

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.008

造林对乌海露天煤矿复垦地土壤养分和碳库的影响

严洁, 于小娟, 唐明, 段文艳, 李鑫, 郝一鸣, 盛敏*

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 明确矿区复垦地造林前后土壤碳库的变化及土壤养分对碳库的影响。[方法] 以造林前的荒草地和造林后的新疆杨林地作为研究对象, 研究复垦地造林前后土壤无机碳库、活性有机碳库、慢性有机碳库、惰性有机碳库和养分的变化规律和相互关系以及各养分指标对碳库的贡献率差异。[结果] 表明, 除 NN (硝态氮) 外, 造林后土壤养分和碳库各组分含量均有所上升。林地土壤 TN (全氮)、AN (铵态氮)、TP (全磷)、AP (速效磷)、TK (全钾) 和 AK (速效钾) 的含量相较于草地分别增加了 29.27%、17.21%、23.08%、27.04%、51.18% 和 53.19%, 而土壤 NN 含量下降了 71.84%。造林后土壤 SOC (有机碳)、POC (颗粒物有机碳)、NPOC (非颗粒物有机碳)、DIC (可溶性无机碳)、DOC (可溶性有机碳)、MBC (微生物量碳) 和 HC (还原性糖碳) 含量相较于造林前分别上升了 50.35%、62.46%、22.56%、113.53%、230.23%、274.63% 和 72.54%。复垦地土壤无机碳库与活性有机碳库之间呈显著正相关性, 与慢性有机碳库和惰性有机碳库之间无显著相关性。土壤养分因子共能解释 40.7% 的碳库变量, 其中 K 对土壤碳库的贡献率最高。相关性分析也表明 TK 和 AK 与各形态碳组分之间均存在显著正相关关系。[结论] 综合分析认为造林能够明显改善和提高乌海露天煤矿复垦地土壤养分含量和碳库水平, 这为进一步深入研究造林对干旱荒漠区露天煤矿复垦地土壤质量和生态功能的影响提供了理论和实践基础。

关键词: 矿区复垦地; 造林; 土壤养分; 土壤碳库

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0066-08

煤炭作为一种重要的化石燃料, 是全球第二大能源, 占全球能源消耗总量的 24%, 在我国能源供应中也占据着重要地位^[1]。露天采矿是世界上重要的煤炭开采方式, 其生产的煤炭量占全世界生产量增长值的 75%, 占我国年总产量的 15%^[2]。露天采矿不仅会移除地表植被, 还有大规模土石方的时空转移, 造成矿区大面积土地损毁或占用。据统计资料显示^[3], 我国每年由煤炭的露天开采造成的土地损毁或占用的面积高达 10 000 hm²。土壤养分和碳库是衡量土壤质量的重要指标, 其含量直接影响土壤肥力及生态功能, 从而决定地上植被的生长。土

壤养分主要包括氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 3 种元素, 为植物生长提供必要的营养支持, 影响着生态系统的健康稳定与持续发展^[4]。对不同形态碳的系统研究是明确土壤碳库变化和调控机理的关键, 是研究陆地生态系统碳循环及全球碳平衡的关键^[5]。土壤碳库由无机碳库和有机碳库两部分组成。土壤无机碳库可通过测定可溶性无机碳 (DIC) 含量表征, 在土壤碳库中所占比例较小, 往往为人们所忽视。而近来研究表明, 土壤无机碳库是一个有效碳汇, 在土壤-大气碳循环中发挥着重要作用^[6]。土壤有机碳库则较为复杂, 可根据

收稿日期: 2020-04-22 修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家重点研发计划“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”项目 (2017YFC0504400) -“采煤迹地地形与新土体近自然构建技术研究” (2017YFC0504404) -“采煤迹地新土体综合培肥增效技术研究 (2017YFC0504404-3)”资助

* 通讯作者: 盛敏, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林保护, 电话: 18392358307。E-mail: shengmin1977@126.com

其稳定性将其分为活性有机碳库(周转期0.1~4.5年)、慢性有机碳库(周转期5~50年)和惰性有机碳库(周转期50~3 000年)^[7]。土壤活性有机碳库是植物营养的主要来源,可溶性有机碳(DOC)、还原性糖碳(HC)、微生物量碳(MBC)均属于活性碳库这一范畴。慢性有机碳库是指介于“活性”和“惰性”库之间具有中等周转时间的土壤有机碳,包括微生物和微型动物残体以及碎屑物质。颗粒物有机碳(POC)属于慢性有机碳库这一范畴。惰性有机碳库很稳定,对土地利用的短期变化几乎没有响应。非颗粒物有机碳(NPOC)属于惰性有机碳库这一范畴。

西北干旱荒漠区煤矿资源丰富,蕴藏着巨大的开发潜力,是我国重要的能源基地^[8]。该区域的典型特征是风大沙多、降水稀少、物种贫乏、生境脆弱。煤矿的露天开采是一种高强度的生态扰动行为,在生境脆弱地区尤其要重视其复垦地土壤质量和生态功能的恢复情况。植树造林作为西北干旱荒漠区生态恢复的一种重要手段^[9],评价其对该区域矿区复垦地土壤质量的恢复情况具有重要的意义。目前国内对露天矿区复垦地的研究多集中于黄土高原地区^[10-11],少有学者将研究重点放在西北干旱荒漠地区,而近年来我国大型煤炭基地越来越多地向西北区域汇集,其中内蒙古自治区2019年上半年的煤炭生产量位列全国第一^[12]。本研究以内蒙古自治区乌海市露天煤矿复垦地为例,研究其造林前后土壤养分及碳库各组分含量变化及相互关系,系统探究不同形态碳含量的变化规律以及各养分含量对土壤碳库组成变化的影响,可为深入探讨和评价造林前后矿区复垦地土壤质量和生态功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于内蒙古自治区乌海市海勃湾区至

海南区之间的露天煤矿复垦地(106°50'~106°57'E, 39°29'~39°39'N),占地面积约185 km²。露天煤矿在复垦时,以前移除的表土是不可能恢复的,结果就是用采煤产生的固体废弃物作为复垦的基质。这些复垦地的主要特点为岩石碎块高,土壤养分缺乏,容重高,而且复垦时采取的压实处理使得土壤渗透率偏低^[13-14]。乌海市属典型的西北干旱荒漠区,干旱少雨,地表蒸发强烈,年均降水量157.9 mm,年均蒸发量3 249.0 mm,其蒸发量几乎是其降水量的20倍^[15]。建市初期,荒漠化面积占全市国土面积比重达60%,全市森林覆盖率仅为0.38%。从2009年开始,乌海市全面铺设节水灌溉系统,坚持水利设施建设到哪,植树造林推进到哪。研究发现干旱荒漠区的很多植物的种子都适于传播^[16],能随风飘到很远的地方,该矿区复垦地也能发现这些植物形成的荒草地。2010年春季,植树造林工程推进到海南区矿区复垦地,形成成片人工林地。林地的绝对优势种为新疆杨,其种植密度为0.17株·m⁻²,平均胸径为21.80 cm。

1.2 试验设计与样品采集与制备

为比较造林前后土壤碳库组分特征及影响因素,本研究于2017年10月在矿区复垦地选取荒草地(GH)和林地(FH)作为研究对象(表1)。在荒草地和林地内分别随机设置10个不连续样地(样地面积为100 m×100 m),样地之间间隔至少100 m;于每一样地内随机设置3个10 m×10 m的调查样方,于每个样方内按5点取样法在0~15 cm的土层范围内采集5个直径为15 cm的土柱,然后将这5个土柱混合后作为本样方的代表性样品。将采集的每个土壤样品分成两份,一部分鲜土在现场过2 mm筛后于4℃保温冰箱中保存,另一部分带回实验室,在通风的走廊中将土样风干两周后,分别将风干土样过1 mm筛以测定土壤速效养分,过0.25 mm筛以测定土壤有机碳、全氮和全磷,过0.15 mm筛以测定土壤全钾。

表1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the sample plots

样地 Plot	样地数 Plot number	样地类型 Plot type	坡向 Aspect	坡度 Slope	海拔/m Altitude	优势种 Dominant species
GH	10	荒草地 Grassland	西北 Northwest	<5°	1 250	珍珠猪毛菜和灰绿黄堇 <i>Salsola passerina</i> Bunge and <i>Corydalis adunca</i> Maxim
FH	10	林地 Forest land	西北 Northwest	<5°	1 255	新疆杨和蒙古冰草 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i> and <i>Agropyron mongolicum</i> Keng

1.3 土壤养分和生物学活性的测定

土壤养分含量测定方法参照《土壤农化分析》^[17]：采用凯氏定氮仪（FOSS 2200）测定土壤全氮（TN）含量；采用AA3连续流动分析仪测定土壤硝态氮（NN）和铵态氮（AN）含量；采用钼锑抗比色法测定土壤全磷（TP）含量；采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定速效磷（AP）含量；采用氢氧化钠熔融火焰光度法测定土壤全钾（TK）含量；采用NH₄OAc浸提—火焰光度法测定土壤速效钾（AK）含量。

土壤总有机碳（SOC）含量采用重铬酸钾外加热法^[17]测定；可溶性有机碳（DOC）和可溶性无机碳（DIC）含量采用鲜土提取液，过0.45 μm滤膜，再用总有机碳分析仪（日本岛津TOC-VCPH）进行测定^[18]；微生物量碳（MBC）含量采用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法^[19]测定；还原性糖碳（HC）含量采用3,5-二硝基水杨酸法^[20]测定；颗粒物有机碳（POC）和非颗粒物有机碳（NPOC）含量采用Cambardella & Elliot的方法^[21]测定。

1.4 统计分析

采用Excel（2016版本）对试验数据进行整理和初步分析；再采用R 3.4.2版本（R Core Team 2017, www. R-project.org）对数据进行单因素方差

分析（One-way ANOVA）、Person相关性分析和变差分析，其差异性检验采用最小二乘法（LSD）检验，显著性水平为0.05；最后再通过R软件绘制箱线图、关系网络图和变差分析图。

2 结果与分析

2.1 造林前后复垦地土壤养分含量变化

对复垦地土壤养分含量进行单因素方差分析，结果发现造林前后土壤TN、AN、TP、AP含量无显著差异，NN、TK、AK含量差异显著（图1）。具体而言，复垦地土壤TN、AN、TP、AP、TK和AK的含量范围分别为0.13~0.98 g·kg⁻¹、4.05~9.01 mg·kg⁻¹、0.35~3.29 g·kg⁻¹、3.33~16.57 mg·kg⁻¹、5.38~18.09 g·kg⁻¹和22.79~71.20 mg·kg⁻¹，林地TN、AN、TP、AP、TK和AK的含量（0.53 g·kg⁻¹、7.22 mg·kg⁻¹、0.16 g·kg⁻¹、8.08 mg·kg⁻¹、16.01 g·kg⁻¹和58.12 mg·kg⁻¹）相较于草地（0.41 g·kg⁻¹、6.16 mg·kg⁻¹、0.13 g·kg⁻¹、6.36 mg·kg⁻¹、10.59 g·kg⁻¹和37.94 mg·kg⁻¹）分别增加了29.27%、17.21%、23.08%、27.04%、51.18%和53.19%。复垦地土壤NN的含量范围为1.06~13.45 mg·kg⁻¹，林地NN的含量（1.76 mg·kg⁻¹）相较于草地（6.25 mg·kg⁻¹）减少了71.84%。

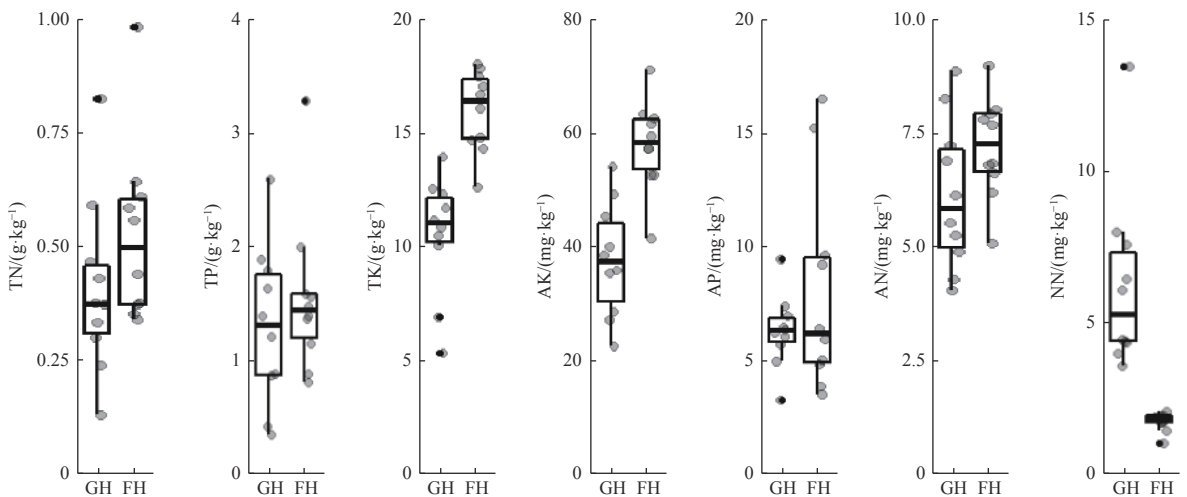


图1 造林前后矿区复垦地土壤养分变化特征

Fig. 1 Changes in soil nutrient characteristics in reclaimed mine before and after afforestation

2.2 造林前后复垦地土壤碳库各组分含量变化

对复垦地各碳组分进行单因素方差分析，结果发现造林后土壤碳库各组分含量均有所上升，其中无机碳库和活性有机碳库含量显著增加（图2）。具体而言，复垦地土壤SOC、POC和NPOC含量

范围分别为3.53~49.33 g·kg⁻¹、1.41~51.98 g·kg⁻¹和0.68~66.24 g·kg⁻¹，林地SOC、POC和NPOC的含量（19.20 g·kg⁻¹、16.10 g·kg⁻¹和28.52 g·kg⁻¹）相较于草地（12.77 g·kg⁻¹、9.91 g·kg⁻¹和23.27 g·kg⁻¹）分别增加了50.35%、62.46%和22.56%。DIC、

DOC、MBC 和 HC 在土壤碳库中虽占比较低, 但造林对其的影响却很大; 林地土壤 DIC、DOC、MBC 和 HC 的含量 ($85.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $134.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $75.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $313.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相较于草地 ($40.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $40.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $181.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别增加了 113.53%、230.23%、

274.63% 和 72.54%。

2.3 复垦地土壤碳库各组分间的相关性分析

对复垦地各形态碳组分进行 Pearson 相关性分析, 再用达到显著水平 ($P < 0.05$) 的相关系数绘制碳组分间的关系网络图 (图 3A)。分析发现, SOC 和 HC 的连线最多, NPOC 的连线最少, 且均

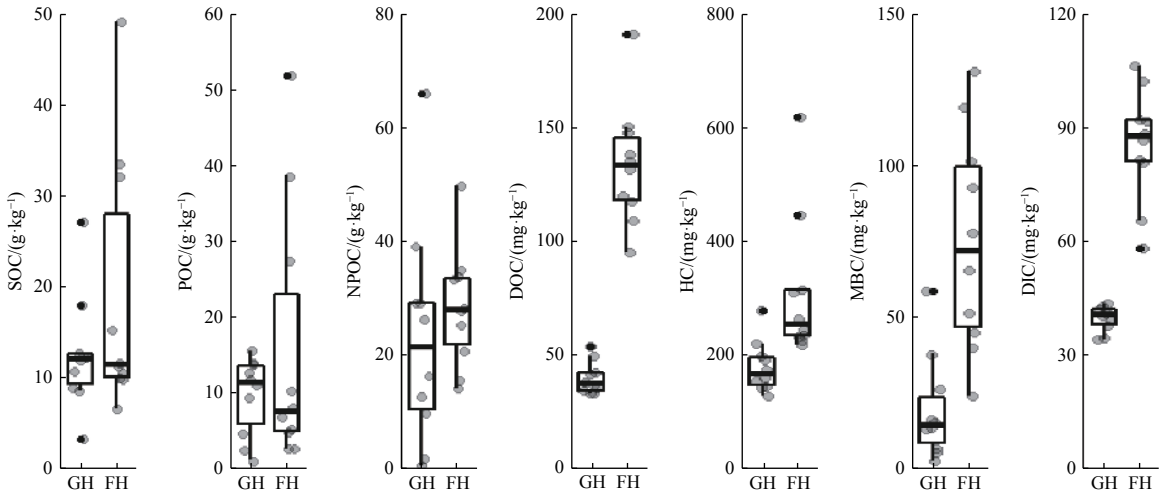
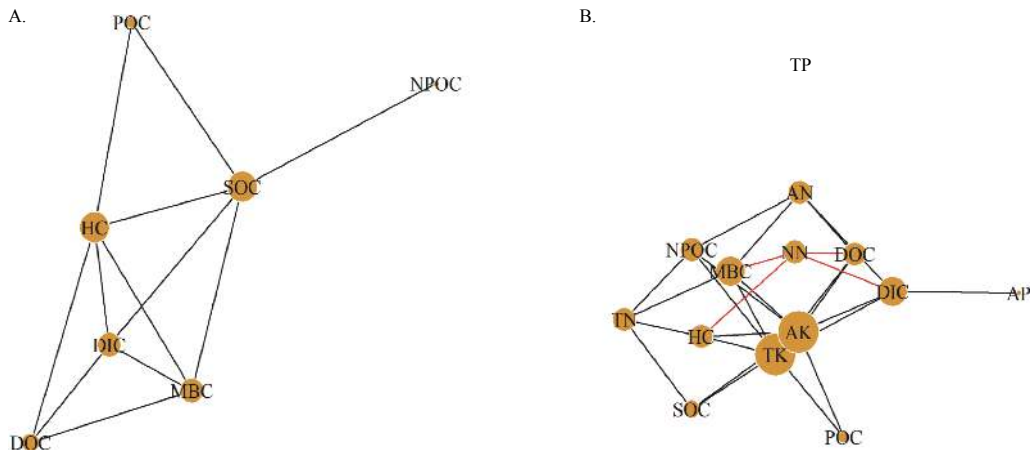


图 2 造林前后矿区复垦地土壤碳库变化特征

Fig. 2 Changes in soil carbon pool characteristics in reclaimed mine before and after afforestation



注: 图中节点代表土壤指标, 连线代表连接的土壤指标间相关性达到显著水平。节点的大小代表该土壤碳指标之间连线的多少 (图 A) 或土壤碳指标与土壤养分指标之间连线的多少 (图 B), 黑线表示正相关, 红线表示负相关。各节点代表的具体土壤指标如下: DOC 代表可溶性有机碳, DIC 代表可溶性无机碳, MBC 代表微生物量碳, HC 代表还原性糖碳, SOC 代表有机碳, POC 代表颗粒物有机碳, NPOC 代表非颗粒物有机碳, TN 代表全氮, AN 代表铵态氮, NN 代表硝态氮, TK 代表全钾, AK 代表速效钾, AP 代表速效磷, TP 代表全磷。

Note: In the figure, the nodes represent soil carbon index, and the lines represent the correlation between connected soil index reaching a significant level. The size of the node represents the linking number of soil carbon indexes (A) or the linking number between soil carbon index and soil nutrient indexes, the black line represents the positive correlation, and the red line represents the negative correlation. The specific indicators of each node are as follows: DOC represents soluble organic carbon, DIC represents soluble inorganic carbon, MBC represents microbial biomass carbon, HC represents reducing sugar carbon, SOC represents soil organic carbon, POC represents particulate organic carbon, NPOC represents non-particulate organic carbon, TN represents total nitrogen, AN represents ammonium nitrogen, NN represents nitrate nitrogen, TK represents total potassium, AK represents available potassium, AP represents available phosphorus, TP represents total phosphorus.

图 3 矿区复垦地土壤碳组分之间 (A) 或与土壤养分之间 (B) 的关系网络图

Fig. 3 Networks of correlations among soil carbon components (A) or between soil nutrient and carbon components (B) in reclaimed mine.

呈正相关关系；SOC与无机碳库和各形态有机碳组分之间均呈显著正相关，其中SOC与POC的相关性最强($r=0.93$)；DIC与DOC、MBC和HC呈显著正相关(r 分别为0.87、0.71和0.42)，与POC和NPOC无显著相关性。这表明SOC和HC对碳库的指示作用最强，NPOC对碳库的指示作用最弱。

2.4 复垦地土壤养分与碳库间的相关性分析

分别将复垦地土壤各养分指标与各形态碳组分间进行Pearson相关性分析，再用达到显著水平的($P < 0.05$)相关系数绘制养分与碳库间的关系网络图(图3B)。分析结果显示，复垦地土壤养分对碳库指示作用由强到弱依此排序为TK = AK > TN = NN = AN > AP > TP。土壤TK和AK与各形态碳组分均呈显著正相关，其中TK与SOC、DIC、DOC、POC、NPOC、MBC和HC的相关系数分别为0.36、0.66、0.72、0.28、0.35、0.52和0.47，AK与SOC、DIC、DOC、POC、NPOC、MBC和HC的相关系数分别为0.54、0.74、0.61、0.40、0.46、0.73和0.47。土壤TN与SOC、NPOC、MBC和HC呈显著正相关，相关系数分别为0.48、0.80、0.47和0.56。土壤NN与DIC、DOC、MBC和HC呈显著负相关，相关系数分别为-0.68、-0.72、-0.46和-0.52。土壤AN与DIC、DOC、NPOC和MBC呈显著正相关，相关系数分别为0.40、0.33、0.43和0.44。土壤TP与各形态碳组分均无显著相关性，AP与DIC呈显著正相关($r=0.45$)。

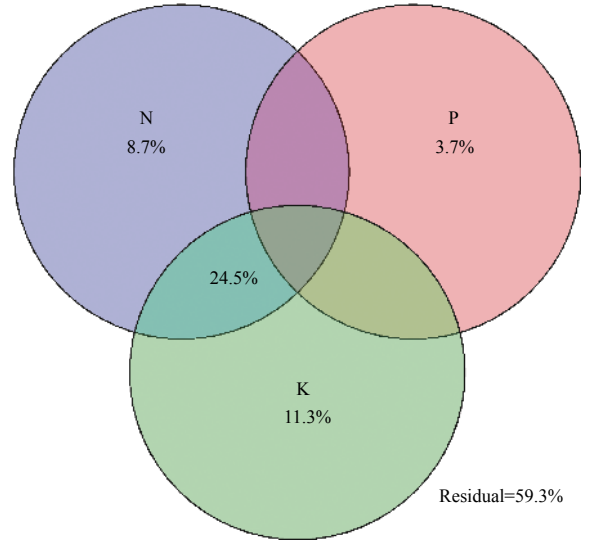
2.5 复垦地土壤氮、磷和钾对碳库组成的变差分析

将土壤氮(N)、磷(P)和钾(K)作为解释变量，利用变差分析确定土壤N、P、K对土壤碳库组成的贡献程度。如图所示(图4)，土壤N、P和K总共解释了40.7%的变差，这表明复垦地造林前后土壤养分对土壤碳库组成变化具有较好的解释作用。其中24.5%的变差为N和K共同解释，11.3%的变差为K单独解释，8.7%的变差为N单独解释，3.7%的变差为P单独解释。这表明土壤碳库组成在N、P、K三要素中主要受N和K的影响，P对土壤碳库的影响较低。

3 讨论

3.1 造林对干旱荒漠矿区复垦地土壤碳库的影响

干旱荒漠矿区复垦地作为一个独特的人工、半人工生态系统，在该区域自然恢复荒草地上栽植新



注：图中解释的值小于0时不予以展示。

Note: Values < 0 not shown.

图4 矿区复垦地土壤N、P和K对碳库组成影响的变差分析

Fig. 4 Variation analysis of soil carbon pool composition by soil N, P and K in reclaimed mine.

疆杨会对土壤不同赋存形态碳含量造成不同程度的影响。林地不仅包含草地原有的灌木和草本植物，还新增了乔木，更多的植被凋落物和根系分泌物可以为土壤提供更丰富的碳库来源^[22]，造成不同形态碳含量均有所增加。前人研究表明^[23]，SOC对人为活动和环境因子变化的反应敏感度不强，而活性有机碳是土壤中活跃的化学物质，对土地管理措施的敏感度高于SOC。本研究同样发现，造林后土壤SOC含量变化不显著而活性有机碳含量显著增加。根据全国第二次土壤普查养分分级系统^[24]，将土壤有机质含量由高到低划分为6个级别：I(>40 g·kg⁻¹)、II(30~40 g·kg⁻¹)、III(20~30 g·kg⁻¹)、IV(10~20 g·kg⁻¹)、V(6~10 g·kg⁻¹)、VI(<6 g·kg⁻¹)。土壤有机质(SOM) = 土壤有机碳(SOC) × 1.724，由此可知，干旱矿区复垦地SOC总体中等偏上，草地属于Ⅲ级水平，林地可达到Ⅱ级水平。造林后土壤活性有机碳含量显著升高，而POC和NPOC含量虽有所上升却不显著，原因可能是本研究所选林地种植新疆杨年限较短，满足活性碳库的周转期，却未达到慢性碳库和惰性碳库的有效周转期。

不同学者对土壤活性有机碳定义不同^[5]，但大致都认为其并非为一种单纯的化合物，而是土壤系统中不稳定且具有较高活性的那部分有机碳的统称，可以较为灵敏地反映土壤理化性质的微小变

化。DOC、MBC和HC在土壤中含低,占比小,其中DOC和HC可以作为活性有机质直接被微生物吸收利用^[25],MBC是土壤微生物体内所含有机碳的总称^[26]。本研究中,干旱矿区复垦地造林后铺设有人工灌溉系统,形成的干湿交替环境有利于土壤DOC的释放,增加了微生物可利用的碳源,造成林地DOC含量显著高于草地。这与李宗佩等^[27]的研究结果一致,其认为干湿交替的环境可促进团聚体的分散进而增加土壤DOC含量。Shi等^[28]研究表明,干旱地区的土壤无机碳和有机碳含量呈正相关关系,本研究进一步发现干旱矿区复垦地土壤无机碳库与活性有机碳库之间呈显著正相关性,与慢性有机碳库和惰性有机碳库无显著相关性。POC是与砂粒(53~2000 μm)结合的土壤慢性有机碳组分,由相对粗大的非腐殖质化的植物残体和微生物分解产物组成,是土壤有机质周转和植物有效养分的暂时储存库^[29]。NPOC指同时受土壤粘粒和粉粒保护的腐殖质化的惰性有机碳组分,其结构稳定复杂,很难被微生物利用,在一定程度上反映了土壤保持有机碳的能力,因此提高这部分碳库含量对缓解大气CO₂浓度上升具有重要意义^[30]。

3.2 复垦地造林前后土壤养分对碳库组成变化的影响

土壤养分是指植物生长的过程中由土壤提供的必需的营养元素,其中N、P、K是维持植物体内物质和能量流动的重要组成部分^[31]。已有研究表明,复垦地经营模式对土壤养分含量会产生重要影响^[32]。本研究结果表明,与造林前相比,除NN外,造林后复垦地土壤养分含量均有所提高。其中,林地土壤TK和AK含量相较于草地增加显著,TN、AN、TP和AP含量增加不显著。与草地相比,林地经营模式可通过改变土壤结构、微生物生物量和小气候,增加植物残体和根际分解产物的数量和多样性的方式影响土壤养分循环,因而有更高的土壤养分^[33]。土壤速效氮主要以AN和NN这两种形态存在于土壤溶液中,其中AN易被土壤胶体吸附而NN易随水流失^[34],因而造林后复垦地土壤AN含量增加而NN含量降低,且AN与土壤DIC、DOC、NPOC和MBC间呈显著正相关性而NN与土壤DIC、DOC、MBC和HC间呈显著负相关性。土壤TK和AK与各形态碳库因子均有显著正相关性,所以土壤K对碳库因子的解释率最高。土壤AP只与DIC呈显著相关性,而TP与各

形态碳库因子均无显著相关性,所以土壤P对碳库因子的解释率最低。本研究中变差分析和相关性分析只考虑土壤养分因子对土壤碳库组成变化的影响,而未考虑其他环境因子,例如土壤微生物、植物地上地下部生物量、枯落物量等对土壤碳库组成变化的影响。其中,土壤微生物作为分解者,其群落组成及活性决定了土壤有机碳的分解速率^[35],土壤微生物多样性和数量与土壤碳库组分含量之间存在密切关系^[36],因而土壤微生物也是土壤有机碳的重要影响因子之一。在未来的研究中,应当更加关注土壤微生物群落和植被群落及生物量对土壤碳库组分变化的影响。

4 结论

造林能够明显改善和提高乌海露天煤矿复垦地土壤养分状态和碳库水平,这为进一步深入研究造林对于干旱荒漠区露天煤矿复垦地土壤质量和生态功能的影响提供了理论和实践基础。造林后复垦地土壤有机质含量从原来的Ⅲ级水平上升至Ⅱ级水平,且除NN含量外,造林后复垦地土壤不同形态碳含量和养分含量均有所增加。

参考文献:

- [1] Jitendra A, Subodh K M. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India[J]. *Catena*, 2016, 140: 155-163.
- [2] 黄元仿, 张世文, 张立平, 等. 露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 72-82.
- [3] 罗明. 土地复垦潜力调查评价研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [4] 舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 等. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 394-402.
- [5] 陈宗定, 许春雪, 安子怡, 等. 土壤碳赋存形态及分析方法研究进展[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(2): 233-244.
- [6] Xie J X, Li Y, Zhai C X, et al. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(5): 953-961.
- [7] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. *Geoderma*, 2014, 232-234: 81-87.
- [8] 高艺宁, 许丽, 林风友, 等. 矿区复垦地土壤有机碳分布及与土壤化学特性的关系[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(1): 54-60.
- [9] 蒋小董, 郑嗣蕊, 杨咪咪, 等. 毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2567-2574.

- [10] 李 华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [11] 白文霞. 安太堡露天矿复垦地典型植被-土壤系统生态效应研究[D]. 太原, 山西大学, 2018.
- [12] 刘春红. 2019年上半年煤炭市场供求情况分析以及下半年走势预测[J]. 商业经济研究, 2019, 21: 185-186.
- [13] Reynolds B, Reddy K J. Infiltration rates in reclaimed surface coal mines[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2012, 223: 5941-5958.
- [14] Shrestha R K, Lal R. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio[J]. *Plant Soil*, 2008, 306: 249-260.
- [15] 王旭东, 李 忠, 包伟民, 等. 乌海气候生产力对气候暖干化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 101-105.
- [16] 高瑞如, 赵瑞华. 干旱荒漠区植被恢复与重建的探讨[J]. 新疆环境保护, 2004, 26(1): 21-24.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 张 瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
- [19] Mclatchey G P, Reddy K R. Regulation of organic matter decomposition and nutrient release in a wetland soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(5): 1268-1274.
- [20] Deng S P, Tabatabai M A. Colorimetric determination of reducing sugars in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(4): 473-477.
- [21] Cambardella C A, Elliott E T. Participate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777-783.
- [22] 孔君洽, 杨 荣, 苏永中, 等. 基于土地利用/覆盖变化的荒漠绿洲碳储量动态评估[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7801-7812.
- [23] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 0-219.
- [24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [25] Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the below ground carbon cycle[J]. *Biology and Fertility*, 1997, 25(2): 196-201.
- [26] 王 宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 125-133.
- [27] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.
- [28] Shi H J, Wang X J, Zhao Y J, *et al.* Relationship between soil inorganic carbon and organic carbon in the wheat-maize cropland of the North China Plain[J]. *Plant & Soil*, 2017, 18(1-2): 1-14.
- [29] 尚 杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509-517.
- [30] Zougagh M, Rios A, Valcarcel M. Direct determination of total carbonate salts in soil samples by continuous - flow piezoelectric detection[J]. *Talanta*, 2005, 65(1): 29-35.
- [31] 王凯荣, 刘 鑫, 周卫军, 等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1041-1045.
- [32] 邹晓君, 薛 立. 林下经济经营模式对土壤理化性质和碳储量的影响研究进展[J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 79-87.
- [33] Araujo A S F, Leite L F C, Iwata B D F, *et al.* Microbiological process in agroforestry systems. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(1): 215-226.
- [34] 胡霁堂, 周立群. 植物营养学: 下册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [35] Rousk J, Frey S D. Revisiting the hypothesis that fungal-to-bacterial dominance characterizes turnover of soil organic matter and nutrients[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(3): 457-472.
- [36] Hu Y, Xiang D, Veresoglou S D, *et al.* Soil organic carbon and soil structure are driving microbial abundance and community composition across the arid and semi-arid grasslands in northern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77: 51-57.

Effects of Afforestation on Soil Nutrient and Carbon Sequestration in Reclaimed Area of Opencast Coal Mine, Wuhai, Inner Mongolia

YAN Jie, YU Xiao-juan, TANG Ming, DUAN Wen-yan, LI Xin, HAO Yi-ming, SHENG Min

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] To better understand the variation rule of soil carbon pool composition and soil nutrient before and after afforestation and the influence of soil nutrient to soil carbon pool composition in reclaimed mine. [Method] This study was conducted in grassland and forest land of *Populus alba* var. *pyramidalis* in reclaimed mine to explore the variation and relation of soil inorganic carbon pool, active organic carbon pool, chronic organic carbon pool, inert organic carbon pool and soil nutrient, and contribution of soil nutrient to soil carbon. [Result] The results showed that the contents of soil nutrients and soil carbon increased after afforestation in reclaimed mine. The content of soil total nitrogen, available nitrogen, total phosphorous, available phosphorous, total potassium and available potassium in forest land increased by 29.27%, 17.21%, 23.08%, 27.04%, 51.18% and 53.19% than in grassland, while the content of soil nitric nitrogen in forest land decreased by 71.84% than in grassland. The content of soil organic carbon, particle organic carbon, non-particle organic carbon, dissolved inorganic carbon, dissolved organic carbon, microbial biomass carbon and reducing sugar carbon in forest land increased by 50.35%, 62.46%, 22.56%, 113.53%, 230.23%, 274.63% and 72.54% than in grassland. There was a significant positive correlation between soil inorganic carbon pool and active organic carbon pool, but no significant correlation with chronic organic carbon pool and inert organic carbon pool. The soil nutrient factors accounted for 40.7% of contribution rate to soil carbon sequestration. The correlation analysis also showed that there was a significant positive correlation between soil total potassium, available potassium and carbon pool composition. [Conclusion] The comprehensive analysis shows that afforestation can improve the soil nutrient status and carbon sequestration significantly in reclaimed area of Wuhai opencast coal mine. This conclusion can be used as a reference for further study on the improvement of soil quality and the restoration of ecological function in reclaimed mine of arid desert areas.

Keywords: reclaimed mine; afforestation; soil nutrient; carbon pool composition

(责任编辑: 崔 贝)