

# 煤炭开采区土地复垦后土壤肥力演变机制研究

武雨欣

国家能源集团神东煤炭集团生态环境管理中心, 中国·陕西 榆林 719000

**摘要:** 煤炭开采活动对土壤系统的结构和功能造成严重破坏, 土地复垦后的土壤肥力演变是一个复杂的多维过程。论文系统分析了煤炭开采区土地复垦后土壤肥力的演变规律、作用机制及优化策略。分析发现, 复垦土壤肥力的演变呈现出从初期恶化到中期恢复再到后期稳定的动态轨迹。具体机制涉及土壤剖面重组与物质迁移、元素循环与养分再分配、微生物驱动的生物化学过程及生态系统耦合调节等。在此基础上, 提出了基于多元化植被体系、有机质循环管理和精准施肥技术的优化策略, 为煤矿区土地可持续利用与生态恢复提供科学指导。

**关键词:** 煤炭开采区; 土地复垦; 土壤肥力; 演变机制

## Research on the Evolution Mechanism of Soil Fertility in Coal Mining Areas after Land Reclamation

Yuxin Wu

CHN Energy Shendong Coal Ecological Environment Management Center, Yulin, Shaanxi, 719000, China

**Abstract:** Coal mining activities cause serious damage to the structure and function of soil systems, and the evolution of soil fertility after land reclamation is a complex multidimensional process. This paper systematically analyzes the evolution laws, mechanisms, and optimization strategies of soil fertility after land reclamation in coal mining areas. The analysis found that the evolution of reclaimed soil fertility presents a dynamic trajectory from initial deterioration to mid-term recovery and then to later stability. The specific mechanisms involve soil profile reorganization and material migration, element cycling and nutrient redistribution, microbial driven biochemical processes, and ecosystem coupling regulation. On this basis, optimization strategies based on diversified vegetation systems, organic matter cycling management, and precision fertilization techniques were proposed to provide scientific guidance for sustainable land use and ecological restoration in coal mining areas.

**Keywords:** coal mining area; land reclamation; soil fertility; evolutionary mechanism

## 0 前言

煤炭资源的开采为经济发展提供了重要支撑, 但长期的开采活动对地表生态系统造成了不可忽视的破坏。土地复垦作为恢复采矿区生态功能的核心手段, 其有效性直接关系到区域环境的可持续性。然而, 由于煤炭开采区的土壤破坏程度较大, 复垦后土壤肥力的恢复过程往往复杂且周期较长。土壤肥力作为土壤支持植物生长的综合能力, 是衡量复垦效果的重要指标之一。论文旨在从理论和实践层面对煤炭开采区复垦后土壤肥力的演变机制与优化路径进行系统分析, 结合区域特征提出科学合理的优化策略。

## 1 土壤肥力概述

肥力是土壤的本质特征和基本属性。有关土壤肥力的概念, 世界各国目前仍无统一的认识。土壤肥力是土壤物理、化学和生物学性质的综合反映, 其中养分是土壤肥力的物质基础, 温度和空气是环境因素, 水既是环境因素又是营养因素。各种肥力因素(水、肥、气、热)同时存在、相互联系和相互制约。因此, 归纳起来可以将土壤肥力定义为: 土壤肥力(soil fertility)是土壤能经常适时供给并协调植物生长所需的空气、温度、养分和无毒害物质的能力。

土壤肥力可划分为自然肥力、人工肥力。自然肥力是由土壤母质、气候、生物、地形等自然因素的作用下形成的土壤肥力, 是土壤的物理、化学和生物特征的综合表现。它的形成和发展, 取决于各种自然因素质量、数量及其组合适当与否。

人工肥力是指通过人类生产活动, 如耕作、施肥、灌溉、土壤改良等人为因素作用下形成的土壤肥力。

## 2 煤炭开采区土地复垦后土壤肥力的演变规律

### 2.1 初期退化阶段

复垦初期, 土壤肥力普遍处于显著退化状态, 表现为地表土层结构破坏严重和养分供应能力不足。由于开采活动的剧烈扰动, 原生土壤剖面被严重破碎, 导致土壤结构失稳, 颗粒黏结力下降, 且表层土壤难以形成稳定的团聚体。与此同时, 水分保持能力显著减弱, 大量养分随地表径流流失。此外, 土壤盐碱化风险在此阶段尤为突出, 表现在盐分在土壤表层的积累和 pH 值异常升高, 进一步抑制植物生长和土壤肥力的恢复<sup>[1]</sup>。

### 2.2 中期过渡阶段

随着复垦时间的延续, 土壤进入过渡恢复阶段, 此时

肥力开始逐步改善,主要体现在有机质和养分含量的显著增加。在植被逐渐覆盖的条件下,枯落物分解为土壤提供了稳定的有机质来源,根系分泌物和土壤生物活性的恢复进一步促进了土壤结构的改善。同时,土壤中的碳氮循环逐渐建立,氮素矿化和固定能力逐步增强,使得土壤能够更有效地储存和释放养分。这一阶段的一个重要特点是,土壤中团聚体的形成速度加快,物理结构趋于稳定,持水能力显著提升。并且,盐碱化现象有所缓解,土壤pH值逐步恢复到适宜的水平,为后续阶段的稳定发展奠定了基础。

### 2.3 后期稳定阶段

在复垦后期,土壤肥力趋于稳定,表现为养分积累与消耗之间的动态平衡。此阶段,土壤有机质含量接近饱和,养分供应和利用效率保持在相对稳定的水平。土壤微生物群落结构在长时间的演替过程中逐步定型,酶活性和功能性群落比例达到新的平衡点,整体生态系统的功能恢复能力显著增强。尽管土壤肥力在此阶段表现出总体稳定的趋势,但其内部仍可能存在局部波动。例如,气候条件变化可能引起土壤水分条件的周期性波动,从而影响养分的可用性。同时,植物群落的演替和多样性增加,也可能对土壤养分循环产生新的驱动作用。这种平衡中的动态特性成为土壤长期可持续生产力的关键。

这一规律表明,复垦后土壤肥力的演变是一个逐步恢复并趋于稳定的非线性过程,其速度和结果受多种环境因素及时间维度的共同作用影响。

## 3 煤炭开采区土地复垦后土壤肥力演变机制

### 3.1 土壤剖面重组与物质迁移机制

煤炭开采区土地复垦后,土壤剖面重组和物质迁移机制是推动土壤肥力恢复的关键物理过程之一。这一机制主要体现为剖面层次的重新构建、物质的垂直迁移与颗粒分布的空间调节。在垂直方向上,土壤颗粒的再分布起着重要作用。粗颗粒因重力作用向剖面底部沉积,而细颗粒逐渐向上迁移并填充表层孔隙,这一过程可增强土壤表层的致密性和持水能力<sup>[2]</sup>。同时,复垦植被的根系活动加速了剖面的结构化进程。根系通过穿插和伸展作用,改良了土壤孔隙分布,形成有利于气体交换和水分渗透的微结构。此外,随着有机质和矿物质的持续输入,土壤剖面内逐步出现明显的分层现象。表层土壤因有机质积累而逐渐形成肥沃层,而底层土壤则因物质沉积形成支撑层。这种剖面结构的重建为土壤的长期肥力提供了基础支持。物质迁移过程则包括养分和盐分的垂直运移。矿质元素在土壤剖面内经历溶解、迁移及沉积的动态过程,逐步在特定深度形成富集区。盐分的迁移则受到水分循环和植被作用的调控,其在剖面的重新分布对土壤盐碱化问题的缓解具有积极意义。

### 3.2 元素循环与养分再分配机制

煤炭开采区复垦后,土壤肥力的恢复在很大程度上依

赖于元素循环与养分再分配机制。这一机制通过一系列地球化学过程和生物作用,实现了养分的释放、转化和重新分布。复垦土壤中,矿质元素的释放是关键初始驱动力。开采活动暴露出的底层岩石和剥离土富含矿物质,这些矿物借助化学风化和微生物降解作用释放出可利用的养分,如磷、钾和微量元素。与此同时,养分的再分配主要通过两种路径进行。第一,表层的植物枯落物分解为土壤提供了有机养分来源。这些有机质在土壤微生物的作用下被矿化,释放出氮、磷、钾等元素,供植物吸收利用。第二,矿物养分在水分作用下发生垂直迁移,并在特定深度形成养分富集带。例如,磷酸盐易与金属离子结合沉积,而钾离子因溶解性较强,在剖面中迁移幅度更大<sup>[3]</sup>。元素循环还包括碳氮耦合作用。在复垦过程中,植物光合作用固定大气二氧化碳并形成有机质,同时根系分泌物为土壤微生物提供碳源。这一过程促进了氮素的循环利用。微生物通过固氮、硝化及反硝化等过程,将大气氮转化为土壤可利用氮,并参与氮的再分配。

### 3.3 微生物驱动的生物化学过程机制

土壤微生物是复垦后土壤肥力演变的核心驱动力,其利用多种生物化学过程调节土壤的养分供应和结构功能。这一机制依赖于微生物群落的代谢活动和生态功能实现,主要包括有机物分解、养分矿化及微生物间的功能协同。微生物对有机物的分解是土壤养分供给的主要途径。植物残体、枯落物及根系分泌物在微生物的代谢作用下被降解,生成二氧化碳、氨态氮和有机酸<sup>[4]</sup>。这些产物进一步被土壤吸收或转化为植物可利用的养分。养分矿化过程是微生物生物化学功能的直接体现。例如,固氮菌通过固定大气中的氮气为土壤提供额外的氮素,解磷菌通过分泌有机酸溶解难溶性磷酸盐,提高磷的有效性。放线菌则通过降解复杂有机质,为土壤输入更多易吸收的养分。并且,微生物间的协同作用对土壤肥力的恢复起到了重要的调节作用。例如,某些细菌和真菌借助共生或竞争关系维持群落稳定,并在养分循环和土壤改良中发挥联合作用。这种微生物驱动的生物化学过程能够提高土壤养分供应效率,并改善土壤的生物活性。

### 3.4 生态系统耦合调节机制

在煤炭开采区复垦后,土壤肥力的恢复还受到生态系统内部多要素协同作用的调控。生态系统耦合调节机制通过整合土壤—植物—微生物—水文等要素的相互作用,形成了复杂的调节网络。例如,土壤水分条件对微生物代谢活性和植物生长均有显著影响。复垦植被通过调控地表径流和增加土壤渗透性,为土壤水分保持创造了条件。而土壤水分的改善反过来增强了微生物对有机质的分解能力,加速了养分释放过程。与此同时,区域气候条件如降水和温度变化对土壤水分动态产生重要影响,从而间接调节了土壤肥力恢复的速度。此外,植被覆盖和微生物活性之间也存在高度耦合。多样化的植被可提供丰富的根系分泌物和枯落物输入,这些物质能够为微生物提供稳定的碳源。而微生物代谢产物则可进

一步促进植物的养分吸收效率,形成双向作用的反馈关系。这种生态系统耦合调节机制最终确保了土壤肥力的持续恢复与功能优化。

## 4 煤矿开采区土地复垦后土壤肥力恢复的优化策略

### 4.1 引入多元化生态植被体系以优化土壤结构和功能

针对煤炭开采区土地复垦后土壤物理结构不稳定的现状,实施多元化生态植被引入策略是改善土壤结构的重要手段。具体操作包括在复垦早期选择抗逆性强的先锋植物,如豆科植物和耐盐植物,作为初级植被群落。这些植物通过根系作用和枯落物输入,增强土壤表层的物质循环能力。中后期,可逐步引入适合区域气候和土壤条件的本地植物群落,建立以乔木、灌木和草本植物为主的多层次生态体系。此外,应结合复垦区域的地形特征实施差异化种植模式。在坡地,采用等高植被带栽种以减少水土流失;在平地,应用覆盖型植被布局以提高地表覆盖率。同时,建立长期的植被监测体系,定期调整植物种类和密度,以确保植被系统与土壤肥力恢复同步优化。

### 4.2 构建有机质循环管理体系以提高养分供给能力

为了提高复垦区土壤的养分供给能力,可构建有机质循环管理体系,逐步提高土壤的有机质储量和养分利用效率。建议将农业废弃物(如秸秆、畜禽粪便)和林业副产品(如树皮、枯枝落叶)进行堆肥处理后施入土壤,从而补充有机碳源。为了避免单一施用导致的养分不均衡,还应根据土壤的具体养分需求,混合使用多种来源的有机肥料,并科学控制施用比例。再者,还可结合区域特点实施周期性深翻和有机质覆盖技术,以提高有机质在土壤中的垂直分布均匀性和分解效率。在复垦初期,采用地表覆盖腐熟有机肥的方法,减少有机质损失并提高养分释放效率;中后期,通过浅层翻耕和植被覆盖相结合的手段,进一步稳定有机质循环体系。同时,引入微生物接种技术(如解磷菌和放线菌),提高有机质分解效率并加速养分转化过程,从而实现土壤肥力的长效提升<sup>[5]</sup>。

### 4.3 应用精准施肥技术以优化养分利用效率

为减少养分损失并提高土壤养分的有效性,建议在复垦区推行精准施肥技术,通过科学管理实现养分供给与植物需求的动态匹配。首先,在施肥前需进行土壤测试与分析,

以确定不同区域土壤的养分缺乏类型和水平,从而制定分区施肥策略。例如,对于氮素缺乏的土壤,可优先使用氮肥,而磷酸盐养分不足的土壤则应增加磷肥的施用比例。其次,在施肥方法上,优先采用深施技术,将肥料施入植物根系的活跃层,减少养分挥发和径流带来的损失。同时,结合缓释肥料和微量元素肥料的使用,以实现养分的逐步释放,避免短期过度供应引发的不均衡问题。此外,采用灌溉施肥技术(如滴灌或微喷施肥)可显著提高水肥利用率,并在干旱地区有效降低水分消耗。最后,应建立土壤养分监测与管理平台,实时采集土壤肥力数据,分析土壤中养分的动态变化趋势,调整施肥方案,实现精准化调控。技术推广过程中,需注重与植被管理的协同优化,确保精准施肥措施与生态修复需求相匹配,为土壤肥力的长期稳定奠定基础。

## 5 结语

复垦后土壤肥力的变化受多种机制共同驱动,包括土壤剖面重组、物质迁移、元素循环、生物群落功能恢复以及生态系统耦合调节等。论文提出的基于多元化植被体系、有机质循环管理和精准施肥技术的优化策略,能够为提升复垦区土壤肥力的稳定性和可持续性提供实践路径。未来,针对煤炭开采区复垦土壤肥力的研究应进一步加强以下几个方面探索:一是利用多尺度监测技术量化不同机制的作用强度及其时空差异;二是构建基于大数据和模型模拟的土壤肥力动态评估体系,优化复垦管理策略。这些研究方向将为推动土地复垦实践的科学化与精细化奠定重要基础。

### 参考文献:

- [1] 郭佳欢,孙杰杰,冯会丽,等.杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展[J].浙江农林大学学报,2020,37(4): 801-809.
- [2] 蓝林,刘芸婷,莫碧霞,等.不同C/N有机碳肥对铝矿复垦地土壤肥力和桑树生长的影响[J].广西蚕业,2021,58(2):37-41.
- [3] 陈永春,赵萍,郑刘根,等.淮南潘一矿采煤沉陷复垦区土壤肥力时空变化特征[J].环境监测管理和技术,2021,33(3):21-24.
- [4] 马荣,何建国,章梅,等.安徽恒源煤矿区土壤肥力特征及重金属风险评价[J].中国煤炭地质,2023,35(1):50-56.
- [5] 马康,杨帆,张玉秀.西北干旱半干旱区煤炭井工开采对土壤肥力质量的影响研究进展[J].中国科学院大学学报,2020,37(4): 442-449.