

不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化

安娟娟¹, 陈少锋¹, 赵发珠¹, 杨丽霞¹, 韩新辉^{1,2}, 康迪¹, 杨改河^{1,2*}

(1.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要:探讨了黄土丘陵区不同人工植被下土壤总有机碳(TOC)、3种氧化活性有机碳及碳库管理指数(CMI)的变化特征。结果表明:0~100 cm土层,不同人工植被下土壤总有机碳、3种活性有机碳含量均随土层加深而递减,但整个土壤剖面总有机碳及其活性组分含量均表现为刺槐>柠条>撂荒地>坡耕地,且差异主要在0~40 cm土层;同一土层,不同人工植被下3种土壤活性有机碳含量及有效率表现为低活性有机碳(0.67~2.02 g·kg⁻¹, 10.47%~33.00%)>中活性有机碳(0.12~1.38 g·kg⁻¹, 6.44%~22.52%)>高活性有机碳(0.03~0.68 g·kg⁻¹, 2.10%~11.09%)。不同人工植被下有机碳活性越强,则其CMI的差异越大且影响深度越深,相比坡耕地,3种人工植被均显著提升了0~100 cm深各土层高活性有机碳CMI,且平均增幅表现为刺槐(213.9%)>柠条(152.4%)>撂荒(82.6%),中和低活性有机碳CMI只在人工刺槐和柠条林下100 cm深各土层显著增加。综上,人工林植被具有提升100 cm土壤碳库及其质量的潜力,且总体以刺槐效果较佳。

关键词:人工植被;土壤活性有机碳;碳库管理指数(CMI);黄土丘陵区

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)05-0985-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.05.023

Changes of Soil Labile Organic Carbon and Carbon Management Index Under Different Artificial Vegetations

AN Juan-juan¹, CHEN Shao-feng¹, ZHAO Fa-zhu¹, YANG Li-xia¹, HAN Xin-hui^{1,2}, KANG Di¹, YANG Gai-he^{1,2*}

(1.College of Agricultural Sciences, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China; 2.Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil organic carbon is often affected by organic inputs. In this study, three pools of soil labile organic carbon (LOC) with different turnover rates and soil carbon management index (CMI) were investigated under different artificial vegetations for 20 years in the Hilly Loess Plateau Region, China. In 0~100 cm soil profile, contents of total organic carbon (TOC) and LOC decreased with increasing soil depth. Compared to the farmland, artificial vegetations increased the contents of TOC and LOC mainly in the 0~40 cm soil layer. Both TOC and LOC decreased in order of *Robinia*>*Caragana microphylla*>abandonment>farmland. At the same depth, the contents of three LOC and the ratios LOC to TOC were lowly labile organic carbon (0.67~2.02 g·kg⁻¹ and 10.47%~33.00%)>mid-labile organic carbon (0.12~1.38 g·kg⁻¹ and 6.44%~22.52%)>highly labile organic carbon (0.03~0.68 g·kg⁻¹ and 2.10%~11.09%). The CMI of highly labile organic carbon was increased in the 0~100 cm soil layer under the artificial vegetations, with increasing percentage in *Robinia* (213.9%)>*Caragana microphylla* (152.4%)>abandonment (82.6%) in comparison with the farmland. However, the CMI of lowly and mid-labile organic carbon was found to increase only under *Robinia* and *Caragana microphylla*. The present results show that artificial vegetations have the potential to promote soil organic carbon pools with *Robinia* performing best.

Keywords: artificial vegetations; soil labile organic carbon; carbon management index (CMI); the Hilly Loess Plateau Region

黄土丘陵区地形支离破碎,沟壑纵横,自然植被破坏严重,土壤贫瘠且结构疏松,有机碳含量低,抗侵

蚀能力弱,水土流失严重,是我国主要的生态环境脆弱区之一,也是国家以退耕还林还草为核心的生态恢复建设工程的重点实施区域^[1-2]。土壤有机碳作为土壤质量核心的表征指标之一,与土壤的物理、化学及生物学性质有着直接关系^[3],认知黄土丘陵区典型人工植被类型下土壤碳库的动态变化对认知退耕还林生态效应、机制及其效果评价具有重要意义。但土壤有机碳由周转速率和功能不同的组分组成,对植被变化

收稿日期:2013-08-07

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201304312);国家自然科学基金项目(41301601)

作者简介:安娟娟(1987—),女,硕士在读,主要从事农业生态研究。

E-mail: 760311867@qq.com

* 通信作者:杨改河 E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

的响应和敏感程度不同^[4-5],特别是土壤有机碳中对植物养分有高效直接的供应作用且易被土壤微生物分解利用的活性部分,被称为活性有机碳^[6],它能够比土壤总有机碳更灵敏和迅速地表征土壤碳库对人工措施 的响应变化^[7]。Logninow 等^[4]根据有机碳能被 3 种不同浓度的 KMnO₄(33、167、333 mmol·L⁻¹)氧化的数量,将有机碳分成高活性、中活性及低活性 3 种活性有机碳组分,由其计算所得土壤碳库管理指数(CMI)更是全面、敏感监测和反映土壤碳库质量变化及更新程度的有效指标^[5],广泛应用于土壤碳库变化研究中^[6-8]。目前,国内外学者在人工林地上也积极开展了土壤碳库的研究,但大多仅限于表层土壤^[6-7]或是单一植被类型^[2,9-10],且侧重于土壤总有机碳的变化^[11-12]。因此,本研究采集黄土丘陵区不同人工植被下 0~100 cm 不同土层土壤,对比分析总有机碳及 3 种活性有机碳含量、分布及碳库管理指数的变化状况,揭示不同人工植被对于提升土壤活性碳库储量、质量的效应及其分异特征, 以期为评价人工林促进生态恢复效果、提高土壤质量及选择生态碳库管理技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在陕西省安塞县纸坊沟流域(北纬 36° 51'30";东经 109°19'30"),面积 8.27 km²,属黄土丘陵沟壑区。年总辐射量为 552.6 kJ·cm⁻²,海拔 1010~1400 m,年均降雨量为 535 mm,年均气温 8.8 ℃,干燥度 1.48,无霜期 160 d 左右,土壤以黄土母质发育的黄绵土为主,约占总面积的 95%^[1]。实施有山杏(*Armeniaca sibirica*)、刺槐(*R. pseudoacacia*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、杨树(*P. simonii*)、柠条(*Cargana microphylla*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等退耕还林林种。该流域经过 30 多年水土保持综合治理,通过林草植被和工程建设等措施,成功恢复了退化生态系统,林地面积从

1980 年的不足 5%增长到 40%以上^[2]。

1.2 采样点布置

2012 年 9 月中旬,在纸坊沟流域选择历史背景相同(植被恢复前为坡耕地,种植作物为谷子)的退耕年限为 20 年的刺槐、柠条及撂荒地共 3 种植被类型地(人为干扰较少),并以邻近坡耕地作为对照(种植作物为谷子,粗放管理,不灌水、施肥少),采样点具体信息见表 1。每种植被类型选择 3 块立地条件基本一致的样地,设置 20 m×20 m 标准采样区。样区内按照“S”型选 12 点(图 1),用土钻法采集土样,每隔 10 cm 取样,采至 100 cm 深,共 10 层土样。每层取样点土样混合后作为该层待测土样(共 120 个土样)。将土样中可见的植物残体、植物根系和石块剔除后,混匀并自然风干研磨过 0.25 mm 筛以供测定。

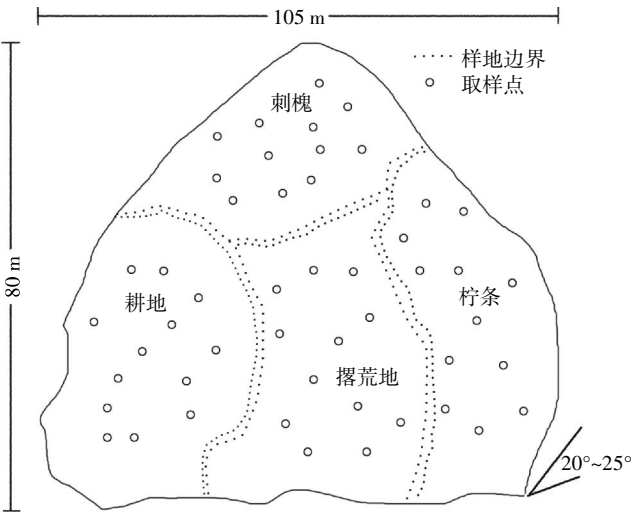


图 1 采样点示意图
Figure 1 Diagrammatic sketch of sampling sites

1.3 样品分析方法

土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾加热法测定。不同组分活性有机碳(Labile organic carbon, LOC)采用 KMnO₄ 氧化法测定^[2],即称取

表 1 样地基本特征
Table 1 Description of investigated plots

植被类型 Vegetation type	海拔高度 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	郁闭度 Coverage	林下主要植被类型 Mainly vegetation types of herb
刺槐	1259	22	阳坡	0. 75	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>
柠条	1230	20	阳坡	0. 75	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>
撂荒地	1214	20	阳坡	0. 80	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 达乌里胡枝子 <i>Lespedezadawurica Schindl</i>
坡耕地	1214	19	阳坡		谷子

含有 15 mg 总有机碳的土样于 50 mL 离心管中,加 KMnO_4 25 mL,振荡 1 h,离心 5 min (转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),取上清液用去离子水按 1:250 稀释,然后将稀释液在 565 nm 比色,根据 KMnO_4 浓度的变化求出样品的活性有机碳含量(氧化过程中 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 消耗 9 mg 碳)。试验中选择的 KMnO_4 浓度为 333、167、33 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,由此测定的三组活性有机碳分别为低活性有机碳、中活性有机碳和高活性有机碳。非活性有机碳(Non-labile organic carbon, NLOC)为 TOC 与 LOC 的差值。

1.4 数据计算与分析

各活性有机碳有效率(ER)^[13]的计算为:

$$ER = LOC/TOC \quad (1)$$

以坡耕地为对照土壤,计算不同人工植被下土壤碳库管理指数(CMI):

$$L = LOC/NLOC \quad (2)$$

$$LI = L/L_0 \quad (3)$$

$$CPI = TOC/TOC_0 \quad (4)$$

$$CMI = CPI \times LI \times 100 \quad (5)$$

以上各式中:TOC 为土壤总有机碳含量;LOC 为土壤活性有机碳; L 为土壤的碳库活性; $NLOC$ 为非活性有机碳; LI 为活度指数; L_0 为对照的碳库活性; TOC_0 为对照总有机碳含量; CPI 为碳库指数。

采用 Sigma plot 10.0 制图和 SPSS 16.0 软件进行实验数据处理。不同人工植被及土层中总有机碳及其活性组分含量、碳库管理指数等差异显著性采用邓肯法进行检验分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同人工植被下土壤总有机碳含量的变化

不同人工植被下土壤总有机碳含量随土层深度的加深而递减(图 2),且其剖面分布显著受人工植被的影响。但只在 0~40 cm 深各相邻土层降幅差异达到显著水平($P < 0.05$),刺槐、柠条、撂荒地相邻土层平均差异分别为 23.1%、18.9%及 16.1%;40~100 cm 深各土层并无显著差异,刺槐、柠条及撂荒地各土层总有机碳平均含量分别为 1.90 、 1.78 、 $1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与坡耕地相比,不同人工植被仅显著增加了浅层 0~40 cm 深各土层有机碳含量。40~100 cm 各土层总有机碳含量并未发生显著变化,其中 0~10 cm 土层总有机碳含量以刺槐增幅最高,达到 96.4%;柠条次之,达到 45.2%;撂荒地增幅最低,仅为 15.7%。在 10~20 cm 土层各人工植被土壤总有机碳含量增幅显著低于 0~10

cm 土层,表现为刺槐>柠条>撂荒地。20~40 cm 土层总有机碳含量增幅最小,仍以刺槐 60.2%的增幅最高,撂荒地 6.0%的增幅最低。可见刺槐林土壤表现出更好的碳截留效应。

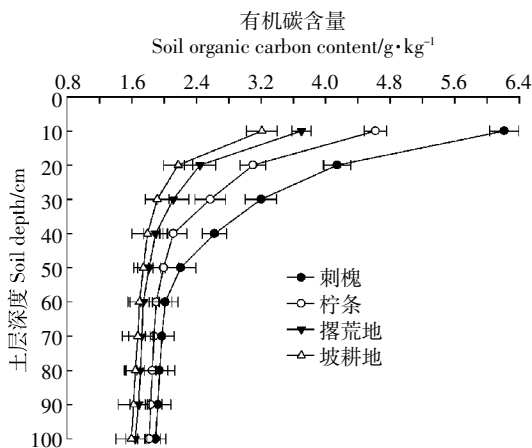


图 2 不同人工植被下土壤总有机碳含量的剖面分布

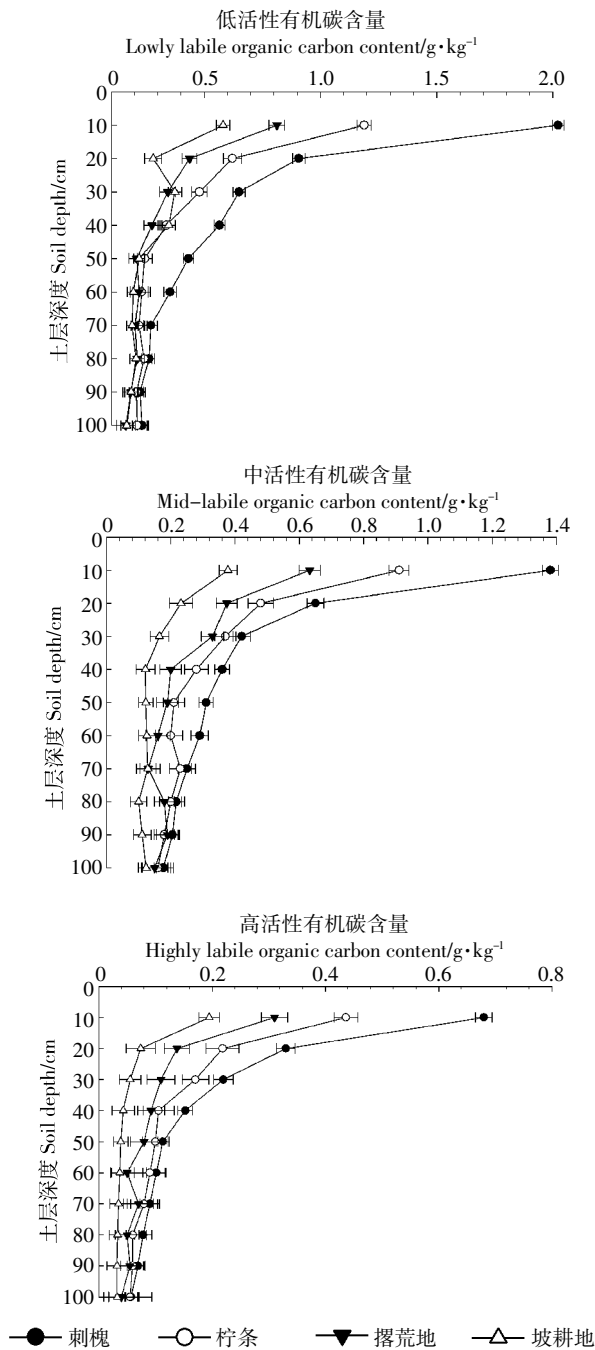
Figure 2 Distribution of total organic carbon in soil profile under different artificial vegetations

2.2 不同人工植被下土壤 3 种活性有机碳及碳库管理指数的变化

2.2.1 活性有机碳的剖面分布

图 3 显示,不同人工植被下 3 种土壤活性有机碳含量均随土层深度加深而递减,其变化趋势基本与土壤总有机碳含量变化一致。各人工植被下 3 种活性有机碳含量在 0~40 cm 土层沿土层加深均显著下降,且相邻土层同一活性有机碳组分降幅在不同植被之间接近,即低、中、高活性有机碳相邻土层降幅分别为 12.9%~46.3%、11.7%~52.9% 和 13.3%~55.6%。40~100 cm 深各土层并无显著差异,刺槐、柠条及撂荒地各土层低活性有机碳平均含量分别为 0.29 、 0.22 、 $0.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;中活性有机碳平均含量分别为 0.24 、 0.19 、 $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;高活性有机碳平均含量分别为 0.08 、 0.07 、 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一土层不同人工植被下 3 种活性有机碳含量也存在明显差异。相比坡耕地,不同人工植被仅显著增加了浅层(0~40 cm)土壤活性有机碳含量。低、中、高活性有机碳含量在 0~10 cm 与 10~20 cm 土层均表现为刺槐>柠条>撂荒,其中低活性有机碳含量增加 39.9%~248.5%,中活性有机碳含量增加 67.3%~265.2%,高活性有机碳含量增加 22.3%~249.6%。20~40 cm 土层仅刺槐低活性有机碳含量较坡耕地显著增加,增幅达到 68.8%,而柠条及撂荒地低、中、高活性有机碳均与坡耕地差异不显著。到 40~100 cm 土

层,不同人工植被低活性有机碳含量均与坡耕地无显著差异($P>0.05$),而刺槐和柠条中、高活性有机碳含量与坡耕地差异显著,增幅达到 84.4%~124.0%。总体而言,0~100 cm 土层的 3 种活性有机碳平均含量在不同人工植被下均表现为低活性有机碳>中活性有机



误差棒为标准误。下同
The error bars represent $\pm$ standard error. The same as below

图 3 不同人工植被下 3 种土壤活性有机碳的剖面分布

Figure 3 Distribution of labile organic carbon pools in soil profiles under different artificial vegetations

碳>高活性有机碳。

2.2.2 活性有机碳有效率的剖面分布

如图 4 所示,3 种土壤活性有机碳 ER 基本随着土层加深而降低。在 0~40 cm 深土层,刺槐、柠条及撂荒地低活性有机碳 ER 在相邻土层降幅平均分别为 19.6%、16.2%及 14.2%。在 40~100 cm 深各土层刺槐、

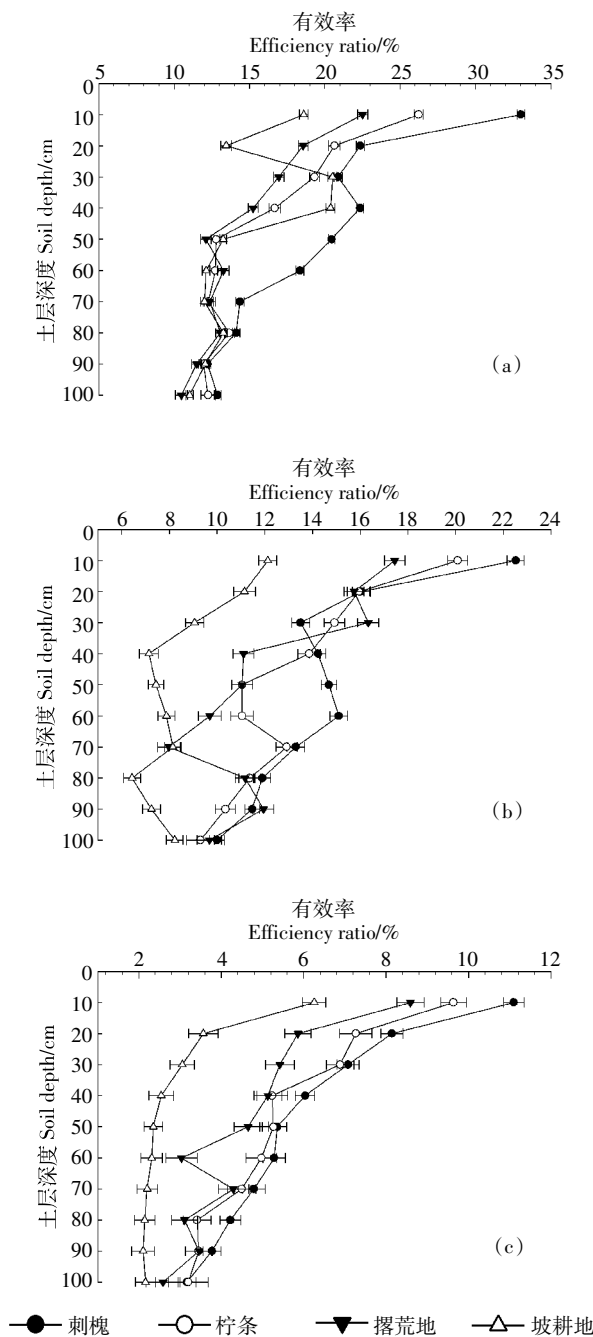


图 4 不同人工植被下土壤低(a)、中(b)、高(c)活性有机碳 ER 的剖面分布

Figure 4 Distribution of ratios of lowly labile organic carbon(a), mid-labile organic carbon(b) and highly labile organic carbon(c) to TOC in soil profiles under different artificial vegetations

柠条及撂荒地低活性有机碳 ER 接近, 平均分别为 15.39%、12.61%、12.12%。各人工植被下中、高活性有机碳 ER 仅在 0~20 cm 土层降幅差异达到显著水平, 刺槐中、高活性有机碳降幅分别为 28.8%和 26.6%, 柠条中、高活性有机碳降幅分别为 20.6%和 24.6%, 撂荒地中、高活性有机碳降幅分别为 9.8%和 20.7%。20~100 cm 深各土层不同人工植被下中、高活性有机碳 ER 并无显著差异。

不同人工植被下土壤低、中、高活性有机碳 ER 分别在 10.5%~33.0%、6.4%~22.5%、2.1%~11.1%。与坡耕地相比, 各人工植被仅显著增加了 0~20 cm 土层活性有机碳 ER , 刺槐低、中、高活性有机碳 ER 增幅均最高, 依次为 77.4%、85.7%、94.6%。20 cm 以下土层, 随土层加深各植被下 3 种活性有机碳 ER 均与坡耕地差异逐渐减小。刺槐、柠条及撂荒地仅高活性有机碳 ER 在各土层均显著高于坡耕地, 平均增幅达到 89.4%。而低、中活性有机碳 ER 大小变化无一致特征。可见高活性有机碳 ER 对人工植被变化较敏感。

2.2.3 碳库管理指数的剖面分布

图 5 显示不同人工植被下 CMI 值分布和大小差异显著。在 0~40 cm 土层, 仅低活性有机碳 CMI 沿土层加深相邻土层间降幅显著, 不同植被下平均降幅为 26.4%。中、高活性有机碳 CMI 下降趋势不明显。与坡耕地(CMI 为 100)比较, 在 0~40 cm 土层, 3 种人工植被均显著增加了中、高活性有机碳 CMI , 且各土层平均增幅表现为刺槐(268.9%)>柠条(175.0%)>撂荒(75.4%)。对于低活性有机碳 CMI , 撂荒仅使 0~10 cm 的 CMI 提高了 53.0%, 而刺槐和柠条使 0~40 cm 各土层 CMI 分别平均显著增加了 171.3%和 73.2%。在 40~100 cm 土层, 低活性有机碳 CMI 在各土层及不同植被间均无显著差异, 平均为 53.3%。中活性有机碳 CMI 整体仍是无显著下降变化趋势。对于高活性有机碳 CMI , 整体略有下降趋势, 但 CMI 仅在 40~50 cm 与 90~100 cm 土层间存在显著差异。与坡耕地相比, 在 40~100 cm 土层, 刺槐和柠条使各土层低、中活性有机碳 CMI 均显著增加, 其中低活性有机碳 CMI 分别平均增加了 32.1%和 17.5%, 中活性有机碳 CMI 分别平均增加 116.7%和 73.5%。对于高活性有机碳 CMI , 不同人工植被下均有显著增加, 且各土层平均增幅表现为刺槐(147.8%)>柠条(115.9%)>撂荒(67.2%)。以上分析说明, 以刺槐林提升土壤碳库质量的效应最明显, 且以高活性有机碳 CMI 对人工植被的变化更加敏感。

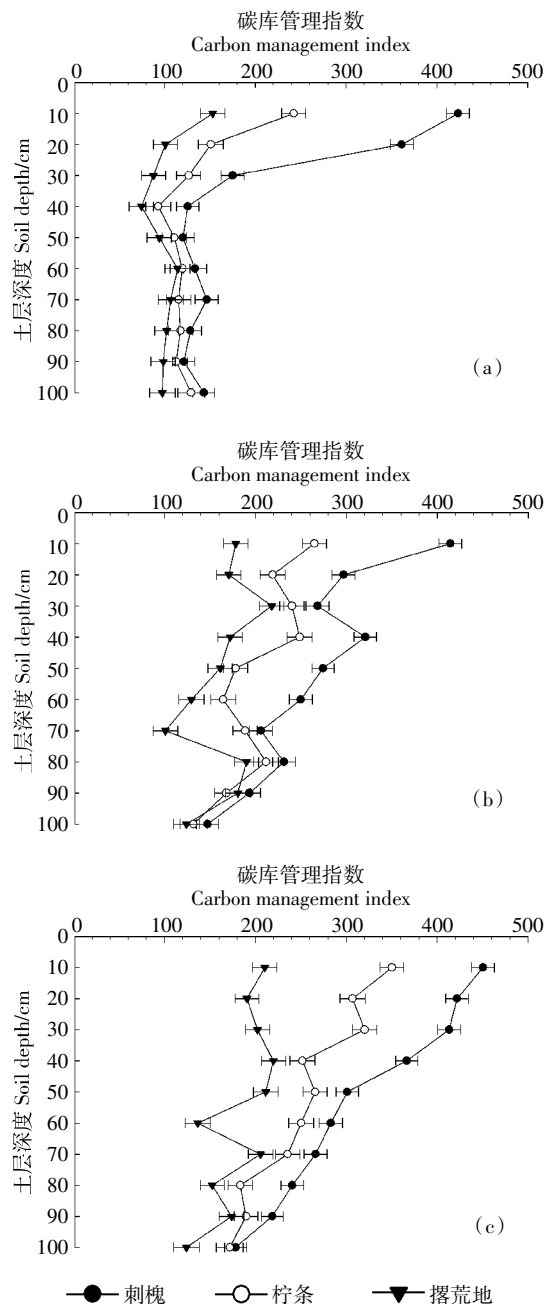


图 5 不同人工植被下土壤低(a)、中(b)、高(c)活性有机碳 CMI 的剖面分布

Figure 5 Distribution of carbon management index (CMI) of lowly labile organic carbon (a), mid-labile organic carbon (b) and highly labile organic carbon (c) in soil profiles under different artificial vegetations

3 讨论

3.1 土壤总有机碳及活性组分含量差异特征

林地植被恢复可以通过增加自身凋落物、根系残体及其分泌物等投入从而提升土壤碳库^[14-15], 本研究

亦显示总体上退耕还林下不同人工植被均比坡耕地显著增加了 100 cm 深度内土壤总有机碳及活性有机碳的含量,但活性有机碳组分对植被变化的响应比总有机碳更快。本研究中 100 cm 土壤中不同人工植被下低、中、高活性有机碳含量增幅分别是总有机碳的 1.48~2.32 倍、3.29~7.47 倍及 4.56~9.41 倍,表明活性有机碳比总有机碳更加敏感地指示碳库变化^[16]。同时,各人工植被总有机碳及活性有机碳含量表现为刺槐>柠条>撂荒地。这与不同人工植被有机物料输入量不同直接相关。正如郭胜利等^[17]研究表明人工刺槐林凋落物量是小叶杨的 2.4 倍,其表层有机碳含量同比也达到 2.0 倍。从不同土层差异看,不同人工植被总有机碳及其活性组分增加主要来自 0~40 cm 浅层土壤,而深层变化相对较小。这与多数研究结果近似,即植被恢复下土壤碳多出现表聚现象,而深层碳变化较慢^[11,16,18]。一方面浅层土壤能够直接接收降解林木凋落物、林下草本植物残体和根系生长代谢产物^[17-18]。另一方面,人工植被土壤表层水土流失显著降低,土壤抗侵蚀能力较强,有机碳不易流失^[19],且相比坡耕地土壤受人为扰动较少,有机碳受土壤团聚体的蓄蔽保护作用而降低了排放和分解^[20]。深层土壤可能因为根系残体及代谢产物归还到土壤中的有机碳处于矿化分解与腐殖合成的动态平衡,有机碳含量变化不明显^[16]。

3.2 土壤活性有机碳有效率和碳库管理指数差异特征

土壤活性有机碳有效率 *ER* 和碳库管理指数 *CMI* 均可以一定程度上反映土壤有机碳的质量,其值越大,表示有机碳越易于被微生物分解和被植物吸收利用,碳库活度和质量也就越高^[13,16]。本研究中不同人工植被均有增加土壤活性有机碳 *ER* 和 *CMI* 的特征,显示出改良退耕地土壤碳库的效应,与多数研究结果一致^[16,21-22]。但不同土层和植被间变化差异较大,不同人工植被均能增加 0~100 cm 深各土层高活性有机碳的 *ER* 和 *CMI*,且表现为刺槐>柠条>撂荒地。但各土层低、中活性有机碳 *ER* 和 *CMI* 只在刺槐和柠条林下显著增加,撂荒地基本仅能提高它们在表层土壤的 *ER* 和 *CMI*。这说明不同植被下土壤剖面的 *CMI* 随有机碳活性的增高差距增大,且其影响深度也加深,显示高活性有机碳 *ER* 和 *CMI* 对人工植被变化更加敏感。这一方面与前面分析的总有机碳及其活性组分变化差异相关,另一方面与氧化活性有机碳的成分有关。Tirol-Padre 等^[23]研究发现,高锰酸钾能够氧化有机碳主要是糖类化合物、有机酸类如氨基酸,抗坏血酸等简单化合物,但同时也会氧化土壤中一些复杂化

合物^[24],如木质素和腐殖质。因此,低浓度的高锰酸钾就会先氧化简单易变的化合物,即高活性有机碳,从而更加敏感于植被变化。而不同植被间 *ER* 和 *CMI* 的差异,则是这些植被产生的上述化合物性质和数量不同导致,对此需要进一步研究。总之,高活性有机碳及其计算的 *ER* 和 *CMI* 可以作为潜在的指示退耕地不同植被土壤碳库变化的指示物,并且在本研究中刺槐林显示出更好地提升和改良土壤碳库的效应。

4 结论

(1)黄土丘陵区人工植被土壤总有机碳和 3 种活性有机碳含量均随土层加深而递减,且整个土壤剖面表现为刺槐>柠条>撂荒地。与坡耕地比较,不同人工植被增加的土壤碳库主要是 0~40 cm 浅层,并以刺槐提升碳库效应最佳。

(2)同一土层,同一植被 3 种土壤活性有机碳含量及其 *ER* 为低活性有机碳>中活性有机碳>高活性有机碳。不同人工植被均提升了 0~20 cm 表层各活性有机碳 *ER*,表现出提升碳库活性的效应。但 20 cm 以下各土层中仅高活性有机碳 *ER* 均显著高于坡耕地,且基本表现为刺槐>柠条>撂荒的差异特征。说明高活性有机碳 *ER* 对人工植被变化更加敏感。

(3)相比坡耕地,3 种人工植被均显著提升了 0~100 cm 深各土层高活性有机碳 *CMI*,且增幅表现为刺槐>柠条>撂荒地;中、低活性有机碳 *CMI* 只在人工刺槐和柠条林下显著增加。可见,不同植被下土壤剖面的 *CMI* 随有机碳活性的增高差距增大,且其影响深度也加深,说明高活性有机碳 *CMI* 对人工植被变化更加敏感。同时退耕地人工造林显著提高了 0~100 cm 土层的 *CMI*,提升了土壤碳库质量,并以刺槐林提升效应较明显。

参考文献:

- [1] 高旺盛,董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价:以安塞县为例[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 182-188.
GAO Wang-sheng, DONG Xiao-bin. Valuation of fragile agriculture ecosystem services in loess hilly-gully region: A case study of Ansai county[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 182-188.
- [2] 薛 蕊, 刘国彬, 潘彦平, 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 Jie, LIU Guo-bin, PAN Yan-ping, 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.
- [3] 侯晓龙, 庄 凯, 刘爱琴, 等. 不同植被配置模式对福建紫金山金铜矿废弃地土壤质量的恢复效果[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31

- (8):1505-1511.
- HOU Xiao-long, ZHUANG Kai, LIU Ai-qin, et al. Restoration of soil quality after mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine, Fujian Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1505-1511.
- [4] Logninow W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20:47-52.
- [5] 刘梦云, 付东磊, 常庆瑞, 等. 黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12):2415-2424.
- LIU Meng-yun, FU Dong-lei, CHANG Qing-rui, et al. Effects of land-use type on soil organic carbon oxidability and enzyme activities in the tablelands of the loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2415-2424.
- [6] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(2):105-123.
- [7] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta analysis[J]. *Glob Change Biol*, 2011, 17:1658-1670.
- [8] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3):112-119.
- WANG Chun-mei, LIU Yan-hong, SHAO Bin, et al. Quantifying soil carbon changes following the afforestation of former arable land[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3):112-119.
- [9] 周国模, 徐建明, 吴家森, 等. 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变[J]. 林业科学, 2006, 42(6):124-128.
- ZHOU Guo-mo, XU Jian-ming, WU Jia-sen, et al. Changes in soil active organic carbon with history of intensive management of phyllostachy pubescens forest[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(6):124-128.
- [10] 尚雯, 李玉强, 王少昆, 等. 科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8):2069-2074.
- SHANG Wen, LI Yu-qiang, WANG Shao-kun, et al. Dynamic changes of surface soil organic carbon and light-fraction organic carbon after mobile dune afforestation with Mongolian pine in Horqin sandy land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8):2069-2074.
- [11] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9):2253-2258.
- LIAO Hong-kai, LONG Jian. Variation of soil organic carbon under different vegetation types in Karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9):2253-2258.
- [12] 刘苑秋, 王芳, 柯国庆, 等. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4):885-890.
- LIU Yuan-qiu, WANG Fang, KE Guo-qing, et al. Effects of converting cultivated land into forest land on the characteristics of soil organic carbon in limestone mountain area in Ruichang, Jiangxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):885-890.
- [13] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1):84-89.
- QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang, CHENG Ji-min. Effects of land-use type on soil organic matter and carbon management index in Ziwl-ing area[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):84-89.
- [14] Tate K R, Ross D J, O'Brien B J, et al. Carbon storage and turnover and respiratory activity in the litter and soil of an old-growth south ern-beech (*Nothofagus*) forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(11):1601-1612.
- [15] Vesterdal, Ritter T, Gundersen P L. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(12):137-147.
- [16] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12):223-229.
- HAN Xin-hui, TONG Xiao-gang, YANG Gai-he, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(12):223-229.
- [17] 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 Sheng-li, MA Yu-hong, CHE Sheng-guo, et al. Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in loess hilly areas[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10):14-18.
- [18] 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):36-41.
- JIANG Na, SHAO Ming-an. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the loess plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6):36-41.
- [19] Jagadamma S, Lal R. Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(6):543-554.
- [20] 王俊波, 季志平, 白立强, 等. 刺槐人工林土壤有机碳与根系生物量的关系[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4):56-64.
- WANG Jun-bo, JI Zhi-ping, BAI Li-qiang, et al. Vertical distribution characteristic of soil organic carbon of plantation[J]. *Journal of North-west Forestry University*, 2007, 22(4):56-64.
- [21] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5):657-664.
- WU Jian-guo, ZHANG Xiao-quan, XU De-ying. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone[J]. *Acta Phyto Ecologica Sinica*, 2004, 28(5):657-664.
- [22] Kravchenko A N, Robertson G P. Whole-profile soil carbon stocks: The danger of assuming too much from analyses of too little[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2011, 75:235-240.
- [23] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68:969-978.
- [24] Verma B C, Datta S P, Rattan R K, et al. Monitoring changes in soil organic carbon pools, nitrogen, phosphorus under different agricultural management practices in the tropics[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 171(14):579-593.