

# 黄土丘陵沟壑区不同年限苜蓿地 土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性研究

海龙<sup>1,2</sup>,姚拓<sup>2</sup>,张春红<sup>1</sup>,张文明<sup>1</sup>,李林芝<sup>1</sup>,路永莉<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃兰州730070;

2.甘肃农业大学草业学院草业生态系统教育部重点实验室,甘肃兰州730070)

**摘要:**为了探索种植苜蓿对土壤质量的影响,选取黄土高原丘陵沟壑区3、7、12 a和18 a生苜蓿草地0~60 cm 土层土壤为研究对象,以农田为对照(CK),采用湿筛法研究了不同种植年限苜蓿草地土壤团聚体分布特征及其稳定性。结果表明:黄土丘陵沟壑区土壤水稳性团聚体组成随着粒径减小呈阶梯式递增态势,增幅为1.22%~61.43%,以<0.25 mm的微团聚体占据优势级别,其比例达60.83%~79.72%。当农田更替为苜蓿草地后,在0~20 cm 土层,随种植年限增加至12 a,土壤团聚化递增趋势明显,>2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm和0.25~0.5 mm粒径的土壤水稳性团聚体分别为农田对照的2.03~2.75倍、1.98~2.72倍、1.31~1.65倍和1.15~1.36倍;平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)在0~20 cm 土层均表现为12 a>18 a>7 a>3 a>CK,变化范围分别为0.34~0.70和0.18~0.26;分形维数(D)变化虽然较小,但在0~20 cm 土层也呈现出了不同年限苜蓿草地均小于农田的规律性,变化范围为2.31~2.43。相关分析表明,>0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量(W<sub>SAP0.25</sub>)、MWD、GMD均与土壤总有机碳(TOC)含量呈显著正相关,而土壤黏粒、碳酸钙含量与土壤水稳性团聚体各指标间相关性均不显著。研究结果表明,有机质是黄土丘陵沟壑区土壤团聚的主要胶结物质,种植苜蓿能促进土壤团聚体形成,增强团聚体稳定性。

**关键词:**苜蓿草地;种植年限;土壤水稳性团聚体;粒径分布;稳定性;土壤理化性质;黄土丘陵沟壑区

**中图分类号:**S152.4;S551<sup>+</sup>.7 **文献标志码:**A

## Distribution characteristics and stability of water-stable soil aggregates in different alfalfa growth years in Loess Hilly-Gully Region

HAI Long<sup>1,2</sup>, YAO Tuo<sup>2</sup>, ZHANG Chunhong<sup>1</sup>, ZHANG Wenming<sup>1</sup>, LI Linzhi<sup>1</sup>, LU Yongli<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, College of Pratacultural Science,  
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of alfalfa planting on soil quality, a range of different lengths of growth years (3, 7, 12 a, and 18 a) and a tract of farmland nearby were selected in loess hilly-gully region as objects for investigating soil aggregates size distribution in 0~60 cm soil layer. Soil samples were analyzed for fractionation of soil aggregates with wet-sieving methods. The results showed that the proportion of water-stable soil aggregates increased by 1.22%~61.43% with the decrease of particle size in studied area, and the dominant particle size was 60.83%~79.72% with micro aggregates (<0.25 mm). The topsoil (0~20 cm) in alfalfa grassland displayed a pronounced aggregation trend with the planting age to 12 a, which embodied the proportion of >2, 1~2, 0.5~1 mm, and 0.25~0.5 mm water-stable aggregates of grassland soil was 2.03~2.75 times, 1.98~2.72 times, 1.31~1.65 times, and 1.15~1.36 times of farmland soil, respectively. Both mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) in 0~20 cm soil were 12 a>18 a>7 a>3 a>CK, and the variation ranges were 0.34~0.70 and 0.18~0.26, respectively. Compared with farmland, alfalfa grassland fractal dimension (D) decreased significantly in 0~20 cm soil, ranging from 2.31 to 2.43. Correlation analysis showed that the proportion of >0.25 mm water-stable aggregates (W<sub>SAP0.25</sub>), mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GMD) were positively correlated with soil

total organic carbon (TOC). While there were no significant correlation between soil clay,  $\text{CaCO}_3$  content and indexes of soil aggregates. Our results confirmed that organic matter was the main cementing material for soil aggregation and alfalfa plantation could promote soil aggregation and increase the stability of soil aggregates in loess hilly-gully region.

**Keywords:** alfalfa grassland; growth years; soil water-stable aggregates; particle size distribution; stability; soil physical and chemical properties; Loess Hilly-Gully Region

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤中物质和能量转化的场所,其组成和稳定性是土壤结构变化的重要指示因子,能对土壤孔隙状况以及水、肥、气、热产生重要影响<sup>[1-2]</sup>。目前,评价团聚体稳定性的指标主要有大团聚体含量、土壤平均质量直径、几何平均直径以及分形维数等<sup>[3]</sup>。一般认为,大团聚体含量、土壤平均质量直径和几何平均直径越大,土壤团聚体分布状况与稳定性越好<sup>[4]</sup>。而分形维数越小,土壤结构的稳定性越好,抗蚀能力越强<sup>[3]</sup>。因此,土壤团聚体的组成和稳定性决定了土壤的可侵蚀性<sup>[5]</sup>,其不仅受土壤质地、有机及无机胶结物影响,很大程度上也受土壤环境变化、植被类型以及人为生产活动的强烈影响<sup>[6]</sup>。

黄土高原是世界黄土分布最典型的区域,具有独特侵蚀沟壑地貌,极易发生侵蚀,是世界上水土流失最为严重和生态环境最脆弱的地区之一。解决黄土高原的水土流失问题,主要是防治土壤侵蚀,提高土壤的抗侵蚀能力<sup>[7]</sup>。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是一种广泛栽培的优质多年生豆科牧草,对修复该地区的脆弱生态环境、改良土壤结构、提高土壤肥力,以及水土保持等方面都发挥着积极作用<sup>[8]</sup>。随着种植业和养殖业结构调整,苜蓿种植面积逐年扩大,有效弥补了天然草场的不足,已成为黄土高原重要的草地生态系统<sup>[9-10]</sup>。然而,目前苜蓿草地的研究主要多集中在生产的可持续性和土壤水分方面,对土壤结构性质的研究也有报导<sup>[11-14]</sup>,但都尚未将土壤结构稳定性与无机、有机粘结剂联合起来比较分析,尤其是在陇西地区人工草地苜蓿种植年限对土壤结构特性影响方面的研究未见报道。为此,本研究以黄土丘陵沟壑陇西地区不同种植年限苜蓿草地土壤为研究对象,以农田土壤为对照,应用湿筛法分析土壤团聚体分布特征、稳定性及其变化趋势,并分析了土壤无机、有机粘结剂与团聚体稳定性的关系,探讨苜蓿种植对该区域土壤质量的影响,为黄土丘陵沟壑区苜蓿草地持续利用、防止土壤质量退化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验选在黄土高原丘陵沟壑区的甘肃省定西

市陇西县,属大陆性温带半干旱季风气候。平均海拔 1 673 m,年均降水量 445.8 mm,降水主要集中在 6—9 月份,年均气温 7.7℃,无霜期 146 d。试验地土壤类型为黄绵土,近似于半干润淡色始成土(*Ustochnept*),相对应于 FAO 分类系统中的钙积始成土(*Calcic Cambisols*),成土母质为第四纪风成黄土。

### 1.2 样品采集

在野外实地调查的基础上,采用空间分布代替时间序列的方法,综合考虑坡向、坡位,于 2018 年 5 月选取了自然生态条件相同,种植年限分别为 3、7、12、18 a 的紫花苜蓿草地为研究对象,种植面积均在 200 m<sup>2</sup>以上。每个样地随机布设 3 个典型样方(5 m × 5 m),每个样方设置 3 个样点,逐层采集 0~20、20~40、40~60 cm 土层原状土柱样品,每一样方取 3 个样点的相同土层组成一个混合样,装入硬质塑料盒中。基于从农田更替为苜蓿草地,在苜蓿草地旁边选取未曾种草、常规管理模式的农田作为对照,按相同层次采集土壤样品。将土样带回室内,沿土块自然裂隙轻轻剥成小于 5 mm 的小块后,去除石块和植物残体,自然风干后分成 2 个亚样本,其中一个用作团聚体分析,另一个过筛后供其他项目的理化分析使用。

### 1.3 分析方法

土壤水稳性团聚体的测定按照 Li 等<sup>[15]</sup>修订的方法。称取 50 g 风干样品置于套筛(2、1、0.5、0.25 mm)最上层,把筛子放入装有蒸馏水的桶中浸泡 10 min,以 30 次·min<sup>-1</sup>的频率竖直上下振荡 5 min,振荡幅度为 3.5 cm,振荡时要保证最上层的筛子浸没在水中。筛分后,将各级筛层上土壤团聚体分别转移至铝盒中,105℃烘干称重,计算各级团聚体的质量百分比。

供试土壤总有机碳、碳酸钙、容重和机械组成分别采用硫酸-重铬酸钾外加热法、气量法、环刀法和吸管法测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据处理与统计分析

>0.25 mm 水稳性团聚体含量(>0.25 mm water-stable aggregate proportion,  $WSAP_{0.25}$ )计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$WSAP_{0.25} = \frac{M_{0.25}}{M_T} \times 100\%$$

式中,  $M_{0.25}$  为  $> 0.25$  mm 团聚体重量(g);  $M_T$  为未筛分之前土壤总重(g)。

平均重量直径(mean weight diameter,  $MWD$ ) 和几何平均值(geometric mean diameter,  $GMD$ ) 计算公式<sup>[18]</sup>为:

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

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

式中,  $R_i$  是某级别团聚体平均直径(mm),  $w_i$  是该级别团聚体干重(g)。

分形维数(fractal dimension,  $D$ ) 计算公式<sup>[19]</sup>为:

$$D = 3 - \frac{\lg(w_i/w_0)}{\lg(d_i/d_{max})}$$

式中,  $d_{max}$  为最大粒级团聚体的平均直径(mm);  $d_i$  为两筛分粒级的平均粒径(mm);  $W_i(\delta < d_i)$  是直径小于  $d_i$  累积的团聚体重量(g);  $\delta$  为团聚体直径(mm);  $W_0$  是全部各粒级团聚体的重量和。

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 进行统计分析, 不同处理结果的多重比较采用邓肯检验, 显著水平为  $P < 0.05$ 。图表中数据为平均值  $\pm$  标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳性团聚体粒径分布

土壤水稳性团聚体数量和分布反映了土壤团

粒结构状况, 是决定土壤质量的重要指标之一。由表 1 可知, 苜蓿草地土壤水稳性团聚体含量在土壤剖面中具有明显的垂直分布性, 即在 0~60 cm 土层, 随土壤深度的增加,  $> 2$  mm、1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径水稳性团聚体含量均逐渐减少, 而  $< 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体数量逐渐增加。在各土层, 无论农田还是种植苜蓿, 土壤水稳性团聚体组成均随着粒径减小呈阶梯式递增态势, 增幅为 1.22%~61.43%, 以  $< 0.25$  mm 的微团聚体占据优势级别, 变化范围为 60.83%~79.72%, 大部分土壤在 70% 以上, 说明黄土丘陵沟壑区土壤水稳性团聚体状况普遍较差。

如表 1 所示, 当农田更替为苜蓿草地后, 在 0~20 cm 土层,  $> 2$  mm、1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径水稳性团聚体含量均从农田到 12 a 生苜蓿草地显著递增 ( $P < 0.05$ ), 分别是对照农田的 2.03~2.75 倍、1.98~2.72 倍、1.31~1.65 倍和 1.15~1.36 倍。20~40 cm 土层不同年限苜蓿草地土壤水稳性团聚体含量与 0~20 cm 土层具有一致规律, 但变化幅度较小, 仅 12 a 生苜蓿草地土壤  $> 2$  mm、1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径水稳性团聚体含量与对照农田达到了显著性差异 ( $P < 0.05$ )。40~60 cm 土层各处理土壤水稳性团聚体呈现出含量均匀化态势, 处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

通过分析  $> 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量 ( $WSAP_{0.25}$ ) 分布特征发现, 不同年限苜蓿草地  $WSAP_{0.25}$  在 0~20 cm 含量最多, 随土壤深度的增加逐渐减少, CK 则在 20~40 cm 含量最多(图 1)。在 0~20 cm 土层, 不同种植年限苜蓿草地  $WSAP_{0.25}$  均

表 1 不同种植年限苜蓿草地土壤水稳性团聚体粒径分布

Table 1 Composition of water-stable aggregates in alfalfa field with different growth years

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	土壤水稳性团聚体组成 Composition of the water-stable soil aggregates/%				
		$> 2$ mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	$< 0.25$ mm
0~20	CK	1.79±0.43C	2.94±0.85C	6.16±0.69C	11.06±0.58C	78.05±4.21A
	3 a	3.63±0.72B	5.80±0.67B	8.05±0.33B	12.73±0.60B	69.79±3.57B
	7 a	4.18±0.64B	6.03±0.56B	8.88±0.41A	13.07±0.94AB	67.84±3.09B
	12 a	6.03±1.17A	7.98±0.91A	10.16±2.20A	15.00±1.50A	60.83±2.13C
	18 a	4.91±0.85AB	6.39±0.47B	9.50±1.37A	13.40±0.49A	65.80±2.56B
20~40	CK	2.32±0.62B	3.11±0.52C	6.73±0.56B	12.10±0.72B	75.72±3.04A
	3 a	2.53±0.50B	3.55±0.40C	7.14±0.39B	12.07±0.87B	74.68±2.30A
	7 a	2.67±0.41B	4.06±0.39B	7.83±0.32A	12.37±0.71B	73.07±2.66A
	12 a	3.29±0.24A	4.59±0.27A	8.64±0.68A	13.34±0.48A	70.15±1.19B
	18 a	2.88±0.52B	4.16±0.13B	8.11±0.41A	12.59±0.64B	72.26±1.57A
40~60	CK	1.94±0.76A	2.72±1.29A	6.19±0.88A	10.69±1.81A	78.45±4.62A
	3 a	1.74±0.32A	2.35±0.55A	6.03±1.57A	10.06±2.03A	79.72±3.74A
	7 a	2.00±0.60A	2.84±1.02A	6.16±1.32A	11.08±1.72A	77.91±5.03A
	12 a	1.91±0.59A	2.51±0.37A	6.06±2.07A	10.97±2.20A	78.55±3.18A
	18 a	1.71±0.61A	2.72±1.40A	5.86±0.78A	10.31±1.06A	79.41±2.47A

注: 同列相同土层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 represent significant difference at  $P < 0.05$  between different treatments within the same soil layer. The same below.

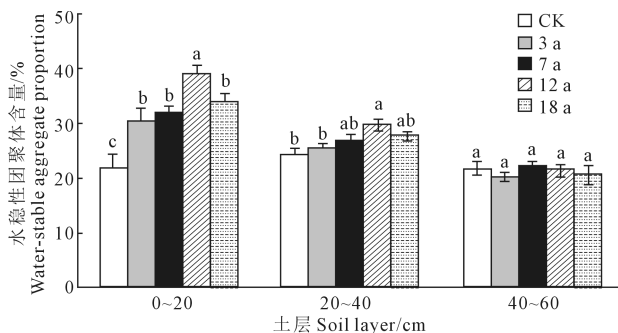
显著高于农田 ( $P < 0.05$ ), 12 a 苜蓿草地最高, 较 3、7、18 a 苜蓿草地和 CK 农田分别提高了 78.43%、29.68%、21.81% 和 14.55%, 均呈显著差异 ( $P < 0.05$ )。20~40 cm 土层与 0~20 cm 土层具有一致规律, 但变化幅度较小, 仅 12 a 苜蓿草地  $WSAP_{0.25}$  显著高于农田 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 土壤水稳性团聚体的稳定性

土壤团聚体稳定性与其粒径分布是同等重要的质量指标, 直接关系到土壤对不同环境的适应与协调性能。由表 2 可知, 表层 (0~20 cm) 不同年限苜蓿草地平均重量直径 ( $MWD$ ) 和几何平均直径 ( $GMD$ ) 最大, 随土壤深度增加,  $MWD$  和  $GMD$  逐渐减小, 而农田  $MWD$  和  $GMD$  在 20~40 cm 土层最大。其中,  $MWD$  在 0~20 cm 土层表现为 12 a > 18 a > 7 a > 3 a > CK, 且供试不同年限苜蓿草地与农田之间差异均显著 ( $P < 0.05$ ), 12、18、7 a 和 3 a 苜蓿草地分别较 CK 提高了 104.63%、76.65%、60.33% 和 47.88%; 20~40 cm 与 0~20 cm 土层变化趋势一致, 但变幅小, 仅 12 a 苜蓿草地显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。  $GMD$  变化趋势与  $MWD$  相一致, 0~20 cm 土层各苜蓿草地与农田均呈显著性差异 ( $P < 0.05$ )。土壤水稳性团聚体分形维数 ( $D$ ) 变化虽然不大, 但在土壤表层也呈现出了从农田到 12 a 生苜蓿草地逐渐递减的规律性。总之, 苜蓿草地土壤水稳性团聚性较农田好, 且随苜蓿种植年限递增至第 12 年达到最大。

## 2.3 土壤粒径分布、总有机碳和碳酸钙含量

由表 3 可知, 不同种植年限苜蓿草地土壤粉粒 (0.002~0.02 mm) 含量最多, 黏粒 (<0.002 mm) 次之,



注: 相同土层不同小写字母表示各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters represent significant difference between treatments within the same soil layer ( $P < 0.05$ ).

图 1 不同种植年限苜蓿草地 0~60 cm 土层  $WSAP_{0.25}$  的变化

Fig.1 Proportion of water-stable aggregate >0.25 mm particle size under different growth years in 0~60 cm soil depth

砂粒 (0.02~2 mm) 最少, 在 0~60 cm 土层, 各苜蓿草地粒径分布与对照农田之间无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。在 0~20 cm 土层, 土壤总有机碳表现为 12 a > 18 a > 7 a > 3 a > CK, 各苜蓿草地均显著高于对照农田 ( $P < 0.05$ ), 20~40 cm 土层与 0~20 cm 土层变化趋势一致, 但变幅小, 仅 12 a 苜蓿草地显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。土壤碳酸钙含量在各处理间差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.4 土壤水稳性团聚体性能指标与土壤理化性质间的相关性分析

土壤水稳性团聚体性能指标与土壤粒径分布、总有机碳和碳酸钙含量相关分析如表 4 所示。 >2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 粒径水稳性团聚体和  $WSAP_{0.25}$ 、 $MWD$ 、 $GMD$  均与 TOC 呈显著正相关; <0.25 mm 的微团聚体、土壤分形维数  $D$  与 TOC 呈负相关, 其中 TOC 与 <0.25 mm 微团聚体相关性达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。砂粒、粉粒、黏粒和碳酸钙与土壤水稳性团聚体各指标之间均无显著相关性。

## 3 讨论

### 3.1 土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性

土壤团聚体分布和数量不仅影响作物生长发育, 而且与土壤抗侵蚀能力密切相关, 特别是湿筛法获得的土壤水稳性团聚体更能准确地反映出土地利用方式对土壤结构的影响<sup>[20]</sup>。随土壤深度的增加, 苜蓿草地 >2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径水稳性团聚体含量均逐渐减少, 这与霍

表 2 不同种植年限苜蓿土壤团聚体稳定性

Table 2 Stability of water-stable aggregates in alfalfa field with different growth years

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	水稳性团聚体 Water-stable aggregate/mm		
		$MWD$	$GMD$	$D$
0~20	CK	0.34±0.06D	0.18±0.02B	2.42±0.01A
	3 a	0.50±0.04C	0.22±0.02A	2.37±0.03B
	7 a	0.55±0.02C	0.23±0.02A	2.35±0.02B
	12 a	0.70±0.04A	0.26±0.03A	2.31±0.04B
	18 a	0.60±0.03B	0.24±0.03A	2.33±0.04B
20~40	CK	0.38±0.03B	0.21±0.02A	2.40±0.03A
	3 a	0.40±0.02B	0.20±0.03A	2.41±0.02A
	7 a	0.42±0.03AB	0.20±0.02A	2.41±0.05A
	12 a	0.47±0.03A	0.21±0.02A	2.39±0.02A
	18 a	0.44±0.03A	0.20±0.03A	2.42±0.03A
40~60	CK	0.36±0.05A	0.18±0.03A	2.44±0.02A
	3 a	0.34±0.04A	0.18±0.02A	2.45±0.04A
	7 a	0.36±0.04A	0.19±0.04A	2.43±0.03A
	12 a	0.35±0.05A	0.19±0.03A	2.43±0.02A
	18 a	0.34±0.07A	0.19±0.02A	2.44±0.03A

表 3 不同种植年限苜蓿草地土壤粒径分布、总有机碳和碳酸钙含量

Table 3 Soil particle-size distribution, TOC, and CaCO<sub>3</sub> concentrations in alfalfa field with different growth years

土层/cm	处理	粒径分布 Particle-size distribution/%			总有机碳	碳酸钙
Soil layer	Treatment	砂粒 Sand(0.02~2 mm)	粉粒 Silt(0.002~0.02 mm)	黏粒 Clay(<0.002 mm)	TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )
0~20	CK	10.06±1.24A	69.56±1.83A	20.38±2.47A	7.37±0.39C	82.64±5.89A
	3 a	9.72±0.57A	69.22±2.47A	21.06±1.77A	8.02±0.17B	81.83±6.25A
	7 a	10.01±1.01A	69.25±3.88A	20.74±2.16A	8.41±0.32B	81.27±3.99A
	12 a	9.97±0.97A	68.89±1.88A	21.14±1.19A	9.17±0.20A	81.55±4.14A
	18 a	10.16±0.82A	67.74±2.99A	22.09±1.10A	8.82±0.24AB	81.14±6.14A
20~40	CK	10.10±1.50A	68.05±1.66A	21.85±0.96A	5.67±0.25B	84.24±4.12A
	3 a	9.36±0.97A	68.44±3.14A	22.20±2.11A	5.88±0.15B	81.61±5.35A
	7 a	9.78±0.43A	69.98±4.01A	20.24±0.88A	6.04±0.32AB	83.17±5.46A
	12 a	10.28±0.34A	68.45±2.69A	21.28±2.57A	6.32±0.20A	85.03±4.60A
	18 a	9.81±0.99A	69.69±1.49A	20.50±1.63A	6.19±0.26AB	83.12±5.71A
40~60	CK	10.02±1.16A	67.8±2.37A	22.18±1.40A	4.86±0.18A	90.16±5.11A
	3 a	10.1±0.56A	67.44±2.47A	22.45±0.96A	4.93±0.17A	86.43±4.72A
	7 a	9.72±0.95A	67.51±3.40A	22.77±1.55A	4.85±0.25A	88.43±5.78A
	12 a	9.83±0.39A	69.24±3.41A	20.93±1.71A	5.01±0.28A	88.85±4.06A
	18 a	9.93±0.59A	69.43±3.42A	20.65±1.68A	5.13±0.21A	87.19±5.16A

表 4 土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation between soil aggregate stability indexes and soil physicochemical properties

土壤水稳性团聚体指标	土壤理化性质 Soil physicochemical properties				
Soil water-stable aggregate indexes	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	总有机碳 TOC	碳酸钙 CaCO <sub>3</sub>
>2 mm	-0.083	0.154	0.019	0.382*	-0.211
1~2 mm	0.037	0.287	-0.028	0.476**	-0.205
0.5~1 mm	0.085	0.205	-0.031	0.541**	-0.255
0.25~0.5 mm	-0.106	0.022	0.013	0.327*	-0.182
<0.25 mm	0.115	-0.178	-0.114	-0.403**	0.251
WSAP <sub>0.25</sub>	-0.091	0.006	0.107	0.419**	-0.026
MWD	-0.108	0.16	-0.011	0.392**	-0.152
GMD	-0.072	0.118	0.023	0.314*	-0.067
D	0.035	-0.055	0.031	-0.237	0.151

注: \* 表示相关性达显著水平( $P<0.05$ ), \*\* 表示相关性达极显著水平( $P<0.01$ )。

Note: \* \* \* mean significant difference at  $P<0.05$  and  $P<0.01$ , respectively.

琳等<sup>[21]</sup>研究结果一致。以>0.25 mm 水稳性团聚体为参照指标,认为>75%为优良状态,40%~75%为良好,30%~40%为较差,<30%为不良<sup>[22]</sup>。在0~20 cm 土层,土壤团聚状态从农田的不良级别演化为苜蓿草地的较差状态,而苜蓿草地20~60 cm 土层均属不良团聚状态,级别虽然没有变化,但是>0.25 mm 团聚体在土壤剖面上存在明显的递减趋势。农田>0.25 mm 水稳性团聚体在20~40 cm 土层含量较0~20 cm 土层多,是因为农田表层土壤受人为活动干扰多,扰动频繁,尽管有机质含量高于下层,但在扰动过程中易于暴露,分解速度大于下层,弱化了团聚体稳定性的胶结作用,这也是耕地中难以形成更大团聚体的缘故。水稳性团聚体直径越小,表明团聚体在润湿后抵抗破坏能力越小,浸水后土壤团聚体大部分都将散碎<sup>[23]</sup>。本研究得出水稳性团聚体含量随直径减小而增加,<0.25 mm 为数量优势级别,变化范围为60.83%~79.83%,大部分土壤在70%以上,表明研究区域较大团聚体数量较少,

结构松散。

土壤团聚体平均重量直径( $MWD$ )和几何平均直径( $GMD$ )的值越大,分形维数( $D$ )越小,土壤结构越稳定,土壤抗侵蚀能力越强<sup>[24]</sup>。本研究得出0~40 cm 土层  $MWD$  表现为12 a>18 a>7 a>3 a>CK,  $GMD$  与  $MWD$  变化趋势基本一致,而  $D$  变化趋势相反,说明种植苜蓿能提高土壤水稳性团聚体的稳定性。这与苜蓿根部能共生大量根瘤菌,随生长年限的增加,其入土深度和根茎上分枝数增加<sup>[25]</sup>,能产生更多的根系分泌物有关<sup>[26]</sup>。首先,根系分泌物是土壤颗粒团聚的主要粘合剂<sup>[27-28]</sup>,分泌的多糖类有机碳是一种线性的高分子聚合物,其链上有大量的羟基(-OH),可以不通过阳离子的作用,直接利用有机物的分子极性,与矿物晶面上的氧原子形成氢键,使得土壤团聚化<sup>[29]</sup>;再则,根系分泌物及其脱落物能够促进微生物大量繁殖,会使微生物产生更多作为土壤颗粒胶结剂的粘液,进一步促进土壤颗粒的团聚<sup>[30]</sup>。本研究同时表明18 a 生苜蓿草地土壤水稳性团聚体稳定性开始下降,这与黄土高原苜蓿草地超过一定的种植年限,地上和地下生物量开始下降有关<sup>[31]</sup>。

### 3.2 土壤水稳性团聚体指标与土壤有关参数的相关性

土壤团聚体粒径分布和稳定性与胶结物质密切相关,其质量分数、分布、组成特征等是团聚体形成与稳定的基础及内在动力<sup>[32]</sup>。土壤有机碳、黏粒和碳酸钙是黄土高原土壤中的主要胶结物质<sup>[33]</sup>。本研究得出黏粒与土壤水稳性团聚体各指标相关性均不显著,但是这不能否定黏粒对土壤的团聚作用,只是在黄土丘陵沟壑区自然条件下土壤黏粒的数量和性质对于矿物颗粒的胶结与团聚作用不够明显而已。有学者研究表明,黄土高原地区大部分

属于钙盐基饱和土壤<sup>[34-35]</sup>,蒙脱石有效面积比高岭石大得多,土壤黏粒自身凝聚作用虽然强,但通过此作用形成的微团聚体稳定性不高<sup>[29]</sup>,属于一种稳定性相对较差的胶结物质<sup>[36]</sup>。已有研究指出,难溶性碳酸钙对土壤团聚体水稳性起重要作用<sup>[33]</sup>,碳酸钙对黄土团粒的形成起决定性的作用<sup>[32]</sup>。而本研究表明,土壤碳酸钙含量与土壤水稳性团聚体各指标相关性均不显著,这和前面的研究结论不一致,还有待于进一步研究。苑亚茹等<sup>[37]</sup>研究发现,有机物不仅能增强团聚体之间的粘结力和抗张强度,同时较土壤矿物提高了吸收水的容量,水分的润湿速率因而减缓,团聚体稳定性提高。黄泽等<sup>[38]</sup>、罗珠珠等<sup>[20]</sup>的研究结果都表明,黄土高原半干旱区的土壤团聚体稳定性和土壤有机质密切相关,但没有将土壤团聚体稳定性和无机胶结剂联系起来。本研究中,TOC 与 >0.25 mm 各粒级土壤水稳性团聚体、MWD、GMD 均呈显著正相关,与 <0.25 mm 粒径的水稳性团聚体含量呈显著负相关,说明黄土丘陵沟壑区有机质是土壤团聚体主要胶结物质,在水稳性团聚体的形成、促进土壤结构的稳定性、增强土壤的抗侵蚀能力方面发挥着至关重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] Chen Y J, Day S D, Wick A F, et al. Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon, and hydraulic conductivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 494-495:329-336.
- [2] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review[J]. *Geoderma*, 2018,314:122-137.
- [3] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
- [4] 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): 4696-4704.
- [5] Ghosh B N, Meena V S, Alam N M, et al. Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after seven years of maize-wheat cropping system in the Indian Himalayas [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016,216:247-257.
- [6] 孙艳,王益权,刘军,等. 日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响——以陕西省泾阳县日光温室土壤为例[J]. *土壤学报*, 2011,48(1): 168-174.
- [7] 李程程,曾全超,贾培龙,等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀能力经度变化特征[J]. *生态学报*, 2020,40(6): 1-10.
- [8] 苏永中,刘文杰,杨荣,等. 河西走廊中段绿洲退化土地退耕种植苜蓿的固碳效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6385-6391.
- [9] 温晓霞,翁琴,李生焯,等. 黄土高原苜蓿草业开发利用探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2003,21(3):160-163.
- [10] 李裕元,邵明安,上官周平,等. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究[J]. *草业学报*, 2006, 15(2): 85-92.
- [11] 宋丽萍,罗珠珠,李玲玲,等. 苜蓿—作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016,24(1):27-35.
- [12] 李柏桥,付玉,李光录,等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3):

- 238-244.
- [13] 蒯芳,刘晓静,张家洋. 人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6):1219-1229.
- [14] 张家洋,蒯芳,詹乃才,等. 紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下土壤团聚体形态结构、组成及有机碳特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6):1077-1086.
- [15] Li X G, Li F M, Rengel Z, et al. Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland[J]. *Geoderma*, 2007,139:98-105.
- [16] 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.
- [17] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014,28(1):129-135.
- [18] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. *生态学报*, 2006,26(2): 364-372.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993,38(20): 1896-1899.
- [20] 罗珠珠,李玲玲,牛伊宁,等. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应[J]. *草业学报*, 2016,25(10): 40-47.
- [21] 霍琳,武天云,蒯海明,等. 长期施肥对黄土高原旱地黑土水稳性团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2008,19(3): 545-550.
- [22] 石宗琳,王加旭,梁化学,等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. *土壤学报*, 2017,54(2): 387-399.
- [23] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014,25(3): 671-678.
- [24] 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[J]. *地理研究*, 2002,21(6):700-706.
- [25] 杨恒山,张庆国,刘晶,等. 不同生长年限紫花苜蓿根系及其土壤微生物的分布[J]. *草业科学*, 2007,24(11):38-41.
- [26] Johnson M F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizo-deposits using the national grain-yield database[J]. *Agronomy Journal*, 2006,98(3):622-636.
- [27] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1982,33(2):141-163.
- [28] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005,124(1-2):3-22.
- [29] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:18-342.
- [30] Gunina A, Kuzyakov Y. Sugars in soil and sweets for microorganisms: review of origin, content, composition and fate[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015,90:87-100.
- [31] 周恒,时永杰,胡宇,等. 不同生长年限紫花苜蓿地下生物量的空间分布格局[J]. *中国草地学报*, 2016,38(2): 47-51.
- [32] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004,41(4): 618-623.
- [33] Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, Fernández-Ugalde O. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5):566-572.
- [34] 郭玉文,加藤诚,宋菲,等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3):362-368.
- [35] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11):2710-2715.
- [36] 张耀方,赵世伟,王子龙,等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. *中国水土保持科学*, 2015,13(5):145-150.
- [37] 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.
- [38] 黄泽,田福平,刘玉,等. 黄土高原不同草地类型对水稳性团聚体粒径分布及稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2017,26(11):216-221.