

DOI: 10.5846/stxb201811192510

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. 生态学报, 2020, 40(3): 778-788.

Huang Y Z, Xin Z B. Effects of different ecological restoration patterns on soil organic carbon in gullies of Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 778-788.

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

黄艳章^{1, 2, 3}, 信忠保^{1, 2, 3, *}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

3 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要:黄土高原退耕还林近 20 年来, 大量生态恢复工程的实施, 势必对土壤碳库产生影响。为评估生态恢复的土壤碳汇效益, 本研究以黄土残塬沟壑区天然次生林、人工生态林和人工经济林等 3 种生态恢复模式为对象, 研究其 4 m 土壤有机碳 (SOC) 储量。结果表明: (1) 三种生态恢复模式具有明显的碳汇效益。天然次生林 4 m SOC 储量为 $(166.40 \pm 42.90) \text{ t/hm}^2$ 比坡中农地 $((58.73 \pm 4.73) \text{ t/hm}^2)$ 显著增加了 183.33%; 人工生态林和人工经济林分别为 $(111.32 \pm 13.30) \text{ t/hm}^2$ 、 $(104.60 \pm 7.10) \text{ t/hm}^2$ 比坡中农地高 89.54%、78.11%; (2) 0—60 cm SOC 含量随深度的增加显著降低 ($P < 0.05$), 由表层的 $(11.03 \pm 7.51) \text{ g/kg}$ 减少到 $(2.40 \pm 0.93) \text{ g/kg}$, 降幅达 78.22%, 表现出明显的表聚性; 60—400 cm SOC 含量变化较为稳定, 含量较低为 $(1.81 \pm 0.88) \text{ g/kg}$; (3) 三种恢复模式深层 (1—4 m) SOC 储量与坡中农地相比分别提高 109.43%、76.43%、65.06%; 深层 SOC 储量天然次生林 $((77.81 \pm 8.40) \text{ t/hm}^2)$ 、人工生态林 $((65.55 \pm 7.71) \text{ t/hm}^2)$ 、人工经济林 $((61.32 \pm 3.16) \text{ t/hm}^2)$ 分别占 4 m 剖面有机碳储量的 46.76%、58.89%、58.62%。结果表明天然次生林和人工混交林是黄土高原残塬沟壑区良好的生态恢复模式, 且深层 SOC 在土壤碳库中不可忽视。

关键词:黄土高原; 深层土壤; 有机碳; 生态恢复; 植被类型

Effects of different ecological restoration patterns on soil organic carbon in gullies of Loess Plateau

HUANG Yanzhang^{1, 2, 3}, XIN Zhongbao^{1, 2, 3, *}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The Grain for Green Programme (GGP) was launched in Loess Plateau, China in 1999. The implementation of a large number of ecological restoration projects may inevitably affect the soil carbon pool, creating a need to evaluate the soil carbon sink benefits of ecological restoration. This study determined the effects of three ecological restoration patterns (natural secondary forest, artificial ecological forest, and artificial economic forest) on the soil organic carbon (SOC) content of a cropland site in the gullies of Loess Plateau. The SOC and particle size were measured across 12 types of land use/cover at 20 depths representing 0—400 cm. The results revealed that (a) the SOC storage of natural secondary forests was $(166.40 \pm 42.90) \text{ t/hm}^2$, which was significantly higher in the natural secondary forest than that in cropland in the slope $((58.73 \pm 4.73) \text{ t/hm}^2)$ by 107.67 t/hm^2 . An increase in SOC storage of 89.54% and 78.11% in the artificial ecological forest $((111.32 \pm 13.30) \text{ t/hm}^2)$ and the artificial economic forest $((104.60 \pm 7.10) \text{ t/hm}^2)$, respectively. (b) We found increases in the 0—60 cm SOC content from (11.03 ± 7.51) to $(2.40 \pm 0.93) \text{ g/kg}$ ($P < 0.05$), which showed a

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501704);中国科学院科技网络服务计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-036);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017ZY02)

收稿日期:2018-11-19; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinzhongbao@126.com

certain degree of surface aggregation. There were small vertical changes in mean SOC content of (1.81 ± 0.88) g/kg below 60 cm. (c) The higher SOC storages in the three restoration patterns than that in cropland by 109.43%, 76.43%, and 65.06% in 1—4 m layers, respectively. Additionally, the deep SOC storage of natural secondary forest ((77.81 ± 8.40) t/hm²), artificial ecology forest ((65.55 ± 7.71) t/hm²), and artificial economic forest ((61.32 ± 3.16) t/hm²) accounted for 46.76%, 58.89%, and 58.62% of the 4 m organic carbon storage, respectively. These results suggest the importance of deep SOC content in the soil carbon pool, and highlight that ecological restoration affect the carbon sink capacity. The natural secondary forest and artificial mixed forest may help to mitigate C emissions in the gullies of the Loess Plateau.

Key Words: Loess Plateau; deep soil; organic carbon; ecological restoration; vegetation type

陆地生态系统土壤碳库储量是植被碳库或全球大气碳库的 2—3 倍^[1-3],其微小变化就可能严重影响全球碳循环的平衡;土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)又是土壤养分循环转化的核心,是评价土壤质量的重要指标^[4]。因此,在当前全球碳循环失衡、植被类型变化活跃的情况下,土壤碳库储量的变化受到了越来越多的关注。

深层土壤有机碳(1 m 以下)是土壤碳库的重要组成部分。全球深层 SOC(不包括农田)的平均储量超过 1 m 剖面的 50%,在土壤碳库中的比重不容忽视^[2,5]。在黄土高原沟壑区,1—2 m 土层的 SOC 储量占 2 m 土层储量的 37.2%^[6];黄土丘陵区,人工刺槐林、柠条林以及撂荒地深层土壤(1—2 m)的有机碳密度占 2 m 土层 SOC 密度的比例可达 35%—40%^[7];内蒙古地区,乔木林和灌木林地 3 m SOC 储量的 50%储存在 1 m 以下土层^[8]。近年来,深层 SOC 由于自身稳定的性质^[9-10]以及所占的比例之大引起了众多学者的关注。

土壤有机碳含量是植被^[11-12]、土壤^[13-14]和人为等因素综合作用的结果。在历史上因植被类型改变和土壤开垦导致的土壤碳库的流失量累计为 55—78 Gt^[15],但植被恢复可以增加 SOC 含量^[4,16-17]。Jackson 等^[18]指出土地利用变化影响 SOC 的输入和周转,是 SOC 变化的重要驱动力。郭月峰等^[19]研究表明,农地 SOC 含量比山杏林地、小叶杨林地、油松山杏混交林、天然次生灌木林分别低 30.96%, 27.97%, 48.05%, 69.56%;在 0—20 cm 土层,Gao 等^[20]发现退耕 30 年的草地和枣园有机碳含量显著高于农地($P < 0.05$);孙文义等^[21]在研究黄土高原 0—100 cm 土层时发现天然次生林的 SOC 比人工林高 42%—82%。表明不同的植被类型会影响 SOC 的输入和周转,从而影响土壤的碳汇效益。

目前研究大多集中于 2 m 以内的土壤^[6,22-24],由于黄土高原土层深厚,须加强深层 SOC 的研究,尤其对恢复模式的研究较少,还不够系统全面^[12,25]。黄土高原退耕还林还草工程实施近 20 年来,大规模的生态恢复工程增加了区域植被盖度^[26],势必会对土壤的碳汇产生影响,甚至影响到较深土层。所以在估算退耕还林土壤碳汇量时,应该考虑深层 SOC,只按 1 m 土层计算 SOC 储量,会低估退耕还林还草工程的碳汇效益。

本研究调查了天然次生林、人工生态林、人工经济林等 3 种生态恢复模式 4 m 深土壤剖面的 SOC 储量及垂直分布特征,评估了 3 种生态恢复模式的碳汇效益,并分析了不同树种间土壤碳汇效益的差异。研究结果为黄土高原地区的土壤碳汇效益的合理评估以及生态恢复模式和树种的选择及配置提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

蔡家川流域($36^{\circ}14'—36^{\circ}18'N$, $110^{\circ}40'—110^{\circ}48'E$)位于山西省黄土高原西南部吉县境内,流域面积 39.33 km²,主沟道长度 12.15 km,为昕水河一级支流,流域大体呈西东走向,流域主沟道及部分支沟常年有水。蔡家川流域为典型的黄土残塬、梁峁侵蚀地貌,流域冲沟发育,沟壑纵横,沟壑密度 0.8 km/km²。流域海拔在 900—1586 m 之间,相对高差 700 m 左右,平均海拔 1172 m。流域属暖温带大陆性季风气候,年均气温 10.2 °C,光照时数平均 2563.8 h,无霜期 172 天,多年平均蒸发量为 1650.8 mm,风向冬季多西北风,其余三季多偏南风,年均风速为 2.0 m/s,年平均降水量为 575.9 mm,降雨年际变化大,主要集中在 6—9 月份,约占全年降水量的 80.6%。

蔡家川流域植被种类多,生长较好,森林覆盖率在 79%左右。作为国家级野外科学观测研究站,拥有实

验林场 1.6 万亩,对全流域水土保持长期定位监测。流域内森林生态系统包括天然次生林、人工促进自然植被恢复封禁 35 年以上的植被和不同时期的人工林。天然次生林分布在沟域上游,主要包括荆条 (*Vitex negundo*)、辽东栎 (*Quercus wutaishanica*)、山杨 (*Populus davidiana*)、暴马丁香 (*Syringa reticulata*);人工生态林主要是上世纪末的退耕还林工程和 1990 年以来的中日政府间技术合作项目所栽植的刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油松 (*Pinus tabuliformis*) 等。流域内现有经济林地 49 hm²、占流域面积的 1.25%,是当地主要经济来源,有苹果 (*Malus pumila*)、梨 (*Pyrus spp*) 等。农地主要是玉米 (*Zea mays*) 和小麦 (*Triticum aestivum*)。灌木主要有虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、杠柳 (*Periploca sepium*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、连翘 (*Forsythia suspensa*)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 等。蔡家川流域作为山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站主要观测流域,残塬沟壑地貌类型典型,生态恢复模式和植被类型多样,并且具有长期定位观测基础。因此,蔡家川流域是研究黄土高原残塬沟壑区不同生态恢复模式对土壤深层有机碳影响的绝佳沟域。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

蔡家川流域生态恢复模式包括天然次生林、人工生态林、人工经济林等 3 种。流域上游阴坡多为天然次生林,研究调查了荆条林、山杨林和辽东栎林 3 个样地;中游峁顶是人工生态林主要分布区,研究调查了油松刺槐混交林、刺槐林、油松林、侧柏林等 4 个样地以及苹果和梨 2 种人工经济林样地;在沟域中游坡中布设了农地作为对照样地,并对河谷农地和坡中撂荒草地进行了调查(表 1)。研究共包括 12 种植被类型或土地利用方式,每样地布设 10 m×10 m 样方,除苹果经济林采样点为 3 个,其他每样方各布设 2 个 4 m 土壤剖面采样点。使用内径为 5 cm 的土钻,按 20 cm 间隔采集 0—400 cm 土壤样品,25 个 4 m 取样点共取得土样 500 个。调查样地 1 m 深的土壤剖面,用 100 cm³ 环刀在每层采集原状土壤,取得 6 个重复,测定土壤容重。

表 1 样地概况

Table 1 Information of the investigated plots

植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	生长年限 Age/a	密度 Density/ (株/hm ²)	胸径 Diameter at breast height/cm	郁闭度 Canopy density	枯落物厚度 Litter depth/cm
荆条次生林 <i>Vitex negundo</i>	1020	259°W	30	20	—	—	0.89	—
山杨次生林 <i>Populus davidiana</i>	1100	313°NW	24	30	2900	9.4±1.6, 7.7±3.3	0.85	2.1±1.5
辽东栎次生林 <i>Quercus wutaishanica</i>	1150	280°W	35	21	1000	10.5±5.6	0.73	5.8±2.1
人工油松×刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> & <i>Pinus tabuliformis</i>	1110	121°SE	26	25	1000	10.4±4.6, 10.0±2.3	0.88	4.8±2.1
人工刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1140	134°SE	25	25	550	11.1±4.0	0.95	2.3±1.4
人工油松林 <i>Pinus tabuliformis</i>	1180	123°SE	21	25	1400	11.5±1.9	0.98	5.5±1.3
人工侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i>	1130	119°SE	28	22	1250	4.5±1.8	0.53	1.4±1.4
梨经济林 <i>Pyrus spp</i>	1190	72°W	28	20	500	10.5±2.1	0.60	0.7±0.9
苹果经济林 <i>Malus pumila</i>	1150	123°SE	26	20	833	—	0.67	—
坡中农地 Cropland	950	121°SE	5	10	—	—	0.84	—
撂荒草地 Abandoned the grass	890	41°NE	24	6	—	—	0.78	—
河谷农地 Valley of farmland	940	130°SE	0	5	—	—	0.98	—

1.2.2 土壤理化性质分析

采样当天测量土壤容重和含水量,采用直接烘干法测量土壤含水量,环刀法测量土壤容重。剩余样品阴凉处自然风干,仔细挑出枝叶、根系、蜗牛壳及钙结核等,用四分法取适量土样磨碎并分别通过直径为 2 mm 和 0.25 mm 的土壤筛,用来测试 SOC 含量和土壤粒径。采用重铬酸钾外加热法测定 SOC 含量。土壤粒径采用激光衍射法(马尔文激光颗粒分析仪 MS-2000)测定。土壤粒径分级根据美国制土壤质地分级标准,即黏粒($d < 0.002$ mm)、粉粒(0.002 mm $< d < 0.05$ mm)和砂粒(0.05 mm $< d < 2$ mm),用于确定土壤质地。

1.2.3 数据处理

数据处理及作图使用 Microsoft Excel 2016 软件;用 SPSS 20.0 进行 ANOVA 分析,LSD 法进行差异显著性检验;采用逐步线性回归分析得到土壤容重的传递函数。土壤有机碳密度(SOCD)的计算:

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \rho \times H \times (1 - \delta_{2\text{mm}}/100) \times 10^{-1}$$

式中,SOCD 为土壤有机碳密度(t/hm^2);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg); ρ 为土壤容重(g/cm^3), H 为土层厚度(cm); $\delta_{2\text{mm}}$ 为粒径大于等于 2 mm 的砾石体积含量,由于黄土区砾石含量极低,该值忽略不计。

由于 1 m 以下土壤容重实测难度较大,因此采用土壤容重传递函数估算深层土壤容重。大量研究表明土壤容重主要取决于 SOC 含量和质地^[27-28],门明新等^[29] 比较的 14 种已有土壤容重传递函数都与 SOC 含量或土壤质地密切相关。本研究以 60 个 1 m 剖面的土壤容重实测值为因变量,深度、土壤质地和 SOC 含量为自变量,通过逐步线性回归分析,得到土壤容重传递函数($r^2 = 0.609$, $P < 0.01$):

$$BD = 0.453 + 0.146/\text{SOC} + 0.074(\% \text{Silt}) + 0.063 \ln(\text{depth}) + 0.008(\% \text{Sand})$$

式中, BD 为土壤容重(g/cm^3);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);depth 为土层深度(cm);Silt 为黏粒含量(%);Sand 为砂粒含量(%)。利用土壤容重传递函数所得土壤容重估计值与实测值吻合度较好,均方根误差为 6.7%,可用于估算深层土壤容重。

2 结果

2.1 土壤有机碳的变化特征

流域内 SOC 含量在 0—60 cm 显著降低,60—400 cm SOC 相对稳定(图 1)。有机碳含量在 0—60 cm 内随深度快速下降($P < 0.05$),由表层的(11.03 ± 7.51) g/kg 减少到(2.40 ± 0.93) g/kg ,降幅达到 78.22%。60 cm 以下各土层 SOC 差异不显著且含量较低,仅(1.81 ± 0.88) g/kg 。流域内 4 m SOC 储量为(129.21 ± 47.59) t/hm^2 ,垂直变化规律与 SOC 含量基本一致。同土层有机碳含量变异系数在 38%—68%之间,属于中等变异。

2.2 生态恢复模式对土壤有机碳含量的影响

蔡家川流域 3 种生态恢复模式可以显著提高土壤有机碳,各恢复模式 SOC 含量与坡中农地相比都有所增加(图 2)。3 种生态恢复模式中,天然次生林 0—400 cm 土壤碳汇效益最显著($P < 0.05$),比坡中农地增加了 196.23%。天然次生林、人工生态林、人工经济林 0—20 cm 表层 SOC 含量较农田表层土壤(4.60 ± 0.32) g/kg 分别提高了 400.88%、112.13%、62.77%;100—300 cm 土层内,3 种恢复模式的 SOC 含量显著增加($P < 0.05$);100—200 cm 土层人工经济林有 SOC 含量高于人工生态林,但不显著;在 300—400 cm 土层,人工经济林的碳汇效益不再明显($P < 0.05$)。

2.3 植被类型对土壤有机碳含量的影响

在 0—400 cm 各土层内,植被类型间的 SOC 含量存在显著差异(表 3)。表层 20 cm SOC 含量山杨林最高为(29.93 ± 6.58) g/kg ($P < 0.05$),坡中农地最低(4.28 ± 0.45) g/kg ,两者相差 5.99 倍;在 20—40 cm 及 40—100 cm 土层,荆条灌木林 SOC 含量(8.36 ± 0.38) g/kg , (3.79 ± 0.48) g/kg) 显著高于其他 11 种植被类型($P < 0.05$)。

河谷地带水沙汇集,土壤较肥沃,历史上多次接受洪水泥沙沉积,SOC 含量较高并在垂直方向存在波动。

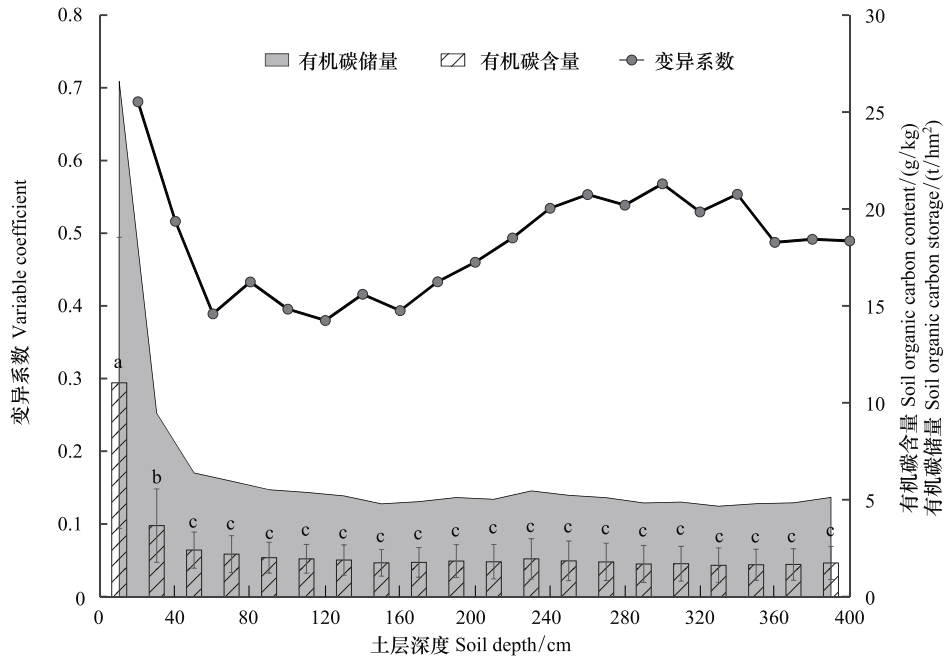


图 1 土壤有机碳垂直分布及变异系数

Fig.1 Vertical distribution and coefficient of variation of soil organic carbon

不同小写字母表示不同土层之间土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$)

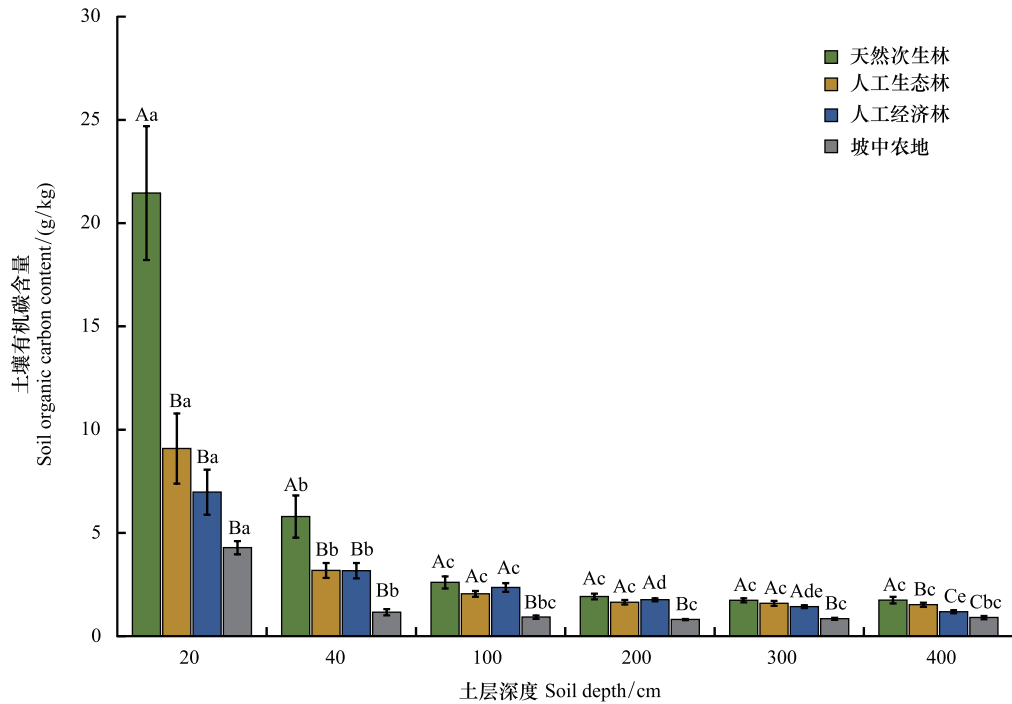


图 2 三种生态恢复模式的有机碳含量比较

Fig.2 Comparison of organic carbon content of three ecological restoration patterns

表中不同大写字母表示不同生态恢复模式在同一土层土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一生态恢复模式在不同土层土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$)

河谷农地 SOC 在 0—80 cm 与其他植被类型同样呈降低趋势,在 100 cm 以下 SOC 含量渐渐增加,并高于其他植被类型 ($P<0.05$);在 200—300 cm 显著高于其他 11 种植被类型的有机碳含量 ($P<0.05$),在 300—400 cm SOC 含量显著下降 ($P<0.05$),但仍显著高于其他植被类型 ($P<0.05$)。

同一生态恢复模式不同植被类型土壤碳汇效益存在差异(表 2)。天然次生林各植被类型有机碳含量较高,辽东栎林为(2.36 ± 0.58) g/kg,荆条林为(3.42 ± 0.55) g/kg,山杨林为(3.53 ± 1.01) g/kg,且含量差异不显著;人工生态林各植被间的有机碳含量差异较大,油松刺槐混交林有机碳含量最高,为(3.08 ± 0.39) g/kg ($P<0.05$),显著高于油松林(1.70 ± 0.17) g/kg)和侧柏林(1.30 ± 0.19) g/kg)。油松刺槐混交林的有机碳含量与天然次生林中的山杨林和荆条林碳汇效益明显,三者之间没有显著差异。

表 2 不同植被类型有机碳含量统计值

Table 2 Statistical values of organic carbon content in different vegetation types

植被类型 Vegetation type	极小值 Minimum/ (g/kg)	极大值 Maximum/ (g/kg)	均值 Mean/ (g/kg)	标准差 Standard deviation/ (g/kg)	变异系数 Variable coefficient	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
荆条次生林 <i>Vitex negundo</i>	1.45	17.25	3.42±0.55AB	3.45	100.77%	3.13	9.97
山杨次生林 <i>Populus davidiana</i>	1.02	36.51	3.53±1.01AB	6.41	181.27%	4.47	20.52
辽东栎次生林 <i>Quercus wutaishanica</i>	1.11	20.19	2.36±0.58B	3.69	156.40%	4.27	18.00
人工油松×刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia & Pinus tabuliformis</i>	1.45	16.07	3.08±0.39AB	2.46	79.92%	4.33	21.13
人工刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1.00	16.90	2.37±0.41B	2.59	109.43%	4.94	26.80
人工油松林 <i>Pinus tabuliformis</i>	0.82	7.04	1.70±0.17BC	1.06	62.65%	3.72	16.79
人工侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i>	0.66	6.19	1.30±0.19BC	1.18	90.54%	3.59	12.97
梨经济林 <i>Pyrus spp</i>	1.29	8.30	2.24±0.21B	1.32	59.12%	3.00	11.15
苹果经济林 <i>Malus pumila</i>	0.71	10.55	1.77±0.19BC	1.48	83.69%	4.22	21.83
坡中农地 Cropland	0.59	4.60	1.05±0.12C	0.78	74.20%	3.97	15.77
撂荒草地 Abandoned the grass	1.65	9.74	2.68±0.22AB	1.37	51.21%	3.88	18.48
河谷农地 Valley of farmland	1.45	7.85	3.57±0.23A	1.43	40.14%	1.19	2.13

表中不同大写字母表示不同植被类型土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)

2.4 生态恢复对土壤有机碳储量的影响

天然次生林、人工生态林、人工经济林的 SOC 储量较坡中农地都显著提高 ($P<0.05$),生态恢复带来的土壤碳汇效益明显(表 4)。天然次生林 4 m 剖面 SOC 储量为(166.40 ± 42.90) t/hm²,比坡中农地的(58.73 ± 4.73) t/hm²增加了 183.33%;人工生态林和人工经济林 4 m 剖面 SOC 储量分别为(111.32 ± 13.30) t/hm²和(104.60 ± 7.10) t/hm²,分别比坡中农地高 89.54%、78.11%。SOC 储量表现为天然次生林高于人工生态林和人工经济林,坡中农地最低 ($P<0.05$)。

3 种生态恢复模式对土壤深层(1—4 m)SOC 储量皆有明显增加。天然次生林、人工生态林、人工经济林的深层(1—4 m)SOC 储量分别为(77.81 ± 8.40) t/hm²、(65.55 ± 7.71) t/hm²、(61.32 ± 3.16) t/hm²,较坡中农地增加了 109.43%、76.43%、65.06%。

25 个取样点 1—4 m 深层 SOC 储量占整个 4 m SOC 储量的 58.61%±9.15%,其中,2—4 m SOC 储量占深层 SOC 储量的 66.13%±4.60%。天然次生林对表层有机碳储量贡献较大,深层只占到 4 m 剖面的 46.76%,人工生态林和人工经济林的深层土壤有机碳储量都占到了整个土壤剖面的 58%以上(图 3)。天然次生林和人工生态林深层单位深度土壤有机碳储量占比均一,100—200 cm 有机碳储量约是 200—400 cm 的一半;而人工经济林 100—200 cm 有机碳储量占比较高。可能是人工经济林的整地措施对 100—200 cm 有机碳储量产生影响。

表 3 不同植被类型下土壤有机碳平均含量

恢复模式	植被类型	有机碳含量 Soil organic carbon content/(g/kg)						
		0—20 cm	20—40 cm	40—100 cm	100—200 cm	200—300 cm	300—400 cm	
天然次生林	荆条次生林 <i>Vitex negundo</i>	16.59±0.93Ba	8.36±0.54Ab	3.79±1.17Ac	2.60±0.73Bd	2.01±0.41Cde	1.81±0.26BCe	
Natural secondary forest	山杨次生林 <i>Populus davidiana</i>	29.93±9.30Aa	5.58±2.56Bb	2.53±0.82Bc	1.93±0.56Cc	1.68±0.58CDc	1.91±0.55BCc	
人工生态林	辽东栎次生林 <i>Quercus wutaishanica</i>	17.84±3.33Bc	3.45±0.39BCb	1.49±0.22BCc	1.23±0.07Ec	1.52±0.15Dc	1.52±0.74Cc	
Artificial ecological forest	人工油松×刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> & <i>Pinus tabulaeformis</i>	12.60±4.91BCa	4.23±1.50BCb	3.02±0.34Bbc	2.75±0.16Bbc	2.69±0.60Bc	1.70±0.16Cd	
Artificial economic forest	人工刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	12.20±6.64BCa	3.45±0.29BCb	2.05±0.30BCcd	1.48±0.17DEd	1.41±0.22Dd	2.22±0.57BCd	
Artificial economic forest	人工油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	5.48±2.20Ca	2.68±0.97Cb	1.69±0.48BCc	1.46±0.10DEc	1.42±0.29Dc	1.25±0.50CDc	
Artificial economic forest	人工侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i>	6.06±0.19Ca	2.37±0.06Cb	1.44±0.32Cc	0.90±0.11Fd	0.84±0.12Fd	0.91±0.11Dd	
Artificial economic forest	梨园经济林 <i>Pyrus spp</i>	6.84±2.06Ca	3.34±1.09BCb	3.12±0.24Bb	2.01±0.44Cc	1.48±0.10Dd	1.54±0.11Cd	
Artificial economic forest	苹果经济林 <i>Malus pumila</i>	7.06±3.11Ca	3.06±0.85Cb	1.85±0.61BCc	1.60±0.15Dc	1.40±0.43Dcd	0.94±0.24Dd	
农地 Farmland	坡中农地 Cropland	4.28±0.45Ca	1.16±0.21Cb	0.92±0.19Cb	0.81±0.10Fc	0.84±0.16Fc	0.90±0.24Dhc	
	撂荒草地 Abandoned the grass	7.62±3.00Ca	2.43±0.08Cb	2.20±0.37BCb	2.19±0.29Cb	2.45±0.65Bb	2.73±0.80Ab	
	河谷农地 Valley of farmland	7.80±0.07Ca	4.16±1.27BCbc	2.49±0.27Bc	3.20±0.43Ac	4.22±0.86Ab	2.96±1.37Ac	

表中不同大写字母表示不同植被类型在同一土层土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一植被类型在不同土层土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$)

表 4 流域内不同植被类型土壤有机碳储量

恢复模式	植被类型	有机碳储量 Soil organic carbon storage/(t/hm ²)				
		0—20 cm	20—100 cm	100—200 cm	200—400 cm	0—400 cm
天然次生林	荆条次生林 <i>Vitex negundo</i>	40.37±1.61	52.89±6.03	36.89±8.47	55.66±7.82	185.81±23.94
Natural secondary forest	山杨次生林 <i>Populus davidiana</i>	71.05±15.61	35.24±9.92	26.86±6.56	51.13±11.89	184.28±43.98
人工生态林	辽东栎次生林 <i>Quercus wutaishanica</i>	44.09±5.81	22.14±0.45	17.51±0.28	45.37±3.23	129.11±2.75
Artificial ecological forest	平均 Average	51.84±16.74	36.76±14.28	27.09±10.05	50.72±9.42	166.40±39.16
Artificial ecological forest	人工油松×刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> & <i>Pinus tabulaeformis</i>	30.53±8.40	34.35±4.34	35.78±0.62	59.81±4.81	160.47±18.17
Artificial ecological forest	人工刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	26.71±10.28	23.36±0.80	19.14±0.58	47.82±6.13	117.03±17.80
Artificial ecological forest	人工油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	13.36±3.79	20.69±4.48	20.02±0.48	38.68±5.04	92.75±13.79
Artificial ecological forest	人工侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i>	15.13±0.34	18.93±0.27	13.52±0.74	27.43±0.08	75.01±0.74
Artificial economic forest	平均 Average	21.43±10.07	24.33±6.77	22.11±8.30	43.43±12.77	111.32±35.18
Artificial economic forest	梨园经济林 <i>Pyrus spp</i>	16.29±3.46	33.03±1.27	26.85±1.07	42.21±0.93	118.38±4.88
Artificial economic forest	苹果经济林 <i>Malus pumila</i>	16.93±6.09	22.32±4.99	21.83±1.36	34.33±1.43	95.42±10.44
农地 Farmland	平均 Average	16.68±5.21	26.60±6.57	23.84±2.76	37.48±4.06	104.60±14.19
农地 Farmland	坡中农地 Cropland	10.85±0.81	10.73±1.82	11.39±1.15	25.77±0.96	58.73±4.73
农地 Farmland	撂荒草地 Abandoned the grass	19.10±5.30	23.95±1.74	30.03±3.27	73.49±0.51	146.56±7.36
农地 Farmland	河谷农地 Valley of farmland	19.37±0.12	32.60±4.07	46.50±1.41	105.37±22.58	203.83±20.04
农地 Farmland	所有样地平均 Average	26.58±17.81	27.31±11.11	25.38±10.32	49.94±22.35	129.21±47.59

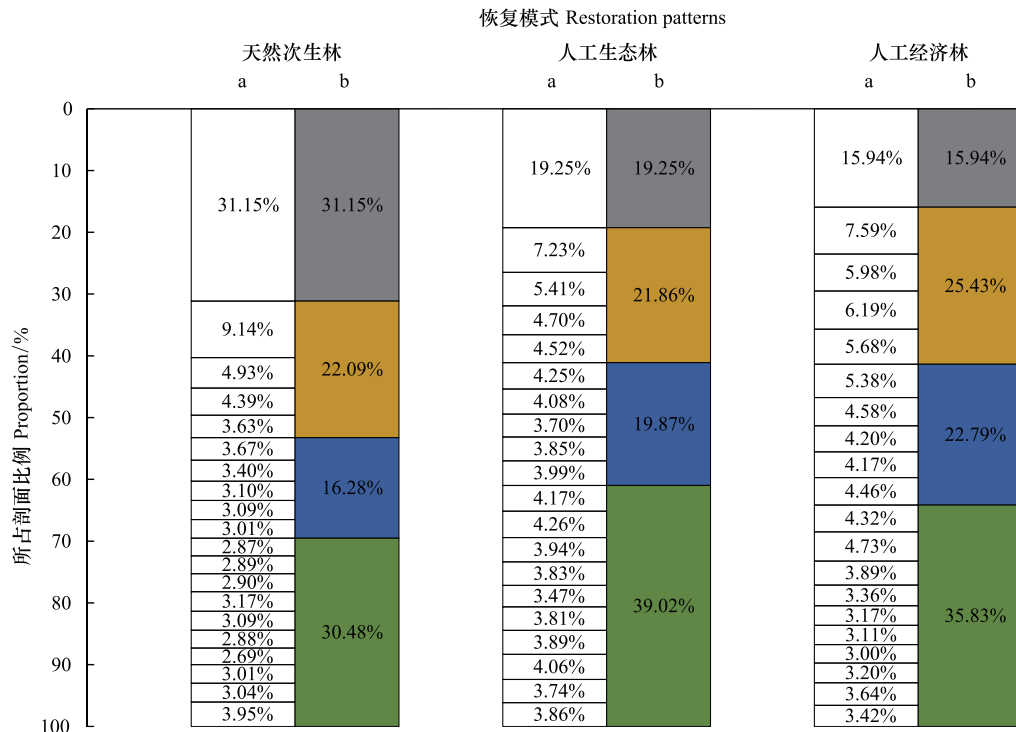


图3 三种生态恢复类型各层有机碳储量所占比例

Fig.3 The proportions of SOC storage in each layer of the three ecological restoration patterns

a 是每 20 cm 土层有机碳储量所占比例;b 是 0—20 cm、20—100 cm、100—200 cm、200—400 cm 土层有机碳储量所占比例

3 讨论

3.1 不同植被类型间有机碳储量的差异性

植被是 SOC 含量垂直分布的重要控制因子^[30]。一方面,碳是构成植被体的骨架元素^[31],植被类型不同,碳骨架也随之不同,进入土壤中的植被残体量以及根系生物量存在较大差异,进而造成土壤中有有机物向下输入的数量和质量^[32]以及土壤有机质的分解速率不同^[33-34];另一方面,不同的植被类型会在其下垫面形成独特的小气候,影响微生物活性,进一步影响凋落物的分解^[35]。

三种恢复模式中天然次生林 SOC 储量最高,是人工生态林、人工经济林、坡中农地的 1.49、1.59、2.83 倍,与孙文义等^[21]对黄土区天然次生林各层 SOC 储量研究结果一致,混交林的土壤碳汇能力与天然次生林相似,40 cm 以下 SOC 含量显著高于 ($P < 0.05$) 刺槐林、油松林、侧柏林,有机碳储量分别是它们的 1.37、1.73、2.14 倍。表明天然次生林的土壤碳汇能力高于其他恢复模式。主要是由于天然次生林具有完整的群落结构,且微生物的多样性指数和丰度均高于人工林^[36],生态系统和碳循环相对良好稳定。而混交林能够通过增加林地的物种多样性,提高林分结构的稳定性,有利于有机碳的积累^[37]和改善生产力^[38],董敏慧等^[39]发现松树樟树混交林的土壤微生物碳氮含量均高于两种纯林,本研究结果与其一致。

人工经济林与人工生态林的碳汇效益没有显著差异,甚至经济林碳储量略高于某些人工生态林树种,且在 100—200 cm 处土壤有机碳储量与其他模式相比仍占比较大。整地如深耕使有机碳快速到达土壤深层,增加了 SOC 的稳定性及深层 SOC 储量^[40]。当前,关于经济林碳汇效益方面存在不同的认识,一些研究指出经济林的建设会造成 SOC 降低^[12],但陈磊等^[41]指出苹果园有利于 SOC 的固存。原因可能与区域自然条件、经济林树种、经营管理方式等因素有关^[42]。

研究发现河谷农地有机碳储量最高,为 $(203.84 \pm 20.04) \text{ t/hm}^2$,显著高于坡中农地,且单位深度的土壤有

机碳储量都处在较高水平。可能是河谷农地地势低洼,地形平坦,卯坡侵蚀土壤和上游泥沙汇集于此,带来大量土壤有机碳就地沉积埋藏;河谷农地利于地下水的汇集,导致表层水溶性碳向深层淋溶更加明显^[43];加之充足的水分^[42]和长期耕作培肥,造成河谷农地有机碳储量较高。

3.2 深层土壤有机碳的重要性及其影响因素

森林生态系统的SOC储量经常会被低估。本研究中表层20 cm的SOC储量占4 m土壤有机碳库的 $20.02\% \pm 8.54\%$,20 cm以下为 $79.98\% \pm 8.54\%$ 。与Lal^[1]指出的0.3—3 m土层占3 m土壤有机碳库的77%一致。虽然研究中60 cm以下SOC含量(1.81 ± 0.88) g/kg显著低于0—20 cm的SOC含量(11.03 ± 7.51) g/kg,但黄土区土层常厚达数十米以上,所以深层(1—4 m)SOC不容忽视。任何增加新鲜有机碳的土地利用和农业措施变化都会刺激古代埋藏层碳的损失^[9],Mu等^[44]发现青藏高原深层冻土层会释放温室气体加剧全球气候变化,深层SOC储量如此之大,会对全球气候变化产生深刻影响。另一方面,在估算该区退耕还林草的土壤碳汇量时,应该考虑深层土壤的有机碳储量,否则会明显低估退耕还林草的土壤碳汇效应^[7]。

SOC含量随土壤深度的增加而降低,且深层SOC含量变化不大,这与多数研究结果一致^[25,45]。在本研究中,深层(1—4 m)SOC含量在1.62—2.01 g/kg之间;在陕西神木,深层SOC含量几乎在1.00 g/kg以下^[2];整个黄土高原横断面上,深层SOC含量在1.49—2.01 g/kg之间^[32],表明深层SOC含量较低。原因可能是凋落物和根系为表层土壤提供了丰富的碳源^[12,21],而碳供应量随土壤深度的增加而迅速减弱,且黄土区深层水分匮乏,细根分布较少,导致植被根系转化为SOC较少^[24];另外,在较深土层中,SOC分解在很大程度上受土壤通气状况影响^[46],深层土壤空隙水分含量较低,通气条件较好,可促进SOC的分解^[47],造成深层SOC含量较低。各植被类型100—400 cm的SOC储量变化不大,变异系数极低为 $1.50\% \pm 0.54\%$,Balesdent等^[48]研究发现1—2 m处土层放射性有机碳表观年龄约有95%为50年以前,说明深层土壤环境随深度变化较小,造成1—4 m间的SOC变化不大。

土壤碳汇能力取决于土层深度、黏粒含量及矿物属性、植物有效持水能力、土地利用动态、有机碳本底值等^[1]。许明祥等^[7]研究发现土地利用动态解释了79.7%的土壤有机碳变异性,而地形影响极小;相反,孟国欣等^[24]指出地形对土壤有机碳影响较大,解释了22.02%的土壤有机碳变异性。可以发现影响土壤有机碳的因素综合复杂。生态恢复对土壤深层有机碳积累的影响过程与机制,是当前生态恢复对土壤碳循环调控领域的重要研究命题。由于大多数研究都采用“空间代替时间”的研究方法,不可避免的对研究结果带来一定的变异性^[47],进而在解释植被对深层有机碳的贡献时会造成一定的影响。今后的研究需要加强在时间尺度和有机碳本底值的研究,避免空间变异的影响,正确评估生态恢复的碳汇速率及碳汇量。

4 结论

(1)生态恢复能够显著增加SOC储量,天然次生林和人工混交林是碳汇效益良好的生态恢复模式。天然次生林有机碳储量(166.40 ± 42.90) t/hm²比坡中农地显著($P < 0.05$)增加183.33%,是人工生态林、人工经济林的1.49、1.59倍;而混交林(160.47 ± 18.17) t/hm²的碳汇效益与天然次生林(166.40 ± 42.90) t/hm²)相近。

(2)在评估生态恢复碳汇效益和估算土壤碳库总量时,深层SOC储量地位显著。深层(1—4 m)SOC储量约占4 m剖面的 $58.61 \pm 9.15\%$,2 m以下土壤有机碳储量(49.94 ± 22.35) t/hm²)占深层土壤有机碳的 $66.13\% \pm 4.60\%$ 。天然次生林、人工生态林和人工经济林1 m以下有机碳储量分别占4 m剖面的46.76%、58.89%、58.62%。

(3)生态恢复碳汇效益表现出显著的表聚性特征,SOC含量在0—60 cm随深度增加迅速降低,从 11.03 ± 7.51 g/kg减少到 2.40 ± 0.93 g/kg,降幅达78.22%;60—400 cm SOC含量变化较为稳定,含量较低为 1.81 ± 0.88 g/kg。

参考文献 (References):

- [1] Lal R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3285-3301.
- [2] Wang Y Q, Han X W, Jin Z, Zhang C C, Fang L C. Soil organic carbon stocks in deep soils at a watershed scale on the Chinese Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(1): 157-167.
- [3] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 2016, 269: 61-68.
- [4] 李玉进, 胡澍, 焦菊英, 吴多洋. 黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应. *生态学报*, 2017, 37(12): 4100-4107.
- [5] Harper R J, Tibbett M. The hidden organic carbon in deep mineral soils. *Plant and Soil*, 2013, 368(1/2): 641-648.
- [6] 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. *环境科学*, 2010, 31(5): 1372-1378.
- [7] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [8] Wang Y G, Li Y, Ye X H, Chu Y, Wang X P. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*, 2010, 408(8): 1925-1931.
- [9] Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280.
- [10] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 35-66.
- [11] 李柏桥, 付玉, 李光录, 张腾, 郑腾辉. 退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 238-244.
- [12] 李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利. 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. *环境科学*, 2015, 36(7): 2662-2668.
- [13] 黎英华, 姚云峰, 秦富仓, 郭洋洋, 罗继尧. 不同类型土壤的有机碳密度特征. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 455-460.
- [14] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 张庆印, 李学章, 贾小旭, 邵明安, 魏孝荣. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [15] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [16] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 龙高飞, 杨丽蓉, 贾永霞, 徐小逊, 李云. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 367-377.
- [17] Poepflau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 2013, 192: 189-201.
- [18] Jackson R B, Schenk H J, Jobbágy E G, Canadell J, Colello G D, Dickinson R E, Field C B, Friedlingstein P, Heimann M, Hibbard K, Kicklighter D W, Kleidon A, Neilson R P. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 470-483.
- [19] 郭月峰, 姚云峰, 秦富仓, 祁伟, 王欣. 不同土地利用方式下土壤有机碳与其他土壤理化指标的关系. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(8): 103-109.
- [20] Gao X D, Meng T T, Zhao X N. Variations of soil organic carbon following land use change on deep-loess hillslopes in China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 1902-1912.
- [21] 孙文义, 郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响. *生态学报*, 2010, 30(10): 2611-2620.
- [22] Zhang F, Wang X J, Gao T W, Zhang P L, Wang J P. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: implications of deep soils. *Catena*, 2015, 126: 68-74.
- [23] Blanco-Canqui H, Francis C A, Galusha T D. Does organic farming accumulate carbon in deeper soil profiles in the long term? *Geoderma*, 2017, 288: 213-221.
- [24] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 张志强, 朱聿申, 周娅, 刘怡雨, 林珠. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2447-2454.
- [25] 涂夏明, 周家茂, 曹军骥, 韩永明, 沈振兴. 黄土高原不同土地利用类型有机碳和黑碳的储量及意义. *地球环境学报*, 2017, 8(1): 65-71.
- [26] Zhao F Z, Kang D, Han X H, Yang G H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, 2015, 74(1): 415-422.

- [27] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C C, Coelho E R, Madari B E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 90-97.
- [28] Kaur R, Kumar S, Gurung H P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(5): 847-858.
- [29] 门明新, 彭正萍, 许焱, 宇振荣. 河北省土壤容重的传递函数研究. *土壤通报*, 2008, 39(1): 33-37.
- [30] Li Z, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant and Soil*, 2001, 231(2): 175-185.
- [31] 任悦, 高广磊, 丁国栋, 张英, 朴起亨, 郭米山, 曹红雨. 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤有机碳含量特征. *北京林业大学学报*, 2018, 40(7): 36-44.
- [32] Han X Y, Gao G Y, Chang R Y, Li Z S, Ma Y, Wang S, Wang C, Lü Y H, Fu B J. Changes in soil organic and inorganic carbon stocks in deep profiles following cropland abandonment along a precipitation gradient across the Loess Plateau of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 258: 1-13.
- [33] Van Leeuwen J P, Djukic I, Bloem J, Lehtinen T, Hemerik L, De Ruiter P C, Lair G J. Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 79: 14-20.
- [34] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, Yano Y, Brant J B, Caldwell B A, Sulzman E W. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10): 2224-2232.
- [35] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, Grand-Clement E, Carter J, Berry S L. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1): GB1007.
- [36] 殷萌清, 冯建祥, 黄小芳, 蔡中华, 林光辉, 周进. 天然及人工红树林土壤微生物群落结构分析. *生态科学*, 2017, 36(5): 1-10.
- [37] 朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 贾龙, 王赫, 黄诗华, 易志强, 张文锋. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 249-257.
- [38] 沈国舫, 翟明普. *森林培育学(第二版)*. 北京: 中国林业出版社, 2011: 73-75.
- [39] 董敏慧, 张良成, 文丽, 吴子剑, 黄忠良, 张轩, 李辉, 覃晓莉. 松树-樟树混交林、纯林土壤微生物量碳、氮及多样性特征研究. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 146-153.
- [40] Alcántara V, Don A, Vesterdal L, Well R, Nieder R. Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils-implications for carbon stocks. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5511.
- [41] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 郝明德. 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. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 86-90.
- [42] 孙文义, 郭胜利, 周小刚. 黄土丘陵沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响. *环境科学*, 2010, 31(11): 2740-2747.
- [43] Marinho-Soriano E, Fonseca P C, Carneiro M A A, Moreira W S C. Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresource Technology*, 2006, 97(18): 2402-2406.
- [44] Mu C C, Li L L, Wu X D, Zhang F, Jia L, Zhao Q, Zhang T J. Greenhouse gas released from the deep permafrost in the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-9.
- [45] 张帅, 许明祥, 张亚峰, 王超华, 陈盖. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3094-3101.
- [46] Li C H, Li Y, Tang L S. Soil organic carbon stock and carbon efflux in deep soils of desert and oasis. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(3): 549-557.
- [47] 张金, 许明祥, 王征, 马昕昕, 邱宇洁. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2721-2727.
- [48] Balesdent J, Basile-Doelsch I, Chadoeuf J, Cornu S, Derrien D, Fekiacova Z, Hatté C. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*, 2018, 559(7715): 599-602.