

秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体 稳定性和有机碳含量的影响

王永栋¹, 武均^{1,2}, 蔡立群^{1,2,3}, 张仁陟^{1,2,3}

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070;
3.甘肃省节水农业工程技术研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探明秸秆还田后土壤团聚体与有机碳的变化特征和作用机制,依托 2019 年布设于甘肃省定西市李家堡镇的不同秸秆还田试验,设置两种秸秆类型:小麦秸秆和玉米秸秆,秸秆还田量分别为:0 (CK)、3 500 (低量)、7 000 (中量)、14 000 kg · hm⁻² (高量),研究了秸秆还田对陇中黄土高原旱作农田土壤团聚体稳定性和有机碳的影响。结果表明:土壤机械稳定性团聚体以>0.25 mm 团聚体为主,且随土层加深粒径逐渐增大,水稳性团聚体均与之相反;秸秆还田较不还田处理的机械稳定性和水稳性<0.25 mm 粒级团聚体含量分别降低了 3.53%~21.74%和 2.73%~8.95%,土壤机械稳定性和水稳性团聚体平均重量直径 *MWD*、几何平均直径 *GMD* 的提升幅度最大分别达到 16.29%、30.12%和 20.93%、12.12%,团聚体破碎率 *PAD* 降低了 2.53%~13.23%,在中量秸秆还田时效果最好,且玉米秸秆比小麦秸秆效果更明显。秸秆还田提升了土壤有机碳含量,且在表层土壤秸秆还田量越高,对土壤有机碳的提升效果越显著,其中玉米秸秆高量还田处理的土壤有机碳含量较 CK 显著提高了 31.37%;下层土壤小麦和玉米秸秆分别在 中量和高量还田下对土壤有机碳含量提升幅度最大,较 CK 分别显著提高了 29.85%和 36.31%。相关性和多元回归分析结果显示,土壤有机碳与机械稳定性和水稳性团聚体的稳定指数分别呈显著和极显著正相关关系,而 *PAD* 与土壤有机碳呈极显著负相关关系;土壤有机碳与 *GMD* 的拟合方程更适合描述土壤有机碳与团聚体稳定性间的关系。综上,本研究认为在玉米秸秆还田量为 7 000 kg · hm⁻² 时最适宜改良土壤团聚体结构和提升土壤固碳潜力,有效改善土壤质量。

关键词: 秸秆还田量;土壤团聚体;土壤有机碳;旱作麦田
中图分类号: S152;S19 **文献标志码:** A

Effects of straw returning amount on stability of soil aggregates and organic carbon content in dryland wheat field of the Loess Plateau

WANG Yongdong¹, WU Jun^{1,2}, CAI Liqun^{1,2,3}, Zhang Renzhi^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu Engineering Research Center for Agricultural Water-saving, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of straw returning on stability of soil aggregates and organic carbon in the dry farmland of the Loess Plateau in central Gansu. Different straw returning experiments were conducted in Lijiapu Town, Dingxi City, Gansu Province in 2019. The two straw types were wheat and corn, and the straw returning amount included 0 (CK), 3 500 kg · hm⁻² (low amount), 7 000 kg · hm⁻² (medium amount) and 14 000 kg · hm⁻² (high amount). The results showed that soil mechanically stable aggregates were >0.25 mm aggregates as the main aggregates, and the particle size gradually increased with the deepening of soil layer, while that of water-stable aggregates were the opposite. When compared the treatment of straw returning to the field with no returning to the field, the contents of <0.25 mm mechanical stability and water stability aggregates decreased by 3.53%~21.74% and 2.73%~8.95%, respectively. The average weight diameter *MWD* and geometric average diam-

eter *GMD* of soil mechanical stability aggregates increased by 16.29% and 30.12%, respectively, while that of water stability aggregates increased by 20.93% and 12.12%, respectively. The aggregate fragmentation rate *PAD* decreased by 2.53% ~ 13.23%. The effect of medium straw was the best, and the effect of corn straw was more significant than that of wheat straw. Straw returning increased soil organic carbon content, and the higher the amount of straw returning on the soil surface, the more significant the improvement effect on soil organic carbon became. Compared with CK, the soil organic carbon content in high amount of corn straw returning to the field was significantly increased by 31.37%. In the subsoil, the medium wheat straw returning and high corn straw returning significantly increased soil organic carbon content by 29.85% and 36.31%, respectively, when compared with CK. The results of correlation and multiple regression analysis showed that soil organic carbon had a significant positive correlation with the stability index of mechanically stable aggregates, and extremely significant positive correlation with the stability index of water-stable aggregates. However, there was an extremely significant negative correlation between aggregate fragmentation rate and soil organic carbon. The fitting equation of soil organic carbon and water-stable aggregate *GMD* was the most suitable to describe the relationship between soil organic carbon and the stability of soil aggregates. In conclusion, the optimum amount of corn straw returning was 7 000 kg · hm⁻² for effectively improving the structure of soil aggregates, soil carbon sequestration potential and soil quality.

Keywords: straw returning amount; soil aggregates; soil organic carbon; dryland wheat field

土壤团聚体是土壤结构组成的基本单元,也是土壤肥力的物质基础,其数量、大小与分布影响着土壤物理结构、养分物质循环和微生物活动等,是评价土壤质量的重要指标^[1]。土壤团聚体稳定性是土壤可持续利用和土壤生产力水平的主要影响因素^[2],其中团聚体的水稳定性与土壤的抗侵蚀能力密切相关,稳定的土壤团聚体能减少水土流失和土壤养分损失的风险,提升土壤的固碳、固氮能力^[3]。土壤有机碳是土壤的重要组成部分,不仅对土壤的理化性质具有调控作用,也决定着土壤肥力^[4]。土壤有机碳与团聚体之间联系紧密,一方面在团聚体的形成与稳定中,土壤有机碳作为重要的胶结物质,通过增强土粒间的团聚性来保证团粒结构的稳定性;另一方面土壤团聚体为有机碳的形成与转化提供载体,其对土壤有机碳的物理保护作用是碳固定和稳定的主要机制^[5-6]。

作物秸秆是农田生态系统中的可再生资源,而秸秆还田是秸秆资源利用的有效途径。有研究表明,秸秆还田在改良土壤物理性状、提高土壤养分含量和增加作物产量等方面作用显著^[7]。秸秆还田对增加土壤大团聚体数量和提升团聚体稳定性有积极的影响,主要是因为秸秆腐解通过增强土壤微生物活动和刺激土壤酶活性产生的效应^[8]。WANG等^[9]研究发现秸秆还田可以提升土壤有机碳含量,也有研究认为土壤有机碳储量的增加是有限度的,只有在土壤有机碳未达到饱和时才能有效提升其含量^[10]。秸秆还田后,自身的碳素经矿化和腐殖化过程成为了土壤有机碳,同时因秸秆碳的激

发效应加速了土壤原有有机碳的矿化,而秸秆作为外源添加物质,其数量和质量是影响有机碳激发效应的关键因素^[11]。刘晓舟^[12]研究认为小麦秸秆比玉米秸秆对土壤团聚体形成与稳定的影响更显著,可能与不同作物秸秆的生物利用度差异有关。韩新忠等^[13]研究表明在江淮平原地区 3 000 kg · hm⁻² 的小麦秸秆还田量处理作物增产显著、土壤养分和酶活性明显提高;而张静等^[14]和孟庆英等^[2]分别在黄土高原有灌溉条件的地区和辽宁省半干旱地区的研究结果显示,玉米秸秆还田量分别为 9 000 kg · hm⁻² 和 12 000 kg · hm⁻² 时对土壤肥力和作物产量的促进效果最好,可见由于土壤类型和气候条件等因素间的差异,导致适合不同区域的秸秆还田模式不一致。陇中黄土高原水土流失严重,生态环境脆弱,秸秆还田能促进农田生态系统的良性循环,有效缓解上述现象。有关该区不同耕作措施的影响研究众多^[15-16],但未能明确合理的还田秸秆类型和还田量。因此,为探究秸秆还田对陇中黄土高原旱作农田土壤团聚体稳定性和有机碳的影响,本研究对土壤团聚体稳定指数和有机碳及二者间关系进行测定与分析,为探寻适宜该区的秸秆类型和还田量提供有效参数,为秸秆高效利用、改善土壤质量和提升土壤生产力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇麻子川村。该区平均海拔

2 000 m, 年均大气温度 6.4℃, ≥ 0℃ 积温 2 933.5℃, ≥ 10℃ 积温 2 239.1℃, 无霜期 140 d, 多年平均降水量 390.9 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 干燥度 2.53, 80% 保证率的降水量 365 mm, 变异系数为 24.3%, 是典型的雨养农业区。土壤为典型的黄绵土, 土质绵软, 质地均匀, 土层深厚, 储水性能良好。试区土壤基本理化性质: pH 8.13, 有机碳 8.06 g · kg⁻¹, 全氮 0.88 g · kg⁻¹, 碱解氮 56.35 mg · kg⁻¹, 速效磷 24.71 mg · kg⁻¹, 速效钾 132.50 mg · kg⁻¹, 0~200 cm 平均土壤容重 1.17 g · cm⁻²。

1.2 试验设计

试验选用两种秸秆类型(小麦秸秆、玉米秸秆), 根据当地小麦和玉米的常规秸秆产量分别为 3 500 kg · hm⁻² 和 10 000 kg · hm⁻², 设置 4 个还田量水平, 分别为: 0、3 500 (低量)、7 000 (中量)、14 000 kg · hm⁻² (高量), 共 7 个处理(CK: 秸秆不还田; W1: 低量小麦秸秆还田; W2: 中量小麦秸秆还田; W4: 高量小麦秸秆还田; C1: 低量玉米秸秆还田; C2: 中量玉米秸秆还田; C4: 高量玉米秸秆还田), 各处理 3 次重复, 共计 21 个小区, 采用随机区组排列, 小区面积为 2 m × 3 m = 6 m²。试验种植作物为‘定西 40 号’春小麦, 自 2019 年开始, 于每年 3 月下旬播种, 8 月收获, 播种量 187.5 kg · hm⁻², 行距 20 cm。各处理播种前均施 N 105 kg · hm⁻² (尿素, 纯氮含量为 46%), P₂O₅ 45.9 kg · hm⁻² (过磷酸钙, P₂O₅ 含量为 14%)。小麦秸秆和玉米秸秆均为该试验区其他地块种植的当季作物产生, 分别于每年 8 月和 10 月对应小麦和玉米收获后, 采用人工搬运的方式转移秸秆, 用铡草机将其切割为 3~5 cm 长的小段, 按本试验处理所需均匀散布于还田小区内, 并利用旋耕机将其翻埋入土壤(三耕两耨, 耕深 18 ± 2 cm)。

1.3 样品采集与测定

2020 年 8 月作物收获后采用五点法分别采集各小区 0~10、10~20、20~30 cm 土层原状土样 1 000 g 左右, 装入硬质塑料保鲜盒带回实验室后, 除去植物根系、杂草、小石块等杂物, 沿土块自然裂隙剥成直径约为 1 cm 的土块后于通风干燥处风干, 分别取 500 g 用于土壤团聚体分析和土壤理化指标测定。

土壤机械稳定性(MS) 和水稳性团聚体(WS) 测定分别采用干筛法和湿筛法^[17]。将一定质量的风干土通过孔径依次为 5、2、1、0.25 mm 的套筛, 分别称重并计算出干筛的各级团聚体百分含量, 之后

按照其各粒级的比例配出 50 g 土样, 平铺于套筛上(套筛孔径自上而下依次为 2、1、0.25 mm), 用去离子水浸润 10 min 后, 手动上下振动套筛 20 次, 幅度为 3 cm。振动完毕后将套筛取出, 留在套筛上的各级团聚体用水洗入铝盒, 待沉降后弃去上清液, 在 55℃ 下烘干后称重, 得到湿筛的各级团聚体百分含量。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定。

1.4 计算方法

$$MWD(\text{平均重量直径}) = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$
$$GMD(\text{几何平均直径}) = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)$$

$PAD(\text{团聚体破碎率}) = (M_d - M_w) \times 100 / M_d$
式中, X_i 为第 i 粒级团聚体平均直径; W_i 为第 i 粒级团聚体质量百分比; M_d 和 M_w 分别为 >0.25 mm 粒级干筛和湿筛的团聚体质量百分数。

1.5 数据处理

文中数据、图表用 Microsoft Excel 2010 处理, SPSS 20.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对团聚体粒径分布的影响

2.1.1 机械稳定性团聚体分布 如图 1 所示, 各处理土壤均表现为以 <0.25 mm 粒级团聚体含量最高(在 26.75%~35.09% 范围), 其次是 >5 mm 粒级团聚体(在 16.99%~20.19% 范围), 1~2 mm 粒级团聚体含量最低(在 13.90%~17.87% 范围)。随着土层的加深, <0.25 mm 粒级团聚体含量降低, 其他粒级含量均增加。在 0~30 cm 土层, 相比于 CK, 各秸秆还田处理均不同程度降低了 <0.25 mm 粒级团聚体含量, 增加了 >5、2~5 和 1~2 mm 粒级团聚体含量, 而 0.25~1 mm 粒级团聚体含量变化不明显, 此趋势整体上均以 C2 处理的效果最显著, 在小麦秸秆还田处理中均以 W2 处理效果最显著。在 0~10、10~20、20~30 cm 土层, 相比于 CK, C2 处理的 <0.25 mm 粒级团聚体含量分别降低了 18.69%、19.77% 和 21.74%, W2 处理分别降低了 16.64%、16.62% 和 17.00%。

2.1.2 水稳性团聚体分布 如图 2 所示, 各处理土

壤均表现为以<0.25 mm 粒级团聚体含量最高(在 72.47%~83.03%范围),其次是 0.25~1 mm 粒级团聚体(在 6.05%~11.41%范围),≥2 mm 粒级团聚体含量最低(在 3.80%~8.01%范围)。随着土层的加深,<0.25 mm 粒级团聚体含量增加,其他粒级含量均降低。在 0~30 cm 土层,相比于 CK,各秸秆还田处理均不同程度降低了<0.25 mm 粒级团聚体含量,增加了>0.25 mm 各粒级团聚体含量,整体上均以 C2 处理的效果最显著,在小麦秸秆还田处理中均以 W2 处理效果最显著。在 0~10、10~20、20~30 cm 土层,相比于 CK,C2 处理的<0.25 mm 粒级团聚体含量分别降低了 8.95%、5.59%和 7.92%,W2 处理分别降低了 6.90%、4.58%和 7.56%。

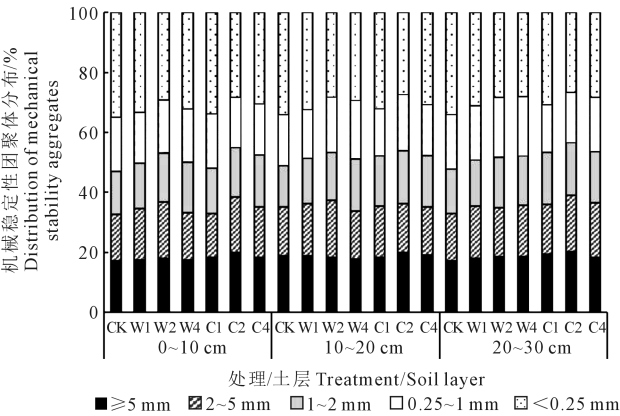


图 1 不同秸秆类型和还田量对土壤机械稳定性团聚体分布的影响

Fig.1 Effects of different straw types and returning amounts on the distribution of soil mechanical stability aggregates

2.2 秸秆还田对团聚体稳定性的影响

2.2.1 土壤团聚体平均重量直径 由图 3 可知,各处理土壤机械稳定性团聚体 *MWD* 值在 2.18~2.57 mm 范围,不同土层间差异不明显。在 0~30 cm 土层,相比于 CK,各秸秆还田处理均不同程度提高了 *MWD* 值,且均以 C2 处理的提升幅度最大,其次是 W2 处理。在 0~10 cm 和 20~30 cm 土层,C2 处理的 *MWD* 值较 CK 分别显著提高了 16.06% 和 16.29%,其他处理间差异不显著;在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,小麦秸秆还田处理中均以 W2 处理的 *MWD* 值最大,且较 CK 分别提高了 9.63% 和 6.11%。各处理土壤水稳性团聚体 *MWD* 值在 0.43~0.55 mm 范围,且随土层加深其 *MWD* 值逐渐降低。在 0~10 cm 土层,各处理 *MWD* 值以 C4 处理最大,C2 处理次

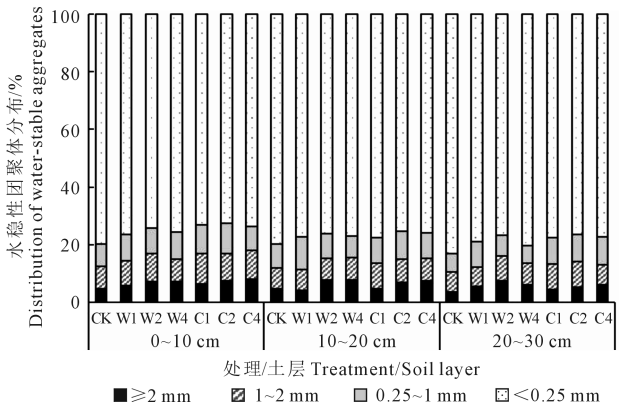
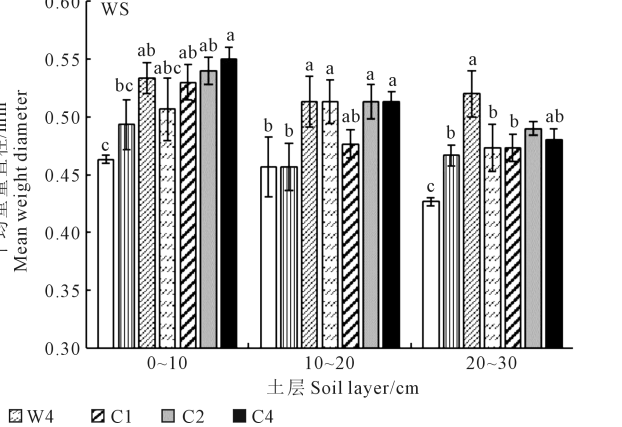
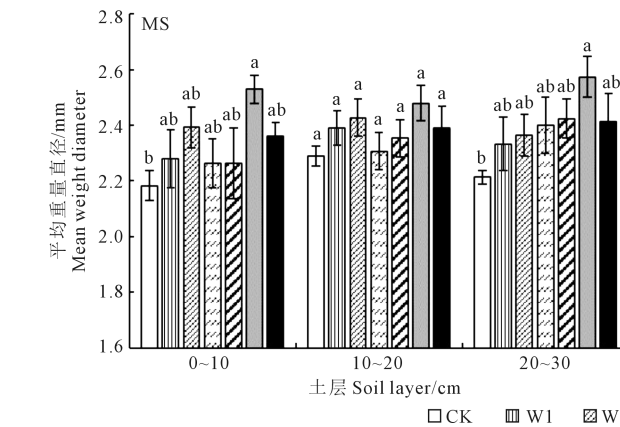


图 2 不同秸秆类型和还田量对土壤水稳性团聚体分布的影响

Fig.2 Effects of different straw types and returning amounts on the distribution of soil water-stable aggregates



注:同一土层不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note:Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant differences among treatments ($P<0.05$), the same as below.

图 3 不同秸秆类型和还田量对土壤机械稳定性和水稳性团聚体平均重量直径的影响

Fig.3 Effects of different straw types and returning amounts on the mean weight diameter of soil mechanical stability and water-stable aggregates

之,CK 最小;在 10~20 cm 土层,W2、W4、C2 和 C4 处理的 *MWD* 值均较 CK 显著提高了 10.87%;在 20~30 cm 土层,各秸秆还田处理 *MWD* 值均显著高于 CK,其中 W2 处理 *MWD* 值较 CK 显著提高了 20.93%。相比于 CK,整体上玉米秸秆还田比小麦秸秆还田处理对 *MWD* 值的提升幅度更大。

2.2.2 土壤团聚体几何平均直径 由图 4 可知,各处理土壤机械稳定性团聚体 *GMD* 值在 0.80~1.08 mm 范围,不同土层间差异不明显。在 0~30 cm 土层,相比于 CK,各秸秆还田处理均不同程度提高了 *GMD* 值。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,各处理 *GMD* 值均以 C2 处理最大,W2 处理次之,其中 C2 处理的 *GMD* 值较 CK 显著提高了 28.75% 和 20.00%;在 20~30 cm 土层,W4、C2 和 C4 处理的 *GMD* 值较 CK 分别显著提高了 18.07%、30.12% 和 19.28%。各处理土壤水稳性团聚体 *GMD* 值在 0.33~0.38 mm 范围,不同土层间差异不明显。在 0~30 cm 土层,C2 处理的 *GMD* 值均显著高于 CK,且

在各土层分别显著提高了 11.76%、8.82% 和 6.06%;在小麦秸秆还田处理中均以 W2 处理的 *GMD* 值最大,在 20~30 cm 土层,W2 处理的 *GMD* 值较 CK 显著提高了 12.12%。相比于 CK,整体上玉米秸秆还田比小麦秸秆还田处理对 *MWD* 值的提升幅度更大。

2.2.3 土壤团聚体破碎率 由图 5 可知,各处理土壤团聚体破碎率(*PAD*) 在 59.50%~74.37% 范围,且随土层加深 *PAD* 呈增加的趋势。在 0~30 cm 土层,相比于 CK,各秸秆还田处理均不同程度降低了土壤团聚体破碎率。在 0~10 cm 土层,C1 处理的土壤团聚体破碎率较 CK 显著降低了 13.23%,其他处理间差异不显著;在 10~20 cm 土层,各处理土壤团聚体破碎率以 C4 处理最小,C2 处理次之,在 20~30 cm 土层,各处理土壤团聚体破碎率以 W2 处理最小,C1 处理次之,且各处理间差异未达显著性水平。相比于 CK,整体上玉米秸秆还田比小麦秸秆还田处理对土壤团聚体破碎率的降低幅度更大。

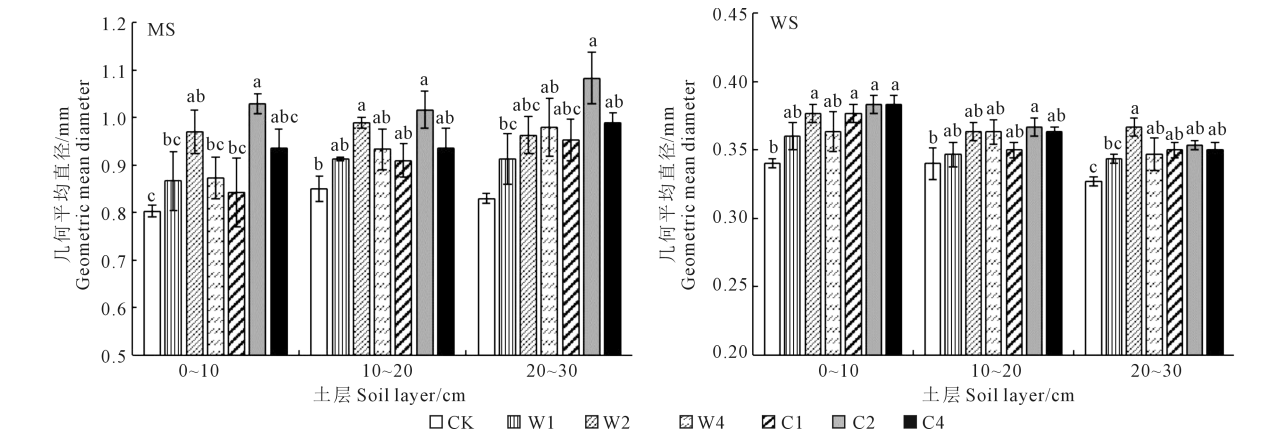


图 4 不同秸秆类型和还田量对土壤机械稳定性和水稳性团聚体几何平均直径的影响
Fig.4 Effects of different straw types and returning amounts on the geometric mean diameters of soil mechanical stability and water-stable aggregates

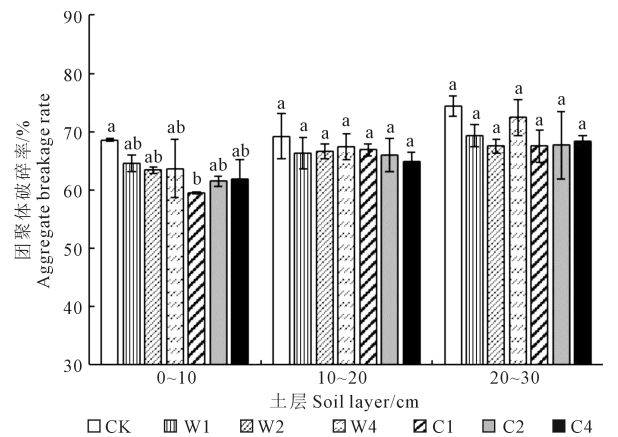


图 5 不同秸秆类型和还田量对土壤团聚体破碎率的影响
Fig.5 Effects of different straw types and returning amounts on soil aggregate fragmentation rate

2.3 秸秆还田对土壤有机碳的影响

由图 6 可知,各处理土壤有机碳含量随土层加深而降低。在 0~30 cm 土层,相比于 CK,各秸秆还田处理均显著提高了土壤有机碳含量,且均以 C4 处理最高,在各土层 C4 处理的土壤有机碳含量较 CK 分别显著提高了 31.37%、36.00% 和 36.31%。玉米秸秆还田处理中,在 0~30 cm 土层各处理土壤有机碳含量按其高低排序均为 C4>C2>C1;小麦秸秆还田处理中,在 0~10 cm 土层,各处理土壤有机碳含量以 W4 处理最高,较 CK 显著提高了 26.08%,在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层,各处理土壤有机碳含量均以 W2 处理最高,且较 CK 分别显著提高了

27.87%和 29.85%。相比于 CK,整体上玉米秸秆还田比小麦秸秆还田处理对土壤有机碳含量的提升幅度更大。

2.4 土壤有机碳与团聚体稳定性间的相关性与多元回归分析

如表 1 所示,在 0~20 cm 土层,土壤机械稳定性团聚体 *MWD* 和 *GMD* 与有机碳含量呈显著正相关关系,而在 20~30 cm 土层关系不显著;在 0~30 cm 土层,土壤水稳性团聚体 *MWD* 和 *GMD* 与有机碳含量呈极显著正相关,土壤团聚体破碎率 *PAD* 与有机碳含量呈极显著负相关。

由于土壤有机碳含量与水稳性团聚体稳定指数 *MWD* 和 *GMD* 关系达到显著水平,可对其进行多元回归分析。结果显示,土壤有机碳含量与平均重量直径 *MWD* 的拟合方程为 $y = -160.32x^2 + 179.98x - 40.349$, R^2 为 0.7257,土壤有机碳含量与几何平均直径 *GMD* 的拟合方程为 $y = -922.16x^2 + 706.81x - 125.35$, R^2 为 0.7495,此外,土壤有机碳含量与团聚

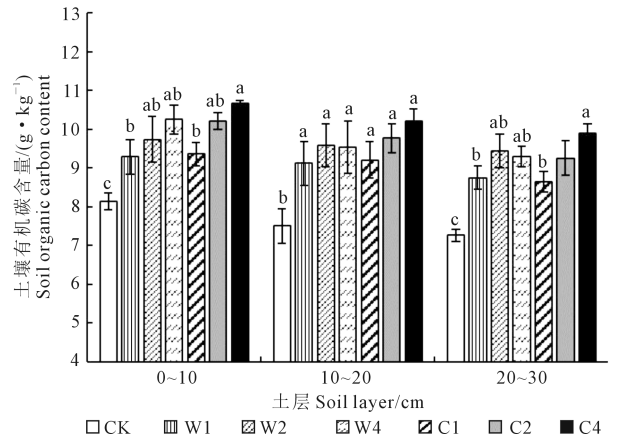


图 6 不同秸秆类型和还田量对土壤有机碳含量的影响
Fig.6 Effects of different straw types and returning amounts on soil organic carbon content

表 1 土壤有机碳与团聚体稳定性相关关系

Table 1 Relationship between soil organic carbon and aggregate stability indexes

指标 Indicator	土壤有机碳 Soil organic carbon		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
<i>MWD</i> _{MS}	0.484 *	0.477 *	0.378
<i>MWD</i> _{WS}	0.832 **	0.837 **	0.805 **
<i>GMD</i> _{MS}	0.544 *	0.510 *	0.423
<i>GMD</i> _{WS}	0.806 **	0.865 **	0.754 **
<i>PAD</i>	-0.555 **	-0.644 **	-0.587 **

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。
Note: ** indicates significant correlation at level of $P<0.01$; * indicates significant correlation at level of $P<0.05$.

体破碎率 *PAD* 的拟合方程为 $y = -0.0094x^2 + 1.0864x - 21.273$, R^2 为 0.5007。可见土壤有机碳含量与水稳性团聚体几何平均直径 *GMD* 的拟合关系更适合描述土壤有机碳含量与团聚体稳定性的关系。

3 讨论

随着土层的加深,水稳性团聚体粒径逐渐减小,大团聚体数量逐渐降低,而机械稳定性团聚体趋势与之相反,与田慎重等^[18]研究结果一致,这可能是耕作对土壤的扰动程度和土壤胶结物质分布差异造成的。本研究发现,各处理土壤机械稳定性团聚体以>0.25 mm 团聚体为主,水稳性团聚体以<0.25 mm 团聚体为主,武均等^[15]研究认为本研究区土壤易因湿筛分析时水分快速入渗而造成团聚体破裂和崩解,该作用常导致较大团聚体变为微团聚体(<0.25 mm)。关于添加秸秆对土壤团聚体的影响与多数研究结果^[19-20]一致,即秸秆还田能不同程度降低<0.25 mm 粒级团聚体,增加>0.25 mm 各粒级团聚体含量。秸秆进入土壤后,一方面直接被土壤中的细小颗粒附着在秸秆上形成大团聚体^[21];另一方面秸秆在分解过程中产生的腐殖酸可与土壤中的钙、镁结合,形成水稳性土壤团粒结构,同时产生形成团聚体所需的多种胶结物质,通过胶结和吸附作用使微团聚体向大团聚体转移,提高土壤团聚体团聚度,这是影响土壤团聚体含量和稳定性的内在因素^[22-23]。土壤团聚体稳定性可反映在外界环境变化的影响下,土壤团聚体维持其原有结构的能力。本研究发现,秸秆还田不同程度提升了土壤团聚体的 *MWD* 和 *GMD*,降低了团聚体破碎率 *PAD*,这与多数研究^[2,16]结果一致,这 3 种指标在表征土壤团聚体稳定性上具有一致性,*MWD* 和 *GMD* 值越大,团聚体破碎率越小,则团聚体越稳定。尤其在中秸秆还田量处理下对团聚体稳定性的提升效果显著,表明适宜的秸秆还田能提升土壤大团聚体的数量和质量,增加微团聚体的团聚能力;而高秸秆还田量不利于大团聚体的形成和稳定。在试验期间受当地环境条件限制,低量和中量秸秆施入土壤后腐解率较高,促进了小麦的生长发育和土壤结构的改良;而高量秸秆腐解不充分,未腐解的部分约占三分之二,这导致土壤环境变差,降低小麦出苗率的同时延迟了其生育时期。此外,玉米秸秆比小麦秸秆还田时对土壤团聚体改良效果更好,这可能与其

对微生物活性的影响最适有关。土壤团聚体稳定性与土壤中胶结物质的生物稳定性关系密切,微生物可以形成多种生物膜结构,使胶结物质保持更高的稳定性,从而提升团聚体的稳定性,而玉米秸秆中酚类物质含量偏高,更易于形成稳定的大团聚体^[24]。

土壤有机碳的变化是其输入和输出的相对关系决定的,即有机物质的矿化损失、腐殖化过程和团聚作用的累积、土壤物质迁移等构成的动态平衡^[25]。本研究发现,随着土层的加深土壤有机碳含量降低,这可能与耕层深度、作物根系和微生物的分布有关。秸秆还田相比不还田提升了土壤有机碳含量,且在表层土壤秸秆还田量越高,提升效果越显著,与张鹏等^[20]研究结果一致。原因是秸秆进入土壤后为微生物提供了丰富的碳、氮源,促进了微生物对有机物质的分解利用和重新形成腐殖质的过程,土壤有机碳的原有平衡被打破,秸秆和土壤物质产生新的有机碳,提升了土壤的固碳潜力^[26]。本试验秸秆在旋耕还田后集中在表层土壤,这部分土壤对环境变化更为敏感,其水热条件和通气性能更适宜秸秆的腐解,随着秸秆施入量的增加,还田效应越明显。在下层土壤,随着玉米秸秆还田量的增加有机碳含量在提高,而高量较中量小麦秸秆还田时有机碳含量不再提升,这可能是由于秸秆性质差异引起的,高量小麦秸秆还田使下层土壤空间温度上升,加剧了微生物活动,秸秆碳源的消耗速率加快,同时激发效应导致的土壤原有有机碳的矿化损失增加,抵消了部分秸秆碳积累量^[27]。此外,胡乃娟等^[28]研究发现,相比高量秸秆,中低量秸秆还田在提高土壤有机碳方面具有显著优势,可能是因为秸秆还田量过高会使土壤碳氮比失衡,没有足够的氮素供应时,微生物繁殖活动被抑制,导致秸秆腐解率降低。也有研究认为^[29],秸秆还田对土壤有机碳的增加作用主要体现在对难降解有机碳的贡献,秸秆的加入促进了土壤有机碳的稳定性,因此高量秸秆还田对土壤有机碳的提升并不能良好地体现在对作物的碳素供应上。本研究发现,玉米秸秆还田对土壤有机碳含量的提升效果好于小麦秸秆,原因可能是玉米秸秆的碳、氮素含量高于小麦秸秆,且碳氮比低于小麦秸秆,其易分解的水溶性物质和粗蛋白质含量高,难分解的纤维素和木质素含量低,短期内比小麦秸秆腐解更快、养分释放率更高^[27]。

相关性和多元回归分析结果表明,土壤有机碳与机械稳定性团聚体稳定指数显著正相关,与水稳性团聚体稳定指数呈极显著正相关关系,与张翰林等^[30]研究结果类似,进一步说明土壤团聚体与有机碳间相互促进和稳定的作用关系。土壤有机碳与PAD呈极显著负相关关系,但其方程的拟合度偏低,而土壤有机碳与水稳性团聚体GMD的拟合度最高,说明二者间的拟合关系更适合描述土壤有机碳与团聚体稳定性的关系。

4 结 论

陇中黄土高原旱作农田土壤机械稳定性团聚体以>0.25 mm 各级团聚体为主,且随土层加深其团聚体粒径逐渐增大,而水稳性团聚体均与之相反;秸秆还田可降低<0.25 mm 粒级团聚体含量,同时提升土壤团聚体稳定指数MWD和GMD,降低团聚体破碎率PAD,在中量秸秆还田时效果最好,且玉米秸秆比小麦秸秆效果更明显;秸秆还田提升了土壤有机碳含量,表层土壤随秸秆还田量的增加提升幅度越大。多元回归分析结果表明,土壤有机碳与水稳性团聚体GMD的拟合关系更适合描述土壤有机碳与团聚体稳定性的关系。综上,在玉米秸秆还田量7000 kg·hm⁻²时最适宜改良土壤团聚体结构和提升土壤固碳潜力。

参 考 文 献:

[1] 付鑫,王俊,刘全全,等.不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6): 1423-1430.
FU X, WANG J, LIU Q Q, et al. Soil aggregate and organic carbon contents with different surface mulching under dryland farming system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1423-1430.

[2] 孟庆英,邹洪涛,韩艳玉,等.秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2019,35(23): 119-125.
MENG Q Y, ZOU H T, HAN Y Y, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 119-125.

[3] PAUL B K, VANLAUWE B, AYUKE F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 14-22.

[4] 江晶,武均,张仁陟,等.碳氮添加对雨养农田土壤全氮、有机碳及其组分的影响[J].水土保持学报,2019,33(3): 215-220, 227.
JIANG J, WU J, ZHANG R Z, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on total nitrogen, organic carbon and their components in rain-fed farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation,

- 2019, 33(3): 215-220, 227.
- [5] 李柏桥,付玉,李光录,等.退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3): 238-244.
- LI B Q, FU Y, LI G L, et al. Effects of age and type of conversion from cropland to forest land and grassland on stability and organic carbon in soil aggregates[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 238-244.
- [6] ASSI A T, BLAKE J, MOHTAR R H, et al. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity[J]. *Irrigation Science*, 2019, 37(7): 511-522.
- [7] LI S H, GUO L J, CAO C G, et al. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(5): 5742-5754.
- [8] 刘威,张国英,张静,等.2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):117-122.
- LIU W, ZHANG G Y, ZHANG J, et al. Effects of two conservation tillage measures on soil aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 117-122.
- [9] WANG W, LAI D Y F, WANG C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 8-16.
- [10] POEPLAU C, KÄTTERER T, BOLINDER M A, et al. Low stabilization of aboveground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments[J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 246-255.
- [11] 陈春梅,谢祖彬,朱建国.土壤有机碳激发效应研究进展[J].土壤,2006,38(4):359-365.
- CHEN C M, XIE Z B, ZHU J G. Advances in research on priming effect of soil organic carbon[J]. *Soils*, 2006, 38(4): 359-365.
- [12] 刘晓舟.秸秆还田模式对农田土壤稳定性团聚体粒径组成的影响[J].东北农业科学,2021,46(4):34-37,104.
- LIU X Z. Effects of straw returning modes on particle size composition of stable soil aggregates in farmland[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2021, 46(4): 34-37, 104.
- [13] 韩新忠,朱利群,杨敏芳,等.不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2192-2199.
- HAN X Z, ZHU L Q, YANG M F, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [14] 张静,温晓霞,廖允成,等.不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3): 612-619.
- ZHANG J, WEN X X, LIAO Y C, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3): 612-619.
- [15] 武均,蔡立群,张仁陟,等.不同耕作措施对旱作农田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(3): 329-337.
- WU J, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Effect of tillage practices on soil water-stable aggregate stability in dry farmlands in the Loess Plateau, central Gansu province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 329-337.
- [16] 武均,蔡立群,罗迪,等.不同耕作措施对陇中黄土高原雨养农田土壤团聚体稳定性和C、N、P的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):234-239.
- WU J, CAI L Q, LUO D, et al. Effects of different tillage methods on the content of soc, tn, tp in soil aggregates of rain-fed field of the Loess Plateau in central of Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 234-239.
- [17] BARRETO R C, MADARI B E, MADDOCK J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 132(3/4): 243-251.
- [18] 田慎重,王瑜,李娜,等.耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J].生态学报,2013, 33(22):7116-7124.
- TIAN S Z, WANG Y, LI N, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the north China plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [19] 温美娟,杨思存,王成宝,等.深松和秸秆还田对灌耕灰钙土团聚体特征的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):78-85.
- WEN M J, YANG S C, WANG C B, et al. Effects of subsoiling and straw returning on soil aggregates of irrigated sierozem farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(2): 78-85.
- [20] 张鹏,李涵,贾志宽,等.秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(12): 2518-2525.
- ZHANG P, LI H, JIA Z K, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518-2525.
- [21] 王碧胜,于维水,武雪萍,等.添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].中国农业科学,2019,52(9): 1553-1563.
- WANG B S, YU W S, WU X P, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1553-1563.
- [22] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 253-263.
- [23] 薛斌,黄丽,鲁剑巍,等.连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):182-189.
- XUE B, HUANG L, LU J W, et al. Effects of continuous straw returning and no-tillage on soil aggregates and organic carbon[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 182-189.