

黄土丘陵区退耕还林土壤不同大小颗粒固碳过程与速率

佟小刚^{1,2} 韩新辉³ 李 娇¹ 马建业^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境研究重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示黄土丘陵区退耕还林土壤固碳过程及其变化机制,采用物理分组法探讨了安塞纸坊沟退耕 15 ~ 45 a 刺槐与柠条林地土壤砂粒、粉粒、黏粒截存有机碳的效应与速率。结果表明,对比坡耕地,两种退耕林地土壤颗粒结合碳含量均随退耕年限延长显著增加,并且表层 0 ~ 10 cm 土壤增幅最高,10 ~ 60 cm 各土层增幅基本接近。退耕 15 ~ 45 a 期间,刺槐与柠条林 0 ~ 20 cm 土层均以粉粒碳密度增速最高,分别达 0.21、0.11 Mg/(hm²·a),砂粒碳和黏粒碳增速相近,平均分别为 0.13、0.06 Mg/(hm²·a)。同样的变化发生在 0 ~ 60 cm 土层,但各颗粒碳密度增速为 0 ~ 20 cm 土层的 1.6 ~ 2.5 倍。按此增速到退耕 45 a 时柠条林地砂粒碳、粉粒碳、黏粒碳相比坡耕地分别增大了 2.6、1.1、0.8 倍,刺槐林地则分别增大了 8.3、2.2、2.8 倍,并且对总有机碳累积贡献的平均比率为:砂粒碳(23%)等于黏粒碳(26%)且均小于粉粒碳(51%)。此外碳库管理指数比碳库活度与土壤总有机碳库变化有更显著的线性相关性。综上分析,该区域退耕刺槐林比柠条林土壤有更强的固碳效应,两种林地均以粉粒碳为主要固碳组分,以砂粒碳周转速率最快。

关键词: 黄土丘陵区; 退耕还林; 土壤有机碳; 土壤颗粒; 固碳

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0117-08

Process and Sequestration Rate of Carbon in Soil Particle-size Fractions Following Conversion of Cropland to Forest in Loess Hilly Region

Tong Xiaogang^{1,2} Han Xinhui³ Li Jiao¹ Ma Jianye^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the loess hilly region of China, a large amount of arable land has been replaced by artificial forests, resulting in increased storage of soil organic carbon (SOC). To elucidate the process and mechanisms of SOC sequestration following conversion of cropland to forest, the storage and sequestration rates of SOC associated with sand, silt and clay was measured by physical fractionation on *Robinia* (*Robinia pseudoacacia* L.) and *Caragana* (*Caragana korshinskii*) lands that have been stood on former cropland for 15 ~ 45 a. Compared with cropland, the content of carbon in all soil particle-size fractions on all afforested lands was significantly increased with the stand time. Moreover, the highest increase of carbon was in the top soil layer (0 ~ 10 cm) and similar increase amplitude of carbon was found in 10 ~ 60 cm soil layers. During the 15 ~ 45 a afforestation on former cropland, the highest annual sequestration rates of carbon stock in 0 ~ 20 cm soil depths was in silt, which were 0.21 Mg/(hm²·a) and

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-02-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41301602)、国家林业公益性行业科研专项(201304312)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452015269)
作者简介: 佟小刚(1979—),男,讲师,博士,主要从事土壤固碳过程与机理研究,E-mail: xiaogangtong@126.com
通信作者: 韩新辉(1980—),女,副教授,主要从事生态恢复系统碳氮循环研究,E-mail: hanxinhui2011@126.com

0.11 Mg/(hm²·a), and similar sequestration rate of carbon was in sand with average value of 0.13 Mg/(hm²·a) and in clay was 0.06 Mg/(hm²·a) on *Robinia* and *Caragana* lands, respectively. The same changing trend also occurred in 0 ~ 60 cm soil depth, and sequestration rate of carbon associated with all mineral particles was 1.6 to 2.5 times higher than those in 0 ~ 20 cm soil depth. Following the annual increase rates, the carbon stocks in sand, silt and clay were varied by 2.6, 1.1 and 0.8 times on *Caragana* land, and those were varied by 8.3, 2.2, 2.8 times on *Robinia* land respectively after 45 years conversion of cropland to forest. The average percentage that contributed to accumulation of total SOC in different mineral particles was in the order: silt carbon (51%) > clay carbon (26%) = sand carbon (23%). Additionally, there was a more significant linear correlation between SOC content and carbon management index (CMI) than the linear correlation between SOC content and activity of carbon pool (A). In conclusion, long term stand *Robinia* on former cropland sequestered more SOC than stand *Robinia* in the area. However, carbon in slit was the main fraction for carbon sequestration and carbon in sand showed the fastest turnover rate on both afforested lands.

Key words: loess hilly region; conversion of cropland to forest; soil organic carbon; particle-size fractions; carbon sequestration

引言

生态造林通过植被恢复引起的土壤碳汇效应已受到广泛的认可^[1-3]。我国大规模退耕还林工程实施下 40 cm 深土壤固碳速率可达 1.1 Mg/(hm²·a)^[4]。PAUL 等^[2]综述分析得出欧洲原本耕地上造林可使 30 cm 深土壤碳库以 0.56 Mg/(hm²·a) 的速率增加。可见,人们对人工造林下土壤碳库的数量变化已有了深刻认识。但由于土壤有机碳是由活性、功能、周转速率不同的组分构成的复合体,其总量的变化还难以回答土壤碳库响应生态措施的变化过程与机制^[5]。因此,碳分组成成为目前认知土壤碳库动力学过程 and 变化机制的研究热点^[6]。如人工造林下土壤氧化活性有机碳、轻组碳、不同粒径团聚体碳组分^[7-9]的研究表明它们比土壤总有机碳对生态措施的响应更敏感。以氧化活性有机碳计算的碳库管理指数还可作为造林影响有机碳库数量和性质变化的指标^[10]。这些碳组分周转快,能够良好反映土壤碳库的变化趋势,但对认知土壤稳定固持碳的过程却很有限。近年来,以土壤质地组成,即按砂粒、粉粒、黏粒等不同大小土壤颗粒结合碳分组的研究技术开始受到关注^[5,11]。已有研究认为砂粒(53 ~ 2 000 μm)中的有机碳与砂粒结合并不紧密,功能上属于活性有机碳^[6,12];粉粒(2 ~ 53 μm)和黏粒(小于 2 μm)通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附有机碳,形成惰性矿物结合态有机碳^[6,13],是土壤固持有机碳的重要碳组分库^[11,14]。可见该分组方法提供了一个可以从活性和惰性碳库两个方面同时探究土壤碳库变化过程及机制的有效方法。这种物理分组方法在研究农业措施^[15-17]、不同土地利用方

式^[11,18]影响土壤碳库变化上已有较多应用,但还鲜有用于退耕还林土壤碳库变化的研究。因此,本研究在我国重点退耕还林区黄土丘陵区,选择不同退耕年限的刺槐与柠条林地,利用该研究技术探究土壤不同大小颗粒结合碳组分演化过程与累积效应,以期丰富退耕还林土壤固碳理论及生态固碳技术选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省纸坊沟流域(109°13'46" ~ 109°16'03"E,36°46'42" ~ 36°46'28"N),该区地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,暖温带半干旱季风气候,海拔 1 010 ~ 1 400 m,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505.3 mm。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,有机质含量低、抗侵蚀能力差,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。该流域生态系统自 20 世纪 60、70 年代开始由破坏期转向逐渐稳定和恢复期,至 20 世纪 90 年代初进入良性生态初步形成期,这主要是多年的水土保持综合治理和开展林草植被工程等措施建设下,有效遏制了该流域的土壤侵蚀,成功地恢复了退化生态系统^[19]。目前,该区域林地面积从 1980 年不足 5% 增加到目前 40% 以上,流域生态经济系统进入良性循环阶段^[19]。说明该区域已拥有了长期不同灌木林、乔木林及经济林等退耕还林类型,这为本研究提供了良好的自然研究基础。

1.2 样地选取及采样

基于时空互代法,2014 年 9 月于研究区选择退耕还林年限为 15 a、35 a、45 a 的柠条(*Caragana*

korshinskii) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 2 种退耕还林地样地,并以邻近长期坡耕地为对照。样地土壤类型均为黄绵土,砂粒、粉粒、黏粒含量并未随退耕年限发生显著变化,平均分别为 9.1%、81.0%、9.6%(表 1)。各样地其他基本特征见表 1。每种还林地都选择 4 个条件基本一致的重复样地进行采样。在每个样地内,设置 20 m×20 m 标准采样

区。采样时先除去地面凋落物,按照“S”型选 12 点,以直径 5 cm 土钻钻取 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 共 4 层林下及草本植物覆盖下土样,以客观代表退耕还林地土壤。每层取样点土样混合后作为该层待测土样。同时,在每个标准采样区挖取剖面,采用环刀法测定各土层容重,以计算土壤有机碳密度。土壤样品自然风干后研磨过 2 mm 筛备用。

表 1 样地基本特征及 0~20 cm 深土壤理化性质

Tab. 1 Characteristics of sampling sites and physical and chemical properties in 0~20 cm soil

样地	坡位	坡度/ (°)	种植密度/ (株·hm ⁻²)	容重/ (g·cm ⁻³)	砂粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	pH 值	林下主要草本种类
坡耕地	坡中部	23	—	1.43	9.5	81.8	8.7	8.21	荞麦
柠条(15 a)	坡中上部	25	1 418	1.35	8.7	81.7	9.6	8.17	铁杆蒿、长芒草、艾蒿
柠条(30 a)	坡中部	24	1 302	1.28	9.1	80.6	10.3	8.15	胡枝子-长芒草
柠条(45 a)	坡中上部	26	1 358	1.23	10.7	80.4	8.9	8.12	长芒草
刺槐(15 a)	坡中部	23	1 076	1.26	9.4	81.9	8.7	8.13	铁杆蒿-长芒草
刺槐(30 a)	坡中上部	27	950	1.29	9.3	79.9	10.8	8.02	长芒草、狗尾草
刺槐(45 a)	坡中部	26	970	1.31	8.8	80.7	10.5	7.89	长芒草、狗尾草

1.3 不同大小土壤颗粒结合碳的分离和测定

采用 ANDERSON 等^[20]和武天云等^[21]描述的方法,并略作修改(图 1):称取 20 g 风干土样于 250 mL 烧杯,加水 100 mL,在超声波发生器清洗槽中超声分散 30 min,然后将分散悬浮液冲洗过 53 μm 筛,直至洗出液变清亮为止。在筛上得到是 53~2 000 μm 的砂粒和半分解植物残体。根据 Stockes 定律计算每一个粒级颗粒分离的离心时间,用水平转离心机对洗出液进行离心。通过不同的离心速度和离心时间分离得到粉粒结合有机质组分(2~53 μm)和黏粒结合有机质组分(小于 2 μm)。其中黏粒悬液采用 0.2 mol/L CaCl₂絮凝,再离心收集。以上砂粒、粉粒及黏粒的粒径分级基本以美国农部制为准。各组分转移至铝盒后,先在水浴锅上蒸干,然后置于烘箱内,60℃ 下干燥 12 h。干燥后各组分磨细过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾法测定有机碳含量^[22],并以砂粒碳、粉粒碳、黏粒碳表示与土壤不同颗粒组分结合的有机碳。

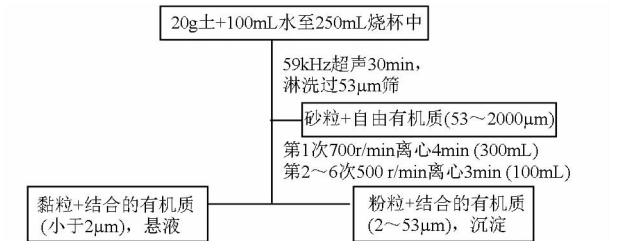


图 1 土壤不同大小颗粒组分分离流程
Fig. 1 Flow chart of soil particle-size fractionation

1.4 数据计算与统计分析

土壤有机碳密度是指单位面积一定厚度的土层

中有机碳的质量,可以指示土壤有机碳的储量。对不同土层土壤总有机碳及其颗粒结合有机碳密度计算式^[23]为

$$S_i = C_i \rho_i D_i / 10 \tag{1}$$

式中 S_i ——第 i 层土壤有机碳密度, Mg/hm²
 C_i ——第 i 层总有机碳或颗粒碳质量比, g/kg
 ρ_i ——第 i 层土层容重, g/m³
 D_i ——第 i 层土层厚度, cm

0~60 cm 土层有机碳密度则为各层土壤有机碳密度之和。退耕 45 a 后各林地不同土层土壤颗粒结合有机碳增量对土壤累积碳总量的贡献百分比计算式为

$$R_i = \frac{C_{Fi\ forestland} - C_{Fi\ cropland}}{C_{Ti\ forestland} - C_{Ti\ cropland}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 R_i ——第 i 层土壤不同颗粒碳贡献百分率
 $C_{Fi\ forestland}$ ——退耕 45 a 还林地第 i 层土壤颗粒碳质量比, g/kg
 $C_{Fi\ cropland}$ ——坡耕地第 i 层土壤颗粒碳质量比, g/kg
 $C_{Ti\ forestland}$ ——退耕 45 a 还林地第 i 层土壤总有机碳质量比, g/kg
 $C_{Ti\ cropland}$ ——坡耕地第 i 层土壤总有机碳质量比, g/kg

退耕还林地不同土层土壤碳库管理指数以坡耕地土壤为参考,并且以砂粒碳为活性碳,以粉粒碳和黏粒碳之和为非活性碳。碳库管理指数(CPI)计算式^[10]为

$$CMI = CPI \times AI \times 100 \tag{3}$$

式中 CPI ——碳库指数,其值为林地样品全碳质量比(g/kg)除以参考土壤全碳质量比(g/kg)

AI ——碳库活度指数,其值为林地样品碳库活度 A 除以参考土壤碳库活度

A ——碳库活度,其值为活性碳质量比(g/kg)除以非活性碳质量比(g/kg)

不同退耕还林地及土层中总有机碳和颗粒结合有机碳含量、密度、贡献比例以及 CMI 等差异显著性采用 LSD 进行检验分析($P < 0.05$)。土壤有机碳密度年变化速率以有机碳密度与退耕年限的线性回归方程斜率确定。以上实验结果的统计与分析采用 SPSS 21.0 软件进行,图采用 SigmaPlot 12.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳含量变化

不同退耕年限还林地土壤各土层总有机碳含量均比坡耕地的显著增加(图 2)。刺槐林地各土层土壤总有机碳含量由小到大依次为退耕 15 a、30 a、45 a。相比坡耕地,退耕 15~45 a 年总有机碳质量比从表层 0~10 cm 土壤中增加 2.3~11.2 g/kg 到深层 40~60 cm 土壤增加 0.9~4.1 g/kg。相对地,柠条林地仅在表层 0~10 cm 土壤中总有机碳质量比随退耕年限延长而持续显著增加,且增幅为退耕 15 a 时的 1.7 g/kg 到 45 a 时的 6.1 g/kg。在 10 cm 以下各土层,45 a 的柠条林地总有机碳质量比并未比 35 a 的显著提高,但都显著高于 15 a。与坡耕地相比,退耕 15~45 a 年柠条林地 10~60 cm 各土层总有机碳增幅为 0.6~2.5 g/kg。总体可见,刺槐林地土壤比柠条林地土壤具有更强固碳效应。

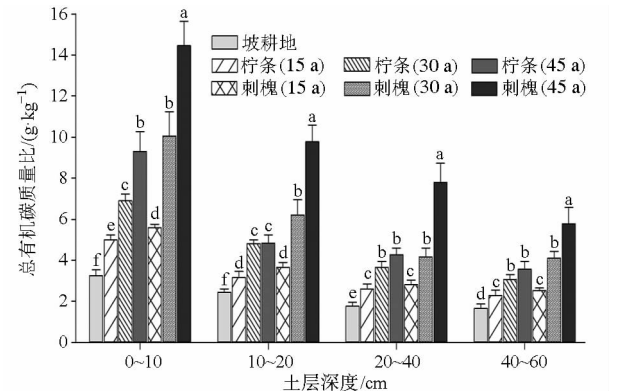


图 2 不同退耕年限刺槐与柠条林地土壤总有机碳含量
Fig. 2 Contents of total SOC following afforestation age of *Robinia* and *Caragana* on former cropland

2.2 土壤不同大小颗粒结合碳含量变化

长期退耕还林下柠条与刺槐林地土壤不同颗粒结合的有机碳含量增幅表现出显著的差异(图 3)。

对比坡耕地,两种林地砂粒碳增幅均随土层加深减小(图 3a)。在表层 0~10 cm 土壤,刺槐和柠条林地砂粒碳增幅分别从退耕 15 a 的 0.7 g/kg 和 0.4 g/kg 到退耕 45 a 的 1.6 g/kg 和 4.2 g/kg。在 10~20 cm 土层退耕 15~45 a 的刺槐林地砂粒碳增幅为 0.2~1.9 g/kg,而柠条林仅为 0.2~0.5 g/kg。20~40 cm 和 40~60 cm 土层,刺槐林地砂粒碳在退耕 30 a 和 45 a 时比坡耕地平均显著高 0.5 g/kg;柠条林砂粒碳仅在退耕 45 a 时比坡耕地平均显著高出 0.3 g/kg。

各土层刺槐林地粉粒碳和黏粒碳含量由小到大依次为退耕 15 a、30 a、45 a,并且都显著高于坡耕地(图 3b、3c)。退耕 15~45 a 粉粒碳和黏粒碳在 0~10 cm 表层增幅最高,分别达到 1.1~3.7 g/kg 和 0.5~2.3 g/kg。相同退耕年限下 10~60 cm 各土层粉粒碳和黏粒碳增幅接近,退耕 15~45 a 增幅平均分别为 0.8~2.8 g/kg 和 0.3~1.5 g/kg。不同退耕年限柠条林各土层粉粒碳和黏粒碳亦显著高于坡耕地。其中表层土粉粒碳含量由小到大表现为退耕 15 a、30 a、45 a,对比坡耕地,增幅分别为 0.5、1.5、

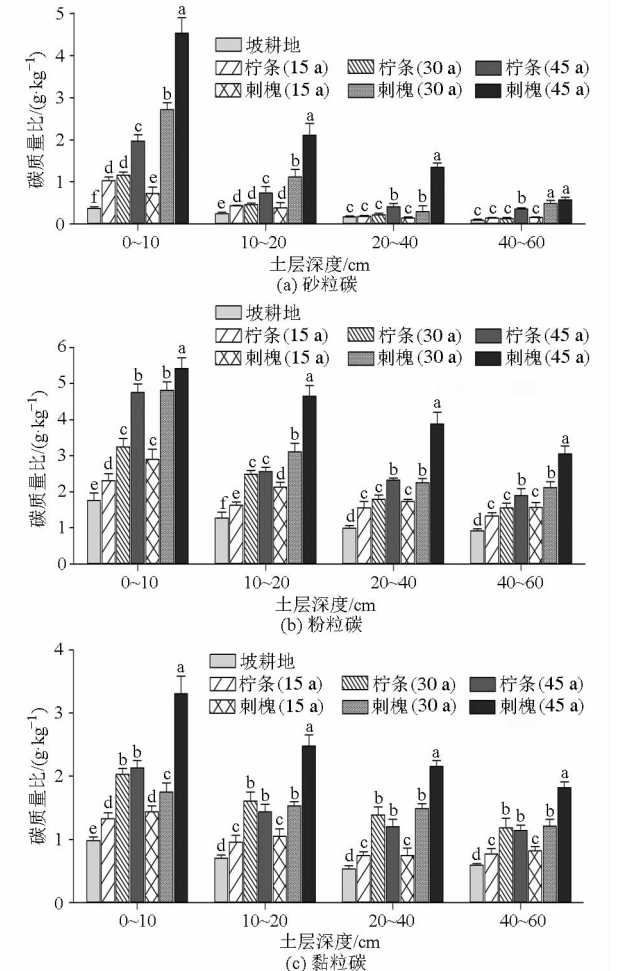


图 3 不同退耕年限刺槐与柠条林地土壤砂粒碳、粉粒碳、黏粒碳含量
Fig. 3 Contents of organic carbon in sand, silt and clay following afforestation age of and on former cropland

3.0 g/kg。在 10~20 cm 土层粉粒碳在退耕 30 a 和退耕 45 a 时并无显著差异,平均比坡耕地显著增加 1.2 g/kg。到 20~40 cm 土层和 40~60 cm,以退耕 45 a 时粉粒碳增幅最高,平均为 1.2 g/kg,而退耕 30 a 和 15 a 粉粒碳含量并无显著差异,平均增幅为 0.6 g/kg。

柠条林各土层中黏粒碳含量则为退耕 45 a 与 30 a 相同且高于 15 a。对比坡耕地,退耕 15~45 a 黏粒碳在 0~10 cm 表层增幅达到 0.3~1.2 g/kg,在 10~60 cm 各土层黏粒碳增幅平均为 0.2~0.8 g/kg。

2.3 土壤不同大小颗粒固碳速率

两种林地土壤总有机碳及不同颗粒结合有机碳密度均随退耕年限延长呈直线增长趋势(图 4、5)。图中“*”和“**”分别表示线性回归方程决定系数 R^2 的显著性达到 0.05 和 0.01 水平。 y_T 、 y_X 、 y_Y 、 y_Z 分别代表土壤总碳、砂粒碳、粉粒碳和黏粒碳。45 a 柠条林 0~20 cm 和 0~60 cm 土壤总有机碳密度比坡耕地分别增加了 1.5 倍和 1.2 倍,对应总有机碳的年增长速率分别为 0.21 Mg/(hm²·a) 和

0.49 Mg/(hm²·a)。砂粒碳、粉粒碳及黏粒碳亦对总有机碳的增加表现出积极作用,增加的速率在 0~20 cm 土层分别为 0.05、0.11、0.06 Mg/(hm²·a),在 0~60 cm 土层,年增加速率分别为 0.08、0.25、0.14 Mg/(hm²·a)。这相当于到退耕 45 a 时柠条林两个土层砂粒碳、粉粒碳及黏粒碳平均分别比坡耕地增加了 2.6、1.1、0.8 倍。刺槐林地 0~20 cm 和 0~60 cm 土壤总有机碳密度年增加速率分别达到 0.53、1.13 Mg/(hm²·a),相当于退耕 45 a 时总有机碳密度分别增加 2.9、2.6 倍。其中砂粒碳、粉粒碳及黏粒碳年增长速率在 0~20 cm 土层分别达到 0.18、0.21、0.11 Mg/(hm²·a),在 0~60 cm 土层分别达到 0.28、0.49、0.28 Mg/(hm²·a)。这相当于到退耕 45 a 时刺槐林两个土层砂粒碳、粉粒碳及黏粒碳平均分别比坡耕地增加了 8.3、2.2、2.0 倍。总体上,刺槐林土壤总碳及其组分固碳速率平均是柠条林的 2.3 倍,但两种林地土壤不同颗粒结合碳均以粉粒碳年增长速率最高,以砂粒碳周转速率最快。

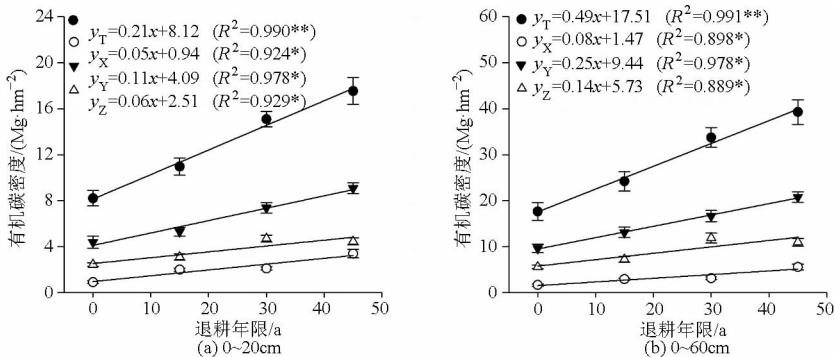


图 4 柠条林土壤总有机碳及颗粒结合碳密度与退耕年限的线性回归关系

Fig. 4 Linear regression relationship between afforestation age and stock of carbon in whole soil and size fractions land

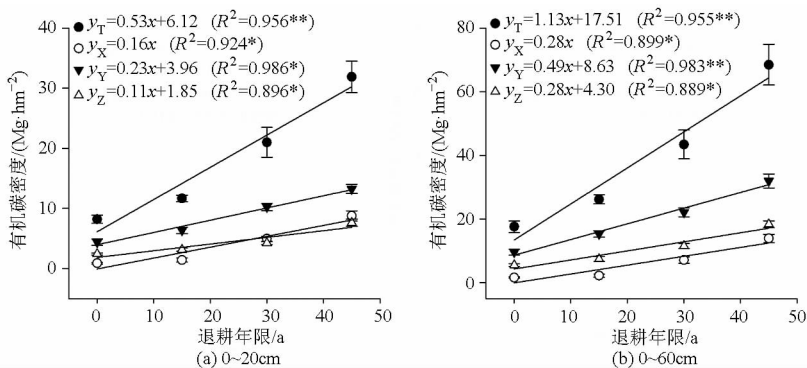


图 5 刺槐林土壤总有机碳及颗粒结合碳密度与退耕年限的线性回归关系

Fig. 5 Linear regression relationship between afforestation age and stock of carbon in whole soil and size fractions land

2.4 土壤不同大小颗粒固碳比例

图 6 显示经过 45 a 的退耕林地恢复过程,两种林地 0~60 cm 土层中不同颗粒的对总碳增加的平均贡献率表现为:黏粒碳(26%)与砂粒碳(23%)相等且均小于粉粒碳(51%)。从不同土层看,刺槐林

砂粒碳贡献率由表层(0~10 cm)土的 41% 降低到深层(40~60 cm)土的 12%,同样柠条林地砂粒碳贡献率则由 28% 降低到 14%。粉粒碳贡献率在柠条林地不同土层基本接近,平均为 54%,在刺槐林地由表层土的 36% 提高到深层土的 56%。两种林

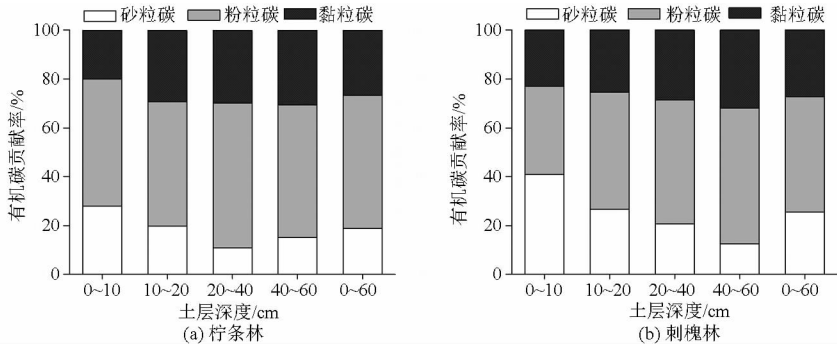


图 6 退耕 45 a 柠条林和刺槐林地土壤不同颗粒结合碳对土壤总碳增加的贡献率

Fig. 6 Percentages of carbon in size fractions contributed to accumulation of total SOC after 45 years returning cropland to and land

地黏粒碳的平均贡献率则由表层土的 21% 提高到深层土的 30%。

2.5 土壤碳库管理指数与总碳变化关系

随退耕还林年限延长,两种林地土壤 CMI 持续显著增加,碳库活度 A 亦发生显著变化,但其在不同林地间变化差异不如 CMI 明显(表 2)。刺槐林不同土层土壤 CMI 由大到小依次为退耕 45 a、30 a、15 a,柠条林地不同土层 CMI 均为退耕 30 a 与 15 a 相等且小于退耕 45 a。与坡耕地相比,两种林地除 20~40 cm 土层退耕 15 a 土壤 CMI 无显著变化外,刺槐林各土层 CMI 平均增幅从退耕 15 a 的 0.8 倍到退耕 45 a 的 9.6 倍,柠条林各土层 CMI 在退耕 15 a 和 30 a 平均增幅是 1.1 倍,到退耕 45 a 时 CMI 平均增幅达 3.0 倍。从碳库活度 A 来看,不同退耕年限柠条林地 A 仅在表层 0~10 cm 比坡耕地平均显著增加 1.1 倍,其他仅在退耕 45 a 时使 10~20 cm 和 40~60 cm 土层比坡耕地显著提高 0.6 倍和 1.0 倍。刺槐林不同土层 A 基本都在退耕 30 a 和退耕 45 a 时才比坡耕地显著增加,平均增幅从 0~10 cm 表层土的 2.6 倍到 40~60 cm 土层的 1.1 倍。

总有机碳含量与碳库管理指数和碳库活度均存在显著的线性相关性(图 7),但两种林地地下线性相关性决定系数 R^2 在总有机碳和 CMI 间均达到了 $P < 0.01$ 显著水平,而总有机碳和 A 之间的 R^2 仅在刺槐林地达到 $P < 0.01$ 显著水平。同时, R^2 值在总有机碳和 CMI 间也高于其在总有机碳和 A 之间。可见,

CMI 和 A 都对碳库变化有显著的正响应关系,但 CMI 对碳库变化更敏感。

表 2 不同退耕年限下退耕林地土壤碳库活度与碳库管理指数变化

样地	碳库活度(A)				碳库管理指数(CMI)			
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
坡耕地	0.13 ^b	0.12 ^b	0.11 ^b	0.06 ^b	100 ^f	100 ^e	100 ^e	100 ^e
柠条(15 a)	0.28 ^a	0.17 ^{ab}	0.08 ^b	0.07 ^b	324 ^d	175 ^d	107 ^{cd}	160 ^d
柠条(30 a)	0.22 ^a	0.11 ^b	0.07 ^b	0.05 ^b	389 ^d	178 ^d	140 ^d	150 ^d
柠条(45 a)	0.29 ^a	0.19 ^a	0.12 ^b	0.12 ^a	610 ^c	296 ^c	252 ^b	430 ^c
刺槐(15 a)	0.17 ^b	0.12 ^b	0.06 ^b	0.06 ^b	215 ^e	148 ^d	84 ^d	164 ^d
刺槐(30 a)	0.41 ^c	0.24 ^a	0.08 ^b	0.14 ^a	954 ^b	495 ^b	265 ^b	603 ^b
刺槐(45 a)	0.52 ^c	0.30 ^a	0.22 ^a	0.12 ^a	1 715 ^a	959 ^a	871 ^a	693 ^a

注:同列数值后不同小写字母表示不同退耕还林地之间差异显著, $P < 0.05$ 。

3 讨论

长期退耕还林刺槐和柠条林地土壤表层 0~20 cm 深土层分别以 0.21 和 0.53 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 速率显著增加,0~60 cm 土层增速则为表层土的 2.5 倍。这在 ZHANG 等^[3]和 SHI 等^[4]综述得出的我国退耕还林土壤 0~20 cm 和 0~40 cm 土层 0.35~1.07 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的固碳速率范围内。当贫瘠坡耕地被林地替代后,植被恢复通过凋落物和根系投入

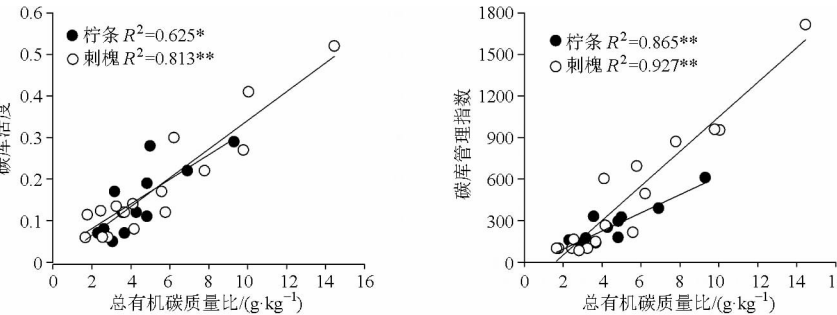


图 7 柠条与刺槐林地土壤总有机碳含量与碳库活度和碳库管理指数线性相关性
Fig. 7 Linear correlation between total SOC with A and CMI and land

碳是土壤碳库显著增加的直接原因^[2,23]。本研究中刺槐林土壤碳库增幅是柠条林的两倍多,也是因为刺槐林有更多的植物碳返还土壤^[24]。两种林地砂粒碳数倍的增加也说明有大量植物碳进入土壤。因为砂粒碳主要由有机残体和半分解有机质组成^[25],对凋落物和根系输入较敏感。并且以砂粒碳计算的碳库管理指数与总有机碳变化成极显著的线性相关性,说明这与原本以氧化活性有机碳计算的碳库管理指数对土壤碳库变化有同样良好的指示作用^[10],亦说明砂粒碳属于活性有机碳组分,能够快速反映土壤碳库响应退耕还林措施的变化过程。

粉粒和黏粒通过吸附作用结合有机碳形成抗分解能力较强的有机无机复合体,是土壤稳定和固持土壤有机碳的重要机制之一^[5,13]。本研究中两种林地下粉粒碳和黏粒碳均随退耕还林年限延长显著增加,贡献了总碳累积增加量的 76%。但其中以粉粒碳累积比例和增加速率最高,说明该组分是退耕还林土壤固定有机碳的主要形式,这与土中粉粒组分质量占到全土的 81% 直接相关,同时粉粒结合的碳高度腐殖化,较难分解^[5,20]。黏粒组分质量虽然只占全土质量 10%,却贡献了 26% 的总有机碳累积量。并且黏粒结合的碳还包括自微生物的代谢产物^[5,25],因而它在土壤碳转移和固定中都有重要作用。已有研究也表明土壤碳库含量与土壤黏粒含量成显著的正比例关系^[5]。另外,有报道由于粉

粒和黏粒表面积有限,因此认为土壤颗粒实际结合碳的总量也有限,即土壤固存碳存在饱和点^[14,26]。本研究 45 a 期间不同颗粒结合碳含量均与退耕年限呈直线增长关系,并且黏粉粒质量占到全土的 90%,因此可判断黄土丘陵区土壤碳库还远未达到其最大的碳容量。

4 结论

(1) 退耕还林 45 a 使刺槐和柠条林地土壤总有机碳库分别比坡耕地增加了 2.7 倍和 1.4 倍,说明退耕种植刺槐比柠条有更强的固碳效应。退耕林地总碳及各颗粒结合碳组分含量均随退耕时间延长呈直线增长趋势,可预见黄土丘陵区土壤碳库的仍具有较大的固碳潜力。

(2) 土壤砂粒、粉粒、黏粒结合碳均随退耕还林年限延长显著增加,其中土壤总有机累积量的一半都来自粉粒碳含量的增加,并且该组分碳年际增速显著高于砂粒碳和黏粒碳组分,是该区域退耕还林土壤截存碳的主要形式。砂粒碳组分变化的幅度显著高于粉粒碳和黏粒碳,具有较高的周转速率,能够快速响应生态措施引起的变化。由砂粒碳作为活性碳计算的碳库管理指数亦与土壤总有机碳含量呈现显著的线性相关关系,说明该指数可以较好描述退耕还林土壤有机碳库的变化过程。

参 考 文 献

- 1 POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317–327.
- 2 PAUL K I, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1): 241–257.
- 3 ZHANG K, DANG H, TAN S, et al. Change in soil organic carbon following the ‘Grain - for - Green’ programme in China [J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(1): 13–23.
- 4 SHI J, CUI L. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 98(2): 75–85.
- 5 VON LÜTZOW M, KÖGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183–2207.
- 6 武天云, SCHOENAU J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717–722.
WU T Y, SCHOENAU J J, LI F M, et al. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717–722. (in Chinese)
- 7 安娟娟, 陈少锋, 赵发珠, 等. 不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 985–991.
AN J J, CHEN S F, ZHAO F Z, et al. Changes of soil labile organic carbon and carbon management index under different artificial vegetation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 985–991. (in Chinese)
- 8 ZHANG J, SONG C, YANG W. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 660–679.
- 9 AN S, MMENTLER A, MAYER H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau China [J]. *CATENA*, 2010, 81: 226–233.
- 10 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(3): 466–473.

- TONG X G, HAN X H, YANG G H, et al. Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(3): 466–473. (in Chinese)
- 11 HE N, WU L, WANG Y, et al. Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China [J]. *Geoderma*, 2009, 150(3–4): 302–308.
- 12 CAMBARDELLAI C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- 13 SPOSITO G, SKIPPER N T, SUTTON R, et al. Surface geochemistry of the clay minerals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999, 96(7): 3358–3364.
- 14 HASSINK J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77–87.
- 15 刘骅, 佟小刚, 马兴旺, 等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合碳的含量及其演变特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 84–90.
- LIU H, TONG X G, MA X W, et al. Content and evolution characteristics of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 84–90. (in Chinese)
- 16 花可可, 朱波, 杨小林, 等. 长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 167–174.
- HUA K K, ZHU B, YANG X L, et al. Effects of long-term different fertilization on soil aggregates and organic carbon fractions on sloping upland of purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 167–174. (in Chinese)
- 17 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 157–164.
- FAN H Z, ZHANG J H, WANG Y, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 157–164. (in Chinese)
- 18 ARAI H, TOKUCHI N. Soil organic carbon accumulation following afforestation in a Japanese coniferous plantation based on particle-size fractionation and stable isotope analysis [J]. *Geoderma*, 2010, 159(3–4): 425–430.
- 19 薛蕙, 刘国彬, 潘彦, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(4): 1458–1464.
- XUE S, LIU G B, Pan Y, et al. Evolution of soil labile organic matter and carbon management index in the artificial robinia of Loess Hilly area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4): 1458–1464. (in Chinese)
- 20 ANDERSON D W, SAGGAR S, BBETTANY J R, et al. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(4): 767–772.
- 21 武天云, SCHOENAU J J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 477–481.
- WU T Y, SCHOENAU J J, LI F M, et al. Soil particle size fractionation with centrifugation method [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 477–481. (in Chinese)
- 22 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 23 ZHANG C, LIU G, XUE S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 54: 16–24.
- 24 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[J]. *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 [J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2009, 45(10): 14–18. (in Chinese)
- 25 SIX J, GUGGENBERGER G, PAUSTIAN K, et al. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 607–618.
- 26 LIAO J D, BOUTTON T W, JASTROW J D. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(11): 3184–3196.