

黄土丘陵区油松人工林土壤固碳特征及其影响因素

宋超^{1,2}, 陈云明^{1,3†}, 曹扬^{1,3}, 唐亚坤^{1,3}, 陆媛^{3,4}

(1. 中科院 水利部 水土保持研究所 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院大学 100049 北京; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 712100 陕西杨凌; 4. 西北农林科技大学林学院; 712100 陕西杨凌)

摘要: 以黄土丘陵区 9、23、33、47 a 油松人工林为研究对象, 分析油松人工林不同发育阶段土壤有机碳质量分数和土壤有机碳密度的变化规律, 结合土壤全氮质量分数和土壤密度、枯落物现存量、根系生物量指标, 分析其影响因素。结果表明: 1) 9、23、33 和 47 a 油松人工林 0~100 cm 土层平均土壤有机碳质量分数分别为 4.9、5.9、9.2 和 6.5 g/kg, 土壤有机碳密度分别为 63.0、66.8、100.7 和 72.5 mg/hm², 二者均表现为随林龄变化先增大(9~33 a) 后减小(33~47 a) 的趋势, 土壤有机碳质量分数和密度垂直分布规律明显, 即随土层深度增加而减小, 其中 0~30 cm 土层土壤有机碳密度占 0~100 cm 土层碳密度的 48.5%~57.9%; 2) 相关性分析及拟合结果显示, 土壤有机碳质量分数与全氮质量分数、枯落物现存量和根系生物量存在极显著线性正相关关系, 与土壤密度呈线性负相关关系, 根系生物量、枯落物现存量与土壤有机碳质量分数的相关性随着土层深度的增加逐渐减小, 逐步回归分析结果表明, 土壤全氮质量分数和枯落物现存量是土壤有机碳质量分数最主要的影响因素。

关键词: 油松人工林; 土壤有机碳质量分数; 土壤有机碳密度; 影响因素; 黄土丘陵区

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3007(2015)03-0076-07

Characteristics of soil carbon sequestration in *Pinus tabulaeformis* plantations and influencing factors in the Loess Hilly Region

Song Chao^{1,2}, Chen Yunming^{1,3}, Cao Yang^{1,3}, Tang Yakun^{1,3}, Lu Yuan^{3,4}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 4. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract: We analyzed the content and density of soil organic carbon along a chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantations (9, 23, 33 and 47 years old) in the Loess Hilly Region, and explored the relationships between soil organic carbon content and main factors affecting it, i. e., total nitrogen, soil particle density, root biomass and litter biomass. The results showed that the average contents of soil organic carbon were 4.9, 5.9, 9.2 and 6.5 g/kg, and the densities of soil organic carbon were 63.0, 66.8, 100.7 and 72.5 mg/hm², for 9-, 23-, 33- and 47-year-old plantations, respectively. Both the content and density of soil organic carbon increased first (9–33 years) and then decreased (33–47 years) over stand age. In addition, the content and density of soil organic carbon decreased gradually as

收稿日期: 2014-08-05 修回日期: 2015-03-21

项目名称: 中国科学院先导专项“中国科学院暖温带落叶阔叶混交林区域陕西省森林固碳现状、速率和潜力研究”(XDA05050203-05); 国家自然科学基金“黄土丘陵区森林植物—凋落物—土壤化学计量特征耦合关系及对非生物环境因子的响应”(41371506); 中国科学院西部之光项目“黄土高原人工林土壤养分平衡与生产力维持机制”(K301021304)。

第一作者简介: 宋超(1991—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 植被与水土保持。E-mail: chaosxcz8866@163.com

† 通信作者简介: 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

soil depth increased. The density of organic carbon in surface soil layer (0 - 30 cm) accounted for 48.5% - 57.9% of that of the entire observed soil layer. 2) The soil organic carbon content had a significantly positive correlation with total soil nitrogen, root biomass and litter biomass. However, there was a significantly negative relation between soil organic carbon and soil particle density. The correlation coefficients between soil organic carbon content and root biomass and litter biomass decreased gradually with soil depth increasing. The result of stepwise regression indicated that total soil nitrogen and litter biomass were the main factors affecting soil organic carbon content.

Keywords: *Pinus tabulaeformis* plantations; soil organic carbon content; soil organic carbon density; influencing factors; the Loess Hilly Region

森林土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,其碳储量约占全球土壤碳库的56%^[1],分别是植被、大气碳库的3~4倍,对维持全球碳平衡有着极其重要的作用^[2-3]。森林土壤有机碳是进入土壤中的动植物残体量及其在微生物作用分解损失量之间的动态平衡总量^[4],其大小受到气候、植被、土壤理化性质等因素影响。国内外学者对此进行了大量研究。王大鹏等^[5]对中国主要人工林土壤有机碳进行了比较,土壤有机碳密度大致表现为从西向东、从南到北逐渐增高的规律,与经度、纬度有显著的正相关关系。解宪丽等^[6]研究了不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子,结果表明,草甸和森林的土壤有机碳密度最高,不同地区其主要影响因素不同。杜有新等^[7]研究了江西九江地区不同海拔、坡向植被群落的土壤有机碳质量分数,结果表明,植被类型和海拔是土壤有机碳的主要变异因子。S. E. Crow等^[8]和 Xiong Yanmei等^[9]研究发现,枯落物能够提高土壤有机碳质量分数。上述研究多集中于土壤有机碳密度的估算和大尺度土壤有机碳的影响因素,对于影响森林土壤有机碳的主要控制因子及其控制过程仍欠缺^[3]。全面理解森林土壤有机碳的固碳特征及其影响因素,对于合理评估和发挥森林固碳能力,并且制定相应抚育管理措施具有重要意义。

黄土丘陵区水土流失严重,生态环境脆弱。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为黄土丘陵区的主要造林树种,20世纪90年代以来在该地区得到广泛的种植。除了良好的水土保持功能外,其固碳功能逐渐引起人们的关注。刘迎春等^[10]在黄土丘陵区研究了0~86年油松人工林碳储量—林龄关系,结果表明,油松人工林植被、凋落物和土壤碳储量随林龄逐渐增加;贺亮等^[11]对该区油松人工林碳储量及其分布特征的研究表明,土壤有机碳质量分数和根系生物量垂直分布特征明显,土壤有机碳质量分数与土

壤全氮质量分数呈显著线性正相关;孙文义等^[12]研究发现,1 m土层内油松天然林的土壤有机碳质量分数和全氮质量分数显著高于油松人工林,土壤有机碳质量分数与全氮质量分数有较强的相关性。尽管前人对此进行了大量研究,这些研究对于认识油松林固碳与林龄、土壤深度、养分等关系具有重要作用;但是对于该地区油松人工林土壤固碳主要影响因素的研究多集中于土壤养分^[12-13],而枯落物现存量、土壤密度和根系生物量尤其是粗根生物量鲜有报道。笔者以黄土丘陵区9~47年油松人工林为研究对象,探讨不同生长时期油松人工林土壤固碳特征,并重点分析根系生物量(粗根和细根)、枯落物现存量和土壤密度等对油松人工林土壤固碳的影响,以期对黄土丘陵区油松人工林土壤固碳效应,尤其是枯落物现存量、根系生物量等影响因子作出较为全面的分析。

1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区南部(E108°53′~109°38′, N35°27′~36°50′),所选样地位于陕西省延安市境内。该区是典型的暖温带半湿润气候区,海拔1010~1275 m,年平均气温8.6℃,最高气温36.7℃,最低气温-22.5℃。无霜期183 d,年平均降水量611.2 mm,年蒸发量约1500 mm。土壤主要为灰褐土。植被带属于暖温带落叶阔叶林带。该区内主要树种为油松、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)等,林下灌木主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、忍冬(*Lonicera Japonica*)、绣线菊(*Spiraea pubescens*)、毛樱桃(*Prunus merrilliana*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)等;草本植物主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、北京隐子草(*Cleistogenes hancei*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

在研究区的黄陵县建庄、黄龙县三岔镇、富县直罗乡和宜川县铁龙湾依次选取海拔、坡度、土壤等立

地条件相似且生长健康的 9、23、33 和 47 年油松人工林地作为研究样点,林龄由生长锥法获得。每个样点内各设置 3 个 20 m × 50 m 的标准样地,样地经纬度、海拔、坡向使用手持 GPS 测定,坡度采用坡度仪测定,郁闭度由目测法测定。样点基本概况见表 1。

表 1 样点基本概况

Tab. 1 Basic information of plots

林龄 Age/ a	纬度 Latitude/ (°)	经度 Longitude/ (°)	海拔 Altitude/ m	坡向 Aspect	坡度 Slop/ (°)	平均胸径 DBH/ cm	平均树高 Height/ m	郁闭度 Crown density	林下优势种 Dominant species
9	35.46	108.88	1 195.0	南向 South	31	2.2	2.3	0.20	黄刺玫-铁杆蒿(<i>Rosa xanthine-Artemisia sacrorum</i>)
23	35.60	109.72	1 245.5	南向 South	32	8.7	7.0	0.83	黄刺玫-披针苔(<i>Rosa xanthine-Carex lanceolata</i>)
33	35.96	109.06	1 105.6	西南 Southwest	32	11.5	10.8	0.67	黄刺玫-披针苔(<i>Rosa xanthine-Carex lanceolata</i>)
47	35.97	110.10	1 050.7	西北 Northwest	34	15.8	14.0	0.77	黄刺玫-披针苔(<i>Rosa xanthine-Carex lanceolata</i>)

2.2 植物样品采集与测定

粗根生物量:对样地内所有 DBH(胸径) ≥ 5 cm (人工幼龄林以 DBH ≥ 2 cm 起测)的乔木进行每木检尺,测定其胸径、树高并记录;按大中小径级选取 5 株具有代表性的树木,取其根(直径 > 2 mm)并混合成一个样品。在每个标准样地内沿对角线设置 3 个彼此相距 12 m 的 1 m × 1 m 的草本样方,取其根(直径 > 2 mm)混合成一个样品并称其鲜质量。所有样品带回实验室,置于 85 °C 烘箱烘至恒质量,称其干质量。乔根生物量通过肖俞^[14]在这一地区建立的生物量方程计算得出。由于油松人工林内灌木很少,因此忽略灌木,粗根生物量为乔根、草根生物量之和。

细根生物量:在每个标准样地内上、中、下部位,采用根钻法(内径 9 cm),分别采集 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 的土芯 6 个,分层混合装袋,带回实验室后拣出直径 ≤ 2 mm 的根系,置于 85 °C 烘箱烘至恒质量并称其干质量。

枯落物现存量:收集 3 个草本样方内所有的枯落物并带回实验室,置于 85 °C 烘箱烘至恒质量并称其干质量。

2.3 土壤样品采集与测定

在上述 3 个 1 m × 1 m 的样方内挖取 1 m 深的剖面,不足 1 m 至基岩为止,沿剖面按 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm, 用环刀取各个土层的原状土,带回实验室置于 105 °C 烘箱烘至恒质量并称量,计算土壤密度。使用内径为 5.8 cm 的土钻,每层随机钻取 3 钻土,同一样地 3 个 1 m × 1 m 样方的同一层土样混合均匀后带回实验

室,风干磨碎并过 0.25 mm 筛后装入塑封袋,分别采用 LY/T 1237—1999《森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算》中规定的重铬酸钾硫酸氧化法^[15]和半微量开氏法^[15]测其有机碳、全氮质量分数。

土壤剖面有机碳密度计算公式^[16]为

$$S_{OC} = \sum_{i=1}^k 0.1 C_i D_i E_i (1 - G_i)。$$

式中: S_{OC} 为土壤有机碳密度, $\mu\text{g}/\text{hm}^2$; 0.1 为将土壤有机碳密度单位转换为 mg/hm^2 的系数; C_i 为第 i 土层土壤有机碳质量分数, g/kg ; D_i 为第 i 土层土壤密度, g/cm^3 ; E_i 为第 i 土层土壤厚度, cm ; G_i 为第 i 土层直径 > 2 mm 的石砾所占的体积比例, %; k 为土壤层数, $k = 5$ 。因研究区整个土壤剖面无直径 > 2 mm 的石砾,所以公式中 $G_i = 0$ 。

2.4 数据处理

运用 SPSS18.0 软件,使用单因素方差分析法(one-way ANOVA)对同一林龄不同土层、同一土层不同林龄土壤有机碳质量分数及密度进行差异显著性检验($P < 0.05$)。使用协方差分析法(ANCOVA)对土壤有机碳质量分数和全氮质量分数、土壤密度在各土层的回归方程差异显著性进行检验($P < 0.05$)。使用 Pearson 法对土壤有机碳质量分数和土壤全氮质量分数、土壤密度、粗根生物量、细根生物量、枯落物现存量进行相关性分析。将土壤有机碳质量分数作为因变量,土壤全氮质量分数、土壤密度、粗根生物量、细根生物量和枯落物现存量为自变量,对其进行逐步回归分析。使用 Sigmaplot 10.0 软件拟合回归曲线。

3 结果与分析

3.1 油松人工林土壤有机碳质量分数

由表 2 可知,油松人工林土壤有机碳质量分数在 2.802 ~ 27.005 g/kg 之间。除 0 ~ 10 cm 土层外,33 和 47 年油松人工林各层土壤有机碳质量分数与其他林龄差异显著。处于幼龄阶段的 9 年油松林的土壤有机碳质量分数最低,其平均值为 4.705 g/kg,随着林龄的增加,9 ~ 33 年油松林土壤有机碳质量分数逐步增加,33 年油松林的土壤有机碳质量分数

最高,其平均值为 9.220 g/kg。47 年油松林处于成熟期,其土壤有机碳质量分数较 33 年油松林有所下降,平均值为 6.470 g/kg,但仍高于 9 年和 23 年油松林的土壤有机碳质量分数(分别为 4.705 g/kg 和 5.948 g/kg)。同一林龄各土层土壤有机碳质量分数差异明显,0 ~ 10 cm 土壤有机碳质量分数变化范围在 11.373 ~ 27.005 g/kg 之间,明显高于其他土层,并且随着土壤深度的增加,土壤有机碳质量分数逐渐减少,具有明显的垂直分布特征。

表 2 不同林龄油松土壤有机碳质量分数

Tab. 2 Soil organic carbon content of *Pinus tabulaeformis* plantations in different ages g/kg

林龄 Age/a	土层 Soil layer/cm				
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 100
9	11.373 ± 3.389Ba	7.309 ± 0.845Bb	5.600 ± 0.963Bb	4.379 ± 0.483Bb	2.802 ± 0.364Bc
23	17.272 ± 6.484Ba	11.407 ± 2.979Bb	7.202 ± 2.007Bb	4.239 ± 2.105Bbc	3.024 ± 1.435Bbc
33	27.005 ± 5.414Aa	17.011 ± 4.602Ab	11.509 ± 2.519Ab	7.327 ± 1.955Abc	4.405 ± 1.868Ac
47	21.447 ± 2.459Aa	10.932 ± 1.216Bb	6.564 ± 0.538Bc	4.413 ± 0.082Bc	3.386 ± 0.159Bcd

注: 平均值 ± 标准差 $n = 3$; 同行不同小写字母表示各土层间差异显著, 同列不同大写字母表示林龄间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: values are represented as mean ± SD $n = 3$; Different small letters in the same row indicated significant difference among different soil layers at 0.05 level and different capital letters in the same column indicated significant difference among different forest ages at 0.05 level.

3.2 油松人工林土壤有机碳密度

图 1 为同一林龄不同土层土壤有机碳密度和同一土层不同林龄土壤有机碳密度。可以看出,油松人工林 0 ~ 100 cm 土层土壤有机碳密度随土层加深均表现为逐渐减小的规律,0 ~ 30 cm 土层有机碳密度占 0 ~ 100 cm 全部有机碳密度的 48.5% ~ 57.9%,为土壤有机碳汇的主要层次(图 1(a))。随着林龄的增大,0 ~ 30 cm 间各土层土壤有机碳密度

在 9 ~ 33 年间增大,33 ~ 47 年间减小。除 0 ~ 10 cm 土层外,33 年与其他林龄土层间差异显著,其他林龄各层土壤之间差异不显著(图 1(b))。30 ~ 100 cm 间各土层随林龄的变化没有明显规律。其中,30 ~ 50 cm 土层 33 年时的土壤有机碳密度与其他林龄差异显著,其他林龄间差异不显著,50 ~ 100 cm 土层土壤有机碳密度仅 33 年和 23 年差异显著,其他林龄之间差异均不显著。林龄对土壤有机碳密度

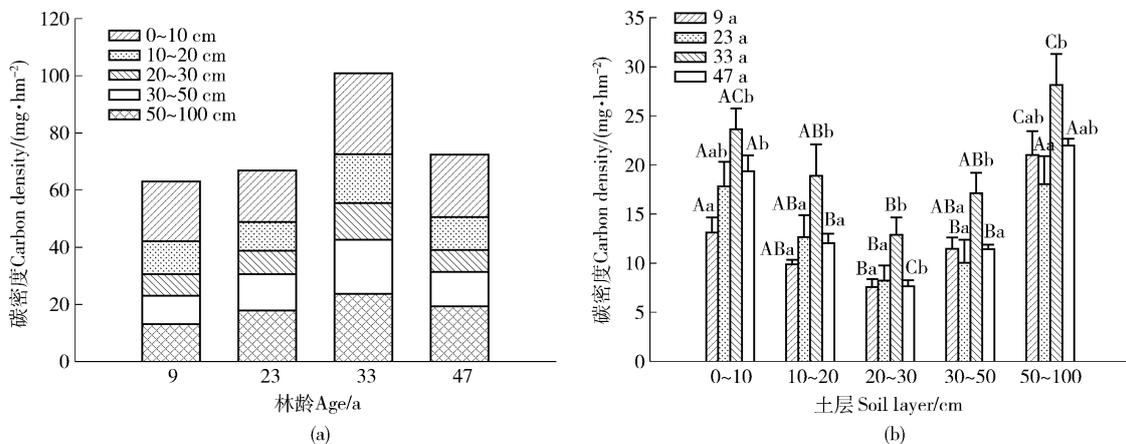


图 1 同一林龄不同土层土壤有机碳密度 (a) 和同一土层不同林龄土壤有机碳密度 (b)

Fig. 1 Soil carbon storage in *Pinus tabulaeformis* plantations in the same age but different layers (a) and in the same layer but different ages (b)

影响明显,9、23、33、47 年油松林 0~100 cm 土壤有机碳密度依次为 63.044、66.770、100.730 和 72.473 mg/hm²。

3.3 油松人工林土壤有机碳质量分数的影响因素

油松人工林土壤有机碳质量分数 y 和粗根生物量 x_1 的相关性分析和线性拟合结果见图 2(a),可知二者之间表现为显著的线性正相关关系,说明粗根生物量的增加能够显著增加土壤有机碳质量分数。相关系数(表 3)表明,在 0~100 cm 土层,随着土壤深度增加,二者之间相关系数减小,说明粗根对

土壤有机碳的影响随土壤深度的增加而逐渐减弱。

油松人工林土壤有机碳质量分数 y 和细根生物量 x_2 的相关性分析和线性拟合结果见图 2(b),可知二者之间表现为极其显著的线性正相关关系,说明增加细根生物量有助于土壤有机碳的积累。由相关系数(表 3)可以看出,在整个 0~100 cm 土层,随着土壤深度增加,二者之间相关系数减小,土壤有机碳质量分数和细根生物量在 50~100 cm 土层不相关,说明细根生物量对表层土壤有机碳影响较大,对深层土壤有机碳几乎没有影响。

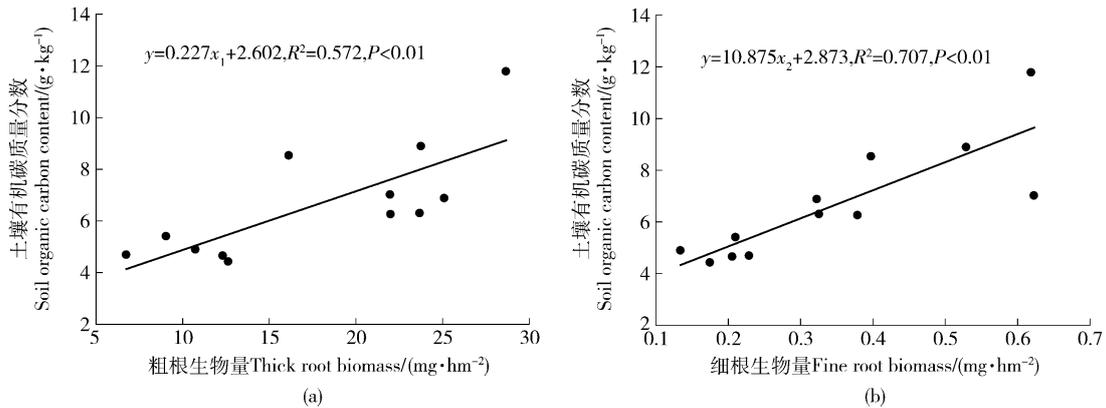


图 2 土壤有机碳质量分数和粗根生物量(a)、细根生物量(b)关系

Fig. 2 Relationship between soil organic carbon content and thick root biomass (a) and fine root biomass (b)

表 3 土壤有机碳质量分数与各影响因素的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between soil organic carbon content and influencing factors

影响因素 Influencing factors	土层 Soil layer/cm					
	0~10	10~20	20~30	30~50	50~100	0~100
粗根生物量 Thick root biomass	0.815**	0.716**	0.666*	0.620*	0.593*	0.756**
细根生物量 Fine root biomass	0.891**	0.868**	0.846**	0.734**	0.546	0.841**
枯落物现存量 Litter biomass	0.925**	0.877**	0.790**	0.665*	0.592*	0.895**

注: * 为在 0.05 水平上达到显著; ** 为在 0.01 水平上达到显著。Note: * and ** represent significance at the level of $P=0.05$ and $P=0.01$.

对油松人工林土壤有机碳质量分数 y 和枯落物现存量 x_3 进行相关性分析和线性拟合,结果见图 3。可知二者之间表现为极其显著的线性正相关关系。由相关系数(表 3)可以看出,随着土层深度增加,二者之间相关系数减小,说明枯落物现存量对土壤有机碳质量分数的影响随着土壤深度的增加而逐渐减弱。油松人工林土壤有机碳质量分数 y 和土壤全氮质量分数 x_4 的相关性分析和拟合结果见图 4,可知二者之间表现为极其显著的线性正相关关系。这说明土壤全氮质量分数的增加能够显著增加土壤有机碳质量分数。

油松人工林土壤有机碳质量分数 y 和土壤密度 x_5 的相关性分析和拟合结果(图 5)显示,二者之间在土壤各层均表现为极其显著的线性负相关关系,说明减小土壤密度能够增加土壤有机碳质量分数。土壤有机碳质量分数和土壤密度在 0~100 cm 土壤各层的回归方程斜率($P=0.134$)和截距($P=0.000$)的显著性检验结果表明,各回归方程差异不显著,二者之间的回归关系在不同土层之间无显著性差异。

对土壤有机碳质量分数 y 和粗根生物量 x_1 、细根生物量 x_2 、枯落物现存量 x_3 、土壤全氮质量分数

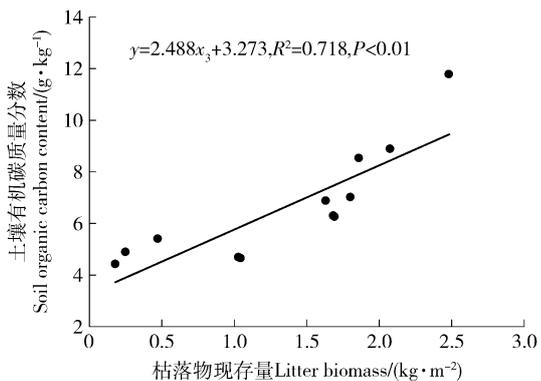


图 3 土壤有机碳质量分数和枯落物现存量关系

Fig. 3 Relationship between soil organic carbon content and litter biomass

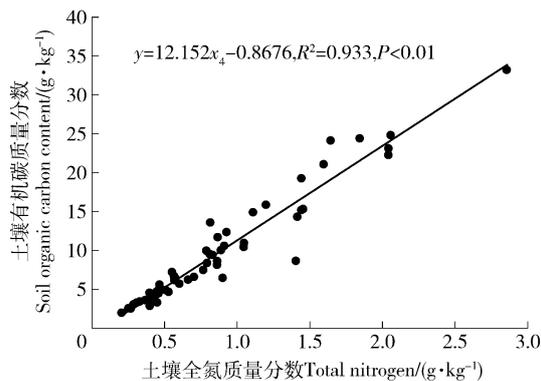
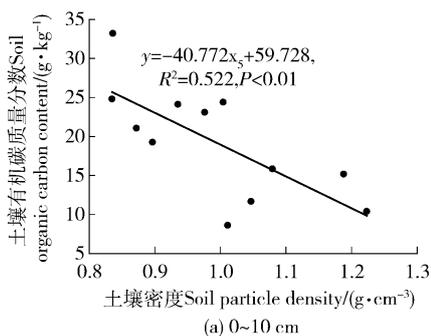
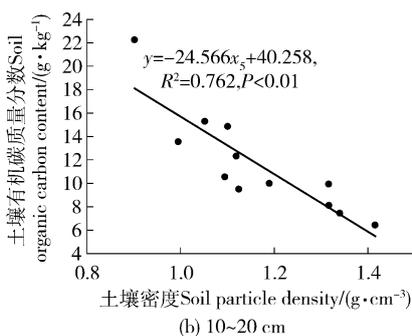


图 4 土壤有机碳质量分数和土壤全氮关系

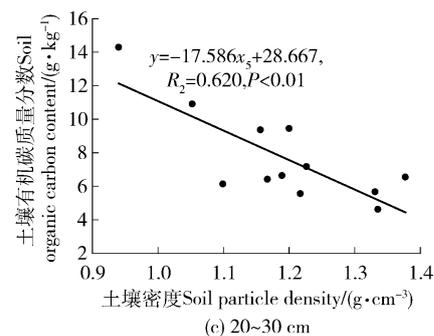
Fig. 4 Relationship between soil organic carbon content and total soil nitrogen



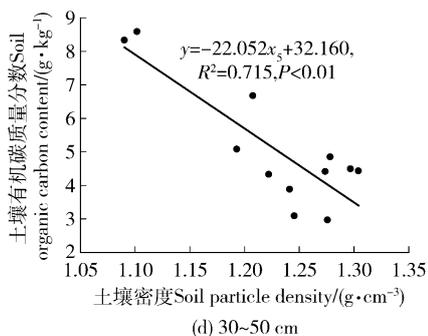
(a) 0~10 cm



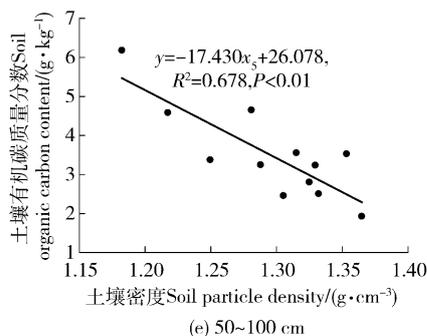
(b) 10~20 cm



(c) 20~30 cm



(d) 30~50 cm



(e) 50~100 cm

图 5 各层土壤有机碳质量分数和土壤密度关系

Fig. 5 Relationship between soil organic carbon content and soil particle density

x_4 、土壤密度 x_5 进行逐步回归分析, 得到 $y = 0.372 + 1.322x_3 + 7.149x_4$, $R^2 = 0.983$, $P = 0.000$ 。 $R^2 = 0.983$ 表明土壤有机碳质量分数变化中 98.3% 可以用该线性回归方程来解释。土壤全氮质量分数和枯落物现存量是土壤有机碳质量分数最主要的影响因素。

4 结论与讨论

1) 黄土丘陵区油松人工林地中, 幼龄油松人工林地土壤的固碳效益最差, 近熟油松人工林地土壤的固碳效益最好, 且随着油松人工林进入成熟期, 其土壤固碳能力会有所减小。

2) 黄土丘陵区油松人工林地中, 表层土壤是土壤有机碳的主要贡献者, 相比深层土壤具有更好的固碳效益。

3) 枯落物现存量、土壤全氮质量分数、粗根生物量、细根生物量的增加以及土壤密度的减小均有助于黄土丘陵区人工油松林地土壤有机碳的积累, 其中表层土壤的固碳效益受以上因素的影响相比深层土壤要大的多。

有研究^[17-18]表明, 深层土壤有机碳在整个土体中占有很大比例。本研究以 0~100 cm 土层估算土壤有机碳密度, 可能低估了黄土丘陵区油松人工林土壤有机碳密度, 因此今后的研究中深层土壤有机

碳不可忽略。此外,本研究以黄土丘陵区 9、23、33、47 年油松人工林为研究对象,而不是同一林型的不同发展阶段,具有一定局限性。

5 参考文献

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190
- [2] Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. Land use, land-use change and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. London: Cambridge University Press, 2000: 208-219
- [3] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005(1): 99-105
- [4] Post W, King A, Wullschlegel S. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon [J]. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*: Springer, 1996, 38(6): 201-222
- [5] 王大鹏,王文斌,郑亮,等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. *生态环境学报*, 2014, 24(4): 698-704
- [6] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699
- [7] 杜有新,宋祖祥,何春林,等. 江西九江地区森林土壤有机碳含量及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 575-579
- [8] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10): 2224-2232
- [9] Xiong Yanmei, Xia Hanping, Li Zhi'an, et al. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China [J]. *Plant and Soil*, 2008, 304(1/2): 179-188
- [10] 刘迎春,王秋凤,于贵瑞,等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4277-4286
- [11] 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
- [12] 孙文义,郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2611-2620
- [13] 曹晓阳,王百田,迟璐,等. 山西吕梁地区三种林分土壤养分与碳密度关系研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 86-90
- [14] 肖瑜. 陕西省不同气候区域油松人工林生物和生产力的比较研究[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1990, 14(3): 237-246
- [15] 刘光嵩. 土壤理化分析与剖面描述: 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 156-162
- [16] 黄从德,张国庆,唐宵,等. 四川省马尾松人工林土壤有机碳密度研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 46-49
- [17] 许明祥,王征,张金,等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415
- [18] 张金,许明祥,王征,等. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2721-2727

(责任编辑:宋如华)