

# 恢复措施对皆伐油松林团聚体活性有机碳含量的影响 ——以黄土丘陵区松峪沟流域为例

景航<sup>1</sup>, 刘国彬<sup>1,2†</sup>, 王国梁<sup>1,2</sup>, 薛蕙<sup>1,2</sup>, 姚旭<sup>1</sup>, 梁楚涛<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 712100 陕西杨凌)

**摘要:** 团聚体中的活性有机碳对土壤质量改善以及碳库动态平衡具有重要意义。为了研究皆伐后土壤团聚体活性有机碳的分布状况, 本实验选取黄土高原典型油松林为对象, 以未皆伐人工油松林为对照, 采用高锰酸钾氧化法研究皆伐后不同恢复植被群落(幼林、撂荒、灌木)地表0~20 cm层土壤团聚体中活性有机碳变化特征。结果表明: 1) 研究区土壤以大团聚体(>250 μm)为主, 自然恢复的灌木地以及撂荒地大团聚体质量分数显著增加( $P < 0.05$ )。2) 有机碳质量分数随团聚体粒径的增大而增加, 大团聚体是有机碳积累的主要场所, 并且自然恢复的灌木地团聚体有机碳质量分数最高。3) 研究区油松林团聚体低活性有机碳质量分数 > 中活性有机碳质量分数 > 高活性有机碳质量分数, 大团聚体活性有机碳质量分数大于微团聚体。研究表明, 皆伐会造成团聚体有机碳趋于活化, 其中自然恢复的灌木地活性有机碳质量分数显著增加。本研究还进一步发现大团聚体中的高活性有机碳能更好地预测土壤碳库变化。

**关键词:** 土壤团聚体; 活性有机碳; 油松人工林; 皆伐; 土壤有机碳

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2017)01-0113-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2017.01.014

## Effects of restoration measure on labile organic carbon in aggregates after clear-cutting Chinese pine forest:

A case study of Songyugou Watershed of the Loess Plateau

JING Hang<sup>1</sup>, LIU Guobin<sup>1,2</sup>, WANG Guoliang<sup>1,2</sup>, XUE Sha<sup>1,2</sup>, YAO Xu<sup>1</sup>, LIANG Chutao<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract [Background]** Labile organic carbon (LOC) is an important factor of soil organic carbon pool, and it can be more sensitive to environment change than any other factor. LOC in aggregate significantly influences soil quality and protection of carbon pool. In order to achieve the scientific management of restoration communities after clear-cutting, it is of great significance to investigate the relationship between soil aggregates and LOC in the area. **[Methods]** Concentrations of soil aggregates and LOC of restoration communities in Chinese pine plantations of the Loess Plateau after clear-cutting were investigated. There were 3 types of restoration community (shrub land, abandoned forestland and young plantation land.) and no clear-cutting forest as control (CK). Undisturbed soil samples were collected at 0–20 cm soil layer, the volume fraction of aggregate were tested using wet screening, the

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-09-13

项目名称: 国家科技支撑课题“陕北水蚀区植被功能调控技术与示范”(2015BAC01B03); 中国科学院重点部署项目“黄土丘陵区集约经营型流域生态经济协同发展技术与示范”(KFZD-SW-306-2)

第一作者简介: 景航(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向: 土壤生态学研究。E-mail: h8170166069@163.com

†通信作者简介: 刘国彬(1958—),男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向: 流域管理。E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

concentrations of soil total organic carbon were determined using  $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$  oxidation, and the concentrations of soil LOC were measured using  $KMnO_4$  oxidation. Analysis of variance and linear regression analyses were done using SPSS(12.0). [Results] 1) Macro-aggregate ( $>250\ \mu m$ ) was dominant in aggregate composition. Compared with CK, the types of restoration community after clear-cutting presented significant effects on the distribution of aggregates. The percentage of micro-aggregate significantly decreased ( $P < 0.05$ ) while that of macro-aggregate significantly increased ( $P < 0.05$ ) in shrub land and abandoned forestland. Aggregate composition in young plantation land showed no significant changes. 2) The concentration of aggregate organic carbon increased with aggregate size increasing. There was the highest concentration of organic carbon in shrub land. The concentration of aggregate organic carbon was more sensitive than that of bulk soil organic carbons to different type of restoration community. 3) The concentration of LOC in soil aggregate decreased with the improvement of labile state, and LOC concentration of macro aggregate was greater than micro aggregates. Compared with CK, the organic carbon of soil aggregate became more highly labile under different restoration communities. The concentration of aggregate LOC significantly increased in shrub land, and the concentration of LOC in macro-aggregate was more sensitive to different type of restoration community than that in any other aggregate size. 4) Results of correlation analysis showed that LOC in aggregates presented a significant correlation with organic carbon in bulk soil. The correlation of LOC in macro-aggregate with organic carbon in bulk soil was better than micro-aggregate. Highly LOC showed better correlation with organic carbon in bulk soil than lowly LOC. Therefore, highly LOC in macro-aggregate correlated best with organic carbon in bulk soil. [Conclusions] These results proved that different type of restoration community resulted in soil organic carbon unstable, and aggregate LOC in shrub land significantly increased. To some degree, our results uncovered the distribution characteristics of soil aggregate LOC in the Loess Plateau and indicated the effect of clear-cutting on aggregate labile organic carbon. According to these results, shrub land in restoration community can be a considerable management measure after clear-cutting Chinese pine forest in the Loess Plateau. Based on previous researches, our findings indicate that highly LOC in macro-aggregate can be a better index for measuring the dynamic of soil organic carbon than LOC in bulk soil.

**Keywords:** soil aggregate; labile organic carbon; Chinese pine forest; clear-cutting; soil organic carbon

团聚体是土壤结构的重要组成部分<sup>[1]</sup>,是评价土壤质量的一个重要指标<sup>[2]</sup>。有机碳能黏合矿物颗粒形成稳定的土壤团聚结构,是团聚体形成过程中的主要胶结物质<sup>[3]</sup>。团聚体和有机碳是土壤肥力的基础,二者之间关系密切<sup>[4]</sup>。目前关于团聚体有机碳的研究报道已有很多。陈建国等<sup>[5]</sup>研究指出土壤的固碳过程伴随着团聚体的形成、稳定和周转,而有机碳中的活性组分在这个过程中最为活跃。W. Logninow 等<sup>[6]</sup>根据土壤有机碳被浓度为 333、167 和 33 mmol/L 的高锰酸钾氧化的数量将活性有机碳分为高、中和低 3 个活性级别。虽然活性有机碳只占土壤有机碳很少的一部分,但是它在土壤碳库源、汇的状态转换及反映和预测土壤质量变化方面具有重要意义<sup>[7]</sup>。以往研究主要针对全土活性碳变化进行分析<sup>[8]</sup>,而团聚体中的活性有机碳由于

其特殊的结构以及团聚体的保护作用可能会对土壤的碳汇功能产生深刻影响<sup>[9]</sup>;因此开展团聚体及其活性有机碳的研究是揭示土壤碳库动态变化的重要途径<sup>[10]</sup>。

森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分,全球土壤有机碳库的 70% ~ 73% 是森林土壤有机碳<sup>[11]</sup>。森林土壤碳库的微弱变化都会导致大气  $CO_2$  的显著变化<sup>[12]</sup>。研究森林土壤团聚体和活性有机碳可以揭示森林土壤碳库动态过程,为探索全球碳循环提供参考<sup>[10]</sup>。当前森林土壤活性有机碳研究中,存在的问题主要是影响因子和变化过程不清楚,这也是不能预测气候变化的主要原因<sup>[13]</sup>。已有的研究表明,森林皆伐后土壤有机碳变化各异<sup>[14]</sup>,并且皆伐后恢复的不同植被群落对土壤有机碳组分和团聚体含量的影响目前还不清楚;因此探索皆伐

后恢复的不同植被群落对土壤团聚体和活性有机碳分布的影响,评价不同恢复群落的固碳效益,对黄土高原地区水土保持工作具有指导意义,可为林业经营管理和生态安全建设提供参考依据。

## 1 研究区概况

实验在陕西省延安东南部宜川县铁龙湾林场松峪沟半阳坡进行(E 110°06', N 35°39'),坡度 25°,土壤类型为灰褐色森林土,样地为典型的黄土丘陵区油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)林。实验区地质、土壤、植被条件基本一致,具有开展研究森林水土保持效益实验的条件。实验区属黄龙山系,海拔 1 000~1 200 m,年平均气温 9.8 °C,年平均降水量 574.4 mm,多集中在 7—9 月。土壤表层有机质含量丰富,达 13.6 mg/g。林下土壤属碱性土,pH 值约 8.6,每 100 g 干土阳离子交换量为 13.01 mg,全氮、全磷质量分数分别为 0.39 mg/g 和 0.63 mg/g。

供实验用油松人工林为 1963 年植造,现保存 1 400~1 800 株/hm<sup>2</sup>,树高 9.5~12.5 m,胸径 10~12 cm,郁闭度 0.7。森林群落组成特征为:乔木层油松,零星伴生有杜梨(*Pyrus betulifolia* Bunge)、山杏(*Armeniaca sibirica* (L.) Lam);灌木层有黄刺梅(*Rosa xanthina* L.)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)等,覆盖度 10%~20%;草本层优势种有大披针苔草(*Carex lanceolata* Boott)盖度约 40%。

## 2 试验设计与方法

1999 年皆伐后,在油松人工林地,用铁丝围封 12 块面积为 50 m<sup>2</sup> 实验用小区,保证不同小区之间环境条件基本一致。参考前人对皆伐后不同恢复群落类型的相关研究结果<sup>[14-15]</sup>并结合当地常见植被种群以及坡耕地特征。设置 3 种常见皆伐后恢复的植被群落:皆伐后更新为油松幼林、皆伐后自然更新为灌木、皆伐后翻耕并撂荒形成草地共 3 种恢复林地,并以未皆伐林地为对照(CK)进行实验,每种措施设置 4 个重复。共 16 块实验小区用铁丝围封管理。灌木地以胡枝子群落为主,而撂荒地以披针苔草群落为主。

2015 年 10 月采集不同处理原状土壤样品,土壤质地为中壤土,结构较疏松,平均土壤密度 2.635 g/cm<sup>3</sup>,表层土壤密度 1.1 g/cm<sup>3</sup>左右。样品采集时要去除地表植被与枯枝落叶,取样深度为 0~20 cm,每个样地采 3 个原状土样装入方形塑料盒运回

实验室。将同一样地内的 3 个原状土混合均匀,立刻将土样过 8 mm 土筛,较大的土块沿着自然裂隙轻轻破碎最后风干土样,以便进行土壤团聚体及活性有机碳的测定。

采用湿筛法<sup>[16]</sup>测定土壤水稳性团聚体质量分数:取 100 g 过 8 mm 筛的土样在去离子水中静置 5 min,撇去水面上漂浮的杂质,在 250 μm 样品筛内湿筛 2 min,频率控制在 50 次/min,振幅约 3 cm;通过 250 μm 筛的土样在 53 μm 筛上湿筛 2 min;>250 μm 的土粒为大团聚体,250~53 μm 为微团聚体,冲出来的土壤黏粉结构通过离心处理,在 270 g 下离心 3 min 得到黏粒,加入凝聚剂在 2 000 g 下离心 10 min 得到粉粒。所有样品测定土壤质量后用于活性有机碳的测定。

活性有机碳含量测定采用 Logninow 提出的 KMnO<sub>4</sub>氧化法测定<sup>[6]</sup>:根据 KMnO<sub>4</sub>浓度的变化得出活性有机碳的质量分数。称取 3 g 土壤样品于 50 mL 离心管,根据所要测定有机碳的活性加入不同浓度(333、167 和 33 mmol/L)的 KMnO<sub>4</sub>溶液 25 mL,放入震荡器震荡 1 h 后以 2 000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min。用去离子水稀释上清液 250 倍,然后在 565 nm 光下比色得出不同活性有机碳质量分数。总有机碳采用重铬酸钾氧化外加加热法测定。

数据统计整理以及做图基于 Excel 2010;不同恢复群落之间各指标的差异性检验采用 SPSS 中的 LSD 和 Duncan 方法( $P < 0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同恢复群落团聚体分布

土壤结构以大团聚体为主,皆伐后不同恢复群落会造成水稳性团聚体分布的显著变化(表 1)。与不采取任何干扰的对照处理相比,撂荒地和灌木地的大团聚体比例显著增加而幼林地大团聚体比例下降但变化不显著。另外,撂荒地和灌木地的微团聚体比例有显著降低的趋势而幼林地微团聚体比例增加不显著。不同恢复群落土壤黏粒、粉粒团聚体比例很少,并且不同处理变化不明显。

### 3.2 不同恢复群落团聚体有机碳质量分数

团聚体有机碳质量分数:大团聚体 > 微团聚体 > 黏粉粒。灌木地团聚体有机碳质量分数与对照相比显著增加(表 2),其他处理下变化不显著。如表 2 所示,不同处理下林地全土的有机碳质量分数没有显著变化,而团聚体中的有机碳质量分数变化显著。

表 1 不同恢复群落土壤水稳性团聚体组成

Tab. 1 Composition of soil water-stable aggregate at different restoration communities

%

处理 Treatment	大团聚体	微团聚体	黏粒	粉粒
	Macro-aggregate	Micro-aggregate	Clay	Silt
	>250 μm	250 ~ 53 μm	<53 μm	<53 μm
对照 CK	66.36 ± 3.66b	25.99 ± 3.51ab	7.00 ± 0.80a	0.15 ± 0.01c
幼林 Young plantation	63.94 ± 1.60b	28.47 ± 2.03a	7.64 ± 1.46a	0.18 ± 0.01bc
撂荒 Abandoned forestland	72.35 ± 1.08a	19.52 ± 1.38c	7.93 ± 2.22a	0.20 ± 0.05ab
灌木地 Shrub land	72.46 ± 0.97a	23.36 ± 1.81bc	4.62 ± 0.45a	0.22 ± 0.01a

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 下同。Note: Different letters in the same column refer to significant difference among different treatments at 0.05 levels; CK indicates control treatment. The same below.

表 2 不同恢复群落水稳性团聚体有机碳质量分数

Tab. 2 Soil organic carbon concentration of water-stable aggregates at different restoration communities

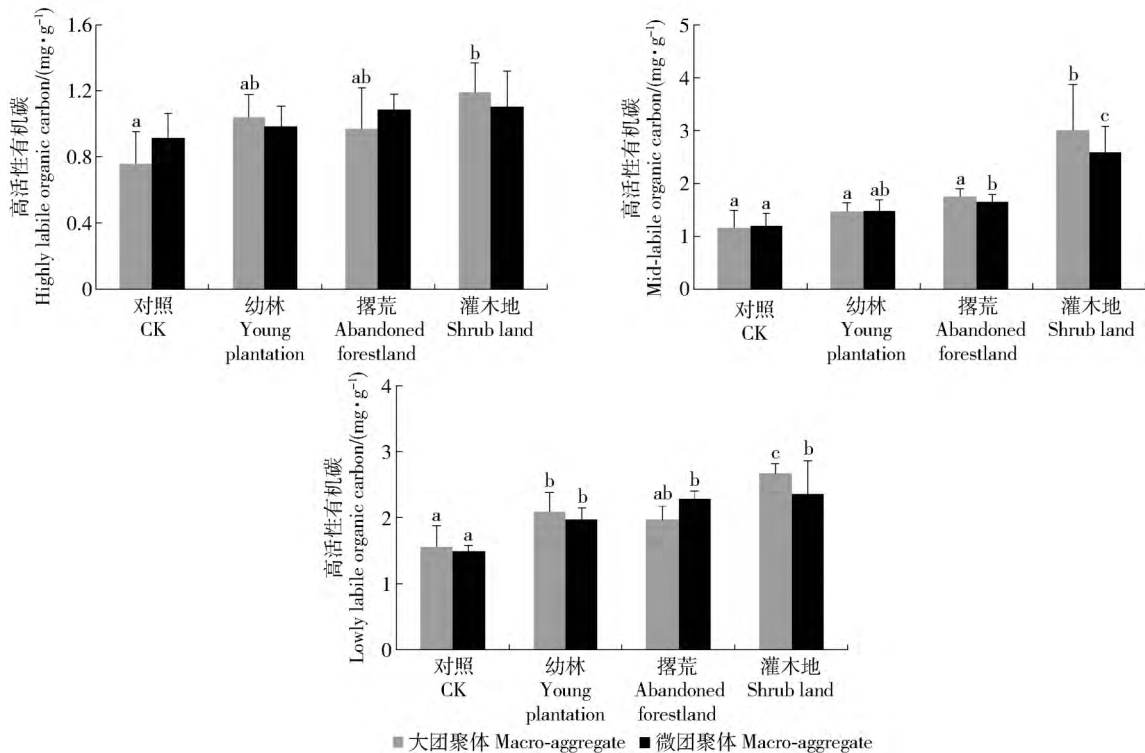
mg/g

处理 Treatment	全土 Bulk soil	大团聚体 Macro-aggregate	微团聚体 Micro-aggregate	黏粉粒 Clay-silt
		Macro-aggregate	Micro-aggregate	Clay-silt
		> 250 μm	250 ~ 53 μm	< 53 μm
对照 CK	9.59 ± 2.75	10.10 ± 1.36b	8.30 ± 1.33c	7.90 ± 1.28b
幼林 Young plantation	10.10 ± 1.02	11.53 ± 1.11b	11.00 ± 1.21b	8.72 ± 0.68b
撂荒 Abandoned forestland	9.96 ± 1.89	9.55 ± 1.45b	10.39 ± 1.32bc	6.81 ± 1.59b
灌木地 Shrub land	12.91 ± 1.81	15.43 ± 2.25a	13.45 ± 1.56a	11.16 ± 3.07a

### 3.3 不同恢复群落团聚体活性有机碳质量分数

如图 1 所示, 团聚体活性有机碳质量分数随其活性的提高而降低, 大团聚体中的活性碳质量分数

普遍高于微团聚体。与对照相比, 皆伐后不同恢复群落团聚体活性有机碳呈增加趋势, 皆伐后自然恢复的灌木地团聚体中活性碳的质量分数最高, 大团



图中不同小写字母表示该粒径下不同群落的活性碳质量分数有显著差异  $P < 0.05$ 。Note: Values with different letters refer to significant difference at 0.05 levels among the treatments.

图 1 不同恢复群落水稳性团聚体活性有机碳质量分数

Fig. 1 Labile organic carbon contents in soil water-stable aggregates of different restoration community

聚体中的活性有机碳对群落的变化响应最显著。

### 3.4 团聚体活性有机碳与土壤总有机碳的相关性

团聚体中的中、高活性有机碳与全土有机碳均

极显著相关(表 3),大团聚体活性有机碳与全土有机碳相关性较微团聚体更为显著,而活性越高相关性越显著。

表 3 土壤总有机碳与水稳性团聚体活性有机碳的相关系数  $R$

Tab.3 Correlation between total soil organic carbon and aggregate labile organic carbon in soil water-stable

恢复群落 Restoration community	$R$	恢复群落 Restoration community	$R$
大团聚体高活性有机碳 Content of highly labile organic carbon in macro-aggregate	0.793**	微团聚体高活性有机碳 Content of highly labile organic carbon in micro-aggregate	0.751**
大团聚体中活性有机碳 Content of mid-labile organic carbon in macro-aggregate	0.671**	微团聚体中活性有机碳 Content of mid-labile organic carbon in micro-aggregate	0.615**
大团聚体低活性有机碳 Content of lowly labile organic carbon in macro-aggregate	0.549*	微团聚体低活性有机碳 Content of lowly labile organic carbon in micro-aggregate	0.407

注 Note: \* :  $P < 0.05$ ; \*\* :  $P < 0.01$ 。

## 4 讨论

### 4.1 不同恢复群落团聚体分布

不同的土壤利用方式会改变土壤结构,导致团聚体的重新分布<sup>[17]</sup>。研究发现,大团聚体是研究区土壤的主要组成结构,这与李娟等<sup>[17]</sup>、孙天聪等<sup>[18]</sup>和魏亚伟等<sup>[19]</sup>的研究结果基本一致。土壤肥力与大团聚体含量的多少直接相关,而且大团聚体含量越高土壤稳定性也越高<sup>[16]</sup>,可见,研究区人工油松林土壤质量有所改善。与对照相比,撂荒地和灌木地的大团聚体含量显著增加,而微团聚体含量显著降低,幼林地土壤大团聚体的减小和微团聚体增加趋势均不显著。由等级发育模型<sup>[20]</sup>可知,大团聚体是由微团聚体在各类胶结物质的作用下形成的,而各种有机碳就是最重要的胶结物质。皆伐后自然恢复的灌木地能促进微团聚体向大团聚体转化可能是由于形成灌木地后自然恢复提高土壤各种有机碳的输入造成的,撂荒地大团聚体含量增加可能主要是由于草本植物根系影响表层土壤团聚体组成导致的,而皆伐后恢复的油松幼林地因地表枯落物的减少而导致土壤有机碳含量降低,但是短期内不会显著改变团聚体组成。

### 4.2 不同恢复群落团聚体有机碳分布

团聚体的形成过程需要有机碳的胶结作用,而形成的团聚结构也是有机碳稳定存在的主要场所,两者之间相互依存<sup>[21]</sup>。有机碳质量分数随着团聚体粒径的增大而增加,与安韶山等<sup>[22]</sup>和赵世伟等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。这主要是由于有机碳可以将微团聚体胶结成大团聚体<sup>[24]</sup>,并且大团聚体中处于分解状态的枯落物可以增加有机碳含量<sup>[25]</sup>。大

团聚体是有机碳积累的主要场所,因此大团聚体中有机碳成为研究区土壤总有机碳的主要贡献部分。皆伐后自然恢复的灌木地处理团聚体有机碳质量分数显著增加( $P < 0.05$ ),而其他处理没有显著变化。胡枝子灌木群落土壤团聚体有机碳含量相比于对照有所增加,结合不同处理间团聚体的分布特征可表明灌木地土壤有机碳积累较对照有所增加。其主要原因可能是胡枝子属豆科植物,而栽植豆科植物后土壤氮、有机碳以及微生物量均能显著增加<sup>[26]</sup>。其他群落团聚体有机碳质量分数没有显著变化可能与有机碳含量指标受多种组分影响变化迟缓有关。另外,从表 2 中可以看出不同恢复群落全土有机碳质量分数相比团聚体有机碳质量分数变化更小,与毛霞丽等<sup>[27]</sup>在浙江稻田中取得的研究结果一致,而这与全土有机碳组成成分复杂有很大关系。

### 4.3 不同恢复群落团聚体活性有机碳分布

团聚体中的活性有机碳由于受到物理保护的作用而隔离微生物的分解作用可能会造成土壤碳汇功能的转变,因此团聚体中活性有机碳对土壤碳库稳定和碳汇具有重要意义<sup>[8]</sup>。团聚体中低活性有机碳质量分数 > 中活性有机碳质量分数 > 高活性有机碳质量分数;大团聚体活性有机碳质量分数大于微团聚体(图 1),与安娟娟等<sup>[28]</sup>、Blair 等<sup>[29]</sup>得出的结论一致。团聚体活性有机碳对外界变化有很强的敏感性,研究皆伐后不同恢复群落团聚体活性碳分布的变化可以用来预测土壤碳库对人为干扰与自然恢复响应的动态过程。研究表明油松林皆伐后恢复的群落团聚体活性碳质量分数均不同程度增加,土壤碳库活性组分积累加快。其中,皆伐后自然恢复的灌木地团聚体活性有机碳质量分数最高,相比于其

他恢复群落而言,其土壤活性有机碳积累量最大且土壤质量相对明显提高。大团聚体活性有机碳对恢复群落改变的响应最显著,这主要是由于大团聚体中累积了土壤活性碳组分的绝大部分。类似的研究表明不同土地利用方式下土壤活性有机碳会有显著变化,但也有研究指出土地利用方式对土壤活性有机碳含量没有显著影响。这些不同的结果说明土地利用方式对土壤活性碳的影响过程十分复杂,不同区域环境会有不同的响应结果<sup>[30]</sup>。本研究显示皆伐会扰动森林土壤团聚体活性有机碳动态过程,其中大团聚体活性有机碳对皆伐的响应最明显;不同恢复群落团聚体有机碳不同程度的活化,其中皆伐后自然恢复的灌木地团聚体有机碳活化最显著。这可能与胡枝子群落改变土壤表层有机碳输入和输出动态平衡以及土壤中不同活性有机碳相互转化有关,还需进一步的研究来揭示这其中的机理。

#### 4.4 团聚体活性有机碳与土壤总有机碳的相关性

活性有机碳含量可以作为预测和评价土壤质量的敏感指标<sup>[31]</sup>。相关研究也证实即使在不同区域环境下活性有机碳都可以作为评价土壤碳库变化的敏感指标<sup>[8,17]</sup>,本研究的结果也对此进行了证实(图3)。另外,通过对不同粒径团聚体3种活性有机碳与土壤总碳的相关分析发现,团聚体活性有机碳与土壤总有机碳之间的相关性随着团聚体粒径的增大和有机碳活性的提高而增大,大团聚体中的高活性有机碳与土壤总有机碳的相关性最为显著。因此,大团聚体中的高活性有机碳可以更好的作为预测和评价土壤碳库动态变化的敏感指标。

## 5 结论

黄土高原油松林土壤以大团聚体( $>250\ \mu\text{m}$ )为主,皆伐会造成团聚体分布显著变化,自然恢复的灌木地以及撂荒地大团聚体含量显著增加说明自然恢复过程有助于土壤质量的提高。团聚体中的有机碳是土壤碳库的重要组成部分,黄土高原油松林土壤团聚体有机碳质量分数随团聚体粒径的增大而增加,表明大团聚体是有机碳积累的主要部分。相比于对照和其他恢复群落而言,自然恢复的灌木地团聚体有机碳质量分数显著增加。人工油松林团聚体活性有机碳组分中,低活性有机碳质量分数 $>$ 中活性有机碳质量分数 $>$ 高活性有机碳质量分数,并且大团聚体中的活性有机碳质量分数大于微团聚体。皆伐会造成团聚体有机碳库趋于活化,其中皆伐后自然恢复的灌木地活性有机碳质量分数显著增加,

土壤有机碳活性成分积累量提高,土壤碳库变化波动最大,不过其中的机理有待于进一步探索。另外,在活性有机碳可以用来预测土壤碳库变化的基础上,证实土壤大团聚体中的高活性有机碳可以作为未来预测土壤碳库变化的更佳指标。

## 6 参考文献

- [1] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1): 81.  
LU Jinwei, LI Zhanbin. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil & Water Conservation, 2002, 9(1): 81.
- [2] 李阳兵,谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(4): 122.  
LI Yangbin, XIE Deti. Features of water-stable soil aggregate structure under different land use in Karst mountains [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(4): 122.
- [3] FELLER C, BEARE M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics [J]. Geoderma, 1997, 79(1/2/3/4): 69.
- [4] 孙彩丽,薛蕙,刘国彬,等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,(3): 550.  
SUM Caili, XUE Sha, LIU Guobin, et al. Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, (3): 550.
- [5] 陈建国,田大伦,闫文德,等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(5): 74.  
CHEN Jianguo, TIAN Dalun, YAN Wende, et al. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(5): 74.
- [6] LOGINOW W, WISNIEWSKI W, GONET S S, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1): 47.
- [7] WANG Jiaoyue, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al. Changes in labile soil organic carbon fractions in wetland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China [J]. Catena, 2012, 96(3): 83.
- [8] 华娟,赵世伟,张扬,等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报,2009,29(9): 4613.  
HUA Juan, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al. Distribution characteristics of labile organic carbon in soil ag-

- gregates in different stages of vegetation restoration of grassland in Yunwu Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4613.
- [9] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099.
- [10] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布 [J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1025.  
XIANG Chenghua, LUAN Junwei, LUO Zongshi, et al. Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1025.
- [11] BIRDSEY R A, PLANTINGA A J, HEATH L S. Past and prospective carbon storage in United States forests [J]. *Forest Ecology & Management*, 1993, 58(1/2): 33.
- [12] SUNDQUIST E T. The global carbon dioxide budget [J]. *Science*, 1993, 259(5097): 934.
- [13] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99.  
ZHOU Li, LI Baoguo, ZHOU Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(1): 99.
- [14] 郭剑芬. 皆伐火烧对杉木林和栲树林碳、氮动态的影响 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006: 20.  
GUO Jianfen. Effects of clear-cutting and slash burning on dynamics of carbon and nitrogen in Chinese fir and *Castanopsis fargesii* forests [D]. Xiamen University, 2006: 20.
- [15] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 等. 不同森林恢复类型对土壤微生物群落的影响 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2019.  
ZHENG Hua, OUYANG Zhiyuan, WANG Xiaoke, et al. Effects of forest restoration patterns on soil microbial communities. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2019.
- [16] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367.
- [17] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2147.  
LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2147.
- [18] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1841.  
SUN Tiancong, LI Shiqing, SHAO Mingan. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 4(11): 857.
- [19] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 桂西北喀斯特土壤对生态系统退化的响应 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1308.  
WEI Yawei, SU Yirong, CHEN Xiangbi, et al. Responses of soil properties to ecosystem degradation in Karst region of northwest Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1308.
- [20] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141.
- [21] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447.  
LIU Zhongliang, YU Wangtai. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 447.
- [22] 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.  
AN Shaoshan, ZHANG Xuan, ZHANG Yang, et al. Distribution of Organic Carbon in Different Soil Aggregates Size During Revegetation in Hilly-Gully Region of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2007, 21(6): 109.
- [23] 赵世伟, 苏静, 吴金水, 等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 114.  
ZHAO Shiwei, SU Jing, WU Jinshui, et al. Changes of soil aggregate organic carbon during process of vegetation restoration in Ziwuling [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2006, 20(3): 114.
- [24] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627.
- [25] TISDALL J M. Stabilization of soil aggregates by plant roots [D]. University of Adelaide, 1980: 6.
- [26] 贾举杰, 李金花, 王刚, 等. 添加豆科植物对弃耕地土壤养分和微生物量的影响 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(5): 33.

- JIA Jujie , LI Jinghua , WANG Gang , et al. Effects of the introduction of legume species on soil nutrients and microbial biomass of abandoned-fields [J]. *Journal of Lanzhou University ( Natural Science Edition )* , 2007 , 43( 5) : 33.
- [27] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2015( 4) : 828.
- MAO Lixia , LU Kouping , HE Lingzhi , et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica* , 2015 , 52( 4) : 828.
- [28] 安娟娟, 陈少锋, 赵发珠, 等. 不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化 [J]. *农业环境科学学报*, 2014 , 33( 5) : 985.
- AN Juanjuan , CHEN Shaofeng , ZHAO Fazhu , et al. Changes of soil labile organic carbon and carbon management index under different artificial vegetations [J]. *Journal of Agro-Environment Science* , 2014 , 33( 5) : 985.
- [29] BLAIR G J , CONTEH A. The distribution and relative losses of soil organic carbon fractions in aggregate size fractions from cracking clay soils ( Vertisols) under cotton production [J]. *Australian Journal of Soil Research* , 1998 , 36( 2) : 257.
- [30] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较 [J]. *植物生态学报*, 2004 , 28( 5) : 657.
- WU Jianguo , ZHANG Xiaoquan , XU Deying. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan mountain forest zone [J]. *Acta Phytocologica Sinica* , 2004 , 28( 5) : 657.
- [31] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究 [J]. *应用生态学报*, 2005 , 16( 10) : 1843.
- XU Mingxiang , LIU Guobin , ZHAO Yunge. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2005 , 16( 10) : 1843.