

# 不同林地恢复模式下露天煤矿排土场土壤有机碳分布特征

文月荣<sup>1</sup> 党廷辉<sup>1,2\*</sup> 唐 骏<sup>2</sup> 李俊超<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 研究露天煤矿排土场 6 种不同林地植被恢复模式和撂荒地 0~100 cm 土层土壤有机碳(SOC)含量和储量的分布特征,分析其差异性及其影响因素.结果表明:不同林地 0~10 cm 土层 SOC 含量比撂荒地( $1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著提高 23.8%~53.2%,10~20 cm 土层比撂荒地( $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著提高 5.8%~70.4%,20 cm 土层以下与撂荒地相比差异不大;各土层 SOC 含量随土层深度增加而逐渐减小,表层(0~20 cm)减小幅度大于深层(20~100 cm).不同林地 SOC 储量在表层明显高于深层,随土层深度增加而逐渐减小.0~100 cm 土层林地 SOC 储量比撂荒地( $17.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )提高 18.1%~42.4%,其中,紫穗槐林地 SOC 储量最高,达  $24.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,明显高于其他林地类型,灌木林地 SOC 储量比乔木高 12.4%.林地凋落物、细根生物量和土壤水分都与排土场 SOC 呈显著正相关.综上所述,不同人工林地恢复模式显著提高了排土场 0~100 cm 土层 SOC,尤其对表层 SOC 提高效果明显,但排土场 SOC 与原地貌相比差距仍较大.从提高排土场 SOC 角度优先推荐紫穗槐为主要林地植被.

**关键词** 露天煤矿排土场; 林地恢复模式; SOC 含量; SOC 储量

**Distribution characteristics of soil organic carbon under different forest restoration modes on opencast coal mine dump.** WEN Yue-rong<sup>1</sup>, DANG Ting-hui<sup>1,2\*</sup>, TANG Jun<sup>2</sup>, LI Jun-chao<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** The content and storage of soil organic carbon (SOC) were compared in six wood restoration modes and adjacent abandoned land on opencast coal mine dump, and the mechanisms behind the differences and their influencing factors were analyzed. Results showed that the contents of SOC in six wood lands were significantly higher (23.8%–53.2%) than that of abandoned land ( $1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) at 0–10 cm soil depth, the index were significantly higher (5.8%–70.4%) at 10–20 cm soil depth than the abandoned land ( $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and then the difference of the contents of SOC in the deep soil (20–100 cm) were not significant. The contents of SOC decreased with increase of soil depth, but the decreasing magnitude of the topsoil (0–20 cm) was higher than that of the deep soil (20–100 cm). Compared with the deep soil, the topsoil significant higher storage of SOC in different woods, the SOC storage decreased with the soil depth. Along the 0–100 cm soil layer, the storage of SOC in six wood lands higher (18.1%–42.4%) than that of the abandoned land ( $17.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The SOC storage of *Amorpha fruticosa* land ( $24.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was obviously higher than that in the other wood lands. The SOC storage in the shrub lands was 12.4% higher than that of the arbor woods. There were significantly positive correlations among forest litter, fine root biomass, soil water content and SOC on the dump. Consequently, different plantation restorations significantly improved the SOC level on the dump in 0–100 cm soil, especially the topsoil. But there was still a big gap about SOC level between the wood restoration lands and the original land-form. To improve the SOC on opencast coal mine dump, *A. fruticosa* could be selected as the main wood vegetation.

**Key words:** opencast coal mine dump; forest restoration mode; SOC content; SOC storage.

本文由中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)资助 This work was supported by the Chinese Academy of Sciences Action-Plan for West Development (KZCX2-XB3-13).

2015-06-05 Received, 2015-11-20 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

黑岱沟露天煤矿位于内蒙古黄土高原丘陵区,该地区是我国重要的能源基地,而露天煤矿的开采使该地区本身就脆弱的生态环境进一步恶化,从而加大了生态恢复的难度.人工林在黄土高原水土保持和生态环境建设中占据重要地位<sup>[1]</sup>,作为主要植被恢复措施被广泛采用.土壤有机碳(SOC)是土壤质量评价的重要指标<sup>[2]</sup>,对土壤肥力和退化生态系统的恢复有很好的表征作用<sup>[3]</sup>,在土壤生产力提高和土壤退化有关的一系列土壤活动过程中起着缓解和调节作用<sup>[4]</sup>,而且在影响生物群落稳定性方面发挥着重要作用<sup>[5]</sup>.露天煤矿开采形成大量排土场,使土层扰乱、植被破坏、土壤性质与周围自然土壤有很大差异,主要表现为土壤的层次紊乱、容重变大、干燥缺水、养分贫瘠<sup>[6-7]</sup>,造成当地生态环境恶化.目前,恢复排土场生态效应和土壤质量成为治理排土场研究的重点,而人工重建植被是快速恢复复垦地生态功能、防止生态环境进一步恶化的重要途径<sup>[8]</sup>.谷金锋等<sup>[9]</sup>对矿区废弃地及排土场的研究表明,植被重建较大程度提高了SOC含量,达152.5%.黄土高原地区的研究表明,大面积退耕还林过程中土壤有机碳库对于区域碳平衡有重要影响,植被恢复下土壤表现为碳汇,而目前对于矿区重构土壤林地有机碳储量和含量变化特征研究较少.因此,研究排土场人工林地土壤有机碳含量和储量对于评价排土场植被恢复下土壤质量变化和土壤生态功能有重要意义.

土壤有机碳分布特征及其影响因素在天然林和退耕还林的立地条件下已进行了大量研究<sup>[10-12]</sup>,但关于排土场重构土壤在人工重建林地长期恢复下SOC变化特征和影响因素的研究较少.因此,本研究以经过15年恢复的排土场不同林地类型为对象,研究0~100 cm土层SOC分布特征,探讨排土场不同人工林模式对土壤有机碳的影响及造成差异的主要影响因素,并以原地貌林地和新建排土场为对照,评价不同林地类型对排土场SOC的提高效果,为排土场土地复垦与生态恢复提供技术支持和科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黑岱沟露天煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗东部的黄河西岸鄂尔多斯台地(39°43'—39°49' N, 111° 13'—111° 20' E),面积52.11 km<sup>2</sup>,是黄土高原砒沙岩的主要分布区,也是我国生态退化与生态修复的重点、难点地区.该地区

气候属于中温带半干旱大陆性气候,年均温6.2~7.2℃,年温差约为70℃,年降水量400 mm,降水主要集中在7—9月,多以暴雨形式出现,年蒸发量1825~2896 mm.地貌为典型的黄土丘陵沟壑区,海拔为1025~1302 m.黄绵土分布广泛,植被属暖温型草原带,因受强烈侵蚀的影响,矿区内地带性土壤不明显.

黑岱沟露天煤矿东排土场于1996年建成,排土场平台上的土壤均为复填土,因车辆碾压,土壤紧实.排土场面积为2.75 km<sup>2</sup>,自1997年开始实施大规模的植被重建,有多种植被恢复模式,每种植被模式均成块种植,林地植被盖度较高,面积大.新建排土场建成不足半年时间,未进行任何植被重建,地表裸露,地形平坦.原地貌区的林地选取附近黄土丘陵区的梁峁地带(相对平坦区)的人工林地,主要为柠条、沙棘及二者的混交林,呈带状分布,长势良好,面积较大,生态系统基本稳定.

1.2 试验设计

于2012年11月进行林地凋落物、根系和土壤的采集.在东排土场,选择香花槐、油松、新疆杨、紫穗槐、油松、柠条6种主要的人工重建林地,以自然恢复的撂荒地为对比,以新建排土场、原地貌林地为对照,分析排土场不同林地类型SOC的剖面分布特征和差异.样地基本信息见表1.

表 1 研究样地基本情况  
Table 1 Basic status of the study sites

林地类型 Forest type	恢复年限 Restoration years	林地生长状况 Condition of forest growth
香花槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	15	株高1.5~2.5 m,株距1 m,行距1 m,出现部分植株枯死现象,地表凋落物较多.
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	15	株高1~1.8 m,株距1 m,行距1.5 m,生长相对缓慢,林下草本植物较少.
新疆杨 <i>Populus alba</i>	15	株高4~7 m,株距2 m,行距3 m,林下草本植物较少.
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	15	株高1.2~1.8 m,株距1 m,行距2 m,长势较好,林下针茅类草本较多.
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	15	株高1~2.5 m,株距2 m,行距不明显,密度大,盖度高,林下草本植物较多.
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	15	株高1.5 m,植被稀疏,地表基本无杂草.
撂荒地 Abandoned land	15	自然恢复条件,基本无植被覆盖,只是零星分布赖草、狗尾草等.
新建排土场 New dump	-	建成不足两年,没有种植植被.
原地貌林地 Natural wood in original landform	-	生态系统基本稳定,柠条、沙棘及二者的混交林,长势较好,呈带状分布,面积较大.

1.3 采样方法

每种林地类型随机选取 3 块样地,每块设置一个 20 m×20 m 样方,每块样方按“S”形取 5 个点,用直径为 3 cm 的土钻采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层土壤样品,充分混匀同一土层土壤样品,共 126 个;在新建排土场选取 3 个 50 m×50 m 样方,原地貌林地选取 3 个 10 m×10 m 样方,采集剖面样品,共 36 个土壤样品.将所有采集的土壤样品带回实验室测定土壤水分含量.

在排土场林地每块样地、新建排土场、原地貌林地各挖 1 个土壤剖面,用容积 100 cm<sup>3</sup>环刀采集 6 个土层(同上)原状土,用于土壤容重的测定.用内径为 9 cm 根钻采集排土场每块样地土壤剖面 6 个土层根系样品,共 108 个样品.在不同林地类型下按“S”型设置 5 个 2 m×2 m 样方,采集地表凋落物,共 30 个样品.

1.4 测定项目与方法

采用烘干法测定土壤含水量,并根据土壤含水量和环刀体积计算土壤容重.土壤样品混匀后在室内自然风干,去除土壤中的植物残体及杂质后,研磨使其全部过 0.25 mm 土壤筛,用于测定 SOC 含量. SOC 含量测定采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>外加热法<sup>[13]</sup>.凋落物在 60 ℃烘 24 h,称量并估算单位面积上调落物总量;粉碎过筛后,凋落物含碳量采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>外加热法测定.从根系样品中挑出直径 Φ≤2 mm 的细根,将细根用小纸袋装好置于 70~80 ℃鼓风干燥箱中,烘干至恒量,并称量记录.

1.5 数据处理

土壤有机碳储量的计算公式:

$$S_j = 10 \times \sum_{i=1}^j (C_i \times \rho_i \times d_i / 100) \quad (1)$$

式中: $S_j$ 为某土层 SOC 储量( $t \cdot hm^{-2}$ ); $C_i$ 为 SOC 含量( $g \cdot kg^{-1}$ ); $\rho_i$ 为土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ); $d_i$ 为土层深度(cm).

细根密度的计算公式:

$$R_i = R_m / (S \times d_i) \quad (2)$$

细根生物量的计算公式:

$$R_j = 100 \times \sum_{i=1}^j (R_i \times d_i) \quad (3)$$

式中: $R_i$ 为细根密度( $g \cdot cm^{-3}$ ); $R_j$ 为某土层细根生物量( $t \cdot hm^{-2}$ ); $R_m$ 为每一土层细根质量(g); $S$ 为根钻的截面积( $cm^2$ ); $d_i$ 为土层深度(cm).

利用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析,采用 SPSS 18.0 软件对 SOC 的影响因素进行相关性分

析,利用单因素 LSD 法进行差异显著性检验( $\alpha = 0.05$ ),采用 SigmaPlot 10.0 软件作图.表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 不同林地类型对排土场土壤剖面 SOC 含量的影响

由图 1 可以看出,与撂荒地相比,排土场 6 种林地恢复模式下 0~100 cm 土层 SOC 含量均有一定程度的提高.0~10 cm 土层,6 种林地类型 SOC 含量相对于撂荒地均显著提高,依次为:香花槐( $2.93 g \cdot kg^{-1}$ )>油松( $2.84 g \cdot kg^{-1}$ )>紫穗槐( $2.67 g \cdot kg^{-1}$ )>沙棘( $2.47 g \cdot kg^{-1}$ )>柠条( $2.39 g \cdot kg^{-1}$ )>新疆杨( $2.37 g \cdot kg^{-1}$ ),分别比撂荒地( $1.92 g \cdot kg^{-1}$ )提高 53.2%、48.1%、39.6%、29.3%、24.8%、23.8%;10~20 cm 土层,6 种林地类型 SOC 含量大小为:油松>紫穗槐>柠条>沙棘>新疆杨>香花槐,相对于撂荒地( $1.39 g \cdot kg^{-1}$ )提高 5.8%~70.4%.不同林地各土层 SOC 含量基本呈现出 0~10 cm 土层最高,10~20 cm 土层次之,随土层深度增加依次降低的趋势;不同林地 20~100 cm 土层之间 SOC 含量差异很小,比撂荒地有一定提高,但差异不显著,表明林地对排土场表层 SOC 含量有明显的提高作用,对深层 SOC 含量提高作用不显著.6 种林地各土层 SOC 含量总体上呈现出 0~40 cm 土层 SOC 含量递减幅度大,40~100 cm 土层递减幅度较小的趋势.

由图 2 可以看出,0~100 cm 土层各层 SOC 含量均表现为原地貌林地>排土场林地>新建排土场,

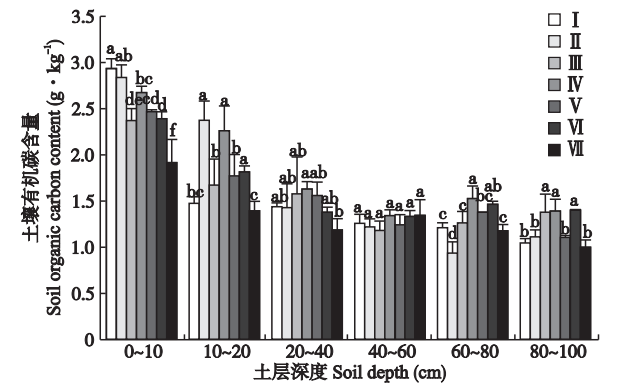


图 1 不同林地类型土壤有机碳含量的垂直分布  
Fig.1 Vertical distribution of soil organic carbon content in different woods.

不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different small letters meant significant difference at the 0.05 level. 下同 The same below. I: 香花槐 *Robinia pseudoacacia*; II: 油松 *Pinus tabulaeformis*; III: 新疆杨 *Populus alba*; IV: 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*; V: 沙棘 *Hippophae rhamnoides*; VI: 柠条 *Caragana korshinskii*; VII: 撂荒地 Abandoned land.



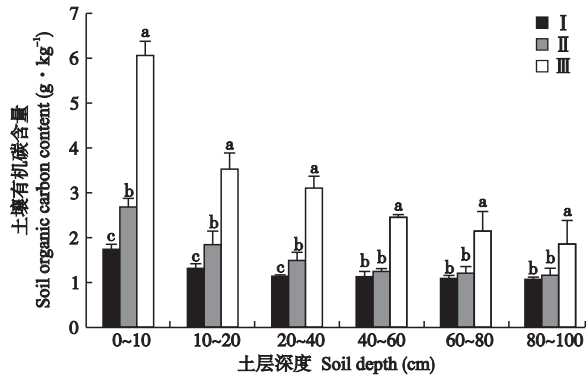


图2 排土场林地、原地貌林地和新建排土场土壤有机碳含量的垂直变化

**Fig.2** Vertical changes of soil organic carbon content in dump wood land, natural wood in original landform and new dump.

I: 新建排土场 New dump; II: 排土场林地 Dump wood land; III: 原地貌林地 Natural wood in original landform. 下同 The same below.

表明排土场林地对提高排土场 SOC 含量有一定效果,但排土场林地距原地貌林地仍然有很大的差距.三者的 SOC 含量均随土层深度的增加而减少,但分布规律明显不同.原地貌林地 SOC 含量随土层深度呈阶梯状降低,但整体含量较高,新建排土场 SOC 含量不同土层间差异不明显.排土场林地相邻土层从上到下依次降低 45.5%、23.6%、19.7%、2.4%、14.8%,表明 SOC 含量随着土层深度的增加各土层差距逐渐缩小,这与人工林主要影响表层 SOC 含量的结果一致<sup>[14]</sup>.在 0~40 cm 土层,排土场林地各土层 SOC 含量均显著高于新建排土场,但两者在 40~100 cm 各土层之间差异不显著,表明排土场林地显著提高了排土场 0~40 cm 土层 SOC 含量,但对土壤深层影响较小.

2.2 不同林地类型对排土场土壤剖面 SOC 储量的影响

与撂荒地相比,由表 2 可以看出,排土场林地不同土层 SOC 储量都有明显的提高.在 0~10 cm 土

层,6 种林地 SOC 储量大小为:香花槐>油松>紫穗槐>沙棘>柠条>油松,分别是撂荒地的 1.4、1.4、1.3、1.2、1.2、1.1 倍.排土场不同林地表层(0~20 cm) SOC 储量占各自总储量的 25.8%~34.3%.油松表层 SOC 储量最大,为 7.22 t·hm<sup>-2</sup>,占总储量的 27.9%;紫穗槐次之,为 6.96 t·hm<sup>-2</sup>,占总储量的 34.3%;新疆杨最小.油松、紫穗槐、新疆杨分别比撂荒地提高 55.2%、49.3%、20.1%.不同林地各土层 SOC 储量随着土层深度的增加均呈逐渐降低的趋势,表明不同林地都对表层 SOC 储量提高的效果最好.在 0~100 cm 土层,SOC 储量大小为紫穗槐>柠条>沙棘>油松>新疆杨>香花槐>撂荒地,且不同林地 SOC 总储量都显著高于撂荒地,紫穗槐林地的 SOC 储量最大,为 24.95 t·hm<sup>-2</sup>,是撂荒地的 1.4 倍;香花槐林地最小,为 20.69 t·hm<sup>-2</sup>,是撂荒地的 1.2 倍.表明不同林地均显著提高了排土场 0~100 cm 土层 SOC 储量,但林地类型不同提高效果不同,紫穗槐林地的提高效果最好.乔木(香花槐、油松、新疆杨)和灌木(紫穗槐、柠条、沙棘)林地的 SOC 储量之间存在一定差异,在 0~100 cm 土层,灌木林的平均 SOC 储量比乔木林高 12.4%,且 3 种灌木林 SOC 储量均高于乔木林.这表明灌木林对排土场 SOC 储量的提高效果明显优于乔木林,适宜多种植灌木,尤其是紫穗槐,有助于排土场 SOC 的积累.

由图 3 可以看出,排土场林地 SOC 总储量是新建排土场的 1.5 倍,为原地貌林地的 55.6%.各土层 SOC 储量均为原地貌林地>排土场林地>新建排土场,且差异显著.原地貌林地各土层 SOC 储量与其 SOC 含量的变化规律一致,即随土层深度的增大呈阶梯状降低趋势;新建排土场各土层之间 SOC 储量差距不大.表明排土场林地 0~100 cm 土层 SOC 储量随土层深度的增加呈下降趋势,这与李裕元等<sup>[15]</sup>的研究结果一致.在 0~20 cm 土层,排土场林地 SOC

表 2 不同林地类型土壤有机碳储量

**Table 2** Soil organic carbon storage in different woods (t·hm<sup>-2</sup>)

土层 Soil layer (cm)	香花槐 <i>Robinia pseudacacia</i>	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	新疆杨 <i>Populus alba</i>	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	撂荒地 Abandoned land
0~10	3.95±0.14a	3.80±0.18a	3.19±0.17c	3.65±0.09ab	3.37±0.03bc	3.27±0.10c	2.80±0.33d
10~20	2.13±0.10cd	3.42±0.30a	2.41±0.41bc	3.31±0.39a	2.59±0.34bc	2.66±0.10b	1.87±0.15d
20~40	4.40±0.13ab	4.37±0.79ab	4.31±0.69ab	4.80±0.24a	4.42±0.30ab	4.06±0.16ab	3.62±0.36b
40~60	3.72±0.29ab	3.60±0.25b	3.49±0.30b	4.19±0.20a	3.88±0.34ab	4.16±0.20a	3.44±0.49b
60~80	3.51±0.15ef	2.71±0.35f	3.66±0.35cd	4.70±0.42a	4.05±0.19bc	4.51±0.10ab	3.09±0.18ef
80~100	2.99±0.12bc	3.16±0.21bc	3.92±0.56a	4.30±0.39a	3.42±0.07b	4.34±0.02a	2.71±0.20c
0~100	20.69±0.86c	21.08±1.71bc	20.97±1.61bc	24.95±1.41a	21.74±0.44ab	22.99±0.19ab	17.52±0.97d

同行不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level.

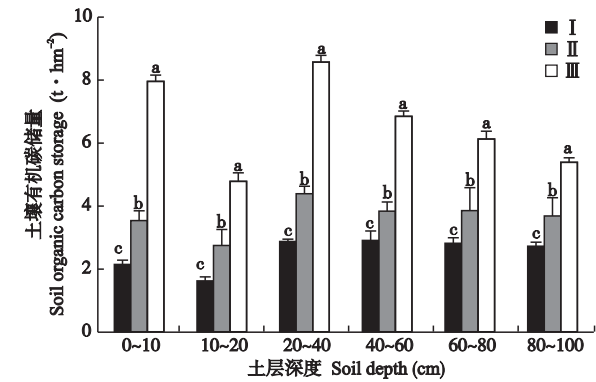


图3 排土场林地、原地貌林地和新建排土场土壤有机碳储量的垂直变化  
Fig.3 Vertical changes of soil organic carbon storage in dump wood land, natural wood in original landform and new dump.

储量是新建排土场的 1.7 倍,但仅为原地貌林地的 49.4%;20~40 cm 土层排土场林地 SOC 储量是新建排土场的 1.5 倍,为原地貌林地的 51.3%;40~100 cm 土层,排土场林地 SOC 储量是新建排土场的 1.3 倍,为原地貌林地的 62.0%;40~100 cm 各土层 SOC 储量之间的下降幅度明显小于 0~40 cm 土层.综上,林地能显著提高排土场 SOC 储量,对土壤表层的提高效果明显高于深层.虽然排土场林地与原地貌林地 SOC 储量仍存在较大差距,但是薛婕等<sup>[14]</sup>认为,在林木生长后期土壤有机碳仍有显著提高,因此经过后期长时间的林木恢复,排土场 SOC 储量将会有巨大的提升空间.董云忠等<sup>[4]</sup>研究发现,撂荒地在一定程度上也有恢复地力的能力.本研究中,撂荒地各土层 SOC 储量较新建排土场都有一定的提高,总 SOC 储量提高了 17.7%.

2.3 排土场不同林地 SOC 差异的影响因素

2.3.1 排土场林地凋落物与 SOC 储量的关系 由图 4 可以看出,排土场林地 SOC 储量与凋落物干物质质量、凋落物含碳量呈显著正相关,SOC 储量随着凋落物干物质质量和凋落物含碳量的增加而逐渐增加,表明凋落物干物质质量越大,含碳量越高,对提高排土场 SOC 储量的效果越明显.

2.3.2 排土场林地细根生物量与 SOC 含量的关系 由图 5 可以看出,林地 SOC 含量随着细根生物量的增加而显著增加.乔木林 SOC 含量( $y_1$ )与细根生物量( $x_1$ )的关系符合线性方程  $y_1 = 4.0552x_1 + 0.8913$ ;灌木林地 SOC 含量( $y_2$ )与细根生物量( $x_2$ )符合线性方程  $y_2 = 1.5253x_2 + 1.3458$ .乔木 SOC 含量与细根生物量的线性方程斜率是灌木林的 2.7 倍,表明乔木林 SOC 含量随着细根生物量的增幅高于灌木林.

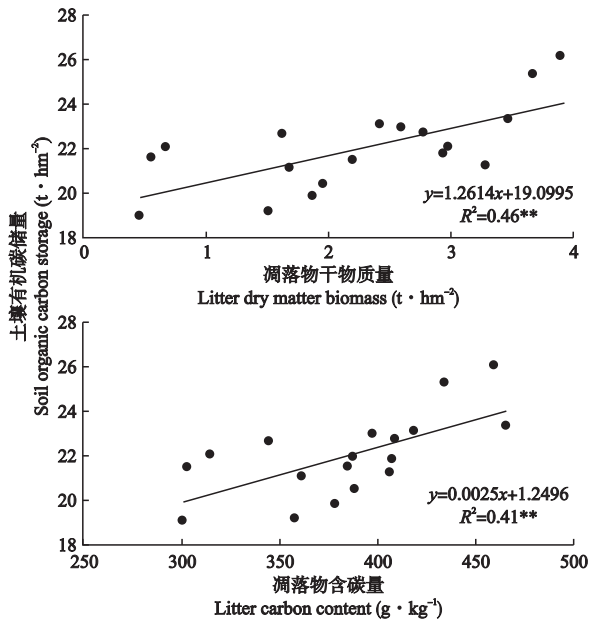


图4 林地凋落物干物质和含碳量对 SOC 储量的影响  
Fig.4 Effects of opencast wood litter dry matter biomass and litter carbon content on soil organic carbon storage.

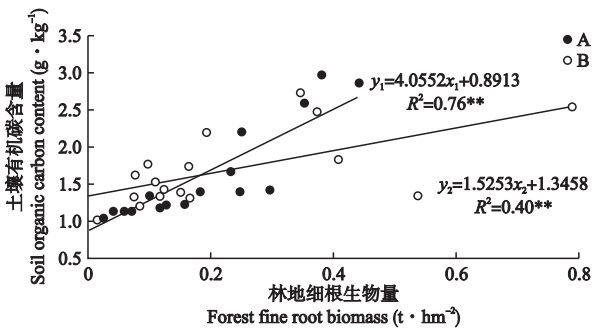


图5 不同林地类型细根生物量对 SOC 含量的影响  
Fig.5 Effects of fine root biomass on soil organic carbon content in different woods.  
A: 乔木 Arbor; B: 灌木 Shrub.

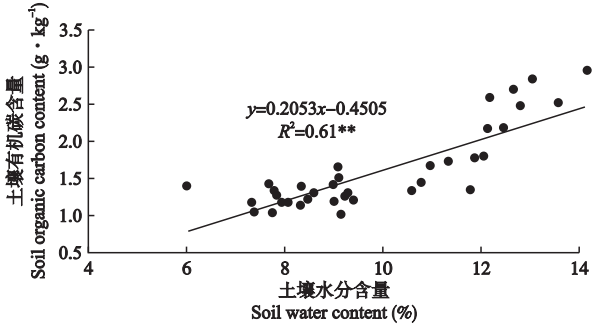


图6 排土场林地土壤水分含量对 SOC 含量的影响  
Fig.6 Effects of soil water content on soil organic carbon content in opencast woods.

2.3.3 林地水分含量与排土场 SOC 含量的关系 由图 6 可以看出,0~100 cm 土层排土场 SOC 含量与

土壤含水量呈显著正相关,表明随着土壤水分的增加 SOC 含量逐渐增加,因此增加土壤水分含量有助于排土场 SOC 含量的提高。

### 3 讨 论

人工林地植被能改变土壤内部养分流动状况,从而引起土壤碳、氮数量和质量的变化<sup>[16]</sup>。有研究表明,植被恢复能显著改善土壤质量,但不同植被类型对 SOC 的提高作用不同<sup>[17-18]</sup>。本研究中,不同林地恢复模式对排土场 SOC 均有一定的提高效果,不同类型人工林地 SOC 含量及分布存在显著差异,这可能是由于不同植被类型生长状态不同,对土壤环境的影响不同,进而影响了 SOC 含量及分布<sup>[19]</sup>。阔叶林 SOC 含量高于针叶林<sup>[20]</sup>,原因是阔叶林可提供大量凋落物,经微生物分解能提高 SOC 含量,油松为针叶林,提供的凋落物相对较少,且其凋落物中含不易降解的单宁、树脂等物质,降解速率慢<sup>[21]</sup>,所以油松林 SOC 含量较低。另外,黄土高原丘陵区水土流失严重,年降雨量少,年蒸发量大,新疆杨的生长受到抑制,植株比较矮小,大部分香花槐更是出现了干枯死亡的现象,因此多年来新疆杨和香花槐等乔木林下调落物少,根系生长受到抑制,导致其 SOC 储量较低。沙棘属非豆科固 N 植物,需 P 量较少,因此沙棘能很好适应缺 N 缺 P 的土壤,并为乔木生长提供水肥条件<sup>[22]</sup>。柠条能够长期适应干旱的环境条件,具有广泛的适应性和很强的抗逆性,而紫穗槐具有较强生命力,是耐旱、耐寒、耐涝等抗逆性极强的豆科植物,两者根系发达具有根瘤菌,能改善土壤结构和土壤理化性质,增加 SOC 含量<sup>[23]</sup>。此外,沙棘和柠条等灌木能够很好地利用土壤水分,对养分需求比乔木小<sup>[22]</sup>。因此,在排土场灌木生长状况明显优于乔木。本研究发现,灌木林地对排土场 SOC 储量的提高效果明显优于乔木,这与巩杰等<sup>[24]</sup>和王彦武等<sup>[25]</sup>的研究一致,他们研究发现,灌木林地土壤肥力状况优于针叶林地和山杏林地,同龄灌木林地土壤有机质高于樟子松林。这可能是由于排土场灌木林地植被种类多,表层凋落物多,根系分布广,细根生物量多,造成整个土壤剖面 SOC 含量均有一定提高<sup>[26]</sup>。

植被凋落物和植物根系的分解与 SOC 密切相关<sup>[27]</sup>。凋落物是排土场 SOC 输入的主要途径<sup>[28]</sup>,大量有机物质随着凋落物的分解进入土壤,增加了 SOC 含量。由于凋落物结构疏松,可储存和保持大量的天然降水,具有重要的作用<sup>[29]</sup>。本研究

表明,凋落物干物质量越大、含碳量越高对排土场 SOC 储量提高的效果越显著,这与 Crow 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。植被凋落物在地表的集聚作用以及根系密集分布在表层土壤中<sup>[31]</sup>,对排土场表层 SOC 含量影响较大,导致 SOC 含量随着土层的增加逐渐减小,在土层中的分布具有很强的表聚性,这与 Arrouays 等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。本研究中,细根生物量对排土场 SOC 含量有显著提高效果,这是由于根系生物量大部分累积在粗根中( $\Phi > 2 \text{ mm}$ ),但每年用于生长的大部分则被分配到细根中<sup>[33]</sup>。由于细根具有菌根侵染形成的巨大吸收表面,很高的周转率,生理活性强,从而成为树木根系中吸收水分和养分的主要部分<sup>[34]</sup>。细根生物量对 SOC 的积累具有重要影响<sup>[35-36]</sup>,主导着深层 SOC 的循环和分布。土壤水分状况是不同立地条件下根系尤其是细根分布差异的主要原因之一<sup>[34]</sup>,是制约黄土高原植被恢复关键的自然因素<sup>[37]</sup>。植物对水分的需求几乎完全依赖于土壤水分,而土壤水分的补充则完全依赖于降水<sup>[38]</sup>。本研究表明,土壤水分是影响排土场林地 SOC 含量的重要因素,改善排土场土壤水分条件有助于提高 SOC 含量,这与焦菊英等<sup>[38]</sup>的研究结果相似。程积民等<sup>[29]</sup>研究表明,地上植被和根系生物量随着土壤含水量的增加而增多,而凋落物和根系分解速率也随着土壤含水量的增加而加快。该排土场位于黄土丘陵沟壑区,年均降雨量仅为 379~420 mm,而蒸发量达 1824~2896 mm,年均降水的最大入渗深度为 100~150 cm。因此,土壤水分状况严重制约了排土场人工林的持续良好生长及生态功能的发挥,适时适量地进行蓄水保墒有助于排土场 SOC 的积累。

### 4 结 论

不同林地类型对排土场 SOC 含量和储量均有一定的提高效果,且都对表层土壤的提高效果明显优于深层。与乔木相比,灌木对排土场 SOC 储量的提高效果较好;各林地类型中以紫穗槐林对 SOC 的积累效果最好。排土场 SOC 含量和储量均比新建排土场有显著的提高,但距原地貌林地仍有很大差距,表明排土场 SOC 有巨大的提升空间,植被恢复是改善 SOC 的重要措施。林地类型不同对排土场 SOC 提高效果不同,植被凋落物、土壤水分和细根生物量都与排土场林地 SOC 呈显著正相关,均是影响排土场 SOC 积累的重要因素。



## 参考文献

- [1] Jin J-W (金晶炜), Su J-S (苏纪帅), Bai Y (白于). Response of soil quality to artificial vegetation restoration patterns in hilly area of Southern Ningxia. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(16): 283–289 (in Chinese)
- [2] Liu Z-F (刘占锋), Fu B-J (傅伯杰), Liu G-H (刘国华), et al. Soil quality: Concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(3): 901–913 (in Chinese)
- [3] Zhou G-M (周国模), Jiang P-K (姜培坤). Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(6): 68–70 (in Chinese)
- [4] Dong Y-Z (董云中), Wang Y-L (王永亮), Zhang J-J (张建杰), et al. Soil carbon and nitrogen storage of different land use types in Northwestern Shanxi Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(4): 955–960 (in Chinese)
- [5] Guo X-Y (郭逍宇), Zhang J-T (张金屯), Gong H-L (宫辉力), et al. Interspecific associations of restored vegetation and related soil factors in Antaibao Mine. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2007, **15**(1): 46–52 (in Chinese)
- [6] Bai Z-K (白中科), Wang W-Y (王文英), Li J-C (李晋川), et al. Ecological rehabilitation of drastically disturbed land at large opencut coal mine in loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(6): 63–68 (in Chinese)
- [7] Ma C-A (马从安), Cai Q-X (才庆祥), Wang Q-R (王启瑞), et al. Analysis and assessment on quality and fertility of soil at surface mine dumping site. *Coal Engineering* (煤炭工程), 2008(5): 77–79 (in Chinese)
- [8] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅). Study on the ameliorate benefits of *Caragana korshinskii* shrub wood to soil properties in loess hilly area. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(1): 70–74 (in Chinese)
- [9] Gu J-F (谷金锋), Cai T-J (蔡体久), Yang Y (杨业). Research on vegetation restoration of abandoned mine land in alpine areas. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2014, **28**(3): 29–36 (in Chinese)
- [10] Han X-H (韩新辉), Tong X-G (佟小刚), Yang G-H (杨改河), et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(12): 223–229 (in Chinese)
- [11] Shen J-P (申家朋), Zhang W-H (张文辉), Li Y-H (李彦华), et al. Characteristics of carbon storage and sequestration of *Pinus tabulaeformis* forest land converted in loss hilly area. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2013, **33**(11): 2309–2316 (in Chinese)
- [12] Bai X-S (白雪爽), Hu Y-L (胡亚林), Zeng D-H (曾德慧), et al. Effects of farmland afforestation on ecosystem carbon stock and its distribution pattern in semiarid region of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **27**(10): 1647–1652 (in Chinese)
- [13] Lu R-K (鲁如坤). Analytical Methods for Soil and Agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [14] Xue S (薛 蕊), Liu G-B (刘国彬), Dai Q-H (戴全厚), et al. Dynamic changes of soil microbial biomass in the restoration process of shrub plantations in loess hilly area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 517–523 (in Chinese)
- [15] Li Y-Y (李裕元), Shao M-A (邵明安), Zheng J-Y (郑纪勇), et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(6): 2279–2287 (in Chinese)
- [16] Sun W-Y (孙文义), Guo S-L (郭胜利). Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(10): 2611–2620 (in Chinese)
- [17] Guo L-L (郭凌俐), Wang J-M (王金满), Zhang M (张 萌), et al. Effects comparison of different reclamation modes in grassland opencast coalmine area. *Mine Mental* (金属矿产), 2014(6): 150–155 (in Chinese)
- [18] Zhang Z (张 召), Bai Z-K (白中科), He Z-W (贺振伟), et al. Dynamic changes of land use type and carbon sinks based on RS and GIS in Pingshuo opencast coal mine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(3): 230–236 (in Chinese)
- [19] Cao W-P (曹伟鹏), Wu F-Q (吴发启), Lei J-Y (雷金银), et al. Characters of different tillage treatments on soil enzymes and microflora in the Southern Muus Desert. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, **29**(1): 88–95 (in Chinese)
- [20] Liu J (刘 举), Chang Q-R (常庆瑞), Zhang J-H (张俊华), et al. Effect of vegetation on soil fertility in different woodlands on Loess Plateau. *Journal of Northwest A&F University* (Nature Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2004, **32**(11): 111–115 (in Chinese)
- [21] Cheng G-L (程国玲), Tang L-J (唐立君), Lang F-S (郎福生). The characteristics and variations of N and P contents of rhizosphere soil in pure ash or larch forests and mixed forests. *Journal Northeast Forest University* (东北林业大学学报), 2001, **29**(1): 26–29 (in Chinese)
- [22] Sun T-S (孙泰森), Bai Z-K (白中科). The approach to the model of recultivation of open colliery's soil-stacking site in the area of middle reaches of Yellow River. *Journal Shanxi Agriculture University* (山西农业大学学报), 2000, **20**(4): 383–385 (in Chinese)

- [23] Zou L-N (邹丽娜), Zhou Z-Y (周志宇), Yan S-Y (颜淑云), *et al.* Effect of salt stress on physiological and biochemical characteristics of *Amorpha fruticosa* seedlings. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2011, **20**(3): 84–90 (in Chinese)
- [24] Gong J (巩杰), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **12**(15): 2292–2296 (in Chinese)
- [25] Wang Y-W (王彦武), Liao C-Y (廖超英), Sun C-Z (孙长忠), *et al.* Soil chemical properties of sand-fixing forests in Maowusu sandland. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(4): 776–780 (in Chinese)
- [26] Liu M-Y (刘梦云), An S-S (安韶山), Chang Q-R (常庆瑞). Features of soil organic carbon under different land use in mountain area of southern Ningxia. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, **12**(3): 47–49 (in Chinese)
- [27] Yang W-Q (杨万勤), Deng R-J (邓仁菊), Zhang J (张健). Forest litter decomposition and its responses to global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2889–2895 (in Chinese)
- [28] Fan J (樊军), Shao M-A (邵明安), Wang Q-J (王全九). Soil water restoration of alfalfa land in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **14**(3): 261–264 (in Chinese)
- [29] Cheng J-M (程积民), Wang H-E (万惠娥), Hu X-M (胡相明), *et al.* Accumulation and decomposition of litter in the semiarid enclosed grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(4): 1207–1212 (in Chinese)
- [30] Crow SE, Lajtha K, Bowden RD, *et al.* Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**: 2224–2232
- [31] Potthast K, Hamer U, Makeschin F. Impact of litter quality on mineralization processes in managed and abandoned pasture soils in Southern Ecuador. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 56–64
- [32] Arrouays D, Pelissier P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 1994, **157**: 185–192
- [33] Yang L-Y (杨丽韞), Li W-H (李文华). The underground root biomass and C storage in different forest ecosystems of Changbai Mountains in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2003, **18**(2): 204–209 (in Chinese)
- [34] Shan C-J (单长卷), Liang Z-S (梁宗锁). Relationship between root distraction of locust plantation and soil water in the Loess Plateau. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2006, **26**(1): 19–24 (in Chinese)
- [35] Upson MA, Burgess PJ. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agro-forestry system. *Plant and Soil*, 2013, **373**: 43–58
- [36] Zhang KR, Cheng XL, Dang HS, *et al.* Linking litter production, quality and decomposition to vegetation succession following agricultural abandonment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **8**: 1–11
- [37] Wang T-Z (王同智), Xue Y (薛焱), Bao Y-Y (包玉英), *et al.* Soil organic carbon content of the spoiled bank under different reclamation modes, Heidaigou open pit, Inner Mongolia. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2014, **14**(2): 174–178 (in Chinese)
- [38] Jiao J-Y (焦菊英), Jiao F (焦峰), Wen Z-M (温仲明). Soil water and nutrients of vegetation communities under different restoration types on the hilly-gullied Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(5): 667–674 (in Chinese)

作者简介 文月荣,女,1988年生,硕士研究生.主要从事土壤环境化学研究. E-mail: wenyuerong0815@163.com

责任编辑 孙菊