植物营养与肥料学报 2012,18(6):1418 -1427
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土台塬不同林分结构土壤有机碳质量分数特征

刘梦云,常庆瑞*,齐雁冰,刘 京,陈 涛
(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 为探讨林分结构对土壤有机碳固定的影响,本文以黄土台塬的油松、沙棘、刺槐和侧柏纯林及其混交林为对象,对土壤有机碳、易氧化态、轻组、颗粒态以及可溶性有机碳进行了分析。结果表明,1)混交林可有效增加土壤不同组分有机碳含量,侧柏混交林与纯林相比增加最为明显,其土壤有机碳增加了123%和160%,易氧化态有机碳增加了161%和304%,轻组有机碳增加了1399%和482%,颗粒态有机碳增加了454%和436%,可溶性碳增加了138%和170%(0—5 cm 土层);刺槐-沙棘、油松-沙棘-刺槐混交林相对改良效果较差。2)各活性有机碳间相比较,混交林对土壤易氧化态碳含量增加效果最显著,而对土壤颗粒有机碳的改善效果不甚明显。3)在0—100 cm 土层,轻组有机碳敏感性指标分别是总有机碳、可溶性和易氧化态有机碳的1.00 ~ 10.58、3.83 ~ 10.19 和1.78 ~ 5.10 倍。4)有机碳与活性有机碳组分均呈线性极显著正相关关系;轻组有机碳与颗粒有机碳二者之间的相关性大于其与其他,易氧化态碳与可溶性有机碳二者之间的相关性大于其与其他。

关键词: 黄土台塬;林分结构;有机碳;活性有机碳
中图分类号: S152.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1418-10

Soil organic carbon under different planting structures on the tablelands of Loess Plateau

LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui*, QI Yan-bing, LIU Jing, CHEN Tao
(*College of Resources and Environment, Northwest A & F University/Key Laboratory of Northwest Plant Nutrition and Agriculture Environment, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: In order to examine the effects of soil organic carbon sequestration under different plantation structures in the tablelands of Loess Plateau, in this paper, *Biota orientalis*, *Robinia pseudoacacia*, *Hippophae reamnoides* and *Pinus tabuliformis* pure and mixed planting models were selected. The soil organic carbon (SOC), easily oxidizable organic carbon (EOC), light fraction organic carbon (LFOC), particulate organic carbon (POC) and dissolved organic carbon (DOC) were analyzed. The results show that the accumulation of carbon in the mixed forestlands is higher than that in the pure forestlands. Compared with the pure forestlands, the mixed forests of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia* could improve soil labile organic carbon (LOC) contents in the 0 - 5 cm soil layers effectively, for example, SOC are increased by 123% and 160%, EOC are increased by 161% and 304%, LFOC are increased by 1399% and 482%, POC are increased by 454% and 436%, and DOC are increased by 138% and 170%. While the improvements in the mixed forests of *Robinia pseudoacacia - Hippophae reamnoides*, *Pinus tabuliformis - Hippophae reamnoides - Robinia pseudoacacia* are small. Among the soil LOC contents, compared with the pure forests, the soil EOC contents are improved most significantly in the mixed forests, LFOC contents are the next, while the soil POC contents are not significantly improved. The soil LFOC is more sensitive than others. In the 0 - 100 cm soil profile, the sensitivity index of LFOC is 1.00 ~ 10.58, 3.83 ~ 10.19 and 1.78 ~ 5.10 times of those of the SOC, DOC and EOC respectively. The correlation coefficient and regression analysis of the organic carbon fractions show that there is a very significant linear positive correlation between SOC and LOC, and among

收稿日期: 2012-03-28　　**接受日期:** 2012-08-06
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30872073);西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(QN2011156)资助。
作者简介: 刘梦云(1973—),女,陕西蒲城人,副教授,博士,主要研究领域为土地生态恢复。E-mail: lmy471993@163.com
* 通讯作者 E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

soil organic carbon fractions, POC accounts for the highest percentage, LFOC for next, while DOC just a little. In addition, the correlation coefficient of between soil LFOC and POC is higher than those between soil LFOC and the others, and the correlation coefficient of between soil DOC and EOC is higher than those between soil DOC and the others.

Key words: tablelands of Loess Plateau; planting structure; soil organic carbon; labile organic carbon

全球陆地约 1500 Gt 碳以有机质形态存储于土壤中,而森林生态系统土壤碳库则占全球土壤有机碳库的 70%,因此,土壤有机碳库特别是森林土壤有机碳库的微小变化,都可引起大气 CO_2 浓度的显著改变[1]。目前,我国人工林发展速度和规模均居世界第 1 位,约占全国森林面积的 20%,占世界造林面积的 1/3 左右; 加之,黄土台塬自响应国家的植树造林号召以来植被覆盖率逐年提高,1993 年植被覆盖率为 28%[2],耕地在实施退耕还林草后固碳量将增加 67.75%[3]。因此,通过增加土壤有机碳的固定来减少大气中 CO_2 含量是一个有效的、具有中长期利益的措施。土壤有机碳固定潜力的大小既取决于其地面植被、矿物组成、风化层厚度、水分、通气和温度状况,还取决于土壤本身保持及累积腐殖物质能力的大小[4]。研究发现,林分结构的不同影响回归土壤的枯落物量[5]及其多样性[6],造成土壤结构、孔隙度和通气度的差异[7],进而导致土壤本身保持及累积腐殖质能力的不同[5,8-9]。因此,林分结构的差异能够导致土壤固碳效应的不同。

土壤总有机碳(soil organic carbon, SOC)是土壤中一切生物残体和其转化、降解的有机化合物。而土壤活性有机碳包括简单的糖类、脂肪酸等,是可以很快被矿化的有机质,在土壤中具有稳定性差、移动快、易矿化、易氧化等特点[10-12],它比土壤总碳对于土壤的反应更敏感、更迅速,直接参与土壤的生物与化学转换,也是土壤微生物生活能源、土壤养分运输的桥梁[13]。近年来,关于林分结构的调整对于植被生物量[5]、土壤结构[7]、固碳总量[5,8-9]等方面的研究较多,而对土壤活性有机碳的影响等还无相关报道。基于此,本文对研究区三种混交林与纯林土壤不同有机碳组分质量分数[14-15]的差异进行了分析,以期获得林分结构与有机碳形成和演变机理之间的关系。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

本研究供试材料采自国家科技攻关项目"黄河中游黄土高原区(永寿)水土保持型植被建设技术研究与示范"试验示范基地的永寿县马莲滩林场。该区位于黄土高原渭北台塬沟壑区,海拔高度 900 ~ 1300 m,塬面地形波状起伏,沟坡崎岖破碎,沟谷深切,水土流失严重。气候属暖温带半湿润偏旱类型,干旱指数为 1.73 ~ 1.80,无霜期 210 d。"六·五"以来,为了控制水土流失,彻底改善生态环境,研究水土保持型植被建设体系,在该地进行了不同植被类型、不同混交方式与栽培模式的试验研究,建设了大面积人工植被。

1.2　样品采集与处理

本研究土样采集于 2008 年 10 月,尽量选择同一种土壤类型、地形相似、位置相近等的农田(小麦)、乔木纯林地(油松纯林、刺槐纯林、侧柏纯林)、灌木纯林地(沙棘纯林)以及混交林地(侧柏-刺槐,刺槐-沙棘和油松-沙棘-刺槐混交林)等用地类型,选择较平坦地面(坡度 <5°),根据立地条件、植被营造模式和恢复阶段的不同,每种类型随机选取采样点 3 个,每个采样点距离树干距离相同,在 0—100 cm 土壤剖面中分 5 个层次(一般划分深度为 0—5 cm、5—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—100 cm,个别根据土壤发生学特性划分层次),利用剖面刀进行采样,具体采样环境见表 1。土样阴干后,去除根系、可见植物残体和石块,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 的筛以供测定。

1.3　土壤有机碳测定

1.3.1 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)测定　土壤有机碳利用 TOC 仪测定,颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)、轻组有机碳(light fraction organic carbon, LOC)以及可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的具体测定方法见参考文献[16-17]。

1.3.2 易氧化态有机碳(easily oxidizable organic carbon, EOC)测定　具体过程为: 称取土样 0.2 ~

表1 土壤采样点基本情况

Table 1 Basic status of the sampling sites

用地类型 Land-use type	植被类型 Vegetation type	采样地点 Sampling site	林龄(a) Age	海拔(m) Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude
耕地 Farmland	冬小麦 Winter wheat	马莲滩林场梁顶 Beam top of the Maliantan farm	多年 Many years	1251	E108°05′24.2″	N34°48′22.0″
	冬小麦 Winter wheat	马莲滩林家沟梁顶 Beam top of the Linjiagou in Maliantan	多年 Many years	1267	E108°05′36.4″	N34°48′42.7″
灌木纯林地 Pure shrub forestland	沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest	马莲滩林场东北 Northeast of the Maliantan farm	15	1259	E108°05′29″	N34°48′21″
乔木纯林地 Pure arbor forestland	油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest	马莲滩林家沟山梁西坡 West slope of mountain ridge of the Linjiagou in Maliantan	16	1254	E108°05′38.2″	N34°48′32.6″
	侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest	马莲滩三岔口 Crossroad of the Maliantan	16	1218	E108°05′35.0″	N34°48′11.1″
	刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest	马莲滩林场西 West of the Maliantan farmland	22	1239	E108°05′27″	N34°48′00″
混交林地 Mixed forestland	侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis*-*Robinia pseudoacacia*	马莲滩三岔口 Crossroad of the Maliantan	16	1239	E108°05′35.6″	N34°48′07.5″
	刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia*-*Hippophae reamnoides*	马莲滩林场西 West of the Maliantan farmland	16	1230	E108°05′25.4″	N34°47′58.4″
	油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis*-*Hippophae reamnoides*-*Robinia pseudoacacia*	马莲滩林场梁顶 Beam top of the Maliantan farm	16	1247	E108°05′23.9″	N34°48′19.3″

0.6 g,放入消煮管,同时,用石英砂作空白,加入5 mL 0.2 mol/L重铬酸钾和5 mL 1∶3硫酸,放在油浴锅中加热5 min(从管中液体沸腾开始计时),然后将管中液体尽可能全部洗入三角瓶中,三角瓶中的液体在50～100 mL之间,滴入二苯胺指示剂,用0.05 mol/L左右浓度的硫酸亚铁滴定。计算公式为:

$$EOC = (V_0 - V_i) \times N \times 0.003/M \times 1000 \times (1 + W/100)$$

式中:EOC为易氧化有机碳含量;V_0为空白滴定用的硫酸亚铁体积;V_i为土样滴定用的硫酸亚铁体积;N为硫酸亚铁摩尔浓度;M为称样重;W为吸湿水百分数。

1.4 数据分析

文中数据均利用 Excel 2003 和 SPSS12.0 软件进行数据处理。混交林与纯林土壤各碳组分含量之间的差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),如果差异显著,再采用 LSD 法进行多重比较分析,然后经过 t 检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同林分结构土壤有机碳分布特征

图 1 显示,与纯林相比,混交林能够有效增加整个剖面土壤有机碳质量分数。对于 0—5 cm 土层 SOC 含量,侧柏-刺槐混交林分别高于侧柏、刺槐纯林 123% 和 160%($P>0.05$);刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐、沙棘纯林 22% 和 25%($P>0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林高于油松纯林 16%($P>0.05$),而低于刺槐、沙棘纯林分别约 21% 和 19%($P>0.05$)。对于 5—20 cm 土层 SOC 含量,侧柏-刺槐混交林分别高于侧柏、刺槐纯林 17%、51%($P>0.05$);刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐、沙棘纯林 84% 和 32%($P>0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别高于刺槐、油松纯林 21% 和 31%($P>0.05$),而低于沙棘纯林 13%($P>0.05$)。20—100 cm 深度,基本表现为混交林 SOC 质量分数明显高于其纯林(除侧柏纯林与其混交林相近外)。0—100 cm 土体,侧柏-刺槐混交林 SOC 质量分数为其纯林的 1.08 和 2.17 倍,刺槐-沙棘混交林为纯林的 1.84 和 2.24 倍,油松-沙棘-刺槐混交林为纯林的 2.00、2.14 和 1.76 倍。

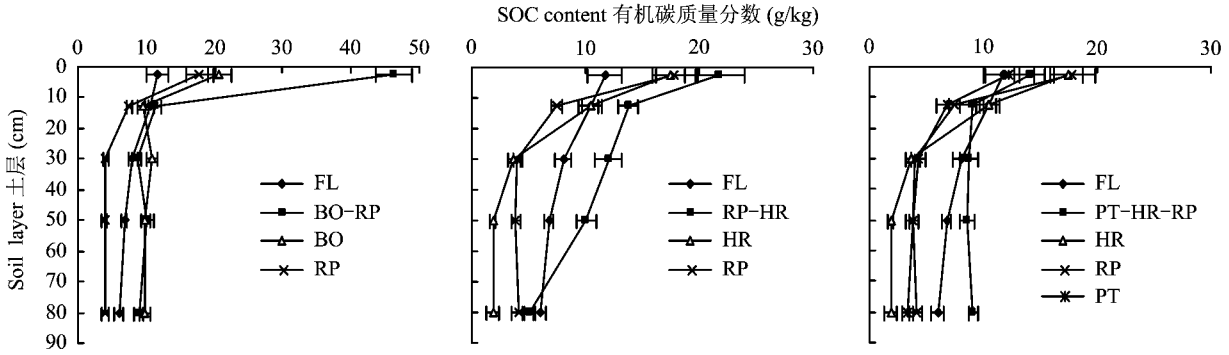

图 1　不同林分结构土壤有机碳质量分数

Fig. 1　The properties of soil organic carbon (SOC) contents under different planting structures

[注(Note): FL—耕地 Farmland; BO—侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest; RP—刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest; HR—沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest; PT—油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest; BO-RP—侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia*; RP-HR—刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides*; PT-HR-RP—油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia*.]

2.2 不同林分结构土壤易氧化态有机碳分布特征

与纯林相比,混交林可较大幅度地提高土壤易氧化态有机碳(EOC)质量分数(图 2)。对于 0—5 cm 土层土壤 EOC 含量,侧柏-刺槐混交林分别高于侧柏、刺槐纯林 161% 和 304%($P<0.05$);刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐、沙棘纯林 62% 和 34%($P<0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别高于油松、刺槐和沙棘纯林 83%、71% 和 42%($P<0.05$)(图 2)。对于 5—20 cm 土层土壤 EOC 含量,侧柏-刺槐混交林高于刺槐纯林 63%($P<0.05$),却低于侧柏纯林($P<0.05$);刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐、沙棘纯林 109% 和 72%($P<0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别高于油松、刺槐和沙棘纯林 85%、109% 和 72%($P<0.05$)。20—100 cm 各土层,混交林土壤 EOC 质量分数明显高于纯林(除侧柏纯林高于其混交林外)。0—100 cm 土体,侧柏-刺槐混交林土壤 EOC 质量分数为其纯林的 1.00 和 2.49 倍,刺槐-沙棘混交林为纯林的 1.88 和 1.36 倍,油松-沙棘-刺槐混交林为其纯林的 1.43、1.36 和 1.88 倍。

2.3 不同林分结构土壤轻组有机碳质量分数

与纯林相比,混交林能极大地提高土壤轻组有机碳(LFOC)质量分数(图 3)。对于 0—5 cm 土层土壤 LFOC 质量分数,侧柏-刺槐混交林分别高于刺槐、侧柏纯林 1399% 和 482%($P<0.05$);刺槐-沙棘混交林高于刺槐纯林 114%($P<0.05$),而低于沙棘纯林 42%($P<0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别高于油松、刺槐纯林 33% 和 148%($P<$

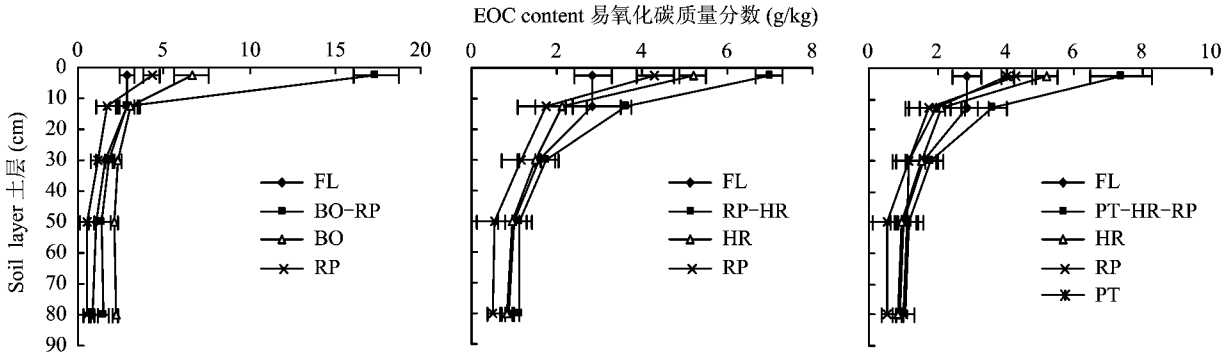

图2 不同林分结构土壤易氧化态有机碳质量分数

Fig. 2 The properties of soil easily oxidizable organic carbon (EOC) contents under different planting structures

[注(Note): FL—耕地 Farmland; BO—侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest; RP—刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest; HR—沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest; PT—油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest; BO-RP—侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia*; RP-HR—刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides; PT-HR-RP—油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia*.]

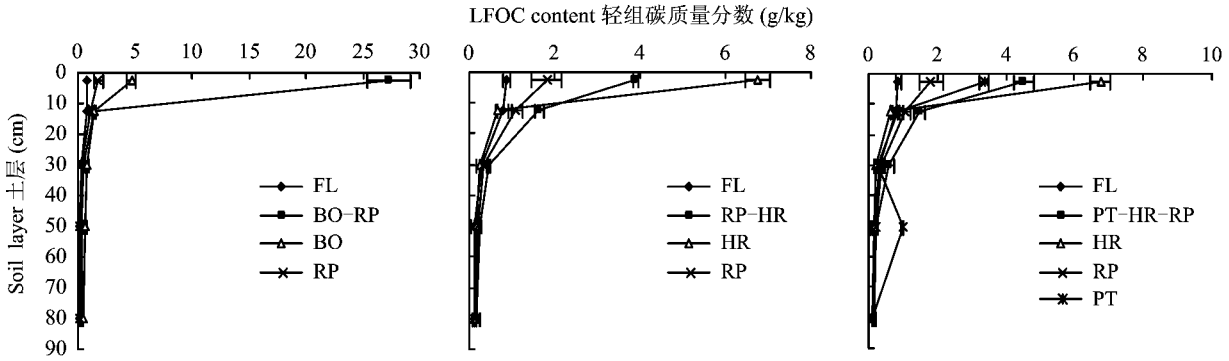

图3 不同林分结构土壤轻组有机碳质量分数

Fig. 3 Properties of light fraction organic carbon (LFOC) contents under different planting structures

[注(Note): FL—耕地 Farmland; BO—侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest; RP—刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest; HR—沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest; PT—油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest; BO-RP—侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia*; RP-HR—刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides*; PT-HR-RP—油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia*.]

0.05),而低于沙棘纯林33% ($P<0.05$)。5—20 cm土层,侧柏-刺槐混交林土壤LFOC质量分数高于刺槐纯林28% ($P<0.05$),而等于侧柏纯林;刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐、沙棘纯林53%和152% ($P<0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别高于油松、沙棘和刺槐纯林75%、126%和37% ($P<0.05$)。其他各土层土壤LFOC质量分数,纯林与混交林相比与5—20 cm变化规律基本一致(除40—60 cm土层油松纯林高于其混交林外)。0—100 cm土体,侧柏-刺槐混交林土壤LFOC质量分数为其纯林的2.04和4.50倍,刺槐-沙棘混交林为其纯林的1.60和1.16倍,油松-沙棘-刺槐混交林为其纯林的1.13、1.65和1.20倍。

2.4 不同林分结构土壤颗粒态有机碳质量分数

与纯林相比,部分混交林能有效提高0—5 cm深度土壤颗粒态有机碳(POC)质量分数(图4)。对于0—5 cm土层POC总量,侧柏-刺槐混交林分别高于刺槐和侧柏纯林约454%和436% ($P<0.05$);刺槐-沙棘混交林高于刺槐纯林81% ($P<0.05$),而低于沙棘纯林7% ($P>0.05$);油松-沙棘-刺槐混交林分别低于油松纯林、刺槐纯林约19%、3% ($P>0.05$),低于沙棘纯林50% ($P<0.05$)(图4)。而5—100 cm的其他土层,混交林则基本低于纯林。在0—100 cm土层,侧柏-刺槐混交林土壤POC质

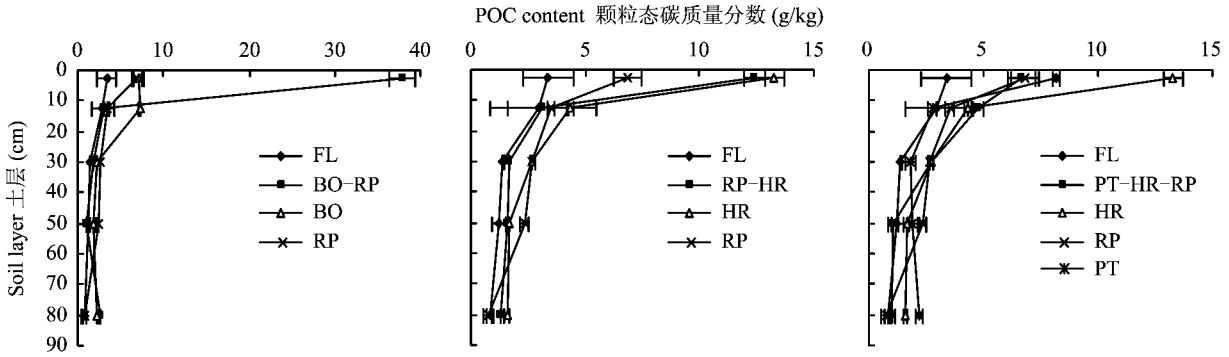

图 4　不同林分结构土壤颗粒态有机碳质量分数

Fig. 4　Properties of particulate organic carbon (POC) contents under different planting structures

[注(Note): FL—耕地 Farmland; BO—侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest; RP—刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest; HR—沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest; PT—油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest; BO-RP—侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia*; RP-HR—刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides*; PT-HR-RP—油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia*.]

量分数为其纯林的 1.26 和 1.83 倍,刺槐-沙棘混交林为其纯林的 1.05 和 0.80 倍,油松-沙棘-刺槐混交林为其纯林的 0.89、0.78 和 1.01 倍。

2.5　不同林分结构土壤可溶性有机碳质量分数

图 5 显示,与纯林相比,混交林能有效提高土壤可溶性有机碳(DOC)质量分数。0—5 cm 土层土壤 DOC 含量,侧柏-刺槐混交林分别显著高于侧柏、刺槐纯林 138% 和 170% ($P<0.05$); 刺槐-沙棘混交林高于刺槐纯林 17% ($P<0.05$),而低于沙棘纯林 10% ($P<0.05$); 油松-沙棘-刺槐混交林等于沙棘纯林,而高于刺槐和油松纯林幅度分别约 30% 和 44% ($P<0.05$)。对于 5—20 cm 土层土壤 DOC 含量,侧柏-刺槐混交林高于刺槐纯林 12% ($P<0.05$),而低于侧柏纯林 5% ($P>0.05$); 刺槐-沙棘混交林分别高于刺槐和沙棘纯林 53%、13% ($P<0.05$); 油松-沙棘-刺槐混交林分别高于油松、刺槐纯林 31%、24% ($P<0.05$),而低于沙棘纯林 9% ($P>0.05$)。对于其他土层土壤 DOC 含量,除侧柏纯林高于其混交林外,其他均表现为混交林高于其纯林。在 0—100 cm 整个土体,侧柏-刺槐混交林土壤 DOC 质量分数为其纯林的 1.06 和 1.59 倍,刺槐-沙棘混交林为其纯林的 1.28 和 1.06 倍,油松-沙棘-刺槐混交林为其纯林的 1.39、1.10 和 1.32 倍。

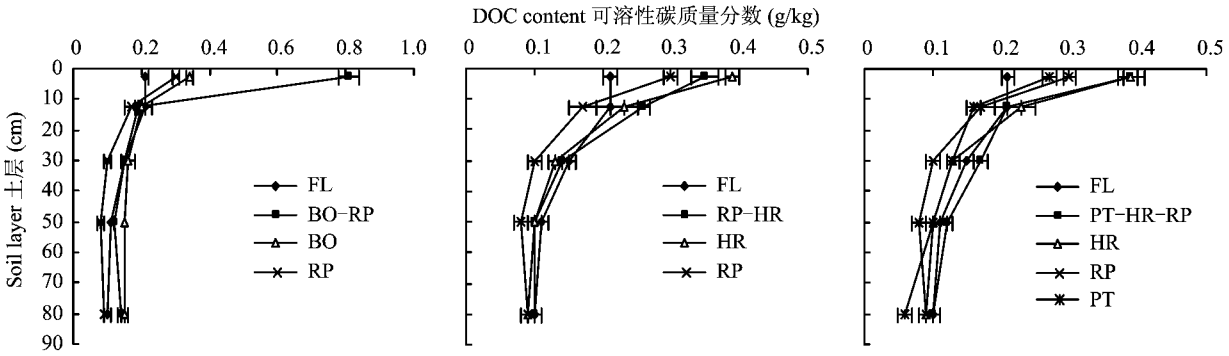

图 5　不同林分结构土壤可溶性有机碳质量分数

Fig. 5　Properties of dissolved organic carbon (DOC) contents under different planting structures

[注(Note): FL—耕地 Farmland; BO—侧柏纯林 *Biota orientalis* pure forest; RP—刺槐纯林 *Robinia pseudoacacia* pure forest; HR—沙棘纯林 *Hippophae reamnoides* pure forest; PT—油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forest; BO-RP—侧柏-刺槐混交林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia*; RP-HR—刺槐-沙棘混交林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides*; PT-HR-RP—油松-沙棘-刺槐混交林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia*.]

3 讨论

3.1 不同林分结构土壤有机碳及其分布

研究发现,研究区混交林与纯林相比较能显著增加土壤有机碳积累。这与韩恩贤等[18]、岳庆玲等[19]以及叶存旺等[20]的研究结果一致。研究区固氮树种有豆科的刺槐,非豆科的沙棘,非固氮树种为侧柏和油松;固氮树种与非固氮树种混交林有着较非固氮树种纯林更为复杂的林分结构,生物种群增多,林分也更为稳定。此外,贾黎明[21]指出,在贫瘠缺氮立地上,固氮树种可改善林地小气候,提高林分稳定性,改良土壤,改善非固氮树种氮素营养状况,促进其生长,增加林地产量。同时,土壤有机碳含量决定于其年生成量和年分解量的相对大小。因此,适当的林分进行混交可以有效增加土壤有机碳含量。

沙棘纯林属于速效树种其有机碳积累短时间内积累效果显著,因此会出现0—20 cm深度高于其混交林模型的现象,但在整个剖面上土壤有机碳质量分数低于混交林。董建辉等[22]研究也发现,沙棘林土壤有机质、全氮等含量高于混交林,而其他树种的纯林则低于混交林,这与本文的结论一致。沙棘、刺槐、油松以及侧柏所形成的混交林中,0—5 cm表层土壤有机碳积累效果以侧柏-刺槐混交栽培模式最为明显,5—20 cm土层以刺槐-沙棘混交栽培模式最为显著。在整个剖面上,油松-沙棘-刺槐、刺槐-沙棘混交林相对于纯林土壤总碳的积累效果最为明显,说明这两种混交林地针阔叶、固氮-非固氮林分结构合理,可有效地增加土壤碳含量。

不同林分结构土壤有机碳含量呈现随土层增深而下降的趋势。乔木有主根系,根系分布较深,而灌木没有主根系,根系分布较浅。因而,总体上表现为乔灌混交林剖面土壤有机碳变化幅度小于灌木纯林;混交林中油松-沙棘-刺槐混交林土壤有机碳剖面变化幅度最小,这与其树种多样性复杂,地下根系分布均匀有关;沙棘纯林剖面变化大于侧柏、刺槐和油松纯林,这与沙棘根系分布主要集中于0—40 cm深度有关;同时,由于针叶树种油松的根系形态类型和数量与阔叶树种刺槐相比有一定差异,油松主根和副主根粗壮发达,水平根系形成构架根,心根数量少;刺槐则水平根系极为发达,造成了刺槐纯林的土壤有机碳剖面变化幅度大于油松纯林。这与韩恩贤等[18]、郭梓娟等[23]得到的根系分布状况结论相符合。

3.2 不同林分结构土壤活性有机碳及其分布

林分结构通过影响归还土壤凋落物的数量、质量和分解速率进而改变与土壤有机碳、氮循环相关的微生物过程[24]。活性有机碳含量差异便与其凋落物和枯死细根归还量、质量有关。同时,林分结构也影响土壤养分和微生物群落结构,最终导致土壤微生物生物量碳和微生物效率的利用率发生变化[25]。因此,有的植被种类的凋落物和枯死细根更易被微生物分解,使得本身便会有更高比例的分解产物进入土壤活性有机碳库,如侧柏-刺槐混交林。由于测定方法的差异,形成本研究区域各活性有机碳含量与其他报道的数值存在一定差异,但总体上表现为混交林活性有机碳积累效果明显优于纯林。这是由于与纯林相比,混交林具有更有效的微生物作用,使得更大部分的碳基体纳入生物量,因此减少了单位生物量碳的呼吸损耗,形成了相对的低代谢商[26]。

混交林与纯林各活性有机碳含量差异主要体现在0—20 cm土层。沙棘林属速效树种,15年便可积累较为丰富的活性有机碳,其颗粒、轻组以及可溶性有机碳含量部分土层高于其混交林,其他则均表现为纯林活性有机碳含量低于其混交林。总而言之,混交林可以有效提高土壤整个土体的活性有机碳含量。这与Binkly得到的"在贫瘠缺氮立地条件上,混交使得固氮、非固氮树种生长和林分总产量有较大的提高"[27]结论一致。其中,侧柏混交林对于土壤活性有机碳的积累效果最为明显,刺槐-沙棘混交林较差;油松林由于油松根重密度是刺槐的2.09倍[28],所以油松纯林活性有机碳含量高于刺槐。

各活性有机碳之间相比较,混交林对于土壤易氧化态碳含量增加效果优于其他活性有机碳。这是由于土壤有机质的瞬时波动主要在易氧化、分解的有机碳内发生,而易氧化态碳便是可以指示土壤有机质早期变化的因子。同时本研究结果显示,混交林与纯林相比对于土壤颗粒有机碳含量的改善效果不甚明显。这与不同植被枯落物分布特征有关,如侧柏纯林在0—60 cm范围内≤1 mm的细根量明显多于其混交林[23],沙棘林有机质积累也高于混交林[22],这些均增加了颗粒态有机碳的形成与积累。

3.3 土壤有机碳与颗粒有机碳敏感性指标分析

众多研究认为,土壤活性有机碳比土壤有机碳更易于改变,是对土地利用、土地管理措施等反应较为敏感的指示部分[29-30]。有研究发现,颗粒态有

机碳对土壤耕作比较敏感,是反映在不同农田管理措施下土壤质量变化较好的指标[31]。本文对不同碳组分进行了敏感性指标计算(表 2),0—5 cm、5—20 cm 和 20—40 cm 三个土层均表现为 LFOC 敏感性较高,其次为 POC,再次为 EOC,DOC 敏感性最差,这与前人等研究结果相似[32]; 40—60 cm 和 60—100 cm 两个土层,LFOC 和 SOC 敏感性较高,DOC 和 EOC 则较低。因此,LFOC 更能反映植被类型、土地管理措施对于土壤的影响,可作为衡量植被恢复、土地管理对土壤影响的评价指标之一。

表 2　不同林分结构土壤各组分有机碳变化的敏感性指标

Table 2　Sensitivity index of soil different carbon fractions under different planting structures

土层(cm) Soil layer	敏感性 Sensitivity				
	SOC	LFOC	DOC	POC	EOC
0—5	2.98	31.49	3.09	14.71	6.18
5—20	2.35	6.25	1.63	11.00	3.51
20—40	3.84	9.33	1.58	6.02	4.03
40—60	6.16	6.10	1.33	3.93	1.91
60—100	5.23	5.65	0.77	5.97	1.76

注(Note): 敏感性指标[32] = (变量最大值-变量最小值)/变量最小值 Sensitivity index[32] = (variable maximum value - variable minimum value) / variable minimum value.

3.4　土壤有机碳与活性有机碳之间的关系

表 3 显示,土壤有机碳与活性有机碳组分均呈线性极显著正相关关系,其中,颗粒态有机碳在有机碳中的比例最高,轻组有机碳其次,可溶性有机碳占的比例最小; 有机碳与可溶性有机碳、易氧化态有机碳的相关性高于其与其他组分; 侧柏-刺槐混交林及其纯林土壤有机碳与其活性有机碳之间的相关性高于其与其他组分。另外,不同植被类型各活性有机碳之间,轻组有机碳与颗粒有机碳二者之间的相关性大于其与其他($r = 0.970$, $P < 0.01$),易氧化态碳与可溶性有机碳二者之间的相关性大于其与其他($r = 0.973$, $P < 0.01$),结果表明,轻组有机碳与颗粒有机碳物质组成相似,而可溶性有机碳主要来源于易氧化态碳。

表 3　不同林分结构土壤有机碳与活性有机碳的相关性

Table 3　Correlation between SOC and liable organic carbon under different planting structures

植被类型 Vegetation type	回归方程 Regression function	r
侧柏-刺槐混交林与其纯林 Mixed forest of *Biota orientalis-Robinia pseudoacacia* and it's pure forest	SOC = 2.4744EOC + 4.0493	0.9881**
	SOC = 1.4428LFOC + 8.2503	0.9472**
	SOC = 1.0755POC + 6.2478	0.9438**
	SOC = 57.468DOC + 0.1430	0.9898**
刺槐-沙棘混交林与其纯林 Mixed forest of *Robinia pseudoacacia-Hippophae reamnoides* and it's pure forest	SOC = 3.0778EOC + 2.1505	0.9223**
	SOC = 2.6107LFOC + 5.9058	0.7531**
	SOC = 1.3277POC + 3.7309	0.8084**
	SOC = 55.506DOC - 0.716	0.9039**
油松-沙棘-刺槐混交林与其纯林 Mixed forest of *Pinus tabuliformis-Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia* and it's pure forest	SOC = 2.2077EOC + 2.8695	0.8279**
	SOC = 2.1299LFOC + 5.0701	0.7699**
	SOC = 1.2838POC + 2.9605	0.8139**
	SOC = 43.925DOC + 0.1818	0.9013**

注(Note): ** 表示 0.01 水平显著相关 Indicate significant correlation at the 0.01 level.

4 结论

1)纯林与混交林各土层土壤有机碳差异不尽一致,基本表现为混交林可以有效增加土壤不同组分有机碳质量分数,侧柏混交林效果最为明显,刺槐-沙棘混交林较差。土壤各活性有机碳之间相比较,混交林对于土壤易氧化态有机碳含量增加效果最显著,而对于土壤颗粒态有机碳含量的改善效果不甚明显。

2)不同碳组分的敏感性指标显示,0—5 cm、5—20 cm 和 20—40 cm 三个土层均表现为轻组有机碳敏感性最高,其次为颗粒有机碳总量,而土壤总有机碳和可溶性有机碳敏感性较低。在 0—100 cm 土体,轻组有机碳的敏感性指标分别是总有机碳、可溶性和易氧化态有机碳的 1.00 ~ 10.58、3.83 ~ 10.19 和 1.78 ~ 5.10 倍。因此,轻组有机碳更能反映植被类型、土地管理措施对土壤的影响。

3)土壤有机碳与活性有机碳组分均呈线性极显著正相关关系;其中,颗粒态有机碳在有机碳中比例最高,轻组有机碳其次,可溶性有机碳占的比例最小。另外,不同植被类型各活性有机碳之间,轻组有机碳与颗粒有机碳二者之间的相关性大于其与其他组分的相关性,易氧化态碳与可溶性有机碳二者之间的相关性大于其与其他组分的相关性,说明轻组有机碳与颗粒有机碳物质组成相似,而可溶性有机碳主要来源于易氧化态碳。

参 考 文 献:

[1] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine[J]. Tree Physiol., 2003, 23: 273-280.

[2] 宋西德, 罗伟祥, 侯琳. 黄土高原渭北生态经济型防护林体系永寿示范区建设技术及其生态经济效益[J]. 防护林科技, 1997, 3: 20-22.
Song X D, Luo W X, Hou L. Yongshou demonstration area of technology and its ecological and economic benefits in the Weibei Loess Plateau of the ecological economic protection forest system [J]. For. Sci. Technol., 1997, 3: 20-22.

[3] 杨尚斌. 黄土丘陵区延河流域退耕还林(草)土壤固碳潜力评估[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2010, 28-36.
Yang S B. The evaluation of carbon in farmland in Yanhe river catchment in Loess Hilly and Gully region [D]. Yangling, Shaanxi: MS thesis, Northwest A & F University, 2010, 28-36.

[4] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem [J]. Chin. J. Ecol., 2007, 26(2): 278-285.

[5] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 等. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2235-2240.
Yang Z J, Chen G S, Xie J S *et al*. Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolat*, *Schima superba*, and their mixed plantations [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(9): 2235-2240.

[6] 尤文忠, 刘明国, 李宏印, 等. 半干旱地区不同油松混交林的油松生长特征及植物多样性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 825-829.
You W Z, Liu M G, Li H Y *et al*. Growth characters and plant species diversities of chinese pine for different mixed stands in semi-arid area[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2007, 38(6): 825-829.

[7] 刘霞, 王丽, 张光灿, 等. 鲁中石质山地不同林分类型土壤结构特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 49-52.
Liu X, Wang L, Zhang G C *et al*. Structural property of soil from different forest types on rocky mountainous area in middle of Shandong province[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(6): 49-52.

[8] 韩恩贤, 韩刚. 黄土高原沟壑区沙棘人工混交林改土效应研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 879-884.
Han E X, Han G. Effect of improved soil on *Hippophae Rhamnodies* mixed plantation in Gully Region of Loess Plateau [J]. J. Nat. Resour., 2005, 20(6): 879-884.

[9] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统C、N贮量[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
Huang Y, Feng Z W, Wang S L *et al*. C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(12): 3146-3154.

[10] 沈宏, 曹志洪, 胡义正. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil [J]. Chin. J. Ecol., 1999, 18(3): 32-38.

[11] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 高寒草原生态系统表层土壤活性有机碳分布特征及其影响因素—以贡嘎南山—拉轨岗日山为例[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3501-3508.
Wang J L, Ouyang H, Wang Z H *et al*. Influential factors and distribution characteristics of topsoil labile organic carbon in alpine grassland ecosystem at the south of Gongga south mountain Laguigangri Mountain [J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 29(7): 3501-3508.

[12] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 502-506.
Yang L X, Pan J J. Progress in the study of measurements of soil active organic carbon pool [J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(4): 502-506.

[13] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Adv. Agron.

2005, 85: 221-268.

[14] 胡卫萱, 丁峰, 宋文华. 绿化配置对城市土壤酶活性和有机质质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 115-116.
Hu W X, Ding F, Song W H. Effects of afforestation modes on enzyme activities and organic matter contents of urban soils[J]. J. Northeast For. Univ., 2009, 37(9): 115-116.

[15] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 325-330.
Li X H, Wang Z H, Hao M D *et al*. Evaluation on soil carbon contents under different cropping systems on dryland in Loess Plateau [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(S2): 325-330.

[16] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226.
Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B *et al*. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau [J]. J. Nat. Resour., 2010, 25(2): 218-226.

[17] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1418-1425.
Liu M Y, Chang Q R, Yang X Y. Soil carbon fractions under different land use types in the tableland Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1418-1425.

[18] 韩恩贤, 韩刚, 薄颖生. 黄土高原油松、侧柏与沙棘人工混交林生长及土壤特性研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 100-104.
Han E X, Han G, Bo Y S. Studies on the growth and soil properties of *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis* and *Hippophae rhamnoides* mixed plantation on Loess Plateau[J]. J. Northwest For. Univ., 2007, 22(3): 100-104.

[19] 岳庆玲, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土丘陵沟壑区不同人工林地土壤肥力变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 100-104.
Yue Q L, Chang Q R, Liu J *et al*. Soil fertilizer change of different artificial forest on Loess plateau Gully[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2007, 25(3): 100-104.

[20] 叶存旺, 翟巧绒, 郭梓娟, 等. 沙棘-侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 1-6.
Ye C W, Zhai Q R, Guo Z J *et al*. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity of *Hippophae rhamnoides* and *Platycladus orientalis* mixed forests[J]. J. Northwest For. Univ., 2007, 22(5): 1-6.

[21] 贾黎明. 固氮树种与非固氮树种混交林研究现状[J]. 世界林业研究, 1998, (1): 20-26.
Jia L M. The Review of mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species[J]. World For. Res., 1998, (1): 20-26.

[22] 董建辉, 薛泉宏, 张建昌, 等. 黄土高原人工混交林土壤肥力及混交效应研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 31-35.
Dong J H, Xue Q H, Zhang J C *et al*. Soil fertility characteristis and mixed effect of plantation forests on Loess Plateau [J]. J. Northwest For. Univ., 2005, 20(3): 31-35.

[23] 郭梓娟, 宋西德, 赵宏刚. 沙棘-侧柏混交林生物量、林地土壤特性及其根系分布特征的研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 18-23.
Guo Z J, Song X D, Zhao H G. Biomass and soil characteristics of *Hippophae rhamnoides* and *Platycladus orientalis* mixed forest and its root system distribution[J]. Bull. Soil Water Conserv., 2007, 27(3): 18-23.

[24] Morisada K, Ono K, Kanomata H. Organic carbon stock in forest soils in Japan[J]. Geoderma, 2004, 119: 21-32.

[25] Wang Q K, Wang S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations[J]. J. For. Res., 2008, 19(2): 131-135.

[26] Behera N, Sahani U. Soil microbial biomass and activity in response to Eucalyptus plantation and natural regeneration on tropical soil[J]. For. Ecol. Manag., 2003, 174: 1-11.

[27] Binkley D. Interaction of site fertility and red alder on ecosystem production in Douglas-fir plantation[J]. For. Ecol. Manag., 1983, 5: 215-227.

[28] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647-651.
Liu X P, Chen L H, Chen J H. Study on the distribution of root density of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis Carr* [J]. Arid Zone Res., 2007, 24(5): 647-651.

[29] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1123-1131.
Yang Y S, Xie J S, Sheng H *et al*. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of Southern China [J]. Acta Geograph. Sin., 2007, 62(11): 1123-1131.

[30] 周程爱, 张于光, 肖烨, 等. 土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4542-4547.
Zhou C A, Zhang Y G, Xiao Y *et al*. The effect of land use changes on soilactive organic carbon pool in Miyaluo forest zone of the western Sichuan[J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 29(8): 4542-4547.

[31] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a cerrado oxisol[J]. Soil Till. Res., 2003, 70(2): 107-119.

[32] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil [J]. Can. J. Soil Sci., 1994, 74: 131-138.