

# 煤矿区土壤有机碳含量测算与影响因素研究进展<sup>①</sup>

李 博<sup>1</sup>, 王金满<sup>1,2\*</sup>, 王洪丹<sup>1</sup>, 白中科<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 2 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘 要:** 研究矿区土壤有机碳的储量、影响因素以及时空变异规律, 不仅对认识矿区土壤质量变化规律, 而且对排土场覆土工艺和植被类型的选择具有重要的指导意义。植被、土壤质量等自然因素以及复垦管理措施、复垦模式等人为干扰会对矿区土壤有机碳的积累和转化造成重要影响。目前, 对于矿区土壤有机碳的变化过程和转化机理的研究不够深入, 尤其是土壤有机碳对复垦措施的响应规律鲜见报道。本文系统梳理了国内外学者对矿区土壤样品有机碳含量的测量和区域土壤有机碳储量的估算, 自然因素、人为干扰对矿区土壤有机碳积累的影响。在此基础上, 提出了深入研究的方向: 加强矿区土壤有机碳剖面结构的变化及其转化机制的研究; 加强对影响土壤有机碳积累的不确定因素的探讨研究; 应加强复垦模式及覆土工艺以及排土场微地形对土壤有机碳积累机理的研究。

**关键词:** 土壤有机碳; 人为干扰; 自然因素; 矿区复垦; 测算方法

**中图分类号:** S153.6

中国是全世界最大的煤炭生产国和消费国, 中国煤矿开采最主要的形式是井工开采, 约占煤炭开采总量的 90%, 井工开采造成地表沉降及一系列的生态环境问题; 露天煤矿大约占煤矿的 10%, 露天矿开采破坏地表土层结构和植被分布, 极大地损毁了土地资源<sup>[1]</sup>, 通过对矿区土地的复垦, 可以改善土体结构及土壤理化性质<sup>[2]</sup>, 土壤有机碳可以作为土壤理化性质的重要指标, 其组分特征影响土壤的肥力特性和土壤稳定性<sup>[3]</sup>。土地利用类型会影响土壤有机碳的储量及时空变化规律<sup>[4]</sup>, 国内外对土地利用方式与土壤有机碳关系的研究大部分集中于各土地利用方式对土壤有机碳总含量的影响, 一般认为: 林地是地球土壤碳库的重要组成部分, 且含量稳定<sup>[5]</sup>, 耕地土壤有机碳的变化最活跃<sup>[6]</sup>, 草地土壤有机碳含量转化速度快。土地利用方式的转变对土壤有机碳含量的影响研究较多<sup>[7-12]</sup>, 但是较少涉及矿区复垦土地的土壤有机碳的组分变化对复垦方式响应、矿区土壤有机碳积累和转化的机理研究。

为此, 本文通过文献综述和系统总结, 深入分析在各种土地利用方式下的土壤有机碳的积累与理化性质的变化规律, 对影响土壤有机碳积累的自然因素和人为因素进行分析, 为矿区复垦土壤的有机碳的积

累及变化规律提供参考; 深入剖析了不同复垦方向下的土壤有机碳积累的研究进展, 总结存在的不足和突出问题。希望能引起更多学者对矿区复垦土壤的有机碳的积累及其空间变异规律的研究, 借以推动矿区复垦土壤有机碳的深入研究, 为矿区复垦的模式以及管理措施提供科学依据。

## 1 土壤有机碳估算方法的研究进展

土壤有机碳的估算研究主要是对区域的土壤有机碳总量估算、土壤样品有机碳含量的测定。区域土壤有机碳含量的估算是确定碳汇/源的依据, 建立在土壤样品有机碳测量基础上, 土壤样品的有机碳含量精确测定对大区域土壤有机碳总量的估算起着重要作用。

### 1.1 煤矿区土壤有机碳含量测算

土壤有机碳测算的主要方法是土壤有机碳总含量以及土壤有机碳各组分的测量。土壤总有机碳的测定应用范围广泛, 在林地<sup>[13-14]</sup>、草地<sup>[15-16]</sup>及农田<sup>[17]</sup>土壤有机碳含量的测定中, 主要是用外加热重铬酸钾氧化法来测定土壤有机质, 通过数学计算得到土壤有机碳含量。土壤颗粒有机碳易于矿化分解, 对土壤的肥力具有重要的贡献作用, 进行土壤颗粒有机碳的测

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271528)、国土资源部公益性行业科研专项(201411007-4)资助。

\* 通讯作者(wangjinman2002@163.com)

作者简介: 李博(1991—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: libo1991a03@163.com

定有利于研究排土场复垦过程中的土壤养分的规律,土壤颗粒有机碳的测定先用磷酸钠溶液震荡分散后过土筛,然后用重铬酸钾外加热法测得<sup>[18]</sup>。森林损毁<sup>[19]</sup>、秸秆焚烧<sup>[20-21]</sup>等的土壤以及矿区复垦土壤中含碳物质较多,包含植被凋落物的土壤有机质、土壤活性有机碳、颗粒有机碳以及地质成因碳等,更好地确定这些含碳物质的含量对研究复垦土壤的有机碳的变化规律及其对复垦后土壤理化性质的评价有重要作用。排土场复垦土壤的土地质量的研究大多都是对土壤总有机碳和其他土壤物理性质之间关系的研究,排土场在复垦过程中会有煤矸石混在复垦后的土壤中以及空气中的煤粉等物质沉降到土壤表面,导致复垦土壤中存在地质成因碳,会对外加热重铬酸钾氧化法测定的土壤有机碳含量造成影响,从而对土壤有机碳随着复垦年限及复垦措施的规律变得不明显,为了在估算土壤有机碳的过程中剔除地质成因碳等物质的影响,一般采用以下方法对地质成因碳的含量进行测算:光学和显微镜方法<sup>[22]</sup>、热氧化法<sup>[23-24]</sup>、化学氧化法<sup>[25]</sup>、光谱表征法<sup>[26]</sup>、同位素法<sup>[27]</sup>等。光学显微镜法主要是对土壤中黑色的煤炭微粒的形状和粒径来进行观测,比较费时费力且准确性较差,应用较少<sup>[28]</sup>。热氧化法和化学氧化法的结合使用是测量地质成因有机碳的主流方法,热氧化法主要是通过调节温度来让新形成的土壤有机质氧化,而地质成因有机碳保持原状来测量<sup>[29]</sup>。化学氧化方法通过不同试剂的组合来去除新形成的土壤有机质,与热氧化法原理相似,但是因样品的化学特性不同会对结果造成影响。相比于以上的传统方法,新技术在土壤的地质成因碳的测定中也有广泛应用,最具有代表性的是光谱表征方法和同位素标记法,光谱表征方法是根据有机基团的红外光对红外光谱的不同区域的响应,通过多变量数据分析和建模预测来实现<sup>[30]</sup>;同位素标记法主要是用<sup>14</sup>C来标记,经过标记的<sup>14</sup>C元素会进入新形成的土壤有机质中,通过时间序列估算含<sup>14</sup>C的酶活性在煤矿复垦区的有机质的含量<sup>[31]</sup>于自然土壤,通过外加热重铬酸钾氧化法所测得的土壤有机质的含量来计算得到的土壤有机碳含量完全满足实验要求,但是因为矿区的煤炭微粒等的影响,所以应当选取更加有效的方法(光谱表征方法以及同位素法等)对植被恢复增加的土壤有机碳进行测定,来研究矿区复垦的效果。

## 1.2 煤矿区土壤有机碳储量估算

区域土壤有机碳的估算主要是根据土壤剖面进行估算,根据生命带和土壤类型等传统方法估算及应

用GIS和IPCC方法等新方法进行估算。传统方法采用某类型土壤的平均有机碳含量进行估算,误差较明显。早期多用土壤剖面法估算,如Bolin等<sup>[32]</sup>根据美国9个土壤剖面的碳含量推算出全球1 m厚度土层SOC库为 $7.1 \times 10^{11}$  t。生命带法通过建立土壤体积质量与土壤碳密度的方程来估算土壤有机碳含量,Post等<sup>[33]</sup>通过土地调查得到的各土地类型相应的土壤有机碳含量,建立土壤体积质量与土壤有机碳密度的方程,估算1 m土壤有机碳库的含量,并建立了土壤碳密度与气候及植被之间的关系。现在较多的研究是应用GIS方法和IPCC方法进行区域土壤有机碳的估算。通过ArcGIS等软件处理得到区域土壤有机碳的估算量<sup>[34]</sup>,并且通过降水和温度进行有机碳含量的校正,得到较准确的估算量,如估算黄土高原区土壤有机碳密度加权平均值为 $2.00 \text{ kg/m}^2$ <sup>[35]</sup>。IPCC方法主要是估算不同时期与自然植被相关的土壤有机碳库的变化,也可以根据土壤特征、土地利用方式、环境及生物量信息等的变化来预测未来土壤有机碳储量。矿区土壤有机碳的估算主要是应用GIS方法和IPCC方法进行估算,如焦泽珍<sup>[36]</sup>通过对不同的植被类型及土地利用方式的估算,计算得到矿区的总碳汇量为 $4.72 \times 10^6$  t,且通过模拟计算得到复垦措施使得土壤有机碳的含量增加了 $2.4 \times 10^5$  t,可见土地复垦工作卓有成效。黄翌等<sup>[37]</sup>通过对矿区不同土地利用类型土壤有机碳的测定结果,得到矿区植被和土壤受扰动的碳收支变化,大同矿区忻州窑煤矿因开采导致土壤有机碳增加1 641.169 t。矿区土壤有机碳含量测定方法的改进,使得土壤有机碳的储量测算更加准确,后续研究更加深入详尽。

## 2 煤矿区自然因素对土壤有机碳的影响研究

土壤中有机碳含量是进入土壤的植物残体量以及微生物分解损失的平衡结果,其储量受气候、植被、土壤属性等多种物理因素、生物因素和人为因素的影响。矿区土壤有机碳的储量及变化主要是受到煤矿开采和复垦的影响,而研究多集中在煤矿区复垦对土壤有机碳的影响。大量学者进行复垦植被类型、复垦区土壤质量以及不同复垦年限对土壤有机碳的影响研究。

### 2.1 植被对矿区土壤有机碳的影响

在自然条件下,进入土壤的枯枝落叶是由植被类型决定的,植被类型不同,进入土壤的有机碳数量不同,方式也有差异。因此,合理的植被类型选择以及植被之间的组合状态对于复垦区土壤质量水平的提

高和生态环境质量的提升有重大影响<sup>[38-39]</sup>。不同的复垦植被类型,随着复垦时间的增加,土壤有机碳的含量都有显著提高,但不同的复垦模式对土壤有机碳的积累效率不同,且增长各有其规律:相同复垦年限下,土壤有机碳的含量是草地>林地>耕地<sup>[40]</sup>,且复垦区林地土壤的有机碳有典型的表聚特征,随着土壤深度的增加,土壤有机碳的含量逐渐减少<sup>[41]</sup>;不同树种的积累效果也不同,落叶阔叶林相比于针叶林对土壤有机碳的积累效果更好<sup>[42]</sup>。采矿会造成地表植被破坏,且不同的复垦植被类型决定土壤有机碳的含量及其时空变化规律,大量研究表明,选择草地的复垦模式对土壤有机碳的增加效果最明显<sup>[43-44]</sup>,但随着复垦年限的增加,林地复垦方式对土壤有机碳积累的效果更显著,且林地方式下土壤有机碳的垂直分层变化更明显,土壤有机碳状况更接近原地貌。但不同植被类型的组合更有助于矿区土壤有机碳的积累,樊文华等<sup>[45]</sup>发现复垦初期沙棘林有优势,随着复垦时间的增加,乔木类混交林的有机碳积累相比于沙棘林更有效。王同智等<sup>[46]</sup>发现在复垦年限相同时,油松+蒙古冰草排土场比新疆杨+紫花苜蓿排土场有机碳质量高。

## 2.2 土壤质量对土壤有机碳的影响

土壤质量对矿区土壤有机碳的影响因素主要是土壤质地、土壤结构性以及土壤水分空气状况等。煤矿复垦区因机械压实以及煤矸石填充等因素导致土壤理化性质的恶化,土壤黏重且孔隙结构破坏,影响微生物的呼吸,进而影响土壤有机碳的转化及矿化,对土壤有机碳的积累造成影响。影响土壤有机碳积累的土壤质地因素主要是土壤颗粒的大小及组成,影响土壤有机碳积累的土壤结构性因素是土壤团聚体的大小。土壤颗粒的大小影响土壤对有机碳的吸附,其中土壤有机碳的含量与黏粒的含量呈正相关关系<sup>[3]</sup>;且黏粒对土壤有机碳有保护性<sup>[47]</sup>,此保护性主要是通过土壤有机碳与黏粒形成团聚体来实现的<sup>[48]</sup>;植被恢复主要是影响大团聚体的土壤有机碳含量,复垦开始前微团聚体的土壤有机碳含量较少,在恢复过程中,粒径大的土壤团聚体含量增多<sup>[49]</sup>,土壤的结构趋于稳定<sup>[50]</sup>,大团聚体利于微生物呼吸,有利于土壤有机质矿化。在复垦区域中复垦基质的种类影响土壤团聚体的形成,复垦区域的团聚体结构变化从微团聚体系向大团聚体演变<sup>[51]</sup>,大团聚体吸附的土壤有机碳比较年轻,容易矿化<sup>[52]</sup>。

## 2.3 复垦时间对土壤有机碳积累的影响

时间是影响土壤有机碳积累的重要因素,煤炭开

采使得土壤有机质暴露在空气中,经过矿化分解,不利于土壤有机碳的积累和保存。土壤有机碳的积累随复垦年限的变化规律研究是进行排土场复垦的一项基础性研究,随着复垦年限的增加,土壤有机碳的总量增加并趋于稳定,因为刚复垦后的土壤层次混乱,土壤黏重,透水透气性能差,土壤有机碳的含量也较少<sup>[53]</sup>。随着地表植被的生长,逐渐改变土壤的理化性质,土壤团聚体的结构改善以及地表凋落物的分解,增加了土壤有机碳的积累,但与原地貌的土壤有机碳含量仍有差距<sup>[54]</sup>。通过对露天煤矿排土场的复垦可以增加土壤有机碳的积累。王金满等<sup>[55]</sup>发现,土壤有机碳随着复垦时间的增加呈现先增加后减少的趋势;丁青坡等<sup>[56]</sup>研究发现:随着复垦年限的增加,易氧化碳比例增加,颗粒状碳减少,土壤有机碳的含量和品质有所增加;因复垦区土壤层次混乱,土壤有机碳的含量层次分布不显著,但随着复垦时间的增加,土壤有机碳含量的剖面分布越来越明显,土壤质量含量逐渐提高。吴旭东等<sup>[57]</sup>发现,随着种植苜蓿时间的增加,表层土壤有机碳含量高于底层。

## 3 煤矿区人为因素对土壤有机碳的影响

复垦是对土壤有机碳影响最显著的人类活动,进行土地复垦,其根本目的是恢复土壤生产力特性,进行土壤有机碳与地表植被和土壤质量变化关系的研究,可以对复垦模式进行指导。矿区复垦土壤有机碳的研究主要集中在不同的复垦模式下土壤有机碳的积累与复垦年限的关系、复垦区域土壤有机碳的时空变异特性以及影响复垦区域土壤有机碳积累的因素的研究。

### 3.1 复垦模式对土壤有机碳的影响

露天煤矿排土场产生的废弃地大部分为排土场,露天煤矿复垦包括地貌重塑、土壤重构和植被重建,不同复垦模式即是将这三方面进行不同方式的选择。复垦母质的选择对土壤有机碳和植被生长的影响重大。张萌等<sup>[58]</sup>发现,复垦母质中土壤有机碳含量随着深度的增加而增加,且黄土母质的含量并不高;煤矸石母质因风化淋溶等使得土壤表层有机碳含量增高,且使得排土场附近土壤有机碳含量随距离增加呈同心圆式减少<sup>[59]</sup>。复垦植被种类对土壤有机碳的影响已经在前文进行了相关叙述,而不同的母质和植被的选择是煤矿复垦的重要内容。郭凌俐等<sup>[60]</sup>研究发现,“覆表土+草帘+打网格+施化肥”的排土场平台复垦模式和“覆表土+覆草帘+草方格”的排土场边

坡复垦模式下表层土壤有机碳的积累和植被恢复效果更好。喻红林等<sup>[61]</sup>研究发现林果草生态利用模式和生态旅游模式更适合五峰山煤矿区的复垦,有助于矿山复垦的稳定和土壤有机碳的积累。马佳慧等<sup>[62]</sup>研究发现以林地为主的混合复垦模式更有助于土壤有机碳的积累。

### 3.2 管理措施对土壤有机碳的影响

选择不同的植被类型进行复垦之后,随着年限的增加,土壤有机碳均会逐渐增长,而合理的人为管理会加快土壤理化性质的改善,提高土壤有机碳的积累效率。复垦为林地、草地及农田的排土场,其人为管理措施的差异,使得土壤有机碳的积累速率产生差异:对草地土壤有机碳的影响方式主要是放牧活动,复垦区域主要是割刈牧草造成土壤有机碳的影响;对农田土壤有机碳的影响主要是农田管理措施。放牧对草原碳汇的影响比较复杂,研究发现:适当的放牧强度下,放牧草原土壤有机碳的含量大于未放牧草原土壤有机碳<sup>[63]</sup>,主要是动物践踏有利于枯落物的破碎分解,以及使得土壤体积质量变大,微生物分解减少;放牧强度的差异会导致草原土壤有机碳的变化,轻度放牧有利于土壤有机碳的积累,中度放牧和重度放牧都会导致土壤有机碳的减少<sup>[64]</sup>,所以应当在牧区制定适宜的放牧强度,加强管理,保证草原碳汇功能。农田是受人类活动影响最大的土壤系统,农田的土壤有机碳也最容易受人类活动的影响,我国农业土地土壤有机碳每年约损失  $7.18 \times 10^{10} \text{ t}$ <sup>[65]</sup>,因此应当通过农田的管理来增加农田土壤有机碳的储量;影响农田土壤碳汇的主要管理措施是施肥、灌溉和免耕,其中施肥是对农田土壤有机碳影响最大的措施,施用化肥有利于速效养分的供应,有机肥的施用更有利于土壤理化特性的改善和养分的持续供应<sup>[66]</sup>;秸秆还田增加了农田土壤有机质的来源,对农田土壤碳汇有积极影响。灌溉管理措施可以增加土壤有机碳的含量,主要是由于灌溉降低了土壤水分限制,更利于植被的生长及植物残体的输入<sup>[67]</sup>,可以改变土壤的理化性质、土壤团聚体结构和黏粒含量<sup>[68]</sup>,便于有机碳的吸附。耕作导致土壤团聚体的破坏,土壤有机质的转化效率增强,造成土壤有机碳积累的减少,与传统耕作模式相比,免耕模式下,土壤表层 SOC 含量提高了 30%<sup>[69]</sup>,主要是因为免耕可以提高土壤表层的大团聚体的数量并且减少微团聚体的数量<sup>[17]</sup>,而大团聚体对农田土壤有机碳的增加效应更明显<sup>[70]</sup>。农业管理措施的综合使用,更加有利于土壤有机碳的积累,如免耕与秸秆还田的结合可以提高土壤的稳定性、增加地表覆盖以及增加土壤团聚体的稳定性以及透气性

来增加土壤有机碳的积累。人类活动对土壤有机碳的影响是建立在自然因素的影响上的,自然因素和人为因素又会相互影响,各影响因素之间也会相互影响,目前对各个因素之间如何共同影响土壤有机碳积累的研究少之又少,应当建立一个模型将各影响因素综合考虑。矿区土地复垦主要是复垦为耕地、林地、草地等,研究人类活动对土壤有机碳的影响,可以将达到的规律应用到矿区复垦中,以得到最佳的复垦效果。

### 3.3 土地利用方式转化对矿区土壤有机碳的影响

煤矿开采及矿区土地复垦都会影响煤矿区土壤有机碳储量,煤矿开采破坏地表植被,剥离表层土壤会导致土壤有机碳的剧烈减少,且破坏土壤原有的剖面结构;矿区复垦会改善表层土壤的理化性质,所形成不同的土地利用方式,改变土壤有机碳的时空分布。而土地利用方式转变主要是林地、草地和耕地 3 种利用方式之间转变,大量研究证实,林地是土壤碳库的重要部分,其碳储量丰富,进行林地开垦会造成土壤有机碳的损失<sup>[71]</sup>,但是退耕还林与草地造林对土壤有机碳的影响规律却非常复杂,退耕还林会造成土壤有机碳的先减少后增加<sup>[72-73]</sup>。由于所在区域的气候环境与树种的差异,土壤有机碳减少的时间有差异:在复垦年限十年以内,土壤有机碳一般不会增加<sup>[74-75]</sup>。草地的开垦会造成草地土壤有机碳含量的急剧减少,将草地开垦为农田后,损失掉的土壤有机碳占原来总量的 30%~50%<sup>[76]</sup>,草场开垦 60 年后,其土壤有机碳的含量会降低 18%~35%<sup>[77]</sup>;将农田复垦为草地会增加土壤有机碳的含量。所以应当在保证耕地红线和适应当地自然环境的条件下,适度地退耕还草,以增加当地土壤碳汇,而非盲目地大面积退耕还林。

## 4 结论与展望

本文系统综述了自然因素(植被、土壤质量、复垦时间)和人为因素(复垦模式、复垦管理措施、土地利用方式转变)对矿区土壤有机碳积累的影响及矿区土壤样品有机碳含量的测算和区域土壤有机碳储量估算。当前,土壤有机碳的研究集中于自然因素下人为影响的研究,有关各影响因素之间相互关系及其对土壤有机碳积累的研究较少。通常情况下,植被类型、土壤质量等对土壤有机碳的积累起主导作用,通过人为管理措施对土壤有机碳积累的过程产生影响,采矿及复垦活动对矿区土壤有机碳的影响主要是通过改变土壤质量和地表植被类型的方式实现的。在进行矿区复垦研究时,应综合运用各土地利用方式的土壤有

机碳积累及影响规律,可更好地指导矿区的复垦工作。

但是,关于各因素对土壤有机碳的研究主要集中在自然因素和人为干扰方面,而矿山复垦对土壤有机碳的研究较少。另外,矿山土作为一种新形成的土壤,其土壤有机碳的储量及变异规律的研究是矿山复垦土壤质量变化的重要指标。因此,明确影响土壤有机碳的主要因素及转化机理,探求有助于土壤有机碳积累的新复垦方法,对于缓解气候变暖具有重要意义。基于对复垦区土壤有机碳的研究,提出在此领域的研究重点应放在以下几方面:

1) 系统研究矿区土壤有机碳的变化过程和机制。影响土壤有机碳积累的因素众多,各影响因素之间又会相互影响,但目前的研究多集中于各因素对土壤有机碳的影响研究,未考虑各因素的综合影响,未来研究的重点应当集中在矿区土壤有机碳的变化过程和机制,选取合适的因素进行分析模型的构建,分析影响土壤有机碳的各因素之间的关系及对土壤有机碳积累的作用。

2) 应加强复垦模式及覆土工艺以及排土场微地形对土壤有机碳积累机理的研究。不同的复垦基质(煤矸石及其他排弃废物)会影响土壤有机碳的初始含量,排土场表层土的堆放方式以及排土场设计方式的差异会影响土壤理化性质,进而对土壤有机碳的积累产生影响。国内研究复垦模式对土壤有机碳积累主要集中在单一的复垦植被类型或者土地利用方式对土壤有机碳的影响,如复垦为林地之后较少转变土地利用方式,应当进行复垦土地利用类型中间转变对土壤有机碳积累速率的研究。

3) 应当加强对处于不同地理位置的矿区土壤有机碳积累的对比研究。目前,矿区土壤有机碳积累一般是小区域的储量及变化规律研究,缺乏对不同区域矿区土壤有机碳积累的比较研究,小区域的土壤有机碳积累缺乏气候变化等因素的影响,今后的研究可以加强不同区域土壤有机碳积累的研究。

4) 加强土壤有机碳测量方法的研究。井工开采及露天煤矿开采等都会造成煤泥、碳黑等物质散落或沉降在土壤中,排土场的煤矸石排放也会造成土壤中含有较多的碳黑、煤碳类物质,对土壤有机碳的测量造成影响。寻求更好的测定方法来减少此类物质的影响,更好地测得矿区各类有机碳的密度、单位体积含量的参数,便于进行更为精确的比较分析;也可以更好地比较颗粒有机碳、惰性有机碳、活性有机碳等对复垦区土壤有机碳积累的研究,以便于进行矿区有机碳循环机理的研究。国内对矿区土壤有机碳的研究较

为薄弱,基于矿区土壤有机碳循环的研究鲜有报道,进行深入并全面的研究是很有必要的。

#### 参考文献:

- [1] 陕永杰,郝蓉. 矿区复合生态系统中土壤演替和植被演替的相互影响[J]. 煤矿环境保护, 2001, 15(5): 28-30
- [2] 王金满,杨睿璇,白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 229-235
- [3] Bodlák L, Křováková K, Kobesová M, et al. SOC content—An appropriate tool for evaluating the soil quality in a reclaimed post-mining landscape[J]. Ecological Engineering, 2012, 43: 53-59
- [4] Levy P, Friend A, White A, et al. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems[J]. Climatic Change, 2004, 2(67): 185-209
- [5] Sedjo R A. The carbon cycle and global forest ecosystem[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70(1): 295-307
- [6] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions[J]. Biogeochemistry, 2005, 72(1): 87-121
- [7] Zhou T, Shi P, Wang S. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China[J]. Acta Geographica Sinica-Chinese Edition, 2003, 58(5): 727-734
- [8] 杨渺,李贤伟,张健,等. 植被覆盖变化过程中土壤有机碳库动态及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 126-138
- [9] 周涛,史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 138-143
- [10] 贾重建,刘红宜,卢瑛,等. 土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J]. 热带地理, 2014, 34(5): 681-689
- [11] Dinakaran J, Krishnayya N. Variations in type of vegetal cover and heterogeneity of soil organic carbon in affecting sink capacity of tropical soils[J]. Current Science, 2008, 94: 1 144-1 150
- [12] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81: 169-178
- [13] Zhou Z H, Wang C K, Zhang Q Z. The effect of land use change on soil carbon, nitrogen, phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6 694-6 702
- [14] 张亚茹,欧阳旭,褚国伟,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23
- [15] 刘楠,张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14
- [16] Bordovsky D, Choudhary M, Gerard C. Effect of tillage, cropping, and residue management on soil properties in the Texas Rolling Plains[J]. Soil Science, 1999, 164(5): 331-340

- [17] Andruschkewitsch R, Koch H J, Ludwig B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites[J]. *Geoderma*, 2014, 217: 57–64
- [18] 丁青坡, 王秋兵, 魏忠义, 等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 262–267
- [19] 胡海清, 吴畏, 岳彩玲, 等. 火干扰后短期白桦林和落叶松林土壤呼吸及其组分的影响[J]. *植物研究*, 2015, 35(2): 279–288
- [20] 张国盛. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2 722–2 728
- [21] Cong H B, Zhao L X, Meng H B, et al. Monitoring and control system development for pilot-scale moving bed biomass carbonization equipment with internal heating[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31: 268–274
- [22] Fernandes M B, Skjemstad J O, Johnson B B, et al. Characterization of carbonaceous combustion residues I. Morphological, elemental and spectroscopic features[J]. *Chemosphere*, 2003, 51: 785–795
- [23] Maharaj S, Barton C D, Karathanasis T A, et al. Distinguishing “new” from “old” organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development[J]. *Soil Science*, 2007, 172: 292–301
- [24] Maharaj S, Barton C D, Karathanasis T A, et al. Distinguishing “new” from “old” organic carbon in reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: II. Field validation[J]. *Soil Science*, 2007, 172: 302–312
- [25] Mikutta R, Kleber M, Kaiser K, et al. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 120–135
- [26] Rumpel C, Janik L J, Skjemstad J, et al. Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32: 831–839
- [27] Rumpel C, Balesdent J, Grootes P, et al. Quantification of lignite-and vegetation-derived soil carbon using  $^{14}\text{C}$  activity measurements in a forested chronosequence[J]. *Geoderma*, 2003, 112: 155–166
- [28] Griffin J J, Goldberg E D. Sphericity as a characteristic of solids from fossil fuel burning in a Lake Michigan sediment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 763–769
- [29] Schmidt M W, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14: 777–793
- [30] Luinge H J, Hop E, Lutz J E T G, et al. Determination of the fat, protein and lactose content of milk using fourier transform infrared spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1993, 284: 419–433
- [31] Morgenroth G, Kretschmer W, Scharf A, et al.  $^{14}\text{C}$  measurement of soil in post-mining landscapes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 223: 568–572
- [32] Bolin B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle[J]. *Science*, 1977, 196(4290): 613–615
- [33] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156–159
- [34] Adhikari K, Hartemink A E, Minasny B, et al. Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark[J]. *PloS One*, 2014, 9(8): 1–13
- [35] 付东磊, 刘梦云, 刘林, 等. 黄土高原不同土壤类型有机碳密度与储量特征[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 44–50
- [36] 焦泽珍. 土地复垦对矿区植被及土壤碳汇量的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2013
- [37] 黄翌, 汪云甲, 田丰, 等. 煤炭开采对植被–土壤系统扰动的碳效应研究[J]. *资源科学*, 2014(4): 817–823
- [38] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169: 137–147
- [39] Chambers J Q, Schimel J P, Nobre A D. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52: 115–131
- [40] 陈锦盈, 孙波, 李忠佩, 等. 不同土地利用类型土壤有机碳各库大小及分解动态[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 91–95
- [41] 马明东, 李强, 罗承德, 等. 卧龙亚高山主要森林植被类型土壤碳汇研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 27–131
- [42] Gunina A, Ryzhova I, Dorodnikov M, et al. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils[J]. *Plant and Soil*, 2014, 387: 265–275
- [43] 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 等. 植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化[J]. *环境科学*, 2014 (10): 3 842–3 850
- [44] 李俊超, 党廷辉, 薛江, 等. 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 453–460
- [45] 樊文华, 李慧峰, 白中科. 黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化——以平朔安太堡露天煤矿为例[J]. *山西农业大学学报*, 2006(4): 313–316
- [46] 王同智, 薛焱, 包玉英, 等. 不同复垦方式对黑岱沟露天矿排土场土壤有机碳的影响[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2): 174–178
- [47] Kern J S, Turner D P, Dodson R F. Spatial patterns in soil organic carbon pool size in the Northwestern United States[J]. *Soil Processes and the Carbon Cycle*, 1998, 44: 29–43
- [48] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005(1): 91–96
- [49] 华娟, 赵世伟, 张扬, 等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4 613–4 619

- [50] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014(12): 4 695–4 704
- [51] Jastrow J, Miller R, Boutton T. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 801–807
- [52] Elliott E, Cambardella C. Physical separation of soil organic matter[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1991, 34(1): 407–419
- [53] Vinduřková O, Frouz J. Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: A quantitative review[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(5): 1 685–1 698
- [54] 王同智, 薛焱, 包玉英, 等. 不同复垦方式对黑岱沟露天矿排土场土壤有机碳的影响[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 174–178
- [55] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223–232
- [56] 丁青坡, 王秋兵, 魏忠义, 等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 262–267
- [57] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 245–251
- [58] 张萌. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒分布的多重分形特征[D]. 北京: 中国地质大学, 2014
- [59] 郑永红, 张治国, 胡友彪, 等. 淮南矿区煤矸石风化物特性及有机碳分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 18–24
- [60] 郭凌俐, 王金满, 张萌, 等. 草原露天煤矿区不同复垦模式效果对比[J]. 金属矿山, 2014, 43(6): 150–155
- [61] 喻红林, 李晓青, 邓楚雄, 等. 五峰山煤矿区复垦土地适宜性评价及复垦模式研究[J]. 农学学报, 2012, 2(6): 59–64
- [62] 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. 水土保持研究, 2015(1): 93–96
- [63] Piñeiro G, Paruelo J M, Oesterheld M, et al. Pathways of grazing effects on soil organic carbon and nitrogen[J]. Rangeland Ecology & Management, 2010, 63(1): 109–119
- [64] 萨茹拉, 李金祥, 侯向阳. 草地生态系统土壤有机碳储量及其分布特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3 604–3 614
- [65] Changsheng L. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 345–350
- [66] 胡慧蓉, 胡庭兴, 谭九龙, 等. 华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 630–637
- [67] Collins H, Rasmussen P, Douglas C. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 783–788
- [68] 赵加瑞, 王益权, 刘军, 等. 灌溉水质与土壤有机质累积的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1 240–1 243
- [69] Dolan M, Clapp C, Allmaras R, et al. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(2): 221–231
- [70] Six J, Elliott E, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2 099–2 103
- [71] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6: 317–327
- [72] Paul K, Polglase P, Nyakuengama J, et al. Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1): 241–257
- [73] Kalinina O, Goryachkin S, Karavaeva N, et al. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics[J]. Geoderma, 2009, 152(1): 35–42
- [74] Lemma B, Kleja D B, Nilsson I, et al. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia[J]. Geoderma, 2006, 136(3): 886–898
- [75] Arevalo C B, Bhatti J S, Chang S X, et al. Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-uses in north central Alberta, Canada[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257: 1 776–1 785
- [76] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74–81
- [77] Tiessen H, Stewart J, Bettany J. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen, and phosphorus in grassland soils[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(5): 831–835

## Progress on Measurement and Factors of Soil Organic Carbon in Mineral Area

LI Bo<sup>1</sup>, WANG Jinman<sup>1,2\*</sup>, WANG Hongdan<sup>1</sup>, BAI Zhongke<sup>1,2</sup>

(1 *College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2 *Key Laboratory of Land Consolidation and Land Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China*)

**Abstract:** Study the reservation, factors and temporal variation of soil organic carbon (SOC) in mineral area can not only understand the variation of soil quality, but also guide mine reclamation in the selection of overburden and vegetation. Climate, vegetation, soil texture and other natural factors, land use patterns, management practices and other human disturbances have effects on SOC accumulation and transformation. Currently, the study on SOC change process and transformation mechanism in mineral area are not enough, especially in the response law of SOC to the reclamation measures. This paper systematically summarized the study progresses of domestic and foreign scholars on the measurement of SOC in mine area and on the estimation of the regional SOC reservation, the influences of natural factors and human interference on SOC accumulation in the mine area. On the above bases, further research directions were proposed: 1) on the change and transformation mechanism of SOC in profile structure; 2) on uncertain influential factors of SOC accumulation; 3) on effects of reclamation modes, covering techniques, and microtopography on SOC accumulation mechanism.

**Key words:** Soil organic carbon (SOC); Human disturbance; Natural factors; Mine reclamation; Calculation method