

# 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

李柏桥<sup>1</sup>, 付 玉<sup>1</sup>, 李光录<sup>1,2</sup>, 张 腾<sup>2</sup>, 郑腾辉<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 以黄土高原南部退耕还林年限 6 a (FL06) 和 15 a (FL15) 刺槐林地、退耕还草年限 6 a (GL06) 和 15 a (GL15) 紫花苜蓿草地为研究对象, 以临近长期耕作坡耕地 (CK) 作为对照, 采用湿筛法, 分离出  $> 2$  mm、 $1 \sim 2$  mm、 $0.5 \sim 1$  mm、 $0.25 \sim 0.5$  mm 和  $< 0.25$  mm 5 个粒级的水稳性团聚体, 研究了退耕年限与方式对团聚体稳定性和不同粒径团聚体有机碳分布的影响。结果表明: 在  $0 \sim 20$  cm 土层, 退耕还林还草与未退耕相比能显著提高  $> 2$  mm 和  $1 \sim 2$  mm 粒径团聚体含量, 显著减少  $< 0.25$  mm 粒径团聚体含量, 其中对于  $> 2$  mm 和  $1 \sim 2$  mm 粒径团聚体在不同退耕年限与方式下含量表现为  $GL15 > GL06 > FL06 > FL15 > CK$  和  $GL15 > FL06 > GL06 > FL15 > CK$ ; 退耕还林和还草增加了两个土层的团聚体稳定性,  $GL15$  的平均重量直径 (MWD) 值和几何平均直径 (GMD) 值均最大, 土壤结构最稳定, 其次为  $GL06$ ; 不同退耕年限,  $> 2$  mm 粒径下退耕还林地和还草地、 $1 \sim 2$  mm 粒径下退耕还草地团聚体有机碳含量均随退耕年限的延长而增加。 $20 \sim 40$  cm 土层中, 团聚体含量均值随粒径的减小而增加; MWD 和 GMD 值均小于  $0 \sim 20$  cm 层; 各粒径范围内退耕还林与还草后的团聚体有机碳含量与坡耕地相比总体表现出减小的趋势。研究结果表明, 退耕改善了土壤结构, 对各粒径团聚体有机碳含量分布的影响随退耕年限与方式不同效应各异, 且  $GL15$  相较于其它退耕年限和方式下的样地有更好的土壤团聚体稳定性和更多的团聚体有机碳积累。

**关键词:** 退耕还林还草; 退耕年限; 退耕方式; 团聚体稳定性; 有机碳; 黄土高原

中图分类号: S152 文献标志码: A

## Effects of age and type of conversion from cropland to forest land and grassland on stability and organic carbon in soil aggregates

LI Bai-qiao<sup>1</sup>, FU Yu<sup>1</sup>, LI Guang-lu<sup>1,2</sup>, ZHANG Teng<sup>2</sup>, ZHENG Teng-hui<sup>1</sup>

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

2. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to elucidate the effect of plantation type and age on aggregate stability and aggregate-associated organic carbon content. Soil samples were collected from five types of land in the southern part of the Loess Plateau including: artificial pure locust forest land converted from slope cropland with plantation ages of 6 years (FL06) and 15 years (FL15), artificial alfalfa grassland converted from slope cropland with plantation ages of 6 years (GL06) and 15 years (GL15) and the neighboring conventional slop cropland (CK). The results revealed that: in  $0 \sim 20$  cm soil layer, land use conversion from cropland to forest land and grassland could significantly increase the fractions for  $> 2$  mm and  $1 \sim 2$  mm aggregate but decrease for  $< 0.25$  mm compared with the cropland. The fractions for  $> 2$  mm and  $1 \sim 2$  mm aggregate under different plantation type and age was in the order of  $GL15 > GL06 > FL06 > FL15 > CK$  and  $GL15 > FL06 > GL06 > FL15 > CK$ , respectively. Land use conversion increased aggregate stability in the two soil layers.  $GL15$  had the maximum mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) values, followed by  $GL06$ . Soil organic carbon in  $> 2$  mm aggregate under forest land and grassland, and that in  $1 \sim 2$  mm aggregate under grassland all increased with plantation age. In  $20 \sim 40$  cm soil layer, the mean of aggregate content increased with aggre-

收稿日期: 2016-04-27

修回日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571262)

作者简介: 李柏桥 (1988—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: libaiqiao@aliyun.com。

通信作者: 李光录 (1964—), 男, 甘肃永靖人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与土地利用研究。E-mail: guanghuli@nwsuaf.edu.cn。

gate size decreasing, both the MWD and GMD value of this layer were less than those of 0 ~ 20 cm soil layer. There was an trend that all aggregate fractions under forest land and grassland had the less organic carbon content than that of cropland. The findings suggested that land use conversion from cropland to forest land and grassland improved soil structure, and its effect on organic carbon content in every aggregate fractions change along with plantation type and age. GL15 had better aggregate stability and more aggregate - associated organic carbon.

**Keywords:** conversion from cropland to forest land and grassland; plantation age; plantation type; aggregate stability; soil organic carbon; Loess Plateau

土壤团聚体是土壤结构的重要指标,是土壤环境、耕作管理和土地利用等因子相互作用的结果,是土壤良好结构的物质基础<sup>[1]</sup>,为土壤中物质和能量的转化提供了必要场所<sup>[2]</sup>。土壤团聚体在土壤中主要维持土壤中的水、肥、气、热,保持和稳定土壤疏松熟化层,影响土壤酶的种类和活性<sup>[3]</sup>,为土壤有机碳提供物理保护<sup>[2]</sup>,同时与有机碳的固定效应密切相关<sup>[4]</sup>。土壤团聚体有机碳是土壤团聚体形成的重要胶结剂,影响着土壤团聚体的数量和大小分布<sup>[5]</sup>,对衡量土壤肥力和土壤碳汇具有重要意义<sup>[6]</sup>。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,土壤结构疏松,地形破碎,自然植被遭到严重破坏<sup>[7]</sup>。人类活动所造成的土地的开垦和森林的滥砍滥伐是导致该区土地生产力严重退化的重要原因<sup>[8]</sup>。退耕还林还草是我国一项重要的生态环境保护措施,对改善土壤的理化性状、提高土壤肥力、保持水土和防止水土流失具有重要作用<sup>[9]</sup>。许多学者对退耕土壤效应开展了大量研究工作,但更多地集中于退耕方式对土壤有机碳含量<sup>[10-12]</sup>、可蚀性<sup>[13-15]</sup>,以及水分动态变化<sup>[16-18]</sup>的影响方面。关于退耕过程中不同年限与方式对土壤团聚体稳定性变化及土壤团聚体有机碳分布的影响研究报道较少。本研究以黄土高原南部沟壑区不同退耕年限人工刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)林地和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)草地为对象,以长期耕作坡耕地为对照,定量分析退耕年限与退耕方式在退耕还林还草过程中对团聚体稳定性和不同粒径团聚体有机碳的影响,为退耕还林还草工程的有效实施和水土流失的治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于陕西省铜川市耀州区小丘镇,为黄土高原南部沟壑区(108°44'E, 34°54'N),海拔 750 ~ 1 100 m,属暖温带大陆性半干旱气候区,年均降水量 540 mm,年均气温 10.4℃左右,无霜期年 270 d,生长期 240 d。土壤为黄绵土。主要树种包括刺槐

(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等。主要草本植物群落包括铁杆蒿(*Artemisia asacrorum*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)、羊胡草(*Carex rigescens*)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、野菊花(*Chrysanthemum indicum*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand. - Mazz.)等。主要农作物为小麦(*Triticum aestivum* Linn.)和玉米(*Zea mays* L.)等。

### 1.2 样地选择与土样采集

在野外调查的基础上,考虑退耕还林还草的地理位置、地质条件,以成土母质相同、地块位置相对集中、坡位近似且营造和管理措施较一致的退耕刺槐林地和紫花苜蓿草地作为试验样地。退耕样地在人工种植刺槐和苜蓿前均为长期耕作坡耕地。刺槐和苜蓿的生长过程中未进行灌水和施肥管理,坡耕地种植制度为冬小麦、夏玉米轮作。选取退耕还林年限为 6 a(FL06)和 15 a(FL15)刺槐林地,退耕还草年限为 6 a(GL06)和 15 a(GL15)紫花苜蓿草地为研究对象,以临近长期耕作坡耕地(CK)作为对照。每个样地 2 组,共 10 个样地,于 2014 年 10 月进行土样采集。每个样地随机布设 3 个典型样方(20 m × 20 m),以 X 形设置 5 个样点,采集 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 两个层次混合土样 1 kg 左右。用硬质铝盒装好后带回实验室。各样地地形地貌及土壤等基本特征见表 1。

### 1.3 样品处理与分析

将采集土样去除杂草、根系、小石块等,沿土块自然裂缝剥成 10 ~ 20 mm 左右的小块,混匀后在室温下风干。采用约得法<sup>[19]</sup>并略作改进,分离出土壤团聚体。具体方法为:称取风干土样置于套筛的最上部筛网上,蒸馏水浸泡 10 min,套筛从上到下依次为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm,开动马达,使套筛在水中上下振动 15 min,振荡速度为每分钟 30 次,上下移动距离为 4 cm,使土样依次通过 2, 1, 0.5, 0.25 mm 的土筛。将留在每个筛子上的土壤冲洗到铝盒中,在 40℃温度下烘干,称重,得到 > 2 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、< 0.25 mm 共 5 个粒级

的水稳性团聚体。土壤团聚体有机碳采用重铬酸钾氧化－外加热法测定<sup>[20]</sup>；全氮采用凯氏定氮法测定；全磷采用高氯酸－浓硫酸法消解,然后用钼锑抗比色法测定<sup>[21]</sup>；土壤 pH 采用 pH 计测定。试验过程中每个测定重复测试 3 次。

表 1 各样地基本特征  
Table 1 Description of the sampling plots

| 项目 Item                                      | CK                                | FL06                                                                                                                                         | FL15                                                                                                                                                          | GL06                                                                                                | GL15                                                                                                |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 年限 Year/a                                    | 0                                 | 6                                                                                                                                            | 15                                                                                                                                                            | 6                                                                                                   | 15                                                                                                  |
| 地貌 Landforms                                 | 梁坡 Slope                          | 梁坡 Slope                                                                                                                                     | 梁坡 Slope                                                                                                                                                      | 梁坡 Slope                                                                                            | 梁坡 Slope                                                                                            |
| 坡向 Aspect/(°)                                | NE7                               | NE3                                                                                                                                          | N                                                                                                                                                             | NE3                                                                                                 | NE10                                                                                                |
| 坡度 Gradient/(°)                              | 21 ± 0.92                         | 20 ± 0.76                                                                                                                                    | 19 ± 1.01                                                                                                                                                     | 17 ± 0.78                                                                                           | 19 ± 0.62                                                                                           |
| 海拔 Elevation/m                               | 895 ± 1.11                        | 915 ± 1.53                                                                                                                                   | 1090 ± 1.40                                                                                                                                                   | 915 ± 0.92                                                                                          | 893 ± 0.66                                                                                          |
| pH                                           | 7.88 ± 0.16                       | 8.01 ± 0.08                                                                                                                                  | 8.11 ± 0.09                                                                                                                                                   | 8.23 ± 0.12                                                                                         | 8.09 ± 0.09                                                                                         |
| 容重/(g·cm <sup>-3</sup> )<br>Bulk density     | 1.14 ± 0.06                       | 1.12 ± 0.02                                                                                                                                  | 1.16 ± 0.03                                                                                                                                                   | 1.13 ± 0.01                                                                                         | 1.19 ± 0.03                                                                                         |
| 有机质/%<br>Organic matter                      | 1.44 ± 0.07                       | 1.54 ± 0.04                                                                                                                                  | 1.48 ± 0.03                                                                                                                                                   | 1.63 ± 0.05                                                                                         | 1.72 ± 0.05                                                                                         |
| 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Total nitrogen   | 0.93 ± 0.04                       | 0.82 ± 0.08                                                                                                                                  | 0.81 ± 0.05                                                                                                                                                   | 0.83 ± 0.09                                                                                         | 0.84 ± 0.06                                                                                         |
| 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Total phosphorus | 0.48 ± 0.05                       | 0.47 ± 0.04                                                                                                                                  | 0.52 ± 0.04                                                                                                                                                   | 0.61 ± 0.06                                                                                         | 0.58 ± 0.05                                                                                         |
| 盖度 Coverage/%                                | —                                 | 80 ± 1.52                                                                                                                                    | 85 ± 1.36                                                                                                                                                     | 80 ± 0.75                                                                                           | 85 ± 1.01                                                                                           |
| 土壤类型<br>Soil types                           | 黄绵土<br>Loess soil                 | 黄绵土<br>Loess soil                                                                                                                            | 黄绵土<br>Loess soil                                                                                                                                             | 黄绵土<br>Loess soil                                                                                   | 黄绵土<br>Loess soil                                                                                   |
| 草本植物 Herbs                                   | 小麦<br><i>Triticum aestivum</i> L. | 铁杆蒿,狗尾草,长芒草,羊胡草<br><i>Artemisi asacrorum</i> ,<br><i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.,<br><i>Stipa bungeana</i> Trin., <i>Carex rigescens</i> | 铁杆蒿,长芒草,野菊花,蒲公英<br><i>Artemisi asacrorum</i> ,<br><i>Stipa bungeana</i> Trin.,<br><i>Chrysanthemum indicum</i> ,<br><i>Taraxacum mongolicum</i> Hand. – Mazz. | 苜蓿,野草莓,野菊花<br><i>Medicago sativa</i> L.,<br><i>Fragaria vesca</i> ,<br><i>Chrysanthemum indicum</i> | 苜蓿,野草莓,野菊花<br><i>Medicago sativa</i> L.,<br><i>Fragaria vesca</i> ,<br><i>Chrysanthemum indicum</i> |

注：表中数据为平均值 ± 标准偏差。      Note: Data represent mean ± SD. The same below.

1.4 数据计算与统计

研究采用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)来衡量土壤团聚体的稳定性。

各粒级团聚体质量百分含量、MWD 和 GWD 计算采用下述公式计算<sup>[6]</sup>：

各粒级团聚体质量百分含量 =  $\frac{\text{各粒级团聚体质量}}{\text{土壤样品总质量}} \times 100\%$  (1)

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$
 (2)

$$GMD = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\}$$
 (3)

式中,  $\bar{R}_i$  为某一粒级团聚体平均直径,  $w_i$  为某一粒级团聚体组分的干重。

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS18.0 软件进行

处理,采用 Duncan 法进行显著性检验。

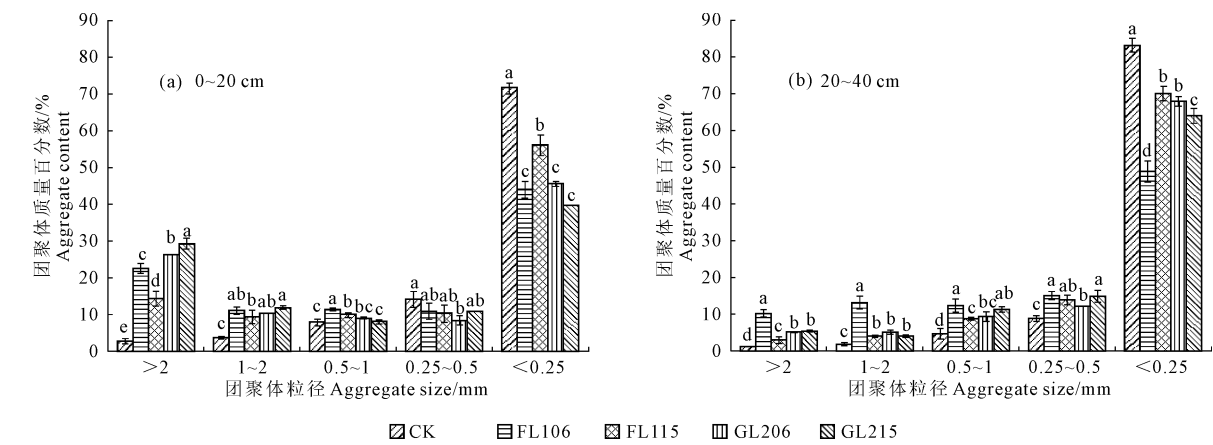
2 结果与分析

2.1 退耕还林还草对土壤团聚体分布的影响

由图 1 可知,在 0 ~ 40 cm 土层,所有样地土壤团聚体含量的均值表现出随粒径的减小而先减小后增加的趋势。在 0 ~ 20 cm 土层(图 1a),退耕还林还草后, > 2 mm 和 < 0.25 mm 两粒径土壤团聚体含量均值的和大于 70%。 < 0.25 mm 粒径团聚体含量均值最高,为 51.42%, 0.5 ~ 1 mm 粒径团聚体含量均值最低,为 9.25%。与坡耕地相比,退耕还林还草显著提高了 > 2 mm 和 1 ~ 2 mm 粒径团聚体含量,分别表现为 GL15 > GL06 > FL06 > FL15 > CK 和 GL15 > FL06 > GL06 > FL15 > CK。 > 2 mm 粒径中,退耕 6 a 和 15 a 后,还草比还林团聚体含量分别显著增加 16.85%和 104.47%。 1 ~ 2 mm 粒径中,相同退耕方式、不同退耕年限的团聚体含量之间差异不显著。 0.5 ~ 1 mm 粒径中,退耕 6 a 和 15 a 后,还林的团聚

体含量与还草的相比均增加。 > 0.25 mm 粒径中, 退耕还林还草后团聚体含量与坡耕地相比均增加, 增幅为 54.41% ~ 111.70%, 大小为 GL15 > FL06 > GL06 > FL15 > CK, 表明退耕还林还草促进了大团聚体的形成, 增强了土壤的团聚作用, 且还草 15 a 的

团聚作用最大。20 ~ 40 cm 土层中(图 1b), 团聚体含量均值表现出随粒径的减小而增加的趋势。该土层中 > 2 mm 粒径中退耕还林与还草后土层团聚体含量均显著小于 0 ~ 20 cm 土层。 > 0.25 mm 粒径中各团聚体含量大小表现为 FL06 > GL15 > GL06 > FL15 > CK。



注:图中不同字母表示同一土层下相同粒径不同样地差异显著性达 0.05。下同。  
Note: Different letters meant significant difference at 0.05 level in the same soil layer. The same as below.

图 1 不同退耕还林还草与退耕年限下各粒径团聚体分布

Fig.1 Aggregate size distribution under different plantation type and age

2.2 退耕还林还草对土壤团聚体稳定性的影响

由表 2 可知,0 ~ 20 cm 层不同退耕年限的 MWD 和 GMD 值均大于 20 ~ 40 cm 层。在 0 ~ 20 cm 层中, 退耕还草 15 a 的 MWD 值和 GMD 值均最大, 与其它样地差异显著。0 ~ 40 cm 中, 与坡耕地相比, 退耕还林还草后 MWD 和 GMD 值均显著增加, 其中在 0

~ 20 cm 土层增幅分别为 180.95% ~ 397.62% 和 85.00% ~ 240.00%, 在 20 ~ 40 cm 土层增幅分别为 66.67% ~ 281.48% 和 31.25% ~ 137.50%。以上表明:退耕还林还草有助于改善土壤结构, 能够增强土壤抵抗外力破坏的能力, 同时退耕还草 15 a 样地团聚体相较于其它退耕样地有更高的稳定性。

表 2 不同退耕还林还草与退耕年限下土壤团聚体的平均质量直径(MWD)、几何均重直径(GMD)值

| Table 2 Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) values of soil aggregates for different plantation type and age |                   | 退耕年限及类型 Plantation type and age |              |              |               |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 项目 Item                                                                                                                           | 土层 Soil layer /cm | CK                              | FL06         | FL15         | GL06          | GL15         |
| MWD                                                                                                                               | 0 ~ 20            | 0.42 ± 0.04e                    | 1.70 ± 0.06c | 1.18 ± 0.09d | 1.90 ± 0.01b  | 2.09 ± 0.08a |
|                                                                                                                                   | 20 ~ 40           | 0.27 ± 0.02d                    | 1.03 ± 0.08a | 0.45 ± 0.06c | 0.59 ± 0.01b  | 0.61 ± 0.02b |
| GMD                                                                                                                               | 0 ~ 20            | 0.20 ± 0.00d                    | 0.55 ± 0.01b | 0.37 ± 0.02c | 0.58 ± 0.00b  | 0.68 ± 0.04a |
|                                                                                                                                   | 20 ~ 40           | 0.16 ± 0.01d                    | 0.38 ± 0.03a | 0.21 ± 0.01c | 0.23 ± 0.01bc | 0.25 ± 0.01b |

注:表中不同字母表示同一土层下不同样地在 0.05 水平差异显著。  
Note: Different small letters in the same row represent significant difference at 0.05 level.

2.3 退耕还林还草对土壤团聚体有机碳含量的影响

由图 2 可知,在 0 ~ 40 cm 土层,土壤团聚体有机碳含量的均值表现出随粒径的减小而减小的趋势。在 0 ~ 20 cm 土层(图 2a), > 2 mm 粒径团聚体有机碳含量均值是 1 ~ 2、0.5 ~ 1、0.25 ~ 0.5 mm 和 <0.25 mm 粒径的 1.06、1.05、1.13 和 1.29 倍。在各粒径中,退耕还林还草后与坡耕地相比均显著增

加了 > 2 mm 和 1 ~ 2 mm 粒径中团聚体有机碳含量, 大小表现为 FL15 > GL15 > GL06 > FL06 > CK 和 GL15 > GL06 > FL06 > FL15 > CK。表明较大粒径团聚体中的有机碳对退耕的响应更为敏感。0.5 ~ 1、0.25 ~ 0.5 mm 和 <0.25 mm 粒径的团聚体有机碳含量均表现为 GL15 > GL06 > CK > FL06 > FL15。坡耕地、退耕还林 6 a 和 15 a 及退耕还草 6 a 和 15 a 土壤团聚体有机碳含量分别在 0.5 ~ 1、1 ~ 2、> 2、0.25 ~

0.5 mm 和 0.5 ~ 1 mm 粒径中最大, 值分别为 7.3、7.4、10.52、8.7  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 11.3  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。20 ~ 40 cm 土层中(图 2b), 土壤团聚体有机碳含量的均值随粒径

的减小而减小。各粒径中, 退耕还林与还草后的团聚体有机碳含量与坡耕地相比总体表现出减小的趋势。

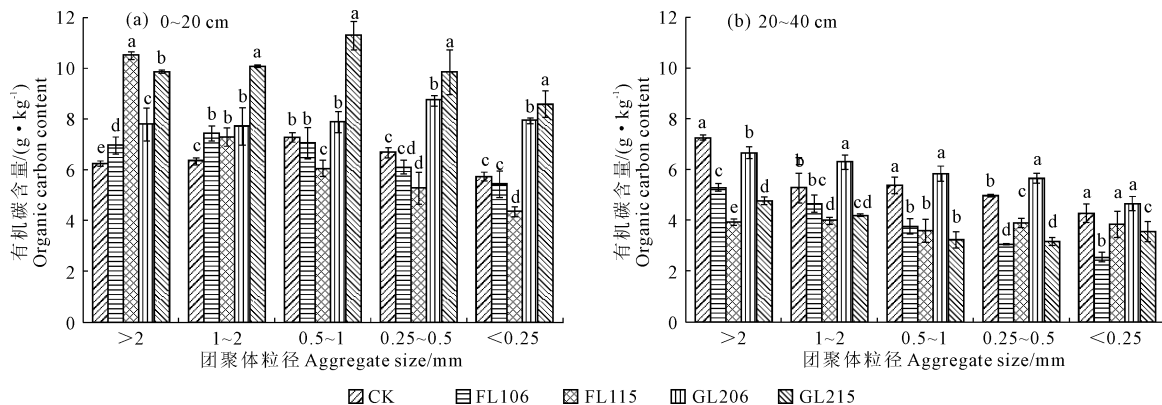


图 2 不同退耕还林还草与退耕年限下各粒径团聚体有机碳含量

Fig. 2 SOC in different aggregate size under different plantation type and age

### 3 讨 论

团聚体中大部分物质都易于减弱、变形或破坏, 同时一部分对水的破坏力具有一定的抵抗性, 经筛分后也能维持原状, 其对土壤结构的稳定性具有重要作用<sup>[1]</sup>。本研究中, 0 ~ 20 cm 土层, 各样地土壤团聚体含量随粒径的减小表现出先减小后增加的趋势, < 0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量最高。这与苏静等<sup>[22]</sup>研究结果大致相同。王天高等<sup>[23]</sup>对山地森林及干旱河谷交错带不同植被条件下土壤团聚体研究表明 > 5 mm 粒径团聚体含量最高, 与本研究结果有差异, 这可能与研究区土壤类型不同有关。> 0.25 mm 粒径被认为是维持土壤结构稳定的基础<sup>[24]</sup>。> 0.25 mm 粒径中, 退耕还林还草后团聚体含量与坡耕地相比均增加, 主要是因为坡耕地退耕还林还草后, 耕种过程中的物理机械破坏消失, 同时退耕后地表草本、枯落物及地下植物根系增多, 使土壤有机物来源增加, 土壤颗粒间有机质胶结作用和团聚体的团聚作用得到加强, 从而使大粒径团聚体含量较坡耕地显著增加<sup>[25-28]</sup>, 这与李鉴霖等<sup>[24]</sup>研究结果相似。退耕显著提高了 > 2 mm 和 1 ~ 2 mm 粒径团聚体含量。退耕还林 6 a 和 15 a, 还草 6 a 和 15 a 后, > 2 mm 粒径团聚体含量分别是坡耕地的 8.21、5.21、9.60、10.66 倍, 1 ~ 2 mm 粒径团聚体含量分别是坡耕地的 3.03、2.56、2.86、3.25 倍, 表明随着退耕年限的延长, 还草更有利于这两个粒径团聚体的形成, 原因是苜蓿主根系发达, 生长年限越长, 根系数量越多。林草生长过程中的养分环境逐渐发生变化, 后期地表苜蓿草地比刺槐林地有更多根系数量, 而根系对土粒的缠绕、固结有助于土粒的

团聚胶结, 使团聚体由较小粒径向较大粒径转变。20 ~ 40 cm 土层 > 2 mm 粒级团聚体含量总体低于 0 ~ 20 cm 土层, 说明 20 ~ 40 cm 土层团聚体稳定性低于 0 ~ 20 cm 土层, 这与李玮等<sup>[29]</sup>关于植茶年限对土壤团聚体影响的研究结果有差异, 这可能与人为活动对土壤大粒级团聚体的结构破坏有关系。

土壤团聚体的稳定性是团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持其原有形态的能力<sup>[30]</sup>。本研究中, 不同土层各样地 MWD 和 GMD 值各异。退耕还林与还草后 0 ~ 20 cm 层不同退耕年限的 MWD 和 GMD 值均大于 20 ~ 40 cm 层, 表明土壤团聚体的稳定性随土壤深度的增加而减弱。这主要由于植物残体主要积累在土壤表层, 为微生物维系生命活动提供充足能量, 从而增加土壤表层的生物活性, 促进各粒级团聚体内部结合形成微粒有机质<sup>[24,31]</sup>。这与以往的研究结果较一致<sup>[32]</sup>。在 0 ~ 40 cm 层中, 退耕还林还草后 MWD 值和 GMD 值均大于坡耕地, 这是因为还林还草后, 生物量增大, 植物有机残体较坡耕地回归增多, 有机质增多, 从而使水稳性团聚体稳定性较坡耕地增强<sup>[2]</sup>, 同时有机物不仅能增强团聚体之间的粘结力和抗张强度, 而且吸收水的容量较土壤矿物更高, 减缓了水分的湿润速率, 从而提高团聚体稳定性<sup>[33]</sup>。退耕还草 15 a 的 MWD 值和 GMD 值均最大, 表明水稳性团聚体稳定性最强, 这可能是由于该样地退耕前的耕作方式、有机肥施用及管理使退耕后土壤结构改善, 草本植物生长情况良好, 枯落叶和根系进入土壤碳循环过程, 同时土层的土壤环境有利于微生物的繁殖和生长<sup>[2]</sup>, 增强了土壤酶的活性, 使该样地土壤中的有机质较其它样地更多, 从而使团聚体稳定性更强。

0~20 cm 土层中,团聚体有机碳含量均值最高的为>2 mm 粒径,最低为<0.25 mm 粒径。说明在微团聚体中有机碳含量最低。这主要是因为微团聚体是由有机分子与粘粒和阳离子胶结形成,而微团聚体与周围基本粒子之间相互胶结形成大团聚体,当大团聚体解体形成微团聚体时,颗粒有机质分解,从而使微团聚体有机碳含量更低<sup>[34-35]</sup>。同时微团聚体在形成大团聚体过程中由于有机质的胶结作用也减少了微团聚体有机碳的比例<sup>[28]</sup>。而另有一些研究则认为小粒径团聚体中有机碳含量更多<sup>[27,36]</sup>。退耕还林和还草显著增加了>2 mm 和 1~2 mm 粒径团聚体有机碳含量。这是因为耕地地表植被覆盖度低,减小了土壤入渗率和吸水量,降雨时雨滴的溅蚀作用和地表超渗径流使土壤大团聚体受到破坏<sup>[37]</sup>。还林与还草后,地表植被覆盖增加,促进了腐殖质在土壤中积累,土壤侵蚀降低,大团聚体受到破坏减弱,减缓了团聚体内部的有机质矿化和氧化<sup>[27]</sup>,再加上有新补充的有机碳,从而使团聚体有机碳含量增加。相同退耕年限下,还草与还林相比,0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量均增加,这是由于苜蓿具有固氮能力,对土壤有机碳具有保护作用<sup>[38]</sup>,同时,由于草地生长状况良好,每年枯落物全部回归土壤,因而有机碳含量更高<sup>[39]</sup>。这与于寒青等<sup>[40]</sup>对吴旗退耕示范区土壤团聚体有机碳研究结果较一致。20~40 cm 土层中,退耕还林与还草后各粒径中团聚体有机碳含量与坡耕地相比总体表现出减小的趋势,这主要是因为坡耕地的耕作过程中人工施肥能增加土壤中有机碳含量,而耕作过程中土壤进行翻动,使表层土壤获得的有机碳转移到地表以下,退耕后土壤人为翻动消失,地表以下土壤获得的有机碳含量减少,同时植物根系也会消耗地表以下土壤有机碳,从而使退耕地与坡耕地相比团聚体有机碳含量减少。

综上所述,在该研究区域,退耕对团聚体分布和团聚体有机碳含量变化有重要影响。退耕还林还草均改善了土壤结构,增加了土壤大团聚体数量,且对各粒径团聚体有机碳含量分布的影响随退耕年限与方式不同,效应各异。总体来看退耕还草 15 a 样地相较于其它样地有更好的土壤团聚体结构和土壤肥力,土壤抗侵蚀能力更强,具有最好的水土保持效应。因此,在实际工作中对于其它年限的退耕还林和还草地应进行适当且有针对性的人工管理,从而提高退耕还林还草工程实施的整体效应。本试验仅以退耕 6 a 和 15 a 的分析结果为基础,对于团聚体和团聚体有机碳含量在还林与还草两种方式下的长期影响还有待于进一步研究。

## 4 结 论

1) 退耕还林和还草能显著提高 0~20 cm 土层中>2 mm 和 1~2 mm 粒径团聚体含量,显著降低<0.25 mm 粒径团聚体含量。在>2 mm 和 1~2 mm 粒径范围内,团聚体含量分别表现为 GL15>GL06>FL06>FL15>CK 和 GL15>FL06>GL06>FL15>CK。

2) 退耕还林和还草增加了两个土层的团聚体稳定性。在 0~20 cm 层中,退耕还草 15 a 的 MWD 值和 GMD 值均最大,团聚体稳定性最大,其次为退耕还草 6 a。土壤团聚体的稳定性随土壤深度的增加而减弱。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层,退耕还林还草后,MWD 值和 GMD 值与坡耕地相比增幅分别为 180.95%~397.62%和 85.00%~240.00%、66.67%~281.48%和 31.25%~137.50%。

3) 退耕还林和还草增加了 0~20 cm 土层中>2 mm 和 1~2 mm 粒径团聚体有机碳含量。退耕 6 a 和 15 a 时,还草与还林相比均增加了 0.5~1、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量。20~40 cm 土层中,各粒径中退耕还林与还草后的团聚体有机碳含量与坡耕地相比总体表现出减小的趋势。

## 参 考 文 献:

- [1] 罗友进,赵 光,高 明,等.不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):117-122.
- [2] 程 曼,朱秋莲,刘 雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报,2013,33(9):2835-2844.
- [3] 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):447-455.
- [4] 谭文峰,朱志锋,刘 凡,等.江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J].自然资源学报,2006,21(6):973-980.
- [5] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. Soil & Tillage Research, 2005,81(2):253-263.
- [6] 郑子成,王永东,李廷轩,等.退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].自然资源学报,2011,26(1):119-127.
- [7] 薛 蕙,刘国彬,潘彦平,等.黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J].中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [8] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004,104(3):399-417.
- [9] 郭永红,张义华,张宏霞,等.天水市退耕还林(草)不同造林模式对土壤养分的影响[J].安徽农业科学,2010,38(30):16980-16983.
- [10] 刘苑秋,王 芳,柯国庆,等.江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对

土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):885-890.

[11] 陈亮中,肖文发,唐万鹏,等.三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究[J].林业科学,2007,43(4):111-114.

[12] 彭文英,张科利,杨勤科.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.

[13] 高凤杰,张 柏,王宗明,等.牡丹江市退耕还林前后自然状态下土壤侵蚀敏感性变化研究[J].水土保持通报,2010,30(5):1-6.

[14] 赵串串,王 湜,孙根行,等.青海省湟水河流域退耕还林地土壤可蚀性研究[J].林业资源管理,2010,(2):73-77.

[15] 李晓佳,海春兴,刘广通.阴山北麓不同用地方式下春季土壤可蚀性研究[J].干旱区地理,2007,30(6):926-932.

[16] 刘春利,邵明安.六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究[J].中国生态农业学报,2006,14(4):54-56.

[17] 马祥华,白文娟,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J].水土保持通报,2004,24(5):19-23.

[18] 紫 檀,潘志华,安萍莉,等.北方农牧交错带不同退耕方式下土壤水分变化特征[J].中国农业大学学报,2008,13(6):6-10.

[19] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal American Society of Agronomy, 1936,28(5):337-351.

[20] Gijnsman A J. Soil aggregate stability and soil organic matter fractions under agropastoral systems established in native savanna[J]. Soil Research, 1996,34(6):891-907.

[21] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:103-104.

[22] 苏 静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持通报,2009,29(5):114-117.

[23] 王天高,何淑勤,尹 忠,等.山地森林/干旱河谷交错带不同植被条件下土壤团聚体及其腐殖质分布特征[J].水土保持学报,2014,28(6):222-227.

[24] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.

[25] 戴全厚,刘国彬,薛 蕊,等.侵蚀环境人工刺槐林土壤水稳性团聚体演变及其养分效应[J].水土保持通报,2008,28(4):56-59.

[26] 李会科,张广军,赵政阳,等.渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2070-2076.

[27] 张曼夏,季 猛,李 伟,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J].应用与环境生物学报,2013(4):598-604.

[28] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.

[29] 李 玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.

[30] 李 越,李 航.土壤团聚体稳定性的研究概述[J].安徽农业科学,2014,42(11):3245-3247.

[31] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(3):777-783.

[32] 刘 威,张国英,张 静,等.2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):117-122.

[33] 苑亚茹,韩晓增,丁雪丽,等.不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征[J].土壤通报,2012,43(2):320-324.

[34] 谢锦升,杨玉盛,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.

[35] 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):2099-2103.

[36] 郑子成,刘敏英,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体有机碳的分布特征[J].中国农业科学,2013,46(9):1827-1836.

[37] 董莉丽.不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J].林业科学,2011,47(4):95-100.

[38] 杨 洋,王百群,李玉进.苜蓿对旱地土壤有机碳氮变化的驱动作用[J].水土保持研究,2012,19(3):78-81.

[39] 刘梦云,安韶山,常庆瑞.宁南山区不同土地利用方式土壤有机碳特征研究[J].水土保持研究,2005,12(3):47-49.

[40] 于寒青,李 勇,金发会,等.黄土高原植被恢复提高大于0.25 mm 粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J].植物营养与肥科学报,2012,(4):877-884.

(上接第 171 页)

[33] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969,50(4):663-666.

[34] Zarco - Tejada P J, Rueda C A, Ustin S L. Water content estimation in vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996,58(3):257-266.

[35] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,41(1):34-44.

[36] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,82(2):188-197.

[37] Chen D, Huang J F, Jackson T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near and short-wave infrared bands[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,98(2/3):225-236.

[38] Shibayama M, Takahashi W, Morinaga S, et al. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer [J]. Remote Sensing of Environment, 1993,45:117-126.

[39] 贾方方.不同水分状况对烤烟高光谱特性及生理生化指标的影响[D].郑州:河南农业大学,2010.

[40] 李向阳.烟草高光谱特性及其生物理化指标和化学品质、香气成分估测模型研究[D].郑州:河南农业大学,2007.