

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0256

陈文媛, 徐学选, 华瑞, 等. 2017. 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J]. 环境科学学报, 37(4): 1486-1492

Chen W Y, Xu X X, Hua R, et al. 2017. Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in loess hilly region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 37(4): 1486-1492

# 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响

陈文媛, 徐学选\*, 华瑞, 丁康, Shahmir Ali Kalhoro, 杜峰

西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100

收稿日期: 2016-05-27 修回日期: 2016-06-23 录用日期: 2016-06-23

**摘要:** 随着国家退耕还林还草战略的实施, 植被覆盖的变化, 林、草地植被恢复进程中土壤团聚体特征的变化受到广泛关注. 本研究以黄土丘陵区西部的官山林场退耕后栽植的刺槐林地、撂荒草地为对象, 选取退耕年限为 10、25 a 的林、草地, 采用湿筛法测定各样地 0~30 cm 土壤的水稳性团聚体组成, 比较退耕还林、还草和退耕年限 (10、25 a) 对土壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 和分形维数 ( $D$ ) 的影响. 结果表明: 退耕 10 a 的林地 0~30 cm 土层水稳性大团聚体含量 ( $R_{0.25}$ )、MWD 和  $D$  分别为 57.60%、1.91 mm 和 2.73; 退耕 25 a 的林地分别为 60.17%、1.88 mm 和 2.74; 退耕 10 a 的草地分别为 59.89%、1.82 mm 和 2.74; 退耕 25 a 的草地分别为 72.69%、2.71 mm 和 2.61. 进一步分析证明, 随着退耕年限的增加, 土壤团聚性增强; 但林草地的变化存在差异: 恢复 10 a 阶段, 土壤团聚性林地尚优于草地, 25 a 后草地优于林地. 各样地土壤的 SOC 含量与  $R_{0.25}$  呈显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 与  $D$  呈显著负相关关系 ( $p < 0.05$ ). 退耕类型和退耕年限对土壤团聚性有显著影响.

**关键词:** 退耕年限; 土壤水稳性团聚体; 平均质量直径; 分形维数

文章编号: 0253-2468(2017)04-1486-07 中图分类号: X53 文献标识码: A

## Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in loess hilly region

CHEN Wenyuan, XU Xuexuan\*, HUA Rui, DING Kang, Shahmir Ali Kalhoro, DU Feng

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

Received 27 May 2016; received in revised form 23 June 2016; accepted 23 June 2016

**Abstract:** With the implementation of national Grain for Green plan, vegetation coverage changed dramatically in many areas. Wide attention has been paid on the variation of soil aggregates in the process of forestlands and grasslands restoration. In this paper, sites with different restoration types (secondary acacia forest and secondary grassland) and ages (10 a and 25 a) in Guanshan Forest Farm in the west of Loess Hilly Region were chosen as research objects. The effects of vegetation restoration types and ages on the contents, mean weight diameter (MWD) and fractal dimension ( $D$ ) of soil water-stable aggregates in layer of 0~30 cm were investigated using wet sieving method. The results showed that Macro-aggregate content ( $R_{0.25}$ ), MWD and  $D$  were 57.60%, 1.91 mm and 2.73 for 10 a forestland, 60.17%, 1.88 mm and 2.74 for 25 a forestland, 59.89%, 1.82 mm and 2.74 for 10 a grassland, and 72.69%, 2.71 mm and 2.61 for 25 a grassland, respectively. Obviously, soil aggregates stability was enhanced with the restoration ages increased. Additionally, there existed some interactive effects. With the same restoration age of 10 a, soil aggregates stability of forestland performed better than grassland, while when restoration was extended to 25 a, the aggregates stability of the grassland were better than forestland. The parameters of  $R_{0.25}$ , MWD and  $D$  were correlated with the content of soil organic carbon (SOC) and the clay content. In conclusion, vegetation restoration types and ages have significant influences on soil water-stable aggregates.

**Keywords:** vegetation restoration ages; soil water-stable aggregates; mean weight diameter; fractal dimension

### 1 引言 (Introduction)

黄土高原是我国水土流失最为严重的区域

(李相儒等, 2015), 自 1999 年开展退耕还林还草工程以来, 黄土高原的植被覆盖度增加, 水土流失状况逐渐好转 (Jin et al., 2012). 植被通过增加土壤有

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41471439, 41271526); 中国科学院国际交流项目 (No.2013T2Z0027)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41471439, 41271526) and the International Exchange Program of Chinese Academy of Sciences (No.2013T2Z0027)

作者简介: 陈文媛 (1992—), 女, E-mail: chenwy92@163.com; \* 通讯作者 (责任作者) E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

Biography: CHEN Wenyuan (1992—), female, E-mail: chenwy92@163.com; \* Corresponding author, E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

机质含量及根系作用来改善土壤结构,进而增强土壤的抗蚀性,减少水土流失。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,能够通过团聚体的粒径分布和稳定性来影响土壤孔隙分布,进而影响水分在土表及土体内的运移方式与途径(Duiker *et al.*, 2001)。在黄土高原开展的相关研究表明,土壤团聚体的粒级分布和稳定性与退耕类型、年限等有明显的关系(安韶山等, 2007; 马帅等, 2011; 于寒青等, 2012; 程曼等, 2013; Wang *et al.*, 2014)。胡阳等(2015)发现,草地、灌丛和林灌的大团聚体含量明显高于荒地,草地和灌丛土壤的平均质量直径(MWD)高于荒地和林灌,草地和灌丛土壤的团聚体稳定性高于荒地和林灌。马祥华等(2005)发现,在退耕地植被恢复过程中,随着植被恢复,水稳性团聚体含量不断增加,土壤抗蚀性提高,并且恢复时间越长,土壤抗侵蚀能力就越强。

土壤团聚体是评价土壤肥力和抗蚀性的重要指标(Lal *et al.*, 2000),大部分有关土壤团聚体的研究都集中在不同土地利用方式及不同添加剂对土壤团聚体的影响(唐骏等, 2016; 唐晓红等, 2009; Liu *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2013),而对于黄土丘陵区退耕后最重要的退耕类型(刺槐林(*Locust*)、撂荒草地)在不同退耕年限下土壤团聚体特征变化的研究还较少。因此,本研究以黄土丘陵区两种典型退耕方式为研究对象,研究退耕年限为10、25 a的刺槐林地和草地土壤团聚体特征,探讨黄土丘陵区退耕还

林还草对土壤的改良和水土保持效应,以期黄土丘陵区退耕还林还草工程提供理论依据。

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 研究区概况

样地位于黄土高原中部秦陇交界处的甘肃省泾川县官山林场,地理位置为 $107^{\circ}15' \sim 107^{\circ}45' E$ ,  $35^{\circ}11' \sim 35^{\circ}31' N$ ,海拔1072~1351 m,属温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,光照充足。年平均气温 $10^{\circ} C$ ,无霜期174 d,年均降水量553.4 mm,年内降雨分配不均匀,主要集中在7—9月,年蒸发量1181.6 mm,土壤为黄绵土。刺槐是黄土高原常见的退耕还林树种,退耕还草是1999年国家提出的适合黄土高原的退耕方式,官山林场于20世纪80年代将大面积耕地改造成刺槐林地和退耕撂荒地,近10年来由于退耕还草政策的推行,官山林场又进行退耕还林还草,官山林场两次大规模的退耕还林还草已实施10和25 a,这两个年龄段样地多、面积大。退耕10 a后的草地逐渐出现小灌木种,25 a时草本仍占有主要优势;刺槐林在幼林期生长较快,前几年郁闭度不足,第10 a可以基本达到郁闭,为刺槐快速生长阶段,25 a时林下小灌木较多,林冠郁闭好,可以代表刺槐的成熟林。选取退耕年限分别为10 a的刺槐林地( $L_{10a}$ )、草地( $C_{10a}$ )、25 a的刺槐林地( $L_{25a}$ )、草地( $C_{25a}$ )为样地,样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic condition of plots

样地	年限/a	群落组成	树高/m	胸径/cm	地径/cm	郁闭度/覆盖度
$L_{10a}$	10	刺槐+悬钩子+旱地芦苇	$8.0 \pm 1.6$	$7.0 \pm 3.2$	$8.4 \pm 4.3$	80%
$L_{25a}$	25	刺槐+茅莓+悬钩子+旱地芦苇	$12.0 \pm 2.5$	$14.0 \pm 4.9$	$17.7 \pm 6.8$	90%
$C_{10a}$	10	甘草+滨草+胡枝子	—	—	—	85%
$C_{25a}$	25	隐子草+铁杆蒿+草地风毛菊	—	—	—	95%

### 2.2 研究方法

2.2.1 采样方法 采样于2015年5月上旬进行,在每块样地选取3个植被盖度相近的样方,分别采集0~10、10~20、20~30 cm 3个层次的原状土样,每个样方2次重复,将原状土带回实验室后,用小刀沿自然裂隙切成1 cm左右的小块,将土放在通风处自然风干。

2.2.2 样品测定 采用干筛法获取土壤团粒含量,取两份风干土样(各500 g)进行干筛,分别获得>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、<0.25 mm的土壤团粒

质量,计算各粒级土壤团粒质量百分比。

采用湿筛法获取土壤水稳性团粒含量,按照干筛法将获得的各粒级团粒比例配成50 g风干土样进行湿筛。用团聚体分析仪湿筛1 min,将各粒级的筛子取出,用水将筛子上的团聚体清洗到烧杯中,得到>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、<0.25 mm各粒级的水稳性团粒,使用沙浴烘干,然后称重,计算各粒级土壤水稳性团粒百分比。

将风干土样过2 mm筛,采用马尔文激光粒度仪测定土壤的机械组成;将风干土样过0.15 mm筛,

采用重铬酸钾法测定土壤有机碳含量.

2.2.3 数据分析 综合已有研究结果,采用大于 0.25 mm 团聚体含量 ( $R_{0.25}$ )、平均质量直径 (MWD)、分形维数 ( $D$ ) 等指标来描述团聚体的特征,计算公式分别如下:

$$m_i = M_i / M_T \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / M_T = 1 - M_{r<0.25} / M_T \quad (2)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i m_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

$$\frac{M_{r < \bar{R}_i}}{M_T} = \left( \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

$$\lg \left[ \frac{M_{r < \bar{R}_i}}{M_T} \right] = (3 - D) \lg \left( \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中  $m_i$  为第  $i$  级团聚体质量所占的百分比,  $M_i$  为第  $i$  级水稳性团聚体的质量 (g),  $M_T$  为各粒级团聚体的总质量 (g),  $R_{0.25}$  为 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量,  $\bar{R}_i$  为第  $i$  级团聚体的平均直径 (mm),  $R_{\max}$  为水稳性团聚体的最大粒径 (mm),  $M(r < \bar{R}_i)$  为粒径小于  $\bar{R}_i$  的团聚体质量 (g).

2.2.4 数据处理 使用 Excel 2013 软件对数据进行初步整理, SPSS 18.0 软件进行统计分析, LSD 法进行差异显著性检验, Pearson 相关分析法进行相关分析, SigmaPlot 12.5 软件进行作图.

### 3 结果 (Results)

#### 3.1 退耕年限对土壤各粒级团聚体组成的影响

退耕年限为 10、25 a 的林、草地土壤各粒级的

水稳性团聚体含量如表 2 所示. 由表 2 可知, 退耕 10、25 a 的林、草地各粒级土壤水稳性团聚体组成差异很大. 各样地的团聚体粒级分布除  $C_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 10~20 cm 和  $L_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 20~30 cm 土壤呈现出“V”型分布外, 其余均呈现出“W”型. 除  $C_{25a}$  样地外, 各样地 <0.25 mm 的团聚体所占比例最高, 为 30.9%~49.11%. 除  $C_{25a}$  样地 0~10 cm 和  $C_{10a}$  样地 20~30 cm 土壤外, 各样地土壤 >5 mm 团聚体含量均大于 2~5 mm 团聚体含量. 土壤中 1~2 mm 和 0.5~1 mm 的团聚体含量差值不大. 除  $C_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 0~10 cm 及  $L_{10a}$  样地 10~20 cm 土壤外, 差值均小于 2%. 土壤 0.25~0.5 mm 团聚体含量均小于 13%. 土壤中 >0.25 mm 的团聚体被称为大团聚体 ( $R_{0.25}$ ), 大团聚体含量越高, 土壤结构越稳定, 抗蚀性越强 (Zhou *et al.* 2008). 随着深度的增加, 各样地土壤的  $R_{0.25}$  含量减少, 0~10 cm 土壤的  $R_{0.25}$  含量均大于 60%, 10~20 cm 土壤的  $R_{0.25}$  含量均大于 59%, 20~30 cm 土壤的  $R_{0.25}$  含量均大于 50%.

退耕还林、还草和退耕年限对土壤水稳性团聚体数量有显著影响. 当深度为 0~10 cm 时,  $L_{25a}$  和  $C_{25a}$  样地的  $R_{0.25}$  达到显著差异 ( $p < 0.05$ ); 深度为 10~20 cm 时,  $C_{25a}$  样地与其它 3 块样地的  $R_{0.25}$  均达到显著差异; 深度为 20~30 cm 时, 4 块样地的  $R_{0.25}$  均没有达到显著差异. 相同的退耕方式下, 25 a 林、草地的  $R_{0.25}$  均高于 10 a 林、草地,  $C_{25a}$  样地的  $R_{0.25}$  随着深度增加而递减的速度快于  $C_{10a}$  样地.  $L_{10a}$  和  $L_{25a}$  样地的 0.25~0.5 mm 团聚体含量均达到显著差异. 相同退耕年限的林、草地, 除  $L_{10a}$  样地 0~10 cm 土壤的

表 2 不同退耕年限林、草地的土壤团聚体组成

Table 2 Aggregates content of forestlands and grasslands under different vegetation restoration ages

土层/cm	样地	团聚体含量						$R_{0.25}$
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
0~10	$L_{10a}$	18.93%±2.62% <sup>a</sup>	11.25%±0.73% <sup>a</sup>	13.64%±1.04% <sup>a</sup>	12.94%±0.81% <sup>a</sup>	8.05%±0.33% <sup>a</sup>	35.19%±1.52% <sup>a</sup>	64.81%±1.52% <sup>a</sup>
	$L_{25a}$	23.57%±2.75% <sup>a</sup>	8.99%±1.25% <sup>a</sup>	11.88%±1.27% <sup>a</sup>	13.10%±1.09% <sup>a</sup>	11.56%±1.39% <sup>b</sup>	30.90%±0.60% <sup>b</sup>	69.10%±0.60% <sup>b</sup>
	$C_{10a}$	13.00%±3.23% <sup>a</sup>	10.65%±1.19% <sup>a</sup>	18.48%±1.17% <sup>b</sup>	12.80%±1.14% <sup>a</sup>	6.47%±1.32% <sup>a</sup>	38.61%±2.09% <sup>a</sup>	61.39%±2.09% <sup>a</sup>
	$C_{25a}$	18.01%±5.06% <sup>a</sup>	20.44%±2.53% <sup>b</sup>	23.54%±1.70% <sup>c</sup>	12.93%±1.81% <sup>a</sup>	5.97%±0.77% <sup>a</sup>	19.11%±1.39% <sup>c</sup>	80.99%±1.39% <sup>c</sup>
10~20	$L_{10a}$	20.42%±5.28% <sup>ab</sup>	9.44%±1.13% <sup>ab</sup>	9.57%±0.56% <sup>a</sup>	11.45%±0.71% <sup>ab</sup>	8.57%±0.64% <sup>a</sup>	40.54%±7.40% <sup>a</sup>	59.46%±7.40% <sup>a</sup>
	$L_{25a}$	10.68%±3.96% <sup>a</sup>	8.34%±0.74% <sup>a</sup>	10.92%±1.12% <sup>ab</sup>	13.88%±1.56% <sup>a</sup>	11.65%±0.64% <sup>b</sup>	44.54%±2.37% <sup>a</sup>	55.46%±2.37% <sup>a</sup>
	$C_{10a}$	17.23%±2.47% <sup>a</sup>	11.69%±1.69% <sup>b</sup>	11.25%±1.14% <sup>ab</sup>	10.80%±0.52% <sup>b</sup>	9.30%±0.95% <sup>a</sup>	39.73%±4.37% <sup>a</sup>	60.27%±4.37% <sup>a</sup>
	$C_{25a}$	28.23%±2.12% <sup>b</sup>	17.03%±0.63% <sup>c</sup>	12.60%±0.75% <sup>b</sup>	10.77%±0.60% <sup>b</sup>	6.85%±0.38% <sup>c</sup>	24.52%±1.44% <sup>b</sup>	75.48%±1.44% <sup>b</sup>
20~30	$L_{10a}$	10.78%±3.85% <sup>a</sup>	7.17%±1.20% <sup>a</sup>	9.21%±0.79% <sup>a</sup>	11.55%±1.08% <sup>ab</sup>	12.18%±1.35% <sup>a</sup>	49.11%±4.56% <sup>a</sup>	50.89%±4.56% <sup>a</sup>
	$L_{25a}$	14.84%±4.48% <sup>a</sup>	7.00%±1.33% <sup>a</sup>	12.17%±1.48% <sup>a</sup>	13.04%±0.94% <sup>a</sup>	8.92%±1.00% <sup>bc</sup>	44.03%±4.70% <sup>a</sup>	55.97%±4.71% <sup>a</sup>
	$C_{10a}$	11.30%±4.02% <sup>a</sup>	11.67%±1.28% <sup>b</sup>	12.32%±1.33% <sup>a</sup>	13.03%±1.64% <sup>a</sup>	9.69%±0.93% <sup>abc</sup>	42.00%±3.11% <sup>a</sup>	58.00%±3.11% <sup>a</sup>
	$C_{25a}$	21.38%±2.11% <sup>a</sup>	12.96%±1.23% <sup>b</sup>	10.81%±0.93% <sup>a</sup>	9.58%±0.76% <sup>b</sup>	6.97%±0.59% <sup>c</sup>	38.31%±2.39% <sup>a</sup>	61.69%±2.39% <sup>a</sup>

注: 不同小写字母表示各样地的土壤团聚体之间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同.

$R_{0.25}$  高于  $C_{10a}$  样地外,草地的  $R_{0.25}$  均高于林地;随着年限的增加,草地的  $R_{0.25}$  增加速率快于林地。 $L_{25a}$  和  $C_{25a}$  样地 0~10 cm 土壤的 2~5、1~2 mm 团聚体含量和 20~30 cm 土壤的 2~5 mm 团聚体含量达到显著差异。 $L_{10a}$  和  $C_{10a}$  样地 0~10 cm 土壤的 1~2 mm 团聚体含量,以及 20~30 cm 土壤的 2~5 mm 团聚体含量达到显著差异。

### 3.2 退耕年限对土壤平均质量直径的影响

平均质量直径 (MWD) 是评价土壤团聚体分布状况的常用指标, MWD 值越大表示土壤团聚体的团聚度越高,稳定性越好。比较不同退耕年限林、草地土壤的 MWD (图 1) 发现,除  $L_{25a}$  样地的 MWD 呈现随着深度的增加先减小后增加的趋势外,其它样地的 MWD 均呈现随着深度的增加先增加后减小的趋势。 $L_{25a}$  样地 <0.25 mm 的团聚体含量在 10~20 cm 土壤出现最大值。相同退耕方式下,除  $L_{25a}$  样地 10~20 cm 土壤的 MWD 低于  $L_{10a}$  样地外, MWD 均表现为随退耕年限的增加而增加的趋势;  $C_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 10~20 cm 土壤的 MWD 差异显著 ( $p < 0.05$ )。相同退耕年限下,  $L_{10a}$  样地 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤的 MWD 高于  $C_{10a}$  样地,而 20~30 cm 土壤的 MWD 低于  $C_{10a}$  样地;  $L_{25a}$  样地的 MWD 均低于  $C_{25a}$  样地相同深度的 MWD;  $L_{25a}$  和  $C_{25a}$  样地 10~20 cm 土壤的 MWD 差异显著 ( $p < 0.05$ )。随着退耕年限的增加, MWD 有增加的趋势,退耕初期草地的 MWD 低于林地,随着退耕年限的增加,草地的 MWD 逐渐大于林地。

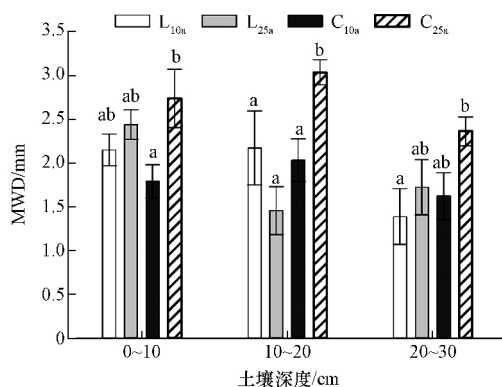


图 1 不同退耕方式和不同退耕年限下土壤团聚体的平均质量直径 (图中不同小写字母表示各样地平均质量直径差异显著 ( $p < 0.05$ ),下同)

Fig.1 Mean weight diameter (MWD) of soil under different vegetation types and restoration ages

### 3.3 退耕年限对土壤分形维数的影响

土壤团粒结构的分形维数 ( $D$ ) 是评价土壤团聚体稳定性的一项指标,团粒结构分形维数越小,土壤的结构和稳定性越好,抗蚀能力越强。比较不同退耕年限林、草地土壤的分形维数 (图 2) 发现,随着深度的增加,分形维数有增加的趋势。 $L_{10a}$ 、 $C_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 0~10 cm 土壤的分形维数略大于 10~20 cm 土壤,但 20~30 cm 土壤的分形维数大于 0~10 cm 土壤。 $L_{25a}$  样地 0~10 cm 土壤的分形维数最小,10~20 cm 土壤的分形维数最大,20~30 cm 土壤的分形维数介于两者之间。不同退耕年限草地的分形维数存在显著差异,  $C_{10a}$  和  $C_{25a}$  样地 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤的分形维数差异显著 ( $p < 0.05$ )。相同退耕方式下,  $C_{10a}$  样地的分形维数均大于  $C_{25a}$  样地;  $L_{10a}$  样地除 10~20 cm 土壤的分形维数小于  $L_{25a}$  样地外,其余均大于  $L_{25a}$  样地。相同退耕年限,  $L_{10a}$  样地的分形维数除 20~30 cm 土壤外均小于  $C_{10a}$  样地;  $L_{25a}$  样地的分形维数均大于  $C_{25a}$  样地;  $L_{25a}$  和  $C_{25a}$  样地 10~20 cm 土壤的分形维数差异显著 ( $p < 0.05$ )。随着退耕年限的增加,草地的分形维数有减小的趋势,林地 10~20 cm 土壤的分形维数有增大的趋势,0~10 cm 和 20~30 cm 土壤的分形维数有减小的趋势。

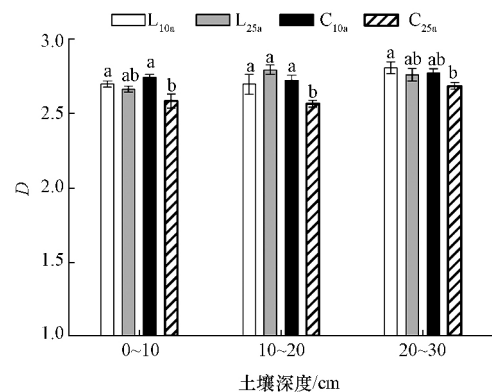


图 2 不同退耕方式和不同退耕年限下土壤团聚体的分形维数

Fig.2 Fractal dimension ( $D$ ) of soil under different vegetation types and restoration ages

### 3.4 土壤团聚体的稳定性与土壤有机碳 SOC、颗粒分布的关系

土壤有机碳 (SOC) 对土壤团聚体的形成及稳定有重要作用 (Virto *et al.* 2011)。对不同退耕年限林、草地的土壤有机碳含量进行比较 (图 3), 发现有机碳含量随年限的增加而增加,随深度的增加而减少;除  $L_{10a}$  和  $L_{25a}$  样地 0~10 cm 土壤的 SOC 外均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。相同退耕年限的林、草地,随

着深度的增加林地 SOC 的递减速度慢于草地, C<sub>10a</sub> 样地的 SOC 低于 L<sub>10a</sub> 样地; L<sub>25a</sub> 样地 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤的 SOC 低于 C<sub>25a</sub> 样地, 20~30 cm 土壤的 SOC 高于草地, 说明 C<sub>25a</sub> 样地 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤更利于有机碳的富集。

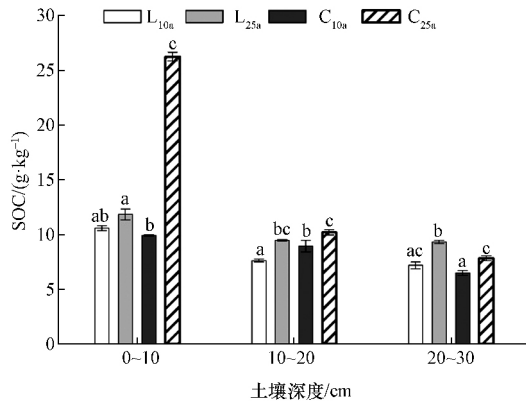


图 3 不同退耕方式和不同退耕年限下土壤团聚体的有机碳含量

Fig.3 Soil organic carbon soil under different vegetation types and restoration ages

对不同退耕年限林、草地的颗粒分布进行分析 (表 3), 发现各样地土壤颗粒分布变异较小, 土壤质地基本一致. 土壤的颗粒分布只有粘粒出现明显的随着深度的增加而增加的趋势, 粘粒含量为 15.58%~20.37%, 粉粒含量为 37.23%~39.97%, 砂粒含量为 39.80%~46.80%, 都属于黄绵土. 不同退耕年限, 除 L<sub>10a</sub> 和 L<sub>25a</sub> 样地 10~20 cm 土壤的粘粒含量间差异不显著外, 林、草地其余各土层的粘粒含

表 3 不同退耕年限林、草地土壤颗粒分布

Table 3 Soil particle size distribution of forestland and grassland under different vegetation restoration ages

土层/cm	样地	土壤颗粒分布		
		粘粒	粉粒	砂粒
0~10	L <sub>10a</sub>	16.29%±0.57% <sup>a</sup>	37.74%±1.47% <sup>a</sup>	45.96%±2.03% <sup>ab</sup>
	L <sub>25a</sub>	18.67%±0.41% <sup>b</sup>	39.16%±0.36% <sup>a</sup>	42.17%±0.73% <sup>ac</sup>
	C <sub>10a</sub>	15.58%±0.30% <sup>a</sup>	37.62%±0.30% <sup>a</sup>	46.80%±0.54% <sup>b</sup>
	C <sub>25a</sub>	18.47%±0.15% <sup>b</sup>	39.80%±0.78% <sup>a</sup>	41.73%±0.92% <sup>c</sup>
10~20	L <sub>10a</sub>	18.80%±1.07% <sup>ab</sup>	39.50%±1.79% <sup>a</sup>	41.71%±2.86% <sup>a</sup>
	L <sub>25a</sub>	19.30%±0.87% <sup>ab</sup>	39.23%±1.04% <sup>a</sup>	41.47%±1.90% <sup>a</sup>
	C <sub>10a</sub>	17.52%±0.53% <sup>a</sup>	37.66%±0.79% <sup>a</sup>	44.82%±1.31% <sup>a</sup>
	C <sub>25a</sub>	20.22%±0.36% <sup>b</sup>	39.97%±0.51% <sup>a</sup>	39.80%±0.84% <sup>a</sup>
20~30	L <sub>10a</sub>	18.09%±0.53% <sup>a</sup>	38.33%±0.79% <sup>a</sup>	43.58%±1.07% <sup>ab</sup>
	L <sub>25a</sub>	19.65%±0.43% <sup>b</sup>	38.27%±0.30% <sup>a</sup>	42.08%±0.42% <sup>ac</sup>
	C <sub>10a</sub>	17.78%±0.25% <sup>a</sup>	37.23%±0.46% <sup>a</sup>	44.98%±0.70% <sup>b</sup>
	C <sub>25a</sub>	20.37%±0.48% <sup>b</sup>	38.90%±0.60% <sup>a</sup>	40.74%±0.88% <sup>c</sup>

量随年限增加均表现为显著增加 ( $p < 0.05$ ); 砂粒含量则有相反的关系, 如 C<sub>10a</sub> 和 C<sub>25a</sub> 样地 0~10 cm 与 20~30 cm 土壤的砂粒含量均存在随年限增加而显著减少的表现. 相同退耕年限的林、草地的粘粒、粉粒和砂粒含量差异均不显著. 不同的退耕方式和退耕年限对土壤的粉粒含量的影响没有达到显著水平, 差异均小于 3%, 即粉粒含量变化幅度微弱.

分析土壤团聚体各稳定性参数与土壤有机碳和颗粒分布的关系 (表 4), 发现 SOC 和  $R_{0.25}$  呈显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 与  $D$  呈显著负相关关系 ( $p < 0.05$ ). 土壤有机碳和粘粒的含量越高, 土壤团聚体的稳定性参数越大, 土壤结构越好, 抗蚀性越强. 砂粒含量越高, 土壤的稳定性越差, 抗蚀性越弱.

表 4  $R_{0.25}$ 、MWD、 $D$  与 SOC 和颗粒分布的相关性分析

Table 4 Correlation among  $R_{0.25}$ , MWD,  $D$ , SOC and soil particle size distribution

	SOC	粘粒 (<0.002 mm)	砂粒 (>0.02 mm)
$R_{0.25}$	0.775 **	0.152	-0.345
MWD	0.433	0.338	-0.482
$D$	-0.607 *	-0.285	0.461

注: \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ .

#### 4 讨论 (Discussion)

##### 4.1 不同退耕方式对团聚体稳定性指标的影响

已有研究表明, 不同的植被恢复方式能够影响土壤水稳性团聚体颗粒分布和数量等特征 (于寒青等 2012; 安韶山等 2008; 马帅等 2011). 植被恢复能够改变土壤水稳性团聚体数量和颗粒分布进而改善土壤结构, 提高土壤的抗侵蚀能力 (苏静等, 2005). 本研究中相同退耕年限林地的大团聚体含量高于草地; 退耕年限为 10 a 的林地土壤的 MWD 高于 10 a 草地, 年限为 25 a 的草地土壤的 MWD 高于 25 a 林地; 退耕年限为 10 a 的草地土壤的分形维数  $D$  高于 10 a 林地, 年限为 25 a 的林地土壤的  $D$  高于 25 a 草地. 说明退耕初期, 林地土壤团聚体的稳定性高于草地, 随着年限的增加, 草地土壤团聚体的稳定性逐渐优于林地.

##### 4.2 不同退耕年限对土壤团聚体稳定性指标的影响

随着退耕年限的增加, 土壤大团聚体含量增加, MWD 增加,  $D$  减小, 说明在黄土丘陵区林、草地的土壤团聚体的稳定性和抗蚀性均随退耕年限的增加而增加. 植被恢复时间越长, 土壤团聚体水稳性

程度也越好,土壤团聚体的机械稳定性增强(丁文峰等,2002;谢锦升等,2008;刘晓利等,2009)。朱秋莲等(2013)研究发现,MWD为天然草地、25 a 柠条样地相对较大,15 a 柠条样地次之,坡耕地最小。随着恢复年限的增加,土壤团聚体颗粒逐渐向大团聚体聚集,大粒级团聚体含量不断增加,小粒级团聚体含量降低,土壤结构逐渐改善,土壤稳定性和抗蚀性逐渐增强。

#### 4.3 团聚体稳定性和有机碳、颗粒分布的关系

本研究表明,有机碳和粘粒的含量越高,土壤团聚体的稳定性参数越大,土壤结构越好,抗蚀性越强;砂粒含量越高,土壤的稳定性越差,抗蚀性越弱。土壤有机质和粘粒是土壤团聚结构形成的重要因素(Bronick *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2012; 唐骏等, 2016; Soinnie *et al.*, 2016),土壤团聚体的形成主要依赖于土壤中各胶结物质的数量和性质,而土壤腐殖质和粘粒是最主要的胶结物质(王清奎等, 2005)。有机碳的积累与土壤团聚体的粒级和植被恢复的类型、年限等有明显的关系(安韶山等, 2007; Deng *et al.*, 2016) 植被恢复能够通过增加有机质含量来促进团聚体的形成,进而增强土壤的团聚性(Yao *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016)。本研究证实了有机质含量、粘粒含量与土壤团聚体各稳定性参数的内在联系。

## 5 结论(Conclusions)

1) 不同退耕年限和不同退耕方式下,土壤的  $R_{0.25}$  呈现出  $L_{10a} < C_{10a} < L_{25a} < C_{25a}$ , MWD 呈现出  $C_{10a} < L_{25a} < L_{10a} < C_{25a}$ ,  $D$  呈现出  $C_{25a} < L_{10a} < C_{10a} \approx L_{25a}$  的趋势。总体来说,林、草地退耕年限增加均有利于土壤水稳性团聚体形成,进而改善土壤透气性和导水性能,增强土壤的抗蚀性,保持水土。草地在退耕年限不超过 25 a 内,其土壤团聚体的稳定性好于林地。

2) 不同退耕年限和不同退耕方式下,表层 0~30 cm 土壤的 SOC 呈现出  $C_{10a} < L_{10a} < L_{25a} < C_{25a}$ 。SOC 与  $R_{0.25}$  呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ),与  $D$  呈显著负相关关系( $p < 0.05$ )。

责任作者简介:徐学选(1966—),男,中国科学院水土保持研究所研究员,博士生导师,长期从事流域水文研究。先后主持国家自然科学基金(面上项目)3项、中组部与科学院“西部之光”人才培养计划等10余项,发表论文90多篇,SCI收录7篇。

#### 参考文献(References):

- 安韶山,黄懿梅,郑粉莉.2008.宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J].植物营养与肥料学报,14(2):300-307
- 安韶山,张玄,张扬,等.2007.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,21(6):109-113
- Bronick C J, Lal R. 2005. Soil structure and management: a review [J]. Geoderma, 124(1/2): 3-22
- 程曼,朱秋莲,刘雷,等.2013.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,33(9):2835-2844
- Deng L, Wang G L, Liu G B, *et al.* 2016. Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 90:105-112
- 丁文峰,丁登山.2002.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,21(6):700-706
- Duiker S W, Flanagan D C, Lal R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain [J]. Catena, 45(2):103-121
- Gao H, Qiu L, Zhang Y, *et al.* 2013. Distribution of organic carbon and nitrogen in soil aggregates of aspen (*Populus simonii* Carr.) woodlands in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Soil Research, 51(5):406-414
- 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.2015.典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持通报,35(1):61-67
- Jin Z, Cui B L, Song Y, *et al.* 2012. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau? [J]. Environmental Sciences & Technology, 46(16):8527-8528
- Lal R. 2000. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century [J]. Soil Science, 165(3):191-207
- 李相儒,金钊,张信宝,等.2015.黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J].地球环境学报,6(4):248-254
- Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, *et al.* 2014. Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China [J]. Catena, 115(3):19-28
- 刘晓利,何园球,李成亮,等.2009.不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J].土壤学报,46(2):255-262
- 马帅,赵世伟,李婷,等.2011.子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J].水土保持学报,25(2):157-161
- 马祥华,焦菊英,白文娟.2005.黄土丘陵沟壑区退耕植被恢复地土壤水稳性团聚体的变化特征[J].干旱地区农业研究,23(3):69-74
- Soinnie H, Hyväluoma J, Ketoja E, *et al.* 2016. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. Soil & Tillage Research, 158: 1-9
- 苏静,赵世伟.2005.植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响[J].水土保持研究,12(3):44-46
- 唐骏,党廷辉,薛江,等.2016.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J].生态学报,36(16):1-11
- 唐晓红,魏朝富,吕家格,等.2009.保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响[J].农业工程学报,25(11):49-54

- 王清奎,汪思龙.2005.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,36(3):415-421
- 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.2008.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,28(2):702-709
- Virto I,Gartzia-Bengoetxea N,Fernndez-Ugalde O.2011.Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J].Pedosphere,21(5):566-572
- Wang H,Guan D,Zhang R,et al.2014.Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field[J].Ecological Engineering,70(70):206-211
- Wu J J,Zhang Q,Yang F,et al.2016.Afforestation impacts microbial biomass and its natural  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  abundance in soil aggregates in central China[J].Science of the Total Environment,568:52-56
- Yao S,Qin J,Peng X,et al.2009.The effect of vegetation on restoration of physical stability of severely degraded soil in China[J].Ecological Engineering,35(5):723-734
- 于寒青,李勇,金发会,等.2012.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].植物营养与肥料学报,18(4):877-884
- Zhou H,Peng X,Peth S,et al.2012.Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J].Soil & Tillage Research,124(4):17-23
- Zhou P,Liu G B,Hou X L.2008.Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the Hilly-gully region of Loess Plateau[J].Science of Soil & Water Conservation,6(2):75-82
- 朱秋莲,程曼,安韶山,等.2013.宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J].水土保持学报,27(4):247-251