



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响

孙涛, 冯晓敏, 赵财, 殷文, 胡发龙, 宋振伟, 张卫建

引用本文:

孙涛, 冯晓敏, 赵财, 等. 西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 874–881.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0571>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹瑄, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 张轩畅, 常贵蒋, 冯巍仑

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 894–903 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0455>

利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响

王超, 熊凡, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 494–501 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0262>

秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响

李玉梅, 王根林, 孟祥海, 胡颖慧, 王伟, 李建英, 张冬梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 268–276 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0154>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙涛, 冯晓敏, 赵财, 等. 西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 874–881.

SUN T, FENG X M, ZHAO C, et al. Effects of intercropping regimes on soil aggregate composition and their organic carbon content in an oasis area of northwest China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 874–881.



开放科学 OSID

西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响

孙涛¹, 冯晓敏¹, 赵财², 殷文², 胡发龙², 宋振伟^{1*}, 张卫建¹

(1. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081; 2. 甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 间作种植有利于增加作物产量和提高资源利用效率, 但目前关于间作对土壤有机碳的影响仍存在争议, 为明确不同间作模式下土壤团聚体组成及其有机碳变化规律, 本研究基于2016年在甘肃省武威市设置的间作模式定位试验, 探究西北绿洲灌区间作种植模式对土壤团聚体的影响, 试验包括7个处理: 玉米单作(M)、豌豆单作(P)、油菜单作(R)、小麦单作(W)、玉米间作豌豆(M/P)、玉米间作油菜(M/R)和玉米间作小麦(M/W)。2019年10月作物收获后采集0~20 cm和20~40 cm土壤样品, 分析不同间作模式下土壤团聚体及其有机碳含量。结果表明, 间作处理有增加土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)含量以及降低黏粉粒(<0.053 mm)含量的趋势。与M处理相比, M/W和M/R处理显著增加了0~20 cm和20~40 cm土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径, 而M/P处理则与M处理无显著差异。间作模式增加了土壤及土壤团聚体有机碳含量, M/W处理0~20 cm土壤有机碳含量比M处理显著提高11.5%, M/R和M/W处理20~40 cm土壤有机碳含量则分别比M处理显著提高4.3%和9.6%。M/W处理增加了土壤有机碳储量, 在0~40 cm土层, M/W处理土壤有机碳总储量比M处理显著提高10.2%, M/W处理有机碳储量的增加是由于0~40 cm土层>0.25 mm和0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量提升。研究表明, 西北绿洲灌区间作种植模式增加了土壤团聚体稳定性和有机碳含量, 有利于农田土壤固碳。

关键词: 绿洲灌区; 间作; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 玉米; 豌豆; 油菜; 小麦

中图分类号: S152; S153.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)05-0874-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0571

Effects of intercropping regimes on soil aggregate composition and their organic carbon content in an oasis area of northwest China

SUN Tao¹, FENG Xiaomin¹, ZHAO Cai², YIN Wen², HU Falong², SONG Zhenwei^{1*}, ZHANG Weijian¹

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Intercropping is beneficial in increasing crop yield and improving resource utilization efficiency. However, there is still controversy on the effect of intercropping regimes on soil organic carbon (SOC). Therefore, clarifying the rules of soil aggregates and their SOC variations under different intercropping regimes can provide a theoretical basis for exploring the carbon sequestration mechanism of intercropping. This study was based on the field experiment of different intercropping regimes located in Wuwei, Gansu Province since

收稿日期: 2020-10-06 录用日期: 2020-11-05

作者简介: 孙涛(1989—), 男, 山东莱阳人, 博士后, 主要从事作物耕作与农田生态研究。E-mail: suntao1007@126.com

*通信作者: 宋振伟 E-mail: songzhenwei@caas.cn

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(绿肥, CARS-22); 国家自然科学基金项目(31671642); 公益性行业科研专项(20153120); 中国博士后科学基金(2020M670546)

Project supported: The Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System-Green manure (CARS-22); National Natural Science Foundation of China (31671642); Agro-scientific Research in the Public Interest (20153120); China Postdoctoral Science Foundation (2020M670546)

2016. There were seven treatments, including sole maize (M), sole pea (P), sole rape (R), sole wheat (W), maize/pea intercropping (M/P), maize/rape intercropping (M/R), and maize/wheat intercropping (M/W). Soil samples of 0~20 cm and 20~40 cm layers were collected after harvesting in October 2019. Then, soil aggregates and their SOC content under different intercropping regimes were analyzed. Intercropping indicated an increasing trend in the content of soil water stability macroaggregates (>0.25 mm) and micro-aggregates (0.053~0.25 mm) but a decreasing trend in the content of silt and clay (<0.053mm). Compared with the M treatment, the M/W and M/R treatments significantly increased the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers. There was no significant difference in the MWD and GMD between M/P and M treatments. Intercropping regimes increased the organic carbon contents of soil and soil aggregates. The SOC content of the M/W treatment was 11.5% higher than that of the M treatment in the 0~20 cm soil depth. The M/R and M/W treatments increased the SOC content by 4.3% and 9.6% in the 20~40 cm soil depth compared with the M treatment, respectively. The M/W treatment significantly increased the SOC storage. In the 0~40 cm soil depth, the SOC storage of the M/W treatment was significantly higher than that of the M treatment by 10.2%. The increase of the SOC storage in the M/W treatment depended on the improvement of the SOC storage in the soil aggregates of >0.25 mm and 0.053~0.25 mm in the 0~40 cm soil layer. The intercropping systems increased the stability of soil aggregates and SOC content in the northwest oasis irrigation area, which was conducive to promoting soil carbon sequestration in the farmland.

Keywords: oasis irrigation area; intercropping; soil aggregates; soil organic carbon; maize; pea; rape; wheat

改善土壤质量、提高土地生产力是实现作物可持续生产的重要保障^[1]。间作作为一种古老而传统的种植制度,在现代农业生产体系中仍然发挥着确保粮食增产、维持土壤养分供应、促进农民增收等重要作用^[2-3]。相关研究表明,间作可以增加作物产量^[4]、提高土地利用效率^[5]、确保向市场供应的作物品种多样化^[6]、增加农民经济收入^[7]、控制病虫害^[8]以及改善土壤质量等^[9]。土壤有机碳是评价土壤质量和土地生产力的重要指标,与种植模式、耕作方式及养分管理等密切相关^[10-11]。CONG等^[9]和向蕊等^[12]的研究表明,间作由于增加了物种多样性有利于土壤碳的固持,从而增加土壤有机碳含量。而张智晖^[13]的研究表明玉米/大豆间作降低了土壤有机碳的含量。DIJKSTRA等^[14]同样认为间作体系下进入土壤的有机碳源分解速率高,不利于土壤有机碳的固定。综上所述,目前关于间作模式对土壤有机碳的影响仍存在不确定性,亟需进一步深入研究。

土壤团聚体是土壤有机和无机矿物颗粒经过一系列作用形成的土壤基本结构单元,是土壤养分的储存场所。土壤团聚体含量及粒径分布不仅影响作物生长发育,而且影响土壤的一系列物理、化学及生物学过程。大量研究表明土壤团聚体对有机碳的转化起着非常重要的作用^[15]。土壤团聚体通过物理保护作用减少有机碳与微生物的接触,进而减缓土壤有机碳矿化^[16]。此外土壤有机碳含量与大团聚体含量密切相关^[17],而微团聚体中的胶体及无机物质与有机碳紧密结合,可为有机碳的固定提供保护,使其成为土壤有机碳的重要固定场所^[18]。种植模式、耕作措施及

施肥管理等均会影响土壤团聚体及其有机碳含量。间作系统中,由于种植作物种类不同,土壤中作物根系和残茬归还的质量和数量也不同,影响了土壤团聚体的形成及有机碳的转化,进而导致土壤团聚体及有机碳的差异^[19]。已有研究表明间作有增强土壤团聚体稳定性及有机碳含量的作用^[12,20],但对于不同间作模式对土壤团聚体有机碳的影响及其差异仍不清楚。

西北地区光热资源充沛,是我国高产农区之一。但该地区年降水量少,潜在蒸发量大,水资源短缺是当地农业发展的主要制约因素^[3]。依靠过度灌溉和高量化肥投入的生产体系,虽然保证了作物高产,但同时造成了自然资源的浪费,众多研究表明,间作模式不仅能促进作物高产而且可以提高水分利用效率,在西北绿洲灌溉区逐渐受到重视,并形成了玉米/小麦、玉米/豌豆等高产种植模式^[3,21]。但间作在保障高产的同时,对土壤团聚体结构、土壤有机碳含量的影响仍不清楚,不同间作模式的差异性也有待研究。因此,本研究依托2016年在甘肃省武威市建立的间作模式定位试验,系统分析不同间作模式下土壤团聚体结构及其有机碳含量与储量变化特征,以期为西北地区间作模式下土壤有机碳的固持机制及间作模式的推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

本试验在甘肃农业大学武威试验站(37°31' N, 103°50' E)进行。试验地位于河西走廊东端,属典型大陆性干旱气候,年平均温度7.3℃,年降雨量156

mm,年蒸发量2 400 mm,年日照时数2 968 h,>10 ℃积温2 985 ℃·d,无霜期156 d。供试土壤为灌漠土,试验开始前0~40 cm土壤理化性状见表1。

1.2 试验设计

定位试验始于2016年,包括7个处理:玉米单作(M)、豌豆单作(P)、油菜单作(R)、小麦单作(W)、玉米间作豌豆(M/P)、玉米间作油菜(M/R)和玉米间作小麦(M/W)。采用随机区组设计,每个处理3次重复。每个小区面积为10.0 m×6.0 m=60 m²。供试玉米、豌豆、油菜和小麦品种分别为先玉335、陇豌1号、皓油4号和宁春4号。

玉米、豌豆、油菜和小麦种植密度分别为9、180、76、675株·m⁻²,行距分别为40、20、20、15 cm。间作处理条带宽度为2.0 m。其中玉米带宽为1.2 m,包括3行覆膜玉米;小麦(豌豆、油菜)带宽为0.8 m,包括6(4、4)行小麦(豌豆、油菜)。间作处理中玉米与豌豆、油菜和小麦的间距均为30 cm。间作处理中作物种植密度和行距与单作处理相同。每年播种前用旋耕机进行旋耕整地,深度为15 cm。玉米、豌豆、油菜和小麦每年播种日期分别在4月20日、4月1日、4月20日和3月20日前后;收获日期分别在9月20日、7月10日、7月5日和7月20日前后。试验地施用肥料为尿素(N-P₂O₅-K₂O为46-0-0)和磷酸二铵(N-P₂O₅-K₂O为18-46-0)。其中玉米、豌豆、油菜和小麦施N量分别为450、225、120、225 kg·hm⁻²;施P₂O₅量分别为225、150、90、150 kg·hm⁻²。豌豆、油菜和小麦所有氮磷肥均作为基肥一次施入,玉米氮肥30%作为基肥,60%于拔节期追施,10%于灌浆期追施,磷肥则作为基肥一次施入。玉米、豌豆、油菜和小麦均在关键生育时期进行补充灌溉,年总灌溉量分别为405、165、90 mm和240 mm。

1.3 土壤样品采集与测定方法

2019年作物收获后采集0~20 cm和20~40 cm土壤及土壤团聚体样品。其中,土壤样品采用直径5 cm的土钻采集;土壤团聚体样品采用半径约8 cm的圆形铝盒倒扣在取样位置,缓慢压入土壤直至盒中完

全被原状土充满并将外露土块铲除移平后,装盒运回实验室以备测定使用。土壤及土壤团聚体样品在各单作小区作物行间随机采集3点,混合为1个土样,间作小区在每种作物行间及两种作物行间分别随机采集3点,混合为1个土样。土壤容重采用环刀(高5 cm,直径5 cm)法取样测量^[22],取样位置与土壤及土壤团聚体取样位置相同。土壤团聚体采用SIX等^[23]的方法,将大块按结构剥成约1 cm³的团块,风干后干筛,然后按干筛百分数之比称取样品,配成50 g,倒入孔径分别为2、1、0.25 mm和0.053 mm的筛组中进行振荡筛分5 min(30次·min⁻¹),最后将各筛子中的团聚体洗入铝盒中,烘干称质量。

土壤团聚体稳定性采用平均质量直径(Mean weight diameter, MWD)和平均几何直径(Geometric mean diameter, GMD)来衡量^[24],具体计算公式如下:

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

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

式中:W_i为各级团聚体的质量,g;X_i为对应各级团聚体平均直径,mm,其中>2、2~1、1~0.25、0.25~0.053 mm和<0.053 mm粒径的团聚体对应的平均直径分别为2、1.5、0.625、0.152 mm和0.053 mm。

土壤有机碳及团聚体有机碳采用重铬酸钾稀释-热法测定^[25]。称取0.250 0 g(精确到0.000 1 g)土壤样品,加入K₂CrO₇-H₂SO₄以氧化土壤有机质,然后用FeSO₄滴定剩余的K₂CrO₇。

土壤及土壤团聚体有机碳储量采用下式计算:

$$SOC_s = \sum_{i=1}^n (C_i \times BD_i \times Z_i) \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中:SOC_s为某粒径中有机碳储量,t·hm⁻²;C_i为第i层土壤有机碳含量,g·kg⁻¹;BD_i为第i层土容重,g·cm⁻³;Z_i为第i层土层深度,m。

表1 0~40 cm土壤理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties in 0~40 cm depth

土壤深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	pH	有机碳 Soil organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
0~20	1.42	7.4	7.2	0.86	29.0	179.4
20~40	1.51	7.7	6.8	0.73	23.1	127.0

1.4 统计分析

采用SAS 9.2软件进行数据统计分析,各处理土壤团聚体粒径分级、平均质量直径、平均几何直径以及土壤有机碳含量、储量均采用SAS中的PROC GLM过程进行方差分析,其中处理为固定因子,区组为随机因子。采用最小显著极差法(LSD)在 $\alpha=0.05$ 水平下进行多重比较。采用SigmaPlot 12.5软件作图。

2 结果与分析

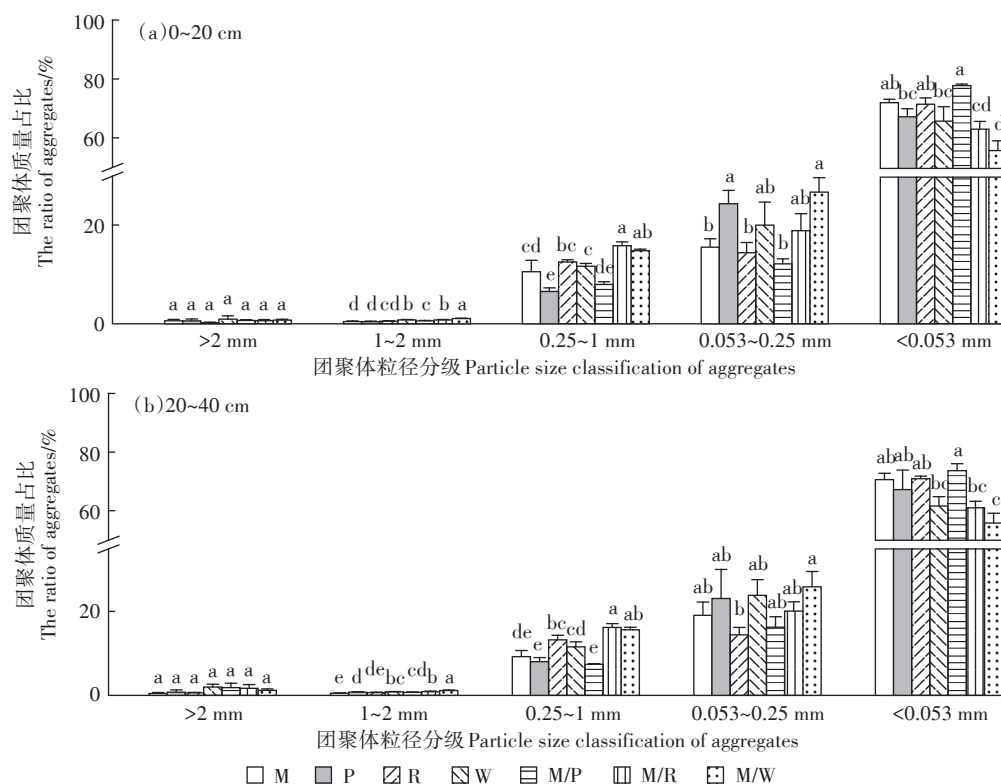
2.1 不同间作模式对土壤团聚体粒径分级的影响

由图1可见,0~20 cm土层中,M/P、M/R和M/W处理的1~2 mm土壤水稳性团聚体含量分别比M处理高0.14、0.33个百分点和0.61个百分点,且差异显著($P<0.05$)。M/R、M/W处理0.25~1 mm和0.053~0.25 mm土壤水稳性团聚体含量分别比M处理高5.3、4.3个百分点和3.4、11.2个百分点。M/R和M/W处理<0.053 mm土壤水稳性团聚体含量比M处理低9.0、16.3个百分点。其中M/P处理0.25~1、0.053~0.25 mm和<0.053 mm土壤水稳性团聚体含量与M处理无显著

差异,且各处理>2 mm土壤水稳性团聚体含量间无显著差异($P>0.05$)。在20~40 cm土层,M/P、M/R和M/W处理1~2 mm土壤水稳性团聚体含量分别比M处理高0.21、0.38和0.67个百分点。M/R和M/W处理0.25~1 mm土壤水稳性团聚体含量分别比M处理高7.0、6.4个百分点。M/W处理<0.053 mm土壤水稳性团聚体含量比M处理低14.8个百分点。其中M/P处理0.25~1、0.053~0.25 mm和<0.053 mm土壤水稳性团聚体含量与M处理无显著差异,且各处理>2 mm土壤水稳性团聚体含量无显著差异($P>0.05$)。

2.2 不同间作模式对土壤团聚体稳定性的影响

如图2所示,在0~20 cm土层,M/R、M/W处理土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径分别比M处理显著提高25.6%、31.3%和19.3%、28.6% ($P<0.05$),而M/P处理土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径则与M处理无显著差异($P>0.05$)。在20~40 cm土层,M/R、M/W处理土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径分别比M处理显著提高50.4%、48.2%和27.9%、33.0% ($P<0.05$),而M/P处理土壤团聚体平



M—玉米单作;P—豌豆单作;R—油菜单作;W—小麦单作;M/P—玉米间作豌豆;M/R—玉米间作油菜;M/W—玉米间作小麦。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

M—sole maize; P—sole pea; R—sole rap; W—sole wheat; M/P—maize/pea intercropping; M/R—maize/rape intercropping; M/W—maize/wheat intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences at the $P<0.05$ level. The same below

图1 不同间作模式下土壤团聚体粒径分级

Figure 1 The particle size classification of soil aggregates under different intercropping patterns

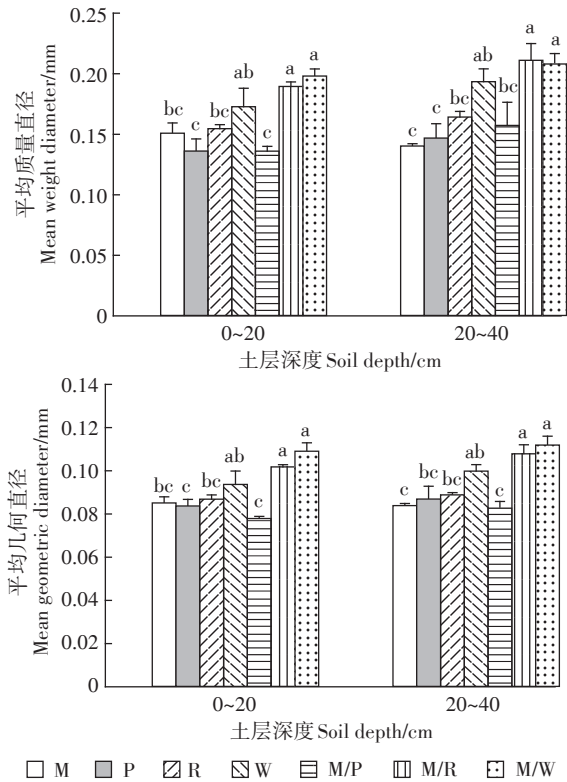


图2 不同间作模式下土壤团聚体稳定性

Figure 2 The stability of soil aggregates under different intercropping patterns

均质量直径和平均几何直径则与 M 处理无显著差异 ($P>0.05$)。

2.3 不同间作模式对土壤有机碳含量的影响

间作模式对土壤有机碳含量存在影响(图3)。其中,M/W 处理 0~20 cm 土壤有机碳含量比 M 处理显著提高 11.5% ($P<0.05$),M/R 和 M/W 处理 20~40 cm 土壤有机碳含量分别比 M 处理显著提高 4.3% 和 9.6% ($P<0.05$),而 M/P 处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳含量则与 M 处理无显著差异 ($P>0.05$)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,M/P、M/R 以及 M/W 处理土壤有机碳含量与 P、R 以及 W 处理均无显著差异 ($P>0.05$)。

2.4 不同间作模式对土壤团聚体有机碳含量的影响

图4所示为不同间作模式下土壤团聚体有机碳含量差异。在 0~20 cm 土层,M/W 处理 <0.053 mm 土壤团聚体有机碳含量比 M 处理显著提高 17.5%,0.053~0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量比 M 处理显著提高 19.9%,而 >0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量则比 M 处理显著降低 12.1% ($P<0.05$);M/R 处理 <0.053 mm 土壤团聚体有机碳含量比 M 处理显著提高 16.0%,>0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量则比 M 处理显著降低 21.5% ($P<0.05$);M/P 处理 <0.053 mm 土壤团聚体有

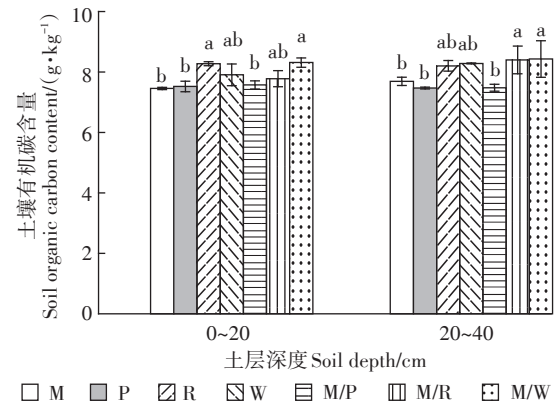


图3 不同间作模式下土壤有机碳含量

Figure 3 The soil organic carbon content under different intercropping patterns

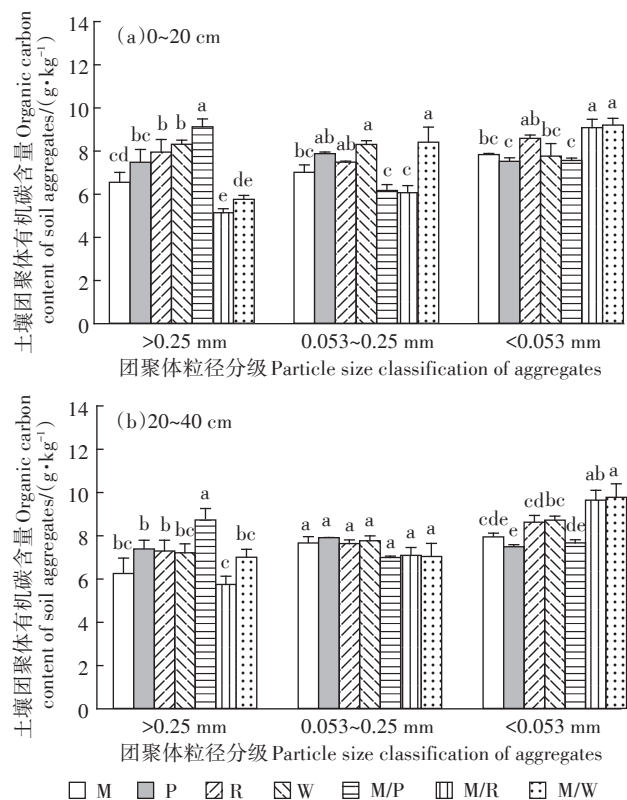


图4 不同间作模式下土壤团聚体有机碳含量

Figure 4 The organic carbon content of soil aggregates under different intercropping patterns

机碳含量与 M 处理无显著差异 ($P>0.05$),而 >0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量则比 M 处理显著提高 39.3% ($P<0.05$)。

在 20~40 cm 土层,M/W 处理 <0.053 mm 土壤团聚体有机碳含量比 M 处理显著提高 23.0%,而 0.053~0.25 mm 和 >0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量与 M 处理无显著差异 ($P>0.05$);M/R 处理 <0.053 mm 土壤团

聚体有机碳含量比M处理显著提高21.4%,而0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳含量则与M处理无显著差异($P>0.05$);M/P处理<0.053 mm和0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳含量与M处理无显著差异($P>0.05$),而>0.25 mm土壤团聚体有机碳含量比M处理显著提高39.5%(图4)。

2.5 不同间作模式对土壤团聚体有机碳储量的影响

由表2可知,在0~20 cm土层,M/W处理土壤有机碳总储量比M处理显著提高11.0%,而M/P和M/R处理0~20 cm土壤有机碳储量与相应单作处理均无显著差异($P>0.05$)。M/W处理有机碳储量的增加主要是由于0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量的增加,在本试验中,M/W处理0~20 cm土层0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量比M处理显著提高105.4%($P<0.05$)。在20~40 cm土层,M/P、M/R和M/W处理土壤有机碳储量与相应单作处理均无显著差异($P>0.05$),仅M/W和M/R处理>0.25 mm土壤团聚体有机碳储量比M处理显著提高87.6%和59.3%。

在0~40 cm土层,M/W处理土壤有机碳总储量与M处理相比显著提高10.2%,而M/P和M/R处理0~40 cm土壤有机碳总储量与相应单作处理均无显著差异($P>0.05$)。M/W处理>0.25 mm和0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量分别比M处理显著提高55.5%和56.8%,而<0.053 mm土壤团聚体有机碳储量则与M处理无显著差异($P>0.05$);M/R处理>0.25 mm土壤

团聚体有机碳储量比M处理显著提高39.1%($P<0.05$),而0.053~0.25 mm和<0.053 mm土壤团聚体有机碳储量则与M处理无显著差异($P>0.05$);M/P处理>0.25、0.053~0.25 mm和<0.053 mm土壤团聚体有机碳储量与M处理均无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,也是土壤质量的重要评价指标^[26]。本研究发现,间作模式可以增加土壤团聚体稳定性,其中M/W和M/R处理0~20 cm和20~40 cm土层土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径均显著高于M处理(图2),这主要是由于M/W和M/R处理增加了土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)含量,降低了黏粉粒(<0.053 mm)含量(图1)。向蕊等^[12]和白录顺等^[20]的研究结果同样表明,间作可以增加土壤大团聚体和微团聚体的占比,提高土壤团聚体稳定性。间作增加土壤团聚体稳定性的原因可能是间作模式作物根系较为发达,通过根系缠绕和固结作用使土壤更容易形成较大粒级的团聚体;同时,间作模式增加了不同作物间根系的交互作用,促使根系分泌物增加和微生物活力增强,植物根系和真菌菌丝分泌多糖及其他有机复合物促进了土壤颗粒和微团聚体的黏结,这有利于微团聚体转化为大颗粒团聚体^[27-28]。

土壤有机碳是土壤肥力的表征,种植方式、耕作

表2 不同间作模式下土壤团聚体有机碳储量($t \cdot hm^{-2}$)

Table 2 The organic carbon storage of soil aggregates under different intercropping patterns($t \cdot hm^{-2}$)

土壤深度 Soil depth/cm	团聚体分级 Soil aggregates	M	P	R	W	M/P	M/R	M/W
0~20	>0.25 mm	1.94±0.56bc	1.41±0.28c	2.88±0.49a	2.79±0.14a	2.55±0.21a	2.34±0.32ab	2.45±0.20ab
	0.053~0.25 mm	3.13±0.63bc	5.49±0.97a	3.10±0.74bc	4.75±1.78ab	2.15±0.24c	3.35±1.37bc	6.43±1.59a
	<0.053 mm	16.11±0.57a	14.46±1.53a	17.53±1.14a	14.72±3.66a	16.79±0.59a	16.40±2.24a	14.62±1.02a
	总储量 Total storage	21.18±0.17b	21.37±0.85b	23.50±0.33a	22.25±2.02ab	21.49±0.67b	22.10±1.32ab	23.51±0.76a
20~40	>0.25 mm	1.77±0.65c	1.82±0.50c	2.92±0.54ab	2.55±0.69abc	2.18±0.20bc	2.82±0.41ab	3.32±0.40a
	0.053~0.25 mm	4.44±1.33a	5.54±2.85a	3.35±0.79a	5.61±1.50a	3.45±0.95a	4.30±0.81a	5.44±1.12a
	<0.053 mm	16.96±0.34a	15.20±2.38a	18.49±0.86a	16.25±1.46a	17.08±0.84a	17.84±2.41a	16.62±3.57a
	总储量 Total storage	23.17±0.67ab	22.56±0.16b	24.77±0.94ab	24.41±0.57ab	22.71±0.18ab	24.95±2.39ab	25.38±2.99a
0~40	>0.25 mm	3.71±1.02bc	3.23±0.35c	5.80±0.52a	5.34±0.66a	4.73±0.32ab	5.16±0.68a	5.77±0.42a
	0.053~0.25 mm	7.57±1.43bc	11.03±1.89a	6.45±1.53c	10.36±2.35ab	5.60±0.87c	7.65±2.17bc	11.87±2.57a
	<0.053 mm	33.07±0.65ab	29.67±1.22b	36.02±0.36a	30.96±4.36b	33.87±1.29ab	34.24±4.32ab	31.24±4.12ab
	总储量 Total storage	44.35±0.72b	43.93±0.96b	48.26±0.88a	46.66±2.29ab	44.20±0.84b	47.05±3.50ab	48.89±2.82a

注:M—玉米单作;P—豌豆单作;R—油菜单作;W—小麦单作;M/P—玉米间作豌豆;M/R—玉米间作油菜;M/W—玉米间作小麦。同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: M—sole maize; P—sole pea; R—sole rap; W—sole wheat; M/P—maize/pea intercropping; M/R—maize/rape intercropping; M/W—maize/wheat intercropping. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences at the $P<0.05$ level.

措施和养分管理均会影响土壤有机碳的含量^[10-11]。本研究发现,间作模式可以增加土壤有机碳含量,其中,M/W处理0~20 cm和20~40 cm土壤有机碳含量分别比M处理显著提高11.5%和9.6%,0~40 cm土层土壤有机碳总储量比M处理显著提高10.2%,CONG等^[9]同样发现间作模式0~20 cm土壤有机碳含量显著高于单作处理。分析其原因,一方面间作模式具有显著的生物量和产量优势,其根系生物量明显高于单作处理,使得更多的残留碳通过根系输入土壤^[29-30];另一方面,间作模式中不同作物根系的交互作用使根系分泌物增加,土壤微生物活性增强,而土壤微生物活性与土壤有机碳的固持与矿化密切相关^[31]。此外,间作模式有利于大团聚体的形成和微团聚体的稳定,而土壤团聚体能够阻止有机碳与矿物颗粒的相互作用,减缓土壤有机碳的降解,从而增加土壤有机碳含量^[12,16]。在本研究中,M/W处理土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径均显著高于M处理,且M/W处理0~40 cm土层>0.25 mm和0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量分别比M处理显著高55.5%和56.8%,这一结果也充分印证了上述观点。M/P和M/R处理中仅M/R处理20~40 cm土壤有机碳含量比M处理高4.3%,这可能是由于豌豆和油菜为C3作物,与玉米相比,其根系生物量较小,导致输入到土壤中的根系碳较少^[6]。

由于表层有机碳有90%存在于团聚体中,明确表土各粒级团聚体中有机碳含量对于揭示不同间作模式对土壤有机碳的影响意义重大^[32]。本研究发现,间作模式增加了土壤团聚体有机碳含量。其中,M/P处理0~20 cm和20~40 cm土层>0.25 mm土壤团聚体有机碳含量均显著高于M和P处理(图4),而M/W处理0~20 cm土层0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳含量显著高于M处理,且0~20 cm和20~40 cm土层<0.053 mm土壤团聚体有机碳含量也均显著高于M处理。这与SIX^[33]提出的“大团聚体周转”模型相符,即新输入有机物首先在微生物及根系分泌物作用下胶结为大团聚体,且伴随颗粒有机物的分解,微团聚体逐渐形成并随着大团聚体的破碎而被释放,而微团聚体对土壤有机碳的保护作用更强。微团聚体中土壤有机碳含量比大团聚体高,是更长时间的储存和较少的干扰所致^[34]。大团聚体促使更多的土壤有机碳储存,但这种储存是暂时的,而微团聚体促使土壤有机碳长期固定^[35]。这也为M/P处理0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳含量与M和P处理无显著差异,而M/W处理

0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳含量显著高于M处理的结果提供了理论依据。由于土壤团聚体的形成是个长期过程,有机碳在大团聚体内可以存在几年,而在微团聚体内可能达到一个世纪^[36]。

本研究结果是基于4年的田间试验得出的结论,对于不同间作模式下土壤团聚体有机碳影响的长期结果可能有所欠缺,后续还需基于长期定位试验进行进一步研究。

4 结论

(1)西北绿洲灌区间作种植模式(玉米/油菜和玉米/小麦)增加了0~20 cm和20~40 cm土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)的含量,降低了黏粉粒(<0.053 mm)的含量。

(2)玉米/油菜和玉米/小麦间作种植模式土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径均高于玉米单作处理。玉米/小麦间作种植模式可以增加土壤及土壤黏粉粒团聚体有机碳含量,有利于土壤有机碳储量的提升,其中0~40 cm土壤有机碳储量比玉米单作处理高4.54 t·hm⁻²,有机碳储量的增加是由于0~40 cm土层>0.25 mm和0.053~0.25 mm土壤团聚体有机碳储量显著增加。

参考文献:

- [1] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108: 20260-20264.
- [2] RASEDUZZAMAN M, JENSEN E S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91: 25-33.
- [3] YIN W, CHAI Q, GUO Y, et al. Reducing carbon emissions and enhancing crop productivity through strip intercropping with improved agricultural practices in an arid area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 197-208.
- [4] CHEN P, SONG C, LIU X, et al. Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 987-999.
- [5] DHIMA K V, LITHOURGIDIS A S, VASIAKOGLIOU I B, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratios[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(2): 249-256.
- [6] CHAI Q, QIN A Z, GAN Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(34): 535-543.
- [7] YANG C H, FAN Z L, CHAI Q. Agronomic and economic benefits of pea/maize intercropping systems in relation to N fertilizer and maize density[J]. *Agronomy*, 2018, 8(4): 52.

- [8] BLASER B C, SINGER J, GIBSON L R. Winter cereal, seeding rate, and intercrop seeding rate effect on red clover yield and quality[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(3): 723–729.
- [9] CONG W F, HOFFLAND E, LI L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 1715–1726.
- [10] ZOTARELLI L, ALVES B J R, URQUIAGA S, et al. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95(1/2): 196–206.
- [11] TECHEN A K, HELMING K, BRÜGGEMANN N, et al. Soil research challenges in response to emerging agricultural soil management practices[J]. *Advances in Agronomy*, 2020, 161: 179–240.
- [12] 向蕊, 伊文博, 赵薇, 等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 303–308. XIANG R, YIN W B, ZHAO W, et al. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 303–308.
- [13] 张智晖. 玉米/大豆间作模式对土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(16): 9706–9707. ZHANG Z H. Effects of intercropping patterns for maize and soybean on soil enzyme activity and soil nutrients[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(16): 9706–9707.
- [14] DIJKSTRA F A, HOBIE S E, REICH P B, et al. Divergent effects of elevated CO₂, N fertilization, and plant diversity on soil C and N dynamics in a grassland field experiment[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 41–52.
- [15] XIE J, PENG B, WANG R, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthrosol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 555–567.
- [16] GUNINA A, KUZYAKOV Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from ¹³C natural abundance[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 71(6): 95–104.
- [17] BENBI D K, SINGH P, TOOR A S, et al. Manure and fertilizer application effects on aggregate and mineral-associated organic carbon in a loamy soil under rice-wheat system[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47(15): 1828–1844.
- [18] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [19] PROMMER J, WALKER T W, WANEK W, et al. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 669–681.
- [20] 白录顺, 范茂攀, 王自林, 等. 间作模式下玉米/大豆的根系特征及其与团聚体稳定性的关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 124–129. BAI L S, FAN M P, WANG Z L, et al. Relationship between root characteristics and aggregate stability in the field with maize and soybean intercropping[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 124–129.
- [21] CHEN G, KONG X, GAN Y, et al. Enhancing the systems productivity and water use efficiency through coordinated soil water sharing and compensation in strip-intercropping[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10494.
- [22] DORAN J W, JONES A J. Methods for assessing soil quality[R]. Madison: WI, 1996: 123–141.
- [23] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregate and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367–1377.
- [24] KEMPER W D, ROSENAU R C. Aggregate stability and size distribution[M]//Klute A, Campbell G S, Jackson R D, et al. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Madison: WI, 1986: 425–442.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] BARTHES B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133–149.
- [27] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 96–99. YUAN Y R, HAN X Z, LI L J, et al. Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 96–99.
- [28] BRADY N C, WEIL R R. The nature and properties of soils[M]. 14th Edition. New York: Pearson Education Inc., 2008.
- [29] YANG C H, CHAI Q, HUANG G B. Root distribution and yield responses of wheat/maize intercropping to alternate irrigation in the arid areas of northwest China[J]. *Plant Soil & Environment*, 2010, 56: 253–262.
- [30] LI L, SUN J H, ZHANG F S. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below-ground space of irrigated maize at late growth stages[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57: 61–67.
- [31] ZAREA M J, GHALAVAND A, GOLTAPPEH E M, et al. Effects of mixed cropping, earthworms (*Pheretima* sp.), and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on plant yield, mycorrhizal colonization rate, soil microbial biomass, and nitrogenase activity of free-living rhizosphere bacteria[J]. *Pedobiologia*, 2009, 52: 223–235.
- [32] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biological Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665–676.
- [33] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099–2103.
- [34] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31.
- [35] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447–455. LIU Z L, YU W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 447–455.
- [36] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595–605.