

# 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响\*

张金<sup>1</sup> 许明祥<sup>2,3\*\*</sup> 王征<sup>2</sup> 马昕昕<sup>3</sup> 邱宇洁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院/水利部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, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 以黄土丘陵区不同恢复年限的人工刺槐林、人工柠条林和自然撂荒地对象,以0~100 cm(浅层)土壤为对照,研究了不同植被类型下100~400 cm(深层)土壤有机碳(SOC)储量的剖面分布特征和累积动态。结果表明:随土壤深度增加,浅层SOC储量显著降低,深层SOC变化趋势不明显,但储量很高,约占0~400 cm剖面SOC的60%。80~100 cm土层的SOC储量与深层100~200和200~400 cm的SOC储量呈显著线性相关,是0~100 cm 5个土层中与深层SOC储量变化相关性最强的一层,可用以估算深层SOC储量。人工刺槐林、柠条林、撂荒地表层(0~20 cm)SOC储量显著高于坡耕地,而深层SOC储量在不同利用类型间差异不显著。随植被恢复年限的增加,深层SOC储量呈上升趋势,人工刺槐林和人工柠条林100~400 cm SOC平均累积速率分别为0.14和0.19 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,人工柠条林与浅层SOC累积速率相当。在估算黄土丘陵区植被恢复的土壤固碳效应时,应考虑深层土壤有机碳累积量,否则会严重低估植被恢复的土壤固碳效应。

**关键词** 土壤有机碳 深层土壤 植被恢复 恢复年限 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2012)10-2721-07 中图分类号 S154.1 S718.5 文献标识码 A

**Effects of revegetation on organic carbon storage in deep soils in hilly Loess Plateau region of Northwest China.** ZHANG Jin<sup>1</sup>, XU Ming-xiang<sup>2,3</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>, MA Xin-xin<sup>3</sup>, QIU Yu-jie<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(10): 2721-2727.

**Abstract:** Taking the *Robinia pseudoacacia* woodlands, *Caragana korshinskii* shrublands, and abandoned croplands with different years of revegetation in the hilly Loess Plateau region of Northwest China as test objects, this paper studied the profile distribution and accumulation dynamics of organic carbon storage in deep soil (100-400 cm), with those in 0-100 cm soil profile as the control. In 0-100 cm soil profile, the organic carbon storage decreased significantly with the increase of soil depth; while in deep soil, the organic carbon storage had a slight fluctuation. The total organic carbon storage in 100-400 cm soil profile was considerably high, accounting for approximately 60% of that in 0-400 cm soil profile. The organic carbon storage in 80-100 cm soil layer had a significant linear correlation with that in 100-200 and 200-400 cm soil layers, and among the organic carbon storages in the five layers in 0-100 cm soil profile, the organic carbon storage in 80-100 cm soil layer had the strongest correlation with that in 100-400 cm soil profile, being able to be used to estimate the organic carbon storage in deep soil in this region. The organic carbon storage in 0-20 cm soil layer in the three types of revegetation lands was significantly higher than that in slope croplands, but the organic carbon storage in deep soil had no significant difference among the land use types. The organic carbon storage in deep soil increased with the increasing years of revegetation. In *R. pseudoacacia* woodlands and *C. korshinskii* shrub lands, the average in-

\* 国家自然科学基金项目(41171422)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-443)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

2012-01-17 收稿 2012-07-26 接受.

creasing rate of the organic carbon storage in 100–400 cm soil layer was 0.14 and 0.19 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, respectively, which was comparable to that in the 0–100 cm soil layer in *C. korshinskii* shrublands. It was suggested that in the estimation of the soil carbon sequestration effect of revegetation in hilly Loess Plateau region, the organic carbon accumulation in deep soil should be taken into consideration. Otherwise, the effect of revegetation on soil carbon sequestration would be significantly underestimated.

**Key words:** soil organic carbon; deep soil; revegetation; revegetation years; hilly Loess Plateau.

在陆地生态系统中,土壤碳库储量巨大,其微小变化就可能严重影响全球的碳平衡<sup>[1-4]</sup>,因此,在当前全球碳循环失衡、全球变暖日益加剧的情况下,土壤碳库储量的变化受到了越来越多的关注<sup>[5-10]</sup>.现有土壤碳库储量变化及影响因素的研究多集中于1 m 以内的浅层土壤,而1 m 以下深层土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库是土壤碳库的重要组成部分,在土壤碳储量中的比重不容忽视<sup>[3, 9-13]</sup>.据估算,全球3 m 土层(不包括农田)的平均碳储量比1 m 土层高56%<sup>[9]</sup>.在亚马孙地区8 m 土层中的碳储量为136 Gt,其中只有47 Gt 分布在1 m 土层中<sup>[5, 14]</sup>.在我国内蒙古地区,乔木和灌木林地3 m 土层SOC 储量的50% 储存在1 m 以下<sup>[12]</sup>;在黄土丘陵区,人工刺槐林地50~200 cm 的SOC 储量占2 m 土层的50% 以上<sup>[15]</sup>;而在黄土高原沟壑区,100~200 cm 土层SOC 储量占2 m 储量的37.3%<sup>[16]</sup>.

土地利用方式的变化是引起土壤SOC 储量变化的主要影响因素之一.有研究表明,亚马孙地区热带雨林退化为草原后,土壤深层SOC 含量会降低约0.255 t · hm<sup>-2</sup><sup>[14, 17]</sup>,建立深根性草本的草场后,土壤深层碳储量则会有所提高<sup>[11]</sup>,但转化为放牧牧场后,1 m 以下有机碳含量则会再次下降<sup>[17]</sup>.在温带地区,与农地相比,深根性草本的建立可以提高深层土壤SOC 储量<sup>[10, 18]</sup>;在荒漠地区,随着植被的引入,1 m 以下的SOC 储量有显著提高,0~2.5 m 土层SOC 储量可提高57%<sup>[13]</sup>.

自20世纪70年代开始,为遏制水土流失和改善日益退化的生态环境,黄土丘陵区逐步实施了以植被恢复为主的大规模的生态修复工程,乔、灌、草等不同植被类型逐渐成为该区主要的土地利用方式<sup>[19-21]</sup>,对深层土壤有机碳产生了重要影响.目前,有关黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响已开展了部分探索性工作<sup>[15]</sup>,尚不能明确深层土壤有机碳的剖面分布特征、累积动态及对植被类型的影响.为此,本文以黄土丘陵区3种主要的植被恢复类型——人工乔木林地、人工灌木林地及自然撂荒地对象,研究了不同植被恢复类型下深层土壤

(100 cm 以下)有机碳的剖面分布特征和累积动态,旨在为区域植被恢复的土壤固碳效应评估及深层土壤碳汇认证提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵区中部的陕西省安塞县(108°51'44"—109°26'18" E, 36°30'45"—37°19'31" N),以纸坊沟流域(109°13'46"—109°16'03" E, 36°46'42"—36°46'28" N)为重点研究区,同时以附近县南沟流域、马家沟流域和中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场作为补充采样区域.研究区属于暖温带半干旱季风气候,年均气温8.8℃,年均降雨量505 mm.地形破碎,沟壑纵横,属典型的黄土高原丘陵区,平均海拔1200 m,相对高差100~300 m.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.土壤以黄土母质上发育而成的黄绵土为主.由于严重的水土流失,该区是生态环境恢复重建的重点区域<sup>[20, 22]</sup>.经过30多年水土保持综合治理,有效地遏制了该区域的水土流失,逐步恢复了退化生态系统,也为植被恢复的生态效益研究提供了良好的试验平台.该区常见的植被恢复类型有:以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主的人工林;以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、丁香(*Sainga oblata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和白刺花(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛;以及以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、披针苔草(*Carex lanceolata*)等为主要植被的撂荒恢复草地<sup>[19]</sup>.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 野外采样** 分别于2010年6—9月和2011年6—8月在研究区内选取人工刺槐林、人工柠条林和自然撂荒地3种植被恢复类型.首先通过走访调查每种植被恢复的年限,然后选取不同恢复年限、林分

表 1 样地概况

Table 1 Characteristics of studied sites

土地利用 Land use	恢复年限 Revegetation ages (a)	样地数 Sample sites	海拔 Altitude (m)	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	主要植物种类 Main plant species
I	9, 10, 17, 24, 28, 36, 43	21	1132 ~ 1290	U7, M10, L4	S7, N3, SS6, SN5	15 ~ 35	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> 、长芒草 <i>S. bungeana</i> 、黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> 、茵陈蒿 <i>A. capillaris</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、芨蒿 <i>A. giraldii</i>
II	17, 18, 24, 28, 35, 36, 45, 52	24	1186 ~ 1336	U10, M11, L3	S5, N5, SS6, SN8	5 ~ 30	柠条 <i>C. korshinskii</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、狗尾草 <i>S. viridis</i> 、白羊草 <i>B. ischaemum</i>
III	20, 29, 43	9	1231 ~ 1291	U1, M6, L2	S3, N4, SN2	12 ~ 27	茵陈蒿 <i>A. capillaris</i> 、长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>
CK	-	3	1196 ~ 1230	M2, L1	S2, N1	12 ~ 21	马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i> 、黄豆 <i>Glycine max</i>

I: 人工刺槐林 *R. pseudoacacia* woodland; II: 人工柠条林 *C. korshinskii* shrubland; III: 撂荒地 Abandoned cropland; CK: 坡耕地 Slope cropland. U, M, L 分别表示上、中、下坡位; 坡向一栏中 S, N, SS, SN 分别表示阳坡、阴坡、半阳坡及半阴坡. 坡度、坡向中的数字代表样点数. U, M, L meant upper, middle and lower positions, while S, N, SS and SN in the column of aspect meant adret, udbac, semi-adret and semi-udbac, respectively. The numbers in the description of position and aspect were the number of sample sites.

密度相似的人工刺槐林、柠条林地作为研究样地. 同时选取相同立地条件下的坡耕地作为对照, 以反映植被恢复前土壤有机碳状况. 研究共选取 57 块样地, 样地概况见表 1.

每样地选 3 个采样点, 用土钻分层采集土样, 采样深度为 0 ~ 400 cm, 其中 0 ~ 200 cm 以 20 cm 为一层, 200 ~ 400 cm 以 40 cm 为一层. 同层 3 次重复的混合样为一个分析样, 共取得 855 个土样. 拣去土样中的植物根系, 风干, 过 0.25 mm 筛备用. 在采样同时, 分别在人工刺槐林、人工柠条林、撂荒地和坡耕地各挖 3 个 400 cm 深的土壤剖面, 与土钻取样分层一致, 测定每层土壤容重(图 1); 同时在每层采集 10 cm×10 cm×20 cm 大小土体, 带回实验室后分拣、清洗植物根系, 计算每层土壤的根系生物量.

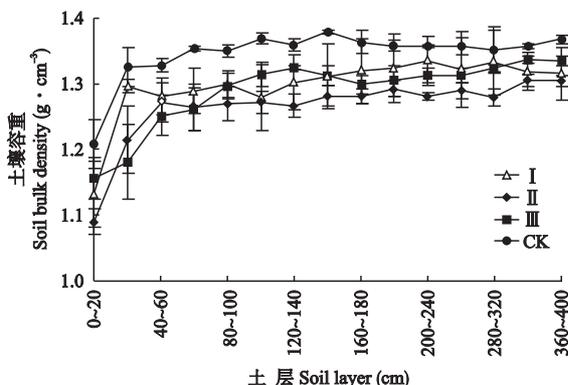


图 1 不同植被类型土壤容重在土壤剖面上的分布

Fig. 1 Soil bulk density distribution in profile in different vegetation types (mean±SE).

I: 人工刺槐林 *R. pseudoacacia* woodland; II: 人工柠条林 *C. korshinskii* shrubland; III: 撂荒地 Abandoned cropland; CK: 坡耕地 Slope cropland. 下同 The same below.

1.2.2 室内分析 土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾-外加热容量法<sup>[23]</sup>.

SOC 储量的计算:

$$SOCS = SOC \times \rho \times H \times (1 - \delta_{2\text{mm}} / 100) \times 0.1$$

式中: SOCS 为 SOC 储量 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); SOC 为 SOC 含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $\rho$  为土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $H$  为土层厚度 (cm);  $\delta_{2\text{mm}}$  为粒径  $\geq 2$  mm 的砾石含量, 由于黄土区砾石含量极低, 该值忽略未计.

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件分析植被恢复类型和年限对 SOC 储量的影响, 当方差分析 ( $F$  检验) 显著时, 采用 LSD 法进行多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ). 建立 SOC 储量与植被恢复年限的多元回归方程来描述 SOC 储量随植被恢复的变化规律, 通过  $F$  检验其显著性, 以确认回归方程的拟合效果. 不同层次 SOC 储量的相关性用偏相关双尾检验.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳储量剖面分布特征

由图 2 可以看出, 在 0 ~ 400 cm 土壤剖面上, 各植被类型土壤有机碳 (SOC) 储量的分布表现为: 0 ~ 100 cm 内随土壤深度增加而显著降低, 变化范围为 5.10 ~ 12.85  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 而 100 ~ 400 cm 土层 SOC 储量仅小幅变化于 5.12 ~ 6.13  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间. 0 ~ 20 cm SOC 储量均显著高于其余土层, 80 cm 以下各土层 SOC 储量差异不显著, 即 80 ~ 100 cm 土层与深层土壤 SOC 储量接近. 刺槐林地、柠条林地和撂荒地 0 ~ 20 cm SOC 储量均显著高于坡耕地, 其余 14 个土层 SOC 储量在不同利用类型间无显著差异.

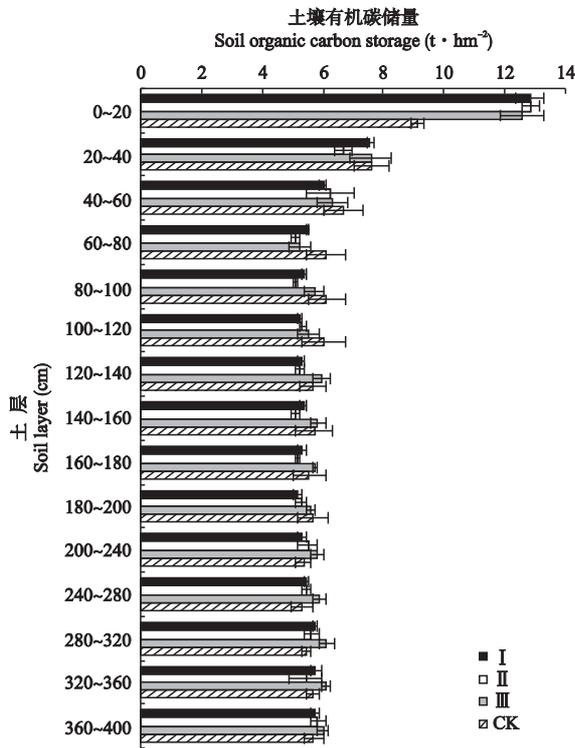


图2 土壤有机碳储量在土壤剖面上的分布  
**Fig. 2** Distribution of soil organic carbon storage along soil profile (mean±SE).

2.2 不同植被类型深层土壤有机碳储量

由图3可以看出,不同植被类型下浅层(0~100 cm)和深层SOC储量差异较大,而100~200、200~400 cm深层SOC储量相差不大。浅层、深层SOC储量在人工乔木林、灌木林、撂荒地以及坡耕地间无显著差异。不同植被类型下SOC储量在0~100、100~200和200~400 cm 3层土壤中的分配比例基本相同。0~100 cm SOC储量约占0~400 cm SOC储量的40%;而深层土壤100~200和200~400 cm SOC储量约占0~400 cm SOC储量的60%。虽然表层SOC含量较高,但由于黄土高原土层深厚,100 cm以下土层中有机碳储量仍然相当可观。

2.3 植被恢复年限对深层SOC累积的影响

不同植被类型下深层SOC储量随植被恢复年限的动态变化规律不同。随植被恢复年限增加,人工刺槐林浅层和深层SOC储量均呈上升趋势(图4)。0~100、100~200、200~400 cm SOC储量在43年的刺槐恢复期内可划分为2个阶段:恢复20年以内3个土层SOC储量没有增加;恢复20年以后,0~100 cm的SOC储量比20年前增加了8.99 t · hm<sup>-2</sup>,比坡耕地SOC储量提高了7.32 t · hm<sup>-2</sup>,平均增长速率为0.22 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>。而相对于坡耕

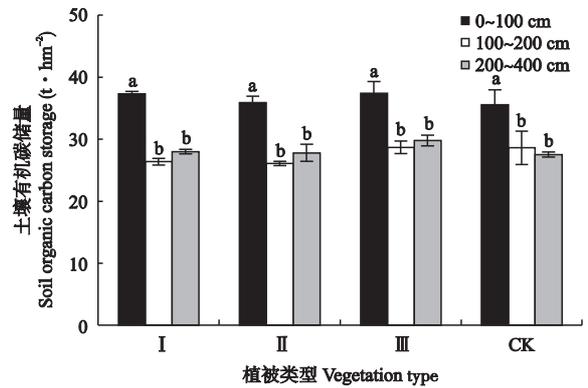


图3 不同植被类型浅层及深层土壤有机碳储量  
**Fig. 3** Soil organic carbon storage in upper and deep soil in different vegetation types (mean±SE).  
 不同字母表示不同土层间差异显著(P<0.05) Different letters meant significant difference at 0.05 level among different soil layers.

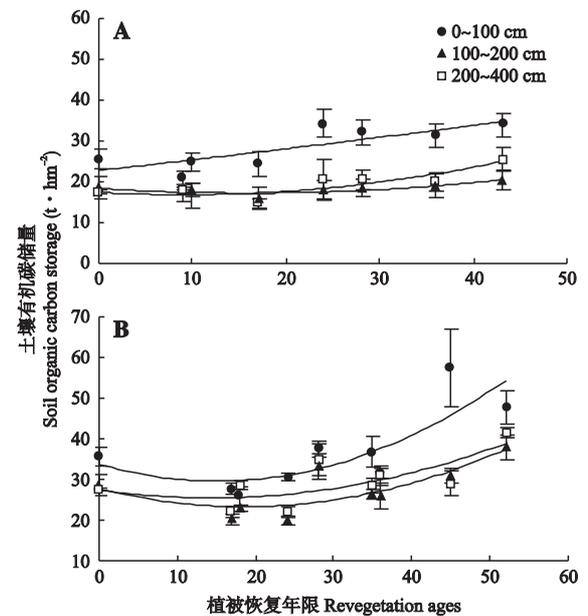


图4 人工刺槐林(A)和柠条林(B)各土层土壤有机碳储量随年限的变化  
**Fig. 4** Soil organic carbon storage of different soil layers along revegetation ages in *R. pseudoacacia* woodland and *C. korshinskii* shrubland (mean±SE).

地,100~200和200~400 cm SOC储量增加了0.33和4.12 t · hm<sup>-2</sup>。相对于坡耕地,平均增长速率为0.01和0.13 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>。人工刺槐恢复后,100~400 cm土层SOC储量的增量为浅层0~100 cm土层的60.8%。

与刺槐林相比,随恢复年限的增加,柠条林SOC储量的变化趋势更加明显。柠条恢复0~30年,0~100、100~200和200~400 cm的SOC储量与坡耕地相比没有明显提高;恢复30年以后,0~100 cm的SOC储量比30年前显著增加14.20 t · hm<sup>-2</sup>,且

比坡耕地 SOC 储量显著提高  $6.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均增长速率为  $0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 100 ~ 200 cm 的 SOC 储量比 30 年前显著增加  $9.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比坡耕地 SOC 储量提高  $2.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均增长速率为  $0.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 而 200 ~ 400 cm 的 SOC 储量显著增加  $8.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比坡耕地 SOC 储量提高  $5.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均增长速率为  $0.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . 随恢复年限的增加, 人工柠条林深层土壤 SOC 储量增加更为明显, 深层土壤 100 ~ 400 cm SOC 储量的增量约为浅层 0 ~ 100 cm 土壤的 1.1 倍.

### 3 讨 论

#### 3.1 黄土丘陵区深层 SOC 储量

有研究表明, 黄土丘陵区人工刺槐林 2 m 土层的 SOC 储量比 1 m 土层高 1/3 左右<sup>[15]</sup>. 本研究在综合考虑本区域多种主要植被类型和植被恢复年限的条件下, 黄土丘陵区 4 m 土层的 SOC 储量比 1 m 土层高约 1.5 倍, 3 m 土层的 SOC 储量比 1 m 土层高约 1 倍, 2 m 土层的 SOC 储量比 1 m 土层高约 3/4, SOC 在土壤深层中储量巨大. 本区域深层 SOC 储量与浅层 SOC 储量的比例高于全球平均值近 1 倍<sup>[9]</sup>, 且显著高于黄土高原沟壑区的研究结果<sup>[15-16]</sup>, 与我国内蒙古草地和荒漠地区的研究结果相当<sup>[12]</sup>. 这可能是由于黄土丘陵区表层土壤贫瘠, 所处气候区不利于表层 SOC 积累, 表层 1 m 的 SOC 储量平均值显著低于其他地区. 而湿润温暖地区则有利于表层 SOC 的积累, 例如, 亚马孙地区 4 m 土层 SOC 大部分储存在表层 1 m 中<sup>[5, 14]</sup>. 因此, 在计算本区域和其他干旱区域的 SOC 储量时, 忽略深层 SOC 储量会造成比其他湿润地区更严重的低估.

随着土壤深度增加, 土样采集难度成倍增加, 分析浅层与深层 SOC 储量变化的相关性有助于通过浅层 SOC 估算深层 SOC 储量. 浅层与深层 SOC 储量偏相关分析表明(表 2), 80 ~ 100 cm 土层的 SOC 储量与 100 ~ 200 和 200 ~ 400 cm SOC 储量显著相关, 也是浅层 0 ~ 100 cm 5 个土层中与深层 SOC 储量变化相关性最强的一层. 80 ~ 100 cm 的 SOC 储量与 100 ~ 200 和 200 ~ 400 cm 的 SOC 储量变化的相关性可以用线性函数表示(图 5). 值得注意的是, 80 ~ 100 cm 的 SOC 储量对深层 SOC 储量的估算能力随土层深度增加显著降低, 其与相邻土层 100 ~ 200 cm 的 SOC 储量变化的相关性较强, 而与更深土层 200 ~ 400 cm 的 SOC 储量的相关性较弱.

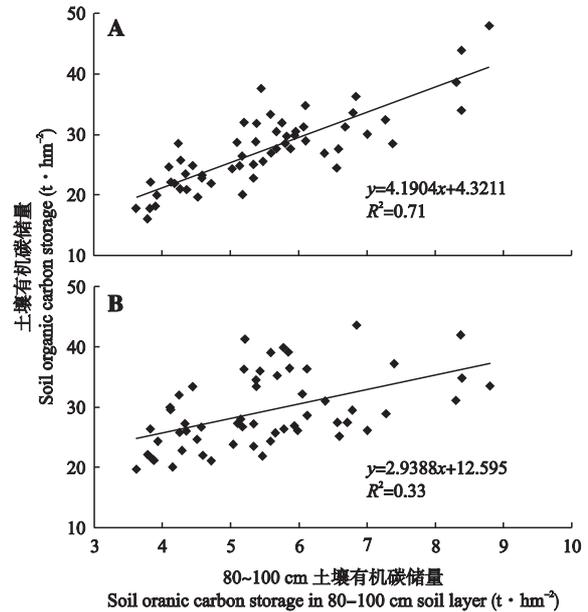


图 5 80 ~ 100 cm 土壤有机碳储量与 100 ~ 200 cm (A)、200 ~ 400 cm (B) 土壤有机碳储量的相关性

Fig. 5 Correlations of 80-100 cm soil organic carbon storage and 100-200 cm (A), 200-400 cm (B) soil organic carbon storage ( $n=57$ ).

#### 3.2 深层 SOC 储量随植被恢复的变化

当不考虑恢复年限时, 3 种植被恢复类型的 SOC 储量只有 0 ~ 20 cm 与坡耕地有显著差异, 甚至 1 m 内土层的 SOC 储量差异均不显著(图 2, 图 3); 但当考虑植被恢复年限时, 深层和浅层的 SOC 储量随植被恢复发生显著变化(图 4). 随着区域深根性乔灌植被的恢复, SOC 储量呈增加趋势, 在植被恢复 20 ~ 30 a 以后, 不仅 0 ~ 100 cm SOC 储量显著增加, 深达 400 cm 的 SOC 储量也显著提高, 人工柠条林深层土壤 SOC 储量随植被恢复的增幅与浅层相当, 且在 SOC 储量升高阶段(恢复 20 年后) SOC 储量显著高于坡耕地(图 4). 因此只考虑 1 m 内 SOC 储量会严重低估本区域植被恢复的土壤固碳效应.

表层 SOC 储量的变化受凋落物的影响较大<sup>[24-28]</sup>, 而深层 SOC 储量变化则主要受植物根系的影响<sup>[29]</sup>, 尤其是细根制约着根系凋落物和根系分泌物的产量、转化和分解速率的变化<sup>[7-8, 10, 30]</sup>. 本研究

表 2 浅层与深层土壤有机碳储量的相关性  
Table 2 Correlations of soil organic carbon storage in upper and deep soil layers

	100 ~ 200 cm	200 ~ 400 cm
0 ~ 20 cm	0.267	-0.062
80 ~ 100 cm	0.785 **	0.375 *
0 ~ 100 cm	0.228	0.211

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

中, 100 ~ 200 和 200 ~ 400 cm 的根系生物量表现为: 人工柠条林 > 人工刺槐林 > 自然撂荒地 (表 3)。这与人工柠条恢复后土壤深层 SOC 储量显著而持续增加相吻合 (图 4), 但与不同植被类型 SOC 储量差异 (图 3) 并不一致。事实上, 根系生物量增加不仅会导致 SOC 储量积累的增加, 同时也可能加剧 SOC 分解。有研究表明, 土壤深层惰性 SOC 会因为新鲜有机物的输入而极大地提高分解速率<sup>[8]</sup>, 根系对深层 SOC 的影响是有机碳积累和分解动态平衡的结果<sup>[7]</sup>。这可能也是人工柠条林和人工刺槐林恢复后深层 SOC 储量随年限动态变化的主要原因。深层土壤中根系长期大量的增加会提高土壤深层 SOC 储量, 但短期大量增加则可能使 SOC 分解超过积累, 导致 SOC 储量降低。人工刺槐林和柠条林 100 ~ 200 cm 土层的 SOC 储量仅增加 1.54 和 2.18 t · hm<sup>-2</sup>, 可能与该土层特殊的有机物积累和分解状况有关。细根的分布主要与土壤水分的分布状况有关<sup>[7, 9-11]</sup>。基于本文对土壤剖面观测和本区域相关的土壤剖面水分分布研究, 人工刺槐林 100 ~ 200 cm 土层普遍存在土壤干层, 而再向下水分条件则有所改善<sup>[31-32]</sup>。本区域人工刺槐林和柠条林用水深度达 600 cm 左右<sup>[31, 33]</sup>, 在水分匮乏土层细根相应分布较少, 因此植物根系凋落物转化为 SOC 较少, 并且在较深土层中, SOC 分解在很大程度上受土壤通气状况影响<sup>[13, 34-35]</sup>, 干层土壤空隙水分含量较低, 通气条件较好, 可促进 SOC 的分解, 因此 100 ~ 200 cm 土层 SOC 积累速率较低。

虽然植被恢复年限是 SOC 储量变化的主要影响因素, 但地形差异以及种植方式、择伐等人为干扰都可能影响 SOC 储量的变化<sup>[9, 14, 16]</sup>。大量的长期试验、模型模拟以及通过时空替代的研究都表明, 不论是地上部生物量、凋落物积累量、生态系统生产力、还是 SOC 储量都会随植被恢复而波动变化, 均与环境变化以及植物生长变化相关<sup>[5-6, 36-37]</sup>。

表 3 不同植被类型各土层深度根系生物量  
Table 3 Root biomass in different soil layers among different vegetation types

土层 Soil layer (cm)	土壤根系生物量 Root biomass (g · m <sup>-3</sup> )		
	人工刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i> woodland	人工柠条林 <i>C. korshinskii</i> shrubland	撂荒地 Abandoned cropland
0 ~ 100	2429 ± 269	396 ± 55	422 ± 63
100 ~ 200	89 ± 31	384 ± 112	20 ± 18
200 ~ 400	53 ± 21	93 ± 29	9 ± 16

本研究采用“以空间代替时间”的研究方法不可避免地会给研究结果带来一定的变异性, 在样地选择中, 尽量控制样地环境条件和土地利用背景一致, 以减小时空替代造成的误差。在关注深层 SOC 储量随年限的较小变化时, 不同样地背景较小的差异可能对研究结果产生较大的干扰。今后需要通过长期定位监测来阐明植被恢复后深层 SOC 储量变化的规律和影响因素。

#### 4 结 论

黄土丘陵区不同植被类型下 SOC 储量在剖面上分布规律相似, 0 ~ 100 cm 内随土壤深度增加而显著降低, 变化范围为 5.10 ~ 12.85 t · hm<sup>-2</sup>, 而在 100 ~ 400 cm 则稳定于 5.12 ~ 6.13 t · hm<sup>-2</sup> 之间, 不同层次间仅存在轻微波动。

不同植被类型 0 ~ 20 cm SOC 储量均显著高于坡耕地, 深层 SOC 储量在不同植被类型间差异不显著。

深层 SOC 与浅层 SOC 储量随着植被恢复而显著增加, 人工刺槐林和人工柠条林深层 SOC 平均累积速率分别为 0.14 和 0.19 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, 人工柠条林与浅层 SOC 累积速率相当。

研究区内人工乔、灌木恢复 20 ~ 30 a 后有显著的深层土壤固碳效应, 0 ~ 400 cm SOC 储量的 60% 储存在 100 cm 以下土层, 忽略深层 SOC 储量会造成严重的碳储量低估。80 ~ 100 cm 是 0 ~ 100 cm 土层中与深层 SOC 储量变化相关性最强的一层, 可用于推测深层 SOC 储量。

#### 参考文献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, **123**: 1-22
- [2] Lal R. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. *Energy & Environmental Science*, 2008, **1**: 86-100
- [3] IPCC. Land-use, Land-use Change, and Forestry, A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 1-51
- [4] IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-18
- [5] de Camargo PB, Trumbore SE, Martinelli LA, et al. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 693-702
- [6] Paul KI, Polglase PJ, Richards GP. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG),

- litter decomposition ( GENDEC ) and soil C turnover ( RothC ). *Forest Ecology and Management* , 2003 , **177**: 485-501
- [7] Trumbore S , Da Costa ES , Nepstad DC , *et al.* Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration. *Global Change Biology* , 2006 , **12**: 217-229
- [8] Fontaine S , Barot S , Barre P , *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* , 2007 , **450**: 277-280
- [9] Jobbagy EG , Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* , 2000 , **10**: 423-436
- [10] Carter MR , Gregorich EG. Carbon and nitrogen storage by deep-rooted tall fescue ( *Lolium arundinaceum* ) in the surface and subsurface soil of a fine sandy loam in eastern Canada. *Agriculture , Ecosystems & Environment* , 2010 , **136**: 125-132
- [11] Fisher MJ , Rao IM , Ayarza MA , *et al.* Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* , 1994 , **371**: 236-238
- [12] Wang YG , Li Y , Ye XH , *et al.* Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of the Total Environment* , 2010 , **408**: 1925-1931
- [13] Li CH , Li Y , Tang LS. Soil organic carbon stock and carbon efflux in deep soils of desert and oasis. *Environmental Earth Sciences* , 2010 , **60**: 549-557
- [14] Fearnside PM , Barbosa RI. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* , 1998 , **108**: 147-166
- [15] Wang Z ( 王 征 ) , Liu G-B ( 刘国彬 ) , Xu M-X ( 许明祥 ) . Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica* ( 生态学报 ) , 2010 , **30**( 14 ) : 3947-3952 ( in Chinese )
- [16] Che S-G ( 车升国 ) , Guo S-L ( 郭胜利 ) . Influencing factors of soil organic carbon in deeper soil layers at a small watershed on tableland region of the Loess Plateau , China. *Environmental Science* ( 环境科学 ) , 2010 , **31**( 5 ) : 1372-1378 ( in Chinese )
- [17] Trumbore SE , Davidson EA , Camargo PBD , *et al.* Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* , 1995 , **9**: 515-528
- [18] Lavania UC , Lavania S. Sequestration of atmospheric carbon into subsoil horizons through deep-rooted grasses-vetiver grass model. *Current Science* , 2009 , **97**: 618-619
- [19] Chen LD , Gong J , Fu BJ , *et al.* Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area , loess plateau of China. *Ecological Research* , 2007 , **22**: 641-648
- [20] Xu Y ( 徐 勇 ) , Tian J-L ( 田均良 ) , Shen H-Q ( 沈洪泉 ) , *et al.* The evaluating method of eco-environment restoration patterns: A case study of the loess hilly-gully region. *Acta Geographica Sinica* ( 地理学报 ) , 2004 , **59**( 4 ) : 621-628 ( in Chinese )
- [21] Liu GB. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenges and prospects. *Ambio* , 1999 , **28**: 663-668
- [22] Li Y-C ( 李育才 ) . The review and the frame work for the 'Grain-for-Green' programme in China. *Forestry Economics* ( 林业经济 ) , 2001( 9 ) : 3-11 ( in Chinese )
- [23] Liu G-S ( 刘光崧 ) , Jiang N-H ( 蒋能慧 ) , Zhang L-D ( 张连第 ) , *et al.* Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles. Beijing: China Standards Press , 1996 ( in Chinese )
- [24] Potthast K , Hamer U , Makeschin F. Impact of litter quality on mineralization processes in managed and abandoned pasture soils in southern Ecuador. *Soil Biology and Biochemistry* , 2010 , **42**: 56-64
- [25] Rubino M , Dungait JAJ , Evershed RP , *et al.* Carbon input belowground is the major C flux contributing to leaf litter mass loss: Evidences from a <sup>13</sup>C labelled-leaf litter experiment. *Soil Biology and Biochemistry* , 2010 , **42**: 1009-1016
- [26] Kim C. Soil carbon storage , litterfall and CO<sub>2</sub> efflux in fertilized and unfertilized larch ( *Larix leptolepis* ) plantations. *Ecological Research* , 2008 , **23**: 757-763
- [27] Ayres E , Steltzer H , Berg S , *et al.* Soil biota accelerate decomposition in high-elevation forests by specializing in the breakdown of litter produced by the plant species above them. *Journal of Ecology* , 2009 , **97**: 901-912
- [28] Daigh AL , Brye KR , Sharples AN , *et al.* Five-year change in soil profile chemical properties as affected by broiler litter application rate. *Soil Science* , 2009 , **174**: 531-542
- [29] Wang Q-K ( 王清奎 ) . Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ) , 2011 , **22**( 4 ) : 1075-1081 ( in Chinese )
- [30] King JS , Albaugh TJ , Allen HL , *et al.* Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist* , 2002 , **154**: 389-398
- [31] Xu X-X ( 徐学选 ) , Liu J-H ( 刘江华 ) , Gao P ( 高鹏 ) , *et al.* A study on the effect of soil moisture of different vegetations in Loess hilly region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* ( 西北植物学报 ) , 2003 , **23**( 8 ) : 1347-1351 ( in Chinese )
- [32] Wang L ( 王 力 ) , Shao M-A ( 邵明安 ) , Wang Q-J ( 王全九 ) , *et al.* Comparison of soil desiccations in natural and acacia forests in the Ziwuling Mountain of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* ( 西北植物学报 ) , 2005 , **25**( 7 ) : 1279-1286 ( in Chinese )
- [33] Wang L ( 王 力 ) , Wei S-P ( 卫三平 ) , Wu F-Q ( 吴发启 ) . Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: A case study of Yangou catchment. *Acta Ecologica Sinica* ( 生态学报 ) , 2009 , **29**( 3 ) : 1543-1553 ( in Chinese )
- [34] Carvalheiro KDO , Nepstad DC. Deep soil heterogeneity and fine root distribution in forests and pastures of eastern Amazonia. *Plant and Soil* , 1996 , **182**: 279-285
- [35] Goebel MO , Woche SK , Bachmann J , *et al.* Significance of wettability-induced changes in microscopic water distribution for soil organic matter decomposition. *Soil Science Society of America Journal* , 2006 , **71**: 1593-1599
- [36] Jiao F , Wen ZM , An SS. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. *Catena* , 2011 , **86**: 110-116
- [37] Neumann-Cosel L , Zimmermann B , Hall JS , *et al.* Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures: A case study from Panama. *Forest Ecology and Management* , 2011 , **261**: 1625-1633

作者简介 张 金,女,1986年生,硕士研究生,主要从事土壤-植被互动效应研究。E-mail: zhangjin8601@163.com

责任编辑 李凤琴