

DOI: 10.5846/stxb202101180187

潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 董凌勃, 吕文文, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化. 生态学报, 2021, 41(13): 5195-5203.

Pan Y J, He Z R, Liu Y L, Dong L B, Lü W W, Shangguan Z P, Deng L. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon during secondary forest succession in the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5195-5203.

# 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化

潘英杰<sup>1,2</sup>, 何志瑞<sup>3</sup>, 刘玉林<sup>1,2</sup>, 董凌勃<sup>1,4</sup>, 吕文文<sup>4</sup>, 上官周平<sup>1,4</sup>, 邓蕾<sup>1,2,4,\*</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 中国科学院大学研究生院, 北京 100049

3 甘肃省子午岭林业管理局合水分局连家砭林场, 合水 745000

4 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 土壤团聚体物理保护是促进有机碳积累主要机制之一。以黄土高原子午岭林区天然次生林植被演替群落为对象, 研究从农田、草地(白羊草, *Bothriochloa ischaemum*)、灌木林(沙棘, *Hippophae rhamnoides*)、先锋林(山杨, *Populus davidiana*)到顶级林(辽东栎, *Quercus liaotungensis*) 5 个植被演替阶段 0—20 cm 土壤团聚体稳定性和团聚体有机碳的动态变化, 并分析团聚体有机碳的影响因素。结果表明: 土壤团聚体稳定性随着植被演替显著提高 ( $P < 0.05$ ), 顶级林的团聚体稳定性最高; 土壤有机碳含量和各粒径土壤团聚体 (> 2 mm, 2—0.25 mm, 0.25—0.053 mm, < 0.053 mm) 有机碳含量均随着植被演替而增加。除草地 0.25—0.053 mm 团聚体有机碳含量最高外, 其他演替阶段均为 0.25—2 mm 粒径最高。根系生物量、凋落物生物量、微生物生物量碳、团聚体稳定性均与团聚体有机碳含量呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。总体而言, 长期植被演替有助于团聚体稳定性和团聚体有机碳累积。

**关键词:** 植被演替; 团聚体; 有机碳; 黄土高原

## Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon during secondary forest succession in the Loess Plateau, China

PAN Yingjie<sup>1,2</sup>, HE Zhirui<sup>3</sup>, LIU Yulin<sup>1,2</sup>, DONG Lingbo<sup>1,4</sup>, LÜ Wenwen<sup>4</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1,4</sup>, DENG Lei<sup>1,2,4,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Lianjiabian Forest Farm, Ziwuling Forestry Administration, Heshui 745000, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Vegetation restoration plays an important role in soil structure and nutrients. The effects of vegetation restoration on the aggregate stability and soil carbon storage have been widely studied, but the distribution of aggregate associated organic carbon and the effects of plants on aggregate associated organic carbon in the secondary forest succession are still unclear. This paper studied the stability of soil aggregates and the changes of soil aggregate-associated organic carbon under the succession sequence of the secondary forests in Ziwuling forest region of the Loess Plateau, China. We discussed the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877538); 国家林业和草原局林草科技创新人才计划项目(20201326015)

收稿日期: 2021-01-18; 修订日期: 2021-04-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

dynamics of aggregate-associated organic carbon and its influencing factors following the secondary forest succession. In the field investigation, five vegetation succession stages were selected: farmland (CL), grassland (GL), shrub (S), pioneer forest (PF), and climax forest (CF). Soil samples in 0—20 cm were collected and the aggregates were separated by wet sieving. The stability of aggregates was characterized by mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and percentage of water stable aggregates (WAS). The organic carbon, root biomass, litter biomass and microbial biomass carbon (MBC) of soil and aggregates were measured. The dynamics of soil aggregate-associated organic carbon and its influencing factors were analyzed. The results showed that soil organic carbon contents increased with vegetation succession, which showed that  $CF > PF > S > CL$ , and the organic carbon contents of aggregates increased more significantly from grassland to pioneer arbor stage. The succession of vegetation communities significantly increased the content of soil organic carbon. The stability of soil aggregate increased significantly with vegetation succession ( $P < 0.05$ ). The stability of soil aggregate in climax forest was the highest, and the contents of macroaggregate  $> 0.25$  mm in pioneer forest and climax forest were higher than that in farmland. The organic carbon contents of soil aggregates with different particle sizes increased with vegetation succession, and the organic carbon content of 2—0.25 mm was the highest in each succession stage. The stability of aggregates was positively correlated with the soil organic carbon. Root biomass, litter biomass and the MBC were significantly positively correlated with aggregate-associated organic carbon content. The main factors affecting soil organic carbon contents of aggregates were different in different particle sizes. Except the stages of vegetation succession, soil total organic carbon, litter biomass and soil aggregate stability were the main factors affecting the organic carbon content in the macroaggregates ( $> 0.25$  mm), middle aggregates (0.25—0.053 mm), and microaggregates ( $< 0.053$  mm). The study suggests that vegetation succession plays an important role in the stability of aggregates and the fixation of organic carbon in aggregates.

**Key Words:** vegetation succession; soil aggregate; organic carbon; the Loess Plateau

土地利用变化是影响土壤碳“源/汇”功能转变的关键因素之一<sup>[1]</sup>,能够改变土壤团聚体稳定性、土壤有机碳在团聚体中的分布、植物残体的分解能力、土壤微生物群落等<sup>[2-3]</sup>。土壤总有机碳(TOC)在较短时间内对土地利用变化引起的改变不甚敏感,并且对总有机碳的测定很难准确、及时地反映土壤碳库的内在变化<sup>[4]</sup>,而土壤团聚体有机碳作为土壤碳库的组成之一,能够较好地反映土地利用与管理对土壤有机质数量和质量的影响,其对土地利用变化的响应更为敏感<sup>[2, 5]</sup>。基于土壤有机碳在不同团聚体中的差异,阐明土壤团聚体内有机碳含量和分布特征,对于揭示因土地利用变化而引起的土壤有机碳变化动态和稳定性机制具有重要的意义。

植被演替是土地利用的主要变化过程,它是在自然条件下的植被恢复过程,在这个过程中,地上植被逐步变化,地下碳积累也随之发生改变,从而造成不同演替阶段 TOC 积累速率明显不同<sup>[6]</sup>。不同土地利用类型的土壤有机质因凋落物的数量和质量以及环境的不同而发生变化,影响土壤的有机碳含量以及团聚体中有机碳的稳定性和含量<sup>[7]</sup>。植被演替通过加速植物群落发展和提高土壤有机质输入,进而促进土壤团聚体的形成<sup>[8-9]</sup>和提高团聚体稳定性<sup>[10]</sup>。团聚体在有机碳的储存、供应及转化能力等方面发挥着重要作用,其有机碳含量显著影响土壤的养分保持能力和碳固存<sup>[11]</sup>。不同粒径团聚体的有机碳含量可以用来微观表征有机质与有机碳矿化速率之间的平衡。目前国内外关于植被恢复对土壤团聚体有机碳的影响主要存在两种观点。大多数认为植被恢复首先增加大团聚体的有机碳,随后微团聚体有机碳也逐渐地增加,而且植被恢复中大团聚体有机碳累积速度快于微团聚体以及粉粒与黏粒结合态有机碳的累积速度<sup>[2, 12]</sup>。但是,也有研究发现植被恢复首先增加土壤微团聚体有机碳,并且微团聚体有机碳对 TOC 贡献较大<sup>[13]</sup>。然而,现有研究多集中在短期的植被恢复过程<sup>[2, 14]</sup>,而对长期植被恢复过程(如:植被演替过程)的研究较少。

子午岭是黄土高原目前保存较完好的天然次生植被区,经过长期的恢复和保护,在该区形成了时间跨度

大(约 160a)、保存完整(从弃耕地到成熟次生林)、受干扰较小的天然次生林植被演替系列<sup>[15]</sup>,为开展长期植被恢复中土壤有机碳动态及稳定机制研究提供了理想的平台。有关该区域植被演替对团聚体有机碳影响的报道较少,且尚不清楚长期植被演替过程中,植物、微生物等对土壤团聚体有机碳的影响。因此,本文以天然次生林植被演替序列为研究对象,探究了天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳的动态变化,以及分析凋落物、根系、微生物和团聚体稳定性等与团聚体有机碳的关系,以期明确长期植被恢复中土壤团聚体碳库动态与影响因素,为深入认识黄土高原植被恢复中土壤有机碳库稳定性机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省合水县连家砭林场的子午岭林区,属于北温带半湿润半干旱地区,年平均气温 10 ℃,年均降雨量为 587 mm,主要集中在 7—9 月。研究区的海拔在 1211—1453 m 之间。土壤大部分是石灰性褐土,由原生或次生的黄土形成,厚度为 50—130 m。该区为温凉半干旱区黄土覆盖的森林草原地带,适于山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等落叶林和温性针叶林发育,灌木以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,草本植物以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等为主(表 1)。根据历史资料记载和咨询当地土地使用历史情况,农田弃耕后按照自然演替序列,演替到草地(白羊草),灌木(沙棘)、先锋林(山杨)和顶级林(辽东栎)时,大约需要的演替时间分别为 30、60、90、160a<sup>[3, 6, 15]</sup>。

### 1.2 实验设计

选择研究区天然次生林植被演替序列为对象,按照农田、草地、灌木、先锋林、顶级林演替序列,分别选择各演替阶段代表性的植被类型:玉米地、白羊草、沙棘、山杨、辽东栎。2020 年 9 月在每个植被演替阶段,分别选择 3 个 20 m×20 m 样地,每个样地随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方,选取海拔、坡度、坡向和环境基本相同的样地,以减小实验样地带来的误差。收集样方内的未分解的凋落物,每个样方随机钻取 3 个土壤样品(0—20 cm,直径 9 cm),过 2 mm 筛,去除杂物混合成一份样品,用于测土壤理化性质,同时分拣土壤样品中的根系,水洗烘干后用于计算根系生物量。从每个样方周围 1 m 范围内的 0—20 cm 土层中取原状土样,自然风干后进行团聚体稳定性分析以及土壤团聚体有机碳的测定。

表 1 研究区地理信息和土壤理化性质

Table 1 Geographical information and soil physical and chemical properties of the study area (mean±S.D.)

地点 Location	农田 Cropland	草地 Grassland	灌木 Shrub	先锋林 Pioneer forest	顶级林 Climax forest
经纬度/(°)	108.464—108.473 E	108.521—108.539 E	108.521—108.529 E	108.527—108.534 E	108.535—108.540 E
Latitude and longitude	36.068—36.078 N	36.072—36.090 N	36.083—36.089 N	36.044—36.055 N	36.047—36.051 N
海拔 Altitude/m	1474—1476	1319—1323	1352—1354	1450—1455	1440—1450
盖度 Coverage/%	—	73.3±7.07	79.7±2.5	88.7±4.04	82.2±3.79
pH	8.70±0.18	8.57±0.08	8.31±0.08	8.35±0.14	8.34±0.12
含水量 Water content/%	11.473±0.75	18.547±1.94	15.857±1.97	13.222±1.04	14.422±1.40
凋落物生物量/(g/kg) Litter biomass	175.06±8.24	39.71±13.00	124.54±25.30	144.44±27.83	231.55±33.09
微生物生物量碳/(g/kg) Microbial biomass carbon	1.51±0.58	2.47±0.35	4.94±0.71	5.49±0.97	4.56±0.68
根系生物量/(g/kg) Root biomass	92.57±16.68	126.50±25.04	133.58±26.82	296.22±36.07	409.77±47.01

### 1.3 测定方法

土壤团聚体采用分级湿筛法<sup>[16]</sup>,收集 4 个团聚体粒级 > 2 mm、2—0.25 mm、0.25—0.053 mm 和

<0.053 mm。将土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和水稳性团聚体百分比(WAS)。分别按照以下公式计算<sup>[17]</sup>：

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n w_i d_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln d_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

$$\text{WAS} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

其中  $d_i$  是筛分出来的任意粒径范围内微团聚体的平均直径(mm);  $w_i$  是任意粒径范围内微团聚体的质量占土样干重的百分比(%)。  $M_{r>0.25}$  为 >0.25 mm 水稳性团聚体质量(g);  $M_T$  为团聚体总量(g)。

采用 pH-3C 型酸度计测定了土壤 pH(土水比 1:5)。TOC 含量、团聚体有机碳含量(SAOC)通过  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$  氧化法测定<sup>[18]</sup>。土壤微生物生物量碳(MBC)采用改进的氯仿熏蒸  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法测定<sup>[19]</sup>。计算公式：

$$\text{MBC} = \text{EC}/\text{KEC}$$

其中 MBC 表示微生物生物量碳质量分数(mg/kg); EC 表示熏蒸土样有机碳量与未熏蒸土样有机碳之差(mg/kg); KEC 表示微生物体中碳被浸提出来的比例,取 0.45。

#### 1.4 数据分析

利用 SPSS 25.0 对不同植被演替阶段土壤团聚体有机碳含量、MWD、GMD、WAS、TOC 含量进行方差分析(ANOVA)。采用皮尔逊相关系数评价不同因子间的相关关系,采用逐步回归分析影响不同粒径团聚体有机碳的主要因素。采用 Origin 2019 进行绘图。

## 2 结果分析

### 2.1 植被演替中土壤团聚体有机碳动态变化

不同植被演替阶段各粒径土壤团聚体有机碳含量差异极显著( $P<0.001$ )。2—0.25 mm 粒径 SAOC 最高,<0.053 mm 粒径 SAOC 最低(图 1)。除草地 0.25—0.053 mm 粒径 SAOC 之外,随着植被演替各粒径 SAOC 均呈现上升趋势。在顶级林中,> 2 mm、2—0.25 mm、0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 的各粒径土壤有机碳含量比农田分别高 51.2%、53.7%、56.3% 和 45.6%。

### 2.2 植被演替中土壤有机碳动态变化

植被演替中 TOC 含量以顶级林最高,比农田、草地、灌木、先锋林样地土壤分别高 51.2%、56.5%、35.9% 和 10.3%。除草地以外,各植被演替阶段 TOC 含量显著高于农田( $P<0.05$ ),TOC 呈现随植被演替不断增加的趋势(图 2)。

### 2.3 植被演替中土壤团聚体稳定性动态变化

植被演替中,除先锋林外,> 2 mm 粒径的团聚体占比均随植被演替不断增加,顶级林达到最高值。2—0.5 mm、0.25—0.053 mm、<0.053 mm 均表现为减小(图 3)。顶级林土壤团聚体的 MWD、GMD 和 WAS 值最高,分别比农田高 51.0%、15.7% 和 14.6%,这表明随着植被演替,团聚体稳定性得到显著提高。

### 2.4 植被演替中土壤团聚体有机碳与团聚体稳定性、凋落物、根系、微生物生物量碳的关系

皮尔逊相关分析表明(表 2),各粒径 SAOC 均与团聚体稳定性、TOC、MBC、根系生物量、凋落物生物量呈显著性正相关( $P<0.05$ )。各粒径 SAOC 与 TOC 的相关系数表现为(> 2 mm) > (2—0.25 mm) > (<0.053 mm) > (0.25—0.053 mm)。除 0.25—0.053 mm 粒径 SAOC 以外,与 MBC 的相关系数范围为(0.314—0.344);根系生物量与 >2 mm 粒径 SAOC 的相关系数最大(0.686),凋落物生物量与 0.25—0.053 mm 粒径 SAOC 的相关系数最大(0.669)。

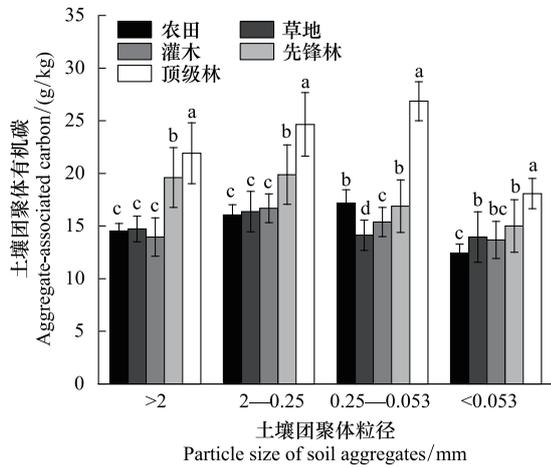


图1 不同植被演替阶段土壤团聚体有机碳含量变化

Fig.1 Change of aggregate-associated organic carbon in different vegetation succession stages

相同小写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )

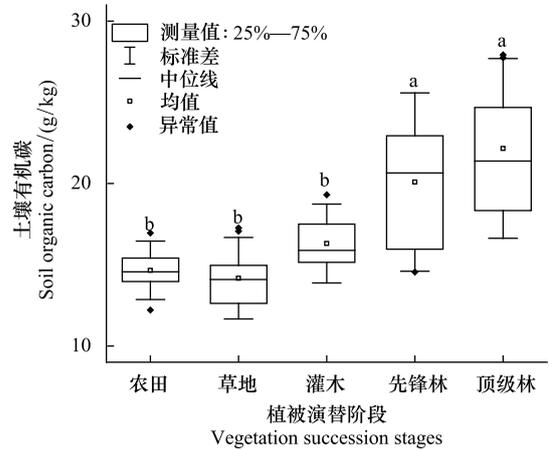


图2 不同植被演替阶段土壤有机碳含量变化

Fig.2 Changes of soil organic carbon content in different vegetation succession stages

相同小写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )

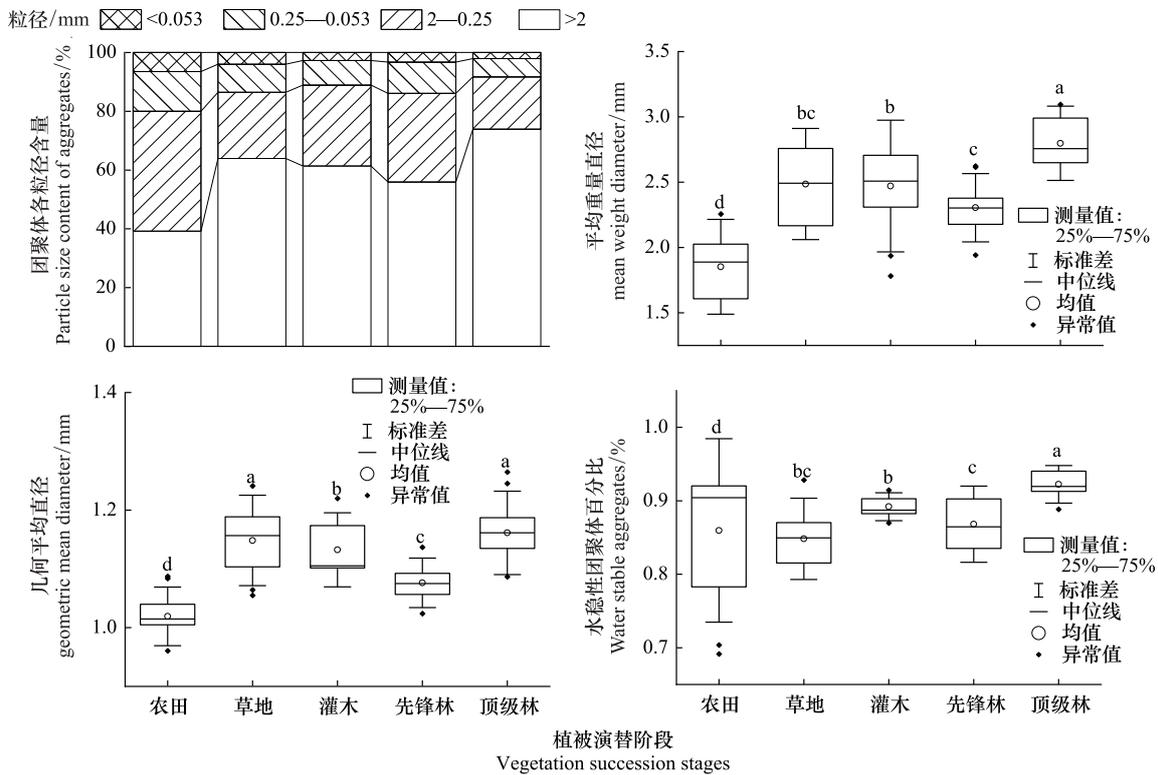


图3 不同植被演替阶段团聚体粒径组成和稳定性动态变化

Fig.3 Dynamic changes of aggregate size composition and stability in different vegetation succession stages

相同小写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )

### 2.5 凋落物-根系-微生物生物量碳和团聚体稳定性与团聚体有机碳的逐步回归分析

由于 MBC 与 TOC 存在共线性,所以剔除 MBC 后,进行逐步回归,得出最优的多元线性回归模型(表 3)。结果表明,植被演替阶段(恢复时间)是各粒径 SAOC 的主要影响之一,且相对贡献最大。除此之外,影响

>2 mm 粒径 SAOC 的主要因素还包括总有机碳和根系生物量,总有机碳的贡献更大;影响 2—0.25 mm 粒径 SAOC 的主要因素还包括总有机碳;影响 0.25—0.053 mm 粒径 SAOC 的主要因素还包括凋落物生物量;影响 <0.053 mm 粒径 SAOC 的主要因素还包括 TOC 和 MWD。

表 2 植物-土壤-微生物和团聚体有机碳相关关系

Table 2 Correlation between soil -plant-microbial and aggregate-associated organic carbon

团聚体有机碳 Aggregate-associated organic carbon	演替阶段 Succession stage	MWD	GMD	WAS	TOC	MBC	LBC	RBC
> 2 mm	0.726 **	0.398 **	0.253 *	0.347 **	0.673 **	0.341 **	0.686 **	0.415 **
2—0.25 mm	0.747 **	0.431 **	0.334 **	0.371 **	0.589 **	0.344	0.670 **	0.449 **
0.25—0.053 mm	0.645 **	0.358 **	0.287 **	0.333 **	0.512 **	0.174 **	0.635 **	0.669 **
<0.053 mm	0.649 **	0.535 **	0.357 **	0.455 **	0.568 **	0.314 **	0.587 **	0.349 **

\*\* 表示在 0.01 水平差异显著; \* 表示在 0.05 水平差异显著 (双尾),  $n=45$ ; MWD: Mean weight diameter 平均重量直径; GMD: geometric mean diameter 几何平均直径; WAS: Water stable aggregates 水稳性团聚体百分比; TOC: total organic carbon 总有机碳; MBC: microbial biomass carbon 微生物生物量碳; LB: litter biomass 凋落物生物量; RB: root biomass 根系生物量

表 3 团聚体有机碳含量与影响因素的逐步回归模型

Table 3 Stepwise regression model of aggregate organic carbon content and influencing factors

团聚体有机碳 Aggregate-associated organic carbon	方程 Equation	$R^2$	$F$	$P$	$n$
> 2 mm	$y=0.024x_1+0.316x_5+0.007x_8+8.253$	0.658	58.181	0.000	45
2—0.25 mm	$y=0.049x_1+0.172x_5+12.349$	0.652	84.282	0.000	45
0.25—0.053 mm	$y=0.05x_1+0.023x_7+11.364$	0.686	98.115	0.000	45
<0.053 mm	$y=0.017x_1+0.194x_5+1.688x_2+6.008$	0.536	35.269	0.000	45

$x_1$  为演替阶段;  $x_2$  为 MWD (Mean weight diameter) 平均重量直径;  $x_3$  GMD (geometric mean diameter) 几何平均直径;  $x_4$  WAS (Water stable aggregates) 水稳性团聚体百分比;  $x_5$  TOC (total organic carbon) 总有机碳;  $x_6$  为 MBC (microbial biomass carbon) 微生物生物量碳;  $x_7$  为 LB (litter biomass) 凋落物生物量;  $x_8$  为 RB (root biomass) 根系生物量

### 3 讨论

#### 3.1 植被演替中土壤团聚体有机碳的动态变化

土壤团聚化是土壤固碳的重要途径<sup>[20]</sup>。本研究发现,与农田相比,植被演替中各粒级团聚体有机碳显著提高( $P<0.05$ );其中不同植被演替阶段各粒级 SAOC 之间差异均达显著水平。不同植被演替阶段由于有机物料输入和输出差异,导致了其土壤物理性状和微生物活性不同,从而对土壤有机碳在各粒径团聚体分布产生影响<sup>[21-23]</sup>。

本研究发现植被演替后土壤 TOC 含量远高于农田,表明弃耕后土壤质量有所改善。TOC 含量的变化可能是由于林地凋落物等的积累,增加了土壤中的胶结物质,进而促进团聚体的形成与稳定,并增加了有机碳的固存<sup>[24-25]</sup>。与农田相比,草地 TOC 较低,这可能是因为弃耕后减少了对土地的管理,土壤孔隙变少且不进行施肥,草地自身的凋落物等残体的分解并不能满足其养分循环的需求,再加上土壤微生物的数量增加对养分的需求量也会增加,这些原因都有可能降低 TOC 的含量<sup>[26]</sup>。

本研究中,各粒径 SAOC 与 TOC 显著正相关( $P<0.05$ ), > 2 mm 粒径 SAOC 与土壤总有机碳相关系数最大。> 2 mm 粒径 SAOC 的变化最大,这可能是随着植被演替增新鲜植物残体有机碳含量增加,更多的有机碳被大团聚体保护起来,进而促进了有机碳在土壤中的固定<sup>[27]</sup>。顶级林 0.25—0.053 mm 粒径 SAOC 显著高于其他粒径原因可能在于:一是植被演替到先锋林后团聚体粒径组成无显著区别( $P > 0.05$ ),团聚体达到较稳定状态,> 2 mm、2—0.25 mm 团聚体透气性较好,有机碳周转速度快,碳固存较少<sup>[28]</sup>;二是较小团聚体内的碳

组分可能更难分解,但由于 $<0.053$  mm 团聚体含量太少,表现不明显。

### 3.2 植被演替中团聚体稳定性、凋落物和根系对土壤团聚体有机碳动态的影响

土壤团聚体 MWD、GMD 和 WAS 的值越大,土壤结构越稳定,土壤抗侵蚀能力越强<sup>[29]</sup>。通过对团聚体有机碳和团聚体稳定性的相关分析(表 2),发现团聚体稳定性与团聚体有机碳含量显著正相关,团聚体稳定性指数与 $<0.053$  mm 粒径 SAOC 的相关系数最大,与 $0.25—0.053$  mm 粒径 SAOC 的相关系数最小。团聚体形成过程中,有机碳是重要的胶结物质,大团聚体分解使得有机碳进入小团聚体,随植被演替团聚体趋于稳定, $<0.053$  mm 粒径 SAOC 变化趋势与其相似,而 $0.25—0.053$  mm 粒径 SAOC 在先锋林、顶级林阶段出现显著上升。原因可能在于到了演替后期,团聚体的形成与分解趋于平衡,碳倾向于由大团聚体向小团聚体的流动<sup>[30]</sup>。

凋落物和根系生物量在植被演替过程中显著增加( $P<0.001$ )。凋落物生物量与团聚体有机碳显著正相关( $P<0.001$ ),与 $0.25—0.053$  mm 粒径 SAOC 的相关系数最大(0.669),与 $<0.053$  mm 粒径 SAOC 最小(0.587);根系生物量与团聚体有机碳显著正相关( $P<0.001$ ),与 $>2$  mm 粒径 SAOC 的相关系数最大(0.686),与 $<0.053$  mm 粒径 SAOC 最小(0.349),这与前人的研究结果一致<sup>[31]</sup>。顶级林的枯枝落叶的质量和数量大于先锋林、灌木、草本和农田。大量枯枝落叶进入土壤,为土壤微生物提供了充足的碳源,微生物活动促进了土壤中有有机碳的转化和分解<sup>[3,32]</sup>。植物类型不同对微生物活性和群落结构的刺激作用不同,对 SAOC 的作用也不尽相同。随着植被演替,各粒径 SAOC 含量不断增加,这可能与凋落物、根系残体等有机质的投入量增加有关<sup>[3]</sup>。大团聚体中的有机碳比微团聚体中的有机碳更容易矿化<sup>[21]</sup>,而微团聚体中的有机碳则大多是高度腐殖化的惰性组分。关于团聚体形成的经典模型,认为新鲜输入的有机碳进入土壤后,首先与土壤中粒径较小的微团聚体胶结形成大团聚体,微团聚体再形成于其内部,而存在于微团聚体中的有机碳由于受到物理保护,所以其稳定性比大团聚体中的新鲜有机质更高<sup>[33]</sup>。另外,土壤团聚体的形成可阻止空气和水的扩散,从而阻止团聚体内有机碳的分解<sup>[34]</sup>,而具有较小孔隙的微团聚体对有机碳稳定性的贡献更大<sup>[5]</sup>。

### 3.3 植被演替中土壤微生物对土壤团聚体有机碳动态的影响

土壤 MBC 随着植被演替不断升高的趋势,与团聚体有机碳的变化趋势相同。植物的生长对 MBC 有着直接和间接的影响:一方面根系分泌物和凋落物的输入为微生物活动提供碳源<sup>[6]</sup>;另一方面可以通过改变土壤结构和营养状况间接的改变微生物的生存环境<sup>[3]</sup>。植被演替过程中凋落物生物量、根系生物量以及根系分泌物等会发生改变,进而会影响微生物活性和数量,导致 MBC 发生显著变化<sup>[35]</sup>。本研究中,除 $0.25—0.053$  mm 团聚体有机碳之外,其余粒径团聚体有机碳含量均与 MBC 呈显著正相关,其中 MBC 与 $0.25—0.053$  mm 团聚体的相关系数最大(0.344)。土壤微生物及其代谢产物促进土壤内不同大小团聚体结构的形成<sup>[36]</sup>。植被演替有助于改变植物和土壤性质,并导致微生物多样性产生变化<sup>[37]</sup>,这体现在植被演替后期土壤微生物多样性的增加。土壤微生物多样性越大,土壤有机碳组分的周转速度越快<sup>[39]</sup>。大团聚体由微团聚体与有机物等胶结剂胶结形成,含有许多不稳定的有机物如轻组碳及微生物量碳等,而易于被微生物利用发生矿化分解<sup>[3]</sup>。在植被演替过程中,SAOC 与 MBC 相互促进,使土壤团聚体肥力与健康状况逐渐改善<sup>[3, 5]</sup>。

## 4 结论

从农田到顶级林(辽东栎)的长期植被演替过程中,土壤团聚体稳定性、TOC 和各粒径团聚体有机碳含量均随植被演替时间的增加而增加,表明随着植被恢复土壤结构趋于稳定,含碳量增加,土壤质量得以改善。团聚体稳定性、根系、凋落物、MBC 与团聚体有机碳含量显著正相关,且不同粒径团聚体有机碳的主要影响因素存在差异,其中,影响 $>0.053$  mm 粒径团聚体有机碳的主要因素为植物生物量(包括:凋落物生物量、根系生物量),而 $<0.053$  mm 粒径团聚体有机碳主要受团聚体本身特性的影响。因此,植被恢复有利于团聚体的稳定性和土壤有机碳的保护,通过长期植被恢复可以有效地改善黄土高原地区的土壤质量,提高土壤碳储量。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Mahowald N M, Randerson J T, Lindsay K, Munoz E, Doney S C, Lawrence P, Schlunegger S, Ward D S, Lawrence D, Hoffman F M. Interactions between land use change and carbon cycle feedbacks. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(1): 96-113.
- [ 2 ] Panettieri M, Rumpel C, Dignac M F, Chabbi A. Does grassland introduction into cropping cycles affect carbon dynamics through changes of allocation of soil organic matter within aggregate fractions. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 251-263.
- [ 3 ] Deng L, Kim D G, Peng C H, Shangguan Z P. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3974-3984.
- [ 4 ] Debnath S, Attri B L, Kumar A, Kishor A, Narayan R, Sinha K, Bhowmik A, Sharma A, Singh D B. Influence of peach (*Prunus persica* Batsch) phenological stage on the short-term changes in oxidizable and labile pools of soil organic carbon and activities of carbon-cycle enzymes in the North-Western Himalayas. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 638-650.
- [ 5 ] Zhu G Y, Shangguan Z P, Deng L. Dynamics of water-stable aggregates associated organic carbon assessed from delta C-13 changes following temperate natural forest development in China. *Soil & Tillage Research*, 2021, 205: 104782.
- [ 6 ] Deng L, Wang K B, Tang Z S, Shangguan Z P. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: evidence from stable carbon isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$ ). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 235-244.
- [ 7 ] Luan H A, Gao W, Tang J W, Li R N, Li M Y, Zhang H Z, Chen X P, Masiliunas D, Huang S W. Aggregate-associated changes in nutrient properties, microbial community and functions in a greenhouse vegetable field based on an eight-year fertilization experiment of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(10): 2530-2548.
- [ 8 ] Gabarrón-Galeote M A, Martínez-Murillo J F, Quesada M A, Ruiz-Sinoga J D. Seasonal changes in the soil hydrological and erosive response depending on aspect, vegetation type and soil water repellency in different Mediterranean microenvironments. *Solid Earth*, 2013, 4(2): 497-509.
- [ 9 ] Mekonnen M, Keesstra S D, Stroosnijder L, Baartman J E M, Maroulis J. Soil conservation through sediment trapping: a review. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(6): 544-556.
- [ 10 ] Burri K, Graf F, Böll A. Revegetation measures improve soil aggregate stability: a case study of a landslide area in Central Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*, 2009, 82(1): 45-60.
- [ 11 ] 张顺涛, 任涛, 周椽棋, 方娅婷, 廖世鹏, 丛日环, 鲁剑巍. 油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响. *土壤学报*, 2021, doi: 10.11766/trxb202004090091.
- [ 12 ] Cheng M, Xiang Y, Xue Z J, An S S, Darboux F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2015, 124: 77-84.
- [ 13 ] Tang F K, Cui M, Lu Q, Liu Y G, Guo H Y, Zhou J X. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region. *Solid Earth*, 2016, 7(1): 141-151.
- [ 14 ] Wu J J, Zhang Q, Yang F, Lei Y, Zhang Q F, Cheng X L. Afforestation impacts microbial biomass and its natural  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  abundance in soil aggregates in central China. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 52-56.
- [ 15 ] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 刘勇, 安慧, 上官周平. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [ 16 ] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [ 17 ] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distributions. Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis. Part I. Agronomy Monograph*. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 424-442.
- [ 18 ] 鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000, 30-34.
- [ 19 ] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [ 20 ] Lal R, Kimble J M. Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1-3): 243-253.
- [ 21 ] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 任镇江, 廖和平. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响. *生态学报*, 2011, 31(1): 257-266.
- [ 22 ] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 戴相林. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究. *土壤学报*, 2014, 51(1): 104-113.
- [ 23 ] 郝翔翔, 窦森, 韩晓增, 李明敏, 安丰华. 典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体中胡敏酸的结构特征. *土壤学报*, 2014, 51(4): 824-833.
- [ 24 ] Li H, Shen H H, Chen L Y, Liu T Y, Hu H F, Zhao X, Zhou L H, Zhang P J, Fang J Y. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in

- global grasslands. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28974.
- [25] Novara A, Rühl J, La Mantia T, et al. Litter contribution to soil organic carbon in the agriculture abandons processes. *Solid Earth Discussions*, 2015, 7(1): 595-616.
- [26] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 宋学姝, 陆森. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991-6999.
- [27] 贺同鑫, 胡宝清, 张建兵, 张诗萌, 庞榆, 裴广廷, 胡刚, 张伟, 孙建飞. 植被恢复十年喀斯特坡地细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响. *生态学报*, 2020, 40(23): 8638-8648.
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [29] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征. *地理研究*, 2002, 21(6): 700-706.
- [30] Li J Y, Yuan X L, Ge L, Li Q, Li Z G, Wang L, Liu Y. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [31] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [32] De Gryze S, Six J, Brits C, Merckx R. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(1): 55-66.
- [33] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1350-1358.
- [34] Ullah R, Lone M I, Ullah K S, Mehdi S M, Qazi M A. Effect of cropping systems and seasonal variations on soil microbial biomass and enzymatic activities in arid soils. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 2013, 23(2): 493-499.
- [35] 董建新, 丛萍, 刘娜, 李玉义, 王婧, 逢焕成. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响. *土壤学报*, 2021, 58(4): 1-15.
- [36] Hoogmoed M, Cunningham S C, Baker P J, Beringer J, Cavagnaro T R. Effects of wetting frequency and afforestation on carbon, nitrogen and the microbial community in soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 34-43.
- [37] Liu Y L, Zhu G Y, Hai X Y, Li J W, Shangguan Z P, Peng C H, Deng L. Long-term forest succession improves plant diversity and soil quality but not significantly increase soil microbial diversity: evidence from the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 142: 105631.
- [38] 吴浩浩, 徐星凯, 段存涛, 李团胜, Cheng W G. 森林土壤融化期异养呼吸和微生物碳变化特征. *生态学报*, 2017, 37(8): 2729-2742.