

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0777

张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 2014. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响[J]. 环境科学学报, 34(12): 3094-3101

Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, et al. 2014. Effects of land use change on storage of soil organic carbon in deep soil layers in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(12): 3094-3101

# 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响

张帅<sup>1</sup>, 许明祥<sup>1,2,\*</sup>, 张亚锋<sup>1</sup>, 王超华<sup>2</sup>, 陈盖<sup>2</sup>

1. 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, 杨凌 712100

2. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

收稿日期: 2014-04-22 修回日期: 2014-06-09 录用日期: 2014-06-09

**摘要:** 通过研究黄土丘陵子午岭林区 5 种典型土地利用类型土壤剖面有机碳分布特征, 分析了天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为农田及撂荒后土壤有机碳变化特征。同时, 以浅层(0~100 cm)土壤为对照, 探讨了土地利用变化对深层(100~200 cm)土壤有机碳储量的影响。结果表明, 在 0~200 cm 剖面上, 天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地、农田土壤有机碳含量分别为 5.85、3.96、4.98、3.09、3.20 g·kg<sup>-1</sup>, 天然乔木林、人工乔木林土壤有机碳含量显著高于天然灌木林、撂荒地和农田( $p < 0.05$ )。各土地利用类型下浅层和深层土壤有机碳含量分别占 0~200 cm 土壤有机碳含量的 58%~73% 和 27%~42%, 不同土地利用类型间浅层土壤有机碳含量差异显著, 但深层土壤有机碳含量差异不大。土地利用变化对土壤有机碳储量影响显著。天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地、天然灌木林转变为农田 4 种土地利用转变方式 0~200 cm 土壤有机碳储量分别减少了 9.68、52.90、20.20、12.49 t·hm<sup>-2</sup>, 减幅为 7%、39%、21%、13%, 其中, 浅层土壤减少了 2%~48%, 深层土壤减少了 12%~22%。相对于林地开垦为农田而言, 农田退耕还林后土壤有机碳的恢复要慢得多。研究结果揭示了浅层和深层土壤有机碳对土地利用变化的敏感性, 反映了深层土壤有机碳具有较大的稳定性。

**关键词:** 土地利用变化; 深层土壤; 有机碳储量; 黄土丘陵区

文章编号: 0253-2468(2014)12-3094-08 中图分类号: X53 文献标识码: A

## Effects of land use change on storage of soil organic carbon in deep soil layers in the hilly Loess Plateau region, China

ZHANG Shuai<sup>1</sup>, XU Mingxiang<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Yafeng<sup>1</sup>, WANG Chaohua<sup>2</sup>, CHEN Gai<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling 712100

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100

Received 22 April 2014; received in revised form 9 June 2014; accepted 9 June 2014

**Abstract:** In order to determine the effects of land use changes on the storage of soil organic carbon (SOC) in deep soil layers (100~200 cm), SOC content and the distribution characteristics of five typical land use types in Ziwuling forest zone on the hilly Loess Plateau were studied in the paper. Response of SOC storage in deep soil to the land use changes was analyzed under four kinds of land use changes, including from natural woodland to artificial woodland, from natural woodland to cropland, from natural shrubland to cropland and from natural shrubland to revegetated grassland. The results showed that SOC content of natural woodland, natural shrubland, artificial woodland, revegetated grassland and cropland was 5.85, 3.96, 4.98, 3.09 and 3.20 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. SOC content of natural woodland and artificial woodland was significantly higher than those of natural shrubland, revegetated grassland and cropland ( $p < 0.05$ ). SOC in upper and deep soil layers contributed 58%~73% and 27%~42% to total SOC in the whole profile (0~200cm) under all investigated land use types. SOC content in upper soil layer varied significantly between different land use types, however no obvious difference in SOC content was observed in all investigated land use types. Land use changes showed significant effect on SOC storages. SOC storages in 0~200cm profile were reduced by 9.68, 52.90, 20.20 and 12.49 t·hm<sup>-2</sup> under the four aforementioned types of land use changes. SOC storages in 0~100cm

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.41171228, 40971174); 中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA05050504)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China(No.41171228, 40971174) and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(No.XDA05050504)

**作者简介:** 张帅(1988—), 男, E-mail: zhouyananzhang@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

**Biography:** ZHANG Shuai(1988—), male, E-mail: zhouyananzhang@163.com; \* **Corresponding author**, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

profile decreased by 2%~48% while the deep layer decreased by 12%~22%. Compared with conversion from woodland to cropland, SOC recovered slowly when land use changed from cropland to woodland. The results suggested different sensitivity of SOC to land use changes in the upper (0~100 cm) and deep (100~200 cm) soil, and SOC in deep soil layers were more stable than that in upper soil layers.

**Keywords:** land use change; deep soil layer; soil organic carbon storage; hilly Loess Plateau

## 1 引言 (Introduction)

土壤是陆地生态系统的重要组成成分,它与大气和陆地生物群落共同组成了系统中碳与植物营养元素的主要贮存库和交换库。据估计 (Post *et al.*, 1982; Schlesinger, 1990; Houghton, 1995), 全球约有 1400~1500 Gt 的碳是以有机质形式储存于土壤中,是陆地植被碳库 (500~600 Gt) 的 2~3 倍,是全球大气碳库 (750 Gt) 的 2 倍多,土壤贡献于大气 CO<sub>2</sub> 的年通量是燃烧化石燃料贡献量的 10 倍。土地利用/覆被变化是造成全球变化和碳循环不平衡的重要原因之一 (Contzen *et al.*, 1994), 是仅次于化石燃料燃烧而使大气 CO<sub>2</sub> 浓度急剧增加的最主要人为活动 (Watson *et al.*, 2000)。土壤碳库在受到土地利用变化的影响后,既可能变成大气中 CO<sub>2</sub> 的“源”,也可能变成“汇” (Kirschbaum, 1995; 吴金水等, 2004), 因此,确定土地利用变化对土壤有机碳的影响尤为关键。

土地利用变化影响土壤有机碳的输入和周转,是土壤有机碳变化的重要驱动力 (Jackson *et al.*, 2000)。国内外有关土地利用变化对土壤有机碳影响的研究已经广泛展开,如天然林变成草地、天然林变成农田、农田变成人工林、农田变成灌木林、农田变成草地等。但多数研究在热带、亚热带、美洲或欧洲的一些地区开展,对包括温带和暖温带区域在内的其它区域研究还较少 (吴建国等, 2004), 且相关的研究集中于 30 cm 以上的表层土壤 (Hughes *et al.*, 2000; Vesterdal *et al.*, 2002; Lorenz *et al.*, 2005; 王小利等, 2006)。目前,越来越多的研究表明,土地利用变化影响深层土壤有机碳 (Osher *et al.*, 2003; 吴建国等, 2004; Wright *et al.*, 2007; Poeplau *et al.*, 2011; Harrison *et al.*, 2011)。有研究表明,亚马逊地区热带雨林退化为草原后土壤深层 SOC 降低约 0.255 t·hm<sup>-2</sup>, 转化为放牧场后 1 m 以下土壤有机碳含量会再次下降 (Contzen *et al.*, 1994); Guo 等 (2002) 对大量数据总结得出农地转变为草地后, 1 m 以下土壤有机碳含量会增加约 10%。所以在研究土壤有机碳时,对 1 m 以下深层土壤有机碳的研究不容忽视。

黄土高原几千年的人类活动已经使土地利用方式发生了很大变化,尤其是清朝末年毁林开荒、20 世纪 70 年代荒地开垦及近十多年来的退耕还林,导致土地利用/覆被发生了几次重大变化 (李裕元等, 2004)。该地区土层深厚,深层土壤有机碳含量所占比例较大,有研究表明,黄土高原沟壑区 1~2 m 土层 SOC 储量占 2 m 土层储量的 37.3% (车升国等, 2010)。有关黄土高原退耕还林后植被恢复过程中土壤有机碳的研究已开展较多并取得了重要进展 (王征等, 2010; 张金等, 2012)。但就该区天然次生林转变为人工林及农田等植被破坏过程中,土壤有机碳变化的研究还鲜见报道,还不足以科学认识该区土地利用变化对土壤有机碳的影响方式和程度。因此,本文以黄土丘陵子午岭林区为研究区,通过分析天然乔木林、天然灌木林转变成人工乔木林、农田及撂荒后土壤有机碳含量及其在土壤剖面上分布的差异,与浅层 (0~100 cm) 土壤对比,分析土地利用变化对深层 (100~200 cm) 土壤有机碳的影响,揭示浅层和深层土壤有机碳对土地利用变化响应的敏感性,以期深入理解土地利用变化的土壤环境效应及深层土壤有机碳的稳定性提供科学依据。

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 研究区概况

研究区位于陕西省富县任家台子午岭林区 (东经 109°08'~109°11', 北纬 36°04'~36°05')。地貌类型属梁状黄土丘陵沟壑区,海拔高程 920~1683 m, 相对高差 100~150 m, 沟谷密度 4.5 km·km<sup>-2</sup>。年均气温 9 °C, 年均降雨量 576.7 mm, 多集中在 7、8、9 三个月,占全年降雨的 60% 以上,属于暖温带半湿润气候。地面组成物质主要以新黄土、老黄土为主,有些沟谷底部出现三趾马红土和白垩系砂、页岩。在清同治年间 (1842—1866 年) 陕甘交界地区发生大范围民族冲突,此后该地区人口逃亡、田地荒芜,植被开始自然恢复,至今已有近 150 年历史,目前子午岭已经形成较大范围而且连片的次生森林景观,20 世纪 40—60 年代以来,由于战争、饥荒、自然灾害等原因,陆续有人迁居此地,重新开始垦荒种田,同时由于人口变动又不断出现新的弃耕土地 (李裕元

等,2004).区内林木郁闭度达0.7以上,主要树种有山杨(*Pobulus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla* Suk)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、榆树(*Ulmus pumila*)和杜梨(*Pyrus betulaefolia* Bunge)等.林下草灌覆盖度达0.9以上,主要有绣线菊(*Spiraea salicifolia* L)、胡枝子(*Lespedeza buergeri* Miq)、栒子(*C.zabelii* Schneid)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、山桃(*Prunus davidiana*)、酸刺(*Hippophae rhamnoides* Linn)、四季青(*Euonymus japonicus* Thunb)、铁杆蒿(*Compositae*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、野菊(*Dendranthema*)等.林下的枯枝落叶层厚度2~5 cm.阴坡及半阴坡的森林长势较阳坡好,梁崩顶部多旱生草灌植被,局部有散生的杜梨(*Pyrus betulaefolia* Bunge)分布.

## 2.2 研究方法

2.2.1 样地选择 于2013年8—11月在研究区选取天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地、农地5种不同土地利用类型,针对4种土地利用变化(天然乔木林-人工乔木林、天然乔木林-农地、天

然灌木林-农地、天然灌木林-农地-撂荒),采用相邻样地比较法,布点采样,以真实反映土地利用变化对土壤有机碳的影响.天然林是原始森林遭破坏后经保护而形成的天然次生林,对照农地是由天然乔木林开垦形成,耕作时间约25年;人工乔木林是在天然乔木林破坏后重新建立,栽种约30年;撂荒地对照农地是天然灌木林开垦形成,其中,撂荒地耕作20年后撂荒10年左右,农地开垦时间约50年(样地概况见表1).

每种土地类型选取有代表性的重复样地3个,为减少样地间地形及小气候差异,选择邻近、坡向和土壤类型基本相同的样地.每块样地选5个采样点,用内径9 cm的根钻取土,采样深度0~200 cm,以20 cm为一层取样,共10层.每一层5个样点采集的土样组成一个混合样,将植物根系拣出,用于计算每层土壤的根系生物量,然后将剩下的土壤充分混匀,按照四分法,取其中的一部分装入塑料袋中,自然风干过2 mm土壤筛,带回实验室测定有机碳含量.每个样地挖200 cm深的土壤剖面,与土钻取样分层一致,测定每层土壤容重.

表1 样地概况

Table 1 Characteristics of studied sites

土地利用	海拔/m	坡位	坡向	坡度/(°)	主要植物种类
天然乔木林	1266~1276	中上	北偏西	15~30	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 、山杨 <i>P. davidiana</i>
天然灌木林	1212~1264	中	南	18~25	山桃 <i>P. davidiana</i> 、山杏 <i>Armeniaca sibirica</i> (L.) Lam.、狼牙刺 <i>Sophora davidii</i> 、黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> Lindl、狗尾草 <i>S. viridis</i>
人工乔木林	1211~1216	中上	北	15~25	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 、狗尾草 <i>S. viridis</i>
撂荒地	1201~1212	中下	南	8~15	角蒿 <i>I. sinensis</i> 、黄蒿 <i>Artemisia annua</i> L、狗尾草 <i>S. viridis</i>
农地	1253~1284	中上	南	5~8	谷子 <i>Setaria italica</i> 、玉米 <i>Zea mays</i> 、大豆 <i>Glycine max</i>
	1252~1275	中上	北偏西	15~30	大豆 <i>Glycine max</i>

2.2.2 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(鲁如坤,2000).土壤有机质储量的计算公式如下:

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

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

2.2.3 数据处理 用Excel进行数据预处理,用SPSS16.0统计软件对不同利用类型下不同土层土壤有机碳含量进行ANOVA分析,LSD法进行差异

显著性检验.用SPSS16.0中一般线性模型(GLM)的方差成分估计模块土地利用类型、容重、根系生物量等因子在土壤有机碳含量变异(方差)中所占的百分比,其百分比的大小可反映各因子对土壤有机碳含量影响程度.

## 3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 不同土地利用类型下土壤有机碳含量和剖面分布特征

由表2可知,在0~200 cm土壤剖面上,天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地、农地土壤

有机碳平均含量分别为 5.85、3.96、4.98、3.09、3.20  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,天然乔木林、人工乔木林与天然灌木林、撂荒地、农田土壤有机碳含量差异显著 ( $p<0.05$ ),天然灌木林、撂荒地和农田之间无显著差异。

从土壤剖面分布来看,几种土地利用类型下土壤有机碳含量沿土壤剖面呈降低的趋势,0~60 cm 下降幅度较大,60 cm 以下土层降幅较小。天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林和农田 0~60 cm 土层之间土壤有机碳含量有极显著差异 ( $p<0.05$ ),60 cm 以下土壤有机碳含量无差异。撂荒地 0~40 cm 土层之间土壤有机碳含量有显著差异 ( $p<0.05$ )。

不同土地利用类型下浅层(0~100 cm)和深层(100~200 cm)土壤有机碳含量分别为 3.77~8.50  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.92~3.20  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,浅层和深层土壤有机碳含量分别占 0~200 cm 土壤有机碳含量的 58%~71%和 29%~42%。其中,浅层土壤有机碳含量以天然乔木林、人工乔木林地较高,其次为天然灌木林地,撂荒地和农田土壤有机碳含量最低。深层土壤有机碳含量则以天然乔木林、人工乔木林地和农田较高,天然灌木林地和撂荒地土壤有机碳含量较低。不同土地利用类型间浅层土壤有机碳含量差异显著,但深层土壤有机碳含量差异不大(图 1)。

表 2 不同土地利用类型下土壤有机碳含量

Table 2 The concentration of soil organic carbon under different land-use types

土层深度/cm	有机碳含量/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )				
	天然乔木林地	天然灌木林地	人工乔木林地	撂荒地	农田
0~20	20.11±2.14 <sup>Aa</sup>	13.85±2.78 <sup>Ab</sup>	16.43±3.59 <sup>Ab</sup>	8.59±2.23 <sup>Ac</sup>	5.81±1.13 <sup>Ac</sup>
20~40	9.18±1.10 <sup>Ba</sup>	5.80±0.61 <sup>Bb</sup>	8.01±1.53 <sup>Ba</sup>	4.93±1.36 <sup>Bb</sup>	3.89±1.09 <sup>Bb</sup>
40~60	5.38±0.52 <sup>Ca</sup>	3.29±0.16 <sup>Cbc</sup>	4.27±0.91 <sup>Cab</sup>	2.90±0.71 <sup>Cc</sup>	3.17±0.57 <sup>Cbc</sup>
60~80	4.19±0.60 <sup>CDa</sup>	2.84±0.21 <sup>Cbc</sup>	3.70±0.74 <sup>Cab</sup>	2.57±0.73 <sup>Cc</sup>	3.07±0.49 <sup>Cbc</sup>
80~100	3.64±0.56 <sup>Da</sup>	2.72±0.22 <sup>Cab</sup>	3.31±0.73 <sup>Cab</sup>	2.29±0.84 <sup>Cb</sup>	2.91±0.43 <sup>Cab</sup>
100~120	3.55±0.40 <sup>Da</sup>	2.44±0.09 <sup>Cbc</sup>	3.11±0.66 <sup>Cab</sup>	2.05±0.79 <sup>Cc</sup>	2.87±0.44 <sup>Cab</sup>
120~140	3.33±0.45 <sup>Da</sup>	2.26±0.19 <sup>Cbc</sup>	2.92±0.67 <sup>Cab</sup>	1.91±0.66 <sup>Cc</sup>	2.69±0.15 <sup>Cab</sup>
140~160	3.29±0.61 <sup>Da</sup>	2.14±0.14 <sup>Cbc</sup>	2.82±0.60 <sup>Cab</sup>	1.92±0.44 <sup>Cc</sup>	2.68±0.18 <sup>Cabc</sup>
160~180	2.97±0.55 <sup>Da</sup>	2.21±0.10 <sup>Cab</sup>	2.59±0.60 <sup>Cab</sup>	1.85±0.49 <sup>Cb</sup>	2.50±0.31 <sup>Cab</sup>
180~200	2.88±0.41 <sup>Da</sup>	2.04±0.05 <sup>Cbc</sup>	2.65±0.41 <sup>Cab</sup>	1.86±0.24 <sup>Cc</sup>	2.39±0.37 <sup>Cac</sup>
平均值	5.85±0.72 <sup>a</sup>	3.96±0.36 <sup>b</sup>	4.98±0.66 <sup>a</sup>	3.09±0.71 <sup>b</sup>	3.20±0.53 <sup>b</sup>

注:表中不同小写字母表示不同土地利用类型在同一土层土壤有机碳含量差异显著 ( $p<0.05$ ),不同大写字母表示同一土地利用类型在不同土层土壤有机碳含量差异显著 ( $p<0.05$ )。

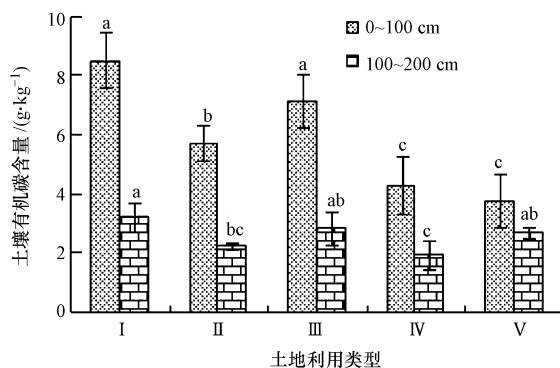


图 1 不同土地利用类型下 0~100 cm 和 100~200 cm 土层土壤有机碳含量(不同字母表示不同土层间差异显著 ( $p<0.05$ ), I:天然乔木林地, II:天然灌木林地, III:人工乔木林地, IV:撂荒地, V:农田)

Fig.1 SOC content in 0~100 cm and 100~200 cm depth under different land-use types

### 3.2 土地利用变化对土壤有机碳储量的影响

土地利用变化对土壤有机碳储量有显著影响。从图 2 可知,天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地及农田 4 种土地利用转变方式下 0~200 cm 土壤有机碳储量分别减少 9.68、52.90、20.20、12.49  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,降低幅度分别为 7%、39%、21%、13%。不同土地利用转变方式下浅层(0~100 cm)和深层(100~200 cm)土壤有机碳呈现不同的变化规律。天然乔木林转变为人工乔木林浅层土壤有机碳储量的减少量(2.27  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )低于深层土壤(7.41  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ );天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地浅层土壤有机碳储量的减少量比深层土壤分别高 33.62  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 13.08  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;天然灌木林转变为农田,浅层土壤有机碳储量减少(16.14  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),深层土壤有机碳储量却有少量增加(5.14  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。土地利用变化导致

浅层土壤有机碳储量减少幅度为 2%~48%, 深层土壤减少幅度为 12%~22%, 这表明相对于表层土壤, 深层土壤有机碳受土地利用变化的响应程度较小。

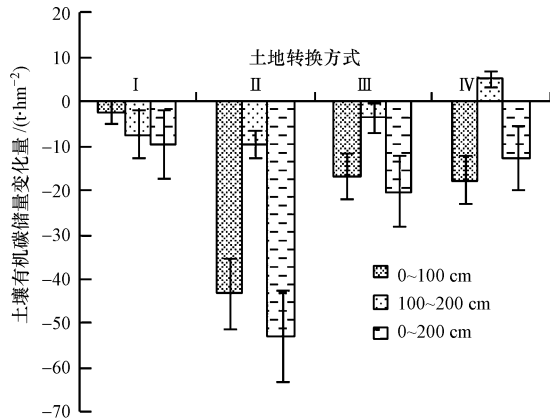


图2 不同土地转换方式土壤有机碳储量在不同深度土层的变化量(I:天然乔木林转变为人工乔木林, II:天然乔木林转变为农田, III:天然灌木林转变为撂荒地, IV:天然灌木林转变为农田)

Fig.2 The variation of SOC storage in different depths under different land use changes

土地利用变化对土壤有机碳储量在土壤剖面上的分布也产生影响。由表3可知, II和III转变类型下土壤有机碳的减少量随着土壤深度的加深而不断地减少, 其中, 0~60 cm深度减少的幅度较大, 60 cm以下减少量趋于平稳。天然乔木林转变为人工乔木林, 0~40 cm土壤有机碳储量增加, 天然灌木林转变为农田, 除表层0~40 cm土壤有机碳储量减少

表3 土地方式转变后土壤有机碳储量变化量

Table 3 The variation of SOC storage after different land use changes

土层深度/cm	土壤有机碳储量变化量/(t·hm <sup>-2</sup> )			
	I	II	III	IV
0~20	2.10	-22.80	-12.02	-16.35
20~40	0.34	-10.11	-2.27	-3.56
40~60	-2.13	-5.35	-1.13	0.58
60~80	-1.42	-3.12	-0.32	1.29
80~100	-1.16	-1.88	-0.91	0.41
100~120	-1.71	-2.60	-0.88	1.53
120~140	-1.57	-2.00	-0.76	0.96
140~160	-1.74	-1.85	-0.39	1.33
160~180	-1.47	-1.57	-1.07	0.54
180~200	-0.92	-1.62	-0.46	0.78
总计	-9.68	-52.90	-20.20	-12.49

注: I:天然乔木林转变为人工乔木林, II:天然乔木林转变为农田, III:天然灌木林转变为撂荒地, IV:天然灌木林转变为农田, 正值表示增加, 负值表示减少。

外, 40 cm以下土壤有机碳储量不同程度地增加, 但增加的幅度不大, 说明深层土壤有机碳储量随土地利用类型变化后剖面上分布有一定复杂性。另外, 土地利用类型变化后, 土壤有机碳储量改变的幅度比土壤有机碳含量小, 这些差异也主要由土壤有机碳含量和土壤容重差异所致。

### 3.3 土壤有机碳含量的影响因素

用一般线性模型中的方差成分估计模块, 计算了各因子对土壤有机碳含量变异性的贡献(表4)。结果表明, 浅层(0~100 cm)土壤有机碳含量主要受土层的影响, 可解释 47.9%的变异性; 容重、土地利用类型和根系生物量对有机碳含量的影响也较大, 可分别解释 28.9%、14.8%和 8.5%的变异性; 与浅层土壤不同, 深层(100~200 cm)土壤有机碳含量主要受土地利用类型的影响, 可解释 71.1%的变异性; 其次是容重和根系生物量, 可分别解释 11.1%、10.2%的变异性; 土层对土壤有机碳含量的影响比较前3个因子较小, 可解释 7.7%的变异性。可以看出, 表层土壤和深层土壤有机碳主要影响因素不同。

表4 不同因子在土壤有机碳含量变异(方差)中的贡献

Table 4 The contribution of different factors in SOC variation (variance)

方差来源	0~100 cm		100~200 cm		0~200 cm	
	方差	方差百分比	方差	方差百分比	方差	方差百分比
土地利用类型	2.732	14.76%	0.167	71.06%	0.351	3.27%
土层	8.872	47.94%	0.018	7.66%	4.387	40.83%
容重	5.339	28.85%	0.026	11.06%	5.893	54.84%
根系生物量	1.563	8.45%	0.024	10.21%	0.114	1.06%

注: 用 GLM 模型进行方差成分估计,  $n=180$ 。

## 4 讨论 (Discussion)

许多研究表明, 土地利用变化对土壤有机碳有着重要的影响。就全球尺度而言, 森林变为农田 1 m 土层内的土壤碳损失量为 25%~30% (Houghton, 1995)。李正才等 (2007) 对北亚热带地区次生林变成农耕地的研究得出, 0~100 cm 土壤有机碳含量下降了 28.2%。吴建国等 (2004) 研究发现, 暖温带半湿润区天然次生林变成农田, 0~110 cm 土层土壤有机碳含量减少了 54%, 差异主要在 0~50 cm 土层。本研究得出, 0~200 cm 土层, 天然乔木林变成农田后, 有机碳含量平均减少了 46%, 差异主要在 0~80 cm 土层, 与上述结果相当; 天然灌木林变成撂荒地和农田, 有机碳含量平均减少了 22% 和

19%, 差异主要在 0~40 cm 土层, 比上述研究结果低. 主要原因在于植被差异, 天然乔木林根系发达, 表层枯落物多(廖洪凯等, 2011), 活性有机碳含量高(张剑等, 2009), 且微生物含量多, 有机碳的周转速率快, 故转变成农田后有机碳损失速率较灌木林快. 由于不同地区气候类型、土壤母质等不一样, 加上土壤有机碳在空间分布的极大变异性、研究者方法的差异, 导致不同地区土地利用变化对土壤有机碳影响的研究结果也不一样(Don *et al.*, 2011). Bouwman(1990)指出, 土地开垦几乎在所有的情况下都会造成自然生态系统土壤有机碳含量的降低, 温带地区加拿大黑钙土开垦后土壤有机碳减少了 50%以上. 李正才等(2007)对北亚热带地区土地利用变化的研究表明, 次生林转变成长期经营的农耕地后, 土壤有机碳储量下降了 22.5%, 而转变成长期集约经营早竹林土壤有机碳储量下降 51.4%.

一般而言, 深层土壤碳储量对土地利用变化的响应不如表层土壤碳储量敏感(Guo *et al.*, 2002; Poeplau *et al.*, 2011). Detwiler 和 Hall(1988)总结得出, 农田耕种 30~50 年后 0~20 cm 土壤表层土壤有机碳损失 50%, 0~100 cm 土层土壤有机碳损失 30%. 吴建国等(2004)研究认为天然次生林转变为农田后 0~100 cm 土层土壤有机碳密度平均降低 35%, 其中, 表层 0~50 cm 土层土壤有机碳密度农田比天然次生林低 20%~79%. 本文研究的天然乔木林地转变为农田后浅层(0~100 cm)土壤有机碳储量下降 48%, 深层(100~200 cm)土壤下降 22%. 这主要是因为随着土层的加深, 土壤稳定性有机碳比例增加, 周转时间变长(Rumpel *et al.*, 2002), 深层土壤有机碳难分解的化合物增加(Liang *et al.*, 2008); 相对于深层, 表层土壤活性有机碳含量高(宇万太等, 2007), 受环境因素影响较大(李忠等, 2001; Petersen *et al.*, 2002), 更容易造成损失. 本研究中, 天然灌木林转变为农田浅层土壤有机碳储量下降 26%, 深层变化与上述不同, 有机碳储量增加了 18%, 这与其他学者(吴建国等, 2004; 李正才等, 2007)的研究结果相同, 60 cm 以下农田土壤有机碳储量均比同层灌木地多. 其原因一是土地管理方式如施肥、翻耕会促进地上新鲜有机物向下层土壤输入(Rasse *et al.*, 2006; Huggins *et al.*, 2007); 加上农田地势平坦, 降雨导致表层水溶性碳向深层淋溶更明显(Marinho-Soriano *et al.*, 2006), 长期的累积可能是造成深层有机碳含量增加的一个原因.

土壤碳库在受到土地利用变化的影响后, 既可能变成大气中 CO<sub>2</sub> 的“源”, 也可能变成“汇”(吴金水等, 2004; Kirschbaum, 1995). Lugo 等(1986)对热带森林的研究表明, 森林砍伐成为农田后, 土壤碳含量降低 65%, 而当农田恢复为森林, 50 年后土壤碳含量可以恢复为原有水平的 75%. 我国黄土丘陵区退耕还林后, 土壤有机碳的累积表现出一定的阶段性, 恢复 10 年的刺槐林土壤有机碳累积不明显, 而恢复 28 年的刺槐林, 0~100 cm 土壤有机碳储量有明显增加, 累积速率为  $1.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 100~200 cm 土壤有机碳累积速率为  $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (许明祥等, 2012). 不同退耕类型和退耕年限土壤有机碳储量变化有一定的差异. 张金等(2012)研究指出, 恢复 30 年后的柠条林有机碳储量增加  $14.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均累积速率为  $0.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 100~200 cm 土壤有机碳累积速率为  $0.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . 相对于农田退耕还林而言, 天然林地开垦为农田后对土壤有机碳的影响程度更大. 林地开垦为农田导致土壤有机碳储量显著降低, 如森林转化为农地, 种植农作物 5 年内使土壤有机碳减少 40%(Detwiler, 1986). 本研究表明, 天然乔木林转变成农田后 0~100 cm 土层的土壤有机碳储量显著降低, 平均减少速率为  $1.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 100~200 cm 土层的平均减少速率为  $0.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 且浅层的降低速率显著高于深层. 相对于林地开垦为农田而言, 农田退耕还林后土壤有机碳的恢复要慢得多.

土地利用变化对表层土壤有机碳有显著影响, 且深层土壤在一定程度上也参与了碳循环, 深入研究土地利用变化对深层土壤有机碳影响对量化土地利用方式改变所引起的碳储量变化, 制定生态系统管理策略, 适应和减缓全球气候变化具有重要的意义. 由于大量的有机碳储存于深层土壤, 深层土壤有机碳的长期稳定固存的机制问题仍未明晰, 因此, 未来应加强深层土壤有机碳的来源、特征与长期动态变化方面的研究.

## 5 结论(Conclusions)

1) 不同土地利用类型间 0~200 cm 土层的土壤有机碳含量有一定差异, 以乔木林和人工林地最高, 其次是天然灌木林地, 撂荒地和农田土壤有机碳含量最低. 浅层和深层土壤有机碳含量分别占 0~200 cm 土壤有机碳含量的 58%~73% 和 27%~42%. 不同利用类型间浅层土壤有机碳含量差异显著, 但

深层土壤有机碳含量差异不大。

2) 不同土地转变方式对土壤有机碳储量有显著影响, 浅层比深层变化更敏感。天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地及农田 4 种土地利用转变方式下 0~200 cm 土壤有机碳储量分别减少了 7%、39%、21% 和 13%。土地利用变化导致浅层土壤有机碳储量减少幅度为 2%~48%, 深层减少幅度为 12%~22%。相对于林地开垦为农田而言, 农田退耕还林后土壤有机碳的恢复要慢得多。

3) 土壤有机碳在浅层和深层的主要影响因素不同。黄土丘陵区 0~100 cm 土层土壤有机碳含量主要受土层的影响, 可解释 47.9% 的变异性; 容重、土地利用类型和根系生物量可分别解释 28.9%、14.8% 和 8.5% 的变异性; 100~200 cm 土层土壤有机碳含量主要受土地利用类型的影响, 可解释 71.1% 的变异性; 其次是容重和根系生物量, 可分别解释 11.1%、10.2% 的变异性。

**责任作者简介:** 许明祥 (1972—), 男, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土地利用变化及其环境效应研究。

#### 参考文献 (References):

- Bouwman A F. 1990. Global distribution of the major soils and land cover types//Soils and the Greenhouse Effect [M]. Chichester: Wiley. 33-59
- 车升国, 郭胜利. 2010. 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, 31(5): 1372-1378
- Contzen J P, Ghazi A. 1994. The role of the European Union in global change research[J]. AMBIO, 23(1): 101-103
- Detwiler R P. 1986. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils[J]. Biogeochemistry, 2(1): 67-93
- Detwiler R P, Hall C A S. 1988. Tropical forests and the global carbon cycle[J]. Science, 239(4835): 42-47
- Don A, Schumacher J, Freibauer A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks- a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 17(4): 1658-1670
- Guo L B, Gifford R M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 8(4): 345-360
- Harrison R B, Footen P W, Strahm B D. 2011. Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change [J]. Forest Science, 57(1): 67-76
- Houghton R A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850//Houghton R A. Soils and global change [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press. 45-65
- Hughes R F, Kauffman J B, Jaramillo V J. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico [J]. Ecological Applications, 10(2): 515-527
- Huggins D R, Allmaras R R, Clapp C E, et al. 2007. Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage [J]. Soil Science Society of America Journal, 71(1): 145-154
- Jackson R B, Schenk H J, Jobbagy E G, et al. 2000. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models [J]. Ecological Applications, 10(2): 470-483
- Kirschbaum M U F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. Soil Biology and Biochemistry, 27(6): 753-760
- 李裕元, 邵明安. 2004. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化 [J]. 生态学报, 24(2): 252-260
- 李正才, 徐德应, 傅懋毅, 等. 2007. 北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响 [J]. 林业科学研究, 20(6): 744-749
- 李忠, 孙波, 林心雄. 2001. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素 [J]. 地理科学, 21(4): 301-307
- Liang C, Balser T C. 2008. Preferential sequestration of microbial carbon in subsoils of a glacial-landscape toposequence, Dane County, WI, USA [J]. Geoderma, 148(1): 113-119
- 廖洪凯, 龙健. 2011. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化 [J]. 应用生态学报, 22(9): 2253-2258
- Lorenz K, Lal R. 2005. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons [J]. Advances in Agronomy, 88: 35-66
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社
- Lugo A E, Sanchez M J, Brown S. 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils [J]. Plant and Soil, 96(2): 185-196
- Marinho-Soriano E, Fonseca P C, Carneiro M A A, et al. 2006. Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds [J]. Bioresource Technology, 97(18): 2402-2406
- Osher L J, Matson P A, Amundson R. 2003. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii [J]. Biogeochemistry, 65(2): 213-232
- Petersen B M, Olesen J E, Heidmann T. 2002. A flexible tool for simulation of soil carbon turnover [J]. Ecological Modelling, 151(1): 1-14
- Poeplau C, Don A, Vesterdal L, et al. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach [J]. Global Change Biology, 17(7): 2415-2427
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. 1982. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 298(5870): 156-159
- Schlesinger W H. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. Nature, 348(6298): 232-234
- Rasse D P, Mulder J, Moni C, et al. 2006. Carbon turnover kinetics with depth in a french loamy soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 70(6): 2097-2105
- Rumpel C, Kögel-Knabner I, Bruhn F. 2002. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different

- pedogenesis[J].*Organic Geochemistry*,33(10): 1131-1142
- Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J].*Forest Ecology and Management*,169(1/2): 137-147
- 王小利,苏以荣,黄道友,等.2006.土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J].*中国农业科学*,39(4): 750-757
- 王征,刘国彬,许明祥.2010.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*,30(14): 3947-3952
- Watson R T, Noble I R, Bolin B, *et al.* 2000. Land use, land-use change, and forestry: a special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press
- Wright A L, Dou F, Hons F M. 2007. Crop species and tillage effects on carbon sequestration in subsurface soil[J].*Soil Science*,172(2): 124-131
- 吴建国,张小全,徐德应.2004.土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J].*应用生态学报*,15(4): 593-599
- 吴金水,童成立,刘守龙.2004.亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应[J].*地球科学进展*,19(1): 131-137
- 许明祥,王征,张金,等.2012.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*,32(17): 5405-5415
- 宇万太,马强,赵鑫,等.2007.不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J].*生态学杂志*,26(12): 2013-2016
- 张剑,汪思龙,王清奎.2009.不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J].*中国生态农业学报*,17(1): 41-47
- 张金,许明祥,王征,等.2012.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*,23(10): 2721-2727