

黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响

王 征¹, 刘国彬^{1,2}, 许明祥^{1,2,*}

(1. 西北农林科技林学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:以恢复 9、15、24a 和 34a 的刺槐林为研究对象, 探究黄土丘陵区深层土壤有机碳 (SOC) 积累以及对植被恢复的响应。区域深层土壤 (50—200cm) SOC 含量高达 $1.35 - 2.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为浅层土壤 (0—50cm) SOC 含量的 25%; 深层土壤 SOC 储量高达 $26.28 - 46.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 2m 土层 SOC 储量的 50% 以上, 显著高于浅层 SOC 储量; 植被恢复 20 多年后与恢复 9a 相比, 深层 SOC 含量和储量都有极显著提高。2m 土层 SOC 含量随植被恢复 20 多年后较 9a 提高 1 倍左右; 2m 土层 SOC 储量增幅为 $43.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9—34a), 明显高于 1m 土层 SOC 储量增幅 $34.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9—34a)。浅层土壤中的 0—30cm 相邻土层间 SOC 含量差异显著, 而深层 SOC 含量较稳定。深层 SOC 含量与刺槐盖度、基径、高度呈极显著正相关。在评价黄土丘陵区植被恢复的土壤固碳效应时应充分考虑深层土壤有机碳储量和变化。

关键词: 植被恢复; 土壤有机碳; 深层土壤; 刺槐; 黄土丘陵区

Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China

WANG Zheng¹, LIU Guobin^{1,2}, XU Mingxiang^{1,2,*}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 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 Resources, Yangling, Shaanxi, 712100, China

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an important component of the global carbon cycle. Uncertainties remain about the estimation of SOC storage because of a lack of information about temporal SOC accumulation in deep soil layers. Four ages of a Black locust (*Robinia pseudoacacia*) revegetation chronosequence including 9 (ch9), 15 (ch15), 24 (ch24) and 34 years (ch34) in the hilly Loess Plateau region was selected for this study. Vegetation characteristics and SOC dynamics down to a depth of 2m were investigated along the revegetation chronosequence to determine the accumulation of SOC in the deep soil layer and its response to revegetation. The results showed that the deep soil layer of the hilly Loess Plateau conserved a large amount of soil organic carbon. Deep layer (50—200cm) SOC content ($1.35 - 2.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was equivalent to approximately 25% of that found in the shallow layer (0—50cm). Deep layer SOC storage ($26.28 - 46.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) accounted for more than 50% of total SOC storage (0—200cm), and deep layer SOC storage was significantly higher than that found in the shallow layer. The results demonstrated that total SOC storage will be underestimated by approximately 1/3 in this region if SOC was only measured to a depth of 1m. When compared to ch9, SOC storage and SOC content in deep soil layer increased significantly after more than 20 years revegetation. Average SOC content for 10cm increments down to a depth of 2m for ch9, ch15, ch24 and ch34 were $(1.65 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(1.70 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(3.10 \pm 0.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $(3.35 \pm 0.16) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. As a vigorous accumulation exhibited in the mature phase (15—24a) of Black Locust, average SOC content of 2m was doubled after 20 years revegetation (ch24, ch34) compared to that of 9ch. And for the entire revegetation chronosequence (9—34a) the increase in SOC storage down to a

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KZCX2-YW-443); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB407205); 中国科学院西部行动计划资助项目 (KZCX2-XB2-05-03)

收稿日期: 2010-01-27; 修订日期: 2010-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

depth of 2m ($43.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) was distinctly higher than that in 1m ($34.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). Unlike the shallow soil layer had significant differences in SOC content in adjacent increments (0—30cm), in the deep soil layer the differences were only $0.12 - 0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Black Locust growing conditions (coverage, basal diameter and height) showed significant correlation with both deep and shallow SOC content, demonstrating the significant influence of deep-rooting vegetation to deep layer SOC and the integrity of the whole soil organic carbon pool. Our results indicated that SOC storage in the deep soil layer should be considered when estimating the effects of soil carbon sequestration of revegetation in the hilly Loess Plateau region.

Key Words: revegetation; SOC; deep soil layers; Black Locust; hilly Loess Plateau

土壤有机碳变化是当前全球气候变化研究中的热点问题之一。全球约有 1500 Gt 碳是以有机质形态储存于土壤中,是陆地植被碳库或全球大气碳库的 2—3 倍^[1-2],对全球气候变化的预测和缓解能力将部分取决于对土壤有机碳分布和控制因素的了解^[2]。

当前黄土高原进行了大规模的植被恢复,对表层土壤有机碳产生了深刻影响^[3-8],然而对于深层土壤有机碳的影响尚不明确。Fisher 和 Nepstad 等^[9-10]报道了亚马逊地区深根性草原和森林深层土壤有机碳储量巨大,指出深层土壤有机碳积累将会影响到全球的碳循环,缓解大气温室气体的增加;以后陆续有国外学者对深层土壤有机碳的周转速率和影响因素,以及稳定性机制进行了研究^[2,9-13]。这些研究表明由于缺少深层有机碳数据影响到了土壤碳储量准确估算,并且深层土壤有机碳具有很高的稳定性,能够长期的储存在土壤碳库中,因此在面对全球化变暖的形势下,深层土壤有机碳研究显得尤为重要。

本研究以黄土丘陵区 4 种恢复年限的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林为研究对象,研究土壤有机碳时空分布特征,探讨植被变化对土壤深层有机碳的影响,以期为区域植被建设及土壤碳储量评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区域设在安塞县纸坊沟流域(北纬 $36^{\circ}51'30''$;东经 $109^{\circ}19'30''$),属黄土丘陵沟壑区。流域面积 8.27 km^2 。年辐射总量为 $493 \text{ kJ}/\text{cm}^2$,年均气温 8.8°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 3733.5°C ;年均降水量为 549.1 mm ,枯水年 300 mm 左右,丰水年 700 mm 以上,7—9 月份的降水量占全年降水的 61.1% ,年蒸发量大于 1463 mm 。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% 增加到 40% 以上^[14]。

1.2 样地选取和样地调查

2009 年 5 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)的 4 种恢复年限的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林:恢复 9a(ch9)、恢复 15a(ch15)、恢复 24a(ch24)和恢复 34a(ch34),根据刺槐的生长状况,大致划分为 3 个生长时期:生长期(9—15a)、成熟期(15—24a)和衰老期(24—34a)。样地概况见表 1。

4 种林分内分别间距 5 m 以上设置 3 个重复样地(面积 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$),植被群落调查采用陆地生物群落典型样方调查方法^[15]进行,不同恢复年限植被变化见表 2。

1.3 土样采集和室内分析

植被状况调查完之后,在每块样地随机用内径为 5 cm 土钻分层多点采 $0 - 200 \text{ cm}$ 土样,每 10 cm 为一层,共得 240 个混合土样。土壤容重用环刀法测定。枯落物收集后, 80°C 下烘干至恒重。土样拣去植物根系和杂物,风干后过 0.25 mm 土筛。土样有机碳用重铬酸钾-外加热容量法测定,每个土样重复测定 2 次,取平均值。

1.4 数据计算与分析

目前对于 SOC 动态变化研究,多数关注 $< 50 \text{ cm}$ 浅层土壤^[7-8,16],因此为表征植被恢复对土壤浅层和深层

SOC 的影响,将 0—50cm 作为一个整体,划分为浅层,将 50—200cm 作为一个整体,划分为深层。

表 1 样地概况
Table 1 Characteristics of studied sites

样地 Sample sites	海拔/m Altitude	坡位 Slope position	坡向/(°) Aspect	坡度/(°) Slope	林下主要草本植被类型 Mainly vegetation types of herb
ch9	1235	梁坡中部	WS15	22—25	茵陈蒿 <i>Artemisia capillarie</i> 胡枝子 <i>Lespedezabicolo</i>
ch15	1202	梁坡上部	WS40	20—25	芡蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>
ch24	1199	梁坡中部	WS45	15—23	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
ch34	1208	梁坡上部	ES15	22—25	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 芡蒿 <i>A. giraldii</i> 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>

表 2 不同恢复年限植被指标变化
Table 2 Vegetation dynamic along revegetation chronosequence

恢复年限 Revegetation years/a	林下草本生长状况 Growing conditions of herb			刺槐生长状况 Growing conditions of Black Locust			枯落物指标 Litter indices		
	盖度/% Coverage	物种数量 Species No.	高度/cm Height	盖度/% Coverage	基径/cm Basal diameter	高度/cm Height	盖度/% Coverage	厚度/cm Thickness	干重/g Dry weight
9	53 ± 6.01a	9 ± 2.08a	20 ± 2.08a	10 ± 0.00a	4 ± 0.29a	213 ± 8.82a	37 ± 11.90a	1 ± 0.17a	94 ± 14.00a
15	17 ± 4.33b	12 ± 0.67ab	26 ± 2.96ab	31 ± 1.67b	5 ± 0.00b	550 ± 28.87b	70 ± 2.89b	1 ± 0.06a	282 ± 25.15b
24	8 ± 2.89bc	8 ± 0.58c	21 ± 1.20a	86 ± 3.17c	12 ± 0.33c	1100 ± 57.74c	67 ± 1.78b	2 ± 0.00b	304 ± 45.35b
34	60 ± 6.99ad	14 ± 0.33b	30 ± 2.91b	56 ± 1.67d	15 ± 0.73d	1037 ± 13.33c	72 ± 1.67b	2 ± 0.17b	258 ± 31.33b

注:不同字母表明差异显著($P < 0.05$)

不同土地利用类型表层土壤容重差异较大,而深层土壤容重变化很小^[11,17-18]。浅层土壤容重采用实际测定值,容重变化见图 1,深层土壤容重采用本区域山坡农地容重数据。每层土壤 SOC 储量的计算方法与 Wang^[7] 相同。

采用 SPSS 13.0 对测定结果进行统计分析,用 LSD 法做多重比较,用 T 检验比较两组数据的差异性。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限 2m 土层 SOC 差异

ch9、ch15、ch24、ch34 的 2m 土层 SOC 含量分别为 $(1.65 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(1.70 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(3.10 \pm 0.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(3.35 \pm 0.16) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,随植被恢复年限呈逐渐增加的趋势(图 2),在成熟期(15—24a)极显著提高($P < 0.01$)。恢复 20 多年后,2 m 土层 SOC 含量 $((3.10 \pm 0.12) - (3.35 \pm 0.16) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$ 比恢复 9a 时 $((1.65 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$ 提高了 1 倍左右。

2.2 浅层和深层 SOC 层次间差异性

从图 3 中可以看出,浅层和深层 SOC 表现出不同的层次间差异性。SOC 在土壤浅层(0—50cm)变化比较剧烈,相邻土层的 SOC 含量平均差异 0.68—4.64 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,ch9、ch15、ch24、ch34 样地 0—30cm 深度相邻土层

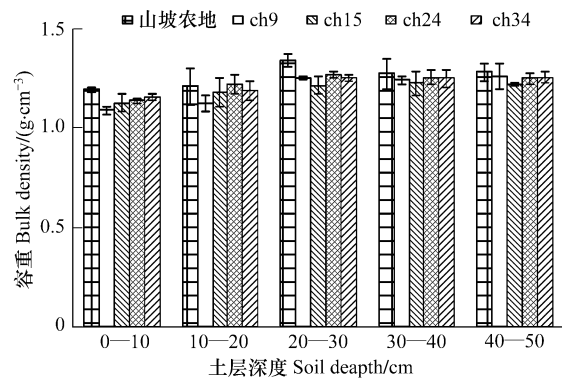


图 1 不同土地利用类型 0—50cm 土壤容重

Fig. 1 Bulk density of 0—50cm soil layers in different land use types

注:山坡农地容重数据为中国科学院安塞水土保持试验站监测数据

间均有显著差异 ($P < 0.05$); 而深层 SOC (50—200 cm) 较稳定, 相邻土层的 SOC 含量平均相差 $0.12\text{--}0.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.3 浅层和深层 SOC 含量

深层土壤仍具有较高的 SOC 含量, ch9、ch15、ch24、ch34 深层 SOC 含量分别为 $(1.35 \pm 0.03)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(1.36 \pm 0.13)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(2.39 \pm 0.11)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(2.05 \pm 0.21)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与相应恢复年限浅层 SOC 含量的比例大于 0.25。

从图 4 中可以看出浅层 SOC 含量随恢复年限的增加而提高, 成熟期 (15—24a) 具有极显著的提高 ($P < 0.01$); 衰老期 (24—34a) 显著增加 ($P < 0.05$)。深层 SOC 含量随恢复年限的增加, 总体上呈提高趋势, 成熟期 (15—24a) 有极显著的增加 ($P < 0.01$), 随刺槐的衰老而轻微降低。

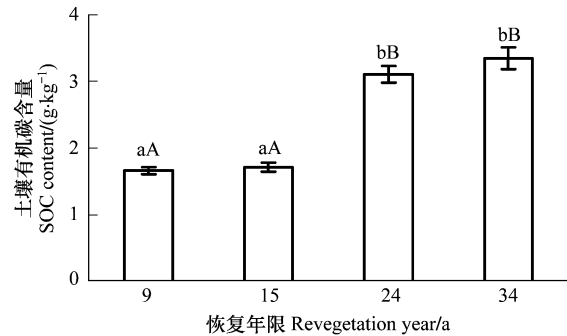


图 2 不同恢复年限 2m 土层土壤有机碳含量

Fig. 2 SOC content of different revegetation years in 2m soil depth

注: 不同小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表明差异极显著 ($P < 0.01$)

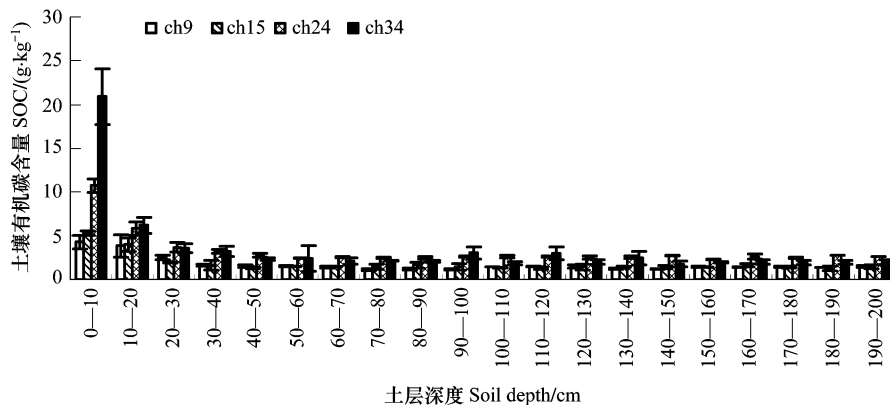


图 3 相同层次不同恢复年限 0—200 cm 土壤有机碳差异

Fig. 3 SOC contents among different revegetation years in soil layers form 0 cm to 200 cm

2.4 浅层和深层 SOC 储量

深层土壤具有很高的 SOC 储量, 为 $26.28\text{--}46.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。如图 5 所示, ch9、ch15、ch24、ch34 深层 SOC 储量都占到了整个 2m 土层 SOC 储量的 1/2 左右; 混合年限后, 深层 SOC 储量占 2m 土层 SOC 储量的 50% 以上。ch9、ch15、ch24 的深层 SOC 储量都显著高于浅层 SOC 储量 ($P < 0.05$)。

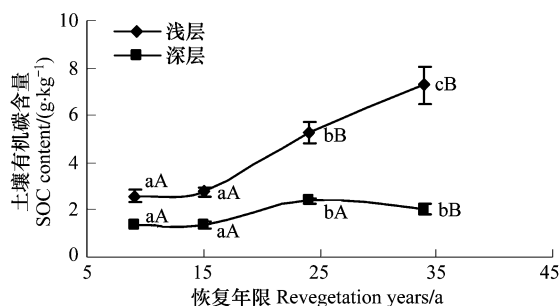


图 4 浅层和深层 SOC 含量随年限的变化

Fig. 4 SOC content dynamic in shallow and deep soil layers along the revegetation chronosequence

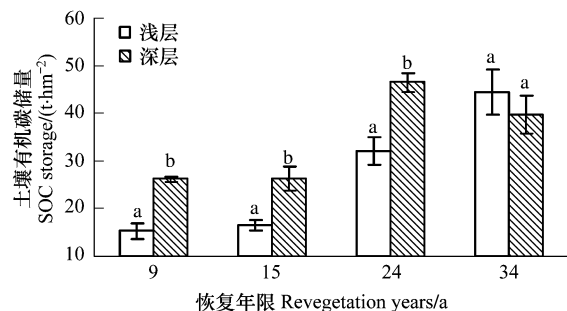


图 5 不同恢复年限浅层和深层 SOC 储量

Fig. 5 SOC storage of different revegetation years in shallow and deep soil layers

2.5 浅层和深层 SOC 与植被因素的相关性

从表 3 中可以看出,浅层 SOC 含量与刺槐的基径和高度,以及枯落物盖度都存在极显著的相关性($P < 0.01$)。深层 SOC 含量与刺槐盖度、基径和高度,以及枯落物厚度相关性极显著($P < 0.01$)。刺槐对于深层 SOC 含量有较大影响。浅层和深层 SOC 含量也存在显著的相关性($P < 0.05$),表明表层 SOC 的提高对深层土壤也会产生影响。

表 3 浅层和深层 SOC 与植被指标的相关性

Table 3 Correlation between SOC content in shallow and deep soil layers and vegetation

0—50cm SOC content	林下草本生长状况 Growing conditions of herb			刺槐生长状况 Growing conditions of Locust tree			枯落物指标 Litter indices		
	盖度 Coverage	物种数量 Species No.	高度 Height	盖度 Coverage	基径 Basal diameter	高度 Height	盖度 Coverage	厚度 Thickness	干重 Dry weight
0—50cm 土壤有机碳含量 0—50cm SOC content	0.218	0.391	0.413	0.404	0.880 **	0.745 **	0.785 **	0.514	0.362
50—200cm 土壤有机碳含量 50—200cm SOC content	0.552 *	-0.187	-0.106	-0.049	0.756 **	0.713 **	0.807 **	0.316	0.863 **

* * 表明相关性极显著($P < 0.01$), * 表明相关性显著($P < 0.05$)

3 讨论

在估算土壤有机碳储量时,现在通常使用的数据是 $\leq 1\text{m}$ 土层的碳储量^[2,3,5-7],这对于土层较浅的地区比较适用,而黄土高原区域土层深厚,本研究所得到的黄土丘陵区刺槐林 $\leq 1\text{m}$ 土层碳储量与其他研究结果相似^[3],而 2m 土层 SOC 储量为 $(41.28 \pm 1.27) - (84.30 \pm 4.12) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比 1m 土层的 SOC 储量高 1/3 左右,显著高于黄土高原 20cm 土层的平均 SOC 储量 $0.6 - 12.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[5],而较 Jobbagy 等在 2000 年^[2]所估算的全球平均值稍高一些(3 m 土层有机碳库储量比 1m 土层的高 56%)。

Fontaine 等^[12]提出稳定的深层 SOC 会由于新鲜有机物的加入而加快分解,但本研究的结果表明植被恢复导致的有机物增加量^[4]大于分解量,最终使深层土壤截留了更多的 SOC。本区域有些研究表明刺槐恢复会导致土壤 SOC 含量降低,这可能是由于恢复年限较短或参比样地不同造成的^[6]。多数研究表明本区域植被恢复会促进表层土壤 SOC 的积累,但忽略了深层土壤 SOC 的变化^[3-4,7-8],这主要是由于缺少对于深层 SOC 随植被恢复而变化的研究,另外没有将深层土壤作为一个整体考虑,忽视了 SOC 储量的变化。本研究表明深层 SOC 含量在 15 个分层中都有提高(图 3)。2m 土层的 SOC 储量显著增加达 $43.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9—34a),比 1m 土层的 SOC 储量的增幅 $34.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9—34a) 高 $8.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。黄土丘陵区大约有 $204.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 坡耕地(坡度 $> 15^\circ$)实施退耕还林工程^[19],到本研究取样调查时大部分已完成了 9a 左右,如果以刺槐恢复后的土壤 SOC 变化近似估算退耕还林工程 30a 后土壤固碳效果,考虑深层 SOC 的碳截留量将比 1m 土层碳截留量高约 $1712 \times 10^4 \text{ t}$ 。Fisher 等^[9]指出这种差值可能与全球碳平衡计算中出现的“碳失汇”问题相关;会影响整个生态系统碳“源”“汇”效应的评价。

一般枯落物和根产量、地上地下物质分配、根系深度、生产有机组分等都影响到有机碳输入土壤的模式、速度、质量和数量^[20]。本研究表明,深层 SOC 随植被恢复的变化趋势与刺槐生长状况的变化趋势一致,相关性极显著(图 4,表 3),而与枯落物、草本生长状况相关性较低。本区域刺槐林根系量随恢复年限增加而明显提高,且这种增加主要发生在深层^[3-4]。Nepstad 和 Trumbore 等^[10-11]等指出植物根系是深层 SOC 主要来源,控制着深层 SOC 的循环和分布。可见深根性植物生长状况对深层 SOC 的变化起主导作用。

随着黄土高原大规模退耕还林工程的实施,深根性灌木、乔木被大面积用于人工植被恢复和重建,必将对深层土壤碳库产生深远影响,关注深层土壤碳库的变化,有助于全面评价植被恢复的土壤碳库效应以及在调节全球碳平衡中的作用。

References:

- [1] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-194.
- [2] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [3] He L, Su Y Q, Ji Z P, Xin Z L. Studies on the carbon storage and distributive character of Robinia and Pinus in Loess Plateau gully area. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(4): 49-53.
- [4] Ji Z P, Su Y Q, He L. Vertical distribution characteristic of soil organic carbon of plantation in hilly Loss region. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(6): 54-57.
- [5] Xun X L, Zhang L K, Xun X L, Peng W Y. Spatial distribution and estimating of soil organic carbon on Loess Plateau. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3): 13-15.
- [6] Zhang J Q, Su Y Q, Kang Y X, Xu X M, Qin L. Carbon sequestration of young Robinia pseudoacacia plantation in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [7] Wang Y, Fu B, Yi he L, Song C, Luan Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau. *China Quaternary Research*, 2010, 73(1): 70-76.
- [8] Li Y Y, Shao M A, Zheng J Y, Zhang X C. Spatial-temporal changes of soil organic carbon during vegetation recovery at Ziowuling, China. *Pedosphere*, 2005, 15: 601-610.
- [9] Fisher M J, Rao I M, Ayarza M A, Lascano C E, Sanz J I, Thomas R J, Vera R R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, 1994, 371(6494): 236-238.
- [10] Nepstad D C, de Carvalho C R, Davidson E A, Jipp P H, Lefebvre P A, Negreiros G H, da Silva E D, Stone T A, Trumbore S E, Vieira S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 1994, 372(6507): 666-669.
- [11] Trumbore S E, Davidson E A, Decamargo P B, Nepstad D C, Martinelli L A. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 515-528.
- [12] Fontaine S, Barot S, Barre P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-U210.
- [13] Salome C, Nunan N, Pouteau V, Lerch T Z, Chenu C. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology*, 2010, 16: 416-426.
- [14] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: Challenges and prospects. *Ambio*, 1999, 28(8): 663-668.
- [15] Dong M, Jiang G M, Kong F Z, Wang Y F, Zhang Z B. Survey. observation and analysis of terrestrial biocommunities. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [16] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [17] Lian G, Guo X D, Fu B J, Hu C X. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 647-654.
- [18] Zhang S Q, Wang G D, Liu J J, Guo M C. Soil hydro-physical properties of Robinia pseudoacacia plantation forestland in Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(3): 11-14.
- [19] Xu Y, Tian J L, Shen H Q, Liu P L. The evaluating method of eco-environment restoration pattern, a case study of the loess hilly-gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 621-628.
- [20] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle; implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280: 1393-1394.

参考文献:

- [3] 贺亮, 苏印泉, 季志平, 辛占良. 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. *西北林学院学报*, 2007, 22(4): 49-53.
- [4] 季志平, 苏印泉, 贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征. *西北林学院学报*, 2006, 21(6): 54-57.
- [5] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 彭文英. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 13-15.
- [6] 张景群, 苏印泉, 康永祥, 徐喜明, 秦乐. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [15] 董鸣, 蒋高明, 孔繁志, 王义凤, 张知彬. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [17] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征. *生态学报*, 2006, 26(3): 647-654.
- [18] 张社奇, 王国栋, 刘建军, 郭满才. 黄土高原刺槐林地土壤水分物理性质研究. *西北林学院学报*, 2004, 19(3): 11-14.
- [19] 徐勇, 田均良, 沈洪泉, 刘普灵. 生态重建模式的评价方法——以黄土丘陵区为例. *地理学报*, 2004, 59(4): 621-628.