

黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素

李如剑¹, 王蕊², 李娜娜¹, 姜继韶³, 张彦军¹, 王志齐¹, 刘庆芳², 吴得峰², 郭胜利^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

摘要: 果园和刺槐是黄土区小流域综合治理中两种典型土地利用方式,对比分析二者土壤固碳功能变化有助于深入了解小流域综合治理条件下陆地生态系统土壤碳循环过程及其影响因素. 在中国科学院院长武黄土高原农业生态试验站,针对 20 世纪 80 年代以来综合治理的王东沟小流域,选取坡地上不同生长年限苹果园和刺槐林群落,测定表层(0~20 cm)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)以及根系生物量和地表凋落物含量,研究不同治理措施下 SOC 的变化特征及其影响因素. 结果表明:①随生长年限的增加,苹果园中 SOC、TN 含量呈降低趋势,而刺槐林中呈增加趋势. 与农地(对照)相比,3 年、8 年、12 年、18 年苹果园 SOC、TN 含量分别降低了 3.26%、10.54%、18.08%、22.55% 和 -8.08%、-0.48%、4.97%、16.91%,12 年、18 年、25 年刺槐林 SOC、TN 含量分别增加了 5.31%、32.36%、44.13% 和 2.49%、15.75%、24.22%;②3 年、8 年、12 年、18 年苹果园细根生物量,分别为农地(对照)的 25.97%、66.23%、85.71% 和 96.10%,凋落物量均为 0 g·m⁻²,而 12 年、18 年、25 年刺槐林细根生物量相较于农地(对照),分别增加了 23.53%、79.41%、157.35%,凋落物输入量分别为 194、298、433 g·(m²·a)⁻¹;③有机物输入差异是导致果园和刺槐生态系统土壤固碳功能差异化的重要原因.

关键词: 固碳功能; 苹果园; 刺槐林; 土壤有机碳; 全氮

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2662-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.045

Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China

LI Ru-jian¹, WANG Rui², LI Na-na¹, JIANG Ji-shao³, ZHANG Yan-jun¹, WANG Zhi-qi¹, LIU Qing-fang², WU De-feng², GUO Sheng-li^{1,2,3*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: Orchard and black locust are two typical plants for comprehensive control in the small watershed of land uses in Loess area. The analysis of soil carbon sequestration function changes of growing two plants is important to gain a deep understanding of soil carbon cycle process and its influencing factors of terrestrial ecosystems under the condition of small watershed comprehensive control. The experiment was conducted in the Changwu State Key Agro-Ecological Station, Shanxi, China. SOC, TN, fine root biomass and litter amount were determined at different age apple orchards and black locusts on the slope land of Wangdonggou watershed to study the variation characteristics of soil organic carbon and its influencing factors under two measurements. The results showed that: ① SOC and TN contents in apple orchards significantly decreased with the increased age, whereas those in black locust showed an increased tendency with the age increased. Compared with the adjacent cropland, the SOC and TN contents in year 3, year 8, year 12 and year 18 apple orchards were decreased 3.26%, 10.54%, 18.08%, 22.55% and -8.08%, -0.48%, 4.97%, 16.91%, respectively. However, SOC and TN contents increased 5.31%, 32.36%, 44.13% and 2.49%, 15.75%, 24.22% in year 12, year 18 and year 25 black locusts, respectively. ② The fine root biomass in year 3, year 8, year 12, and year 18 apple orchards were about 25.97%, 66.23%, 85.71% and 96.10% of the adjacent cropland, respectively; and the litter amounts were all 0 g·m⁻². However, compared with adjacent cropland, the fine root biomass in year 12, year 18 and year 25 black locusts were increased 23.53%, 79.41%, 157.35%, respectively; and the litter input rates were 194, 298, 433 g·(m²·a)⁻¹, respectively. ③ The difference of organic matter input was the major factor which drove the variability of soil carbon sequestration function of apple orchard and black locust ecosystems.

Key words: carbon sequestration function; apple orchard; black locust; soil organic carbon(SOC); TN

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统的重要组成部分,其变化不仅影响土壤 N、P、S 等元素生物地球化学循环,而且影响大气中温室气体浓度变化、水分循环、土地生产力和生态系统服务^[1-3]. 随着人口激增,陆地生态系统中 SOC

变化对人类活动(化石燃料燃烧、毁林、土地利用方

收稿日期: 2014-11-27; 修订日期: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371279)

作者简介: 李如剑(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀及生态环境, E-mail: lirujian1990@126.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

式变化等) 的响应极其敏感。

大量研究显示, 土地利用方式变化是导致陆地生态系统土壤碳循环变化的重要驱动力^[4~6]。土地利用方式的变化, 通过改变土壤有机物的输入输出数量、质量和转化过程, 强烈影响 SOC 的积累和消耗, 如天然林变成草地^[7]、天然林变成农田^[8]、农田变成人工林^[9]、农田变成草地^[10]等。小流域综合治理是黄土高原地区治理水土流失、提高区域水平的重要措施, 而土地利用方式变化是小流域综合治理的核心^[11~13]。退耕还果和退耕还林是高原沟壑区小流域综合治理中两种主要措施, 各自发挥着不同生态和经济效益, 共同促进了流域综合治理和生态环境建设。坡耕地改为刺槐林后, 水土流失得到遏制, 单位面积土地的固碳释氧功能得到发挥。退耕还果, 则显著提高了当地农民的经济收入, 促进了当地经济结构的发展。基于不同服务功能, 果园和刺槐作为两种生态系统, 其管理方式也存在显著不同: 刺槐林生态系统服务于水土保持, 采用近自然的管理方式, 树叶等凋落物自然积累在地表, 种植后很少进行翻耕、砍伐、放牧等人类活动的干预; 而果园生态系统, 服务于当地群众经济收入, 施肥、土壤翻耕与除草、果树修剪、清地表落叶等人类活动强烈。同一流域内, 两种陆地生态系统的管理方式都强烈地影响着土壤有机物的输入和矿化分解。目前, 单一治理措施对 SOC 含量的影响已有大量的研究^[14~17]。然而针对两种治理措施下小流域陆地生态系统土壤固碳功能变化的对比研究相对较少。

本试验以黄土高原沟壑区的典型治理小流域为对象, 选取流域梁坡地上不同生长年限苹果园和刺槐林生态系统, 分析两种治理措施条件下陆地生态系统土壤固碳功能随时间的变化趋势及其与有机物输入量的关系, 以深入了解水土流失区陆地生态系统中碳循环的地球生物化学循环过程。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于陕西省长武县王东沟小流域(东经 107°40′~107°42′, 北纬 35°12′~35°16′), 为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”所在地, 是我国重点水土流失治理小流域。土地面积 8.3 km², 塬、沟、坡各占土地面积的 1/3, 沟壑密度为 2 178 条·km⁻², 属典型的黄土高原沟壑类型区。海拔 1 220 m, 从塬面到沟底的最大高差 280 m, 属大陆季风气候。1984~2013 年平均降雨量为 560 mm, 但季

节性分布不均, 7~9 月降水占年降水总量的 57%, 年平均气温为 9.2℃, 大于等于 10℃ 积温为 3 029℃, 年日照时数为 2 230 h, 年辐射总量 484 kJ·cm⁻², 无霜期 171 d。

1.2 试验设计

流域内梁坡地土壤(黄绵土, 母质为深厚的中壤质马兰黄土) 侵蚀严重, 为水土流失的主要治理地段。早在 20 世纪五六十年代, 当地居民就开始自发在立地条件较差的农田上栽植刺槐等耐旱、成活率高的树种。80 年代, 造林工程推进的同时, 苹果园也开始发展, 其经济效益逐步显现, 以此为向导, 立地条件较好的农田先后改建为果园。因此, 流域内分布着不同生长年限的刺槐林和果园, 且二者立地条件差异较大。据此, 选取梁坡地不同生长年限的苹果园 [3 年(幼树期)、8 年(盛果前期)、12 年(盛果期)、18 年(盛果后期)] 和刺槐林 [12 年(中龄期)、18 年(近熟期)、25 年(成熟期)] 与苹果园、刺槐林立地条件相近的农地各一组(果园对照农地组: 对照 1、刺槐对照农地组: 对照 2), 采用空间序列代替时间序列的方法, 探讨两种水土流失治理模式下土壤固碳功能随时间的变化特征及影响因素。

农地以玉米为主, 为一年一熟制, 人工表层撒施肥料, 一般与播种前的土壤耕翻(20 cm) 结合进行; 苹果园内设置株行距为 3 m×4 m, 人工挖沟撒施肥料后掩埋, 每年 11 月施用基肥, 次年 7 月追施, 一般春秋两次修剪, 春季实施疏花疏果, 全年深翻(50 cm) 两次; 刺槐林内设置株行距为 1.5 m×1.5 m, 自然生长, 无人为管理措施。

1.3 样品采集

1.3.1 土壤样品采集

样地采用“S”型布点取样, 用直径为 3 cm 的土钻多点采集表层(0~20 cm) 土壤, 混合为一个样品。共采集样品 51 个(图 1), 其中苹果园 21 个样品(3 年 3 个, 8 年 6 个, 12 年 7 个, 18 年 5 个), 刺槐林地 18 个样品(12 年 5 个, 18 年 6 个, 25 年 7 个), 对照农地 2 组, 每组 6 个, 共计 12 个样品。采样时间为 2004 年 5 月。

1.3.2 根系生物量和地表凋落物的采集

在各苹果园和刺槐林样地内, 分别选取 3 棵长势良好无病虫害的样树, 进行根系生物量的调查。利用根钻($d=9$ cm), 以树干为中心, 每 120° 沿半径方向, 距离树干 0.5 m、2 m 处, 钻取 0~20 cm 样品, 混合为一个样品, 共计 39 个样品。在各农地内, 选取 6 块植株生长均匀, 株行距较一致的小样方, 每

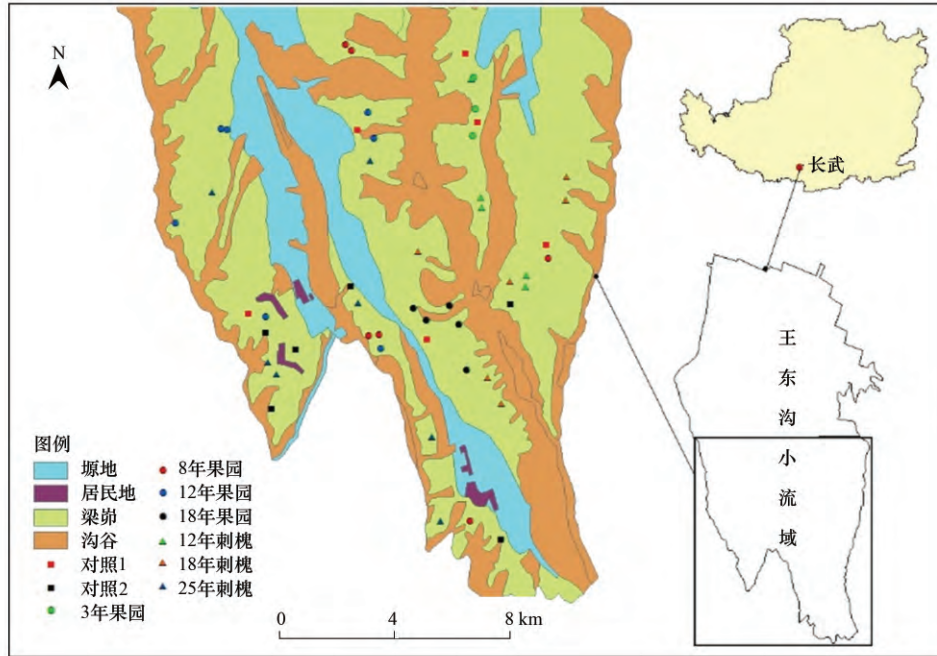


图 1 土壤采样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in Wangdonggou watershed

个小样方钻取 1 个 0 ~ 20 cm 样品,混合为一个样品,共计 12 个样品。采样时间为 2004 年 7 月。

在各刺槐林样地内设 3 个 1 m × 1 m 样方,每个样方上距地表 50 cm 处布设孔径为 0.2 mm × 0.2 mm 的收集器。每两个月收集一次。2004 年 5 月到 2005 年 5 月,共收集子样品 324 个,总样品 54 个。农作物成熟后,被全部收割,作物残茬量较少,而果园生态系统中,为了防止病虫害,地表凋落物全部被移出,故凋落物量均计为零。

1.4 样品测定

将新鲜土样混合均匀,风干,磨细过 0.149 mm 筛,采用 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加加热法测定 SOC、凯氏定氮法测定 TN。利用游标卡尺将根系生物量样品中 $d < 2$ mm 的细根拣出,冲洗,80℃烘干至恒重,计算细根生物量。凋落物样品,在 80℃烘 72 h 称重,估算单位面积上调落物量。

1.5 数据处理

利用 Excel 软件进行数据的预处理,数据方差分析采用 SAS 软件(SAS 6.12)当 F 检验显著时,进行均值间 LSD 显著性检验,所有方差分析的 $\alpha = 0.05$ 。用 SigmaPlot 软件绘制土壤表层 SOC、TN 含量分布图。

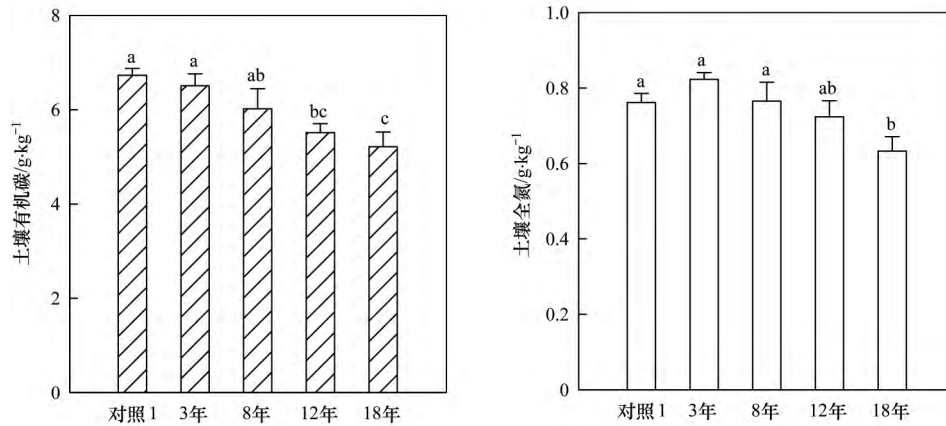
2 结果与分析

2.1 苹果园与刺槐林对表层 SOC、TN 含量的影响

图 2 显示 3 年、8 年、12 年、18 年苹果园 SOC

含量分别为 6.51、6.02、5.51、5.21 $g \cdot kg^{-1}$,TN 含量分别为 0.82、0.77、0.72、0.63 $g \cdot kg^{-1}$,随生长年限的增加,SOC 含量明显下降。与对照 1(6.73 $g \cdot kg^{-1}$)相比,12 年、18 年苹果园 SOC 含量降幅达 18.08% 和 22.55%,差异极显著($\alpha = 0.01$)。相较于 3 年苹果园,12 年苹果园显著下降达 15.36%,18 年苹果园极显著下降,降幅达 19.97%。TN 含量则呈略微上升,而后逐步下降的趋势。改建果园初期,前期肥料的大量投入,导致与对照 1(0.76 $g \cdot kg^{-1}$)相比 3 年苹果园 TN 含量要高出 8.08%,8 年苹果园 TN 含量基本与农地持平。而 18 年 TN 含量下降明显,与 3 年苹果园相比,下降达 23.17%,差异极显著($\alpha = 0.01$),与对照 1、8 年苹果园差异也达到显著水平($\alpha = 0.05$),降幅分别为 16.91%、18.18%。表明农田改建为果园后,人类管理措施及土壤有机质输入输出方面有较大的差异,使得苹果园表层 SOC、TN 含量随退耕年限的增加呈下降趋势。

图 3 显示,12 年、18 年、25 年刺槐林 SOC 含量分别为 5.97、7.50、8.17 $g \cdot kg^{-1}$,TN 含量分别为 0.71、0.80、0.86 $g \cdot kg^{-1}$ 。12 年刺槐林 SOC 和 TN 含量增幅较小,而 18 年、25 年刺槐林则增加显著。与对照 2(5.67 $g \cdot kg^{-1}$)相比,18 年、25 年刺槐林 SOC 含量极显著增加,增幅达 32.36%、44.13%。相较于 12 年刺槐林,18 年、25 年刺槐林 SOC 含量



图中不同字母表示处理间存在显著差异, 否则无显著差异, 下同
图2 坡地不同年限苹果园土壤表层(0~20 cm) SOC、TN 含量

Fig. 2 SOC and TN in topsoil (0-20 cm) in different plantation age apple orchards in slope land

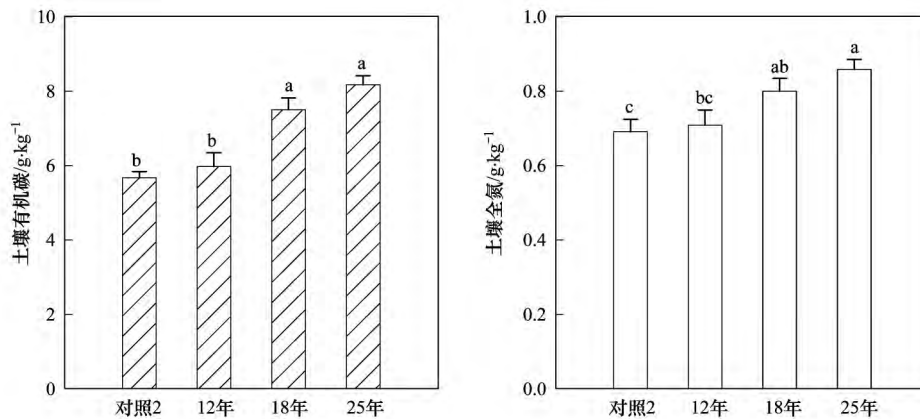


图3 坡地不同年限刺槐林土壤表层(0~20 cm) SOC、TN 含量

Fig. 3 SOC and TN in topsoil (0-20 cm) in different plantation age black locusts in slope land

分别增加了 25.63%、36.85%, 差异均达到极显著水平 ($\alpha = 0.01$)。TN 含量, 相较对照 2 ($0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 18 年刺槐林显著增加达 15.75%; 25 年刺槐林则增加了 24.22%, 差异极显著 ($\alpha = 0.01$)。相较 18 年刺槐林, 25 年刺槐林也极显著增加达 21.13%。表明刺槐林生长前期, 自身同化作用强烈, 消耗 SOC 较多, 随着进一步生长形成稳定的乔-灌-草结构, 加之人类干扰较少, SOC、TN 逐步积累。

2.2 苹果园与刺槐林对细根生物量及地表凋落物的影响

随生长年限的延长, 苹果园和刺槐林细根生物量均显著增加(表 1)。但 3 年苹果园根系量仅为对照 1 ($77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的 25.97%。8 年、12 年、18 年苹果园分别为农地的 66.23%、85.71%、96.10%。可见, 苹果树生长近 20 年后, 细根生物量才能恢复到建立前农地水平。而 12 年、18 年、25 年刺槐林细根生物量分别为 84、122、175 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 较对照 2 (68

$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 极显著增加, 增幅分别达 23.53%、79.41%、157.35%。退耕 12 年后, 刺槐林细根生物量已经恢复到对照农地水平, 退耕 25 年后, 增加到农地的 2.57 倍。

表 1 苹果园和刺槐林细根生物量和地表凋落物含量¹⁾

Table 1 Fine root biomass and above-ground litter amounts in orchards and black locusts

生态系统	年限	细根生物量 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	地表凋落物 / $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
苹果园	对照 1	77A	0
	3 年	20D	0
	8 年	51C	0
	12 年	66B	0
	18 年	74AB	0
刺槐林	对照 2	68 d	0
	12 年	84c	194c
	18 年	122b	298b
	25 年	175a	433a

1) 表中不同大、小写字母分别表示苹果园和刺槐林的不同处理间有显著差异, 否则无显著差异; “—”表示无

农作物成熟后,被全部收割,而苹果园枝条、落叶等也全部被移出,故无凋落物累积情况;而还林后,地表凋落物大幅度增加,12年、18年、25年刺槐林年凋落物积累量分别为194、298、433 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,25年刺槐林相较12年刺槐林也增加了近1.23倍.此结果表明,苹果园和刺槐林生态系统各自对照组农地,在有机物输入方面存在显著差异.

3 讨论

3.1 治理措施对流域生态系统土壤固碳功能的影响

目前,国内针对苹果园SOC随时间的变化趋势出现了增加^[18]、降低^[19]、基本保持不变^[15]这3种观点,而对于刺槐林多数研究^[17,20,21]支持增加的观点.

本研究中,农地转变为果园后,SOC含量呈下降趋势.18年苹果园较对照1极显著下降达19.97% [$-0.07 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$].此结论与杨雨林等^[19]、曹裕等^[22]报道一致,但薛蕙等^[23]发现,30年苹果园SOC含量为对照梯田的1.98倍 [$0.08 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$],陈磊等^[18]指出,与1年果园相比,17年苹果园SOC含量提高了24.39% [$0.09 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$].上述不同结果产生的原因可能为:王东沟坡地苹果园由修筑的梯田改建而来,由于之前遭受水土流失,无地表覆盖,加之受地形和地理位置的限制有机、无机肥料投入相对较少,有机碳积累困难.而刺槐林SOC含量随种植年限的增加,上升趋势明显.相较对照2,25年刺槐林SOC含量极显著增加达44.13% [$0.10 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$].此结论与多数前人研究结果一致,如薛蕙等^[20]发现,50年刺槐林SOC含量增加到10.18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为对照农田的3.72倍 [$0.15 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$],Li等^[24]研究也指出,20年刺槐林相较对照农地增加近4.95倍 [$0.44 \text{ g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$].随林龄的增长,刺槐林逐渐形成稳定的乔-灌-草结构,且其林下凋落物大量积累,根系生物量逐年增加,加之根瘤固氮,都促进了SOC的积累.

3.2 土壤固碳功能差异化的影响因素

流域内农作物收获后根系以及少量作物残茬直接进入土壤,成为有机质的来源.但农地改建为苹果园后,根系生物量、凋落物量输入大幅度降低.尽管苹果园根系生物量逐年增加,18年苹果园较3年苹果园提高了近2.70倍,仅恢复到对照农地的96.10%,并且苹果园根系集中,分布不均匀,根系残体以较难分解的木质素构成为主,不易转化为土壤

腐殖质^[25].加之,果品的大量产出、修剪的枯枝落叶被移出,导致有机物输入量大幅度减少,是造成果园SOC含量降低的主要原因之一.再者,改建为果园后,土壤耕作次数增加,耕作深度也由表层20 cm增加到50 cm,对土壤扰动更强烈,尽管改善了土壤通气性,但使得土体破碎,有机质暴露充分,微生物活动加强,促进了SOC的矿化分解^[26,27].此外,除草、清园等活动导致果园地表裸露,深翻又使得土壤结构疏松,雨滴打击及雨水的直接冲刷更强烈,土壤流失量增加,加剧了SOC的流失^[28,29].

林地SOC的补充和累积主要来自凋落物、根系残体及其分泌物等^[5,30].周国模等^[31]认为植物凋落物和根系分泌物等作用使17年杉木林较9年杉木林表层SOC增加了2.19倍,这与本研究结果一致.退耕10年后,刺槐林形成较稳定的乔-灌-草结构,每年向林下提供大量的凋落物.赵勇等^[32]运用Olson分解模式,得到刺槐林年内凋落物完全分解需要29个月,凋落物存在明显的积累现象.本研究中,25年刺槐林较12年刺槐林凋落物量增加了近1.23倍.通过分析发现,刺槐林SOC含量与凋落物量呈线性正相关关系($y_{\text{soc}} = 0.009x + 4.4385$, $R^2 = 0.9137$).刺槐林根系生物量也逐年增加,25年刺槐林已经增加到对照农地的2.57倍,其根系量与SOC含量也存在线性正相关关系($y_{\text{soc}} = 0.0235x + 4.2358$, $R^2 = 0.9021$).凋落物及细根生物量的大量投入,较少的人类干扰,是刺槐林SOC逐渐积累的主要原因.已有研究表明土壤呼吸与温度呈幂函数^[33]、指数^[34]等正相关关系.而刺槐林郁闭度、地表覆盖度高,无砍伐、放牧等干扰,土体扰动少,不仅使得土壤温度降低^[35],而且水土流失也得到遏制,这都在一定程度上促进了SOC的积累.此外,刺槐根瘤固氮,不仅使土壤TN含量升高,而且减弱了新老有机碳的分解,使得有机碳固存量增加^[36].

SOC固存,在调节和维持正常的生态系统服务中有着重要的作用^[37].刺槐林随林龄的增加,SOC固存量显著增加,这对减缓大气CO₂浓度升高,缓解温室效应具有重要意义.但是,对经济利益的追求,导致人们对生态系统过分的干预,使得生态系统服务的持续供给能力受到损害^[38].苹果园较高的经济效益促使人们的管理方式只注重提高土壤生产力,却造成苹果园土壤固碳能力逐年下降.已有研究表明,SOC低于某一临界值就难以保持土壤团聚体的稳定性,进而影响土壤生产力^[39].今后的管理中,可以通过适当的粮果间作、生草栽培、麦秆覆

盖等措施^[40,41] ,来提高苹果园有机物的输入量和地表覆盖度,以此来逐步增加果园 SOC 含量. 刺槐林生长迅速,萌蘖力强,可以通过合理的间伐,逐步提高其经济效益^[42]. 在黄土区,流域综合治理条件下,寻找到退耕还果和退耕还林土地利用比例平衡点,在维持流域综合效益的同时,实现生态经济的可持续发展是未来需要关注的课题.

4 结论

随生长年限的增加,苹果园和刺槐林生态系统,土壤固碳功能变化趋势出现显著差异,苹果园显著下降,刺槐林则显著上升. 相较农地(对照),耕作、施肥等人类管理方式的不同,是导致苹果园和刺槐林生态系统生物量碳投入量和土壤 SOC 积累、消耗速率变化的主要因素,最终造成了二者固碳功能随时间的不同变化.

参考文献:

- [1] Carter M R. Characterization of soil physical properties and organic matter under long-term primary tillage in a humid climate [J]. *Soil & Tillage Research*, 1996, **38**(3-4): 251-263.
- [2] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**(1): 4-10.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [4] Degryze S, Six J, Paustian K, et al. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(7): 1120-1132.
- [5] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(4): 345-360.
- [6] Fang X M, Wang Q L, Zhou W M, et al. Land use effects on soil organic carbon, microbial biomass and microbial activity in Changbai Mountains of Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**(3): 297-306.
- [7] Kocyyigit R, Demirci S. Long-term changes of aggregate-associated and labile soil organic carbon and nitrogen after conversion from forest to grassland and cropland in northern Turkey [J]. *Land Degradation & Development*, 2012, **23**(5): 475-482.
- [8] Murty D, Kirschbaum M U, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(2): 105-123.
- [9] Wang C M, Hua O Y, Shao B, et al. Soil carbon changes following afforestation with Olga Bay larch (*Larix olgensis* Henry) in northeastern China [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, **48**(5): 503-512.
- [10] Shang Z H, Cao J J, Guo R Y, et al. The response of soil organic carbon and nitrogen 10 years after returning cultivated alpine steppe to grassland by abandonment or reseeded [J]. *Catena*, 2014, **119**: 28-35.
- [11] 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.
- [12] 董云中,王永亮,张建杰,等. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(4): 955-960.
- [13] 孙文义,郭胜利,周小刚. 黄土丘陵区沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2740-2747.
- [14] 李泽,郭胜利,张芳,等. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, **17**(4): 919-924.
- [15] 甘卓亭,张掌权,陈静,等. 黄土塬区苹果园土壤有机碳分布特征 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(8): 2135-2140.
- [16] Li T J, Liu G B. Age-related changes of carbon accumulation and allocation in plants and soil of black locust forest on Loess Plateau in Ansai County, Shaanxi Province of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**(4): 414-422.
- [17] 艾泽民,陈云明,曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 333-341.
- [18] 陈磊,李占斌,李鹏,等. 黄土高原坡地苹果园土壤质量演变研究——以陕西省富县为例 [J]. *水土保持通报*, 2010, **30**(6): 86-90.
- [19] 杨雨林,郭胜利,马玉红,等. 黄土高原沟壑区不同年限苹果园土壤碳、氮、磷变化特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(4): 685-691.
- [20] 薛蕙,刘国彬,戴全厚,等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)土壤微生物量演变特征 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(3): 909-917.
- [21] 赵娜,孟平,张劲松,等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 351-358.
- [22] 曹裕,居玛汗·卡斯木,范鹏,等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(2): 388-396.
- [23] 薛蕙,刘国彬,张超,等. 黄土丘陵区营造果园后土壤质量效应分析 [J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(15): 3154-3161.
- [24] Li H, Li J, He Y L, et al. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(10): 2951-2964.
- [25] 葛玺祖,岳西杰,孙汉印,等. 农田和果园土壤有机碳氧化稳定性和储量差异 [J]. *土壤通报*, 2012, **43**(1): 81-86.
- [26] Paustian K, Six J, Elliott E T, et al. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 147-163.
- [27] 车升国,郭胜利. 黄土塬区小流域深层土壤有机碳变化的影响因素 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1372-1378.

- [28] Pennock D, Anderson D, DeJong E. Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada [J]. *Geoderma*, 1994, **64**(1-2): 1-19.
- [29] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土有机碳和全氮的迁移与累积平衡 [J]. *核农学报*, 2006, **20**(1): 68-73.
- [30] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **169**(1-2): 137-147.
- [31] 周国模, 姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响 [J]. *水土保持学报*, 2005, **18**(6): 68-70, 83.
- [32] 赵勇, 樊巍, 吴明作, 等. 太行山丘陵区刺槐人工林主要养分元素分配及循环特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(5): 111-116.
- [33] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modelling*, 2002, **153**(1-2): 131-142.
- [34] 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 等. 苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1915-1921.
- [35] Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, *et al.* Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **74**: 196-205.
- [36] Resh S C, Binkley D, Parrotta J A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species [J]. *Ecosystems*, 2002, **5**(3): 217-231.
- [37] Freedman B. Maintaining and enhancing ecological carbon sequestration [J]. *Global Environmental Change*, 2014, **1**: 783-801.
- [38] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展 [J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(4): 441-446.
- [39] Greenland D, Rimmer D, Payne D. Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test [J]. *Journal of Soil Science*, 1975, **26**(3): 294-303.
- [40] 张林森, 刘富庭, 张永旺, 等. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(15): 3180-3190.
- [41] 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 等. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 355-363.
- [42] 彭鸿, 陈晓荣, 余仲东. 刺槐人工林培育实践的认知 [J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(5): 11-15.