

不同农业利用条件对黄土胶结物质组成与团聚特征的影响

黄传琴¹ 周琴¹ 谭文峰^{1,2}

1. 华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;

2. 中科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, 杨陵 712100

摘要 以陕西安塞自然植被土壤和农田土壤(包括施有机肥、施无机肥、不施肥对照)为研究对象,通过分析各粒级团粒中有机质和碳酸钙的分布特征及去除胶结物质前后的粒度组成,探讨不同农业利用条件对黄土团聚特征的影响。结果表明:不同利用方式下的土壤均以粒径 >0.05 mm(45%~65%)和粒径 $0.002\sim 0.05$ mm(30%~45%)的团粒为主;相对于自然土壤,农业活动对粗粒级团粒中碳酸钙的溶解再沉淀过程具有促进作用,增加粒径 <0.002 mm 次生碳酸钙含量;不施肥和施用无机肥显著降低粒径 <0.002 mm 团粒的有机质含量,而施用有机肥显著增加粒径 >0.05 mm 和粒径 <0.002 mm 团粒的有机质含量,有利于大团聚体($250\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)的形成;逐步去除胶结物质过程中,不同利用方式的土壤团粒逐渐破碎,粒度分布曲线和累计曲线均向左不同程度推移。不同利用方式的土壤中碳酸钙和有机质均对土壤颗粒产生胶结作用,且施用有机肥的土壤中碳酸盐和有机质的胶结团聚作用最强。

关键词 土壤; 土壤团聚体; 碳酸钙; 有机质; 农业利用

中图分类号 S 152.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)04-0043-07

土壤中砂粒、粉粒和粘粒与有机物相互胶结凝聚,形成大小不等的团聚体。土壤团聚体在三维空间进一步组织排列,构成宏观上的土壤结构^[1]。土壤结构控制着土壤中水、气、热、养分的保持和运移,直接影响植物生长发育,并在土壤抗蚀性、土壤修复、全球碳汇效应等方面具有重要的作用与功能^[2-3]。因此,团聚体作为土壤结构体的基本单元,一直备受关注。

土壤中的胶结物质主要包括有机胶结物质(有机质)和无机胶结物质(氧化物和碳酸盐)。在有机质含量较高、粘粒和氧化铁铝含量较低的土壤中,有机质的胶结作用占主导地位^[4]。而在有机质含量不高、粘粒和氧化铁铝较高的土壤中,团聚体的形成主要靠粘粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用^[4-6]。在粘粒和有机质含量低的钙质土壤中,碳酸钙成为土壤团聚体的重要胶结剂^[7]。碳酸钙参与了黄土高原地区土壤约99%的团聚体形成^[8]。

我国黄土高原地区发育着富含碳酸盐的土壤,

该区域的农业生产在我国粮食生产中占重要地位。为提高农业生产力、确保粮食稳定生产,施肥成为土壤作物高产管理的重要措施之一。长期定位试验发现,相较于施用无机化肥,施用有机肥可显著提高土壤有机质含量^[9-11]。作为土壤功能和质量的核心,高有机质(SOM)含量不仅能够增加土壤养分供应,还能改善土壤的物理、化学及生物学性质;如降低土壤容重,增强土壤持水性能,增加土壤团聚体含量^[9-12];增强土壤缓冲能力,减缓土壤酸化^[13];改变土壤微生物群落结构^[14-15],增加酶活性及轻/重组有机碳(LFOC/HFOC)含量^[16]等。高强度的人为利用改变土壤的物理、化学、生物特性,必将改变土壤环境、影响土壤中碳酸盐的淋溶淀积过程,从而影响土壤胶结团聚特征与稳定性。因此,本研究以陕西安塞黄绵土为研究对象,通过分析自然土壤和农田土壤团粒中碳酸盐和有机质的分布特征及去除胶结物质前后的粒度组成,探讨不同施肥方式对黄土团聚特征的影响,为培育良好土壤结构、提高土壤质量

收稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201230;41330852)

黄传琴, 博士, 讲师。研究方向: 土壤与环境。E-mail: hcq@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 谭文峰, 博士, 教授。研究方向: 土壤与环境。E-mail: tanwf@mail.hzau.edu.cn

提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

研究区域位于黄土高原中部森林草原带北缘的安塞县,属于暖温带半湿润向半干旱过渡区,年均气温 8~10℃,年均降雨量 450~550 mm;成土母质为第四纪风成黄土,地带性土壤为黄绵土,依据中国土壤系统分类为黄土正常新成土(Los-Orthic Entisols)^[17]。

于 2012 年 5 月中旬采集陕西安塞墩滩山

(N36° 51' 10", E109° 18' 48", 海拔 1 303 m)自然土壤和农田土壤样品。长期定位施肥试验依托中国科学院水利部水土保持研究所安塞水土保持综合试验站,始于 1990 年,一年一熟,谷子-糜子-谷子-黄豆轮作。在施有机肥(羊粪)/OM、施无机肥/NK、不施肥对照/CK 农田样地中,随机选择 3 个代表性样点采集表层 0~20 cm 土样;同时采集相邻山头自然植被下伏土壤样品。同一处理土样混匀后带回室内风干备用。采样点基本理化性质见表 1。利用 SPSS 22.0 对不同利用方式土壤 pH、CaCO₃ 和有机质含量数据进行显著性检验($P < 0.05$)。

表 1 供试土样基本性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil samples studied

土地利用 Land use	pH	CaCO ₃ /%	有机质/(g/kg)	粒度组成/% Grain composition			植物/作物 Vegetation/Crop	
			Organic matter	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay		
灌木 Shrub	8.2b	11.2a	6.6c	27.9	71.4	0.7	植被主要为沙棘,冠层下长有杂草 The dominated vegetation is Hippophae rhamnoides with accompanying weeds	
农地 Farmland	OM	8.0a	11.8b	9.9d	26.0	73.3	0.7	一年一熟,谷子-糜子-谷子-黄豆轮作
	NK	8.2b	12.2b	4.2b	23.1	76.1	0.8	One-year cooked, millet-prosop millet-
	CK	8.3c	13.2c	3.2a	24.3	74.9	0.8	millet-soybean rotation

注:砂粒粒径 0.05~2.00 mm;粉粒粒径 0.002~0.05 mm;粘粒粒径 <0.002 mm。Note: Sand, 0.05-2.00 mm; silt, 0.002-0.05 mm; clay, <0.002 mm。小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。Lowercase letters indicate significant differences, $P < 0.05$ 。

1.2 试验设计与样品分析

称取 0.8 g 全样于 100 mL 烧杯,进行去除 CaCO₃、有机质(OM)、CaCO₃ + OM 以及对照 4 个处理,每个处理 3 个重复。用 10% H₂O₂ 和 10% HCl 分别去除样品中的有机质和碳酸盐。去除完全后给烧杯注满蒸馏水,静置 12 h 后抽去上层清水,重复几次直至溶液呈中性。向上述处理样品加入 5 mL 0.05 mol/L (NaPO₃)₆ 作为分散剂,利用马尔文 MS3000 激光粒度仪分析土壤粒度组成。

根据 Stokes 定律,结合湿筛法和虹吸法分离不同粒级土壤团粒(<0.002 mm、0.002~0.05 mm、>0.05 mm),收集各级团粒 50℃ 烘干,称质量^[18]。取适量全样、粒径 >0.05 mm、粒径 0.002~0.05 mm 团粒样品,逐滴加入 0.1 mol/L HCl 以去除 CaCO₃,不再产生气泡后放入烘箱 105~110℃ 烘干,磨细过筛备用。称取 0.04 g ($d = 0.001$ g) 处理前后土样于样舟中,用总碳测定仪测定供试样品的总碳(total carbon, TC)和总有机碳含量(total organic carbon, TOC)。根据公式(1)~(3)计算土壤全样及各级团粒中有机碳(organic carbon, OC)和无机碳(inorganic carbon, IC)的含量, %。

$$T_{IC} = T_C - T_{OC} \quad (1)$$

$$T_{OC全} = T_{OC < 0.002 mm} \times w_{< 0.002 mm} + T_{OC 0.002 \sim 0.05 mm} \times w_{0.002 \sim 0.05 mm} + T_{OC > 0.05 mm} \times w_{> 0.05 mm} \quad (2)$$

$$T_{IC全} = T_{IC < 0.002 mm} \times w_{< 0.002 mm} + T_{IC 0.002 \sim 0.05 mm} \times w_{0.002 \sim 0.05 mm} + T_{IC > 0.05 mm} \times w_{> 0.05 mm} \quad (3)$$

其中: T_C 、 T_{OC} 及 T_{IC} 分别表示总碳、总有机碳及总无机碳; w 表示对应粒径团粒的百分含量, %。土壤 pH 用电位法(水土质量比 1:1, Orien 868 型 pH 计)测定。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质

采样点自然植被以沙棘为主,并伴生有杂草,其下伏土壤质地为粉壤土,呈碱性($pH = 8.2$),有机质和 CaCO₃ 含量分别为 6.6 g/kg、11.2% (表 1)。农田土壤质地亦为粉壤土,其粒度组成与自然土壤相似,但高强度的人为利用方式明显影响其 pH 值、有机质和 CaCO₃ 含量。由表 1 可见,不施肥(CK)土壤 pH 值为 8.3,显著高于自然土壤;施有机肥(OM)显著降低土壤 pH 值(8.0);而施无机肥(NK)土壤 pH 值与自然土壤相当。CK 与 NK 处理土壤的有机质

含量分别为 3.2、4.2 g/kg, 相对于自然土壤分别降低 52%、36%; 而施用有机肥显著增加土壤有机质含量(为 9.9 g/kg)。农田土壤的 CaCO_3 含量在 11.8%~13.2% 之间变化, 高于自然土壤。一方面农业利用可增强土壤矿物风化, 促使含钙矿物风化与 Ca^{2+} 释放^[19]; 另一方面该试验采用传统的翻耕耕作方式, 促进了土壤有机质的周转, 使土壤中有有机碳逐步向 CO_2 、 HCO_3^- 、 CaCO_3 的转化过程^[20] 得以实现。不同施肥处理土壤 CaCO_3 含量大小顺序为 $\text{CK} > \text{NK} > \text{OM}$, 与有机质含量呈负相关。这一关系已被 Pan 等^[21] 和 Zhao 等^[22] 证实。

2.2 各级团粒中有机质与碳酸盐的分布特点

图 1 是不同利用方式下表层土壤的团粒组成。自然植被下伏土壤(自然土壤)与农田土壤团粒均以粒径 >0.05 mm 粗团粒为主(45%~65%), 其次是粒径 0.002~0.05 mm 团粒(30%~45%), 含有少量粒径 <0.002 mm 团粒($<10\%$)。自然土壤中粒径 >0.05 mm、0.002~0.05 mm 及 <0.002 mm 团粒含量分别为 64%、32%、4%。相对自然土壤, 农田土壤粒径 >0.05 mm 团粒含量大幅降低, 而粒径 0.002~0.05 mm、 <0.002 mm 团粒含量呈不同程度增加; 不同施肥处理之间土壤团粒组成相似, 粒径 >0.05 mm、0.002~0.05 mm、 <0.002 mm 团粒含量分别在 48%~51%、42%~45%、6%~8% 之间变化。

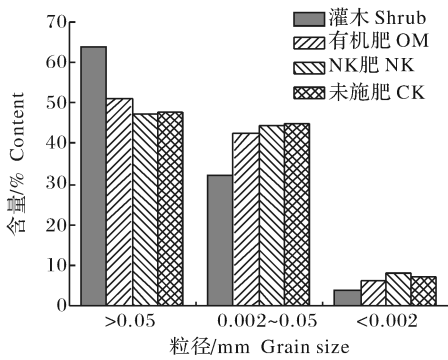


图 1 不同利用方式的土壤中各级团粒的含量

Fig.1 The content of >0.05 mm, 0.002-0.005 mm

and <0.002 mm aggregates in soil under different land uses

不同利用方式下各级土壤团粒中有机质与碳酸钙含量如图 2 所示。供试土壤粒径 >0.05 mm 和粒径 0.002~0.05 mm 团粒中有机质含量较低, 分别在 2.8~8.0、2.7~5.4 g/kg 之间变化; 粒径 <0.002 mm 团粒中有机质含量最高(8.4~64.4 g/kg), 其大小顺序为 $\text{OM} > \text{灌木} > \text{NK} > \text{CK}$ (图 2A)。自然土

壤中粒径 >0.05 mm、0.002~0.05 mm、 <0.002 mm 团粒有机质含量分别为 4.3、5.4、58.3 g/kg, 其储量分别占全土质量的 42%、26%、32%(图 2A, 表 2)。不施肥(CK)处理下, 由于植物的利用消耗, 各级团粒中有机质含量均不同程度减少, 且粒径 <0.002 mm 团粒有机质含量(8.4 g/kg)降幅最大, 其储量仅占全土质量的 18%, 这导致其他粒径团粒(尤其是粒径 0.002~0.05 mm 团粒)有机质储量占比相对增加(图 2A, 表 2)。施无机肥(NK)土壤各级团粒有机质含量呈现与 CK 处理土壤相似的规律(图 2A), 但由于粒径 >0.05 mm 团粒含量的大幅减小导致该级团粒有机质储量占比明显降低, 使粒径 0.002~0.05 mm 和粒径 <0.002 mm 团粒有机质储量占比有所增加(图 1, 表 2)。施有机肥(OM)处理土壤中, 在外源粪肥与团粒结构逐级破碎的共同作用下, 粒径 >0.05 mm 团粒有机质含量增加至 8.0 g/kg, 但其有机质储量占比与自然土壤相当(41%); 粒径 <0.002 mm 团粒有机质含量及储量占比分别增加至 65.6 g/kg、41%; 而粒径 0.002~0.05 mm 团粒有机质含量及储量占比均呈降低趋势(4.1 g/kg, 18%)。供试土壤间各级团粒碳酸钙含量呈相似的变化规律: 粒径 >0.05 mm 和 0.002~0.05 mm 团粒碳酸钙含量较低, 分别在 9.1%~9.7%、6.3%~10.7% 之间变化; 粒径 <0.002 mm 团粒中碳酸钙含量最高(51.3%~81.8%), 其大小顺序为 $\text{CK} > \text{NK} > \text{OM} > \text{灌木}$ (图 2B)。自然土壤中粒径 >0.05 mm、0.002~0.05 mm 和 <0.002 mm 团粒中碳酸钙含量分别为 9.6%、10.7% 和 51.3%, 其储量分别占全土碳酸钙储量的 53%、31%、16%(图 2B, 表 2)。相对于自然土壤, 农田土壤粒径 >0.05 mm 团粒的大幅降低(图 1), 使该团粒碳酸钙储量占比降低了 11%~20%; 粒径 0.002~0.05 mm 团粒含量虽增加约 10%, 但该团粒中碳酸钙含量及其储量占比均呈降低趋势; 而粒径 <0.002 mm 团粒中碳酸钙含量明显增加(OM、NK、CK 分别为 58.0%、59.1%、81.8%), 且该级团粒中碳酸钙储量占比增加了 0.95~1.7 倍(图 2B, 表 2)。

2.3 不同土地利用方式下土壤团粒的胶结特征

在黄土堆积形成过程中, 碎屑方解石的溶解-沉淀形成次生碳酸钙^[23], 并与粘粒结合形成微团聚体^[24]。各利用方式土壤在不同胶结物质去除处理下的粒度分布曲线与累计曲线如图 3 所示。在未去除胶结物质处理下, 不同利用方式土壤团粒主要分

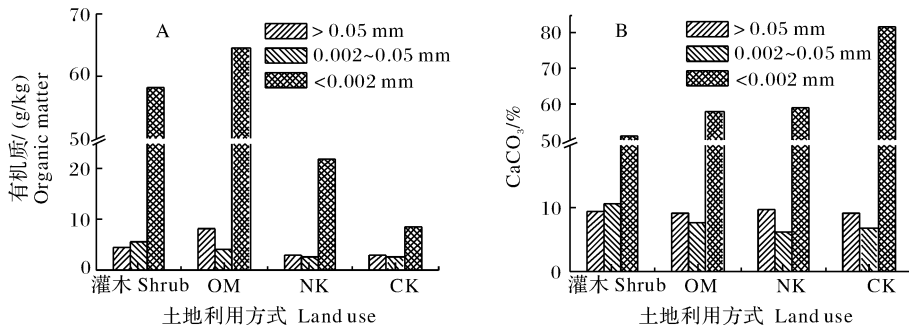


图 2 不同利用方式下土壤中各粒级团粒的有机质和碳酸钙含量

Fig.2 Content of organic matter and CaCO₃ in the >0.05 mm, 0.002~0.05 mm and <0.002 mm aggregates of soil under different land uses

表 2 各粒级团粒中有机质和碳酸盐含量占全土的百分比例

Table 2 The percentage of organic matter and carbonate in the >0.05 mm, 0.002~0.05 mm and <0.002 mm size aggregates to bulk soil

土地利用 Land use	有机质 Organic matter			CaCO ₃			%
	>0.05 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm	>0.05 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm	
灌木 Shrub	42	26	32	53	31	16	
农地 Farmland	OM	41	18	41	27	31	
	NK	31	28	41	38	23	39
	CK	45	37	18	33	24	43

布在 40~50 μm , 且在 3~10 μm 范围内有不同程度的肩台峰(图 3E-H);但施有机肥(OM)处理土壤在 250~1 000 μm 范围内有明显的肩台峰(图 3F),说明施用有机肥提高土壤有机质含量,有利于土壤颗粒的进一步团聚。

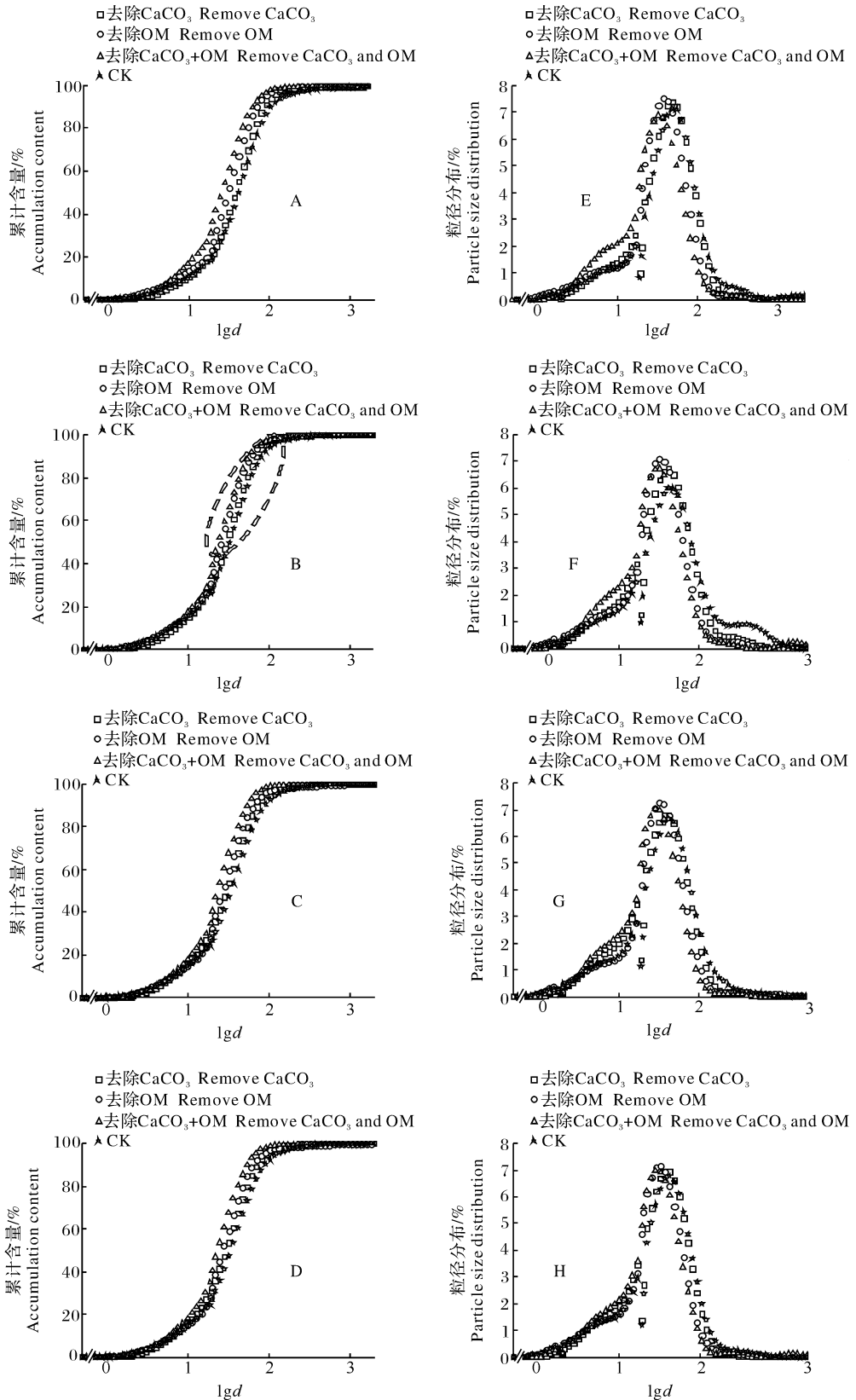
在逐步去除胶结物质(去除 CaCO₃、去除 OM、去除 CaCO₃+OM)过程中,土壤粒度分布曲线和累计曲线均向左不同程度地推移,且粒度分布曲线 3~10 μm 范围的肩台峰逐渐抬升(图 3A-D 和 3E-H),其 D_{50} (中值粒径, μm)和 D_{90} (累计粒度达 90% 时对应的粒径, μm)值的大小顺序均为:未去除胶结物质>去除 CaCO₃>去除 OM>去除 CaCO₃+OM(表 3)。这些结果说明碳酸钙和有机质均对土壤颗粒产生胶结团聚作用,且有机质对土壤颗粒的胶结团聚作用强于碳酸钙。相对于未去除胶结物质处理,去除 CaCO₃+OM 处理下不同利用方式土壤 D_{50} 和 D_{90} 值的减小幅度大小顺序分别为灌木 \approx OM>NK>CK、OM>灌木>NK>CK,且施有机肥土壤 D_{90} 值显著高于其他利用方式(表 3),说明该利用方式下碳酸盐和有机质对土壤颗粒的胶结团聚作用最强。

3 讨论

各利用方式下黄绵土粒度组成一致,质地均为

粉壤土。相对于自然土壤,农业利用促进土壤 Ca²⁺的释放^[19]和有机质的周转及其向碳酸盐的转变^[19],从而提高土壤碳酸钙含量;但土壤 pH 值、有机质含量的变化因施肥方式的不同而变化(表 1)。供试土壤的团粒组成相似,均以粒径>0.05 mm 和粒径 0.002~0.05 mm 团粒为主,分别在 45%~65%、30%~45%之间变化;相对于自然土壤,高强度的人为利用促进土壤团粒结构的破碎,使粒径>0.05 mm 团粒含量大幅降低;但施用有机肥(OM)处理土壤中有机质含量较高,分别为施用无机肥(NK)处理和不施肥(CK)处理土壤的 2.4、3.1 倍,其团粒结构略优于其他施肥处理土壤(图 1)。

供试土壤中粘粒含量较低,有机质和碳酸钙是该土壤团聚体的主要胶结剂,它们在各团粒中分布不均匀。粒径<0.002 mm 团粒中的有机质和碳酸钙含量均高于粒径>0.05 mm 和粒径 0.002~0.05 mm 团粒;各粒径团粒不同利用方式间有机质和碳酸盐含量存在差异(图 2)。土壤颗粒有机物(POM)作为微生物来源,通过真菌菌丝的物理纠缠和胞外多糖胶结,对团聚体稳定起直接作用^[25]。李江涛等^[9-10]发现,与施用化肥比较,施有机肥(尤其是施用畜禽粪便)可显著增加土壤 POM 的含量,同时显著提高土壤团聚体稳定性。相对于自然土壤,耕作不施肥(CK)处理和 NK 处理土壤中,植物的利用



A, E:灌木 Shrub; B, F:施有机肥 OM; C, G:施无机肥 NK; D, H:不施肥对照 CK; $\lg d$:粒径对数值 Logarithm value of particle size.

图 3 不同利用方式土壤在不同处理下颗粒分布和累计曲线

Fig.3 Soil particle size distribution curve and cumulative curve of soil under different land uses with different treatments

表3 不同胶结物质去除处理下各利用方式土壤的 D_{50} 、 D_{90} 值Table 3 D_{50} and D_{90} values of soil under different land uses with different treatments μm

处理 Treatment	D_{50}				D_{90}			
	灌木 Shrub	OM	NK	CK	灌木 Shrub	OM	NK	CK
去除 CaCO_3 Remove CaCO_3	38	33	30	30	88	86	73	71
去除 OM Remove organic matter	31	27	27	25	70	65	65	59
去除 $\text{OM}+\text{CaCO}_3$ Remove organic matter and CaCO_3	26	24	23	24	63	61	55	58
未去除胶结物质 Without removal treatment	41	39	34	32	106	172	91	82

消耗使各粒径团粒中有机质含量均不同程度减少；而施有机肥(OM)处理土壤粒径 $>0.05\text{ mm}$ 和粒径 $<0.002\text{ mm}$ 团粒有机质含量均有所增加(图2)，土壤团粒分布曲线在 $250\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 范围内有明显的肩台峰(图3F)，说明施用有机肥提高土壤有机质含量，有利于土壤颗粒的进一步团聚，其团粒 D_{50} 值与自然土壤相当，但 D_{90} 值为 $172\ \mu\text{m}$ ，远高于其他利用方式土壤(图3B,表3)。

黄土中的碳酸钙在砂粒、粉粒和粘粒中均有分布^[26]，粗粉砂粒级原生碳酸钙在土体中起骨架支持作用，次生碳酸钙在骨架颗粒之间起胶结作用^[27]。王宁等^[28]研究发现，中国西北干旱区表土中碳酸盐含量随土壤颗粒粒径减小而逐渐升高，且细颗粒中次生碳酸盐相对比例大。一方面，高强度的人为利用促进粗粒级团粒中碳酸钙的溶解再沉淀过程，形成大量粒径 $<0.002\text{ mm}$ 次生碳酸钙。另一方面，该研究区处于半湿润半干旱过渡区，土壤中碳酸钙的淋溶淀积过程较弱。因此，农田土壤中形成的碳酸钙多以粒径 $<0.002\text{ mm}$ 次生碳酸钙形式存在(图2B)。

综上所述，不同利用方式下土壤均以粒径 $>0.05\text{ mm}$ 团粒为主(45%~65%)，其次为粒径 $0.002\sim 0.05\text{ mm}$ 团粒(30%~45%)，含有少量粒径 $<0.002\text{ mm}$ 团粒($<10\%$)。农业利用促进团粒中有机质的周转与碳酸钙的溶解再沉淀过程，显著增加粒径 $<0.002\text{ mm}$ 次生碳酸钙含量。施无机肥(NK)处理和不施肥(CK)处理显著降低粒径 $<0.002\text{ mm}$ 团粒有机质含量，而施用有机肥(OM)处理显著增加粒径 $>0.05\text{ mm}$ 和粒径 $<0.002\text{ mm}$ 团粒有机质含量，有利于大团聚体($250\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)的形成。不同利用方式土壤中碳酸钙和有机质均对土壤颗粒产生胶结作用，且施用有机肥土壤中碳酸盐和有机质的胶结团聚作用最显著。

参 考 文 献

- [1] AMÉZKETA E. Soil aggregate stability: a review[J]. Journal of sustainable agriculture, 1999, 14(2/3): 83-151.
- [2] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1148-1158.
- [3] 张志毅, 汤文娟, 熊又升, 等. 改良剂对冷浸田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(4): 37-43.
- [4] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-429.
- [5] 章明奎, 何振力, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 359-365.
- [6] IGWE C A, AKAMIGBO F O R, MBAGWU J S C. Physical properties of soils of southeastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability[J]. Soil science, 1995, 160(6): 431-441.
- [7] 赵传燕, 李林. 兰州市郊区土壤水稳性微团聚体的组成分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 90-94.
- [8] 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.
- [9] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 912-917.
- [10] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2354-2359.
- [11] HATI K M, SWARUP A, DWIVEDI A K, et al. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2007, 119: 127-134.
- [12] CELIK I, GUNAL H, BUDAK M, et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions[J]. Geoderma, 2010, 160(2): 236-243.
- [13] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱性及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153-1160.
- [14] 辛亮, 武传东, 曲东. 长期施肥对旱地土壤中氨氧化微生物丰度和分布的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(6): 41-46.
- [15] 袁红朝, 吴昊, 葛体达, 等. 长期施肥对水稻土土壤细菌、古菌多样性和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1807-

- 1813.
- [16] ZHAO J, NI T, LI J, et al. Effect of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied soil ecology, 2016, 99: 1-12.
- [17] 龚子同. 中国土壤系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] 李学垣. 土壤化学与试验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [19] 贾宇平, 段建南. 土地利用方式对黄土丘陵土壤 CaCO_3 含量及分布的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 319-321.
- [20] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 325-334.
- [21] PAN G X, LI L Q, ZHANG X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. Advances in earth science, 2003, 18(4): 609-618.
- [22] ZHAO W, ZHANG R, HUANG C Q, et al. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau[J]. Catena, 2016, 139(3): 191-198.
- [23] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 198-204.
- [24] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [25] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Total young organic matter distributions in aggregate of silty cultivated soils[J]. European journal of soil science, 1995, 46: 449-459.
- [26] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 18-28.
- [27] 王永焱, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [28] 王宁, 刘卫国. 中国西北干旱区不同粒径表土碳酸盐含量及碳、氧同位素组成[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 158-163.

Effects of agricultural utilization on composition of binding agents and cementation characteristics of loess

HUANG Chuanqin¹ ZHOU Qin¹ TAN Wenfeng^{1,2}

1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract The contents of organic matter and calcium carbonate in different size aggregation and the particle size distribution of Los-Orthic Entisols in Ansai (Shaanxi) Province under different uses with and without binding agents removal were analyzed. The effects of agricultural utilization on loess agglomerate characteristics were investigated. The results showed that aggregate in soils under different uses were dominated by >0.05 mm (45%-65%) and 0.002-0.05 mm (30%-45%) aggregate. Agronomic activities promoted the leaching and deposition of calcium carbonate resulting in a great enhancement of secondary carbonate in <0.002 mm fraction compared with the natural soil. No fertilization treatment (CK) and inorganic fertilizer application (NK) significantly reduced organic matter content in <0.002 mm fraction. But organic fertilizer treatment significantly increased organic matter content in >0.05 mm and <0.002 mm fraction and subsequently favored the formation of macroaggregate of 250-1 000 μm . Gradual removal of binding agents caused the shift of soil particle size distribution curve and cumulative curve to the left with varying degrees as a result of aggregate fragmentation. It is indicated that both calcium carbonate and organic matter cementation occurred in the soils under different land uses. The cementation of calcium carbonate and organic matter was strongest in soil with organic fertilizer application. It will provide scientific basis for improving soil quality and productivity in loess region.

Keywords soil; soil aggregation; CaCO_3 ; organic matter; agricultural utilization

(责任编辑:陆文昌)