

黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应

黎鹏¹, 张勇², 李夏浩祺³, 孙彩丽⁴, 段奥华¹, 刘国彬^{1,5}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省林业科学院, 西安 710082; 3.西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4.贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025; 5.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)

摘要:为分析黄土高原退耕还林(草)后土壤有机碳储量变化特征,选取不同土层深度(0—20 cm, 0—30 cm, 0—50 cm 和 0—100 cm)和不同恢复年限的刺槐林(5, 10, 20, 56 a)、沙棘林(5, 10, 20, 30 a)、柠条林(10, 20, 36, 47 a)及草地(5, 10, 15, 20, 25, 30 a)土壤为研究对象,通过测定土壤有机碳(SOC)含量,分析了植被恢复后土壤有机碳储量变化规律,并探讨了0—20 cm 和 0—100 cm 土层土壤有机碳储量的关系。结果表明:4种退耕方式下,各土层土壤有机碳储量和0—100 cm 土壤有机碳加权平均含量随恢复年限整体呈增加趋势;同时,通过对比0—20 cm 土层土壤碳储量随恢复年限变化速率发现,沙棘[0.048 g/(kg·a)]>刺槐[0.023 g/(kg·a)]>撂荒[0.020 g/(kg·a)]>柠条[0.012 g/(kg·a)]。此外,线性回归表明0—20 cm 土层与0—100 cm 土层土壤有机碳储量呈极显著正相关关系($F=169.6$, $R^2=0.755$, $p<0.001$)。综上,退耕还林(草)能够显著提高土壤有机碳储量,从土壤有机碳蓄积的角度考虑沙棘更有利于土壤有机碳的积累,同时可以用0—20 cm 土层土壤有机碳储量来估算退耕还林的固碳潜力。

关键词:退耕还林(草); 有机碳储量; 恢复类型; 恢复年限; 土层深度

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0029-05

Effect of Soil Carbon Sink in the Hilly Region of the Loess Plateau Under Grain for Green Project

LI Peng¹, ZHANG Yong², LI Xiahaoqi³, SUN Caili⁴, DUAN Aohua¹, LIU Guobin^{1,5}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 5. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the aim to analyze the variation characteristics of soil organic carbon reserves after returning cropland to forest (grassland) on the Loess Plateau, soil with different depths (0—20 cm, 0—30 cm, 0—50 cm and 0—100 cm) and various vegetation with different restoration ages including *Robinia pseudoacacia* (5 a, 10 a, 20 a and 56 a), *Caragana korshinskii* (5 a, 10 a, 20 a and 30 a), *Hippophae rhamnoides* (10 a, 20 a, 36 a and 47 a) and natural grassland (5 a, 10 a, 15 a, 20 a, 25 a and 30 a) were selected as the objects of this study, the law of soil organic carbon (SOC) reserves after vegetation restoration was analyzed, and the relationship between soil organic carbon reserves in 0—20 cm soil layer and 0—100 cm was discussed. The results showed that soil organic carbon reserves of each soil layer increased with the recovery years in four restoration patterns. Meanwhile, the carbon sequestration rate of the 0—20 cm soil layer followed the order of *Caragana korshinskii* [0.048 g/(kg·a)] > *Robinia pseudoacacia* [0.023 g/(kg·a)] > natural grassland [0.020 g/(kg·a)] > *Hippophae rhamnoides* [0.012 g/(kg·a)]. In addition, a significant positive correlation was found between soil organic carbon of 0—20 cm soil layer and 0—100 cm soil layer ($F=169.6$; $R^2=0.755$; $p<0.001$). Overall, Grain for Green project can significantly increase SOC storage, and *Caragana korshinskii* is more conducive to SOC accumulation, compared with other treatments. In addition, the SOC

收稿日期:2020-07-01

修回日期:2020-10-20

资助项目:陕西省自然科学基金(2021JC-50);国家自然科学基金(41771557)

第一作者:黎鹏(1996—),男,四川巴中人,硕士研究生,研究方向为水土保持及土壤微生物生态。E-mail:lipeng1900@outlook.com

通信作者:刘国彬(1958—),男,陕西榆林人,研究员,主要从事水土保持与流域管理研究。E-mail:gblu@ms.iswc.ac.cn

of 0—20 cm soil layer could be used to estimate the potential carbon sequestration of conversion of farmland to forest. This study is conducive to enhancing the understanding of soil carbon sequestration during vegetation restoration in the Loess Plateau and providing theoretical reference for regional carbon cycle.

Keywords: Grain for Green; soil organic carbon storage; restoration type; restoration ages; soil depths

土壤碳库是陆地生态系统中的重要资源,其有机碳储量约为 2 500 Pg,占全球陆地生态系统碳库的 75%,不仅能够作为碳源,也可作为碳汇,是碳循环的重要环节。森林土壤碳库约占全球土壤有机碳库的 70%,是森林生物量碳库的 2~3 倍^[1]。因此,森林土壤对于维持陆地生态系统碳平衡十分重要,森林土壤碳库的变化是导致大气碳库增加和全球变暖的主要原因^[2-3]。退耕还林(草)措施被广泛认为是增加土壤有机碳储量的有效方式,耕地与退化土地施行退耕还林(草)后,土壤有机碳储量显著增加^[4-6]。马帅等^[7]通过对子午岭林区不同植被恢复阶段的土壤有机碳进行研究发现 0—100 cm 剖面上有机碳含量加权平均值随植被恢复年限逐渐升高,0—20 cm 土层土壤相较于 20 cm 以下土层,其有机碳随植被恢复的提高幅度明显升高。彭文英等^[8]研究表明,黄土高原施行退耕还林(草)工程 30 a 后土壤有机碳储量达到 1 314.6 Tg,较 2000 年增加 23.708%。也有研究指出土壤有机碳在恢复初期呈下降趋势,随后逐渐增加,直至 30 a 后土壤碳储量显著高于恢复前^[9]。

全球 0—1 m 深土层范围的有机碳总量大约是陆地植被碳总量的 1.5~3 倍^[10-11]。虽然研究 1 m 深土层范围土壤有机碳储量变化更加准确且具代表性,但存在采样困难,耗时耗力等问题。因此亟待寻找更加简单省时的方法以表征深层土壤的有机碳储量。有研究表明各林分土壤的有机碳主要集中在 0—20 cm 土层^[12]。研究 0—20 cm 土层的土壤有机碳储量是否能够表征 0—100 cm 土层深度的有机碳储量为我们提供了新的思路。

由于人类活动和自然灾害的增加,黄土高原丘陵地区的土壤质量急剧下降,为了解决黄土高原的生态问题,国家自 1999 年开始施行退耕还林(草)计划,经过数十年的努力,黄土高原生态环境得到了极大的改善^[8,13]。对于黄土高原的生态恢复效益的研究一直是热点问题,但由于自然环境复杂等原因,关于退耕还林(草)工程土壤固碳效应的研究结果存在较大差异^[14-17]。本文通过研究陕北黄土高原地区不同退耕年限土壤有机碳的变化特征,分析不同恢复类型土壤有机碳储量的差异,并通过线性回归来研究 0—20 cm 土层与 0—100 cm 土层深度的土壤有机碳储量的关系,以期为黄土高原地区生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况

研究区设在陕西省安塞县(东经 108°5′44″—109°26′18″,北纬 36°30′45″—37°19′3″)。该地区年均降水量 500 mm 左右,蒸发量 1 000 mm 左右,年均气温 8.8℃,日照时数 2 352~2 573 h,属暖温带半干旱气候区。由于毁田造林、过度放牧等不合理的土地利用,该地区生态环境遭到严重破坏。为了减少水土流失,提高土壤质量,该地区自实施退耕还林(草)工程,将坡度大于 15°的坡耕地退耕成草地或林地等,生态环境得到较大改善。目前土地利用类型主要包括耕地、林地、草地和果园等,主要植被类型是以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主的人工林,以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主的灌丛林,以及以铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等为主的草地。土壤类型主要以黄土母质发育而成的黄绵土为主,研究区属典型的黄土丘陵沟壑区。

2 材料与方法

2.1 研究方法

本研究以安塞不同退耕年限土壤为研究对象,以研究陕北退耕还林过程中土壤有机碳随退耕年限和土层深度的变化,并探索不同恢复类型土壤碳库的差异特征,具体研究方法如下:选择立地条件相似、具有代表性的不同退耕年限的乔木林、灌木林和草地,其中乔木林选择刺槐林(5,10,20,56 a),灌木林选择柠条林(10,20,36,47 a)和沙棘林(5,10,20,30 a),草地为退耕草地(5,10,15,20,25,30 a)。采用混合取样方式,即选择相同恢复类型、相近退耕年限的 3 块样地,每块样地按“S”曲线选取 5 个样点,每个样点采集 5 个不同土层深度土样(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—50 cm 和 50—100 cm)分别进行混合。采集的土样自然风干,去除杂质后进行有机碳的测定,土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定。

2.2 数据分析

数据结果均采用平均值±标准差的形式表示,对土壤有机碳含量和储量进行单因素方差分析,显著性水平为 0.05。各数据均使用 Microsoft Excel 2010, SPSS 24.0 和 Origin 8.0 软件处理绘制。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳的加权平均含量随退耕年限变化

通过对 5 个土层深度的土壤有机碳含量进行加权平均得到 0—100 cm 土壤有机碳加权平均含量。结果表明 0—100 cm 土壤有机碳加权平均含量随恢复年限整体呈增加趋势(表 1)。坡耕地营造柠条(CA)后,土壤有机碳含量呈现先降低而后显著增加的趋势,于 47 a 时达到最大为 3.89 g/kg。沙棘(HR)恢复 20 a 内,其土壤有机碳无显著变化,20 a 后显著增加,在 30 a 时达到最大(5.85 g/kg)。同样的,刺槐(RP)恢复 20 a 后土壤有机碳显著增加,在 56 a 时达到最大(3.45 g/kg)。坡耕地撂荒地(AC)土壤有机碳含量随恢复年限逐渐增加,30 a 时达到最大(3.91 g/kg)。

3.2 土壤有机碳储量随退耕年限变化

不同恢复类型的土壤有机碳储量随其退耕年限有显著变化(图 1)。坡耕地营造柠条林后,各土层有机碳储量在 0~10 a 内均有所降低,10~20 a 间显著增加。20 a 后,0~20 cm 和 0~30 cm 土层有机碳储量趋于稳定,0~50 cm 和 0~100 cm 土层有机碳储量则表现为 36 a 短暂降低后,47 a 时又恢复到 20 a 的水平。坡耕地营造沙棘林后,20 a 内各土层有机碳储量无显著变化,20~30 a 间土壤有机碳储量开始显著增加。坡耕地营造刺槐林后,各土层有机碳储量在 20 a 内无显

著变化,20 a 后开始显著增加。坡耕地撂荒后,各土层土壤有机碳储量随恢复年限整体呈增加趋势。

表 1 0—100 cm 土层不同植被类型土壤有机碳加权平均含量

| 植被类型 | 恢复年限/a | 有机碳/(g·kg ⁻¹) |
|---------|--------|---------------------------|
| 柠条(CA) | 0 | 2.18±0.11c |
| | 10 | 1.39±0.05d |
| | 20 | 3.64±0.14a |
| | 36 | 2.71±0.19b |
| | 47 | 3.89±0.10a |
| 刺槐(RP) | 0 | 2.18±0.11b |
| | 5 | 2.03±0.05b |
| | 10 | 2.54±0.28b |
| | 20 | 2.29±0.08b |
| | 56 | 3.45±0.12a |
| 沙棘(HR) | 0 | 2.18±0.11b |
| | 5 | 2.39±0.06b |
| | 10 | 2.22±0.02b |
| | 20 | 2.26±0.01b |
| | 30 | 5.85±0.51a |
| 撂荒地(AC) | 0 | 2.18±0.11cd |
| | 5 | 1.80±0.14d |
| | 10 | 2.15±0.12cd |
| | 15 | 2.70±0.49bcd |
| | 20 | 3.13±0.19ab |
| | 25 | 2.92±0.12bc |
| | 30 | 3.91±0.49a |

注:不同小写字母表示达到显著差异水平($p<0.05$),下同。

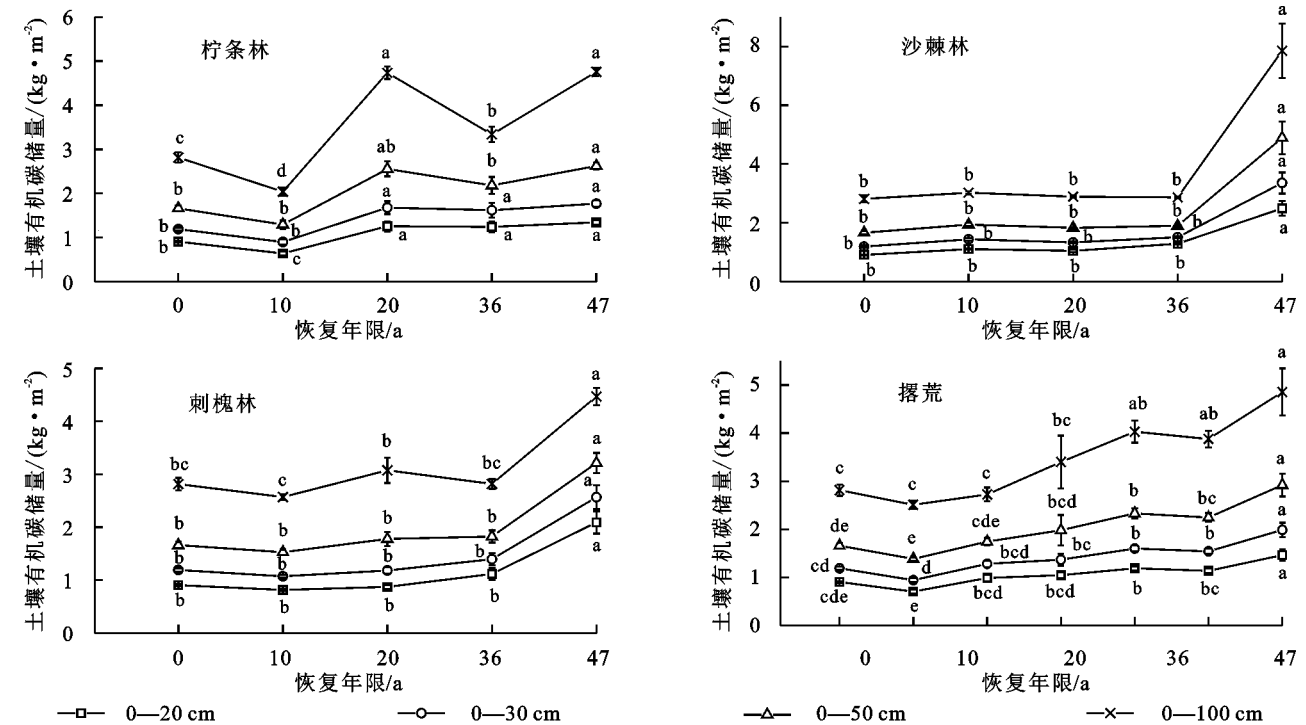


图 1 不同恢复年限土壤有机碳储量特征

3.3 不同退耕方式土壤有机碳储量差异

对于相同恢复年限的土壤,其有机碳储量受退耕

方式影响较大(图 2)。恢复年限为 5 a 时,HR 各土层深度有机碳储量均显著高于 RP 和 AC,0—20 cm

土层表现为 $RP>AC$, 20 cm 以下 RP, AC 各土层有机碳储量无显著差异。恢复年限为 10 a 时, CA 各土层有机碳储量均低于 HR, RP 和 AC , 而三者间无显著差异。恢复年限为 20 a 时, 0—20 cm 和 0—30 cm 土层各恢复类型土壤有机碳储量无显著差异, 其他各土层有机碳储量则表现为 $CA>AC>HR=RP$ 。

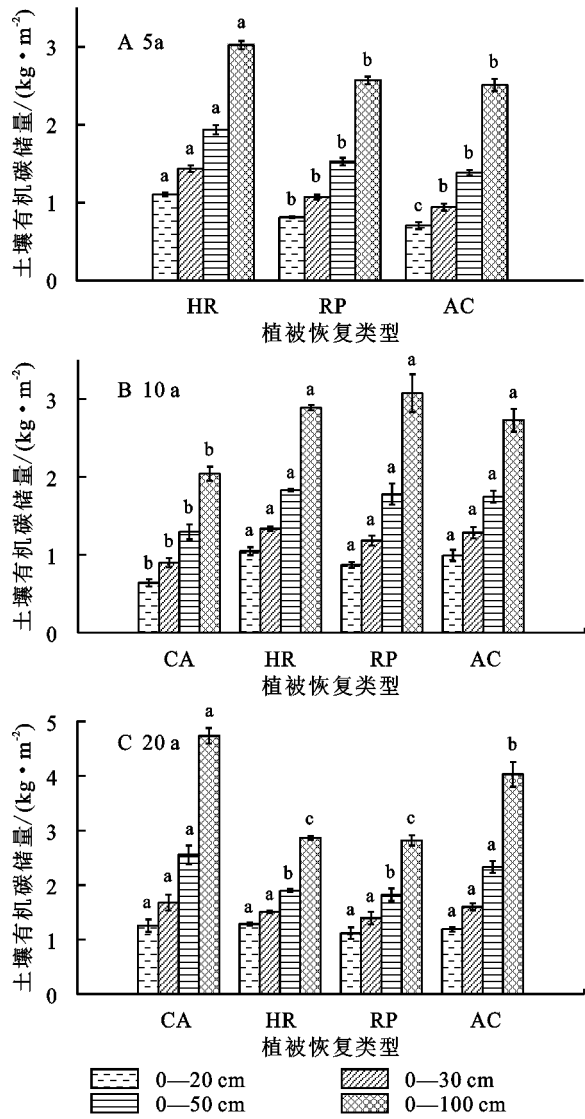


图2 相同恢复年限不同恢复类型土壤有机碳储量比较

3.4 有机碳储量与退耕年限的耦合分析

对植被恢复过程中 0—20 cm 土层有机碳储量和恢复年限进行耦合分析发现(表 2), CA, HR, RP 和 AC 的 0—20 cm 土壤有机碳储量随恢复年限均呈显著的线性增加趋势($p<0.05$), 其年增长率分别为 0.012, 0.048, 0.023, 0.020 g/(kg·a), 且 HR, RP 和 AC 的相关系数大于 0.8, 具有较好的统计学意义。

3.5 0—20 cm 与 0—100 cm 土层土壤有机碳储量的相关性分析

对 0—20 cm 和 0—100 cm 土层有机碳储量进行线性回归分析(图 3), 结果表明二者相关关系达到显著性水平($p<0.001$), 其相关系数为 0.869。该结果

说明, 可以根据 0—20 cm 土壤有机碳储量可估算出 0—100 cm 土壤有机碳储量。

表 2 0—20 cm 土层有机碳储量与恢复年限的耦合分析

| 植被恢复类型 | 回归方程 | 相关系数 |
|---------|------------------|----------------|
| 柠条林(CA) | $y=0.012x+0.802$ | $r=0.782^*$ |
| 沙棘林(HR) | $y=0.048x+0.748$ | $r=0.891^{**}$ |
| 刺槐林(RP) | $y=0.023x+0.735$ | $r=0.978^{**}$ |
| 撂荒地(AC) | $y=0.020x+0.770$ | $r=0.888^{**}$ |

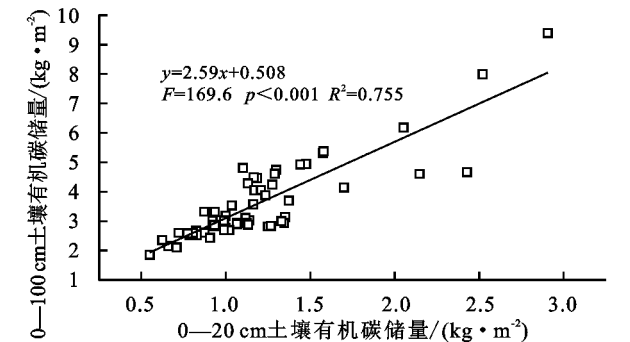


图3 0—20 cm 与 0—100 cm 土壤有机碳储量的相关关系

4 讨论

坡耕地退耕为柠条、沙棘、刺槐和撂荒地后, 0—100 cm 土层加权土壤有机碳含量和各层土壤有机碳储量较退耕前显著增加, 并随恢复年限呈整体增加趋势, 但是在退耕初期有降低的趋势。该结果表明, 黄土高原地区施行退耕还林(草)不同阶段的土壤固碳效应有明显差异, 短期无明显变化, 长期效果显著, 这与许明祥^[18]和孙彩丽^[19]等研究结果一致。此外, 不同恢复类型间土壤固碳量具有显著差异, 以 30 a 恢复年限为例, 坡耕地营造沙棘林与撂荒地处理 30 a 后 0—100 cm 土层有机碳储量分别为 7.85, 4.86 kg/m², 是恢复前的 2.79 倍、1.73 倍。枯落物和根系分泌物是土壤有机碳的主要来源, 而在退耕还林(草)初期新建植被产生的枯落物较少, 且植物自身新陈代谢, 同化作用强^[9, 20-21], 最终导致土壤有机碳含量变化不显著甚至下降。然而, 退耕还林(草)10 a 后, 新建植被继续生长, 植物生物量和盖度不断增加, 通过枯落物、根系残体及其分泌物形成的土壤有机质会显著增多, 同时生态群落逐渐稳定, 微生物活性显著增强, 土壤有机碳含量及储量也随之增加^[22-23]。此外, 随恢复年限增加, 土壤结构整体改善, 因土壤侵蚀和水土流失造成的土壤养分的流失减少^[24]。

植被类型和植被生长间的差异会导致土壤温度、湿度、凋落物数量和根系分泌物等的显著不同^[25-27]。通过对相近退耕年限不同恢复类型的土壤固碳效应和固碳速率进行比较发现, 退耕初期沙棘林 0—20 cm 土层有机碳储量和固碳速率显著高于其他类型。可能是因为沙棘林表层枯落物多, 根系较浅, 根密度大, 根系分泌

物和根系生物量可以增加土壤有机碳的积累,因此沙棘林具有较高的土壤碳储量和固碳速率。

此外,研究证实沙棘、刺槐和撂荒地 0—20 cm 土层的土壤有机碳储量与退耕年限呈极显著正相关关系。同时,0—20 cm 土层与 0—100 cm 土层的土壤有机碳储量也呈极显著线性相关关系。因此,我们认为用 0—20 cm 土层土壤有机碳储量来估算退耕还林还草后 0—100 cm 土层有机碳固碳能力和固碳潜力在干旱和半干旱地区应该被广泛接受。

5 结论

退耕还林(草)工程对土壤有机碳含量及其储量有显著影响。研究发现 0—100 cm 土层土壤有机碳加权平均含量和各土层土壤有机碳储量随恢复年限整体呈现先降低后增加的趋势,表明退耕还林(草)的短期效应不显著,长期固碳效应相当可观。与其他退耕方式相比,沙棘林的表层(0—20 cm)土壤有机碳储量在退耕初期更高。0—20 cm 土层与 0—100 cm 土层土壤有机碳储量呈极显著正相关关系,证明在干旱半干旱地区可以用 0—20 cm 土层土壤有机碳储量来估算 0—100 cm 土层的有机碳储量,本研究有利于对黄土高原地区不同生态恢复模式中土壤固碳效应的评价。

参考文献:

- [1] 王海淇,郭爱雪,邸雪颖.大兴安岭林火点烧对土壤有机碳和微生物量碳的即时影响[J].东北林业大学学报,2011,39(5):72-76.
- [2] William H S. Response of the terrestrial biosphere to global climate change and human perturbation[J]. *Vegetatio*, 1993,104(1):295-305.
- [3] 徐德应.人类经营活动对森林土壤碳的影响[J].世界林业研究,1994,7(5):26-32.
- [4] Niu X, Duiker S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Mid-western U. S. [J]. *Forest Ecology & Management*, 2006,223(1/3):415-427.
- [5] 黄艳章,信忠保.不同生态恢复模式对黄土残塬沟壑区深层土壤有机碳的影响[J].生态学报,2020,40(3):778-788.
- [6] 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.
- [7] 马帅,赵世伟,李婷,等.子午岭林区不同植被恢复阶段土壤有机碳变化研究[J].水土保持通报,2011,31(3):94-98.
- [8] 彭文英,张科利,陈瑶,等.黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J].自然资源学报,2005,20(2):272-278.
- [9] Groenendijk F M, Condron L M, Rijkse W C. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils[J]. *Geoderma*, 2002,108(1/2):91-100.
- [10] Esteban G J, Robert B J. The vertical distribution of soil

organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000,10(2):423-436.

- [11] 王发刚,王启基,王文颖,等.土壤有机碳研究进展[J].草业科学,2008,25(2):48-54.
- [12] 王棣,耿增超,余雕,等.秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J].生态学报,2015,35(16):5421-5429.
- [13] 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.
- [14] 彭文英,张科利,杨勤科.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.
- [15] 王凯博,时伟宇,上官周平.黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):80-86.
- [16] 徐香兰,张科利,徐宪立,等.黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J].水土保持学报,2003,17(3):13-15.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 孙彩丽.陕北退耕还林(草)的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [20] 崔静,陈云明,曹扬,等.黄土丘陵区人工柠条林土壤有机碳组分和碳库管理指数演变[J].水土保持研究,2013,20(1):52-56.
- [21] Rumpel C, Kögel-Knabner I, Bruhn F. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis[J]. *Organic Geochemistry*, 2002,33(10):1131-1142.
- [22] 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.
- [23] 赵萌捷,陈云明,艾泽民,等.黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素[J].水土保持通报,2013,33(2):270-275.
- [24] Chang R, Fu B, Liu G, et al. Soil carbon sequestration potential for "Grain for Green" project in Loess Plateau, China[J]. *Environmental Management*, 2011, 48(6):1158-1172.
- [25] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Review:Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant & Soil*, 2002, 241(2):155-176.
- [26] 王征,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J].生态学报,2010,30(14):3947-3952.
- [27] 党珍珍,王凯博,周正朝,等.黄土丘陵区人工刺槐林恢复对土壤碳库动态的影响[J].干旱区研究,2015,32(6):1082-1087.