

DOI: 10. 11766/trxb201402200074

植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化*

李俊超¹ 党廷辉^{1,2†} 薛江¹ 唐骏² 郭胜利^{1,2} 靳静静³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要 植被重建是治理排土场边坡水土流失最直接也是最有效的生物措施, 研究不同植被重建模式下土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量的空间分布规律是筛选适宜排土场边坡生长的植被模式的重要条件。选取内蒙古黑岱沟露天煤矿治理 15 年的排土场边坡中 4 种植被重建模式(自然恢复地、草地、灌木林、乔木林), 采集 270 个土壤剖面(0~100 cm)样品, 研究不同重建模式下 SOC 储量的变化。结果表明: (1) 植被重建模式显著影响剖面 SOC、TN 含量及分布($p < 0.05$)。0~10 cm 和 10~20 cm SOC、TN 均呈草地 > 灌木 > 乔木 > 自然恢复地。20 cm 以下各土层 SOC、TN 虽然也表现相似的特征, 但差异随土层深度增加越来越小。(2) 剖面 SOC 密度和储量表现为原地貌区 > 治理排土场 > 新建排土场。经 15 年植被重建后, 排土场边坡表现出巨大的固碳能力, 1 m 深度的林地和草地碳储量分别增加了 5.38、11.85 t hm⁻², 但仅原地貌水平的 1/2 和 3/5。(3) 林地和草地的固碳速率分别为 35.87、79.01 g m⁻² a⁻¹, 草地的固碳速率是林地的 2.2 倍, 从土壤固碳及水土流失防治的角度考虑, 建议矿区排土场边坡植被重建优先选择草地, 其次灌木。

关键词 排土场边坡; 植被重建; 土壤有机碳储量; 固碳能力; 生物因素; 露天煤矿

中图分类号 S154.1; X171.4 文献标识码 A

露天煤矿的开发一方面促进地方经济的快速发展, 另一方面也带来严重环境污染及生态破坏^[1-2], 尤其是在土地资源匮乏的黄土丘陵区, 突出表现为土地的大量破坏和排土场的大面积形成^[3]。排土场是在露天煤矿开采过程中形成的特殊巨型地貌, 由大量剥离物人工堆垫形成, 土壤结构差、地表径流紊乱, 致使边坡水土流失加剧。因此, 对排土场边坡进行植被措施治理和土壤质量改良对控制边坡水土流失有重要意义。

植被重建是排土场边坡治理和生态恢复的主要措施。排土场作为重构土体, 其土壤与自然立地条件下土壤存在显著差异, 主要表现为土壤层序紊乱、土壤结构性差、养分贫瘠, 这些特殊性严重阻碍植物生长, 进而影响地表凋落物的积累, 并影响微生物对凋落物和根系等土壤养分主要来源的分解与转化, 最终可能会减缓碳氮的形成^[4]。因此, 土壤有机碳(SOC)成为衡量矿区土壤修复质量好坏的

一个重要指标。目前自然条件下植被恢复与 SOC 变化的关系已有大量研究。一系列研究表明, 植被恢复可显著提高 SOC 含量^[5], 且在一定恢复年限内 SOC 含量与恢复年限成正比^[6-7]。目前, 排土场植被重建对 SOC 影响的研究还鲜有报道, 已有的植被重建的研究多集中在占排土场面积较大的平台上^[8-9], 而对具有维持排土场稳定性的边坡研究较少。因而, 迫切需要对排土场边坡 SOC 储量变化及影响因素进行研究, 以期筛选出适合排土场边坡治理的植被重建模式, 并对区域碳收支预测提供参考。

本研究以内蒙古准格尔旗黑岱沟露天煤矿治理排土场边坡为研究对象, 研究不同植被重建模式下土壤剖面 SOC、全氮(TN)分布及碳储量变化, 并与新建排土场、治理小流域以及原地貌类型区进行综合对比研究, 评价植被重建对碳储量的贡献, 从土壤碳氮角度为矿区土壤修复提出最适的植被重建模式, 对深入了解区域碳汇格局和变化具有重要意义。

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)资助

† 通讯作者, E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 李俊超(1988—), 男, 河南项城人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: lijunchao1212@126.com

收稿日期: 2014-02-20; 收到修改稿日期: 2014-05-07

1 材料与方法

1.1 试验区概况

黑岱沟露天煤矿(39°43′~39°49′N, 111°13′~111°20′E)位于内蒙古自治区准格尔旗东部,地处黄河西岸鄂尔多斯台地,面积达52.11 km²,属于晋、陕、蒙接壤黄土丘陵沟壑区。矿区年均气温7.2℃,年均降水量404.1 mm,海拔在1025~1302 m之间,地形呈东北高西南低,沟壑纵横交错,地形切割剧烈,冲沟溯源侵蚀发育。

研究试验地选择治理排土场边坡(1996年建成的东排土场,在矿区内已治理15年,面积2.75 km²)、新建排土场边坡、治理小流域坡地(开采区西20 km治理25年的五分地沟小流域)及未开垦的原地貌区坡地(开采区西6 km)4个采样区。土壤均为黄绵土,坡向、坡位基本一致,坡度10°~20°。治理排土场边坡以防止水土流失和土壤修复为主,自1997年开始实施大规模的植被重建,至2008年底重建面积达1.1 km²。以草灌为主,草地有沙打旺、苜蓿、草木樨、赖草及本氏针茅类等,灌木有沙棘、柠条、紫穗槐等,乔木有新疆杨、油松等。新建排土场建成不足半年,目前并未进行植被重建,地表裸露。五分地沟小流域位于准格尔旗境内皇甫川的一级支流——十里长川中段东岸,流域总面积7.7 km²。自1986年开始实施流域综合治理,植被覆盖率大大提高,人工植被和治理排土场类似。原地貌区坡地生态系统基本稳定,主要植被亦同治理排土场。

1.2 试验设计

基于治理排土场边坡的不同的植被重建模式,选取自然恢复地、草地、灌木林、乔木林共4种植被重建模式,比较模式间的SOC、TN含量和C/N比差异。新建排土场没有重建植被,仅1种模式。在治理小流域和原地貌区坡地均各选取草地、林地(包含灌木和乔木)2种植被模式。并对4个采样区不同植被模式下剖面SOC、TN密度以及1 m土层SOC、TN储量进行综合对比研究。

于2012年11月在治理排土场边坡的不同植被模式内设置样方(约10 m×10 m),其中自然恢复地、草地、灌木地、乔木地样方数分别为1、3、3、2个。每个样方内采用“S”型路线5点采样(5次重复),每个样点用3 cm的土钻采集0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层土壤样品,共

采集270个土样。在治理小流域和原地貌区的草地、灌木和乔木3种植被模式及新建排土场各设置1个样方,采样方法同治理排土场。在治理排土场、治理小流域和原地貌区的草地、灌木和乔木林地及新建排土场各挖1个1 m深典型土壤剖面,每20 cm用容积100 cm³的环刀采集各层原状土,重复5次,测定土壤容重。同时在治理排土场草地、灌木和乔木林地样方中分别选择4、3和2个植被类型,每个类型重复3次,用网袋收集地表凋落物(草地为1 m×1 m;灌木和乔木为2 m×2 m)并用内径为9 cm的根钻采集土壤剖面6个土层根系样品。

1.3 项目分析与测定

将采集的土壤容重样品于105℃鼓风干燥箱中烘干至恒重,测定土壤含水量,后由环刀体积计算出土壤容重。新鲜土样在野外混匀后,运回实验室,在室内自然风干,风干过0.25 mm筛后,测定SOC和TN含量。SOC用浓H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法,TN用凯氏定氮法(全自动定氮仪BUCHI322/34)测定。

凋落物在60℃烘24 h,称量,以此估算单位面积上凋落物生物量。从根系样品中挑出所有根系,清洗干净后,按直径Φ≤2 mm(细根)和Φ>2 mm(粗根)分为两级。将细根用小纸袋装好置于鼓风干燥箱中以70~80℃烘干至恒重,称重并记录。凋落物和根系粉碎后,测定碳含量(H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法)。

1.4 数据处理及统计分析

SOC或TN密度的计算公式:

$$D_i = C_i \times \rho_i \times d_i / 100 \quad (1)$$

式中, D_i 为SOC或TN密度(kg m⁻²); C_i 为SOC或TN含量(g kg⁻¹); ρ_i 为土壤容重(g cm⁻³); d_i 为土层深度(cm);100为单位转化系数。

SOC或TN储量的计算公式:

$$S_j = 10 \times \sum_{i=1}^j D_i \quad (2)$$

式中, S_j 表示某土层SOC或TN的储量(t hm⁻²);10为单位转化系数。

细根密度的计算公式:

$$R_i = R_m / (S \times d_i) \quad (3)$$

式中, R_i 为细根密度(g cm⁻³); R_m 为每一土层细根质量(g); S 表示根钻的截面积(cm²)。

细根生物量的计算公式:

$$R_j = 100 \times \sum_{i=1}^j (R_i \times d_i) \quad (4)$$

<http://pedologica.issas.ac.cn>

式中 R_i 表示某土层细根生物量 ($t \text{ hm}^{-2}$)。

利用 Excel 软件进行数据的预处理,用 SAS 9.2 软件进行数据的统计与方差分析,方差分析的 $\alpha = 0.05$ 。用 Sigma Plot 10.0 软件制作相关图件并计算出凋落物、细根生物量与碳储量相关分析的各参数。

2 结 果

2.1 治理排土场边坡 SOC、TN 和 C/N 比变化的影响因素

由表 1 可知,治理排土场植被重建模式对 SOC、TN 和 C/N 比的空间分布具有极显著影响 ($p < 0.0001$),土层深度对 SOC、TN 和 C/N 比的空间分布均具有极显著影响 ($p < 0.0001$)。植被重建模式和土层深度之间的交互作用对 SOC、TN 具有极显著影响 ($p < 0.0001$),但对 C/N 比影响不显著 ($p > 0.05$)。

2.2 治理排土场边坡不同植被重建模式对 SOC、TN 含量和 C/N 比的影响

治理排土场 4 种不同的植被重建模式下的 SOC、TN 剖面含量差异显著 ($p < 0.05$) (图 1),且随着土层深度增加二者均逐渐减小,尤其是从表层 0~10 cm 至亚表层 10~20 cm 减小最明显。表层 0~10 cm SOC 依次表现为草地 > 灌木 > 乔木 > 自然恢复地,其中草地、灌木地和乔木地 SOC 分别是自然恢复地 (2.14 g kg^{-1}) 的 1.9 倍、1.4 倍和 1.3 倍,草地 SOC 较灌木地和乔木地分别高 33.3%、47.8%。10~20 cm SOC 呈其他 3 种重建模式均大于自然恢复地,且提高的幅度均略有增加。此外,亚表层 SOC

亦表现为草地 (2.78 g kg^{-1}) 最大,灌木 (1.96 g kg^{-1}) 次之,乔木 (1.76 g kg^{-1}) 最小。20 cm 以下各土层 SOC 虽然也表现相似的特征,但差异随土层深度增加越来越不显著,且 40 cm 以下草地与灌木地间、乔木与自然恢复地间 SOC 差异均不显著。TN 的变化规律与 SOC 基本一致,其中草地表层 TN 相对于自然恢复地提高率达 78.2%,其他 2 种重建模式虽然也有提高,但提高率均远小于草地。4 种模式的 C/N 比除表层乔木和灌木间差异不显著外,10 cm 以下各土层乔木与其他模式间差异均显著 ($p < 0.05$),且随土层加深 C/N 比递减的幅度也减小。

2.3 不同采样区边坡的土壤碳、氮储量

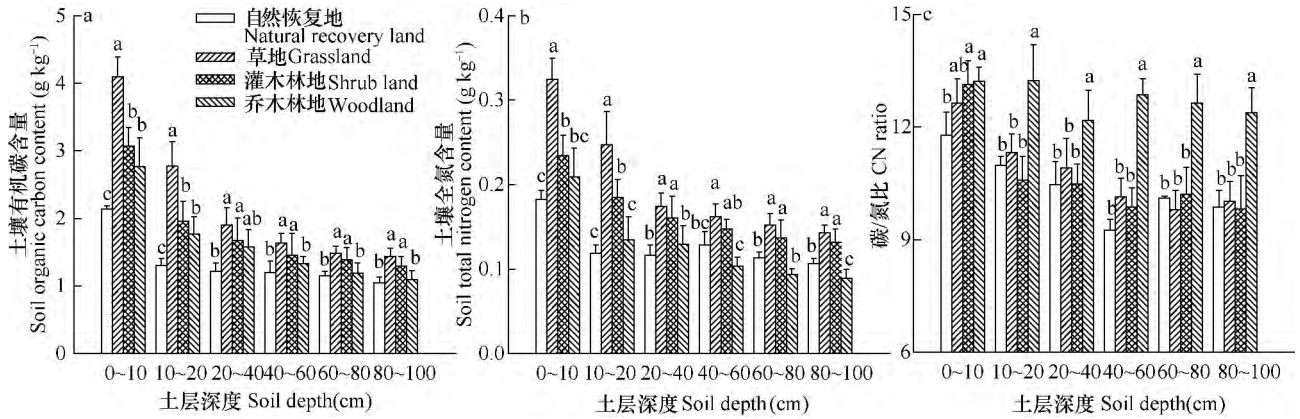
SOC、TN 密度在不同采样区的差异均达到显著水平 ($p < 0.05$),表现为原地貌区 > 治理小流域 > 治理排土场 > 新建排土场,且不同重建模式间也存在显著差异 (图 2),即草地 > 林地 (包括乔木和灌木),如治理排土场草地的 0~20 cm 碳密度 (0.92 kg m^{-2})、氮密度 (0.08 kg m^{-2}) 分别是林地的 1.5 倍和 1.5 倍。说明目前排土场植被重建后的土壤状况显著优于新建的排土场,但还未达到治理小流域和原地貌区水平。经过 15 年的植被重建,排土场林地、草地 0~20 cm 土层的 SOC 密度较新建排土场提高了 60.4%、142.8%,TN 密度提高了 90.2%、193.6%,且氮密度的提高率明显高于碳密度,草地提高率大于林地。治理 25 年小流域在林地和草地上相较治理排土场有 92.2%、35.8% 的固碳能力和 81.1%、40.8% 的固氮能力;而在原地貌区的林地和草地上则分别有 111.7%、68.8% 的固碳能力和 127.1%、74.9% 的固氮能力,且固氮能力高于固碳能力。

表 1 治理排土场边坡 SOC、TN 及 C/N 比的空间分布影响因子方差分析

Table 1 Variance analysis of factors affecting spatial distribution of SOC, TN and C/N ratio in dump slopes of opencast coal mines under management

项目 Item	自由度 df	土壤有机碳 SOC (g kg^{-1})				土壤全氮 TN (g kg^{-1})				碳氮比 C/N ratio			
		平方和 SS	均方 MS	F	Pr > F	平方和 SS	均方 MS	F	Pr > F	平方和 SS	均方 MS	F	Pr > F
植被模式													
Vegetation pattern	3	15.56	5.19	79.69	<0.0001	0.15	0.05	82.15	<0.0001	40.49	13.50	12.87	<0.0001
土层深度													
Soil depth	5	48.64	9.73	149.43	<0.0001	0.21	0.04	71.67	<0.0001	119.75	23.95	22.84	<.00001
植被模式 × 土层深度													
Vegetation pattern × Soil depth	15	8.50	0.57	8.70	<0.0001	0.05	0.00	5.83	<0.0001	12.37	0.82	0.79	0.6911

<http://pedologica.issas.ac.cn>



注: 不同小写字母表示同一土层深度数据差异达 5% 的显著水平, 下同 Note: Different small letters indicate that differences between data the same in soil depth are significantly different at the 5% level. The same below

图 1 治理排土场边坡不同植被重建模式对 SOC 含量 (a)、TN 含量 (b) 及 C/N 比 (c) 的影响

Fig. 1 Effect of revegetation patterns on SOC (a), TN (b) and C/N ratio (c) in the dump slope

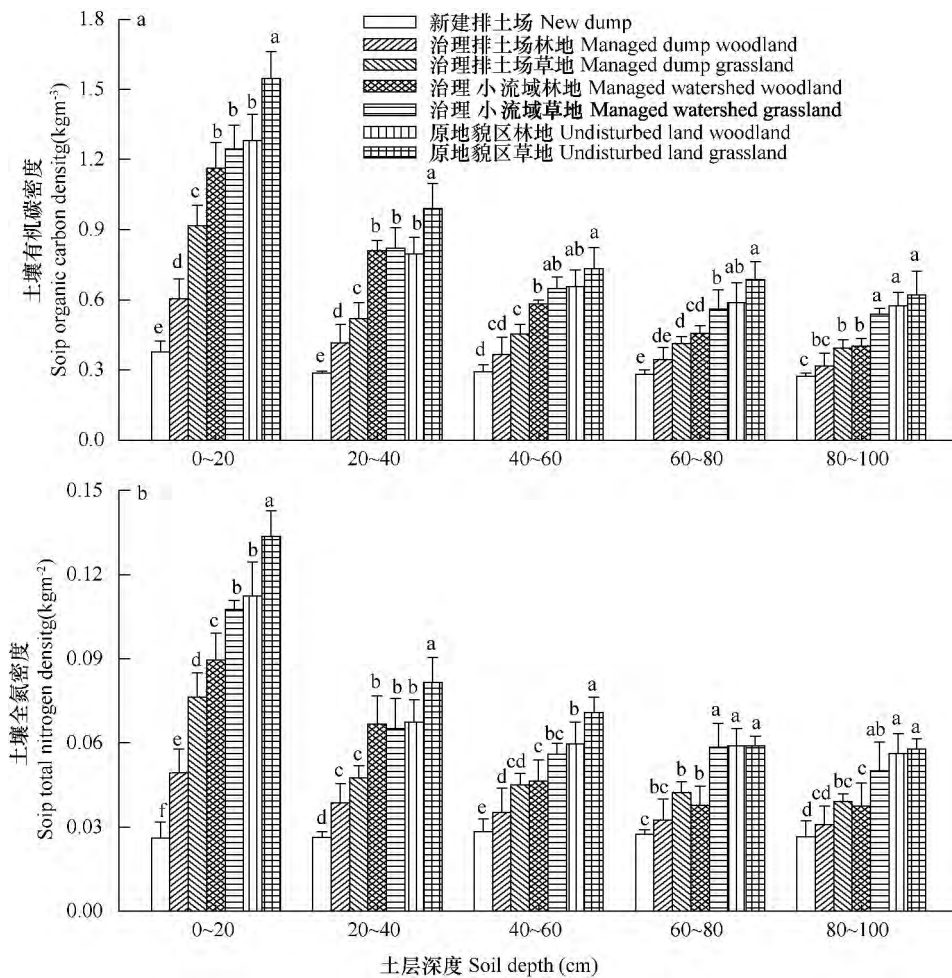


图 2 新建排土场、治理排土场、治理小流域、原地貌区边坡的土壤碳 (a)、氮 (b) 密度的比较

Fig. 2 Comparison between the slope of new dump, managed dump, managed watershed and undisturbed land in SOC (a) and TN (b) density

1 m 土层深度的土壤碳、氮储量亦呈新建排土场 < 治理排土场 < 治理小流域 < 原地貌区, 且同一植被模式下各采样区间的差异达到显著水平 ($p < 0.05$) (图 3)。经植被重建后, 治理排土场林地、草地的 SOC 储量分别增加了 5.38、11.85 t hm^{-2} , TN 储量分别增加了 0.52、1.16 t hm^{-2} 。林地和草地的固碳速率分别为 35.87、79.01 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 草地的固碳速率是林地的 2.2 倍。若要达到治理小流域的碳氮储量水平, 1 hm^2 排土场林地、草地 1 m 土层深度

SOC 分别需要增加 13.64、11.15 t, TN 分别需要增加 0.91、0.87 t; 若要达到原地貌区储量水平, 1 hm^2 排土场林地、草地 1 m 土层深度 SOC 分别需要增加 18.45、18.85 t, TN 分别需要增加 1.68、1.53 t。

上述结果表明, 目前的排土场边坡植被重建不但能显著提高土壤碳、氮储量, 而且表现出巨大的固碳、氮能力。不同植被模式其对土壤碳氮的固定存在显著差异, 草地的固定能力大于林地, 且草地固碳速率也大于林地。

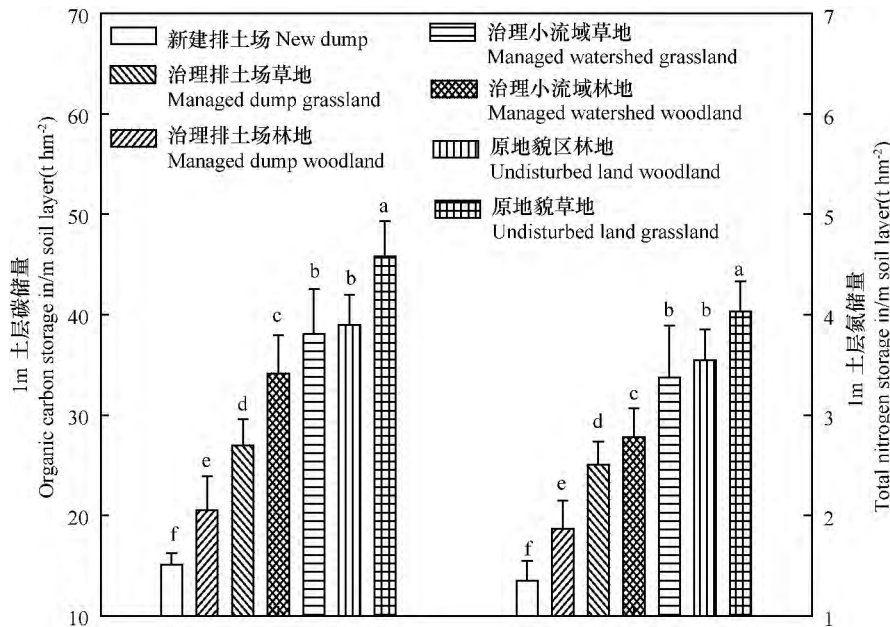


图 3 新建排土场、治理排土场、治理小流域、原地貌区边坡的 1 m 土层碳、氮储量的比较

Fig. 3 Comparison between the slopes of new dump, managed dump, managed watershed and undisturbed land in SOC, TN storage in the 0 ~ 100 cm soil layer

3 讨论

露天矿区排土场边坡 SOC 密度及碳储量因植被重建模式的不同而存在显著差异 ($p < 0.05$), 表现为 1 m 土层草地的碳储量 (26.96 t hm^{-2}) 是林地 (20.49 t hm^{-2}) 的 1.3 倍; 草地的固碳速率 (0.79 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) 则为林地 (0.36 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) 的 2.2 倍。这一研究结果基本与他在矿区排土场的研究一致, 如 Ussiri 和 Lal^[10] 研究表明矿区恢复成牧场和草原后 SOC 固定速率较森林高, 牧场和草原的固碳速率为 0.3 ~ 1.85 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 而森林的为 0.2 ~ 1.64 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。但这与其他区域自然立地条件下植被恢复 SOC 的研究结果存在一定差异: 李跃林^[11] 和 Post^[12] 等认为林地的 SOC 含量和碳积累大于草地, 本课题组在砖窑沟流域^[13] 和燕沟流域^[14]

的研究也得到了类似的结论。造成矿区排土场不同植被重建模式碳储量和固碳速率与自然立地条件下差异较大的原因, 可能是碳输入主要来源的地表凋落物以及根系这两个生物因素的差异。

植被重建不仅显著影响地表凋落物的积累量和性质, 而且显著影响 SOC 的积累速率^[15-16]。本研究同时进行了地表凋落物的调查与分析, 结果表明 (图 4 a), 1 m 土层土壤碳储量与地表凋落物生物量呈显著的正相关关系 ($y = y_0 + a \ln x$, $R^2 = 0.70 \sim 0.73$, $p < 0.01$), 即土壤碳储量随着凋落物生物量的增加而成对数增长, 这一研究结果与他人研究基本一致, Lorenz 和 Lal^[17] 认为 SOC 随凋落物积累量的增加而增加, 郭胜利等^[18] 研究得出凋落物积累量与 0 ~ 20 cm 土层 SOC 存在显著线性相关关系 ($R^2 > 0.83$)。但是, 本研究得出林地和草地两种植被重建模式碳储量增加的速率不一致, 草地重建模式速

率($a = 17.34$) 是林地($a = 8.76$) 的 2 倍 ,且在相同凋落物生物量条件下 ,草地重建模式的土壤碳储量明显高于林地。同时 ,草地的凋落物生物量的变化范围也大于林地。凋落物性质的差异也导致不同植被模式间碳储量的分异。图 5 a 可知 ,土壤碳储量与凋落物含碳量呈显著的线性正相关关系($y = y_0 + ax$, $R^2 = 0.55 \sim 0.66$, $p < 0.01$) ,草地 SOC 储量随凋落物含碳量增加的速率也较林地大。

细根生物量及其周转是影响 SOC 积累的重要因素^[19-20]。在本研究中 ,SOC 储量随着根细根生

物量输入的增加 ,呈对数增长的趋势($y = y_0 + a \ln x$, $R^2 = 0.64 \sim 0.67$, $p < 0.01$) (图 4 b)。这一结果表明 随着矿区植被的修复与重建 ,细根生物量的增加是导致 SOC 储量提高的重要驱动因素。虽然 SOC 储量随细根生物量增加而增加的速率呈草地略小于林地的趋势 ,但草地细根的整体生物量大于林地。此外 ,图 5 b 表明 ,草地细根的碳含量亦高于林地。因此 ,在等量细根生物量输入时 ,SOC 储量表现为草地 > 林地。

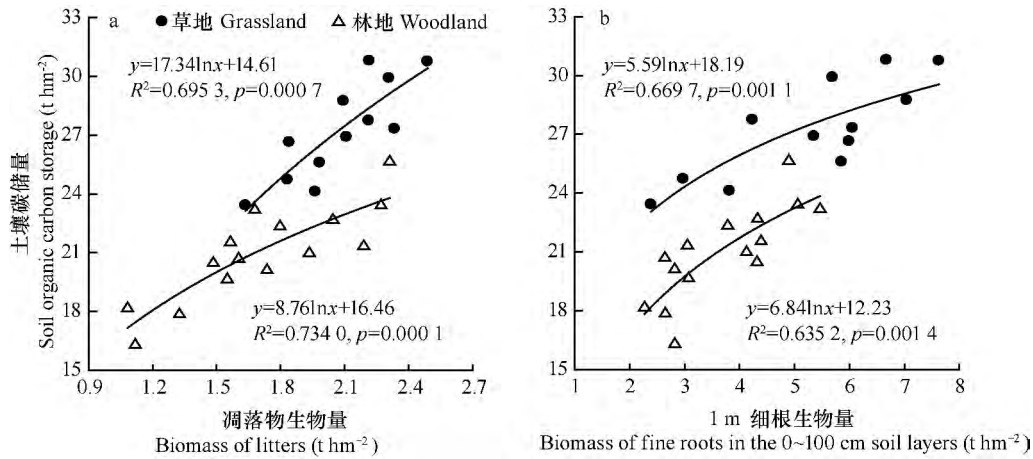


图 4 凋落物、细根生物量对土壤碳储量的影响

Fig. 4 Effects of biomass of litters and fine roots on SOC storage

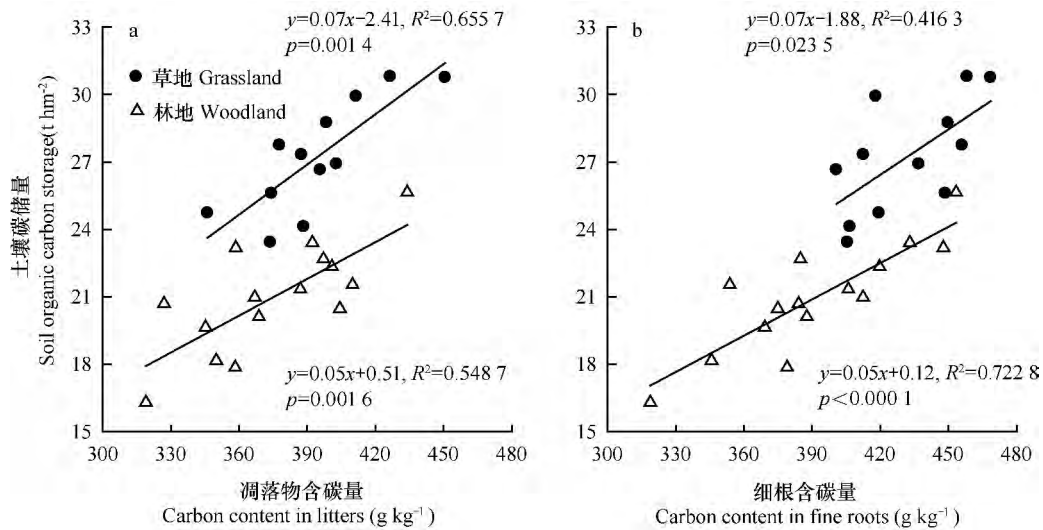


图 5 凋落物、细根含碳量对土壤碳储量的影响

Fig. 5 Effects of carbon content in litters and fine roots on SOC storage

4 结 论

植被重建模式显著影响土壤剖面 SOC、TN 含量及分布($p < 0.05$) $0 \sim 10$ cm 和 $10 \sim 20$ cm SOC、TN 均呈草地 > 灌木 > 乔木 > 自然恢复地, 20 cm 以下各土层 SOC、TN 虽然也表现相似的特征, 但差异随土层深度增加越来越小。土壤剖面 SOC 密度和储量表现为原地貌区 > 治理小流域 > 治理排土场 > 新建排土场。经 15 年植被重建后, 排土场边坡 1 m 土深的林地和草地碳储量分别增加了 5.38、11.85 t hm^{-2} , 仅相当于治理小流域坡地的 60.0%、70.7% 以及原地貌坡地的 1/2 和 3/5, 表现出巨大的固碳能力, 且草地固碳速率是林地的 2.2 倍, 这一变化规律与林地、草地的地表凋落物和细根生物量的差异密切相关。从土壤改良、土壤固碳及水土流失治理的角度考虑, 建议矿区排土场边坡植被重建以草地为主, 其次为灌木。

参 考 文 献

- [1] Wick A F, Merrill S D, Toy T J, et al. Effect of soil depth and topographic position on plant productivity and community development on 28-year-old reclaimed mine lands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 66(3): 201—211
- [2] Miao Z, Marrs R. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(3): 205—215
- [3] 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 18—21. Wei Z Y, Hu Z Q, Bai Z K. The loose-heaped-ground method of soil reconstruction on the stockpiles of open-pit coal mine (In Chinese). *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 18—21
- [4] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1075—1081. Wang Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1075—1081
- [5] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358—5371. Chen Z, Lü C H, Fan L, et al. Effects of land use change on soil organic carbon: A review (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358—5371
- [6] 梁爱华, 韩新辉, 张扬, 等. 纸坊河流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应. *草地学报*, 2013, 21(5): 842—849. Liang A H, Han X H, Zhang Y, et al. Spatio-temporal response of soil carbon and nitrogen relation to the process of vegetation restoration in the gully region of Loess Plateau (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(5): 842—849
- [7] 郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 862—867. Guo R, Wang X K, Lu F, et al. Soil organic sequestration and its potential by grassland ecosystems in China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 862—867
- [8] 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. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2006, 26(4): 313—316. Fan W H, Li H F, Bai Z K. The research of the soil fertility changes in loess area large opencast coal mine's different reclamation models and reclamation years—Taking Pingshuo ATB opencast coal mine as example (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2006, 26(4): 313—316
- [9] 陕永杰, 白中科. 黄土区大型露天矿区土壤质量评价指标研究. *能源环境保护*, 2008, 22(2): 42—45. Shan Y J, Bai Z K. Study of the large-scale opencast mine of loess area soil quality indicators (In Chinese). *Energy Environmental Protection*, 2008, 22(2): 42—45
- [10] Ussiri D A N, Lal R. Carbon sequestration in reclaimed mine-soils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, 24(3): 151—165
- [11] 李跃林, 彭少麟, 赵平, 等. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究. *山地学报*, 2002, 20(5): 548—552. Li Y L, Peng S L, Zhao P, et al. A study on the soil carbon storage of some land use types in Heshan, Guangdong, China (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 548—552
- [12] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317—327
- [13] 邹俊亮, 郭胜利, 李泽, 等. 小流域土壤有机碳的分布和积累及土壤水分的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 430—439. Zou J L, Guo S L, Li Z, et al. Soil organic carbon accumulation and distribution in a small watershed and the effects of soil water (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 430—439
- [14] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 443—453. Sun W Y, Guo S L, Song X Y. Effects of topographies and land use on spatial distribution of surface soil organic carbon in hilly region of the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 443—453
- [15] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(7167): 277—280
- [16] Feral C, Epstein H, Otter L, et al. Carbon and nitrogen in the soil-plant system along rainfall and land-use gradients in southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(2): 327—343
- [17] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 35—66
- [18] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 等. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响. *林业科学*, 2009, 45

- (10): 14—18. Guo S L, Ma Y H, Che S G, et al. Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in loess hilly areas (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 14—18
- [19] Zhang K R, Cheng X L, Dang H S, et al. Linking litter production, quality and decomposition to vegetation succession following agricultural abandonment. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 8(5): 1—11
- [20] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 43—58

VARIABILITY OF SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN DUMP SLOPE OF OPENCAST COAL MINE UNDER REVEGETATION

Li Junchao¹ Dang Tinghui^{1,2†} Xue Jiang¹ Tang Jun² Guo Shengli^{1,2} Jin Jingjing³

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Vegetation reconstruction is the most direct biological measure and the most effective one as well to control soil and water losses from dump slopes of an opencast coal mine. The knowledge of spatial distribution variability of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents in the dump slope as affected by revegetation pattern is essential to selection of proper vegetation patterns that fit the dump slope. The study area was set in the Heidaigou opencast coal mine in Inner Mongolia Autonomous Region, where the dump slopes had been under management for 15 years, using 4 revegetation patterns (natural recovery land, grassland, shrub land, woodland). A total of 270 soil profiles (0~100 cm) were collected as samples for analysis of variability of SOC storage as affected by revegetation pattern. Results show as follows: (1) Revegetation patterns significantly affected SOC and TN contents and their distribution in the soil profile ($p < 0.05$). In terms of SOC and TN contents in the 0~10 cm and 10~20 cm soil layers, the four revegetation patterns displayed an order of grassland > shrub land > woodland > natural recovery land, while in terms of SOC and TN contents in the soil layers below 20 cm, a similar trend could be found, but the differences between the four narrowed with increasing soil depth. (2) In terms of SOC density and storage, an order of undisturbed land > managed watershed > managed dump > new dump was found. After 15 years of revegetation, the dump slopes demonstrated a tremendous carbon sequestration capacity. The SOC storage in the 1 m soil layers of the woodland and grassland was 5.38 t hm⁻² and 11.85 t hm⁻², respectively, higher than that in the new dump, but only reached 1/2 and 3/5 of that in the undisturbed land. (3) The carbon sequestration rate of the woodland and grassland was 35.87 g m⁻² a⁻¹ and 79.01 g m⁻² a⁻¹, respectively. The latter was 2.2 times of the former. From the perspective of soil organic carbon sequestration and soil erosion control, grassland is the priority revegetation pattern recommended for management of dump slopes of opencast coal mines and followed by shrub land.

Key words Dump slope; Revegetation; Soil organic carbon storage; Carbon sequestration capacity; Biological factors; Opencast coal mine

(责任编辑: 卢 萍)