩短其周期<sup>[3]</sup>。矿区的植被覆盖率随着复垦年限的增长而上升,复垦植被的各项生理生态指标和生长状况均有明显的改善<sup>[4]</sup>。

尽管露天矿排土场和井工矿沉陷地的土地损伤特征不同,生态恢复的目的不同,但是对贫瘠土壤的改良是共性问题,因此笔者对此不再分类概述。笔者对矿区复垦土壤改良的影响因素、植被恢复和微生物修复对土壤改良的影响,现代监测方法高光谱遥感对复垦土壤和植被的监测应用现状进行了综述及分析,以期为矿区生态环境的可持续发展提供理论与技术支撑。

## 1 复垦土壤的生物改良内涵

近年来,矿区土地复垦中土壤改良与植被恢复是研究热点,不管是露天矿排土场、井工矿的农林地复垦,要想要获得较好的生态修复效应,土壤改良是核心和基础。生物修复是指利用植物、土壤动物和土壤微生物的生命活动及其代谢产物改变土壤物理结构、化学性质,并增强土壤肥力的过程。土壤的物理改良和化学改良投资成本较高,生物修复投资小,能够改变土壤环境质量,不但获得农林产出,而且实

现了生态系统的持续与稳定。

生物改良的过程是根际微生态系统各因子相互作用、相互协调的结果。土壤是植被生长发育的基质,土壤养分对植物的生长发育、调节植物对水热气的需求和植被的演替过程有至关重要的影响,植被所需的营养物质和水分均可从土壤中不断地提供<sup>[5]</sup>,并且土壤动物与微生物群落能共同参与营养物质循环,加快有机物的分解,促进土壤腐殖质转化,驱动养分循环与植物腐解富集,调节土壤肥力,进而影响植被的生长发育<sup>[6]</sup>。因而土壤改良是土地复垦的内在基础,植被恢复是生态效应的外在表现,植物生长与土壤性质紧密相关,而活跃于植物与土壤间的大量微生物活性又依赖于土壤质量与植被类型,微生物对于植物生长与土壤改良具有重要的作用,越来越被重视。生物改良效应主要由土壤改良、植被生长和微生物作用的交互来综合体现(图1)。

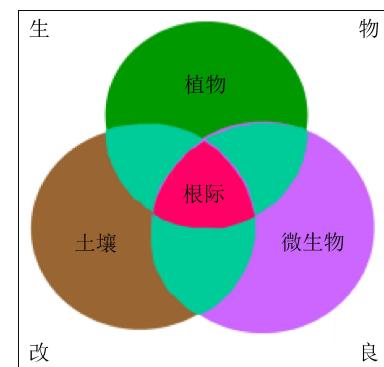


图1 生物改良各要素关联示意

Fig.1 Diagram of different factors interrelated in micro-ecosystem

我国矿区复垦土壤改良经历3个阶段:第1阶段为20世纪80年代以前,主要为土壤物理改良,主要是对土壤的组成结构改良,如采用泥浆泵复垦的土壤改良<sup>[7]</sup>。第2阶段是20世纪90年代,土壤改良方式主要为物理、化学改良,是结合土壤物理改良,添加化学肥料的方法,促进复垦土壤质量的快速提升,常见的有露天排土场土壤改良<sup>[8]</sup>。第3阶段是21世纪以来,土壤改良方式为物理、化学和生物改良。生物改良主要以植物改良、微生物改良、微生物-植物联合改良为研发重点<sup>[9-12]</sup>。我国的生物改良处于刚起步迅速发展阶段,生物修复已由细菌修复拓展到真菌修复、植物修复、动物修复、微生物-植物联合修复,由单一生物修复拓展到有机生物联合修复。

## 2 土壤改良的影响因素

### 2.1 土壤对植被生长的影响

植物生长与生存离不开土壤,土壤不仅是植物生长的载体更是其发育的物质基础,土壤结构破坏、营养元素流失将引起整个生态系统的崩溃。复垦土壤是否适宜植被恢复的因素主要有:pH值、土壤层深度、保水能力、入渗能力、排土场岩性、地貌特点<sup>[13]</sup>。土壤水分是植物生长发育的关键因子,土壤含水量不仅对根系生物量有显著影响,还与植物的蒸腾作用与光合作用相关,环境缺水会限制植物群落的生产力。姚敏娟等<sup>[14]</sup>研究表明,不同植被配置类型对土壤含水量、贮水量、营养元素、水分有效性均有显著影响,降雨丰沛时植被茂盛。可以得出,在西部干旱区水分是影响植被群落重要因素之一。土壤持水量在一定的范围内时,幼树光合和蒸腾速率随着土壤持水量的降低呈逐渐减弱的趋势<sup>[15]</sup>。土壤水分的垂直分布、变异系数和有效水分参数直接影响植物对水分的利用效率和植被的生长状况。

### 2.2 矿区复垦土壤的影响因素

对一般退化生态系统而言,恢复周期较长的自然恢复可以增加植被盖度以及土壤养分等,而矿区受采煤扰动影响,土地条件极度退化,短期内自我恢复较为困难,必须借助人工复垦措施先期引导,利用栽植人工生态林等方法加速自然演替过程。土壤有机质、N、P、K等营养元素含量多少是生态系统恢复的关键问题,改善土壤养分状况是矿区生态系统修复的首要任务。但是,土壤与植被难以在短期内通过自然恢复改善矿区生态系统的结构和功能,尤其土壤性质的改良需要较长的恢复时间。王晓琳等<sup>[16]</sup>研究了复垦年限为16年的晋陕蒙矿区排土场,植被重建工艺为单纯种草、灌木林、草灌混交林、乔木林等配置,人工植被下的土壤养分状况尚未完全恢复到该地区自然水平,进行生态修复时可优先选择豆科乔木、灌木,以及长芒草等草本植物,并使用间作套种等方法增强复垦效果。邢慧等<sup>[17]</sup>发现土壤速效钾、有机质、全氮对复垦区域沙枣、柠条林的种群特征有较大影响。复垦年限增加后,矿区植被群落逐渐恢复,植被凋落物数量增多,经过土壤微生物降解后,土壤有机质、N、P、K的含量均呈现增加趋势<sup>[18-19]</sup>。土壤酶活性受植被凋落物及根系分泌物的直接影响<sup>[20]</sup>,且与土壤容重和土壤养分存在显著相关关系<sup>[21]</sup>。土壤矿化、硝化过程等微生物反应受其活性、通气状况、土壤水分、有机质、全氮、pH等土壤理化性质的影响<sup>[22]</sup>,植被恢复使得土壤中碳

积累量增加,土壤酶在有机质的转化过程中参与率增加,从而提高了土壤酶活性。

### 3 植被恢复对土壤改良的影响

#### 3.1 植被对土壤改良作用

植被恢复过程可有效地降低土壤容重,改善土壤持水性以及孔隙状况,提高并稳定土壤入渗率,植被的直接穿插作用与凋落物的间接保护作用使土壤稳定性增加,从而使土壤结构得到优化。研究表明,粉粒含量、植被覆盖度和土壤体积密度是决定土壤入渗率变化的重要指标<sup>[23]</sup>。肖鹏等<sup>[24]</sup>研究表明植物根系对排土场复垦区土壤抗冲性变化特征表现为灌木林地>混交林地>刺槐林地>榆树林地>荒草地>耕地。MARIANO等<sup>[25]</sup>发现随着植被覆盖率的增长,土壤侵蚀速率会急剧下降。植被种群、覆盖度以及植物群落演替会使土壤的空间异质性发生改变,并能改善土壤的理化性质<sup>[26]</sup>。植被的凋落物含有大量的有机质、N、P、K等营养元素,土壤微生物将凋落物分解形成腐植质,使土壤肥力提高,并且植物根系通过向土壤中分泌如氨基酸、维生素、有机酸等各种根系分泌物来增加土壤中的养分含量。江山等<sup>[22]</sup>发现复垦区长期种植苜蓿能显著提高土壤氮库容量,平稳矿化过程。文献[9]发现固氮植物根和结节的空间分布对土壤氮含量有显著影响,土壤氮含量随根密度和结节密度的升高而增加。

#### 3.2 矿区植被配置对土壤改良作用

矿区植被优化配置模式是将恢复生态学、经济学、系统工程学的有关理论、方法和技术结合起来,优化设计和实施于矿区不同立地条件下组织合理、结构稳定、功能效益显著的一套优化生态系统方案。植被优化配置模式主要通过不同配置类型植被的土壤水分利用效率、养分利用效应,植被对环境因素影响、生长发育状况以及投资与经济评价的分析研究,结合生态效益和经济效益的评价结果进行选择。常规的植物配置模式为乔灌草相结合,具体配置模式与本区域的降水量与土质有关。在西部干旱半干旱矿区,因乔木需水量大而不常作为主要树种,而以灌草配置模式较多。结合土地复垦的最大经济效益,经济灌木优先考虑<sup>[10]</sup>,胡宜刚等<sup>[27]</sup>认为经过近20年的修复,黑岱沟露天煤矿排土场混播有豆科牧草的纯草本配置的恢复效果表现最好,是初期进行土壤修复的首选植被配置模式。在排土场的边坡等较为陡峭的复垦区,园艺性灌草与林木混栽能有效防止地表径流和土壤侵蚀,并能提高土壤再生能力<sup>[11]</sup>。在人工植被引导下,更有利于野生植被的恢

复,提高复垦区植被多样性。物种多样性增加,有利于生态系统稳定性提高<sup>[20]</sup>,促进生态系统物质循环和能量流动。复垦过程中不仅要注重提升土壤养分水平,更重要是优化种植结构模式,使土壤恢复到具有良好水肥气热的状态,植被种类优势互补,达到土地复垦目的。随着复垦程度的深入及土壤的改良,土地利用率与经济产出提高转为主要复垦需求,经济灌木或者林木就转变为后续的配置模式。

## 4 微生物修复对土壤改良影响

### 4.1 土壤微生物活性的作用

土壤微生物总量、种类、群落多样性土随着土地复垦年限的增加而逐渐增加,其群落结构也会随植被自然恢复而演替,土壤酶活性也随之增强。孙梦媛等<sup>[28]</sup>发现,复垦样地土壤酶活性和微生物量均比未复垦样地显著增加(显著性水平  $P<0.05$ )。李智兰<sup>[29]</sup>研究表明,矿区土壤蔗糖酶、脱氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性和微生物数量均随复垦年限的增加有所增加,并且细菌占到微生物总数的 99.3% 以上。根系真菌多样性、数量、微生物总量与植被多样性呈显著正相关关系,植被在恢复过程中能够有效地改善土壤的物理、化学性质,为土壤微生物提供了更适宜的生存生长条件。植被多样性和覆盖度对土壤微生物的活性有显著影响<sup>[30]</sup>,植物的凋落物会增加土壤有机质含量,为土壤微生物活动提供物质基础<sup>[31]</sup>,改善土壤微环境,进而影响土壤微生物群落的多样性<sup>[32]</sup>。土壤微生物对植被凋落物的分解,能增加土壤肥力,促进土壤有机质矿化和植物营养元素转化与供给,从而促进植被的生长。自然界常见的 2 种共生微生物为固氮微生物和菌根真菌。固氮微生物可以进行生物固氮,增加土壤中有效氮的来源,供植物吸收利用。菌根真菌能够增加植物对磷的吸收,促进植物根系发育,提高植物群落次生演替的速率,增强植被恢复效应,进而保护了生物多样性。

### 4.2 丛枝菌根真菌对土壤改良作用

丛枝菌根(AM)真菌是自然界土壤中分布最广泛、最普遍的一类土壤微生物,是属于菌根真菌的一类内生真菌。接种 AM 真菌,可扩大根系的吸收范围与面积,促进植物对土壤中磷、锌、铜的吸收和利用,对氮、钾、镁、硫、锰等吸收也具有一定作用,改善了土壤养分状况,促进了植物生长<sup>[33]</sup>。大量研究证明 AM 真菌通过改善植物的营养吸收对土壤产生改良作用,菌根产生球囊霉素是植物根际土壤碳、氮的重要来源,有利于改善土壤理化性质,改良和稳定土

壤结构。AM 真菌能提高宿主植物的环境适应性,改善宿主植物营养状况、生理代谢,增强宿主植物对病害、干旱、重金属、盐碱等环境压力的抵抗能力<sup>[34]</sup>,对退化土壤的恢复有积极作用。近年来,AM 真菌生态应用研究已由室内模拟试验转向田间生态效应,发现 AM 真菌在矿区生态修复中仍然能持续发挥作用,促进生态系统的生态多样性<sup>[20]</sup>。接种丛枝菌根真菌能促进紫穗槐的生长和光合作用速率<sup>[35]</sup>;在地膜覆盖下,接种 AM 真菌使小麦的籽粒产量和地上生物量分别提高了 46.6% 和 56.5%<sup>[36]</sup>;接种丛枝菌根真菌可以减缓塌陷拉伤对根系的修复功能,通过提高内源激素水平,伤根 1/3 时植株营养状况仍可达到未受伤的对照水平<sup>[37]</sup>。AM 真菌对于修复塌陷区生态系统具有重要意义,经过 AM 真菌修复的生态系统中生物多样性增加,多年生植物种类增加,一年生植物种类减少<sup>[20]</sup>,碳的积累呈现增加的趋势<sup>[21]</sup>,对于生态的演替及碳循环的正向作用具有重大的现实意义。现阶段,微生物复垦技术在矿区土地复垦中已经取得了较好的生态效应,在神东沉陷区、准能黑岱沟排土场、宝日希勒草原煤矿区排土场均建立了微生物复垦示范基地<sup>[12,20,35,38]</sup>。

## 5 矿区复垦土壤环境的高光谱监测

现代监测方法对土地复垦的质量及植被生长都会有较好的监测效果,有无人机遥感、高光谱遥感、热红外等不同手段,但高光谱遥感对土壤和植被的系统监测进展较多,高光谱遥感技术在矿区复垦土壤环境的监测成为主要研究热点。

### 5.1 高光谱遥感对复垦土壤质量的监测

通过人工手段对煤矿区复垦地土壤进行改良的同时,需对改良效果进行快速检测,用传统的检测方法所得结果相对滞后,而高光谱遥感凭借自身波段多、光谱连续,且容易获取的特点为土壤的快速监测提供了新方向。土壤反射光谱特征是受土壤类型、土壤含水量、土壤质地、土壤粒径、土壤碳氮磷等的综合响应,土壤的理化性质直接影响着光谱反射特性,可通过分析土壤理化性质与光谱间的关系,建立线性反演模型,对土壤理化参数进行估测。在进行土壤光谱信息采集时有 3 种方法:①将土壤样品带回实验室进行室内光谱测量;②利用便携式地物光谱仪直接在野外对土壤进行高光谱信息采集;③通过航空摄影测量获取大面积的土壤光谱信息。因在室内进行光谱测量时可以规避掉诸如测量时间有限、地表温度等外界不可抗力因素的影响,所以在室内采集光谱信息是最常用的方法。大量研究表

明,土壤有机碳含量、土壤粒径、土壤含水率、土壤氧化铁含量等是影响土壤光谱的重要因素<sup>[39-42]</sup>。

土壤有机碳含量的高低是衡量土壤肥力的重要指标之一,有研究表明,光谱反射率与土壤有机碳含量呈明显负相关关系,土壤有机碳含量越高,光谱反射率越低<sup>[39]</sup>。侯艳军等<sup>[40]</sup>通过建立荒漠土壤有机质含量高光谱估测模型,为实现土壤有机质的快速且准确估测提供了理论依据。土壤质地按照土壤粒径大小可分为沙土、壤土和黏土<sup>[41]</sup>,土壤粒径越小,土壤表面就越光滑,相应地反射率也就越大,马创等<sup>[42]</sup>通过对不同粒径下土壤光谱特征差异,探讨了不同粒径对土壤光谱特征的影响。遥感技术的进步为估算地表土壤含水量提供了多种方法,SADEGHI 等<sup>[43]</sup>找到从 Landsat 和 MODIS 卫星短波中转换的反射率与土壤水分之间的线性关系,并进一步采用实验室测量的不同土壤的光谱反射率数据验证了模型的准确性。土壤氧化铁是使土壤呈现出不同颜色的一个重要因素,通常认为,土壤氧化铁会使得土壤光谱反射率降低,且在可见光波段出现较多的吸收峰,在近红外波段范围内影响显著,可通过相关分析,提取敏感波段建立模型,对土壤氧化铁含量进行快速预测<sup>[44]</sup>。

## 5.2 高光谱遥感对植被的监测

利用高光谱遥感对植被进行监测的主要方面包括:对植被信息的提取、对生物量进行估计、对植被的长势进行监测和估产等。崔世超等<sup>[45]</sup>利用地物光谱仪对矿区植物进行高光谱信息采集,对比分析矿床上部和背景区植物光谱,选出具有代表性的特征波段,利用数理统计的方法构建出基于植物光谱数据的隐伏矿床预测模型。贺佳等<sup>[46]</sup>通过测定不同品种冬小麦不同生长期的生物量及其相对应的光谱反射率,利用数学分析的方法,筛选出合适的植被指数,建立冬小麦不同时期生物量监测模型。刘新杰等<sup>[47]</sup>通过监测不同时间段农作物对应的叶绿素密度和叶面积指数,探讨其变化规律,构建估产模型,实现了利用遥感数据对农作物长势和产量的预测。高光谱遥感在植被监测方面得到了广泛应用的同时,学者们通过研究归一化植被指数,使其能够被应用到植被监测的各个方面。目前微生物(菌根)复垦技术在矿区取得了较好的生态效应<sup>[20]</sup>,高光谱监测菌根植物的研究也被关注<sup>[48-49]</sup>。高光谱遥感对植被的监测相较传统方法可以实现对植物的无损化,而且更具实效性,随着精准农业的提出,高光谱遥感在对作物长势进行定量的实时诊断方面用有着巨大潜力。

## 6 展望

1) 土地复垦是包括土壤、植物、微生物在内的生态系统恢复、发育的过程,而土壤作为植物和微生物生长发育的载体基质以及生态系统功能完善的重要环节,必须给予重点的关注。土地复垦的核心是土壤改良、培肥与熟化的过程,目的在于在此基础上建立起完善的植物-土壤-微生物体系。

2) 对于人工生态修复,最重要的是提高修复效率,减少修复成本。人工林修复目前存在较多问题,如物种单一、群落稳定性差、栽植养护成本高、投入产出比低等,生物资源优选及配置是研究的主要方向。

3) 在人工修复过程中,不可忽视微生物在土地复垦过程中所起的作用。目前的研究热点也倾向于将各种微生物技术应用于土地复垦中,如功能细菌,深色有隔内生菌等,但其功能的持续性、有效性、安全性仍需大量的试验研究与生态评估。总体来说,微生物技术的应用是高效、低成本人工生态修复的有效手段,对于矿区生态环境的可持续发展具有深远的现实意义。

4) 大量研究利用高光谱遥感对土壤理化性质进行快速预测,并取得了理想效果,但都只是针对某一特定元素(如土壤有机碳、土壤含水率、土壤粒径等)进行研究,而没有考虑多个元素共同建立一个快速估测模型,在这一方面还需进一步深入研究。同时,随着微生物复垦技术在矿区土地复垦研究的深入,加之机器学习的逐步崛起,高光谱遥感在进行植被监测时可结合 AI 技术对研究内容进行更深层次的分析,将会是一个新的研究方法。

## 参考文献(References) :

- [1] 胡振琪,龙精华,张瑞娅,等.中国东北多层煤老矿区采煤沉陷地损毁特征与复垦规划[J].农业工程学报,2017,33(5):238-247.  
HU Zhenqi, LONG Jinghua, ZHANG Ruiya, et al. Characteristics of coal mining subsidence in old multi-layer coal mining areas in Northeast China and reclamation planning [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 238-247.
- [2] 倪应才.大红山矿区植被恢复措施[J].林业调查规划,2012,37(5):95-99.  
NI Yingcai. Vegetation restoration measures in Dahongshan Mining Area [J]. Forestry Survey Planning, 2012, 37(5): 95-99.
- [3] 杨振意,薛立,许建新.采石场废弃地的生态重建研究进展[J].生态学报,2012,32(16):325-335.  
YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin. Advances in ecology restoration of abandoned quarries [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 325-335.

- (16):325–335.
- [4] ZOLNIERZ L, WEBER J, GILEWASKA M, et al. The spontaneous development of understory vegetation on reclaimed and afforested post-mine excavation filled with fly ash [J]. *Catena*, 2015, 136: 84–90.
- [5] 卞正富,张国良.矿山复垦土壤生产力指数的修正模型[J].土壤学报,2000,37(1):124–130.
- BIAN Zhengfu, ZHANG Guoliang. Modified model of mine reclamation soil productivity index [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (1):124–130.
- [6] 董伟华,李晓强,宋扬.土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J].土壤,2016,48(2):211–218.
- DONG Weihua, LI Xiaoqiang, SONG Yang. The role of soil animals in the formation of soil organic matter [J]. *Chinese Journal of Soil*, 2016, 48 (2):211–218.
- [7] 胡振琪,张国良.煤矿沉陷区泥浆泵复田技术研究[J].中国矿业大学学报,1994,23(1):60–65.
- HU Zhenqi, ZHANG Guoliang. Research on mud pump reclaiming technology in subsidence area of coal mine [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1994, 23(1):60–65.
- [8] 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. Effects of the type of reclamation and the micro-topography on soil nutrients in the open-pit coal mine in Pingshuo Mining Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):6–12.
- [9] BOLDT-BURISCH K, NAETH M A, SCHNEIDER B U, et al. Linkage between root systems of three pioneer plant species and soil nitrogen during early reclamation of a mine site in Lusatia, Germany [J]. *Restoration Ecology*, 2015, 23(4):357–365.
- [10] 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):341–351.
- HU Jingjing, BI Yinli, GONG Yunli, et al. Effects of inoculation with AM fungi on the growth and soil characteristics of Xanthoceras henryi in coal mining subsidence area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5):341–351.
- [11] ZHANG L, WANG J, BAI Z, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. *Catena*, 2015, 128:44–53.
- [12] BI Y, XIE L, WANG J, et al. Impact of host plants, slope position and subsidence on arbuscular mycorrhizal fungal communities in the coal mining area of north-central China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 163:68–76.
- [13] GILLESPIE M, GLENN V, DOLRY D. Reconciling waste rock rehabilitation goals and practice for a phosphate mine in a semi-arid environment [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85:1–12.
- [14] 姚敏娟,张树礼,李青丰,等.黑岱沟露天矿排土场不同植被配置土壤水分研究:土壤水分垂直动态研究[J].北方环境,2011,23(S1):29–32.
- YAO Minjuan, ZHANG Shuli, LI Qingfeng, et al. Study on the soil moisture content of different vegetation configurations in the dump site of the Heidaigou open-pit mine; a vertical dynamic study of soil moisture [J]. *Northern Environment*, 2011, 23 (S1):29–32.
- [15] 黄俊威,孙永磊,周金星,等.白枪杆生长特性及光合特性对不同土壤水分的响应[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1254–1260.
- HUANG Junwei, SUN Yonglei, ZHOU Jinxing, et al. Response of growth characteristics and photosynthetic characteristics of white spear to different soil moistures [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2019, 36 (6):1254–1260.
- [16] 王晓琳,王丽梅,张晓媛,等.不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分16a恢复程度的影响[J].农业工程学报,2016,32(9):198–203.
- WANG Xiaolin, WANG Limei, ZHANG Xiaoyuan, et al. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9):198–203.
- [17] 邢慧,张婕,白中科,等.安太堡露天矿排土场植被恢复模式与土壤因子相关性研究[J].环境科学与管理,2015,40(1):82–85.
- XING Hui, ZHANG Jie, BAI Zhongke, et al. Correlation between vegetation restoration model and soil factors in the dump site of Antaibao Open-pit Mine [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40 (1):82–85.
- [18] CUDLÍN O, ŘEHÁK Z, CUDLÍN P. Development of soil characteristics and plant communities on reclaimed and unreclaimed spoil heaps after coal mining [C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 44(5):052030.
- [19] LEI H, PENG Z, HU Y, et al. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94:638–646.
- [20] 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. Self-succession law of microbial reclamation vegetation population in coal mining subsidence areas in western China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44 (1): 307–315.
- [21] XIAO L, BI Y, DU S, 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 [J]. *Catena*, 2019, 177:202–209.
- [22] 江山,刘焕焕,张菁,等.安太堡矿区不同复垦年限和复垦模式土壤氮矿化及硝化特征[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(2):286–295.
- JIANG Shan, LIU Huanhuan, ZHANG Jing, et al. Characteristics of soil nitrogen mineralization and nitrification in different rehabilitation years and models in Antaibao coal mine area [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English)*, 2019, 27 (2):286–295.
- [23] HUANG L, ZHANG P, HU Y, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine [J]. *Global Ecology & Conservation*, 2015, 4:255–263.

- [24] 肖鹏,吕刚,王洪禄,等.不同植被恢复模式对露天煤矿排土场土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):18-24,31.  
XIAO Peng, LYU Gang, WANG Honglu, et al. Effects of different vegetation restoration models on soil impact resistance of open-pit coal mine dumps [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (6) : 18-24, 31.
- [25] MARIANO M D L H, MERINOMARTIN L, ESPIGARES T, et al. Soil erosion - vegetation interactions in Mediterranean - dry reclaimed mining slopes[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [26] 张圆圆,徐先英,刘虎俊,等.石羊河流域中下游河岸植被与土壤特征及其相关分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):115-120.  
ZHANG Yuanyuan, XU Xianying, LIU Hujun, et al. Characteristics of riparian vegetation and soil and their correlations in the lower reaches of the Shiyang River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28 (5) : 115-120.
- [27] 胡宜刚,张鹏,赵洋,等.植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J].草业科学,2015,32(10):1561-1568.  
HU Yigang, ZHANG Peng, ZHAO Yang, et al. Effects of vegetation allocation on soil nutrient restoration in Heidaigou open-pit coal mine area [J]. Prata Science, 2015, 32 (10) : 1561-1568.
- [28] 孙梦媛,刘景辉,米俊珍,等.植被复垦对露天煤矿排土场土壤化学及生物学特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):206-212.  
SUN Mengyuan, LIU Jinghui, MI Junzhen, et al. Impact of vegetation reclamation on soil chemical and biological characteristics of open-pit coal mine dump site [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (4) : 206-212.
- [29] 李智兰.矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响[J].水土保持通报,2015,35(2):6-13.  
LI Zhilan. Effects of mining area reclamation on soil nutrients and enzyme activity and microbial population [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (2) : 6-13.
- [30] CIARKOWSKA K. Organic matter transformation and porosity development in non-reclaimed mining soils of different ages and vegetation covers; a field study of soils of the zinc and lead ore area in SE Poland [J]. Journal of Soils & Sediments, 2017, 17: 2066-2079.
- [31] 吕富成,王小丹.凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J].土壤,2017,49(2):225-231.  
LYU Fucheng, WANG Xiaodan. Research progress on the contribution of litter to soil respiration [J]. Chinese Journal of Soil, 2017, 49 (2) : 225-231
- [32] LI J, ZHOU X, YAN J, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 87: 56-62.
- [33] SMITH S E, READ D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. New York: Academic Press, 2010.
- [34] 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]. Mycosistema, 2017, 36 (7) : 800-806.
- [35] 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[J].环境工程,2019,37(S):844-849.  
LIU Yufei, FAN Yongwei, BAO Quanmin, et al. Effects of different treatments on growth characteristics and photosynthesis of Amorpha fruticosa in soil dumps of different years [J]. Environmental Engineering, 2019, 37 (S) : 844-849.
- [36] BI Y, QIU L, ZHAKYPBEK Y, et al. Combination of plastic film mulching and AMF inoculation promotes maize growth, yield and water use efficiency in the semiarid region of Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 278-286.
- [37] 毕银丽,孙金华,张健,等.接种菌根真菌对模拟开采伤根植物的修复效应[J].煤炭学报,2017,42(4):1013-1020.  
BI Yinli, SUN Jinhua, ZHANG Jian, et al. Remediation effects of plant root growth inoculated with AM fungi on simulation subsidence injured [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (4) : 1013-1020.
- [38] SONG Z, BI Y, ZHANG J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of plants in the mining associated clay [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1) : 1-9.
- [39] 王敬哲,丁建丽,张东,等.基于分数阶微分预处理高光谱数据的荒漠土壤有机碳含量估算[J].农业工程学报,2016,32(21):161-169.  
WANG Jingzhe, DING Jianli, ZHANG Dong, et al. Estimation of desert soil organic carbon content based on fractional differential preprocessing hyperspectral data [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32 (21) : 161-169.
- [40] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J].农业工程学报,2014,30(16):113-120.  
HOU Yanjun, TASHPOLAT · Tiyp, MAMAT · Sawut, et al. Hyperspectral estimation model of desert soil organic matter content [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30 (16) : 113-120.
- [41] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.  
WU Kening, ZHAO Rui. Classification of soil texture and its application in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (1) : 227-241.
- [42] 马创,申广荣,王紫君,等.不同粒径土壤的光谱特征差异分析[J].土壤通报,2015(2):42-48.  
MA Chuang, SHEN Guangrong, WANG Zijun, et al. Difference analysis of spectral characteristics of soils with different particle sizes [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015 (2) : 42-48.
- [43] SADEGHI M, JONES S B, PHILPOT W D. A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 164: 66-76.
- [44] 郭颖,郭治兴,刘佳,等.亚热带典型区域水稻土氧化铁高

- 光谱反演:以珠江三角洲为例[J].应用生态学报,2017,28(11):3675-3683.
- GUO Ying, GUO Zhixing, LIU Jia, et al. Hyperspectral inversion of iron oxide from paddy soil in a typical subtropical region: a case study of the Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 ( 11 ):3675-3683.
- [45] 崔世超,周可法,丁汝福.高光谱的矿区植物异常信息提取[J].光谱学与光谱分析,2019,39(1):241-249.
- CUI Shichao, ZHOU Kefa, DING Rufu. Extraction of plant anomaly information in mining areas based on hyperspectral [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1):241-249.
- [46] 贺佳,刘冰峰,郭燕,等.冬小麦生物量高光谱遥感监测模型研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):313-323.
- HE Jia, LIU Bingfeng, GUO Yan, et al. Research on winter wheat biomass hyperspectral remote sensing monitoring model [ J ]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2):313-323.
- [47] 刘新杰,魏云霞,焦全军,等.基于时序定量遥感的冬小麦长势监测与估产研究[J].遥感技术与应用,2019,34(4):756-765.
- LIU Xinjie, WEI Yunxia, JIAO Quanjun, et al. Research on monitoring and yield estimation of winter wheat based on time-series quantitative remote sensing [ J ]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4):756-765.
- [48] BI Yinli, KONG Weiping, HUANG Wenjiang. Hyperspectral diagnosis of nitrogen status in arbuscular mycorrhizal inoculated soybean leaves under three drought conditions [ J ]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11 ( 6 ): 126-131.
- [49] CHEN Shulin, BI Yinli, QI Lishuai. Monitoring subtle difference of chlorophyll of amorphophallus fruticosus inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi in coal mining area [ J ]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2014, 32 ( 1 ):481-488.