

# 黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素

赵萌捷<sup>1</sup>, 陈云明<sup>1,2</sup>, 艾泽民<sup>2</sup>, 曹扬<sup>1,2</sup>, 徐敬华<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 分析了黄土丘陵区典型人工林刺槐、沙棘和柠条 0—60 cm 土层土壤有机碳(SOC)储量及分布特征的差异,研究了不同类型人工林随生长年限的增加对 SOC 产生的影响。结果表明,人工林建造对 SOC 积累具有积极作用,各人工林进入生长稳定期后,对 SOC 有一定补给作用,有机碳补给能力表现为:沙棘 > 刺槐 > 柠条,这种差异因根系生长特点不同产生,沙棘主要在 20—40 cm 土层,年平均补给量为 0.357 g/kg;刺槐和柠条为 40—60 cm,年平均补给量分别为:0.010 和 0.005 g/kg。回归分析结果表明,土壤物理性状与 SOC 含量相关性显著( $p < 0.01$ ),SOC 含量随土壤容重增大而减小,随团聚体稳定性增大而增大,相关系数分别为 -0.82 和 0.79。

**关键词:** 黄土高原; 人工林; 土壤有机碳; 土壤容重; 团聚体稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0270-06

中图分类号: S714

## Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Their Affecting Factors of Typical Plantations in Loess Hilly Region

ZHAO Meng-jie<sup>1</sup>, CHEN Yun-ming<sup>1,2</sup>, AI Ze-min<sup>2</sup>, CAO Yang<sup>1,2</sup>, XU Jing-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to understand the effects of different plantation types on soil organic carbon accumulation, we conducted a comparative analysis on the variations in the total amount and distribution characteristics of soil organic content in the 0—60 cm soil layers of typical plantations of *Robinia pseudoacacia*, *Hippophae rhamnoides*, *Caragana intermedia* in the loess hilly region. The results showed that the plantations played positive roles in soil organic carbon accumulation. After reaching their stable growth stages, the plantations showed replenishment effects on the soil organic carbon pool. The replenishment ability of the plantations could be ranked in a descending order as *Hippophae rhamnoides* > *Robinia pseudoacacia* > *Caragana intermedia*, with average annual replenishment rates of 0.854, 0.004 and 0.003 g, respectively. Owing to the differences in root growth distribution, the replenishment rates varied vertically for different plantations. Under the plantation of *Hippophae rhamnoides*, the increase of soil carbon mainly occurred at the 20—40 cm layer with an annual replenishment rate of 0.357 g, while for *Robinia pseudoacacia* and *Caragana intermedia*, the increases were found at the layers of 40—60 cm with rates of 0.010 and 0.005 g/kg, respectively. Moreover, the results also indicated significant correlation between soil physical properties and soil organic content ( $p < 0.01$ ); the soil organic content decreased with increasing soil bulk density and increased with aggregate stability. This suggested that the soil organic carbon storage capacity was affected by the soil physical properties, which in turn could be changed by vegetation root activities.

**Keywords:** loess hilly region; plantation; soil organic carbon; soil bulk density; aggregate stability

土壤是陆地生态系统最大的有机碳库,占全球陆地总碳库的 2/3 ~ 3/4,其碳储量和变率对整个陆地

生态系统碳收支具有重大影响<sup>[1-3]</sup>。大量研究及相关模型模拟发现,土壤有机碳(SOC)稳定性在很大程度上

收稿日期:2012-05-12

修回日期:2012-06-10

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力研究”(XDA05050200)

作者简介:赵萌捷(1987—),女(汉族),山西省平陆县人,硕士研究生,主要从事与水土保持生物工程及其相关研究。E-mail:zhaomengjie23@yeah.net。

通信作者:陈云明(1967—),男(汉族),陕西省澄城县人,博士,研究员,主要从事植被生态与水文研究。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn。

上受自然<sup>[4-5]</sup>及内部动植物、微生物活动、土壤有机碳分布特征及土壤理化性质所决定<sup>[6-11]</sup>,因此,SOC 稳定性是全球碳研究的关键问题。其中,人类对土壤的不合理利用及毁林开荒形成的水土流失是 SOC 下降的重要原因,具估计,全球 SOC 每年水蚀损失量为 4.0~6.0 Pg,中国每年 SOC 因风蚀损失量高达  $5.98 \times 10^6 \text{ t}$ <sup>[12-14]</sup>。近年来,人工林建设逐渐成为生态恢复的重要手段<sup>[15-16]</sup>,大量在区域<sup>[17-20]</sup>及全球<sup>[21]</sup>尺度上的研究结果也肯定了人工林对提高陆地碳储量的影响。目前国内关于人工林 SOC 储量、分布特征及外界因素对 SOC 影响的研究较为广泛。已有的研究表明,我国多种人工林 SOC 分布规律明显,有机碳含量随土层深度增加而减少<sup>[22-24]</sup>,并且人工林是退耕还林 SOC 增加及生态恢复的最有效手段。但针对具有区域特色人工林生长过程对 SOC 的影响研究还鲜有报道<sup>[25-27]</sup>。

黄土高原面积近  $6.40 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,土层深厚,是我国重要土壤碳库。但是区域内气候干旱,水土流失严重,土壤肥力下降,并且新鲜有机碳输入量有限,很大程度上限制 SOC 积累。吴金水等人<sup>[12-13,28]</sup>采用 SCNC 模型模拟预测在相同条件下,黄土高原气候有利于 SOC 积累;并且在气温升高 0.03 和 0.06 °C/a 的情况下,黄土高原有机碳积累量相对减少 3.6%和 10.9%,降低幅度小于热带地区,因此,黄土高原土壤具有很大固碳潜力。近年来,黄土高原地区大力营建刺槐、沙棘和柠条等人工林,有效减缓水土流失以及生态退化现象<sup>[25,29]</sup>。但是黄土高原地形复杂,人工林结构、功能及稳定性差异很大,有必要阐明不同类型人工林生长对 SOC 的影响机理<sup>[21,30-34]</sup>。本研究选择了黄土丘陵区典型的刺槐、沙棘和柠条不同林龄的人工林,探讨不同类型人工林随年限增加对 SOC 储

量和土壤物理性质的影响以及二者之间的关系,以期为该地区人工林生态系统碳汇管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞县的中国科学院安塞水土保持综合试验站。该区地处黄土高原腹地,属典型梁峁状丘陵沟壑区,处于暖温带湿润向半干旱过渡区,海拔高度为 1 100~1 400 m,年平均降雨量为 542.5 mm,年均气温为 8.8 °C,无霜期 157~194 d。土壤类型为黄绵土与黄沙土交错区,人工林处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原区,受人类活动影响,是典型的水土流失严重区域。近年来,为减少水土流失,改善生态环境,区域内大力建造人工林,并且取得一定成效。人工植被乔木以刺槐(*Robinia pseudoacada*)和小叶杨(*Populus simonii*)等为主;灌木主要有柠条(*Caragana intermedia*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciiifolia*)等天然灌丛,呈零星分布;草本以中旱生草本植物群落占绝对优势,主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia* L)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等形成的草原和干草原。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择

经实地调查后,选择土壤类型、坡度、坡向和坡位较为一致的不同林龄人工林,选择的样地分别为:10 和 30 龄刺槐林;14,24 和 50 龄柠条林;14 和 24 龄沙棘林;各样地林分的基本情况详见表 1。

表 1 试验样地的基本情况

| 群落名称   | 坡度/(°) | 坡向/(°) | 坡位 | 平均冠幅/m  | 造林规格/m | 地表植被生物量/(g·m <sup>-2</sup> ) | 枯落物量/(g·m <sup>-2</sup> ) | 林下植被       |
|--------|--------|--------|----|---------|--------|------------------------------|---------------------------|------------|
| 10 龄刺槐 | 31     | 115    | 中上 | 150×225 | 2×3    | 1 357                        | 262                       | 芨蒿         |
| 30 龄刺槐 | 31     | 139    | 中上 | 330×280 | 2×3    | 6 763                        | 226                       | 长芒草+阿尔泰狗娃花 |
| 14 龄柠条 | 26     | 165    | 中  | 174×171 | 4×1.5  | 189                          | 82                        | 铁杆蒿+芨蒿     |
| 24 龄柠条 | 24     | 154    | 中上 | 167×159 | 2×1.5  | 630                          | 109                       | 芨蒿+铁杆蒿     |
| 50 龄柠条 | 26     | 210    | 中下 | 145×127 | 2×1.5  | 751                          | 124                       | 芨蒿+铁杆蒿+披针苔 |
| 14 龄沙棘 | 30     | 59     | 中上 | 215×180 | 1×1.5  | 3 309                        | 260                       | 臭草+铁杆蒿     |
| 24 龄沙棘 | 32     | 66     | 中下 | 225×260 | 1×1.5  | 3 497                        | 330                       | 铁杆蒿+长芒草    |

### 2.2 样品采集

2.2.1 植物样品采集 刺槐林地选取 50 m×50 m 样地,然后测定样地内乔木平均冠幅及密度,在样地内沿对角线取 3 个 1 m×1 m 的小样方,进行林下植被调查,并将枯枝落叶收集带回实验室烘干称重求得

枯枝落叶量。灌木林地选取 50 m×50 m 样地,在样地内沿对角线取 3 个 2 m×2 m 的样方,测定样地内灌木平均基径及密度。在所选的 3 个灌木样方内各选择 1 m×1 m 样方,进行林下植被调查,将枯枝落叶收集带回实验室烘干、称重,求得枯枝落叶量。

2.2.2 土壤样品采集 在选好的林地中部沿等高线方向开挖 3 个土壤剖面,每个剖面用规格 100 cm<sup>3</sup> 的环刀分别在 0—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 土层每层采取 2 个原状土样。

### 2.3 样品处理及分析方法

采用环刀法测得土壤容重;团聚体测定采用湿筛法;有机碳测定采用硫酸—重铬酸钾外加热法<sup>[35]</sup>。土壤团聚体是土壤养分含量的有效指标,平均质量直径(MWD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标<sup>[36]</sup>。MWD 计算公式为:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{x_i} \omega_i}{\sum_{i=2}^n \omega_i}$$

式中: $\overline{x_i}$ ——土壤粒级的平均直径(mm); $\omega_i$ ——不同土壤粒级团聚体占总团聚体的比例。

试验数据利用 SPSS 19,Excel 软件和 Origin 8.6 软件进行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 人工林土壤有机碳(SOC)分布特征

3.1.1 人工林生长对土壤有机碳的影响 不同人工林分各土层 SOC 及总有机碳含量随年限增加差异显著( $p < 0.01$ ),30 龄刺槐人工林与 10 龄相比,0—60 cm 土层 SOC 含量增加,平均每年积累量为 0.004

g/kg,0—20 cm 和 20—40 cm 土层 SOC 含量平均每年分别减少了 0.006 和 0.001 g/kg,但 40—60 cm 土层 SOC 含量平均每年增加了 0.011 g/kg。随年限增加,14,24 与 50 龄柠条人工林 0—60 cm 土层 SOC 含量呈现先减少后增加的变化趋势;24 龄人工林与 14 龄相比,平均每年减少了 0.121 g/kg;50 与 24 和 14 龄人工林相比,平均每年分别增加了 0.051 和 0.004 g/kg。说明柠条人工林 24 龄之前对 SOC 需求量较大,24~50 龄柠条人工林 SOC 开始积累,50 龄人工林与 14 龄相比,随土层深度的增加各土层 SOC 年平均积累量分别为 -0.004,0.003 和 0.005 g/kg。24 龄沙棘与 14 龄相比,0—60 cm 有机碳含量平均每年增加 0.854 g/kg,随着土层深度增加,各土层 SOC 每年增加量分别为 0.325,0.357,0.172 g/kg。相关分析表明,各人工林 SOC 含量差异显著( $p < 0.05$ )。如图 1 所示,相同林龄阶段,0—60 cm 土层 10 龄刺槐林 SOC 含量比 14 龄柠条低 30.08%,比 14 龄沙棘林高出 5.82%;30 龄刺槐林比 24 龄柠条和 24 龄沙棘林 SOC 含量分别低 13.71%和 101.39%。

该区人工林土壤 SOC 含量差异主要在 0—20 cm 土层,该土层 10 龄刺槐比 14 龄柠条林 SOC 含量低 60.57%,比 14 龄沙棘高 3.98%;30 龄刺槐比 24 龄柠条和 24 龄沙棘林 SOC 含量分别低了 76.53%和 96.37%。

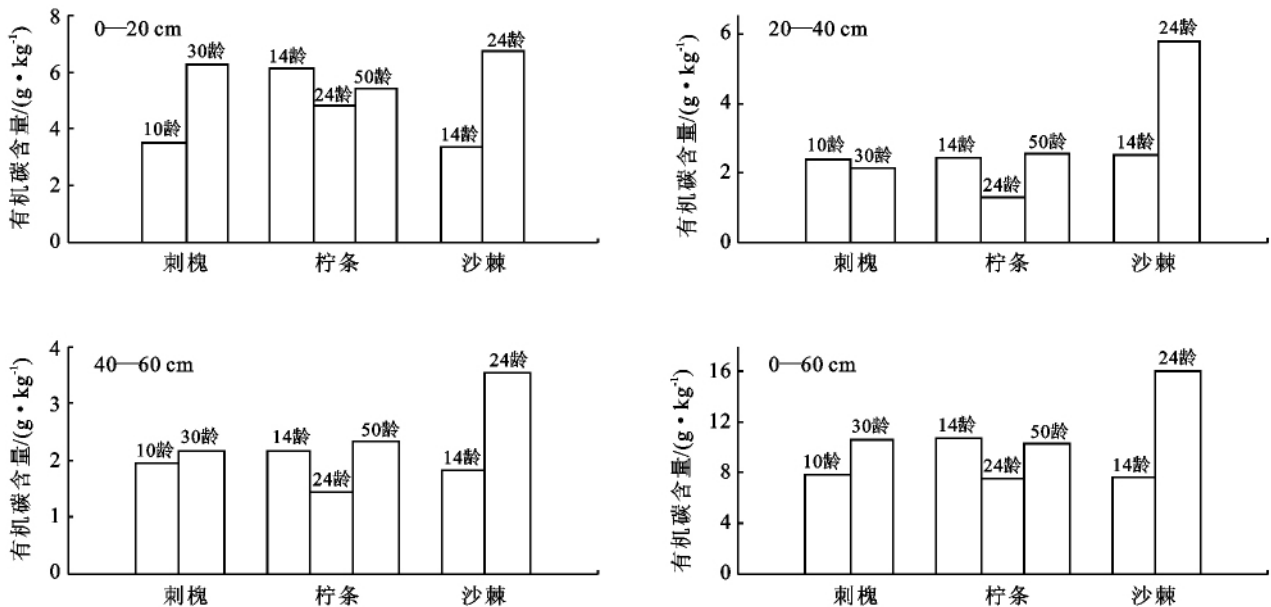


图 1 研究区各林分人工林不同土层的有机碳含量

3.1.2 人工林 SOC 垂直分布特征 研究区人工林不同土层 SOC 含量存在显著差异( $p < 0.01$ )。由图 2 可以看出,不同类型人工林林地 SOC 含量随着土层深度的增加均呈现递减趋势,各土层 SOC 含量由高

到低的顺序为:0—20 cm > 20—40 cm > 40—60 cm,在 60 cm 土层中所占的比例范围,自上而下分别为 41%~66%,15%~36%和 19%~27%,其中 24 龄柠条样地 0—20 cm 土层 SOC 含量比例高达 66%。

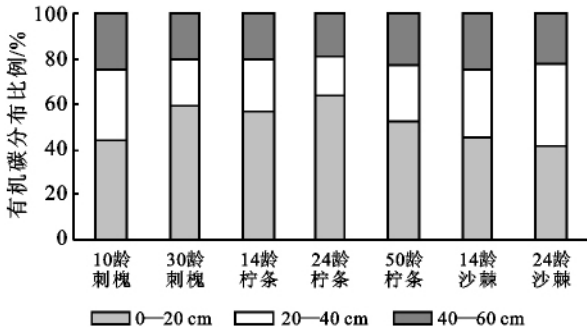


图 2 研究区人工林土层有机碳垂直比例分布特征

### 3.2 土壤物理性质对有机碳的影响

#### 3.2.1 土壤容重变化特征及其对 SOC 含量的影响

如图 3 所示,人工林地在 0—60 cm 土层容重变化范围为 1.020~1.28 g/cm<sup>3</sup>,不同类型人工林对土壤容重的改善作用随土层深度增加而减弱。30 龄刺槐林对土壤容重改善深度可达 60 cm,其作用远大于 10 龄林,30 龄林和 10 龄林 0—60 cm 土层的土壤容重变化范围分别为 1.05~1.18 g/cm<sup>3</sup> 和 1.02~1.24 g/cm<sup>3</sup>;灌木林柠条林在 0—20 cm 土层,其改善土壤容重的作用由大到小分别为:14 龄>24 龄>50 龄,20—40 cm 土层改善土壤容重的作用由大到小分别为:50 龄>14 龄>24 龄,40—60 cm 土层为:24 龄>14 龄>50 龄,14 龄林已经处于改善容重的较好阶段,随着林龄增加其对容重的改善深度具有增加趋势;同理发现 14 和 24 龄沙棘林对容重的改善作用相似,甚至大于 24 龄林,其改善土壤容重的作用和 14 龄柠条林相似,均处于生长较好阶段。就不同类型、不同林龄的乔木林和灌木比较,刺槐林改善土壤容重的作用大于灌木林。相关分析表明,土壤容重与 SOC 含量呈极显著相关关系,Pearson 相关系数为 0.82( $p < 0.01$ )。土壤容重与 SOC 含量的回归分析表明,二者存在显著的曲线关系( $R^2 = 0.736$ ,  $p < 0.01$ ),SOC 含量随着土壤容重的增加而减少,但是当土壤容重大于 1.10 g/cm<sup>3</sup> 后,土壤 SOC 含量减少趋势趋于平缓(图 4)。

3.2.2 团聚体 MWD 变化特征及其对 SOC 含量的影响 由图 5 可知,不同类型人工林团聚体 MWD 随林龄的增加而增大,随土层深度的增加而减小。10 和 30 龄刺槐林地,均以 0—20 cm 土层的团聚体 MWD 最大,其值分别为 1.25 和 1.65 mm,分别是 20—40 cm 和 40—60 cm 土层的 1.14 和 1.03 倍,1.29 和 1.50 倍;30 龄刺槐林地 0—60 cm 土层的团聚体 MWD 是 10 龄的 1.13 倍。14,24 和 50 龄柠条林地,0—20 cm 土层团聚体 MWD 分别为 20—40 cm、

40—60 cm 土层的 1.35,1.72,1.59 倍;1.48,1.44,1.41 倍;50 龄柠条林 0—60 cm 土层团聚体 MWD 分别为 14 和 24 龄的 1.19 和 1.27 倍。14 和 24 龄沙棘林地,0—20 cm 土层团聚体 MWD 分别为 20—40 cm 和 40—60 cm 土层的 1.18 和 1.41 倍,1.44 和 1.80 倍;24 龄沙棘林地 0—60 cm 土层的团聚体 MWD 是 14 龄林地的 1.17 倍。相关分析表明,土壤团聚体 MWD 与有机碳含量极显著相关,Pearson 相关系数为 0.79( $p < 0.01$ )。土壤团聚体 MWD 与有机碳的回归分析表明,二者存在显著的曲线关系( $R^2 = 0.597$ ,  $p < 0.01$ ),SOC 含量随着团聚体 MWD 的增大而增加,并且当团聚体 MWD 小于 1.7 mm 时,土壤 SOC 含量增加趋势较为平缓,MWD 大于 1.7 mm 后,土壤 SOC 含量增加趋势较迅速(图 6)。

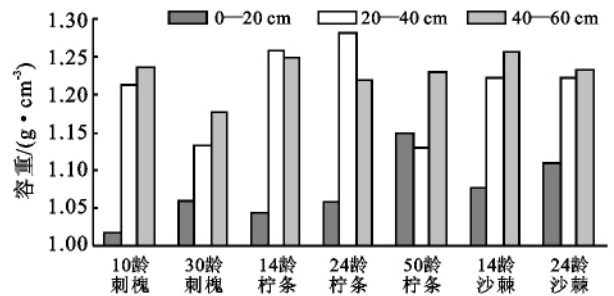


图 3 研究区不同林分人工林在各土层的土壤容重

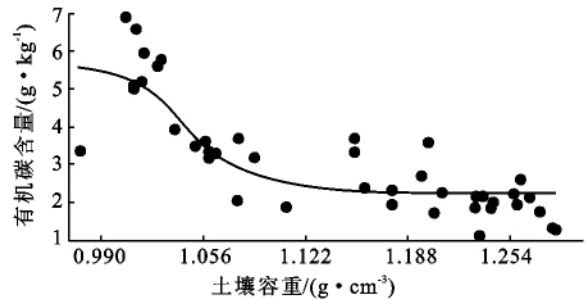


图 4 土壤容重与有机碳含量的关系

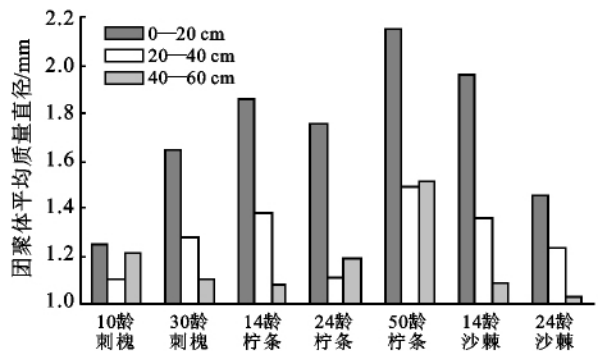


图 5 研究区各林分人工林在各土层的团聚体平均质量直径(MWD)

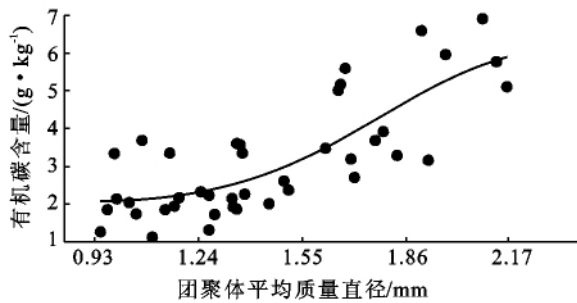


图 6 土壤团聚体平均质量直径与有机碳含量的关系

## 4 结果讨论

### 4.1 人工林对土壤有机碳含量影响

人工林土壤有机碳含量受地表植被类型影响,也受土壤内部性质制约。不同人工林类型根系生长特点不同,不断积累的地表枯落物以及不断更替的根系,在改善土壤质地的同时,产生的腐殖质成为土壤碳源之一,使土壤有机碳含量及土壤物理性质存在明显差异。相关研究也证实 0—60 cm 土层乔木与灌木相对于坡耕地有机碳含量可分别增加了 22.3% 和 17.69%, 差异显著。本研究结果显示,人工林土壤有机碳随年限增加而增大,刺槐、沙棘和柠条的成熟林相对于幼龄林 0—60 cm 土层 SOC 年平均积累量分别为 0.004, 0.854, 0.003 g/kg; 不同人工林分补给有机碳的土层不同,沙棘主要在 20—40 cm 土层,年平均补给量为 0.357 g/kg; 刺槐和柠条为 40—60 cm, 年平均补给量分别为 0.010 和 0.005 g/kg, 与已有研究结果相似。

森林土壤有机碳含量普遍大于灌木与草地,如黄土丘陵沟壑区人工林土壤有机碳含量 40 龄刺槐 > 12 龄沙棘及 30 龄柠条 > 草本。也有研究显示 20 龄左右人工沙棘土壤有机碳含量约为 78.08 g/kg, 而 28 龄人工刺槐林土壤有机碳含量约为 68.93 g/kg。本研究结果显示,区域内人工林进入成熟稳定期后,0—60 cm 土壤有机碳含量由高到低的顺序为: 24 龄沙棘 > 30 龄刺槐 > 50 龄柠条, 与已有的研究结果相一致。

### 4.2 人工林土壤物理性质对土壤有机碳含量的影响

人工林土壤有机碳含量随林龄变化明显,同时也受到物理性质的影响。人工林建造使土壤物理性质发生改变,土壤容重、pH 值等降低,团聚体含量增加<sup>[34]</sup>, SOC 含量与土壤容重呈显著负相关关系,相关系数为 -0.58 ~ -0.68; 与团聚体 MWD 呈显著正相关关系,相关系数 0.75 ~ 0.85 与,从而说明土壤物理性质的改善对 SOC 积累有积极影响。本研究结果显示,黄土丘陵沟壑区人工林随生长年年限的增加,植物根系使土壤疏松,降低了土壤容重,同时更替产生的

腐殖质提高土壤团聚体 MWD, 使团聚体稳定性增加,改善土壤质地,从而有利于土壤有机碳储存; 土壤容重与团聚体 MWD 与土壤有机碳含量相关系数分别为: -0.82 和 0.79, 与已有研究结果相似,进一步支持人工林对有机碳积累具有积极作用的论证,也证实了人工林建造对 SOC 积累的部分影响机制。

## 5 结论

黄土丘陵沟壑区人工林由幼龄林进入成熟林后, 0—60 cm 各土层土壤有机碳含量增加,不同成熟林分有机碳平均积累能力差异明显(沙棘 > 刺槐 > 柠条), 有机碳年平均积累量分别为 0.854, 0.004, 0.003 g/kg。人工林进入成熟期后, 0—60 cm 各土层土壤容重下降,团聚体稳定性提高,土壤质地得到改善。土壤团聚体稳定性、容重与 SOC 含量相关性显著,与 SOC 含量分别呈正、负相关性,相关系数分别为 0.79 和 -0.82。

### [参 考 文 献]

- [1] 曲建升,孙成权,张志强,等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980-986.
- [2] 杨洪晓,吴波,张金屯,等. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2005, 41(2): 172-177.
- [3] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 潘根兴,李恋卿,张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题: 兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109.
- [5] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定型及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 743-747.
- [6] Catherine P, Rock O. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(3): 315-325.
- [7] Brien P M, Attiwill C J W. Stability of soil organic matter in *Eucalyptus regnans* forests and *Pinus radiata* plantation in Southeastern Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 185(3): 249-261.
- [8] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
- [9] 安静,邓波,韩建国,等. 土壤有机碳稳定性影响因子的研究进展[C]// 农区草业论坛论文集. 北京: 2008 中国草业发展论坛, 2008: 53-58.
- [10] 金峰,杨浩,赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000(1): 11-17.
- [11] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其进展研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.

- [12] 温丽燕,王选峰. 侵蚀及土地利用管理方式改变对土壤有机碳的影响[J]. 土壤肥料科学, 2007, 23(7): 362-365.
- [13] 贾松伟,贺秀斌,陈云明. 侵蚀逆境下土壤有机碳的迁移[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 78-80.
- [14] 张东辉,施明恒,金峰,等. 土壤有机碳转化与迁移研究概况[J]. 土壤, 2000(6): 305-309.
- [15] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [16] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究总论[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [17] Garten C T, Post W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the Southern Appalachian Mountains[J]. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115-145.
- [18] Fang Jingyun, Chen Anping, Peng Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(22): 2320-2322.
- [19] Anatoly S, Sten N, Vjacheslav R. Possibilities for increased carbon sequestration through the implementation of rational forest management in Russia[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, 94(1-2): 137-162.
- [20] Dvid P T, Greg J K. Carbon sequestration by forests of the United States: Current status and projections to the year 2040[J]. Tellus, 1995, 47(1/2): 232-239.
- [21] Sten N, Wolfgang S. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program[J]. Climatic Change, 1995, 30(3): 267-293.
- [22] 季志平,苏印泉,贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 54-57.
- [23] 李跃林,胡成志,张云,等. 几种人工林土壤碳储量研究[J]. 福建林业科技, 2001, 31(4): 5-7.
- [24] 方晰,田大伦,项文华,等. 杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 418-423.
- [25] 吴建国,张小全,徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [26] 张城,王绍强,于贵瑞. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 97-102.
- [27] 攀后保,袁颖红,王强,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(1): 1-6.
- [28] 吴金水,董成立,刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 131-137.
- [29] 周德成,赵淑清,朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响:以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1877.
- [30] 贾宇平,苏志珠,段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 21-34.
- [31] 徐香兰,张科利,徐宪利,等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 13-15.
- [32] 李凤民,徐进章,张国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [33] 王进鑫,余清珠,刘增文,等. 人工刺槐改造更新林地土壤理化性质的变化及肥力评价[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(S): 47-52.
- [34] 彭文英,张科利,陈瑶,等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.

(上接第 269 页)

- [13] 蔡迪花,王润元,郭锐,等. 民勤春小麦 NDVI 与产量的关系及其对气候变暖的响应[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 376-382.
- [14] 杜加强,舒俭民,张林波. 1982—2006 年黄南州 NDVI 年际变化及其与气候的关系[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 229-234.
- [15] 毛德华,王宗明,宋开山,等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292.
- [16] 王卫,陈建飞. 广东省封开县 NDVI 变化对气候因子的响应[J]. 热带地理, 2010, 30(2): 151-155.
- [17] 王强,张勃,戴声佩,等. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [18] 王海军,靳晓华,李海龙,等. 基于 GIS 和 RS 的中国西北 NDVI 变化特征及其与气候变化的耦合性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 194-203.
- [19] 索玉霞,王正兴,刘闯,等. 中亚地区 1982 年至 2002 年植被指数与气温和降水的相关性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1422-1429.
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 37-40.