文章编号:1000-7601(2023)03-0210-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.03.27

绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田土壤团聚体有机碳含量的影响

李 超[1,2],王 俊[1,2,3],温萌萌[1,2],张少宏[1,2],邢文超[1,2],付 鑫[4]

(1.西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127;2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127;
3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;4 河北农业大学国土资源学院,河北 保定 071001)

摘 要:依托黄土塬区 4 a 绿肥填闲种植田间定位试验,开展不同填闲作物对土壤团聚体组成及各组分有机碳在团聚体中分布影响的研究,为阐明填闲种植措施下土壤有机碳库的物理保护机制提供依据。试验设置 4 个处理,即冬小麦夏闲期种植长武怀豆(SB)、苏丹草(SG)、怀豆/苏丹草混播(Mix)和裸地休闲(CK)。利用干筛法将全土筛分为>5 mm、2~5 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 等 4 个粒级,分别测定土壤和各粒级团聚体中有机碳和颗粒有机碳含量,进而计算团聚体平均重量直径及有机碳贡献率。结果表明:绿肥种植对土壤团聚体分布有显著影响,各绿肥处理均有利于 0~10 cm 土层土壤团聚体的形成,但对亚表层土壤团聚结构影响较小。与 CK 相比,在 0~40 cm 各土层,SB、SG 和 Mix 处理均显著提高土壤有机碳含量、颗粒有机碳含量及团聚体平均重量直径,提高幅度分别为 7.9%、8.0%和 7.9%,其中 SB 更有利于表层土壤有机碳的固存,且土壤有机碳和颗粒有机碳含量之间呈显著正相关关系,这两者与团聚体平均重量直径之间均呈显著负相关关系。不同处理下土壤团聚体各有机碳组分含量存在差异,与 CK 相比,SB 和 Mix 均显著提高了 0~10 cm 土层团聚体各粒径有机碳和颗粒有机碳含量,而 SG 更有利于提高 10~20 cm 土层团聚体有机碳含量。各粒级团聚体有机碳含量均以<0.25 mm 团聚体最高,但 80%以上的各组分有机碳来自于>0.25 mm 团聚体。此外,绿肥种植均提高了>5 mm 团聚体有机碳和颗粒有机碳贡献率,使更多的有机碳保存在>5 mm团聚体中,有利于提高土壤供肥能力。综上所述,在黄土高原旱作农业区,冬小麦夏闲期种植绿肥作物可以有效提升土壤碳储量,同时促进团聚体有机碳库的分布及固持,且长武怀豆单播方式的表层固碳效果最优。

关键词:绿肥;填闲种植;土壤团聚体;土壤有机碳;颗粒有机碳

中图分类号:S152.4 **文献标志码**:A

Effect of green manure cover cropping on soil aggregate-associated organic carbon in a dryland winter wheat field

LI Chao[1,2], WANG Jun[1,2,3], WEN Mengmeng[1,2], ZHANG Shaohong[1,2], XING Wenchao[1,2], FU Xin[4]

(1.*College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710127, *China*;
2.*Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an, Shaanxi* 710127, *China*;
3.*Institute of Water and Soil conservation Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
4.*College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071001, *China*)

Abstract: Based on a 4-year field experiment in the Loess Plateau, the effects of green manure cover cropping on soil aggregates and aggregate-associated organic carbon were studied. Three cover crops including Changwu soybean (SB), Sudan grass (SG), Changwu soybean/Sudan grass mixture (Mix) and a control with no cover crop (CK) were set during summer fallow period under winter wheat monoculture. Dry sieving method was used to sieve the whole soil into >5 mm, 2~5 mm, 0.25~2 mm and <0.25 mm size class for soil aggregation measurements. The

收稿日期:2022-04-21 **修回日期**:2022-07-27

基金项目:中国科学院"西部之光"西部引进人才项目(中科院人字[2018]99 号);国家自然科学基金项目(42277322,31570440);陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-XA-005)

作者简介:李超(1997-),女,山西晋城人,硕士研究生,研究方向为旱作农田碳氮分组。E-mail:591728220@qq.com

通信作者:王俊(1974-),男,河南虞城人,教授,主要从事旱作农田生态系统可持续管理研究。E-mail:wangj@nwu.edu.cn

contents of organic carbon and particulate organic carbon in the soil and each size class aggregate, aggregate mean weight diameter and contribution of soil organic carbon were determined separately. The results showed that cover cropping had a significant effect on soil aggregates distribution. Cover crop enhanced the formation of soil aggregates at 0~10 cm soil layer but had little impact on subsoils. Compared to CK, SB, SG and Mix significantly increased soil organic carbon content, particulate organic carbon content and aggregate mean weight diameter at 0~40 cm depths by 7.9%, 8.0% and 7.9%, respectively. SB group was more beneficial to soil carbon sequestration in the surface layer than SG and Mix. Soil organic carbon content and particulate organic carbon content showed a significant positive correlation, both of which had a significant negative correlation with aggregate mean weight diameter. The contents of aggregate-associated organic carbon varied with cover crop treatments and soil depths. Compared with CK, SB and Mix significantly increased the contents of organic carbon and particulate organic carbon at 0~10 cm, and SG increased soil organic carbon content at 10~20 cm. Although <0.25 mm aggregates had a greater aggregate-associated organic carbon content than other size classes, more than 80% of organic carbon fractions in aggregates was from >0.25 mm aggregate. In addition, cover cropping increased the contributions of >5 mm aggregate-associated organic carbon and particulate organic carbon, indicating organic carbon were sequestrated in the >5 mm aggregates with cover crops. In conclusion, planting cover crops especially Changwu soybean effectively improved soil carbon storage and promoted the distribution and retention of aggregate organic carbon pool in the dry farming area of the Loess Plateau.

Keywords: green manure; cover cropping; soil aggregate; soil organic carbon; particle organic carbon

土壤有机碳是土壤质量提升的核心,对农业生态系统的可持续发展至关重要[1]。土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,其数量和质量影响土壤有机碳的固定与周转过程[2]。已有研究表明,土壤有机碳的固定与土壤团聚体的形成密切相关,土壤有机碳的输入可以促进微团聚体与其他较小颗粒进行结合,促进大团聚体的形成,从而提高土壤团聚体稳定性,同时土壤颗粒聚集形成团聚体可以对有机碳起到物理保护作用,有利于提高有机碳固持[3-4]。因此探索土壤有机碳组成及其在团聚体中的分布特征是土壤碳循环过程的热点领域。

已有研究发现,在粮食作物休耕期间种植豆科或非豆科作物,并留茬作为绿肥翻压还田可以为土壤输入外源有机物,提高土壤中有机碳含量、改善土壤物理结构、减少土壤有机碳矿化损失[5-7]。不同种类绿肥对有机碳固持和土壤团聚体结构的影响作用存在差异[8]。Jian 等[9]通过 meta 分析发现,不同类型绿肥填闲作物对土壤有机碳的固持能力不同,豆科绿肥的固碳能力高于非豆科,豆科和非豆科混播绿肥的固碳能力高于单播;但 de Oliveria 等[10]的研究则表明绿肥填闲种植对土壤有机碳的影响并不明显,这可能与绿肥填闲作物类型在该地区的适宜性较差或种植年限过短有关。Conceicao 等[11]在巴西进行的 18 a 长期定位试验中发现,黑麦草单播以及黑麦草和野豌豆混播可以提高表层土壤的大团聚体含量,且混播效果显著优于黑麦草单播。在黄土高原地区,Zhang 等[12]发现引入豆科绿肥能显著提高土壤有机碳含量,并促进>5 mm 粒级大团聚体的形成,提高团聚体稳定性。综合来看,目前关于绿肥填闲种植对土壤有机碳含量和土壤团聚体组成已有较多报道,但针对不同种类绿肥处理下土壤有机碳在不同粒级团聚体分布特征的研究尚不多见。

黄土高原是我国重要的旱作农业区,土壤质量低、水土流失严重是限制该区农业发展的重要因素,引入绿肥种植充分发挥有机物料的培肥改土作用,是改善该区土壤结构、提升固碳潜力的关键。本研究基于田间定位试验,系统分析了冬小麦夏闲期种植不同绿肥作物下土壤团聚体组成、不同组分有机碳在团聚体中的分布特征,旨在为黄土高原地区制定地力培育和提升土壤固碳潜力的填闲管理措施提供理论依据,对其在黄土高原旱作农业区的科学推广应用具有重要意义。

1　材料和方法

1.1　试验区概况

试验在陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(35°12′N,107°44′E)进行。该站属于暖温带半干旱半湿润性季风气候,平均海拔 1 220 m,无霜期 171 d,年均气温 9.1℃,年均蒸发量 1 440 mm,多年平均降水量 580 mm,且季节性分布不均,多集中于 6—9 月。供试农田土壤为黑垆土,全剖面

土质均匀疏松,通透性好,肥力中等。土壤有机质12.0 g·kg^{-1}、全氮0.8 g·kg^{-1}、全磷0.66 g·kg^{-1}、矿质氮13.74 mg·kg^{-1}、速效磷24.6 mg·kg^{-1}、速效钾161.39 mg·kg^{-1}、pH值8.11。该研究区属于典型雨养旱作农业区,种植制度为一年一熟或两年三熟。

1.2 试验设计

冬小麦绿肥填闲种植田间试验始于2017年6月底(前季小麦收获后),共设置4个处理,即长武怀豆单播(SB)、苏丹草单播(SG)、怀豆/苏丹草混播(Mix)和裸地休闲对照(CK)。各处理3次重复,共12个小区,小区规格为6.7 m×10 m,随机区组排列。

绿肥作物于每年6月底至7月初播种,播量参照本地绿肥常规播量,SB处理中长武怀豆播量为70 kg·hm^{-2},SG处理中苏丹草播量为35 kg·hm^{-2},Mix处理中怀豆和苏丹草播量分别为35 kg·hm^{-2}和17.5 kg·hm^{-2}。每年9月中旬使用旋耕机将绿肥作物地上部分直接翻压入土壤中,翻压深度约20 cm。基于2018—2020年3 a试验数据,年均绿肥翻压量如下:CK为0 kg· hm^{-2},SB约为3 012 kg·hm^{-2},SG约为3 600 kg· hm^{-2},Mix约为3 957 kg·hm^{-2}。于绿肥翻压两周后播种冬小麦(品种为'长武134'),播量为165 kg·hm^{-2}。在小麦播种时,各处理施用N 60 kg·hm^{-2}和P_2O_5 60 kg·hm^{-2},氮肥和磷肥选用尿素(46% N)和过磷酸钙(20% P_2O_5)。冬小麦于次年6月底收获。绿肥作物和冬小麦生长期间无灌溉,必要时进行人工除草。

1.3 测定方法

试验于2021年6月底冬小麦收获后,采用五点法分别在各小区采集0~10、10~20、20~40 cm土层土样,保持原状土壤结构带回实验室风干。在风干过程中沿土壤自然纹理轻轻掰成1 cm左右的土块,并去除石块和植物根系。

使用元素分析仪(EA3000,欧维特,意大利)测定土壤总土有机碳[13],采用六偏磷酸钠法[14]测定颗粒有机碳。采用干筛法[15]测定土壤团聚体,将孔径为5 mm、2 mm、0.25 mm的土筛按孔径由大到小叠放成一组套筛,放入机械振筛机中振动10 min,筛完后得到>5 mm、2~5 mm、0.25~2 mm和<0.25 mm粒级的团聚体,称重并计算各粒级所占重量比例。通过以下方法测算土壤团聚体平均重量直径(mm)[16]:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} (X_i \cdot W_i) \quad (1)$$

式中,X_i为某级别团聚体的平均直径,W_i是该级别团聚体的重量百分比。

利用邱莉萍等[17]计算方法计算各粒级土壤团聚体有机碳和颗粒有机碳在土壤中的贡献率,如式(2)所示:

某级别团聚体有机碳组分贡献率(%)= 该粒级有机碳组分含量×该粒级团聚体含量/总土有机碳组分含量×100% (2)

1.4 数据处理

采用Excel 2016软件进行数据分析,采用SPSS 25软件进行统计分析,利用单因素方差分析法分析了土壤碳组分、团聚体组成及平均重量直径、团聚体碳组分含量及其贡献率在不同处理间的差异显著性,利用Pearson法分析了各组分碳之间及其与团聚体平均重量直径之间的关系,采用Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

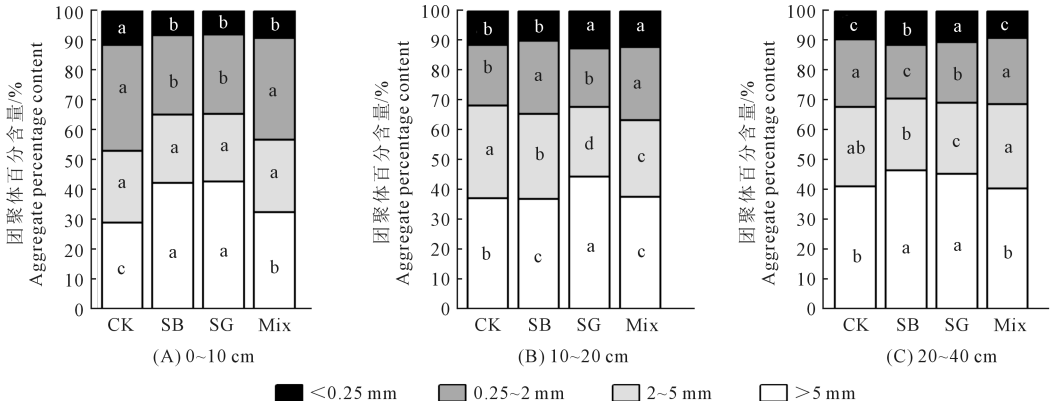
2.1 土壤团聚体组成

不同绿肥种植下,土壤团聚体的组成存在显著差异。由图1可知,在0~10 cm土层,与CK处理相比,SB、SG和Mix处理>5 mm团聚体含量分别提高了45.9%、47.7%和12.5%(P<0.05),同时显著降低了<0.25 mm团聚体含量,其中,SB和SG处理>5 mm团聚体含量显著高于Mix处理。在10~20 cm土层,SG处理>5 mm团聚体含量比CK处理提高了19.5%(P<0.05),其它处理间无显著差异;绿肥种植各处理较CK处理显著降低了2~5 mm团聚体含量,且SB、SG和Mix间差异显著;SG和Mix处理较SB处理<0.25 mm团聚体含量显著降低。在20~40 cm土层,SB和SG处理较CK处理>5 mm团聚体占比分别提高了13.5%和10.6%(P<0.05),同时显著降低了其他粒级团聚体含量,而Mix处理较CK处理各粒级团聚体含量无显著差异。

2.2 土壤总有机碳和颗粒有机碳含量及团聚体平均重量直径

由表1可知,不同绿肥种植条件下,土壤总有机碳含量、颗粒有机碳含量及团聚体平均重量直径均存在显著差异,且土壤有机碳和颗粒有机碳含量之间呈显著正相关关系,而这两者与团聚体平均重量直径间呈显著负相关关系。在0~10 cm土层,SB、SG和Mix处理总土壤有机碳含量分别较CK处理提高了8.9%、4.8%和6.0%(P<0.05),颗粒有机碳含量分别提高了9.2%、5.7%和6.5%(P<0.05),团聚体平均重量直径分别提高了24.9%、25.7%和7.5%(P<0.05),其中SB处理土壤有机碳和颗粒有机碳含量显著高于SG处理,SB处理土壤有机碳含

量显著高于 Mix 处理,SB 和 SG 处理团聚体平均重量直径显著高于 Mix 处理。在 10~20 cm 土层,SB、SG 和 Mix 处理总土壤有机碳含量分别较 CK 处理提高了7.1%、15.5%和 12.4%($P<0.05$),且 SG 显著高于 SB 和 Mix;SG 和 Mix 处理颗粒有机碳含量较 CK 处理分别提高了 14.7%和 10.5%($P<0.05$);SG 处理团聚体平均重量直径较 CK 处理提高了 6.3%($P<0.05$)。在 20~40 cm 土层,与 CK 处理相比,SB、SG 和 Mix 处理总土壤有机碳分别提高了 5.5%、5.5%和3.8%($P<0.05$),不同绿肥间差异不显著;不同处理间土壤颗粒有机碳含量无显著差异;SB 和 SG 处理土壤团聚体平均重量直径分别提高了 6.2%和 4.7%($P<0.05$)。各处理土壤有机碳和颗粒有机碳含量均随土层的增加而降低。



注:同种颜色不同小写字母表示同一土层不同绿肥填闲处理间达到显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters of the same color indicate significant differences among different green manure treatments in the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图 1　不同绿肥处理各粒级土壤团聚体百分含量

Fig.1　Percentage contents of soil aggregates with different sizes under different green manure treatments

表 1　不同绿肥种植条件下不同土层土壤总有机碳含量、团聚体平均重量直径及其相关性

Table 1　Total soil carbon contents, aggregate mean weight diameter and their correlation in different soil layers under different green manure cover cropping

土层深度 Soil depth /cm	处理 Treatment	土壤有机碳(X_1) Soil organic carbon /(g·kg^{-1})	颗粒有机碳(X_2) Particle organic carbon /(g·kg^{-1})	团聚体平均重量直径(X_3) Aggregate mean weight diameter /(g·kg^{-1})
0~10	CK	10.27±0.15c	8.80±0.20c	3.42±0.01c
	SB	11.18±0.13a	9.61±0.10a	4.27±0.04a
	SG	10.76±0.05b	9.30±0.11b	4.30±0.03a
	Mix	10.89±0.03b	9.37±0.06ab	3.68±0.11b
10~20	CK	7.72±0.02d	6.53±0.15b	4.11±0.10b
	SB	8.27±0.04c	6.80±0.08b	4.05±0.08b
	SG	8.92±0.16a	7.49±0.25a	4.37±0.10a
	Mix	8.68±0.03b	7.22±0.08a	4.00±0.04b
20~40	CK	5.30±0.11b	3.99±0.17a	4.27±0.01c
	SB	5.59±0.13a	4.35±0.28a	4.54±0.01a
	SG	5.59±0.07a	4.24±0.06a	4.47±0.04b
	Mix	5.50±0.08a	4.23±0.16a	4.28±0.01c
显著性 Significance				
X_1		1	0.999**	−0.539**
X_2		1	−0.540**	
X_3				1

注:同列不同小写字母表示同一土层不同绿肥填闲处理间达到显著差异($P<0.05$)。**表示差异显著性达到 $P<0.01$。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different green manure treatments in the same soil layer ($P<0.05$). ** indicates that the difference is significant up to $P<0.01$. The same below.

2.3　土壤团聚体碳组分及其贡献率

2.3.1　*土壤团聚体有机碳含量及其贡献率*　由表 2 可知,在 0~10 cm 土层中,与 CK 处理相比,SB 和 Mix 处理可提高各粒级团聚体有机碳含量,SG 处理可提高 2~5 mm 和<0.25 mm 团聚体中有机碳含量($P<0.05$);SB 处理<0.25 mm 团聚体有机碳含量显著高于 SG 和 Mix 处理。在 10~20 cm 土层,SG 处理各粒级团聚体有机碳含量均显著高于 CK,SB 和 Mix 处理 2~5 mm、0.25~2 mm、<0.25 mm 团聚体有机碳含量均显著高于 CK 处理。在 20~40 cm 土层,SB 处理 2~5 mm 和 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量显著高于 CK 处理($P<0.05$),SG 处理可显著提高<0.25 mm 团聚体有机碳含量($P<0.05$),Mix 处理 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量显著高于 CK 处理。各处理不同粒级团聚体中<0.25 mm 团聚体有机碳含量最高,其他粒级团聚体有机碳含量无明显差异。

不同处理下的各粒级团聚体有机碳贡献率基本均以>5 mm 团聚体有机碳贡献率最高,2~5 mm、0.25~2 mm 团聚体有机碳贡献率相近,<0.25 mm 团聚体有机碳贡献率最低(图 2)。各绿肥处理之间团聚体有机碳贡献率的分布与土壤团聚体含量的规律基本一致。在 0~10 cm 土层,与 CK 相比,SB、SG 和 Mix 处理>5 mm 团聚体有机碳贡献率分别提高

39.6%、40.9%和9.5%($P<0.05$),其中SB和SG处理显著高于Mix处理;同时3种绿肥处理显著降低了<0.25 mm团聚体有机碳贡献率。在10~20 cm土层,与CK处理相比,SG处理>5 mm和<0.25 mm团聚体有机碳贡献率分别提高了14.4%和17.5%($P<0.05$),但显著降低了2~5 mm团聚体有机碳贡献率;SB和Mix处理显著降低了>5 mm和2~5 mm团聚体有机碳贡献率,显著提高了<0.25 mm团聚体有机碳贡献率。在20~40 cm土层,SB和SG处理较CK处理显著提高了>5 mm和<0.25 mm团聚体有机碳贡献率,显著降低了0.25~2 mm团聚体有机碳贡献率;Mix处理较CK处理各粒级团聚体有机碳贡献率无显著差异。

2.3.2 土壤团聚体颗粒有机碳含量及贡献率 与土壤有机碳分布特征相似,各土层中各粒级团聚体颗粒有机碳的含量均以<0.25 mm团聚体最高(表3)。在0~10 cm土层,SB和Mix处理各粒级团聚体颗粒有机碳含量均显著高于CK处理,SG处理较CK处理2~5 mm和<0.25 mm团聚体颗粒有机碳含量分别提高了13.1%和10.9%($P<0.05$)。在10~20 cm土层,与CK处理相比,SB处理2~5 mm团聚体颗粒有机碳含量提高10.9%($P<0.05$),SG处理>5 mm、2~5 mm、<0.25 mm团聚体颗粒有机碳含量分别提高了12.0%、10.9%和26.6%($P<0.05$),Mix处理2~5 mm和<0.25 mm团聚体颗粒有机碳含量分别提高了15.6%和33.3%($P<0.05$)。在20~40 cm土层,与CK处理相比,SB处理2~5 mm和0.25~2 mm团聚体颗粒有机碳含量分别提高了12.3%和9.0%($P<0.05$),SG处理0.25~2 mm团聚体颗粒有机碳含量提高了33.0%($P<0.05$),Mix处理2~5 mm团聚体颗粒有机碳含量提高了7.6%($P<0.05$)。

由图3可知,在0~10 cm土层,各处理中各粒级团聚体均以<0.25 mm团聚体颗粒有机碳贡献率最低;且各处理间不同粒级团聚体颗粒有机碳的贡献率分布规律与土壤有机碳贡献率规律基本一致。

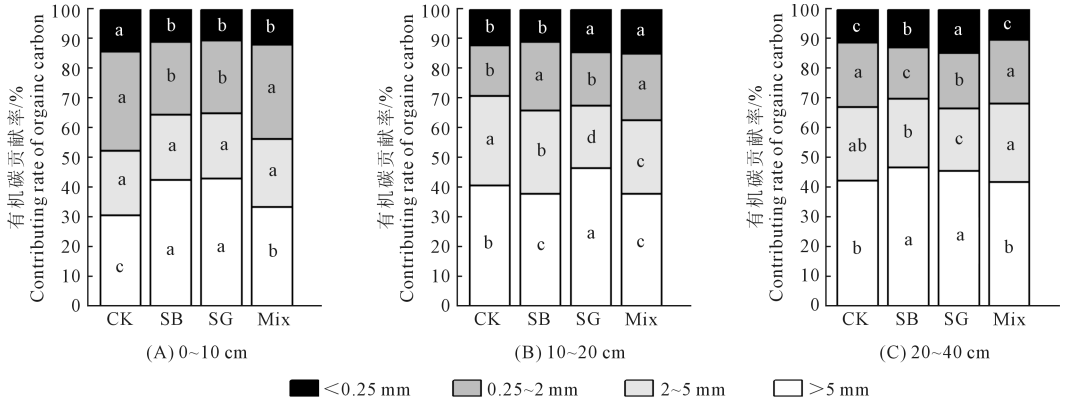


图2 不同绿肥处理不同粒级土壤团聚体有机碳贡献率

Fig.2 Contribution of soil organic carbon associated to soil aggregate size classes under different green manure treatments

表2 不同绿肥处理不同粒级土壤团聚体有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon contents associated to soil aggregate size classes under different green manure treatments

土层深度 Soil depth /cm	处理 Treatment	>5 mm	2~5 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm
0~10	CK	10.82±0.03b	9.31±0.15c	9.66±0.19b	12.79±0.13c
	SB	11.27±0.18a	10.71±0.01a	10.20±0.15a	15.22±0.01a
	SG	10.82±0.04b	10.46±0.13ab	9.93±0.03ab	14.10±0.18b
	Mix	11.18±0.05a	10.30±0.26b	10.16±0.20a	14.14±0.09b
10~20	CK	8.46±0.04b	7.46±0.02c	6.45±0.03c	8.29±0.04c
	SB	8.48±0.11b	8.13±0.03b	7.77±0.07b	9.08±0.16b
	SG	9.35±0.27a	8.07±0.09b	8.11±0.05a	10.22±0.47a
	Mix	8.72±0.03b	8.45±0.08a	7.92±0.20ab	10.57±0.50a
20~40	CK	5.46±0.24a	4.93±0.12b	5.09±0.01b	6.16±0.13b
	SB	5.62±0.23a	5.39±0.22a	5.39±0.04a	6.26±0.26b
	SG	5.63±0.11a	4.93±0.11b	5.13±0.03b	7.84±0.31a
	Mix	5.67±0.28a	5.14±0.10ab	5.34±0.11a	6.22±0.22b

表3 不同绿肥处理不同粒级团聚体颗粒有机碳含量

Table 3 Particulate organic carbon contents associated to soil aggregate size classes under different green manure treatments

土层深度 Soil depth /cm	处理 Treatment	>5 mm	2~5mm	0.25~2mm	<0.25 mm
0~10	CK	9.31±0.12b	7.89±0.06b	8.18±0.28b	11.29±0.25c
	SB	9.75±0.13a	9.08±0.10a	8.56±0.06a	13.76±0.10a
	SG	9.44±0.13b	8.92±0.16a	8.41±0.03ab	12.52±0.27b
	Mix	9.72±0.02a	8.76±0.27a	8.57±0.22a	12.72±0.27b
10~20	CK	7.12±0.04b	6.00±0.01c	6.00±0.78a	6.92±0.03b
	SB	7.03±0.15b	6.65±0.13b	6.32±0.02a	7.55±0.17b
	SG	7.97±0.44a	6.65±0.07b	6.58±0.12a	8.76±0.40a
	Mix	7.24±0.12b	6.93±0.06a	6.48±0.21a	9.22±0.64a
20~40	CK	4.19±0.31a	3.63±0.13b	3.73±0.05b	4.79±0.01b
	SB	4.49±0.45a	4.07±0.13a	4.07±0.25a	4.85±0.24b
	SG	4.33±0.08a	3.56±0.04b	3.73±0.18b	6.37±0.31a
	Mix	4.47±0.38a	3.90±0.03a	4.00±0.07ab	4.71±0.08b

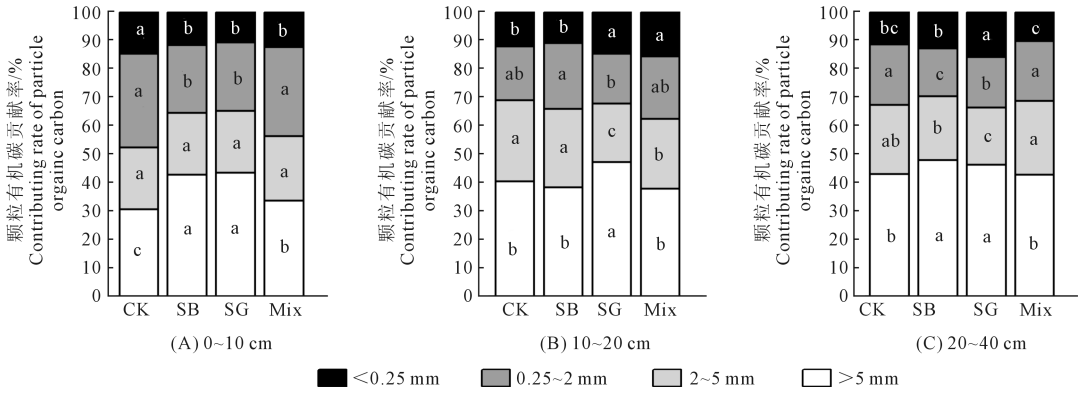


图 3　不同绿肥处理不同粒级土壤团聚体颗粒有机碳贡献率

Fig.3　Contribution of soil particle organic carbon associated to soil aggregate size classes under different green manure treatments

在 0~10 cm 土层,与 CK 处理相比,SB、SG 和 Mix 处理>5 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率分别显著提高了40.0%、41.8%和 10.2%(P<0.05),其中 SB 和 SG 处理显著高于 Mix 处理,各绿肥处理同时显著降低了<0.25 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率。在 10~20 cm 土层,与 CK 处理相比,SG 处理>5 mm 和<0.25 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率分别提高了16.6%和 21.5%(P<0.05),同时显著降低了 2~5 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率;Mix 处理显著降低了 2~5 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率,显著提高了<0.25 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率。在 20~40 cm 土层,SB 和 SG 处理较 CK 处理>5 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率分别提高了 11.5%和 7.7%(P<0.05),显著降低了 0.25~2 mm 团聚体颗粒有机碳贡献率;Mix 处理较 CK 处理各粒级团聚体颗粒有机碳贡献率无显著差异。

3　讨　论

3.1　不同绿肥填闲种植对土壤团聚体的影响

土壤各粒级团聚体的分布特征可以反映土壤存储养分和抗侵蚀的能力[18]。图 1 表明,3 种绿肥种植均显著提高了表层土壤>5 mm 团聚体的含量,同时还降低了<0.25 mm 团聚体的含量;此外,本研究结果(表 1)表明,与裸地休闲相比,3 种绿肥填闲种植对表层土壤团聚体平均重量直径均有显著提升。这是由于在小麦夏闲期播种覆盖作物并将之翻覆入地,提高了土壤有机碳水平,残茬经微生物分解为有机质和腐殖质,增强了土壤颗粒间的结合力,有利于大团聚体的形成,改善了土壤物理结构[19],这与周方亮等[20]的研究结果一致。也有研究表明,绿肥根系的活动是增加土壤中大团聚体的重要原因[21]。此外,Cotrufo 等[22]研究表明,新鲜植物残茬还田能作为微生物的能量来源,并产生有利于土壤团聚的有机胶结物质。相反,夏季休耕会减弱这些效应,并促进大团聚体内<0.25 mm 团聚体的崩解[12]。本研究结果还显示,不同绿肥种植所提高表层土壤>5 mm 团聚体含量的效果存在差异,尽管豆科单播与非豆科单播之间无显著差异,但两者单播效果显著优于混播,这与 Domagala-Swiatkiewicz 等[23]的研究结果基本一致。Ontl 等[24]认为,大团聚体的形成可能是未来碳稳定性的一个良好指标,因为它们对保护新鲜沉积的土壤有机质和帮助形成稳定的有机-矿物复合体具有重要意义。

3.2　不同绿肥填闲种植对土壤有机碳组分的影响

本研究表明,与裸地休闲相比,各绿肥种植方式均能显著提高 0~40 cm 各层土壤总有机碳,且在 0~10 cm 土层,豆科绿肥提高土壤有机碳含量的效果优于非豆科绿肥及混播,豆科绿肥提高颗粒有机碳含量的效果优于非豆科。在粮食作物休闲期间引种填闲作物作为绿肥,为土壤投入了额外的植物残茬,因此对土壤有机碳的固存有积极影响[5,9]。豆科绿肥固碳效果最优,这可能是由于豆科绿肥除了为土壤投入植物残茬外,还通过生物固氮提供氮源,这可能增加了随后的地上和地下植物的生物量,从而更有利于增加表层土壤有机碳含量[25]。但如 Sainju 等[26]研究表明,较裸地休闲,野豌豆单播及野豌豆和黑麦草混播显著提高了土壤中的土壤有机碳含量,而黑麦草单播较其他处理均无显著差异。Mazzoncini 等[27]研究同样表明,豆科绿肥较裸地休闲可以提高土壤有机碳含量,而非豆科绿肥无显著差异。与土壤有机碳相似,本研究中绿肥种植有利于土壤颗粒有机碳含量的提高,这与 Beehler 等[28]研究结果一致。前人发现引入豆科与禾草科混播类绿肥较纯豆科或纯禾草科可以提高土壤有

机碳和颗粒有机碳的含量[29]。而本研究中混播提高土壤有机碳含量的效果与豆科绿肥和非豆科绿肥单播无显著差异,这可能与豆科与非豆科混播比例有关。刘明健等[30]研究发现,在0~15 cm土层当混播比达到2∶1(豆科∶非豆科)时,其土壤全碳含量显著低于单播处理,这可能是由于豆科固氮促进了非豆科植物生长,豆科与非豆科绿肥的竞争作用加剧了土壤中养分的消耗。本文结果还表明,土壤有机碳组分与团聚体平均重量直径呈显著负相关关系,这是由于土壤碳组分随土层加深而减少,而土壤大团聚体含量随土层加深而增多。

3.3 不同绿肥填闲种植对团聚体碳组分的影响

本研究中,长武怀豆单播及其与苏丹草混播较裸地休闲显著提高了0~10 cm土层土壤中>5 mm团聚体的有机碳含量和颗粒有机碳含量,3种绿肥均显著降低了土壤<0.25 mm团聚体的有机碳含量和颗粒有机碳含量。这表明绿肥生长4 a后,有机碳和颗粒有机碳均被固存在大团聚体中,并由微团聚体中向大团聚体重新分配[12]。本研究中<0.25 mm团聚体有机碳和颗粒有机碳均显著高于其他粒级,这与马瑞萍等[31]和武均等[32]在黄土高原地区所取得的研究结果基本一致。这可能是由于大团聚体主要由富含有机碳的年轻植物残体形成[31],这部分有机碳容易分解和矿化,而微团聚体中以惰性的腐殖质碳占主要优势[33],这部分碳不断积累,导致微团聚体的有机碳和颗粒有机碳含量高于其它粒级[32]。尽管<0.25 mm团聚体的有机碳和颗粒有机碳含量均高于其他粒级,但<0.25 mm团聚体含量占比很低,导致该粒级的有机碳含量贡献率低于其他粒级。土壤中>5 mm团聚体有机碳贡献率最大,3种绿肥显著提高了>0.25 mm团聚体的有机碳贡献率和颗粒有机碳贡献率,其中长武怀豆单播和苏丹草单播的效果显著优于两者混播,这与团聚体占比的规律基本一致,表明各粒级团聚体占比是决定不同粒级团聚体有机碳贡献率的主要因素,这与张少宏等[34]研究结果相一致。

4 结 论

本研究表明,黄土高原地区在冬小麦夏季休耕期引入长武怀豆单播、苏丹草单播以及长武怀豆和苏丹草混播均可以促进大团聚体的形成,提高土壤有机碳含量、颗粒有机碳含量和团聚体平均重量直径,其中长武怀豆单播更有利于表层土壤碳组分的固存。土壤微团聚体有机碳和颗粒有机碳含量均显著高于其他粒级团聚体,但该粒级团聚体含量较低,因此微团聚体有机碳组分的贡献率较低。与裸地休闲相比,长武怀豆单播、长武怀豆和苏丹草混播可显著提高土壤各粒级团聚体有机碳和颗粒有机碳含量,而苏丹草单播更有利于提高<5 mm粒级团聚体有机碳组分。3种绿肥均显著提高了大团聚体的有机碳贡献率和颗粒有机碳贡献率,其中长武怀豆单播和苏丹草单播的效果较优。综合来看,在黄土高原旱作农业区,豆科作物较非豆科作物更有利于土壤团聚体形成及有机碳固定,而豆科与非豆科绿肥混播方式具有一定的固碳效果,但对土壤团聚结构的改良效果较差。

致谢:感谢中国科学院长武生态试验站的工作人员对于本研究试验田工作过程中的帮助。

参 考 文 献:

[1] MIKHA M M, HERGERT G W, BENJAMIN J G, et al. Long-term manure impacts on soil aggregates and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(2): 626-636.

[2] TOPPS D, KHABIR MIU, ABDELMAGID H, et al. Impact of cover crop monocultures and mixtures on organic carbon contents of soil aggregates[J]. Soil Systems, 2021, 5(3): 43.

[3] MUPAMBWA H A, WAKINDIKI I I C. Influence of mono- and biculture cover cropping systems on soil polysaccharides and aggregate stability in a sandy loam Oakleaf soil in Eastern Cape, South Africa[J]. South African Journal of Plant and Soil, 2012, 29(3/4): 165-171.

[4] DIECKOW J, BAYER C, CONCEIÇÃO P C, et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(2): 240-249.

[5] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops — a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200: 33-41.

[6] WRIGHT A L, HONS F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(1): 141-147.

[7] 王俊, 薄晶晶, 付鑫. 填闲种植及其在黄土高原旱作农业区的可行性分析[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5244-5254.
WANG J, BO J J, FU X. Research progress in cover cropping and its feasibility in the dryland farming systems on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5244-5254.

[8] 张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳分布及其固持特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019,(1): 71-78.
ZHANG Q, YU E J, LIN H B, et al. Distribution and sequestration of aggregate organic carbon affected by continuous different kind of green manure cultivation[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019,(1): 71-78.

[9] JIAN J S, DU X, REITER M S, et al. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 143: 107735.

[10] DE OLIVEIRA F É R, DE MATOS OLIVEIRA J, DA SILVA XAVIER F A. Changes in soil organic carbon fractions in response to cover

crops in an orange orchard[J]. Revista Brasileira de Ciênciado Solo, 2016, 40: e0150105.

[11] CONCEIÇÃO P C, DIECKOW J, BAYER C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 40-47.

[12] ZHANG D B, YAO Z Y, CHEN J, et al. Improving soil aggregation, aggregate-associated C and N, and enzyme activities by green manure crops in the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(6): 1267-1279.

[13] WANG J, FU X, ZHAO F Z, et al. Response of soil carbon fractions and dryland maize yield to mulching[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(2): 371-381.

[14] 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.

[15] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1): 35-40.
CHEN W C, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Effects of conservation tillage on the composition and organic carbon content of soil aggregates in fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2014, 46(1): 35-40.

[16] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.

[17] 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.
QIU L P, ZHANG X C, ZHANG J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364-372.

[18] 严红星, 田飞, 刘建国, 等. 绿肥、稻草还田对植烟土壤团聚体组成及有机质分布的影响[J]. 烟草科技, 2019, 52(4): 9-16.
YAN H X, TIAN F, LIU J G, et al. Effects of green manure and rice straw returning on composition and organic matter percentage of aggregates in tobacco-planting soils[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(4): 9-16.

[19] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Mechanisms of carbon sequestration insoil aggregates[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004, 23 (6): 481-504.

[20] 周方亮, 李峰, 黄雅楠, 等. 紫云英添加对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 781-788.
ZHOU F L, LI F, HUANG Y N, et al. Effects of adding Chinese milk vetch on soil aggregates composition and organic carbon distribution[J]. Soils, 2020, 52(4): 781-788.

[21] 吕奕彤, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1194-1204.
LYU Y T, YU A Z, LYU H Q, et al. Composition and stability of soil aggregates in maize farmlands under different green manure utilization patterns in an oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7): 1194-1204.

[22] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. Global Change Biology, 2013, 19(4): 988-995.

[23] DOMAGAŁA-SWIATKIEWICZ I, SIWEK P. Effect of field pea (*Pisum sativum* subsp. *arvense* (L.) Asch.) and pea-oat (*Avena sativa* L.) biculture cover crops on high tunnel vegetable under organic production system[J]. Organic Agriculture, 2022, 12(1): 91-106.

[24] ONTL T A, CAMBARDELLA C A, SCHULTE L A, et al. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient[J]. Geoderma, 2015, 255/256: 1-11.

[25] SAINJU U M, SINGH H P, SINGH B P. Soil carbon and nitrogen in response to perennial bioenergy grass, cover crop and nitrogen fertilization[J]. Pedosphere, 2017, 27(2): 223-235.

[26] SAINJU U M, SINGH H P, SINGH B P, et al. Cover crop and nitrogen fertilization influence soil carbon and nitrogen under bioenergy sweet sorghum[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(2): 463-471.

[27] MAZZONCINI M, SAPKOTA T B, BÀRBERI P, et al. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 165-174.

[28] BEEHLER J, FRY J, NEGASSA W, et al. Impact of cover crop on soil carbon accrual in topographically diverse terrain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 72(3): 272-279.

[29] FERREIRA L B, LOSS A, GIUMBELLI L D, et al. Organic carbon and nitrogen contents and their fractions in soils with onion crops in different management systems[J]. Soil Research, 2018, 56(8): 846-855.

[30] 刘明健, 张永亮, 贾玉山, 等. 豆禾混播对草地土壤碳氮磷含量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(8): 50-57.
LIU M J, ZHANG Y L, JIA Y S, et al. Effect of mixed sowing of grass and legume on soil C,N and P contents[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(8): 50-57.

[31] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 324-332.
MA R P, LIU L, AN S S, et al. Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 324-332.

[32] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 276-284.
WU J, CAI L Q, QI P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 276-284.

[33] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2961-2966.
YUAN Y H, LI H X, HUANG Q R, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2961-2966.

[34] 张少宏, 付鑫, MUHAMMAD I, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 236-241, 248.
ZHANG S H, FU X, MUHAMMAD I, et al. Effect of straw and plastic film mulching on nitrogen composition of soil aggregates in dryland wheat field on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 236-241, 248.