

# 子午岭林区不同植被恢复阶段土壤有机碳变化研究

马帅<sup>1</sup>, 赵世伟<sup>1,2</sup>, 李婷<sup>1</sup>, 李晓晓<sup>1</sup>, 曾宪芳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 研究了子午岭林区植被恢复过程中土壤有机碳含量、团聚体有机碳分布以及不同粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率。研究结果表明, 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, 坡耕地 0—100 cm 土层土壤有机碳加权平均值为 3.54 g/kg, 弃耕地、草地、灌木和乔木阶段分别比坡耕地提高 6.8%, 36.6%, 41.5% 和 73.6%; 0—20 cm 土层土壤有机碳含量随植被恢复的提高幅度明显高于 20 cm 以下土层; 0—5 和 5—10 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量随植被恢复年限逐渐增加, 并有向大粒级(> 2 mm) 团聚体中富集的趋势, 10—20 cm 土层土壤团聚体有机碳含量随植被恢复变化不明显; 弃耕地、草地、灌木和乔木阶段 0—20 cm 土层 > 5, 5~ 2 和 2~ 1 mm 粒级团聚体有机碳贡献率高于坡耕地, 说明植被恢复 0—20 cm 土层土壤增加的有机碳更多地固定在 > 1 mm 粒级团聚体中。

**关键词:** 植被恢复; 团聚体有机碳; 团聚体; 有机碳贡献率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0094-05

中图分类号: S152.481, S153.621

## Changes of Soil Organic Carbon in Various Stages of Vegetation Restoration in Ziwuling Mountain

MA Shuai<sup>1</sup>, ZHAO Shi-wei<sup>1,2</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, LI Xiao-xiao<sup>1</sup>, ZENG Xian-fang<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The soil organic carbon(SOC) contents, distribution of organic carbon in soil aggregates, and organic carbon contribution rates of variously sized soil aggregates were studied during vegetation restoration in Ziwuling Mountain. The results show that the weighted mean of SOC was 3.54 g/kg for the 0—100 cm soil profile of sloped cropland, while the weighted means of SOC of 0—100 cm soil profiles of abandoned land, grassland, shrub and arbor phases were 6.8%, 36.6%, 41.5% and 73.6%, respectively, higher than that of sloped cropland. The increasing magnitudes of SOC contents of 0—20 cm soil layer were higher than those of soil layers below following vegetation restoration. The SOC contents of aggregates of all sizes in the 0—5 and 5—10 cm soil layers increased gradually and the SOC enriched in the macro-aggregates (> 2 mm) over time along with vegetation restoration. No clear change of SOC contents in the 10—20 cm soil layer for aggregates of all sizes. The SOC contribution rates of > 5, 5~ 2 and 2~ 1 mm aggregates in 0—20 cm soil layer of abandoned land, grassland, shrub and arbor were higher than that of sloped cropland, indicating that the increased part of SOC in 0—20 cm soil layer were stored mainly in > 1 mm aggregates during vegetation restoration.

**Keywords:** vegetation restoration; SOC of aggregates; soil aggregate; SOC contribution rate

全球的碳储量大约为  $1.0 \times 10^8$  Pg, 其中约 1500 Pg 是以有机质形态储存于土壤中, 全球土壤有机碳库储量约为大气碳库 750 Pg 的 2 倍<sup>[1]</sup>。有研究表明<sup>[2]</sup>, 土壤有机碳在很大程度上影响着土壤结构的形成、土壤稳定性、土壤持水性、土壤缓冲性和土壤生

物多样性等。此外, 由于土壤有机碳的库容巨大, 其较小的变幅即能导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度有较大的波动, 因而其对大气温室气体含量的影响较大。据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 报告显示<sup>[3]</sup>, CO<sub>2</sub> 浓度对全球变暖贡献率为 63.7%。土

收稿日期: 2010-10-26

修回日期: 2011-03-11

资助项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究项目“黄土区植被恢复的土壤碳汇效应”(10502-Z11); 国家“十一五”科技支撑重大项目“半干旱黄土丘陵区退化生态系统恢复技术与模式”(2006BCA01A07)

作者简介: 马帅(1985—), 男(汉族), 河南省三门峡市人, 在读硕士, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: mashuai\_1004@126.com。

通信作者: 赵世伟(1962—), 男(汉族), 四川省荣县人, 硕士生导师, 研究员, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: szhao@ms.isw.ac.cn。

壤有机碳库损失释放的 CO<sub>2</sub> 对全球变暖影响较大。

植被演替过程是土壤环境与植被相互作用协同演变的生态学过程, 不仅地上植物群落结构与组成发生变化<sup>[4,5]</sup>, 而且土壤养分状况<sup>[6,7]</sup>、水分物理性质<sup>[8,9]</sup>和结构特征<sup>[10,12]</sup>也发生了变化。植被恢复过程中土壤有机碳变化的研究有较多报道, 谢锦升等<sup>[13]</sup>的研究表明植被恢复改变了土壤团聚体有机碳含量和比例分布, 植被恢复时间越长, 土壤有机碳含量越高; 团聚体对有机碳具有一定的富集作用, 有机碳含量高于全土和微团聚体、粉粒及黏粒有机碳含量, 大团聚体有机碳恢复速度也快于微团聚体以及粉粒与黏粒有机碳的恢复速度。苏静等<sup>[14]</sup>的研究表明植被恢复增加各个土层土壤有机碳含量, 但是活性有机碳含量表现不同, 草地比农田减少, 其它植被与农田土壤活性有机碳含量差异不大。赵世伟等<sup>[15]</sup>的研究表明植被演替可增加土壤团聚体有机碳含量, 但首先是增加较大粒径团聚体的有机碳含量; 随着植被的进一步演替, 小粒径团聚体有机碳含量也相应地增加。

子午岭林区的植被是在 1862—1874 年弃耕后天然恢复形成的, 虽然前人已经对子午岭林区植被恢复过程中土壤及团聚体有机碳的变化进行了研究<sup>[15]</sup>, 但对各粒级团聚体所包含的有机碳占总碳的比例(团聚体有机碳贡献率)随植被演替的变化的研究尚未见报道。不同粒级团聚体中土壤有机碳成分不同<sup>[16]</sup>, 稳定性不同, 释放 CO<sub>2</sub> 的潜力也不同, 所以研究不同粒级团聚体所包含的有机碳占总碳的比例对评估土壤固碳潜力有一定意义。本文就该地区植被恢复后

各粒级团聚体有机碳贡献率的变化进行研究, 为进一步阐明植被恢复后土壤碳汇的功能变化提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原子午岭北部的甘肃省合水县太白乡连家砭林场, 北纬 35° 03′—36° 37′, 东经 108° 10′—109° 08′, 海拔 1 400 m 左右。该地区年平均气温 7.4 °C, 年均降雨量 587.6 mm, ≥10 °C 积温 2 671.0 °C, 干燥度 0.97, 阴阳坡水热条件变化较大, 但无气候垂直带状变化。土壤为原生或次生黄土, 厚度一般为 50—100 m, 土壤类型以石灰性褐土为主, 其次是粗骨褐色土, 在沟底及两侧低阶地发育有潜育化草甸土。研究区分布着比较完整的次生植被正向演替序列: 草本群落(芨芨、白羊草等) → 灌丛群落(狼牙刺、沙棘、虎榛子等) → 乔灌混交群落 → 乔木群落(白桦、山杨、辽东栎)<sup>[17]</sup>。

### 1.2 样地选择与取样

2009 年 10 月选取子午岭林区弃耕地、草地、灌丛、林地 4 个阶段并以坡耕地为对照, 测定草地群落的地上生物量和林地群落的枯枝落叶量, 调查样地的基本信息, 即海拔、坡度、坡向和土壤类型, 并采集植被恢复各阶段土样。每个植被恢复阶段均采集 0—5, 5—10, 10—20, 20—40, 40—70 和 70—100 cm 6 个土层的原状土样, 并用保鲜盒储存, 每个恢复阶段下取 3 个土壤样品作为重复。各采样点的基本信息如表 1 所示。

表 1 各样地的基本信息

样地类型	坡向	坡度/(°)	海拔/m	经纬度	主要植物种类
坡耕地	西偏南 10°	13	1 482	108° 28′ 5.4″ E 36° 4′ 26.9″ N	马铃薯( <i>Solanum tuberosum</i> )
弃耕地	正南坡	16	1 407	108° 31′ 36.6″ E 36° 5′ 19.6″ N	达乌里胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )、长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )、茵陈蒿( <i>Artemisia capillaries</i> )等
草地	南偏西 5°	21	1 323	108° 31′ 50.7″ E 36° 4′ 56″ N	白羊草( <i>Bothriochloa ischaemum</i> )、芨芨( <i>Artemisia giradii</i> )、达乌里胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )等
灌丛	北偏东 40°	12	1 410	108° 31′ 38.3″ E 36° 5′ 24.6″ N	虎榛子( <i>Ostryopsis davidiana</i> )、披针苔草( <i>Carex lanceolata</i> )、绒毛绣线菊( <i>Spiraea velutina</i> )等
林地	东偏北 45°	17	1 442	108° 31′ 29.3″ E 36° 2′ 59.7″ N	辽东栎( <i>Quercus wutaishanica</i> )、绒毛绣线菊( <i>Spiraea velutina</i> )、虎榛子( <i>Ostryopsis davidiana</i> )等

### 1.3 分析方法

土壤水稳性团聚体质量分数采用萨维诺夫湿筛法测定<sup>[18]</sup>。

土壤总有机碳采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外加热法。

### 1.4 数据处理

文中 0—100 cm 土层土壤有机碳加权平均值 SOC<sub>平均</sub> 和各粒级团聚体有机碳贡献率  $w_i$  计算公式如下:

$$\text{SOC}_{\text{平均}} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i S_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (1)$$

式中:  $L_i$  ——土层  $i$  的厚度;  $S_i$  ——土层  $i$  的有机碳含量。

$$w_i = \frac{p_i S_i}{\sum_{i=1}^n p_i S_i} \quad (2)$$

式中:  $p_i$  ——粒级  $i$  的团聚体占土壤的质量百分比;  $S_i$  ——粒级  $i$  的团聚体的有机碳含量。

本文使用 SPSS 13.0 进行方差分析, 平均值之间的差异性比较采用 LSD 法, 使用 Excel 进行数据初期处理和作图。

## 2 结果分析

### 2.1 植被恢复对 0—100 cm 剖面土壤有机碳加权平均值的影响

图 1 显示, 0—100 cm 土层土壤有机碳加权平均值的从高到低的顺序为: 乔木 > 草地、灌木 > 弃耕地、坡耕地, 随着植被恢复整个 100 cm 剖面上土壤有机碳含量逐渐升高。坡耕地阶段 0—100 cm 土层土壤有机碳平均值为 3.54 g/kg, 弃耕地、草地、灌木和乔木阶段分别比坡耕地提高 6.8%, 36.6%, 41.5% 和 73.6%, 乔木阶段 0—100 cm 土层土壤有机碳平均值最高, 达到 6.15 g/kg。可见, 0—100 cm 剖面上土壤有机碳含量平均值随植被恢复逐渐提高。

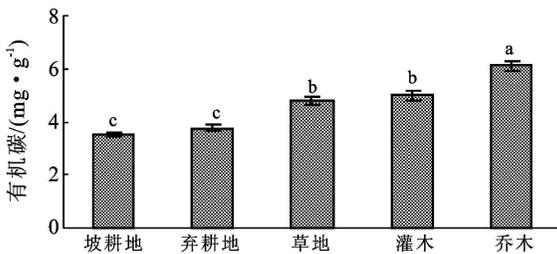


图 1 不同植被恢复阶段 0—100 cm 土层土壤有机碳加权平均值

### 2.2 植被恢复对不同土层土壤有机碳的影响

图 2 显示, 各土层土壤有机碳含量基本都有随植被恢复逐渐增加的趋势, 各植被类型土壤有机碳含量都随土层加深而逐渐降低。0—100 cm 剖面上各土层土壤有机碳含量均随植被恢复逐渐提高, 这与赵世伟等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。

坡耕地 0—5 cm 土层土壤有机碳含量为 8.75 g/kg, 弃耕地、草地、灌木和乔木分别比坡耕地提高了 23.6%, 139.0%, 120.0% 和 192.7%。坡耕地 5—10 cm 土层有机碳含量为 8.70 g/kg, 弃耕地、草地、灌木

和乔木分别比坡耕地提高了 12.7%, 63.6%, 35.0% 和 84.7%。坡耕地 10—20 cm 土层有机碳含量为 5.89 g/kg, 弃耕地、草地、灌木和乔木分别比坡耕地提高了 10.1%, 19.8%, 34.2% 和 70.6%。坡耕地 20—40 cm 土层土壤有机碳含量为 3.72 g/kg, 弃耕地比坡耕地降低 18.9%, 草地、灌木和乔木分别比坡耕地提高了 13.1%, 15.9% 和 40.1%。坡耕地 40—70 cm 土层土壤有机碳含量 2.36 g/kg, 弃耕地比坡耕地降低 6.2%, 草地、灌木和乔木分别比坡耕地提高了 16.7%, 23.9% 和 52.4%。坡耕地 70—100 cm 土层有机碳含量 2.1 g/kg, 弃耕地、草地、灌木和乔木分别比坡耕地提高了 33.2%, 12.4%, 48.3% 和 49.5%。0—20 cm 土层土壤有机碳含量随植被恢复的提高幅度明显高于 20—100 cm 土层。

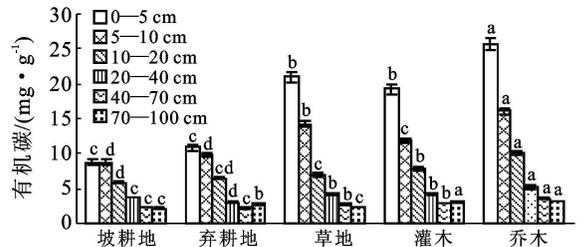


图 2 不同植被恢复阶段 0—100 cm 剖面土壤有机碳含量

### 2.3 植被恢复对土壤团聚体有机碳含量的影响

表 2 显示, 在 0—5 和 5—10 cm 土层, 弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地 > 5, 5~ 2, 2~ 1, 1~ 0.5, 0.5~ 0.25 和 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量均高于坡耕地, 其中乔木林地提高幅度最大。在 0—5 cm 土层, 乔木林地各粒级团聚体有机碳含量分别比坡耕地提高 17.42, 13.27, 14.57, 16.75, 21.60 和 18.75 mg/g; 在 5—10 cm 土层, 乔木林地各粒级团聚体有机碳含量分别比坡耕地提高 9.51, 7.70, 7.60, 8.11, 8.75 和 8.57 mg/g。

乔木林地 10—20 cm 土层 > 5, 5~ 2, 2~ 1, 1~ 0.5, 0.5~ 0.25 和 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量比坡耕地分别增加 3.78, 0.030, 3.9, 3.35, 3.01, 2.00 mg/g, 其它植被恢复阶段各粒级团聚体有机碳与坡耕地各粒级团聚体有机碳含量相比有增有减, 但幅度均较小, 增加和减少量都在 2 mg/g 以内。

由以上分析可知, 0—5 和 5—10 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量随植被恢复逐渐增加, 并有随植被恢复向大粒级团聚体中富集的趋势。10—20 cm 土层乔木林下土壤团聚体有机碳比坡耕地有较大幅度提高, 其它植被恢复阶段团聚体有机碳含量与坡耕地相比变化幅度较小。

表 2 不同植被恢复阶段不同土层土壤各粒级团聚体有机碳含量

植被阶段	土层/cm	土壤粒级					
		> 5 mm	5~ 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	< 0.25 mm
坡耕地	0—5	9.57(d)bc	11.64(d)a	9.57(d)bc	10.17(c)b	11.25(d)a	8.82(d)c
	5—10	9.44(d)b	9.22(d)bc	8.55(b)a	9.59(c)b	9.73(d)b	8.24(d)c
	10—20	7.62(c)b	10.64(a)a	6.23(c)c	6.79(b)c	6.96(c)bc	6.25(c)c
弃耕地	0—5	10.34(d)b	12.62(d)a	12.40(c)a	11.62(c)a	12.59(d)a	8.96(d)c
	5—10	10.48(d)ab	9.87(d)bc	9.25(d)cd	9.90(c)bc	10.86(cd)a	8.73(cd)d
	10—20	7.91(bc)b	10.55(a)a	6.78(c)c	6.31(c)c	6.79(c)c	5.02(d)d
草地	0—5	21.94(b)cd	20.68(b)d	23.86(a)bc	25.47(a)b	27.95(b)a	22.79(b)c
	5—10	13.56(b)ab	14.24(b)a	13.90(b)a	13.60(b)ab	14.08(b)a	12.38(b)b
	10—20	8.50(b)a	8.45(b)a	6.52(c)b	6.62(b)c	6.66(c)b	5.29(d)c
灌木林地	0—5	19.03(c)b	18.19(c)b	18.30(b)b	19.20(b)b	22.38(c)a	17.46(c)b
	5—10	11.77(c)a	11.68(c)a	11.58(c)a	10.93(c)a	10.98(c)a	9.42(c)b
	10—20	8.58(b)a	8.68(b)a	7.79(b)b	7.17(b)b	7.81(b)b	7.25(b)b
乔木林地	0—5	26.99(a)bc	24.91(a)cd	24.14(a)d	26.92(a)bc	32.85(a)a	27.57(a)b
	5—10	18.95(a)a	16.92(a)b	16.15(a)b	17.70(a)ab	18.48(a)ab	16.81(a)b
	10—20	11.40(a)a	10.67(a)ab	10.13(a)b	10.14(a)b	9.97(a)b	8.25(a)c

注: 括号内不同小写字母表示植被类型间数据差异达显著水平( $p < 0.05$ ), 括号外不同小写字母表示团聚体粒级间数据差异达显著水平( $p < 0.05$ )。下同。

2.4 植被恢复对土壤各粒级团聚体有机碳贡献率的影响

表 3 显示, 在 0—5 和 5—10 cm 土层弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地土壤 > 5, 5~ 2, 2~ 1 mm 团

聚体有机碳贡献率高于坡耕地, 在 10—20 cm 土层弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地土壤 5~ 2 和 2~ 1 mm 团聚体有机碳贡献率高于坡耕地<sup>[20]</sup>。

表 3 不同植被恢复阶段不同土层土壤各粒级团聚体有机碳贡献率

植被阶段	土层/cm	土壤粒级					
		> 5 mm	5~ 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	< 0.25 mm
坡耕地	0—5	3.08(e)f	4.23(e)e	5.79(d)d	10.17(c)b	9.72(b)c	67.01(a)a
	5—10	3.03(d)d	3.34(e)d	8.77(c)c	10.44(a)b	9.02(a)c	65.40(a)a
	10—20	17.78(b)b	6.76(e)d	7.99(d)c	6.47(e)d	6.64(d)d	54.36(a)a
弃耕地	0—5	21.49(b)b	11.39(d)c	9.54(c)d	7.82(e)e	6.59(e)f	43.17(b)a
	5—10	30.74(a)b	8.08(d)c	7.68(d)c	7.03(d)d	5.5(c)e	40.97(b)a
	10—20	23.7(a)b	8.54(d)c	5.98(e)f	7.42(d)e	8.05(c)d	46.32(b)a
草地	0—5	18.53(d)c	16.22(b)d	20.27(a)b	12.84(a)e	8.43(d)f	23.72(d)a
	5—10	25.19(c)a	23.51(a)b	18.54(a)d	8.74(c)e	5.11(d)f	18.91(e)c
	10—20	12.59(e)e	21.42(a)b	19.69(a)c	13.28(a)d	9.05(a)f	23.97(e)a
灌木林地	0—5	22.27(a)b	12.25(c)d	14.19(b)c	11.91(b)d	10.26(a)e	29.12(c)a
	5—10	24.91(c)b	13.62(c)d	14.59(b)c	10.5(a)e	7.72(b)f	28.67(c)a
	10—20	16.98(c)b	11.27(c)c	11.25(c)c	9.38(c)d	8.69(b)e	42.43(c)a
乔木林地	0—5	19.15(c)c	18.5(a)d	20.28(a)b	9.22(d)e	9.14(c)e	23.72(d)a
	5—10	26.23(b)b	15.2(b)c	14.39(b)d	9.42(b)e	7.73(b)f	27.03(d)a
	10—20	15.76(d)c	13.45(b)d	16.46(b)b	11.49(b)e	8.84(ab)f	34.00(d)a

坡耕地 0—5 cm 土层 > 5 mm 团聚体有机碳贡献率为 3.08%, 弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地分别比坡耕地提高 5.99, 5.02, 6.24 和 5.22 倍。坡耕

地 0—5 cm 土层 5—2 mm 团聚体有机碳贡献率为 4.23%, 弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地分别比坡耕地提高 1.69, 2.83, 1.90 和 3.73 倍。坡耕地 0—5

cm 土层 2—1 mm 团聚体有机碳贡献率为 5.97%，弃耕地、草地、灌木和乔木阶段比坡耕地分别提高 65%、250%、145% 和 250%。

在 0—20 cm 土层弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地 < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率均低于坡耕地。坡耕地 0—5 cm 土层 < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率为 67.01%，弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地比坡耕地分别降低 36%、65%、57% 和 65%；坡耕地 5—10 cm 土层 < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率为 65.4%，弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地比坡耕地分别降低 37%、71%、56% 和 59%；坡耕地 10—20 cm 土层 < 0.25 mm 团聚体有机碳贡献率为 54.36%，弃耕地、草地、灌木林地和乔木林地比坡耕地分别降低 15%、56%、22% 和 37%。

植被恢复各阶段 0—5、5—10 和 10—20 cm 土层 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率均低于坡耕地；0—5 和 5—10 cm 土层 > 5 mm 粒级团聚体有机碳贡献率高于坡耕地；0—5、5—10 和 10—20 cm 土层 5~2 和 2~1 mm 团聚体有机碳贡献率高于坡耕地（弃耕地 10—20 cm 土层 2~1 mm 团聚体除外）。这说明随着植被恢复，0—20 cm 土层增加的土壤有机碳更多地固定在大粒级（> 1 mm）团聚体中。

### 3 讨论

植被恢复是土壤储存碳，改善土壤养分循环的基础，通过植被恢复不仅可以改善土壤环境条件，而且使土壤成为碳的储存库。苏静等<sup>[14]</sup>的研究表明黄土丘陵区人工植被恢复提高 0—10、10—20 和 20—30 cm 土层土壤有机碳含量。赵世伟等<sup>[19]</sup>的研究表明子午岭林区 0—10 和 40—70 cm 土层土壤有机碳含量随植被恢复逐渐提高。本研究显示 0—5、5—10、10—20、20—40、40—70 和 70—100 cm 土层土壤有机碳含量及 0—100 cm 剖面上土壤有机碳含量加权平均值均随植被恢复逐渐提高，与苏静等和赵世伟等的研究结果一致。

谢锦升等<sup>[13]</sup>的研究表明植被恢复改变了土壤团聚体有机碳含量和比例分布，植被恢复时间越长，土壤有机碳含量越高。安韶山等<sup>[21]</sup>的研究表明植被恢复可增加各粒级团聚体有机碳含量。赵世伟等<sup>[15]</sup>的研究表明植被演替可增加土壤团聚体有机碳含量，但首先是增加较大粒径团聚体的有机碳含量；随着植被的进一步演替，小粒径团聚体有机碳含量也相应地增加。本研究显示 0—5 和 5—10 cm 土层植被恢复各阶段各粒级团聚体有机碳含量均比坡耕地有所提高，10—20 cm 土层土壤团聚体有机碳含量随植被恢复

变化不明显。团聚体有机碳贡献率是指各粒级团聚体中包含的有机碳量占土壤有机碳的比例。高会议等<sup>[20]</sup>对不同施肥方式下团聚体有机碳贡献率变化进行了研究，研究表明高氮处理、氮磷配施处理和有机肥处理的 > 5 mm 团聚体中的有机碳对土壤有机碳的贡献率最大。关于植被恢复过程中团聚体有机碳贡献率的研究还鲜见报道。

本研究通过分析植被恢复过程中团聚体有机碳贡献率的变化发现随着植被的恢复，0—20 cm 土层中土壤增加的有机碳更多地固定在 > 1 mm 粒级团聚体中。

### 4 结论

植被恢复不同阶段土壤有机碳含量均有随土层自下而上逐渐升高的趋势。随植被恢复，0—100 cm 土层有机碳含量得到整体逐渐提高。

0—5 和 5—10 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量随植被恢复逐渐增加，并有随植被恢复向大粒级团聚体中富集的趋势。10—20 cm 土层土壤团聚体有机碳含量随植被恢复变化不明显。

弃耕地、草地、灌木和乔木阶段 0—5、5—10 和 10—20 cm 土层 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率低于坡耕地阶段。弃耕地、草地、灌木和乔木阶段，> 5、5~2 和 2~1 mm 粒级团聚体有机碳贡献率高于坡耕地阶段。说明随着植被恢复，0—20 cm 土层土壤增加的有机碳更多地固定在 > 1 mm 粒级团聚体中。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990, 348(15): 232-234.
- [2] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C. Conservation reserve program effects on soil quality indicators [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 439-444.
- [3] IPCC. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 35-48.
- [4] 邹厚远, 程积民, 周麟. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节 [J]. *水土保持研究*, 1998, 5(1): 126-138.
- [5] 邵新庆, 王堃, 王赟文, 等. 典型草原自然恢复演替过程中植物群落动态变化 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 855-861.
- [6] 程杰, 高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征 [J]. *草地学报*, 2007, 15(3): 273-277.

- [4] 何成新, 黄玉清, 吕仕洪, 等. 石漠化地区农村能源结构调整及其生态经济效应分析: 以广西平果县龙何屯为例[J]. 广西植物, 2007, 27(6): 855-860.
- [5] 封志明. 资源科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 90, 240-241.
- [6] 许炯心. 农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(4): 385-394.
- [7] 张林秀. 农户经济学基本理论概述[J]. 农业技术经济, 1996(3): 24-30.
- [8] 曾从盛, 郑达贤. 福建典型区生态环境研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 1-27.
- [9] 陈志彪, 朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2006, 22(4): 5-9.
- [10] Cao S X, Zhong B L, Yue H, et al. Development and testing of a sustainable environmental restoration policy on eradicating the poverty trap in China's Changting County[J]. PNAS, 2009, 106(26): 10712-10716.
- [11] 何承耕. 多时空尺度视野下的生态补偿理论与应用研究[D]. 福建福州: 福建师范大学, 2007.
- [12] 黄勤楼, 黄惠珠, 陈金波. 不同池型沼气池产气性能及运行效果比较[J]. 福建农业科技, 2003(6): 49-51.
- [13] 黎镛鸿. 沼气建设“一池三改”项目的实施概况及效益分析[J]. 福建农业科技, 2006(4): 55-56.
- [14] 黎镛鸿. 长汀县农村能源节约利用现状分析及发展思路[J]. 福建能源开发与节约, 1996(4): 42-43.
- [15] 王效华. 中国农村家庭能源消费现状与发展[J]. 南京农业大学学报, 1994, 17(3): 134-141.
- [16] 王效华, 吴争鸣. 农村家庭生活用能需求预测方法的讨论[J]. 农村能源, 1999(4): 1-3.
- [17] 王效华, 冯祯民. 中国农村家庭能源消费的回顾与展望[J]. 农业机械学报, 2002, 33(3): 125-128.
- [18] 邓可蕴, 贺亮. 农村可持续发展能源战略对策与建议[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 43-54.
- [19] 查尔斯·T·亨瑞格, 斯坎特·M·达塔, 乔治·福斯特, 等. 成本与管理会计[M]. 11版. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 33.
- [20] 陈勇勤. 论中国小农经济的劳动投入问题[J]. 求索, 2006(9): 1-5.
- [21] Feng T T, Cheng S K, Min Q W, et al. Productive use of bioenergy for rural household in ecological fragile area, Panam County, Tibet in China: The case of the residential biogas model[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 2070-2078.
- [22] 虞江萍, 崔萍, 王五一. 我国农村生活能源中 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 及 TSP 的排放量估算[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 547-555.

(上接第 98 页)

- [7] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [8] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 典型草原区退耕及封育草地土壤水物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 41-44, 115.
- [9] 刘娜娜, 赵世伟, 杨永辉, 等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(4): 338-342.
- [10] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 66-70.
- [11] 何玉惠, 赵哈林, 刘新平, 等. 封育对沙质草甸土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 159-161, 181.
- [12] 苏永中, 赵哈林, 文海燕. 退化沙质草地开垦和封育对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 5-8.
- [13] 谢锦升, 杨玉胜, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
- [14] 苏静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 50-52, 179.
- [15] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量变化[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 114-117.
- [16] 李凯, 窦森, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 579-583.
- [17] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 77-88.
- [19] 赵世伟, 卢璐, 刘娜娜. 子午岭林区生态系统转换对土壤有机碳特征的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(5): 1030-1035.
- [20] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 931-938.
- [21] 安韶山, 张玄, 张扬, 等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 109-113.