

DOI: 10.5846/stxb201709141657

闫美芳,王璐,郝存忠,刘阳,崔菲菲,任鸿瑞,张建彪.煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应.生态学报,2019,39(9): - .

Yan M F, Wang L, Hao C Z, Liu Y, Cui F F, Ren H R, Zhang J B. Effects of ecological restoration on soil organic carbon in post-mining lands: A review. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

## 煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应

闫美芳<sup>1,\*</sup>, 王璐<sup>1</sup>, 郝存忠<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1</sup>, 崔菲菲<sup>1</sup>, 任鸿瑞<sup>2</sup>, 张建彪<sup>3</sup>

1 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024

2 太原理工大学矿业学院, 太原 030024

3 山西大学环境科学研究所, 太原 030006

**摘要:**采煤使得植被和土壤遭到损毁破坏,导致原生态系统碳汇功能的急剧退化甚至完全丧失。采煤堆积的煤矸石可发生氧化自燃,是巨大的 CO<sub>2</sub>排放源。生态修复对减少矿区碳排放及减缓大气温室效应具有重要意义。综述了国内外煤矿废弃地生态修复后的土壤有机碳动态特征,分析了修复模式、修复时间和修复措施对土壤有机碳及其活性组分的影响,总结了土壤固碳的主要影响因素。研究表明,土壤有机碳在人工植被修复和有机物添加后增加显著,且与修复时间成正比。煤矿废弃地通过采取适宜的生态修复措施,有很大的土壤固碳潜力。未来应加强团聚体固碳等土壤固碳机理和土壤活性有机碳等科学问题的研究,以期退化区生态修复进程中土壤固碳功能提升提供参考。

**关键词:**煤矿废弃地;植被修复;土壤有机碳;活性有机碳

## Effects of ecological restoration on soil organic carbon in post-mining lands: A review

YAN Meifang<sup>1,\*</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, HAO Cunzhong<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, CUI Feifei<sup>1</sup>, REN Hongrui<sup>2</sup>, ZHANG Jianbiao<sup>3</sup>

1 College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2 College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

3 Institute of Environmental Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

**Abstract:** Coal mining has caused severe damage to vegetation and soil, leading to a sharp degradation or entire loss of the carbon sequestration function of the original ecosystems. Furthermore, accumulated coal-gangues are easily oxidized or combusted, which has resulted in huge emissions of CO<sub>2</sub>. Ecological restoration in post-mining areas is of great significance to curb regional carbon emission, and to mitigate greenhouse effects. In this study, the effects of ecological restoration on changes in soil organic carbon were reviewed, including the effects of restoration type and time; restoration measures for soil organic carbon and its active fractions, and the main factors influencing carbon sequestration were also summarized. The results showed that soil organic carbon increased significantly through vegetation restoration and organic matter addition and was positively correlated with restoration time. The results suggested that degraded lands in post-mining areas have great potential for carbon sequestration by adopting suitable restoration measures. In the future, research on the mechanism of carbon sequestration in soil aggregates and the active fractions of soil carbon should be prioritized because such studies could provide references for the enhancement of carbon sequestration function in degraded areas during restoration processes.

**Key Words:** post-mining land; vegetation restoration; soil organic carbon; active organic carbon

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41301053);山西省自然科学基金项目(201601D011081,201701D121120)

收稿日期:2017-09-14; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mfyang2010@aliyun.com

工业革命以来,由于化石燃料使用、土地利用方式改变、植被退化等人类活动的影响,CO<sub>2</sub>等温室气体排放量不断增加,导致全球变暖等一系列全球性生态环境问题<sup>[1]</sup>。随着中国经济进一步发展和城镇化进程,中国能源消耗和温室气体排放量短期内继续增加的趋势将难以改变,在未来的气候变化谈判中势必面临温室气体减排或限排的巨大压力<sup>[2]</sup>。因此,如何促进陆地生态系统碳的固定及其稳定,减少CO<sub>2</sub>排放,成为减缓气候变化的一个重大挑战。

煤炭行业是温室气体的主要排放来源之一。研究表明,煤炭及其相关领域的碳排放占全球总排放的近20%<sup>[3]</sup>。长期采煤导致植被损毁、土地破坏和生物多样性减少等严重生态问题,导致原生态系统的碳汇功能的急剧退化甚至完全丧失<sup>[4]</sup>。据估算,1987—2020年,我国煤矿开采破坏的土地面积达 $1.80 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,待复垦土地面积 $1.40 \times 10^6$  hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。此外,采煤产生大量废弃物,如煤矸石目前堆存量达50多亿t,是我国积存量和占用土地最多的工业废弃物<sup>[5]</sup>。由于它们残存的碳量,可发生氧化或自燃,是巨大的CO<sub>2</sub>排放源。所以,如何保护和稳定土壤碳库,减少区域碳排放,是一个迫在眉睫但又是长期被忽略的生态问题。通过对矿山损毁土地和废弃地进行生态修复和重建,恢复生态系统的碳汇功能,可实现区域碳源向碳汇的根本性转变。

土壤有机碳(SOC)作为土壤肥力形成的基础,是生态退化区植物定居的前提条件<sup>[6]</sup>。土壤有机碳有利于改善土壤微团聚体结构,提高土壤保水保肥能力,是煤矿废弃地生态修复的主要评价指标之一<sup>[7-8]</sup>。从全球变化的角度来看,土壤碳有机库储量巨大且较为活跃,其微小变化就可能对大气CO<sub>2</sub>浓度产生重大影响,在陆地碳循环过程中举足轻重<sup>[9-10]</sup>。国内外学者已对土壤碳排放和碳固存过程、土壤固碳机制和潜力<sup>[2,11-12]</sup>进行了深入研究,为“减排增汇”提供了理论基础。但这些研究主要集中于自然地貌上的生态系统类型,对煤矿废弃地这种受到剧烈扰动的退化生态系统类型还缺乏系统性研究。虽然近几年出现了一些矿山复垦区生态系统碳储量及其动态的研究报道<sup>[13-15]</sup>,但研究深度远不及自然生态系统类型。尤其是目前对煤矿废弃地重建生态系统的土壤固碳机制及限制性因素等方面缺乏深入研究<sup>[16-18]</sup>。所以,在全球“减排增汇”的大背景下,结合退化生态系统恢复的国家重大需求,加强煤矿废弃地重建生态系统的土壤固碳功能修复研究,具有重要意义。

近年来,矿区生态修复得到长足发展。生态修复是否促进了土壤有机碳库储量的增加?土壤固碳功能修复的影响因素有哪些?为了揭示这些科学问题,本文通过综述国内外煤矿废弃地生态修复对SOC的影响研究,分析了修复模式、修复年限、人为修复措施对SOC及其活性组分的影响,并展望未来研究重点,以期揭示煤矿废弃地修复土壤的碳库变化规律和影响机制,为科学评估生态修复的土壤碳效应提供思路和参考。

## 1 煤矿废弃地修复模式对土壤有机碳的影响

土壤碳固定是生态系统功能恢复的主要评估指标之一,对改善土壤理化性质和土壤肥力具有重要意义<sup>[19-20]</sup>。研究表明,美国俄亥俄州由于采煤丧失了70%以上的SOC<sup>[21]</sup>,而矿区修复后增加的土壤碳能抵消燃煤50 a排放的 $1.5 \text{ Pg CO}_2$ <sup>[3]</sup>。煤矿废弃地通过适宜的修复措施可以成为一个巨大的碳库,固碳潜力很大<sup>[22-23]</sup>。

目前国内外学者针对矿区生态修复的碳效应做了大量深入研究,为煤矿区固碳功能的修复提供了启示和参考<sup>[21,24]</sup>。20世纪60年代,国外学者开始对煤矿废弃地的生态修复进行研究,并对植被修复后的SOC进行了估算<sup>[25-26]</sup>。随后,以美国、德国和印度学者为代表,对修复后的煤矿废弃地土壤有机碳库进行了广泛深入研究,奠定了矿区固碳功能修复的理论基础<sup>[27-30]</sup>。我国对煤矿废弃地修复研究曾集中于植物群落演替、植物物种配置和多样性恢复等方面<sup>[31-33]</sup>。近年来,我国学者开始对山西、内蒙古和淮南等地矿区修复后的土壤有机碳库进行研究<sup>[13,15,34]</sup>,填补了我国矿区土壤碳固持研究的空白。目前,国内外对煤矿废弃地生态修复后土壤有机碳的研究,主要包含以下3个方面:修复模式对SOC的影响;修复年限对SOC的影响以及人为修复措施的影响。

### 1.1 修复模式对土壤有机碳的影响

煤矿废弃地的修复模式一般包括人工修复与自然修复。研究发现,人工修复为草地、灌木林和林地的

SOC 均显著高于自然修复模式<sup>[13]</sup>。Pal 等<sup>[35]</sup>研究结果表明,印度 Gumgaon 矿修复 10 a 的林地 SOC 密度为 22.98 t/hm<sup>2</sup>,约为自然修复地(12.3 t/hm<sup>2</sup>)的 2 倍。Frouz 等<sup>[36]</sup>研究了捷克西北部修复 30 a 左右的煤矿废弃地,发现修复为人工林地的 SOC 密度为 38.0 t/hm<sup>2</sup>,而自然修复地的 SOC 仅为 4.5 t/hm<sup>2</sup>,约为 8.4 倍。所以,人工修复地的 SOC 恢复速率显著高于自然修复模式,且随着植被的恢复演替,差异逐渐增大。

人工植被修复不仅直接影响 SOC 的含量和分布,还通过改变土壤环境因子而间接影响 SOC。研究表明,人工草地可在短期内快速增加 SOC 含量。唐骏等<sup>[37]</sup>研究了黑岱沟煤矿草地修复对排土场 SOC 的影响,表明修复 15 a 后人工草地 SOC 含量显著增加,1 m 土层内 SOC 密度可达原草地的 62%。这是由于草地植物根系发达,可在短期内增加土壤的碳输入,而且草地的快速郁闭可降低地表温度,从而降低 SOC 的分解速率,有利于草地在修复早期的碳累积。多数研究者认为煤矿废弃地修复为人工草地比人工林地的固碳效果显著,如 Sperow<sup>[38]</sup>分析了美国煤矿废弃地修复为人工林地和草地的碳固持潜力,发现草地的固碳速率(1.4 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)约为林地(0.7 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)的 2 倍。李俊超等<sup>[13]</sup>研究了不同植被修复模式下黑岱沟煤矿排土场 SOC 储量的变化,表明 SOC 含量呈草地>灌木林>乔木林的趋势,且人工草地的固碳速率是人工林地的近 2 倍。但是,由于煤矿废弃地的修复时间较短(小于 50 a),且林地郁闭需较长时间,因此,在短期内林地土壤的固碳潜力可能还未充分显现。Ussiri 等<sup>[27]</sup>对俄亥俄州煤矿的研究表明,人工草地转换为人工松林 10 a 后 0—50 cm 土层 SOC 增加了 11%,转换为刺槐林后可增加 42%。所以,需要长期的定位观测研究,才能准确地评估不同植被类型的土壤固碳潜力。

由于在修复过程中多利用客土充填、平整等方法,导致土壤结构不良,土壤养分匮乏,自然恢复难度极大,且耗费时间较长。而人工栽植植被能够在短期内改善土壤理化性质,提高土壤微生物活性,加速土壤团聚体的形成,促进土壤碳的固定<sup>[13]</sup>。由于不同植被类型的根系周转、凋落物生物量及其 C/N 比存在较大差异,导致不同植被类型的凋落物可分解性和土壤碳输入存在显著差异;同时不同植物功能型群落在郁闭度、冠层结构等方面的差异,可引起土壤环境因子如土壤温度、含水量的改变。这些因素都会最终导致土壤有机碳库储量的波动。

此外,修复效果与物种本身特性及其配置密切相关。如 Yuan 等<sup>[24]</sup>对平朔露天煤矿的 SOC 研究表明,SOC 密度在 6 种人工林地内差异显著,变化范围为 11.7—69.1 t/hm<sup>2</sup>,其中刺槐与油松混交林的 SOC 密度最大,固碳速率最高,而刺槐与榆树、臭椿混交林的 SOC 密度显著低于前者。所以应结合当地矿区的气候和土壤条件,选择适宜的植物及其配置模式,才能更有效地促进 SOC 的增加。

## 1.2 修复时间对土壤有机碳的影响

大多数研究表明,随着煤矿废弃地修复年限的增加,SOC 得到显著提升。Zhao 等<sup>[34]</sup>调查了平朔露天煤矿废弃地土壤碳的变化情况,结果表明 SOC 随修复时间的增加而显著增加,修复 13 a 的 0—20 cm 土层 SOC 含量是修复初期的 3.1 倍。植被盖度增加可减少土壤养分流失,同时,枯枝落叶、林下层植物和死亡细根生物量随群落演替逐渐累积,可以源源不断维持土壤的碳输入,增加土壤碳库储量。

研究表明,由于地域、植被类型和气候因素等因素的差异,导致土壤固碳速率的不同。Chatterjee 等<sup>[39]</sup>对 Ohio 修复为草地的煤矿废弃地 SOC 进行研究,发现修复 9 a 后 SOC(68.8 t/hm<sup>2</sup>)显著高于修复 1 a 的 SOC(37.5 t/hm<sup>2</sup>),碳累积速率约为 3.92 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。Mukhopadhyay 等<sup>[40]</sup>估算了不同修复年限下印度煤矿废弃地 SOC 密度,表明修复 2 a 后 SOC 密度为 1.19 t/hm<sup>2</sup>,而修复 16 a 后 SOC 密度为 9.82 t/hm<sup>2</sup>,累积速率仅为 0.62 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。Tripathi 等<sup>[23]</sup>调查了印度 Singrauli 地区修复 19 a 的煤矿废弃地,发现 SOC 增加速率约为 1.21 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。Yuan 等<sup>[24]</sup>对平朔露天煤矿人工林的 SOC 进行研究,表明 SOC 累积速率在 0.21—2.82 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>之间。Šourková 等<sup>[41]</sup>对捷克煤矿废弃地的研究发现,修复后人工林地 SOC 增长率为 0.60—6.27 t hm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。由此可见,土壤的固碳速率随植被类型、修复时间及区域气候等存在显著差异。这是由于凋落物量、土壤团聚体特征、土壤质地及土壤环境因子等的巨大差异,影响土壤碳循环的输入、固定和分解等主要过程,导致土壤固碳速率差异显著。

### 1.3 修复措施对土壤有机碳的影响

全球煤矿主要分布在干旱、半干旱气候带,是全球变化影响下的生态脆弱区<sup>[5]</sup>。由于修复后的人为重构土壤存在结构不良,团聚体破坏,养分瘠薄等特点,亟需辅以适当的修复措施以加快恢复进程。

修复措施影响土壤 C 的固定。Akala 等<sup>[21]</sup>对 Ohio 煤矿废弃地的研究表明,采用表土覆盖有助于 SOC 的固定,草地覆土 25 a 后,0—15 cm 土层 SOC 密度从最初的 9.2 t/hm<sup>2</sup> 增加到 55.4 t/hm<sup>2</sup>,增加了 502.2%。Tripathi 等<sup>[23]</sup>发现用木屑、植被残留等覆盖煤矿废弃地土壤,能够提高土壤持水能力,有助于有机碳的积累。通过添加有机质如肥料、污泥、粉煤灰等可以显著改善煤矿废弃地的土壤养分状况,有助于土壤碳的固定<sup>[42]</sup>。Silva 等<sup>[14]</sup>的研究结果表明,施用污泥促进了植被群落的建立,它们的协同作用使土壤 SOC 显著增加。Shrestha 等<sup>[43]</sup>对 Ohio 煤矿废弃地的研究表明,施肥 5 a 后,SOC 累积速率可达 2.8 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。范继香等<sup>[44]</sup>研究了不同施肥措施对煤矿废弃地土壤活性有机碳的影响,结果表明施加有机肥可促进土壤活性有机碳的形成,促进 SOC 的增加。Montiel-Rozas 等<sup>[45]</sup>研究发现,施加风化褐煤可以促进 SOC 的增加,延长土壤碳固持时间。但污泥、粉煤灰的施加可能导致重金属污染问题。

近年来,生物质固碳作为减缓气候变化的新途径引起了科学界广泛关注<sup>[46]</sup>。生物质炭是有机物原料在完全或者部分缺氧条件下,经过高温热裂解产生的一类富碳、高度芳香化的多孔性有机物质<sup>[46-47]</sup>。分解缓慢,赋存时间可达上千年,是一种的可持续封存碳的方式<sup>[47]</sup>。虽然曾有研究表明,生物质炭通过激发效应可能增加大气碳排放<sup>[48]</sup>,但生物质炭在矿山修复的实践表明,生物质炭输入不但显著改善了土壤理化性质,还增加了土壤有机碳含量<sup>[49]</sup>。

### 1.4 植被修复对土壤活性有机碳的影响

土壤有机碳包含多种组分或形式,它们的含量、稳定性和周转速率等均存在一定差异<sup>[18]</sup>。土壤总有机碳的变化比较缓慢,短期内不能快速指示土壤碳库变化,而活性有机碳(包括微生物生物量和颗粒有机碳等组分)是易被土壤微生物和植物利用的部分,它能够更灵敏地表征土壤碳库对生态修复的响应,是早期评价土壤质量和土壤碳库动态变化的良好指标<sup>[18]</sup>。煤矿废弃地由于土壤养分匮乏和结构不良,极大地限制了微生物的活性,所以在修复初期,土壤活性有机碳是土壤生态功能修复的重要监测指标。

目前对于土壤有机碳组分的研究主要集中在自然地貌上,针对矿区废弃地这种人工干扰土地类型的研究还非常缺乏<sup>[26]</sup>。Anderson 等<sup>[50]</sup>研究了 Wyoming 煤矿废弃地修复措施对微生物量碳(MBC)的影响,结果表明 MBC 在不同修复措施下差异显著,灌木林的 MBC 含量最高。Qu 等<sup>[51]</sup>的研究结果显示,土壤微生物量碳随修复年限的增加而增加,在修复 13 a 时,土壤 MBC 达最大值,且可溶性有机碳的含量显著高于未修复土壤。土壤微生物能促进有机质分解转化,它的含量高低不仅能反映土壤状况,而且土壤微生物对土壤团聚体的形成和稳定有重要作用<sup>[26]</sup>。Bartuška 等<sup>[52]</sup>研究了两种修复方式下土壤颗粒有机碳(POC)的动态变化,结果表明,修复为人工柵木林时,土壤 POC 的积累速度更快。Frouz<sup>[53]</sup>分析了演替时间对 POC 等土壤 C 组分的影响,结果表明,土壤 POC 随着演替时间的增加而增加。虽然不同的研究侧重于不同的有机碳组分,且它们的累积速率存在差异,但总体而言,恢复时间的增加会促进 SOC 活性组分的增加。这是由于凋落物中的活性成分和根系分泌物易于被微生物分解利用,可促进微生物生长繁殖。所以,对煤矿废弃地土壤有机碳研究应关注其活性组分的早期变化。

## 2 煤矿废弃地土壤固碳的主要影响因素

土壤理化性质、土壤团聚体特征、凋落物性质和土壤碳排放等因素是决定土壤固碳的主要因子,目前,国内外对煤矿废弃地植被修复后 SOC 影响因子研究,主要集中于土壤理化性质和凋落物的研究上。

### 2.1 土壤理化性质对土壤有机碳的影响

土壤理化性质是煤矿废弃地土壤固碳的主要限制因子之一。由于剧烈的人为扰动使得矿区土壤性质恶化,结构不良,且在修复过程中,由于重型机械碾压常导致土壤容重偏大、孔隙率偏低等特点。王同智<sup>[54]</sup>等研

究了露天煤矿排土场 SOC 的影响因素,表明土壤有机碳与土壤水分、孔隙度呈显著正相关,与土壤容重、粘粒含量、pH 呈负相关。史娜娜等<sup>[55]</sup>对采煤前后 SOC 密度的研究发现,SOC 密度与土壤孔隙度呈显著正相关。改善土壤理化性质有利于土壤持水和根系生长,细根周转可以增加土壤碳输入,从而有利于煤矿废弃地 SOC 的累积。随着土壤有机碳的累积,土壤容重、含水量、pH、电导率等土壤理化性质也会发生相应改善。

## 2.2 团聚体对土壤有机碳的影响

土壤团聚体固碳的物理机制是土壤碳固持的最重要机制。SOC 通过形成土壤团聚体或被包裹在团聚体内部,形成团聚体结合态有机碳,不易被分解矿化。表土中约 90%有机碳位于团聚体内,土壤的固碳功能与土壤团聚体的形成和稳定密切相关<sup>[8]</sup>。矿区开采过程中,剧烈扰动极大地破坏了土壤的团聚体结构,因此生态修复过程也是土壤团聚体逐渐形成的过程。Malik 等<sup>[56]</sup>研究表明,植被修复明显提高了表层土壤中大于 0.25 mm 水稳性团聚体的含量,土壤物理结构得到明显改善。唐骏等<sup>[57]</sup>对黑岱沟煤矿的研究表明,植被恢复提高了排土场土壤团聚性,SOC 含量与土壤团聚体指标显著相关。SOC 还与粘粒含量等土壤质地有关。Ahirwal 等<sup>[30]</sup>通过增加表土覆盖厚度以增加废弃地土壤的粘粒组分,从而提高土壤固碳潜力。Hassink<sup>[58]</sup>研究表明,土壤 SOC 固定与土壤中黏土含量密切相关。土壤团聚体的形成主要依赖于土壤中各种胶结物质的数量和性质,而土壤有机质和粘粒可起到粘合的作用。但目前对土壤团聚体等固碳机理还缺乏深入研究。

## 2.3 凋落物性质对土壤有机碳的影响

植被的凋落物是 SOC 的重要来源。Ahirwal<sup>[30]</sup>发现在煤矿废弃地常见的修复树种中,印度黄檀的 C 累积速率最高。Yuan 等<sup>[24]</sup>对修复年限相近的 6 种不同林地的 SOC 库进行研究,结果显示,SOC 密度在 6 种林地中差异显著,变化范围为 11.7—69.1 t/hm<sup>2</sup>,其中刺槐-油松林的 SOC 密度最大,且固碳速率最高。Frouz 等<sup>[36]</sup>研究了修复 22—32 a 的煤矿废弃地,发现不同林地类型的土壤固 C 速率差异显著,在 0.15—1.28 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间。生态修复本质上是植被与土壤相互影响和相互促进的过程,期间植被凋落物累积可增加土壤的 C 输入,有助于土壤有机碳的累积,但由于不同植物的凋落物数量和质量存在显著差异<sup>[59]</sup>,导致对土壤有机碳库的影响明显不同。

## 2.4 土壤呼吸对土壤有机碳的影响

土壤呼吸是土壤 C 的主要输出途径。Ahirwal 的研究表明<sup>[30]</sup>,煤矿废弃地修复后,土壤呼吸速率随修复时间的增加而增大,这主要是由于呼吸底物 SOC 的增加和植物根系的生长。Bujalský等<sup>[60]</sup>发现煤矿废弃地的土壤 C 含量小于 9%时,土壤呼吸与温度不相关。而随着土壤 C 的逐渐积累,土壤呼吸速率逐渐增大。这说明当土壤 C 含量很低时,呼吸底物会取代温度,成为影响土壤呼吸的限制性因子。李君剑等<sup>[61]</sup>研究了不同修复措施下的土壤呼吸动态,表明植被修复方式对土壤基础呼吸速率影响显著,其中苜蓿草地的土壤基础呼吸速率最大,而油松林最小。Qu 等<sup>[51]</sup>对煤矿废弃地修复土壤的研究发现,修复矿区土壤基础呼吸速率随着修复时间持续增大。由此可见,修复时间和植被类型是影响土壤呼吸的主要因子,土壤基础呼吸与土壤微生物的活性密切相关,可作为退化土壤修复的评价指标之一<sup>[62]</sup>。

土壤呼吸是土壤有机碳损失的主要途径<sup>[12]</sup>。从现有的研究结果看,植被修复显著增加了土壤的呼吸作用,这主要是由于:一方面,土壤有机碳是土壤呼吸的底物,植物修复会提高土壤有机碳含量,导致土壤中易被微生物利用的活性有机碳含量增加;另一方面,植被修复能通过改善土壤微生物群落的组成和结构、增强微生物活性来促进土壤呼吸作用<sup>[63]</sup>。当进入土壤的生物残体等有机碳的输入大于呼吸作用的碳排放时,才有利于土壤碳的累积。但生态修复如何同时影响土壤碳输入和碳排放过程,目前还需更多的野外实地观测。

## 3 存在问题与发展方向

在全球气候变化背景下,对煤矿废弃地生态修复过程中土壤碳库储量、动态及影响因素进行研究,对减少煤矿废弃地土壤碳排放和促进矿区生态修复具有重要意义。虽然目前国内外对煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应进行了广泛研究,但由于煤矿废弃地的特殊性,相关研究还存在不少薄弱环节。未来应加强如下

几方面的研究:

(1) 土壤有机碳组分的转化及相关关系, 是揭示土壤固碳机理的关键。但目前主要侧重于土壤总有机碳, 对有机碳各组分的研究较少。未来应加强活性有机碳(包括微生物生物量等组分)的研究, 以便更灵敏地表征土壤碳库对生态修复的响应。

(2) 应加强土壤固碳机制的研究, 包括对土壤碳的物理性、化学性和生物性保护机制的研究。除了土壤团聚体固碳的物理机制, 土壤碳是否能够稳定固持, 还取决于土壤碳的化学组成和结构。基于激光分解波谱、固态<sup>13</sup>C 核磁共振波谱和红外光谱等土壤分析技术, 可更深入地阐明土壤碳固持的机制。

(3) 生物质炭在矿山修复的实践表明, 生物质炭输入不但显著改善了土壤理化性质, 还增加了土壤有机碳含量。矿山废弃地固碳功能恢复可以成为生物质炭未来的服务方向。

(4) 生态系统碳平衡包括 C 固存和 C 释放两个过程。目前对土壤碳储量及其动态研究较多, 而对碳排放的研究较少。未来应开展对土壤呼吸的野外实地观测尤其是有机物添加后土壤呼吸的变化, 以准确估算土壤碳排放。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Li B G, Gasser T, Ciais P, Piao S L, Tao S, Balkanski Y, Hauglustaine D, Boisier J P, Chen Z, Huang M T, Li Z X, Li Y, Liu H Y, Liu J F, Peng S S, Shen Z H, Sun Z Z, Wang R, Wang T, Yin G D, Yin Y, Zeng H, Zeng Z Z, Zhou F. The contribution of China's emissions to global climate forcing. *Nature*, 2016, 531(7594): 357-361.
- [ 2 ] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [ 3 ] Shrestha R K, Lal R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Environment International*, 2006, 32(6): 781-796.
- [ 4 ] 黄翌, 汪云甲, 田丰, 侯飞. 煤炭开采对植被-土壤系统扰动的碳效应研究. *资源科学*, 2014, 36(4): 817-823.
- [ 5 ] 杨永均, 张绍良, 侯湖平, 李效顺. 煤炭开采的生态效应及其地域分异. *中国土地科学*, 2015, 29(1): 55-62.
- [ 6 ] Heneghan L, Miller S P, Baer S, Callahan M A Jr, Montgomery J, Pavao-Zuckerman M, Rhoades C C, Richardson S. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4): 608-617.
- [ 7 ] Yu H Y, Ding W X, Chen Z M, Zhang H J, Luo J F, Bolan N. Accumulation of organic C components in soil and aggregates. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13804.
- [ 8 ] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: A4-A9.
- [ 9 ] Bradford M A, Wieder W R, Bonan G B, Fierer N, Raymond P A, Crowther T W. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 751-758.
- [ 10 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [ 11 ] Melillo J M, Frey S D, DeAngelis K M, Werner W J, Bernard M J, Bowles F P, Pold G, Knorr M A, Grandy A S. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 2017, 358(6359): 101-105.
- [ 12 ] Yan M F, Guo N, Ren H R, Zhang X S, Zhou G S. Autotrophic and heterotrophic respiration of a poplar plantation chronosequence in northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2015, 337: 119-125.
- [ 13 ] 李俊超, 党延辉, 薛江, 唐骏, 郭胜利, 靳静静. 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化. *土壤学报*, 2015, 52(2): 453-460.
- [ 14 ] Silva L C R, Corrêa R S, Doane T A, Pereira E I P, Horwath W R. Unprecedented carbon accumulation in mined soils: the synergistic effect of resource input and plant species invasion. *Ecological Applications*, 2013, 23(6): 1345-1356.
- [ 15 ] Yuan Y, Zhao Z Q, Bai Z K, Wang H Q, Wang Y Z, Niu S Y. Reclamation patterns vary carbon sequestration by trees and soils in an opencast coal mine, China. *CATENA*, 2016, 147: 404-410.
- [ 16 ] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481-504.
- [ 17 ] Crow S E, Lajtha K, Filley T R, Swanston C W, Bowden R D, Caldwell B A. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: implications for global change. *Global Change Biology*, 2009, 15(8): 2003-2019.
- [ 18 ] Paul E A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 98: 109-126.

- [19] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [20] Hu P L, Liu S J, Ye Y Y, Zhang W, Wang K L, Su Y R. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 387-397.
- [21] Akala V A, Lal R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2098-2104.
- [22] Akala V A, Lal R. Potential of mine land reclamation for soil organic carbon sequestration in Ohio. *Land Degradation & Development*, 2000, 11(3): 289-297.
- [23] Tripathi N, Singh R S. Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 1162-1171.
- [24] Yuan Y, Zhao Z Q, Zhang P F, Chen L M, Hu T, Niu S Y, Bai Z K. Soil organic carbon and nitrogen pools in reclaimed mine soils under forest and cropland ecosystems in the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 137-144.
- [25] Vogel W G, Berg W A. Grasses and legumes for cover on acid strip-mine spoils. *Journal of Soil Water Conservation*, 1968, 23: 89-91.
- [26] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, 1988, 15(2): 177-188.
- [27] Ussiri D A N, Lal R. Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, 24(3): 151-165.
- [28] Das R, Maiti S K. Importance of carbon fractionation for the estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine soils—a case study from Jharia coalfields, Jharkhand, India. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 135-140.
- [29] Quinkenstein A, Jochheim H. Assessing the carbon sequestration potential of poplar and black locust short rotation coppices on mine reclamation sites in eastern Germany—Model development and application. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 53-66.
- [30] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: a chronosequence study from dry tropical climate. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 369-377.
- [31] 王改玲, 白中科. 安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策. *水土保持研究*, 2002, 9(1): 38-40.
- [32] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲, 董志. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化. *生态学报*, 2005, 25(4): 763-770.
- [33] Guo D G, Zhao B Q, Shangguan T L, Bai Z K, Shao H B. Dynamic parameters of plant communities partially reflect the soil quality improvement in eco-reclamation area of an opencast coal mine. *CLEAN; Soil Air Water*, 2013, 41(10): 1018-1026.
- [34] Zhao Z Q, Shahrour I, Bai Z K, Fan W X, Feng L R, Li H F. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the west-northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 40-46.
- [35] Pal D, Singh R S, Shome D. C-sequestration in revegetated mine spoils of Jharia coalfields (JCF) in Indian dry tropical ecosystem. *BIOINFO Environment and Pollution*, 2014, 4(2): 72-78.
- [36] Frouz J, Pižl V, Cienciala E, Kalčík J. Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation. *Biogeochemistry*, 2009, 94(2): 111-121.
- [37] 唐骏, 党廷辉, 李俊超, 薛江. 黄土区煤矿排土场重建草地土壤剖面有机碳变化特征. *草地学报*, 2015, 23(4): 718-725.
- [38] Sperow M. Carbon sequestration potential in reclaimed mine sites in seven East-Central States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1428-1438.
- [39] Chatterjee A, Lal R, Shrestha R K, Ussiri D A N. Soil carbon pools of reclaimed minesoils under grass and forest landuses. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(3): 300-307.
- [40] Mukhopadhyay S, Mastro R E. Carbon storage in coal mine spoil by *Dalbergia sissoo* Roxb. *Geoderma*, 2016, 284: 204-213.
- [41] Šourková M, Frouz J, Šantrůčková H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 203-214.
- [42] Haering K C, Daniels W L, Feagley S E. Reclaiming mined lands with biosolids, manures, and papermill sludges//Barnhisel R I, Daniels W L, Darmody R, eds. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. Madison, Wisconsin: Agronomy, ASA, CSSA, SSSA, 2000: 615-644.
- [43] Shrestha R K, Lal R, Jacinthe P A. Enhancing carbon and nitrogen sequestration in reclaimed soils through organic amendments and chiseling. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 1004-1011.
- [44] 范继香, 郜春花, 张强, 李建华, 卢朝东, 靳东升. 施肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳库的影响. *中国农学通报*, 2012, 28(36): 119-123.
- [45] del Mar Montiel-Rozas M, Panettieri M, Madejón P, Madejón E. Carbon sequestration in restored soils by applying organic amendments. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 620-629.
- [46] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1315-1324.

- [47] 刘晓雨, 卞荣军, 陆海飞, 郑聚锋, 程琨, 李恋卿, 张旭辉, 潘根兴. 生物质炭与土壤可持续管理: 从土壤问题到生物质产业. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 184-190.
- [48] Kuppasamy S, Thavamani P, Megharaj M, Venkateswarlu K, Naidu R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. *Environment International*, 2016, 87: 1-12.
- [49] Muñoz M A, Guzman J G, Zornoza R, Moreno F, Faz A, Lal R. Effects of biochar and marble mud on mine waste properties to reclaim tailing ponds. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(4): 1227-1235.
- [50] Anderson J D, Ingram L J, Stahl P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 387-397.
- [51] Qu J F, Hou Y L, Ge M Y, Wang K, Liu S, Zhang S L, Li G, Chen F. Carbon dynamics of reclaimed coal mine soil under agricultural use: a chronosequence study in the Dongtan mining area, Shandong province, China. *Sustainability*, 2017, 9(4): 629.
- [52] Bartuška M, Pawlett M, Frouz J. Particulate organic carbon at reclaimed and unreclaimed post-mining soils and its microbial community composition. *CATENA*, 2015, 131: 92-98.
- [53] Frouz J. Effects of soil development time and litter quality on soil carbon sequestration: Assessing soil carbon saturation with a field transplant experiment along a post-mining chronosequence. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 664-672.
- [54] 王同智, 薛焱, 包玉英, 齐云龙, 屈永安, 董明月. 不同复垦方式对黑岱沟露天矿排土场土壤有机碳的影响. *安全与环境学报*, 2014, 14(2): 174-178.
- [55] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 寇许, 全占军. 采煤塌陷区土壤碳储量变化及其影响因素分析. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 144-148, 154-154.
- [56] Malik A, Scullion J. Soil development on restored opencast coal sites with particular reference to organic matter and aggregate stability. *Soil Use and Management*, 1998, 14(4): 234-239.
- [57] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 文月荣, 徐娜, 吴得峰. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [58] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [59] De Deyn G B, Cornelissen J H C, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 516-531.
- [60] Bujalský L, Kaneda S, Dvorščík P, Frouz J. In situ soil respiration at reclaimed and unreclaimed post-mining sites: responses to temperature and reclamation treatment. *Ecological Engineering*, 2014, 68: 53-59.
- [61] 李君剑, 曹杰, 严俊霞, 李洪建. 矿区不同复垦措施下土壤呼吸与环境因子关系的研究. *环境科学学报*, 2014, 34(8): 2102-2110.
- [62] Ingram L J, Schuman G E, Stahl P D, Spackman L K. Microbial respiration and organic carbon indicate nutrient cycling recovery in reclaimed soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1737-1745.
- [63] 李君剑, 严俊霞, 李洪建. 矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(12): 4178-4185.