

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.022

陈曦, 王改玲, 刘焕焕, 等. 黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征. 土壤, 2021, 53(2): 375–382.

黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征^①

陈曦¹, 王改玲^{1*}, 刘焕焕¹, 殷海善², 樊文华¹

(1 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 2 山西省农业科学院农业资源与经济研究所, 太原 030006)

摘要: 为探究不同撂荒年限土壤结构及有机碳分布特征, 试验选取黄土高原吕梁山自然撂荒 1、2、3、5、10、15、20 a 枣园土壤为研究对象, 以清耕作业下的枣园土壤为对照(CK), 利用干筛和湿筛法测定并分析各样地 0~20 cm 土层中土壤团聚体稳定性、团聚体有机碳与土壤总有机碳含量及其相关性。结果表明: 撂荒初期, 土壤团聚体含量呈波动变化趋势, 撂荒 3 a 后土壤水稳性大团聚体含量(>0.25 mm 团聚体含量, $R_{>0.25}$)及团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)随撂荒年限的增加逐步提高。20 a 撂荒地土壤水稳性大团聚体含量占团聚体总量的 69.6%, 较 CK 提高了 55.2 个百分点。土壤总有机碳、团聚体有机碳含量随撂荒年限的延长均呈先降低后增加的趋势, 撂荒 20 a 土壤总有机碳含量达最大值 7.88 g/kg; 团聚体有机碳含量随团聚体粒径的减小呈先增加后降低的特点, 主要集中于 1~0.25 mm 团聚体内。不同撂荒年限土壤中机械稳定性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率为 54.3%~82.2%, 较 CK(29.3%)提高 25.0~52.9 个百分点; 水稳性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率为 17.7%~71.8%, 除撂荒 1 a 和 3 a 土壤外, 其他样地均高于 CK (21.1%)。水稳性团聚体 MWD、 $R_{>0.25}$ 与土壤总有机碳含量极显著相关($P<0.01$); 水稳性团聚体 GMD 与土壤总有机碳含量显著相关($P<0.05$); 水稳性团聚体 $R_{>0.25}$ 与 2~1、1~0.25 和 <0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量极显著相关($P<0.01$), 与 5~2 mm 团聚体有机碳含量显著相关($P<0.05$)。可见, 撂荒恢复促进了土壤有机碳及水稳性团聚体有机碳含量的提高, 从而提高了团聚体的稳定性。

关键词: 撂荒恢复; 团聚体稳定性; 有机碳分布; 吕梁山

中图分类号: S157.2 文献标志码: A

Stability and Organic Carbon Distribution of Soil Aggregates with Different Fallow Years in Lüliang Mountains in Loess Plateau

CHEN Xi¹, WANG Gailing^{1*}, LIU Huanhuan¹, YIN Haishan², FAN Wenhua¹

(1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Economics, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To explore the characteristics of soil structure and organic carbon distribution in aggregates with fallow year, soils (0–20 cm depth) under 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 fallow years and under clean tillage (as control (CK)) were sampled from Lüliang mountains in Loess Plateau, aggregates were separated by dry and wet sieve methods respectively, and then mechanical-stable and water-stable aggregates, organic carbon contents in soils and aggregates were determined and compared. The results showed that within 3a fallow, aggregate content changed irregularly, then the content of water-stable macro-aggregates (>0.25 mm aggregate content, $R_{>0.25}$), MWD and GMD of aggregates gradually increased with the increase of fallow year, and it accounted for 69.6% of the total aggregate of water-stable macro-aggregates in 20a fallow, 55.2 percent points higher than CK. The contents of organic carbon in soil and aggregates decreased first and then increased with the extension of fallow year, soil total organic carbon (TOC) in 20a fallow reached 7.88 g/kg, organic carbon in aggregates increased first and then decreased with the decrease of aggregate size, mainly concentrated in 1–0.25 mm aggregates. Organic carbon in mechanical-stable macro-aggregates accounted for 54.3%–82.2% of soil TOC, which were 25.0–52.9 percent points higher than CK (29.3%), organic carbon in water-stable

①基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121245)资助。

* 通讯作者(gailingwang@qq.com)

作者简介: 陈曦(1997—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。E-mail:1152902548@qq.com

macro-aggregates accounted for 17.7%–71.8% to soil TOC, and other plots accounted more than CK (21.1%) except 1a and 3a fallow. MWD and $R_{>0.25}$ of water stable aggregates were extremely significantly correlated with soil TOC ($P<0.01$), and GMD of water stable aggregates was significantly correlated with soil TOC ($P<0.05$). $R_{>0.25}$ of water-stable aggregates was extremely significantly correlated with organic carbon in 2–1, 1–0.25 and <0.25 mm aggregates ($P<0.01$), and significantly correlated with organic carbon in 5–2 mm aggregates ($P<0.05$). In conclusion, natural recovery promotes the increase of organic carbon in soil and in water-stable aggregates, thereby improves the stability of aggregates.

Key words: Recovery of abandoned soil; Aggregate stability; Organic carbon distribution; Lüliang mountains

吕梁山区处于黄河中游晋陕峡谷地带,水土流失状况严重,是国家和省级限制开发的黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区。多年以来,吕梁山晋陕峡谷沿黄河两岸发展了约 400 万亩的红枣经济林,为吕梁山区的经济建设做出了重要贡献^[1]。然而当地枣园清耕管理制度使地表裸露,土壤受雨水冲刷后更易流失,土壤结构遭受严重破坏。自 20 世纪 90 年代退耕还林还草工程实施以来,该地区植被覆盖度增加,水土流失状况明显改善^[2],对推动黄河流域生态保护和高质量发展起到了积极作用。因此,在黄土高原地区推行退耕还林还草是提高土壤质量与水土保持能力的有效方法。

团聚体是土壤组成的基本结构单元^[3],其数量与质量不仅反映土壤结构状况,而且影响着土壤的肥力、抗蚀性以及土壤有机碳的固持和分解^[4]。撂荒恢复对土壤团聚体粒级分布及稳定性有重要影响,同一类型土壤的团聚体特征会因恢复方式与植被类型不同而产生不同效果。如,张超等^[5]研究认为,黄土丘陵区天然草地恢复对土壤团聚体团聚能力的改善作用优于人工灌木和人工草地;徐红伟等^[6]研究表明,植被恢复后土壤大团聚体(>0.25 mm 团聚体)含量及团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均表现为:森林带>森林草原带>草原带。植被恢复年限对土壤团聚体的影响同样显著,如,土壤水稳性大团聚体含量与有机碳含量会随着植被恢复年限的延长不断增加^[7],团聚体结构破坏率(PAD)则不断减小^[8]。因此,研究植被恢复年限对增强土壤团聚体稳定性与抗蚀性有重要意义。

关于黄土高原区植被恢复对土壤结构及稳定性影响的研究表明,长期植被恢复能增强土壤固碳能力,增加土壤大团聚体含量。然而目前该研究大多集中于人工林地、草地恢复土壤团聚体的研究^[9],而对于自然撂荒草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征研究较少。因此对上述问题提出假设:自然撂荒后植被的演替能改善土壤结构,提高土壤有机碳含量,增强土壤的抗侵蚀能力。为验证该假设,本研究

选取黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤为研究对象,探讨不同撂荒年限对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响,旨在为该地区撂荒恢复工程对土壤结构及质量的影响过程提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吕梁市临县吕梁山区,地处黄河中游山西省西部,是典型的黄土丘陵沟壑区,地理坐标为 $38.0180^{\circ} \sim 38.0867^{\circ} \text{ N}$, $110.5320^{\circ} \sim 111.1680^{\circ} \text{ E}$,属于温带半干旱大陆性气候区。年平均气温 8.8° C ,年均无霜期 160 d,年均降水量 518.8 mm,主要集中于夏季,年均蒸发量 2 149.8 mm,是降水的 4 倍。研究区土壤是由黄土母质发育而成的黄绵土,土壤贫瘠,抗侵蚀能力较差。研究区自实行撂荒恢复之后,植被类型均由清耕枣园转化为撂荒枣园,撂荒初期主导草本类型主要以狗尾巴草、地锦草、牵牛花等叶鞘松弛、根茎细小的一年生草本植物为主,在撂荒 3 a 后开始出现黄蒿、迷迭香、艾草、尖草等主根明显、根茎粗壮、多分枝的多年生草本植物(表 1)。

1.2 样地选择及土壤样品采集

经过查阅资料、野外走访和调查询问,于 2019 年 8 月在山西省吕梁市临县吕梁山区选择土壤及质地类型相同、坡度相近、管理模式相似的地块,选取撂荒年限分别为 1、2、3、5、10、20 a(分别记作 AL1、AL2、AL3、AL5、AL10、AL15、AL20)的枣园土壤作为研究样地,以清耕作业下的枣园土壤为对照(CK),样地基本情况见表 1。清耕区一年 3~4 次耕作,去除地表杂草及其他覆盖物;撂荒区自撂荒之后,无人耕作及其他管理措施,任野生植被自然生长。在各撂荒年限草地以及清耕对照区分别布设 3 个采样小区($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),每个采样小区内随机取 3 个采样点,在 3 个采样点内分别采集 0~20 cm 土层的原状土壤保存至已标记好的大铝盒($22.5 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$)与容积为 200 cm^3 的环刀中,防止土壤结构发生断裂;同时在 3 个采样小区中按“S”型 5 点采样法

采集 0~20 cm 土层的混合土样保存至自封袋中。其中,大铝盒中土样用于团聚体相关指标测定;环刀内土样用于测定土壤容重及孔隙度;自封袋中混合土样用于测定土壤总养分含量。将大铝盒中原状土样在阴

凉处自然风干,风干过程中沿其自然断裂面轻轻掰成直径为 1 cm 左右的小土块,并去除植物根系残体与小石块。将自封袋中混合土样除去石块、根系等,风干、磨细、过筛(0.149 mm)后备用。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sampling plots

样地	经纬度	海拔 (m)	覆盖度 (%)	优势草种	土壤 pH	土壤容重 (g/cm ³)	土壤孔隙度 (%)	土壤全氮 (g/kg)	土壤有效磷 (mg/kg)
CK	110.5839°E, 38.0961°N	1025.0	-	-	8.50	1.53	42.26	0.0336	2.27
AL1	110.5325°E, 38.0374°N	927.7	70	狗尾巴草、地锦草	8.52	1.39	47.55	0.0812	3.35
AL2	110.5325°E, 38.0377°N	926.0	70	狗尾巴草、牵牛花	8.52	1.36	48.68	0.0756	2.96
AL3	110.5447°E, 38.0867°N	937.4	40	黄蒿、碱蓬	8.55	1.48	44.15	0.0588	2.17
AL5	110.5320°E, 38.0398°N	930.0	50	刺芒野古草、野豌豆	8.58	1.32	50.19	0.0700	1.97
AL10	110.5326°E, 38.0398°N	930.0	60	天门冬、迷迭香	8.51	1.31	50.57	0.0924	1.28
AL15	111.1677°E, 38.0180°N	1304.4	70	草木犀、艾草	8.54	1.40	47.17	0.0980	1.87
AL20	111.1680°E, 38.0186°N	1343.4	75	草木犀、尖草、黄蒿	8.50	1.35	49.06	0.1064	2.76

1.3 测定指标及方法

土壤机械稳定性团聚体含量测定采用干筛法^[10]。将大铝盒中风干土样置于一套孔径为 5、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛上,沿套筛水平方向用手摇动进行筛分,将土样分成 >5、5~2、2~1、1~0.25、<0.25 mm 五个粒级,收集各粒径土壤,称重,并计算机械稳定性大团聚体含量(>0.25 mm 团聚体含量, $R_{>0.25}$)、团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[11]。

土壤水稳性团聚体含量测定采用湿筛法^[10]。按照干筛后的粒径分布比例,配取 50 g 干土土样。将套筛(由上至下为 5、2、1、0.5、0.25 mm)放入 TPF-100 土壤团粒结构分析仪的沉降桶中,给桶内加水至套筛内最大粒径筛子的中心位置。将已称好的 50 g 土样放入套筛内,水中静置 3 min,启动马达,使套筛在水中上下振荡 5 min,振荡速度为每分钟 30 次,上下移动距离为 3~4 cm。振荡完成后将套筛小心拿出,待水稍干后,将留在各级筛子上的团聚体用蒸馏水洗至已编号的蒸发皿中,将土样按照套筛粒级分为 >5、5~2、2~1、1~0.25、<0.25 mm 五个粒级,随后烘干、称重,并计算水稳性大团聚体含量($R_{>0.25}$)、团聚体 MWD 和 GMD^[11]。

取部分混合土样用于测定土壤总有机碳含量,取干筛后各粒级土样用于测定机械稳定性团聚体有机碳含量,取湿筛后各粒级土样用于测定水稳性团聚体有机碳含量,并计算各级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率^[12]。以上土样均过 0.149 mm 筛后采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[13]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据初步整理与绘制图形,采用 SPSS 22 软件进行单因素方差分析和相关分析,不同参数之间多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同撂荒年限对土壤机械稳定性团聚体粒级分布的影响

由表 2 可知,随撂荒年限的增加,土壤机械稳定性大团聚体数量由大到小表现为 AL20>AL1>AL15>AL3>AL5>AL2>AL10>CK,各撂荒样地 >5、5~2、2~1、1~0.25 mm 团聚体所占比例较 CK 均显著增加,提高范围分别为 15.6~51.3、6.6~14、2.7~6.8、0.1~5.3 个百分点。除撂荒 10 a 样地外,其余撂荒样地均以大团聚体在土壤团粒结构中占主导地位,且在撂荒初期(1~5 a)以及撂荒 15 a 后效果较显著。显著性分析表明,CK 与各撂荒样地机械稳定性团聚体含量之间在 5 个粒径中均表现出显著性差异($P<0.05$)。

由表 3 可知,撂荒恢复后,机械稳定性团聚体 MWD、GMD 随撂荒年限的增加均表现出先降低后增加的特点,在 AL20 下达到最高值;与 CK 相比,撂荒恢复后机械稳定性团聚体 MWD、GMD 提高范围分别为 0.98~2.69 mm 和 0.21~1.23 mm。机械稳定性团聚体的 MWD 与 GMD 除撂荒 2、5a 样地间差异性不显著外,其余撂荒年限样地间 MWD、GMD 差异性均达显著水平($P<0.05$)。

表 2 土壤机械稳定性团聚体质量分数
Table 2 The distribution of different size of soil mechanical-stable aggregates

样地	机械稳定性各粒径团聚体质量分数(%)					
	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.25 mm	>0.25 mm	<0.25 mm
CK	5.2 h	2.3 h	4.3 h	7.4 h	19.3 h	80.7 a
AL1	56.5 a	8.9 g	7.0 g	7.5 g	79.4 b	20.6 g
AL2	26.5 e	9.7 f	10.1 e	12.7 a	56.8 f	43.2 c
AL3	31.2 d	11.0 d	10.8 b	7.8 e	60.8 d	39.2 e
AL5	25.6 f	11.1 c	11.1 a	11.4 b	58.5 e	41.5 d
AL10	20.8 g	10.6 e	9.6 f	7.7 f	48.5 g	51.5 b
AL15	33.7 c	12.3 b	10.2 d	8.6 d	65.0 c	35.0 f
AL20	45.9 b	16.3 a	10.6 c	11.0 c	81.1 a	18.9 h

注：同列不同小写字母表示各样地间差异显著($P<0.05$)，下同。

2.2 不同撂荒年限对土壤水稳性团聚体粒级分布的影响

土壤水稳性团聚体既是保持土壤结构稳定的主要因素，也是评估土壤抗蚀能力的重要指标。土壤经过湿筛后，不稳定的大团聚体遇水后分散，形成大量<0.25 mm 的微团聚体。由表 4 可知，随撂荒年限的增加，水稳性大团聚体数量表现为 AL20>AL15>AL10>AL5>AL1>AL2>CK>AL3。除 AL3 样地外，其他撂荒年限样地水稳性大团聚体所占比例较 CK 均显著增加，其中 >5、5 ~ 2、2 ~ 1 mm 团聚体较 CK 增加范围分别为 0.1 ~ 44.0、0.6 ~ 9.1、0.5 ~ 3.4 个百分点，而 1 ~ 0.25 mm 与<0.25 mm 团聚体之和所占比例较 CK 均显著降低，降低范围为 1.1 ~ 56.4 个百分点。对 5 ~ 2 mm 团聚体，AL2 和 AL10 样地差异性不显著，其余撂荒年限样地均呈现出显著性差异($P<0.05$)。>5、2 ~ 1、1 ~ 0.25 与<0.25 mm 各粒径水稳性团聚体数量各撂荒年限样地间差异性均达显著水平($P<0.05$)。

由表 3 可知，撂荒 3 a 后，水稳性团聚体 MWD、GMD 值随撂荒年限延长均呈逐步增加的趋势；与 CK 相比，水稳性团聚体 MWD、GMD 值在撂荒 3 a 时显著下降；而在其他撂荒年限中均显著提高。各撂荒年限样地水稳性团聚体 MWD 均显示出差异显著性($P<0.05$)，水稳性团聚体 GMD 中，除了撂荒 1、2 a 样地间差异性不显著外，其余撂荒年限样地 GMD 的差异性均达显著水平($P<0.05$)。

2.3 不同撂荒年限对土壤有机碳含量和分布的影响

2.3.1 对土壤总有机碳含量的影响 如图 1 所示，撂荒恢复后土壤总有机碳含量较 CK 均显著增加，增加范围为 1.72 ~ 7.12 g/kg。不同撂荒年限中，

土壤总有机碳含量随撂荒年限的延长呈现出先减少后增加的趋势，其中在 AL3 样地达最小值 2.48 g/kg，在 AL20 样地达最大值 7.88 g/kg。不同样地间差异性均达显著水平($P<0.05$)。

表 4 土壤水稳性团聚体粒级分布
Table 4 The distribution of different size of soil water-stable aggregates

样地	水稳性团聚体各粒径质量分数(%)					
	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.25 mm	>0.25 mm	<0.25 mm
CK	0.0 h	1.8 f	2.3 g	10.3 b	14.4 g	85.6 b
AL1	0.1 g	2.4 e	2.8 f	10.8 a	16.0 e	84.0 d
AL2	2.0 e	2.9 d	3.2 d	7.1 d	15.1 f	84.9 c
AL3	0.3 f	1.6 g	1.6 h	4.3 h	7.8 h	92.2 a
AL5	10.9 d	3.7 b	3.6 c	6.6 f	24.8 d	75.2 e
AL10	13.4 c	2.9 d	3.0 e	6.8 e	26.1 c	73.9 f
AL15	23.9 b	3.5 c	4.0 b	5.9 g	37.3 b	62.7 g
AL20	44.0 a	10.9 a	5.7 a	9.1 c	69.6 a	30.4 h

表 3 不同撂荒年限土壤团聚体 MWD 与 GMD
Table 3 MWDs and GMDs of aggregates with different fallow years

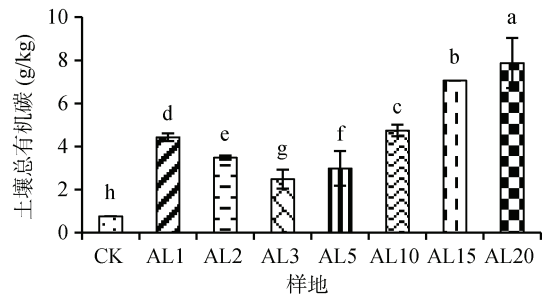
样地	机械稳定性团聚体		水稳性团聚体	
	MWD(mm)	GMD(mm)	MWD(mm)	GMD(mm)
CK	0.42 g	0.10 g	0.14 g	0.07 f
AL1	3.11 a	1.33 a	0.16 f	0.08 e
AL2	1.69 e	0.40 e	0.26 e	0.08 e
AL3	1.97 d	0.52 d	0.13 g	0.06 f
AL5	1.68 e	0.43 e	0.72 d	0.13 d
AL10	1.40 f	0.31 f	0.82 c	0.14 c
AL15	2.08 c	0.61 c	1.36 b	0.23 b
AL20	2.78 b	1.20 b	2.52 a	0.82 a

2.3.2 对土壤机械稳定性团聚体有机碳含量的影响 由图 2 可知，不同撂荒年限土壤 >5、5 ~ 2、2 ~ 1、1 ~ 0.25、<0.25 mm 机械稳定性团聚体有机碳含量变化

范围分别为 1.55 ~ 8.13、1.75 ~ 9.26、2.12 ~ 9.19、3.57 ~ 21.38、2.05 ~ 9.79 g/kg，土壤机械稳定性团聚体有机碳含量随着撂荒年限的增加呈现出先减少后增加的趋势。其中，AL3 样地在大团聚体各粒径中有机碳含量均为最小值，撂荒 3 a 后，土壤机械稳定性团聚体有机碳含量逐年递增，各粒径团聚体有机碳含量在 AL20 样地中均达最大值，变化范围为 8.13 ~ 21.38 g/kg。随团聚体粒径的逐渐减小，各撂荒年限土壤机械稳定性团聚体有机碳含量均呈现出先增后减的趋势，以 1 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳含量最高，平均达 8.43 g/kg，而 >5 mm 团聚体有机碳含量最低，平均为 3.33 g/kg。除 >5 mm 团聚体有机碳含量在 AL2 与 AL5 样地间差异不显著外，其余粒径团聚体在 CK 及各撂荒年限样地间差异性均达显著水平($P<0.05$)。

2.3.3 对土壤水稳性团聚体有机碳含量的影响 由图 3 可知，土壤水稳性团聚体有机碳含量随撂荒年限的延长均呈现出先增后减再逐步增加的趋势，其中 AL2 样地水稳性团聚体有机碳含量较 CK 和 AL1 样地显著增加，而 AL3 与 CK 相比显著降低，除 AL2 样地 >5 mm 水稳性团聚体有机碳含量高于 AL20 样

地外，其余粒径团聚体中有机碳含量均以 AL20 样地最高。各粒径水稳性团聚体有机碳含量变化范围分别为 1.27 ~ 6.93、1.66 ~ 8.56、1.53 ~ 10.19、2.67 ~ 19.46、0.23 ~ 8.24 g/kg。各样地水稳性团聚体有机碳含量随粒径的减小呈现出先增加后减少的趋势，以 1 ~ 0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量最高，其中 AL20 样地达最大值 19.46 g/kg。除了 1 ~ 0.25 mm 与 <0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量在 CK 与 AL10 样地间差异不显著，其余粒径团聚体在 CK 及各撂荒年限样地间差异性均达显著水平($P<0.05$)。



(图中不同小写字母表示处理间差异性显著($P<0.05$))
图 1 不同撂荒年限土壤总有机碳含量
 Fig. 1 Soil total organic carbon contents with different fallow years

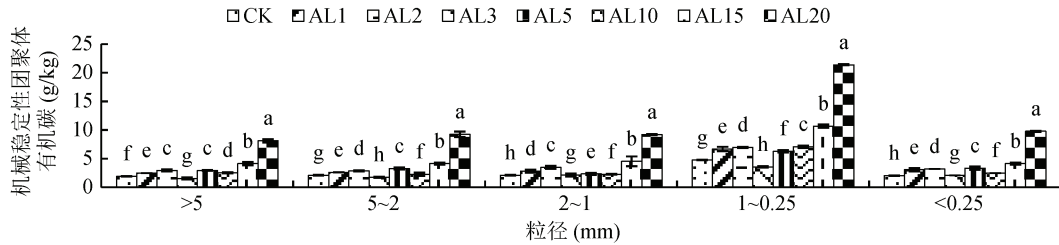


图 2 不同撂荒年限土壤机械稳定性团聚体有机碳含量
 Fig. 2 Organic carbon contents in mechanical-stable aggregates with different fallow years

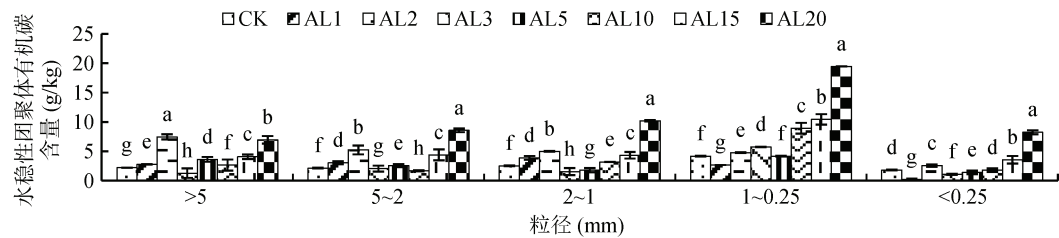


图 3 不同撂荒年限土壤水稳性团聚体有机碳含量
 Fig. 3 Organic carbon contents in water-stable aggregates with different fallow years

2.3.4 不同粒级土壤团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率 由表 5 可知，撂荒恢复后，各粒径机械稳定性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率均随撂荒年限的延长呈现出先减后增的特点，且主要集中在大团聚体中，为 54.3% ~ 82.2%，较 CK 提高了 25.0 ~ 52.9 个百分点。除 AL20 样地外，其他撂荒年限样地水稳性团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率主要集中在微团聚体中，为 50.7% ~ 81.1%，且随撂

荒年限的增加表现出先增后减的趋势，撂荒 3 a 后，水稳性团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率逐步向大团聚体转移，在撂荒 20 a 后达到最大值 71.8%。不同粒径团聚体中，各样地机械稳定性团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率的差异性均达显著水平($P<0.05$)。水稳性团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率，在 >5 mm 团聚体中 CK 和 AL1 样地间差异不显著，其余样地间差异性均达显著水平；在 2 ~ 1 mm

团聚体中 AL1 和 AL5、AL2 和 AL15 样地间差异不显著, 其余样地间差异性均达显著水平; 在 5~2、1

~0.25、<0.25 mm 团聚体中各样地间差异性均达显著水平。

表 5 土壤团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率
Table 5 Contribution rates of organic carbon in aggregates to soil total organic carbon

样地	机械稳定性团聚体						水稳性团聚体					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	>0.25 mm	<0.25 mm	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	>0.25 mm	<0.25 mm
CK	4.8 h	2.4 h	4.4 h	16.8 g	29.3 h	71.7 a	0.1 g	1.7 h	2.9 f	25.3 a	21.1 f	69.9 c
AL1	47.7 a	7.9 e	5.9 g	17.1 f	78.4 b	21.6 g	0.1 g	2.8 f	3.8 c	22.1 b	17.7 h	72.3 b
AL2	21.2 f	7.6 g	9.5 c	24.4 a	62.3 d	37.7 e	3.5 e	5.5 b	5.3 b	17.4 e	21.7 e	68.3 d
AL3	24.3 d	9.7 d	11.7 a	14.0 h	59.1 f	40.9 c	0.9 f	3.5 e	3.4 d	11.2 h	18.9 g	81.1 a
AL5	21.4 e	10.3 c	7.4 f	21.4 c	60.6 e	39.4 d	10.7 d	4.6 c	3.8 c	19.4 d	38.6 d	61.4 e
AL10	18.6 g	7.7 f	8.6 e	19.9 d	54.3 g	45.7 b	18.2 c	3.6 d	3.1 e	15.3 g	40.1 b	59.9 f
AL15	28.8 c	10.5 b	9.5 b	18.9 e	67.7 c	32.3 f	24.2 b	2.7 g	5.3 b	17.1 f	39.3 c	50.7 g
AL20	35.9 b	14.5 a	9.4 d	23.0 b	82.2 a	17.8 h	35.5 a	10.3 a	6.4 a	19.6 c	71.8 a	28.2 h

2.4 土壤团聚体稳定性与土壤有机碳含量的相关性

由表 6 可知, 各样地土壤机械稳定性、水稳性大团聚体含量与其稳定性指标 MWD、GMD 间有极显著相关性($P<0.01$)。土壤总有机碳含量与>5、5~2、2~1、<0.25 mm 机械稳定性团聚体有机碳含量均有显著相关性($P<0.05$), 与 1~0.25 mm 机械稳定性团聚体有机碳含量有极显著相关性。机械稳定性大团聚体含量和土壤总有机碳含量存在显著相关性($P<0.05$)。水稳性团聚体 MWD 与 5~2、2~1 mm 水稳性团聚体有机碳含量存在显著相关性($P<0.05$), 与 1~0.25、<0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量存在极

显著相关性($P<0.01$); 水稳性团聚体 GMD 与 5~2、2~1、1~0.25 和<0.25 mm 团聚体有机碳含量存在极显著相关性($P<0.01$); 水稳性大团聚体含量与 2~1、1~0.25 和<0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量存在极显著相关性($P<0.01$), 与 5~2 mm 团聚体有机碳含量存在显著相关性($P<0.05$); 5~2、2~1、1~0.25 和<0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量与土壤总有机碳含量存在显著相关性($P<0.05$)。水稳性团聚体 MWD、大团聚体含量与土壤总有机碳含量均呈极显著相关性($P<0.01$), 水稳性团聚体 GMD 与土壤总有机碳含量间存在显著相关性($P<0.05$)。

表 6 团聚体稳定性参数与团聚体有机碳及土壤总有机碳含量的相关性
Table 6 Correlation coefficients of aggregate stability parameters with organic carbon contents in soil and aggregates

	MWD	GMD	$R_{>0.25}$	SOC	
机械稳定性团聚体	>5 mm 团聚体有机碳	0.484	0.553	0.549	0.814*
	5~2 mm 团聚体有机碳	0.484	0.567	0.543	0.765*
	2~1 mm 团聚体有机碳	0.516	0.588	0.564	0.797*
	1~0.25 mm 团聚体有机碳	0.498	0.577	0.549	0.837**
	<0.25 mm 团聚体有机碳	0.532	0.611	0.586	0.769*
	MWD		0.949**	0.976**	0.670
	GMD			0.880**	0.626
	$R_{>0.25}$				0.729*
	>5 mm 团聚体有机碳	0.539	0.572	0.570	0.514
	5~2 mm 团聚体有机碳	0.781*	0.859**	0.811*	0.710*
水稳性团聚体	2~1 mm 团聚体有机碳	0.820*	0.908**	0.865**	0.760*
	1~0.25 mm 团聚体有机碳	0.955**	0.942**	0.938**	0.804*
	<0.25 mm 团聚体有机碳	0.923**	0.955**	0.930**	0.716*
	MWD		0.944**	0.990**	0.853**
	GMD			0.964**	0.750*
	$R_{>0.25}$				0.834**

注: $R_{>0.25}$ 表示大团聚体含量; SOC 表示土壤总有机碳含量; *表示相关性显著($P<0.05$), **表示相关性极显著($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 不同撂荒年限对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体大小与数量影响土壤的结构稳定性,通常认为, >0.25 mm 粒级水稳性团聚体的数量与土壤稳定性呈正相关^[14]。已有研究表明,撂荒恢复能显著提高 >0.25 mm 团聚体数量,且撂荒年限越长,改善效果越好^[15-16]。本研究结果表明,自然撂荒恢复后,土壤机械稳定性与水稳性大团聚体所占比例显著高于对照,且随撂荒年限的延长均呈现出先降低后增加的趋势,这与王月玲等^[15]对宁南黄土丘陵区弃耕撂荒地的研究结果相似。说明撂荒恢复后,植被覆盖率增加,其根系分泌出大量有机物质使微团聚体相互胶结从而形成大团聚体。本研究还发现,撂荒 1 a 后机械稳定性大团聚体数量及其稳定性显著高于对照且仅次于撂荒 20 a 样地的最大值,但其水稳性大团聚体所占比例非常低,这可能是由于撂荒 1 a 后土壤表层生长出较多短茎、根细小的 1~2 a 生草本植物,使机械稳定性微团聚体聚合胶结为大团聚体,但由于 1~2 a 生草本植物质脆、茎细的特点,还未形成较强的抗水蚀能力,因此大团聚体遇水后发生分散,形成大量微团聚体。

MWD、GMD 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。本试验表明,机械稳定性团聚体 MWD、GMD 随撂荒年限的延长呈现出先降低后增加的趋势,水稳性团聚体 MWD、GMD 在撂荒前 3 a 较低,之后随撂荒年限的延长而显著增加,较对照显著提高了土壤稳定性,与前人研究结果相似^[17-18]。说明长期撂荒有利于土壤大团聚体的形成,结构稳定性的增强。本试验中撂荒 3 a 土壤水稳性大团聚体含量及其 MWD、GMD 最低,可能与 1~2 a 生草本植物生长周期结束,而多年生草本植物还未生长成熟有关。而撂荒 3 a 后,随地表植被恢复,土壤中根系密度增加,根系的穿插积压使土壤的团聚能力增强;逐渐增加的植物残体及凋落物增加了土壤有机物质输入,加速了土壤腐殖质及腐殖酸的形成,有机胶体的胶结作用增强。同时,人为耕作对表层土壤大团聚体的扰动降低,土壤团聚体颗粒逐渐形成大团聚体^[19],土壤的稳定性与抗蚀能力逐渐增强。

3.2 不同撂荒年限对土壤有机碳含量及分布的影响

土壤中的有机碳通过有机无机胶结作用参与团聚体形成,团聚体则为土壤有机碳提供物理保护^[20]。

已有研究发现,撂荒恢复能提高土壤团聚体有机碳含量^[21-22]。本研究表明,土壤总有机碳含量随撂荒年限的延长呈先减后增的特点,且均显著高于对照,与前人研究结果相似^[23],即土壤有机碳含量相对于植物生长具有一定迟滞性,本研究中撂荒 3 a 后土壤有机碳含量显著降低,可能是由于撂荒初期 1~2 a 生植物生长周期结束,而多年生植物刚进入生长初期,覆盖率还较低。土壤机械稳定性与水稳性团聚体有机碳含量随撂荒恢复年限的延长呈现出先增后减然后再逐步增加的趋势,且撂荒 20 a 时达最大值;各撂荒年限的团聚体有机碳含量均主要集中于大团聚体内,且以 1~0.25 mm 团聚体含量为最高,这与王兴等^[18]、程曼等^[24]研究结果相似。撂荒恢复后,地表植被恢复,植物在成长发育过程中产生大量的枯枝落叶,这些植物残体进入土壤后形成腐殖质,从而使有机碳含量增加^[25],同时由于表层覆盖物增加,有效防止了外力对土壤团聚结构的冲击,利于形成大团聚体^[26],为大团聚体中有机碳提供了稳定的积碳空间。

团聚体对有机碳的贡献率由团聚体有机碳含量和团聚体粒级组成共同决定^[27]。本试验结果表明,各撂荒年限下土壤机械稳定性团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率主要集中于大团聚体中,除撂荒 20 a 样地外,水稳性团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率主要集中于微团聚体中,这与湿筛后大团聚体遇水崩解形成大量微团聚体有关。在撂荒 20 a 样地中,机械稳定性和水稳性大团聚体有机碳的贡献率均达到最大值,分别为 82.2% 和 71.8%,这与长期撂荒后植物覆盖度增加,大团聚体含量比例增加有关。

3.3 土壤团聚体稳定性与土壤有机碳含量的相关性

研究发现,大团聚体特别是水稳性大团聚体含量的多少可反映土壤结构的好坏以及团聚能力的强弱,其含量越高,土壤结构稳定性越好^[28]。本试验结果表明,机械稳定性和水稳性大团聚体含量与团聚体 MWD、GMD 间均存在极显著相关性($P<0.01$)。撂荒恢复后,植物覆盖率增加,根系密度和面积也逐步增大,根系分泌出黏性易胶结物质,将土壤中微团聚体聚合为比表面积大的团聚体,从而提高了团聚体稳定性^[29]。机械稳定性大团聚体含量与土壤总有机碳含量存在显著相关性($P<0.05$),水稳性大团聚体含量与土壤总有机碳含量存在极显著相关性($P<0.01$)。说明土壤有机碳能够增强土壤团聚体的稳定性^[30],这是因为根系有机物不仅能提高土壤团聚能力,还能在团聚体外层形成疏水层,因而提高团聚体抗侵蚀能力,

提高其稳定性^[31]。

4 结论

1) 撂荒恢复年限明显影响了各粒级土壤团聚体数量及团聚体稳定性。撂荒初期, 土壤团聚体含量呈波动变化趋势; 3 a 后, 土壤水稳性大团聚体数量及稳定性随撂荒年限的增加逐步提高。

2) 随着撂荒年限增加, 土壤总有机碳和各级团聚体有机碳含量呈先降低后增加的趋势。不同撂荒年限机械稳定性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率为 54.3%~82.2%; 水稳性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率为 17.7%~71.8%, 且呈现随撂荒年限延长向大团聚体分配的特点。

3) 水稳性团聚体 MWD、大团聚体含量与土壤总有机碳含量极显著相关, GMD 与土壤总有机碳显著相关, 土壤有机碳含量提高对提高团聚体稳定性具有重要作用。

参考文献:

- [1] 殷海善, 贺润平, 孟志兴. 吕梁山红枣产业发展的宏观视角分析[J]. 山西农业科学, 2016, 44(10): 1564-1567.
- [2] 郭明明. 黄土高原沟壑区退耕草地沟头溯源侵蚀及形态演化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [3] 柯炳氨, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 151-156.
- [4] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 15-21, 39.
- [5] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
- [6] 徐红伟, 吴阳, 乔磊磊, 等. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性——以黄土高原为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2223-2232.
- [7] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 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, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [8] 王文鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(16): 2845-2857.
- [9] 于寒青, 李勇, 金发会, 等. 黄土高原植被恢复提高大于 0.25mm 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, 2012, 18(4): 876-883.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [11] 陈磊, 宋书会, 云鹏, 周磊, 高翔, 卢昌艾, 刘荣乐, 汪洪. 连续三年减施氮肥对潮土玉米生长及根际土壤氮素供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(09): 1482-1494.
- [12] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [14] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306-311.
- [15] 王月玲, 王思成, 马璠, 等. 宁南黄土丘陵区撂荒地恢复过程中土壤水稳性团聚体的变化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 310-314.
- [16] 陈文媛, 徐学选, 华瑞, 等. 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, 2017, 37(4): 1486-1492.
- [17] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816-3824.
- [18] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2416-2424.
- [19] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1619-1625.
- [20] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 土壤团聚体对有机碳物理保护机制研究[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 85-90.
- [21] 李懿, 杨子松. 岷江流域不同土地利用方式下的土壤微生物特征及其与土壤养分的关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 33-38, 46.
- [22] 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.
- [23] 李永强, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 61-64, 69.
- [24] 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.
- [25] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 979-986.
- [26] 李娟, 韩霖昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 248-253, 259.
- [27] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 197-203.
- [28] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 等. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 331-336.
- [29] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [30] Fattat M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. CATENA, 2011, 87(1): 60-69.
- [31] Bengough A G. Water dynamics of the root zone: Rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(2): vzj2011. 0111.