

绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响

李超^{1,2}, 王俊^{1,2,3}, 邢文超^{1,2}, 张少宏^{1,2}, 柳瑞³

(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)

摘要: [目的] 探讨绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响, 为在黄土高原旱作农业区的推广提供科学依据。[方法] 基于 4 a 田间定位试验, 研究了夏闲期种植长武怀豆、苏丹草、怀豆/苏丹草混播以及裸地休闲(CK)对旱作冬小麦收获期农田耕层(0—20 cm)土壤容重、孔隙度、持水量和团聚体的影响。[结果] 在 0—10 cm 土层, 与 CK 相比, 苏丹草和混播处理显著降低了土壤容重, 怀豆、苏丹草和混播处理显著提高了土壤毛管孔隙度、总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、大团聚体(>5 mm)所占比例和团聚体平均重量直径(MWD); 在 10—20 cm 土层, 苏丹草处理大团聚体所占比例和 MWD 均显著高于 CK。土壤容重与土壤有机碳含量呈显著负相关, 毛管孔隙度和团聚体平均重量与绿肥生物量呈显著正相关, 而土壤总孔隙度、饱和持水量和毛管持水量与绿肥生物量和土壤有机碳均呈显著正相关。[结论] 在黄土高原地区, 夏闲期单播种植长武怀豆、苏丹草及混播均能显著改善耕层土壤物理性质, 综合来看, 苏丹草单播的效果优于长武怀豆单播和二者混播。

关键词: 绿肥; 填闲种植; 土壤物理性质; 土壤团聚体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0107-07

中图分类号: S152.3, S152.5, S152.7

文献参数: 李超, 王俊, 邢文超, 等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 107-113. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.015; Li Chao, Wang Jun, Xing Wenchao, et al. Effects of green manure on physical properties of topsoil in a dryland winter wheat field [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 107-113.

Effects of Green Manure on Physical Properties of Topsoil in a Dryland Winter Wheat Field

Li Chao^{1,2}, Wang Jun^{1,2,3}, Xing Wenchao^{1,2}, Zhang Shaohong^{1,2}, Liu Rui³

(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)

Abstract: [Objective] The effects of green manure on soil physical properties of dryland winter wheat field were investigated in order to provide scientific basis for its popularization in dry farming area of Loess Plateau. [Methods] Based on a 4-year winter wheat field experiment, the effects of planting Changwu soybean, Sudan grass, soybean/Sudan grass mixture and control with no cover crop (CK) on bulk density, porosity, water holding capacity, and aggregation in the cultivated soil layer at 0—20 cm depth during the harvest of dry winter wheat were studied in the Loess Plateau. [Results] At 0—10 cm depths, compared with CK, Sudan grass and mixture treatment significantly decreased soil bulk density. Soybean, Sudan grass and mixture treatment significantly increased soil capillary porosity, total porosity, saturated water capacity, capillary water holding capacity, the proportion of large aggregates (> 5 mm), and aggregate mean weight

收稿日期: 2021-09-20

修回日期: 2021-11-01

资助项目: 中国科学院西部之光“西部引进人才”项目; 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-XA-005)

第一作者: 李超(1997—), 女(汉族), 山西省陵川县人, 硕士研究生, 研究方向为农田土壤物理性质研究。Email: 591728220@qq.com。

通讯作者: 王俊(1974—), 男(汉族), 河南省虞城县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱作农田生态系统管理研究。Email: wangj@nwu.edu.cn。

diameter (MWD) ($p < 0.05$). At 10—20 cm soil depth, Sudan grass treatment had the higher proportion of large aggregates and MWD than CK. Soil bulk density was negatively correlated with soil organic carbon, while soil total porosity, saturated and capillary water capacity were positively correlated to cover crop biomass and soil organ carbon. [Conclusion] In the Loess Plateau, top soil physical properties can be enhanced by monoculture planting Changwu soybean, Sudan grass, or mixture sowing during summer fallow, especially monoculture of Sudan grass.

Keywords: green manure; cover cropping; soil physical properties; soil aggregate

黄土高原是中国典型的旱作农业区,但干旱缺水加上严重的水土流失,导致该地区农田土壤质量偏低^[1]。在主要粮食作物生长的休闲期间,引种豆科或非豆科绿肥作物在土壤质量提升方面发挥了重要作用,但近几十年来,由于化肥的大面积使用而在本地区几近消失。研究表明,这种绿肥填闲种植方式具有促进土壤碳氮固存^[2-3],促进微生物代谢^[4],减少养分淋溶^[5]和抑制杂草病虫害等^[6]多种生态环境效益。在当前农业“减施增效”背景下,绿肥填闲种植可望在旱作农田土壤质量维持与提升方面发挥巨大作用。土壤物理性状(土壤容重、孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、团聚体结构等)是反映土壤质量状况的重要指标^[7-10]。与裸地休闲相比,绿肥填闲种植增加了有机物的输入,同时也改变了土壤微环境,会导致土壤物理性状发生显著改变。目前,许多国内外学者研究^[11]表明,绿肥填闲作物对土壤物理性质的影响是不一致的。Blanco-Canqui 等^[12]进行的文献分析表明,相比传统休耕,绿肥填闲种植仅在近 1/3 的地区导致土壤容重出现了显著下降。Alvarez 等^[13]在阿根廷潘帕斯地区进行的研究也表明,绿肥填闲种植相比休耕会略微降低土壤容重或无影响,这主要取决于绿肥种类和试验区域特征。Abdollahi 等^[14]在丹麦的研究也发现,绿肥填闲种植在 10 a 后使土壤形成了稳定而连续的大孔隙,从而显著改善了后茬粮食作物根系生长的水分和通气状况。在中国黄土高原地区,刘立意等^[15]研究表明绿肥作物能够显著改善土壤持水能力;张达斌等^[16]研究表明,豆科绿肥配合长期施氮能够显著提高土壤大团聚体(>5 mm)比例。与豆科绿肥作物相比,非豆科绿肥通常具有更大的生物量积累,因而具有更多的根系和残余输入,进而可能对土壤物理性质产生更大的影响,相关研究尚未见报道。为此,本文基于田间定位试验,系统分析了夏闲期种植不同绿肥作物对旱作冬小麦农田耕层土壤容重、孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和团聚体的影响,旨在进一步探讨绿肥填闲种植对土壤物理质量的提升机制,为其在黄土高原旱作农业区的推广提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°12'N, 107°44'E)。该区海拔 1 220 m,属于暖温带半干旱半湿润性季风气候,年均气温 9.1 °C,无霜期约 171 d,年均蒸发量 1 440 mm,年均降水量为 580 mm,且季节性分布不均,多集中于夏秋季节。试验地土壤为黑垆土,母质为中壤质马兰黄土。土层深厚,全剖面土质均匀疏松,通透性好,肥力中等。供试土壤基本理化性质如下:有机质 12.0 g/kg,全氮 0.8 g/kg,全磷 0.66 g/kg,矿质氮 13.74 mg/kg,速效磷 24.6 mg/kg,速效钾 161.39 mg/kg,土壤 pH 值为 8.11。该研究区属于典型旱作农业区,种植制度为一年一熟或两年三熟。

1.2 试验设计

本试验始于 2017 年 6 月底前季小麦收获后,共设置 4 个绿肥作物处理,分别为:长武怀豆单播、苏丹草单播、怀豆/苏丹草混播以及裸地休闲对照(CK),每个处理重复 3 次,共 12 个小区,小区面积为 6.7 m × 10 m,随机区组排列。

绿肥作物在每年 6 月底至 7 月初冬小麦收获后播种,参照本地区绿肥常规播量,怀豆处理长武怀豆播量为 70 kg/hm²,苏丹草处理苏丹草播量为 35 kg/hm²,混播处理怀豆和苏丹草播量分别为 35 和 17.5 kg/hm²。绿肥作物于每年 9 月中旬使用旋耕机将地上部分直接掺入翻压入土壤中,两周后播种冬小麦(长武 134),播量为 165 kg/hm²。小麦播种时按 60 kg/hm² 的 N 和 60 kg/hm² 的 P 分别施入尿素(46%N)和过磷酸钙(20% P₂O₅)作为基肥。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 样品采集与测定

2021 年 6 月底冬小麦收获后,在每个样地按照五点取样法分层挖取 0—10 cm, 10—20 cm 土壤剖面采取原状土样,一部分土样使用环刀(体积为 100 cm³)采集,用于测定土壤容重、孔隙度、饱和持水量和毛管持水量。另一部分尽量保持原状土壤结构带回实验室,将土样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,用于土壤团聚体测定和有机碳测定。

(1) 土壤容重采用环刀法^[17]测定。土壤孔隙度和持水量采用原状土壤浸润法^[18],土壤饱和持水量和总孔隙度计算公式如下:

$$\text{土壤饱和持水量}(\%) = \frac{(\text{浸泡后土质量} - \text{烘干土质量})}{\text{烘干土质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{土壤总孔隙度}(\%) = \text{饱和持水量} \times \text{容重} \quad (2)$$

土壤毛管孔隙度的测定:将浸泡至恒重的环刀置于支架上,环刀底部放置滤纸,静置至恒重,并称重。土壤毛管持水量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度计算方法为:

$$\text{土壤毛管持水量}(\%) = \frac{(\text{静置后土质量} - \text{烘干土质量})}{\text{烘干土质量}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%) = \frac{(\text{静置后土质量} - \text{烘干土质量}) \times \text{容重}}{\text{烘干土质量}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{土壤非毛管孔隙度}(\%) = \frac{\text{土壤总孔隙度} - \text{土壤毛管孔隙度}}{\text{土壤总孔隙度}} \quad (5)$$

(2) 土壤团聚体采用干筛法^[19]测定。将孔径分别为5,2,0.25 mm的土筛按孔径由小到大叠放成一组套筛,放入机械振筛机中振动10 min,称重并计算各粒径所占重量比例。使用下面公式(6)计算土壤团聚体平均重量直径(MWD,mm),用于表征土壤团聚体稳定性^[20]。

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

式中: X_i 为某级别团聚体的平均直径; W_i 是该粒径团聚体的重量百分比。

(3) 土壤有机碳测定。使用元素分析仪(EA3000)进行,详见Wang等^[21]的方法。另外,于每年9月中旬绿肥翻压时使用样方法采集地上样品,70℃烘干至恒重,称重计算干重,用于计算绿肥生物量。

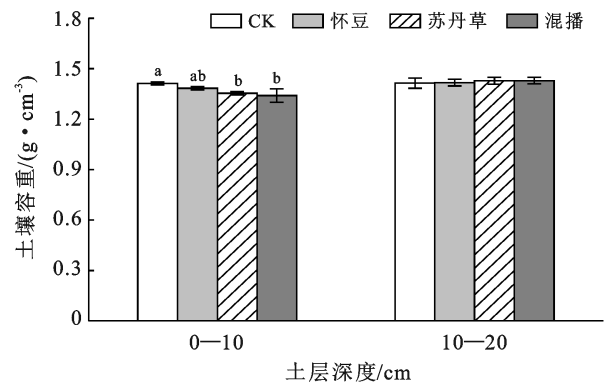
1.4 数据处理

使用Excel 2010及SPSS(25)软件进行数据处理及统计分析,处理间各测定指标差异使用单因素方差分析进行显著性检验,采用Person法分析各指标间相关性,使用Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和孔隙度

研究区不同处理土壤容重如图1所示。与CK相比,苏丹草和混播处理在0—10 cm土层容重分别降低了4.1%和5.1%($p < 0.05$),而怀豆处理与之差异不显著。在10—20 cm土层,各处理间差异均不显著。



注:CK为裸地休闲对照,图中不同小写字母不同代表处理间差异显著($p < 0.05$)。下同

图1 研究区绿肥种植对土壤容重的影响

不同处理土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度如图2所示。在0—10 cm土层,苏丹草和混播处理土壤毛管孔隙度较CK分别提高了21.6%和18.2%($p < 0.05$),且苏丹草处理显著高于怀豆。在10—20 cm土层,各处理间毛管孔隙度无显著差异。各处理间土壤非毛管孔隙度在0—10 cm,10—20 cm土层差异均不显著。在0—10 cm土层,与CK相比,怀豆,苏丹草和混播处理土壤总孔隙度较CK分别显著提高了8.8%,19.2%和19.1%($p < 0.05$),且苏丹草处理显著高于怀豆。在10—20 cm土层,各处理土壤总孔隙度与CK相比差异均不显著,而怀豆处理显著高于混播。

2.2 土壤持水量

不同处理土壤饱和持水量和毛管持水量如图3所示。由图3可知,在0—10 cm土层,与CK相比,怀豆,苏丹草和混播处理下的土壤饱和持水量分别显著提高了11.0%,24.2%和23.4%($p < 0.05$),且苏丹草和混播显著高于怀豆。在10—20 cm土层,各处理间土壤饱和持水量无显著差异。由图3可知,与CK相比,怀豆,苏丹草和混播处理下的土壤毛管持水量分别显著提高了11.9%,26.7%和24.6%($p < 0.05$),且苏丹草和混播显著高于怀豆。在10—20 cm土层,各处理间土壤毛管持水量无显著差异。

2.3 土壤团聚体

不同处理土壤团聚体构成和土壤团聚体平均重量直径(MWD)如图4—5所示。

由图4可知,在0—10 cm土层,供试土壤团聚体主要分布于>5 cm和0.25~2 mm这两个粒级,2~5 mm粒级次之,<0.25 mm粒级团聚体比例最低。与CK相比,怀豆和苏丹草处理显著提高了>5 mm粒级的团聚体比例,而显著降低了0.25~2 mm和<0.25 mm

粒级的团聚体比例;混播处理也显著提高了 >5 mm粒级的团聚体所占比例,但仅显著降低了 <0.25 mm粒级的团聚体比例。怀豆和苏丹草处理下的各粒级所占比例基本一致。与混播相比,怀豆和苏丹草处理具有更高的 >5 mm 粒级团聚体比例和较低的 $0.25\sim 2$ mm粒级团聚体比例。由图 4 还可看出,在 $10\sim 20$ cm 土层,土壤团聚体粒级比例随着粒级减小

而减少。与 CK 相比,怀豆和混播处理显著降低了 $2\sim 5$ mm粒级团聚体比例,显著提高了 $0.25\sim 2$ mm粒级的团聚体占比,而苏丹草处理显著提高了 >5 mm粒级的团聚体比例,同时显著降低了 $0.25\sim 2$ mm粒级团聚体比例。与怀豆相比,苏丹草处理显著增加了 >5 和 <0.25 mm粒级团聚体比例,但显著降低了 $2\sim 5$ mm 和 $0.25\sim 2$ mm 粒级团聚体比例。

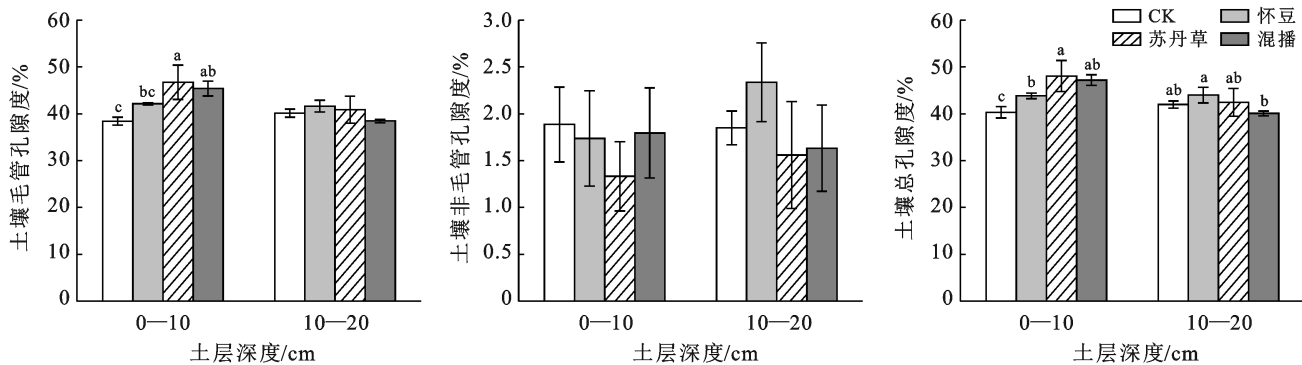


图 2 绿肥种植对土壤毛细孔隙度、非毛细孔隙度和总孔隙度的影响

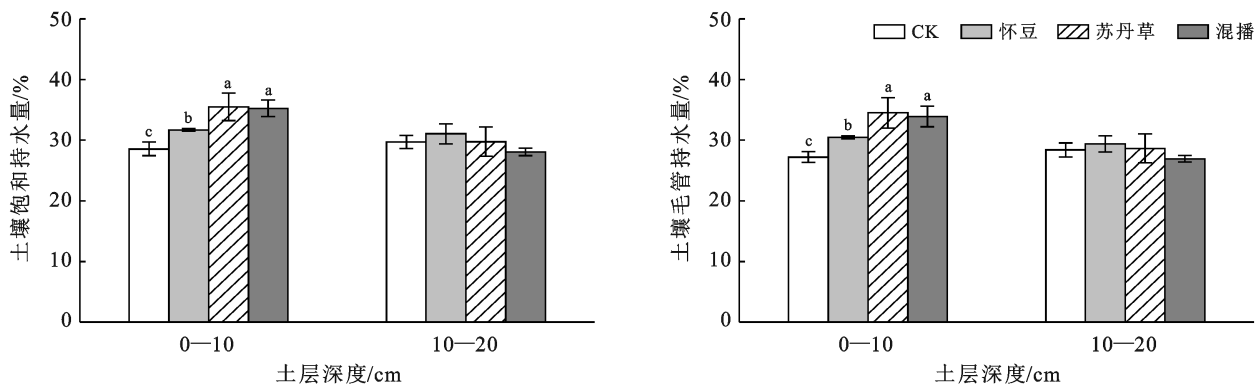


图 3 绿肥种植对土壤饱和持水量和毛细持水量的影响

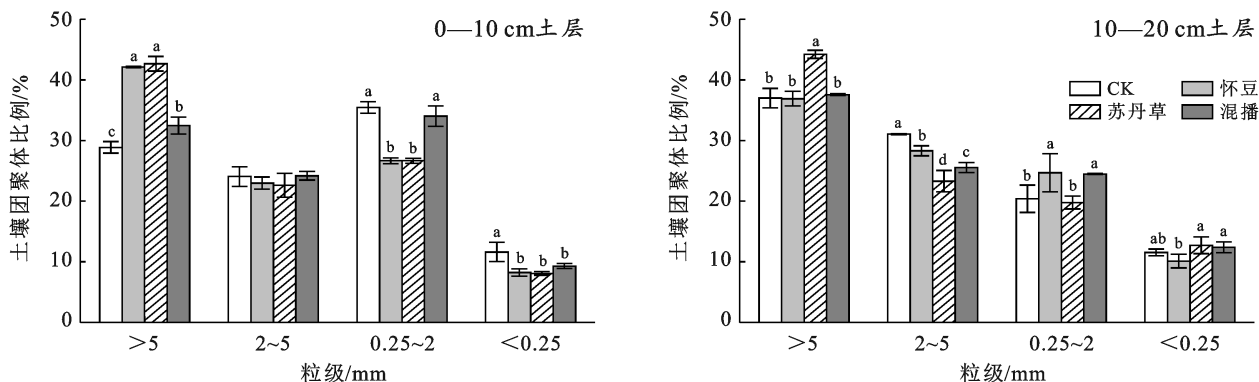


图 4 绿肥种植对不同土层土壤团聚体比例的影响

土壤团聚体 MWD 是表征土壤团聚体稳定性的关键指标, MWD 值越大表明团聚体结构越稳定。由图 5 可知,在 $0\sim 10$ cm 土层,与 CK 相比,怀豆,苏丹草和混播处理下的 MWD 分别提高了 25.0% 、 25.7%

和 7.6% ($p < 0.05$),且怀豆和苏丹草处理 MWD 显著高于混播。在 $10\sim 20$ cm 土层,苏丹草处理 MWD 较 CK 提高了 6.4% ($p < 0.05$),而怀豆和混播与之相比无显著差异。

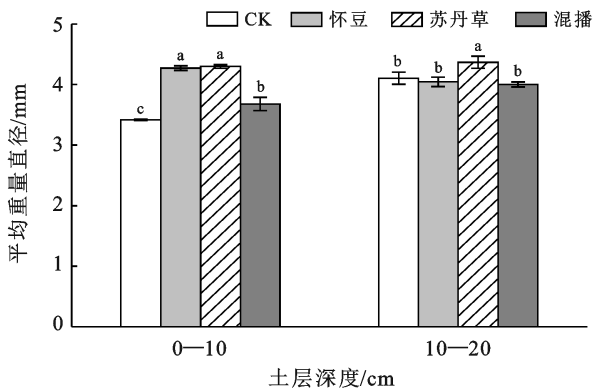


图 5 不同绿肥种植下的土壤平均重量直径

2.4 土壤有机碳

不同处理土壤有机碳含量如图 6 所示。由图 6 可知,在 0—10 cm,怀豆和混播处理的土壤有机碳含量较 CK 显著提高了 11.0% 和 8.4% ($p < 0.05$),而苏丹草与之差异不显著。在 10—20 cm,仅苏丹草处理的土壤有机碳较 CK 显著提高了 12.4%。

2.5 绿肥生物量

不同处理绿肥生物量如图 7 所示。由图 7 可知,怀豆,苏丹草和混播处理的填闲生物量在 2017—2019 年差异均不显著,而在 2019—2020 年,苏丹草和混播较怀豆生物量增加了 21.9% 和 41.6% ($p < 0.05$),且混播显著高于苏丹草。平均 3 a 来看,混播处理生物量显著高于怀豆。

2.6 相关性分析

由表 1 可知,供试土壤容重与土壤毛管孔隙度、总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和有机碳均呈现

显著负相关,而毛管孔隙度与总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量均呈显著正相关。总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、绿肥生物量和土壤有机碳之间均呈显著正相关。MWD 仅与绿肥生物量呈显著正相关,而非毛管孔隙度与其他指标均无显著相关性。

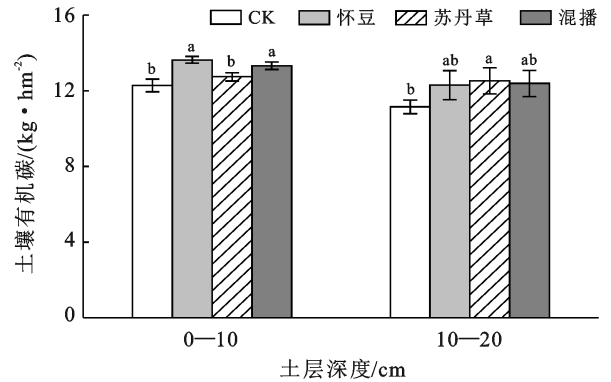


图 6 不同绿肥种植下的土壤有机碳

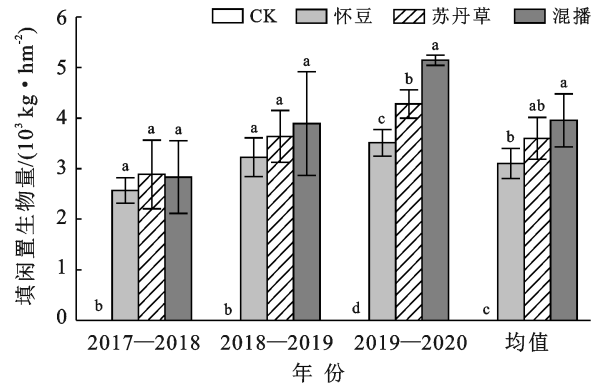


图 7 不同绿肥填闲种植下的填闲生物量

表 1 土壤物理性质指标之间及其与绿肥生物量和土壤有机碳之间的相关性

| 项目 | 毛管孔隙度 | 非毛管孔隙度 | 总孔隙度 | 饱和持水量 | 毛管持水量 | MWD | 绿肥生物量 | 有机碳 |
|--------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|---------|
| 土壤容重 | -0.750** | 0.178 | -0.744** | -0.861** | -0.859** | 0.058 | -0.302 | -0.480* |
| 毛管孔隙度 | | -0.249 | 0.990** | 0.976** | 0.983** | 0.251 | 0.462* | 0.401 |
| 非毛管孔隙度 | | | -0.111 | -0.145 | -0.250 | -0.205 | -0.202 | -0.011 |
| 总孔隙度 | | | | 0.980** | 0.972** | 0.229 | 0.444* | 0.410* |
| 饱和持水量 | | | | | 0.994** | 0.153 | 0.434* | 0.453* |
| 毛管持水量 | | | | | | 0.174 | 0.447* | 0.443* |
| MWD | | | | | | | 0.409* | 0.032 |
| 绿肥生物量 | | | | | | | | 0.554** |

注: ** 表示 $p < 0.01$ 水平上显著相关, * 表示 $p < 0.05$ 水平上显著相关; MWD 为平均重量直径

3 讨论

3.1 绿肥填闲种植对土壤容重的影响

土壤容重是土壤最基础的物理性质指标,可以反映土壤的结构、持水性和透水性^[22]。一般来说,土壤容重越低,土壤结构越疏松,有助于保持土壤水分、使

作物根系加深以及促进土壤中的气体交换^[23]。本研究中,与夏季休耕相比,种植苏丹草或与长武怀豆混播导致地表土壤容重显著降低,这与 Kelly 等^[24]在美国高原和中原地区的研究相一致。Ghahremani^[25]在伊朗地区时长两年的研究也表明,填闲作物单播或混播较裸地容重降低约 13%。土壤容重是否降低还与

绿肥填闲作物的种类有关。一项在美国中西部进行的玉米大豆轮作系统研究^[26]表明,黑麦草单播、黑豌豆单播和二者混播相比休耕显著降低了 0—5 cm 土层容重,但 3 种绿肥处理之间的差异不显著。这与本研究的结果基本一致。这可能是由于种植填闲作物增加的生物量维持和增加了土壤有机质(图 6—7),从而降低了土壤容重。

3.2 绿肥填闲种植对土壤持水能力的影响

土壤持水能力可以反映土壤的抗旱和保水能力^[27],包括土壤结构、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度等指标^[28]。土壤孔隙度直接影响着土壤的通气性能,并能促进植物根系的生长,对作物的生长尤其重要^[29]。本研究中,苏丹草单播和混播较裸地休闲相比显著提高了 0—10 cm 土层毛管孔隙度,且怀豆单播、苏丹草单播以及混播与裸地休闲相比均显著提高了总孔隙度,这与 Restovich 等^[30]在阿根廷地区进行 6 a 的试验结果相一致。这是由于草本和禾本科植物具有广泛的纤维根系和生物量(图 6),能显著提高土壤通气状况。在 Mulumba 和 Lal^[31]在美国哥伦布地区为期 11 a 的研究表明,土壤总孔隙度会随着绿肥作物生物量的增加而增加。而 Blazewicz-Wozniak^[32]在波兰的研究也表明,绿肥作物生物量积累对 0—20 cm 土层总孔隙度有积极影响^[31]。本研究也表明绿肥作物生物量的增加促进了毛管孔隙度和总孔隙度的增大(表 1)。

土壤饱和持水量代表土壤的蓄水能力,毛管持水量代表着土壤的有效水含量。整体来看,本研究中 3 种绿肥处理在 0—10 cm 土层饱和持水量和毛管持水量均显著高于裸地处理,表明夏闲期种植绿肥能显著提高土壤持水能力。已有研究^[33]发现,植被主要是通过提高土壤有机质含量,改善土壤结构,降低土壤容重和增加土壤毛管孔隙度等土壤物理特性,进而提高土壤持水能力。本文中,土壤饱和持水量、毛管持水量与绿肥填闲生物量和土壤有机碳均呈显著正相关,也证实了这一点。

3.3 绿肥填闲种植对土壤团聚作用的影响

土壤团聚体是良好的土壤结构单元,是土壤肥沃与否的标志之一^[34]。而夏季休闲期引入覆盖作物,将植物残茬翻入土中作为土壤有机质和腐殖质的来源,有利于土壤团聚体形成和稳定^[35]。在本研究中,绿肥作物均显著提高了 0—10 cm 土层 > 5 mm 粒径所占比例,而在 10—20 cm 仅苏丹草单播显著提高了大团聚体比例,主要原因在于非豆科绿肥具有更高的生物量积累。

土壤团聚体稳定性是土壤结构、受侵蚀性和入渗

性能的重要指标^[36]。绿肥填闲种植对 0—10 cm 土层 MWD 值均有显著提升,且单播的效果优于混播,而在 10—20 cm 土层仅苏丹草单播处理下的 MWD 值有显著提高。Blanco-Canqui 等研究^[37]指出,旱地条件下,有机碳水平的提高可能是改变土壤团聚体粒径分布和稳定性的关键因素,通过加速细粒与粗粒的融合,增强土壤颗粒间的结合力,从而提升大团聚体比例和稳定性。而本文中 MWD 值与土壤有机碳含量并不相关,但与绿肥生物量呈显著正相关(表 1)。在 Cotrufo 等的研究^[38]中提到,绿肥植物残体的加入对土壤大团聚体的形成和稳定起着重要作用,且土壤有机质是通过微生物对植物残体的某一部分分解而形成的,这需要更长期的试验去验证。

4 结论

在黄土高原地区,冬小麦夏闲期种植苏丹草或长武怀豆与苏丹草混播作为绿肥均显著降低了耕层土壤容重,同时长武怀豆单播、苏丹草单播或长武怀豆与苏丹草混播显著增加了土壤毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水量和饱和持水量。种植绿肥作物同时显著提高了 > 5 mm 大团聚体比例,提高了团聚体稳定性,且单播效果显著优于混播。总之,研究区冬小麦夏闲期单播种植苏丹草、长武怀豆能或混播均能有效改善土壤物理结构,提高土壤物理肥力,其中苏丹草单播的效果优于长武怀豆单播和二者混播。

[参 考 文 献]

- [1] 卢宗凡.黄土高原的农业发展战略[J].干旱地区农业研究,2000,18(4):1-7.
- [2] 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.
- [3] Ovalle C, Del Pozo A, Peoples M B, et al. Estimating the contribution of nitrogen from legume cover crops to the nitrogen nutrition of grapevines using a 15 N dilution technique [J]. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2):247-259.
- [4] Chavarria D N, Verdenelli R A, Serri D L, et al. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 76:74-82.
- [5] Salmerón M, Caverro J, Isla R, et al. DSSAT nitrogen cycle simulation of cover crop-maize rotations under irrigated mediterranean conditions [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(4):1283-1296.
- [6] Schipanski M E, Barbercheck M, Douglas M R, et al. A framework for evaluating ecosystem services provided by

- cover crops in agroecosystems [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 125:12-22.
- [7] 刘哲.黄土旱区土壤物理隐性退化研究与思考[J].*农技服务*, 2020, 37(5):95-96, 98.
- [8] 伍海兵,李爱平,方海兰,等.绿地土壤孔隙度检测方法及其对土壤肥力评价的重要性[J].*浙江农林大学学报*, 2015, 32(1):98-103.
- [9] 索立柱,黄明斌,段良霞,等.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J].*生态学报*, 2017, 37(6):2045-2053.
- [10] 张然,史雷,马龙,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(6):325-330, 336.
- [11] Blanco C H, Mikha M M, Presley D, et al. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4):1471-1482.
- [12] Blanco C H, Ruis S J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(5):1527-1576.
- [13] Alvarez R, Steinbach H S, De Paep J L. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170(1):53-65.
- [14] Abdollahi L, Munkholm L J, Garbout A. Tillage system and cover crop effects on soil quality (II): Pore characteristics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1):271-279.
- [15] 辜松,刘立意,小松崎将一,等.覆盖作物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J].*农业机械学报*, 36(5):41-44, 56.
- [16] Zhang Dabin, Yao Zhiyuan, Chen Jiao, 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.
- [17] 张建军,朱金兆.水土保持监测指标的观测方法[M].北京:中国林业出版社, 2013:62-65.
- [18] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社, 2018:33-34.
- [19] 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.
- [20] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Proceedings. Soil Science Society of America*, 1950, 14(C):20-23.
- [21] Wang Jun, Fu Xin, Zhao Fazhu, 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.
- [22] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等.不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J].*生态学报*, 2015, 35(15):5183-5190.
- [23] Shahid M F, Iqbal M, Akhtar J, et al. Residual Effect of cover crops and conservation tillage on soil physical properties and wheat yield grown after direct seeded rice [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2020, 24(5):1265-1272.
- [24] Kelly C, Schipanski M E, Tucker A, et al. Dryland cover crop soil health benefits are maintained with grazing in the U. S. High and Central Plains [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 313:107358.
- [25] Ghahremani S, Ebadi A, Tobeh A, et al. Monocultured and mixed cover crops on soil properties, weed suppression, and lettuce yield [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(11):406-415.
- [26] Villamil M B, Bollero G A, Darmody R G, et al. No-till corn/soybean systems including winter cover crops [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(6):1936-1944.
- [27] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].*生态学报*, 2018, 38(11):3889-3898.
- [28] 苏杨,朱健,王平,等.土壤持水能力研究进展[J].*中国农学通报*, 2013, 29(14):140-145.
- [29] Sugiyanto Y, Soekodarmodjo S, Suparnawa S H, et al. Soil physical properties affecting the roots distribution of mature rubber on Red-Yellow Podsollic soil, North Sumatra(Indonesia) [J]. *Bulletin Perkaretan*, 1986, 4(3):82-88.
- [30] Restovich S B, Andriulo A E, Armas-Herrera C M, et al. Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions [J]. *Plant and Soil*, 2019, 442(1):401-417.
- [31] Mulumba L N, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98(1):106-111.
- [32] Blazewicz-Wozniak M, Konopiński M. Impact of cover crops and tillage on porosity of podzolic soil [J]. *International Agrophysics*, 2013, 27(3):247-255.
- [33] 赵世伟,周印东,吴金水.子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J].*水土保持学报*, 2002, 16(4):119-122, 94.
- [34] 乔鑫鑫,王艳芳,李乾云,等.复种模式对豫西褐土团聚体稳定性及其碳、氮分布的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3):380-391.

- 坚果生长及水分特征参数的影响[J].热带农业科技, 2017,40(1):17-19.
- [15] 侯贤清,李荣,何文寿,等.保水剂对旱作马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].核农学报,2018,32(5):1016-1022.
- [16] 包刚,王潮炎,徐丽君,等.农林保水剂对毛竹幼苗生长及叶片光合特性的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2013,42(4):385-390.
- [17] 杨青华,高尔明,马新明.不同土壤类型对玉米根系干重变化及其分布的影响[J].土壤通报,2001,32(5):238-240.
- [18] 陈奕凝,谭文文,彭治,等.不同方法对海棠叶表皮的观察对比[J].安徽农业科学,2020,48(20):127-130,139.
- [19] 王凯丽,高彦利,李姗,等.短期干旱胁迫下棉花气孔表现及光合特征研究[J].中国生态农业学报,2019,27(6):901-907.
- [20] 环境保护部.HJ613-2011 土壤干物质和水分的测定重量法[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [21] 师生波,李天才,李妙,等.土壤干旱和强光对高山嵩草叶片 PSII 反应中心非光化学淬灭的交互影响分析[J].植物生理学报,2015,51(10):1678-1686.
- [22] 梁欢,韦宝,陈静,等.基于叶绿素荧光参数的紫花苜蓿种质苗期抗旱性评价[J].草地学报,2020,28(1):45-55.
- [23] 王玉珏,付秋实,郑禾,等.干旱胁迫对黄瓜幼苗生长、光合生理及气孔特征的影响[J].中国农业大学学报,2010,15(5):12-18.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T20481-2017 气象干旱等级[S].北京:中国环境科学出版社,2017:2.
- [25] 黄海霞,杨琦琦,崔鹏,等.裸果木幼苗根系形态和生理特征对水分胁迫的响应[J].草业学报,2021,30(1):197-207.
- [26] Boguszewska-Mańkowska Dominika, Zarzyńska Krystyna, Nosalewicz Artur. Drought differentially affects root system size and architecture of potato cultivars with differing drought tolerance [J]. American Journal of Potato Research, 2020,97,54-62.
- [27] 张馨月,王寅,陈健,等.水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):34-44.
- [28] 杨永辉,武继承,吴普特,等.保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):73-78.
- [29] Arbona V, Iglesias D J, Jacas J, et al. Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants [J]. Plant and Soil, 2005,270:73-82.
- [30] 安东升,严程明,陈炫,等.季节性干旱下农艺节水措施对甘蔗生长和产量的影响[J].热带作物学报,2021,42(4):991-999.
- [31] 吕国华,蒋树芳,白文波,等.聚丙烯酸钠的释水特征及对土壤物理参数的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):172-175.
- [32] 赵丽英,邓西平,山仑,等.不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):63-66.
- [33] 史胜青,袁玉欣,杨敏生,等.水分胁迫对 4 种苗木叶绿素荧光的光化学淬灭和非光化学淬灭的影响[J].林业科学,2004,40(1):168-173.
- [34] 李佳,刘立云,李艳,等.保水剂对干旱胁迫槟榔幼苗生理特征的影响[J].南方农业学报,2018,49(1):104-108.
- [35] 李中华,刘进平,谷海磊,等.干旱胁迫对植物气孔特性影响研究进展[J].亚热带植物科学,2016,45(2):195-200.

(上接第 113 页)

- [35] Kesik T, Blazewicz-Wozniak M, Wach D. Influence of conservation tillage in onion production on the soil organic matter content and soil aggregate formation [J]. International Agrophysics, 2010,24(3):267-273.
- [36] Barthès 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.
- [37] Blanco-Canqui H, Holman J D, Schlegel A J, et al. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013,77(3):1026-1034.
- [38] 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.