

黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子

曲卫东¹, 陈云明^{2†}, 王琳琳³, 张飞⁴, 张学伍¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100 陕西杨凌;
3. 榆林市绿巨人水利设计有限责任公司, 719000 陕西榆林; 4. 华东勘测设计研究院, 310014 杭州)

摘要 以黄土丘陵区柠条人工林为研究对象, 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 探讨柠条生长过程中土壤有机碳储量的变化规律。结果表明: 1) 土壤有机碳主要分布在 0~20 cm 土层, 占 0~50 cm 土层总储量的 49%~63%; 2) 相对于对照地, 柠条林地土壤有机碳储量随柠条生长年限的增加先减小再升高最后趋于稳定, 10、26、40、50 a 柠条林地土壤总有机碳储量分别为 1.555、3.236、2.775、2.444 kg/m², 26 a 林地土壤有机碳储量最高, 随林龄增大其变化趋于稳定; 3) 相关性分析结果表明, 土壤有机碳质量分数与土壤密度之间呈显著负相关关系, 各林地土壤密度随柠条生长年限的增加而减小, 说明柠条可以通过改变土壤性质间接增加土壤总有机碳储量, 土壤有机碳质量分数与根系生物量、土壤全氮质量分数之间呈极显著正相关关系, 说明柠条的根系生长和固氮特性有助于有机碳的积累。

关键词 柠条; 造林; 土壤有机碳密度; 土壤有机碳积累

Dynamics of soil organic carbon in *Caragana microphylla* forest and its relationship with environment factors in loess hilly region

Qu Weidong¹, Chen Yunming², Wang Linlin³, Zhang Fei⁴, Zhang Xuewu¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi; 3. Yulin Green Superman Water Conservancy Design Co., Ltd, 719000, Yulin, Shaanxi; 4. East China Investigation and Design Institute Under CHECC, 310014, Hangzhou: China)

Abstract The variation rule of soil organic carbon density in the growing process of man-made forest was studied by taking *Caragana microphylla* plantation in loess hilly region as the research object with field survey and laboratory analysis. The results indicated as follows: 1) Soil organic carbon are mainly distributed in the 0–20 cm soil layer, which accounted for 49% to 63% of total soil organic carbon content in 0–50 cm soil layer. 2) Compared with the control, the soil organic carbon density of *C. microphylla* plantations decreased firstly, then increased and stabilized finally over growing process. Total soil organic carbon density of *C. microphylla* plantation in age 10 a, 26 a, 40 a, 50 a were respectively 1.555, 3.236, 2.775, 2.444 kg/m². The highest value was in 26a-woodland. It tent to stable over forest age. 3) Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between soil organic carbon content and soil bulk density, soil bulk density decreased over forest age. So it can be concluded that *C. microphylla* could improve soil organic carbon content indirectly by affecting soil characteristics. The soil organic carbon content had significant positive relation with root biomass and the content of total nitrogen, which proved that the root growth and nitrogen fixation characteristics of *C.*

收稿日期: 2011-02-25 修回日期: 2011-04-15

项目名称: 中国科学院百人计划项目“黄土高原半干旱区群落水分平衡与调控机理”(kzcx2-yw-BR-02); 陕西省科学院科技计划重点项目“陕北黄土丘陵区植被恢复及动植物多样性保护关键技术”(2008k-04)

第一作者简介: 曲卫东(1987—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: hkdqwd@163.com

† 责任作者简介: 陈云明(1967—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 生态恢复与水文。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

microphylla contributed to soil organic carbon accumulation.

Key words *Caragana microphylla*; afforestation; soil organic carbon density; soil organic carbon accumulation

土地利用方式的改变会通过土壤微生物以及有机质数量与质量的影响^[1]间接影响到土壤有机质的累积与分解速率^[2],从而引起土壤有机碳库发生相应的变化。有数据统计显示,在过去的150年里,土地利用方式变化释放的碳约占同期因人类活动而释放到大气中碳的33%^[3-4]。造林,作为一种重要的人为土地利用方式和陆地管理活动,能增加陆地碳储量^[5]。贺亮等^[6]对黄土高原中部油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林碳储量和根系、土壤有机碳垂直分布的研究结果表明,根系生物量垂直分布特征明显,土壤有机碳质量分数层次变化平缓,但表层有机碳质量分数最大。张景群等^[7]研究认为,黄土高原刺槐造林可以使土壤有机碳从根系分布区向土壤上层移动,并且能够显著增加土壤有机碳质量分数。柠条(*Caragana microphylla*)因具有强大的防风固沙和保持水土能力在黄土高原和河西走廊等地被大面积种植^[8]。刘方明等^[9]通过研究柠条对科尔沁沙地土壤有机碳积累的影响发现,各土层土壤有机碳储量随柠条种植年限的增加而增加,但研究选取的最大年限为22年,在柠条生长盛期之后的土壤有机碳储量变化尚不明确。笔者以位于陕西省延安市安塞县纸坊沟流域的柠条林地为研究对象,通过对10、26、40和50 a林地的土壤有机碳质量分数及密度的分析,揭示黄土丘陵区灌木造林后土壤碳积累的时间动态变化,以期为当地生态林恢复的生态效益评估和造林工程决策提供参考。

1 研究区自然概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站的纸坊沟流域治理示范区内,该流域地理位置E 109°13'46"~109°16'03",N 36°42'42"~36°46'28",海拔1 100~1 400 m,流域面积8.27 km²;地貌类型属典型黄土丘陵沟壑区,流域内地形破碎,沟壑纵横;气候类型属于温带半干旱气候区,年平均气温8.8℃,干燥度1.5,无霜期157~194 d;年平均降雨量542.5 mm,但年际分布不均,7—9月降雨量占年降雨总量的61.1%,且多暴雨;流域内大部分土壤是在黄土母质上发育而成的黄土幼年土——黄绵土,抗冲抗蚀能力差;植被分区属于暖温带森林草原

过渡带,天然林已遭破坏,乔木以刺槐和小叶杨(*Populus simonii*)等为主,灌丛主要有柠条和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛,草原主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等形成的草原和干草原。

2 材料与方法

2.1 样地设置

在纸坊沟流域内选取坡度、坡向、坡位等立地条件相对一致的样地5块,包括10、26、40和50 a的柠条林地和对照地(2年撂荒地)各1块,样地面积20 m×20 m。样地基本情况见表1。

2.2 样地调查与样品采集

样地调查与样品采集集中在2009年5—6月内完成。样地基本状况调查:在每个样地内沿对角线选取5丛代表性的植株,分别测量其株高、冠幅、分蘖数等基本生长指标,再在5丛代表性植株附近选取3个1 m×1 m小样方(即3次重复),在选定的小样方内进行草本植物种类、地上地下生物量和枯落物量调查,地上生物量采用收获法,地下生物量采用9 cm生物钻收获法^[10],取样深度为0~50 cm,每10 cm取样1次,共取得75个根系样品。生物量和枯落物均在室内以80℃烘干至质量恒定后称量。土壤采集同样在1 m×1 m的小样方内进行,以挖取土壤剖面的方法采集混合土样,采样深度为0~50 cm,每隔10 cm取样1次,共取得75个土壤样品。同时,用环刀(φ5 cm×5 cm)取每个土层的原状土用于测定各层土壤密度。

2.3 分析与计算方法

野外采集的土样在室内风干后,将样品磨碎并过0.25 mm筛用于测定土壤有机碳质量分数和全氮质量分数。有机碳质量分数测定采用GB7857—1987中规定的重铬酸钾-硫酸氧化法测定^[11],全氮质量分数测定采用GB 7173—1987中规定的半微量凯氏法^[11]。土壤密度测定采用环刀法,将装有原状土的环刀在105℃下烘干至质量恒定后称量,计算各土层土壤密度。

表1 样地的立地状况和植被组成

Tab.1 Site characteristics and vegetation composition of the sampled plots

种植年限	海拔	坡度	坡向	坡位	冠幅	现存密度	枯落物厚	总生物量	地表草本 植被
a	m	(°)			m × m	株·hm ⁻²	cm	kg·hm ⁻²	
10	1 142	33	半阴坡	中	1.3 × 1.2	4 020	0.7	12 426.08	赖草
26	1 231	26	阴坡	中	1.5 × 1.4	5 800	2.0	15 242.20	铁杆蒿 + 茭蒿
40	1 130	30	半阴坡	中	1.4 × 1.3	5 040	1.2	13 424.41	铁杆蒿 + 茭蒿
50	1 217	31	阴坡	上	1.4 × 1.6	4 690	1.2	17 100.35	铁杆蒿 + 茭蒿 + 披苔
对照	1 264	31	阴坡	中			0.2	384.20	长芒草

注: 赖草(*Leymus secalinus*)、披苔(*Carex lanceolata*)。

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中有机碳的储量, 一般用 t/hm² 或 kg/m² 表示。本文采用的第 i 层土壤有机碳密度计算公式^[12] 为

$$D_i = C_i B_i H_i / 100$$

式中: D_i 为土壤剖面第 i 层土壤有机碳密度, kg/m²; C_i 为土壤剖面第 i 层土壤有机碳质量分数, g/kg; B_i 为土壤剖面第 i 层土壤密度, g/cm³; H_i 为土壤剖面第 i 层土壤取样时的厚度, cm。

如果某一土壤剖面由 k 层组成, 那么该剖面的总有机碳密度

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k C_i B_i H_i / 100$$

2.4 数据分析

采用 ANOVA 比较不同生长年限林地各土层土壤有机碳质量分数平均值、土壤总有机碳密度、各土层土壤有机碳密度的差异, 并分析土壤有机碳质量分数与根系生物量、土壤密度、全氮质量分数的相关性。所有的统计分析均用 SAS 8.1 统计软件完成。

3 结果与分析

3.1 不同生长年限柠条林地土壤剖面有机碳质量分数分析

对各柠条林地 0 ~ 50 cm 土层土壤有机碳质量

分数的分析结果见表 2 和图 1, 从表 2 可以看出: 随土层深度的增加, 土壤有机碳质量分数逐层减少, 10、26、40、50 a 柠条林地及对照地 40 ~ 50 cm 土壤有机碳质量分数相对于 0 ~ 10 cm 降低幅度分别为 47.9%、72.5%、76.3%、62.4%、52.2%; 10 a 柠条林地 0 ~ 50 cm 土层土壤平均有机碳质量分数与对照地相比下降 18.6%, 并未达到显著水平 ($P > 0.05$)。26 a 柠条林地土壤平均有机碳质量分数最高, 比对照地高 80.3%。40、50 a 柠条林地土壤平均有机碳质量分数与 26 a 的差异不显著, 所以, 自 26 a 之后土壤平均有机碳质量分数变化趋于稳定且仍显著高于对照地(图 1), 说明随着柠条生长年限的增加 0 ~ 50 cm 土层总体是一个碳汇的过程, 其中柠条在 26 a 时(生长旺期), 由于其林分密度和枯落物厚度都达到了其生长过程的最高水平, 所以对碳的积累效应也是最明显的。40、50 a 柠条林地土壤有机碳积累速率略有下降, 由于植物老化, 生长状况不良, 有的树木枯死, 造成林分密度小于低龄林地(26 a), 另外老化林地(40、50 a)的凋落物量相对低龄林有所减小, 通过枯落物分解向土壤输入的有机碳量也减少, 造成了老化林地土壤有机碳质量分数相对较低。

表2 不同种植年限柠条林地土壤有机碳质量分数多重比较结果

Tab.2 Result of multiple comparison for soil organic carbon content over age of *Caragana microphylla* plantation

土层 cm	土壤有机碳质量分数/(g·kg ⁻¹)				
	10 a	26 a	40 a	50 a	对照地
0 ~ 10	3.127 ± 0.746c	9.882 ± 0.978a	9.556 ± 0.463a	6.791 ± 1.032b	4.042 ± 0.467c
10 ~ 20	2.666 ± 0.601b	5.430 ± 1.000a	5.141 ± 0.245a	5.038 ± 0.893a	3.337 ± 0.019b
20 ~ 30	2.119 ± 0.447c	4.200 ± 0.536a	3.330 ± 0.157b	3.305 ± 0.276b	2.479 ± 0.150c
30 ~ 40	1.973 ± 0.274c	3.265 ± 0.415a	2.444 ± 0.196bc	2.813 ± 0.136ab	2.357 ± 0.255bc
40 ~ 50	1.628 ± 0.213d	2.722 ± 0.342a	2.266 ± 0.300bc	2.554 ± 0.123ab	1.931 ± 0.011cd
平均值	2.303 ± 0.448c	5.100 ± 0.483a	4.548 ± 0.076ab	4.100 ± 0.466ab	2.829 ± 0.046c

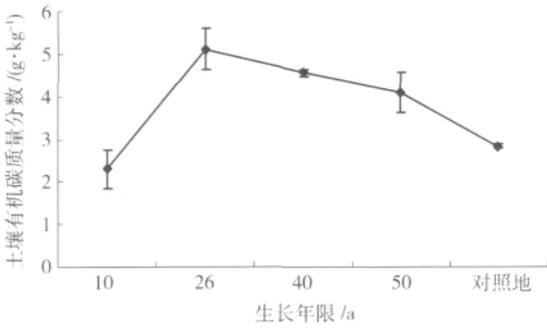


图 1 不同生长年限柠条林地土壤平均有机碳质量分数

Fig. 1 Change of average soil organic carbon content over age of of *Caragana microphylla* plantation

3.2 不同生长年限柠条林地土壤有机碳密度

不同生长年限柠条林地土壤总有机碳密度之间存在极显著差异 ($P < 0.01$) 其变化范围在 1.555 ~ 3.236 kg/m² 之间 (图 2)。其中 26、40、50 a 柠条林地土壤总有机碳密度显著高于 10 a 柠条林地和对照地。与对照地相比 柠条生长前 10 a 有机碳密度在下降, 平均每年减少 0.023 kg/m² 柠条生长初期根系生长迅速 根系在吸收土壤中水分和无机盐的同时, 也因改变了土壤的理化性质或根际微生物生活环境而造成了土壤中有机碳的损失^[8]。10 ~ 26 a 间土壤有机碳密度快速增加, 平均每年增加 0.105 kg/m² 这段时间内增加的碳量对于有机碳积累的贡献最大。26 ~ 40 a、40 ~ 50 a 间的土壤有机碳密度呈稳定变化趋势, 依然显著高于对照地。植被进入衰老期后 植物光合、传输能力下降, 微生物群落的分解作用导致有机碳积累量下降^[13]。

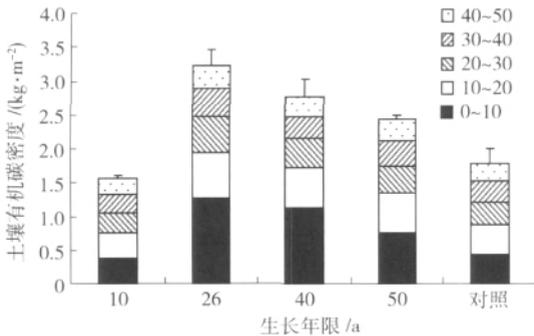


图 2 柠条不同生长年限土壤有机碳密度比较

Fig. 2 Comparison of the soil organic carbon density over age of *Caragana microphylla* plantation

土壤有机碳储量在不同土层的分布也有很大差异 0 ~ 20 cm 土层的土壤有机碳密度占 0 ~ 50 cm 总量的 49% ~ 63%。土壤有机碳主要集中在 0 ~ 20 cm 这与柠条根系的分布基本一致, 坏死根系和枯落物的分解可使有机碳直接输入, 微生物活动和一

些生化反应活跃, 因而有利于土壤有机碳的形成和积累, 反映了人工林土壤有机碳储量受多方面因素的影响, 如土壤的理化性质、土壤生境、凋落物的输入、土壤微生物活动等^[12, 14]。

3.3 柠条林地根系生物量变化对土壤有机碳质量分数的影响

人工柠条林地土壤有机碳质量分数 (y) 与根系生物量 (x) 的相关性分析显示二者呈极显著正相关关系 (图 3), 其线性回归方程为 $y = 7.202x + 1.512$, 相关性系数 $r = 0.948$, 概率 $P < 0.01$ 。说明植物根系生长有助于土壤有机碳的积累。

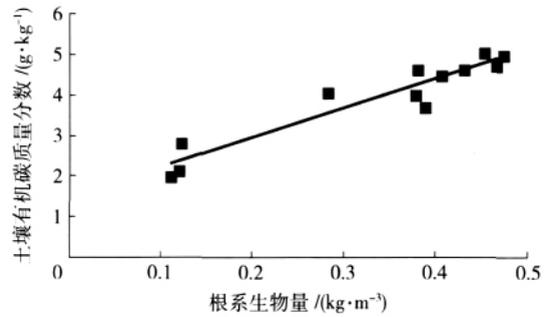


图 3 柠条林地土壤有机碳质量分数与根系生物量的关系

Fig. 3 Relationship between soil organic carbon content and root biomass of *Caragana microphylla* plantation

对不同生长年限各柠条林地 0 ~ 50 cm 土层根系生物量的分析结果 (图 4) 表明 不同林龄柠条林地与对照地根系生物量随着土层的加深逐渐减少, 且主要分布于 0 ~ 30 cm 土层, 占到 0 ~ 50 cm 总根系生物量的 66.74% ~ 96.5%。0 ~ 50 cm 土层根系平均生物量大小依次为 26 a > 50 a > 40 a > 对照 > 10 a。说明柠条林在 10 a 时, 根系生物量仍处于积累期, 到 26 a 左右达到最大值, 此后柠条林逐渐衰老, 代谢能力下降, 部分根系死亡, 到 40、50 a 时根系生物量处于一个新的稳定状态。因土壤有机碳与根系生物量呈显著正相关, 土壤有机碳的变化趋势与根系生物量基本一致, 说明植物根系是土壤的直接碳源。另外 根系不断生长, 对土壤的穿插与破碎作用增强, 土壤通气条件得到改善, 腐殖质分解增加, 也是土壤有机碳量增加的原因之一。

3.4 土壤密度变化对土壤有机碳质量分数的影响

人工柠条林地土壤有机碳质量分数 (y) 与土壤密度 (x) 的相关性分析结果 (图 5) 显示, 二者之间存在极显著的线性负相关关系, 其线性回归方程为 $y = -12.676x + 20.209$, 相关性系数 $R = -0.748$, 概率 $P = 0.0052 < 0.01$ 。

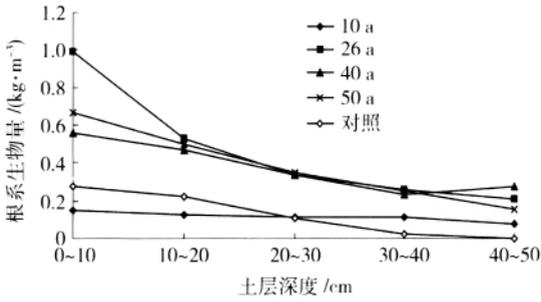


图4 不同生长年限各柠条林地0~50 cm 土层根系生物量
Fig. 4 Change of root biomass in 0 - 50 cm soil layer in an age sequence of *Caragana microphylla* plantation

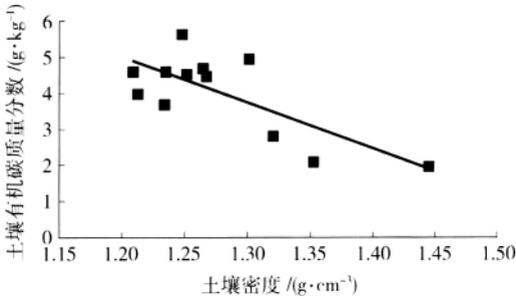


图5 柠条林地土壤有机碳质量分数与土壤密度的关系
Fig. 5 Relationship between soil organic carbon content and soil bulk density of *Caragana microphylla* plantation

根据土壤调查结果(图6),10、26、40、50 a 柠条林地和对照地 0~50 cm 土层的土壤密度平均值分别为 1.372、1.270、1.250、1.218 和 1.282 g/cm³。在 0~50 cm 土层范围内,对照地土壤密度仅小于 10 a 柠条林。柠条林地中,土壤密度随着生长年限的增加而减小,土壤有机碳与之呈显著负相关关系,表明随柠条生长年限的增加,土壤环境条件得到逐步改善后,微生物活动加强,可促进死根与动物残体等物质分解,从而增加土壤有机碳积累量。

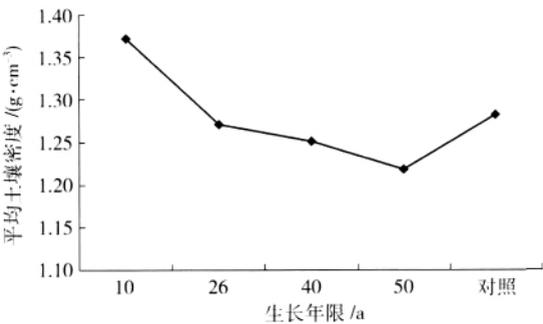


图6 不同生长年限柠条林地平均土壤密度
Fig. 6 Change of soil bulk density in an age sequence of *Caragana microphylla* plantation

3.5 土壤有机碳质量分数与全氮质量分数的相关性分析

对各柠条林地的土壤全氮质量分数进行分析

结果表明,26、40 和 50 a 林地土壤全氮质量分数分别显著 ($P < 0.05$) 高于对照地 53.63%、38.15% 和 48.98%,10 a 林地低于对照 24.10%,未达到显著水平,说明柠条的固氮特性在 10 a 时间内受到抑制,由于植物生长吸收氮素,使其质量分数下降到 26 a 之后开始发挥较大作用,氮素质量分数显著增加。对人工柠条林地土壤有机碳质量分数与全氮质量分数作相关性分析(图7),表明人工柠条林土壤有机碳质量分数(y)与土壤全氮质量分数(x)之间存在极显著的线性正相关关系,其线性回归方程为 $y = 1.499x + 0.118$,相关系数 $R = 0.961$,概率 $P = 0.0002 < 0.01$,说明土壤全氮质量分数的增加有助于土壤有机碳的积累。

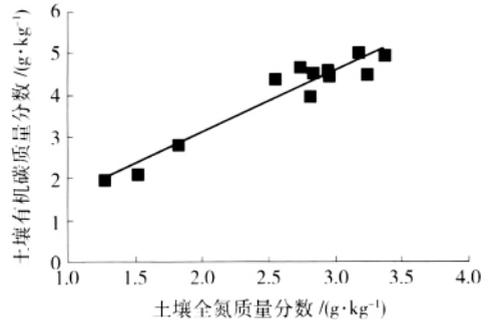


图7 柠条林地土壤有机碳质量分数与全氮质量分数的关系
Fig. 7 Relationship between content of soil organic carbon and content of soil nirtrogen of *Caragana microphylla* plantation

4 结论与讨论

1) 黄土丘陵区人工柠条林地土壤总有机碳密度变化范围为 1.555 ~ 3.236 kg/m²,对照地为 1.781 kg/m²。其中 10 a 柠条林地的土壤有机碳密度比对照地降低 12.69%,26 a 林地的土壤碳密度最高,比对照地显著高 81.70%,固碳效益最好,40、50 a 土壤有机碳密度分别比对照地高 55.81%、37.23%,表明黄土丘陵区荒山柠条造林具有显著的碳积累效应。

2) 与对照地相比,柠条林地的土壤总有机碳变化规律为先减少,经过 10 a 左右的生长之后才开始积累。柠条林生长到 40~50 a 阶段,土壤有机碳积累和消耗处于相对稳定状态。

4) 土壤有机碳质量分数与柠条根系生物量、全氮质量分数呈显著正相关关系,与土壤密度呈显著负相关关系。

人工种植柠条林可以使黄土丘陵区土壤有机碳储量增加,但开始增加的时间滞后于植物的生长,这

与李跃林等^[15]、T. Charles 等^[16]、J. Romanya 等^[17]的研究结果一致,他们认为在温带地区造林后土壤碳储量通常是最初下降,然后才开始积累,开始积累的时间一般在10 a左右。柠条林生长到40 a之后开始老化,固碳效益没有明显增加,需要对林分进行抚育改造,通过改变林分结构与组成,促使老龄柠条林的天然化方向发育。柠条林地根系生物量与土壤有机碳的集中分布层次基本一致,柠条根系的持续扩大有利于土壤有机碳量的增加。土壤密度在柠条林生长过程中不断减小,改善了土壤通透性,使土壤有机碳总量增加。柠条是豆科植物并具有一定的固氮作用而使林下土壤全氮质量分数相对较高,全氮质量分数也随柠条林的生长逐渐增加,所以柠条根系的固氮作用对有机碳积累有积极作用,全氮质量分数升高又是碳储量增加的一个诱因,但是关于这一关系的机制研究报道较少,有待于进一步深入探讨。

5 参考文献

- [1] Templer P H ,Gmffman P M ,Flecker A S ,et al. Land use change and soil nutrient transformations in the Los Haitis region of the Dominican Republic [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2005 ,37(2) : 215-225
- [2] Kalbitz K ,Solinger S ,Park J H ,et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review [J]. *Soil Sci* 2000 ,165(4) : 277-304
- [3] Houghton J T ,Ding Y ,Griggs D J ,et al. *Climate Change 2001: The scientific Basis* [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press ,2001: 67-70
- [4] Watson R T ,Nobel I R ,Bolin B ,et al. *Land Use ,Land-Use Change ,and Forestry* [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press ,2000: 91-92
- [5] Nabuurs G J ,Dolman A J ,Verkaik E ,et al. Consequences for industrialized countries , commitment ,the monitoring need ,and possible side effects [J]. *Environ Sci Policy* , 2000 ,3: 123-134
- [6] 贺亮 ,苏印泉 ,季志平 ,等. 黄土高原沟壑区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究 [J]. *西北林学院学报* 2007 ,22(4) : 49-53
- [7] 张景群 ,苏印泉 ,徐喜明 ,等. 黄土高原刺槐人工中龄林土壤碳汇 [J]. *东北林业大学学报* 2010 ,38(1) : 50-53
- [8] 牛西午 ,张强 ,杨治平 ,等. 柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究 [J]. *西北植物学报* ,2003 , 23(4) : 628-632
- [9] 刘方明 ,郝伟 ,姜勇. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿对土壤有机碳积累的影响 [J]. *辽宁工程技术大学学报* ,2005 , 26(2) : 294-296
- [10] 赵忠 ,李鹏 ,王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究 [J]. *应用生态学报* ,2000 ,11(1) : 37-39
- [11] 刘光崧. *土壤理化分析与剖面描述* [M]. 北京: 中国标准出版社 ,1996: 123-166
- [12] 史军 ,刘纪远 ,高志强 ,等. 造林对土壤碳储量影响的研究 [J]. *生态学杂志* 2005 ,24(4) : 410-416
- [13] 周广胜 ,王玉辉 ,蒋延玲 ,等. 陆地生态系统类型转变与碳循环 [J]. *植物生态学报* 2002 ,26(2) : 250-254
- [14] 季志平 ,苏印泉 ,贺亮 ,等. 秦岭北坡几种人工林根系及土壤有机碳剖面分布特征的研究 [J]. *西北植物学报* 2006 ,26(10) : 2155-2158
- [15] 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 [J]. *山地学报* 2002 ,20(5) : 548-552
- [16] Charles T ,Garten J. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee South Carolina , USA [J]. *Biomass Bioenergy* 2002 ,23: 93-102
- [17] Romanya J ,Cortina J ,Falloon P ,et al. Modeling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils [J]. *European Journal of Soil Science* 2000 ,51: 627-641

(责任编辑: 宋如华)