

秸秆配施膨润土对旱作农田土壤有机碳及其活性组分的影响

张兰英, 米俊珍*, 刘景辉, 赵宝平, 崔雪梅, 胡可欣

(内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 为明确秸秆配施膨润土对旱作农田 0 ~ 40 cm 土层土壤有机碳 (SOC)、活性有机碳组分及其分配比例和碳库管理指数的影响, 于 2019—2021 年在内蒙古清水河县一间房试验基地连续 3 年进行田间定位试验。分别设置不施膨润土和秸秆 (CK)、单施秸秆 (T1)、单施膨润土 (T2) 和秸秆配施膨润土 (T3) 4 个处理。结果表明: 土壤 SOC 及活性碳组分在年际间表现为先降低后升高 [除颗粒有机碳 (POC) 含量] 的变化趋势, 不同土层间表现为 10 ~ 20 cm > 0 ~ 10 cm > 20 ~ 40 cm; 各处理均提高了 0 ~ 40 cm 土层土壤有机碳及其活性组分含量, 秸秆配施膨润土效果优于单施。与 CK 相比, 在 0 ~ 40 cm 土层, T3 处理土壤 SOC、可溶性有机碳 (DOC)、易氧化有机碳 (LOC) 和 POC 3 年平均提高了 7.16% ~ 9.63%、12.35% ~ 18.05%、15.55% ~ 41.97% 和 100.73% ~ 127.90%, 同时提高了不同土层 DOC/SOC、LOC/SOC 和 POC/SOC 以及土壤碳库管理指数; 土壤 SOC 及各组分之间均呈显著正相关关系, 以 LOC 相关系数最大, 表明 LOC 可较好地反映出 SOC 的变化情况。可见, 在旱作区采取秸秆配施膨润土措施能够显著提高土壤 SOC 及其活性组分含量以及碳库管理指数, 对土壤肥力提升、质量改善具有重要意义。

关键词: 秸秆还田; 膨润土; 土壤有机碳; 活性有机碳组分; 碳库管理指数; 旱作农田

黄土高原是我国最大的干旱半干旱区, 由于侵蚀和干旱的影响, 该地区土壤质量严重退化, 有机质含量仅在 1% 左右, 极少达到 1.5%^[1-2], 特别是目前生产中存在的重用地轻养地现象, 更是对土壤质量构成了严重威胁, 限制了旱作农业的发展, 如何有效提升旱作区土壤质量成为了亟待解决的问题。

土壤有机碳是反映土壤质量状况的核心指标, 但有机碳含量仅是矿化分解与合成的平衡产物, 难以体现有机碳的转化速率和质量变化^[3], 而活性有机碳, 包括可溶性有机碳 (DOC), 易氧化有机碳 (LOC) 和颗粒有机碳 (POC) 等作为有机碳的一部分, 其对土壤改良措施的响应较有机碳更为灵敏, 可用来指示土壤质量的变化^[4-6]。

秸秆还田作为重要的土壤改良措施之一, 可使土壤有机碳的数量和质量发生改变^[7-8]。许多研究表明, 秸秆还田可以提升土壤有机碳含量^[9]、增

加活性碳组分含量^[4, 10-11]及其在有机碳中的分配比例^[12]、提高碳库管理指数^[13], 也有研究表明, 秸秆还田促进土壤有机碳矿化, 对农田土壤有机碳固存起到负效应^[14], 而土壤有机碳的增加或者减少主要受还田数量、腐解率的影响, 加快秸秆的腐解速率被普遍认为是快速提高土壤有机碳的有效方式之一, 而在干旱半干旱地区土壤含水率较低, 秸秆腐解困难^[15]。膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的黏土矿物, 具有强吸附性、胀缩性、粘结性和较大的比表面积, 近年来已被用作土壤改良剂。本团队前期研究表明, 在旱作区施用膨润土可以有效调控土壤水分含量, 改善土壤保水蓄水能力^[16-18], 同时其对钝化土壤重金属^[19]和改良土壤结构^[20]也有积极作用。此外, 王润珑等^[19]在施用膨润土改良潮土重金属镉污染农田的研究中还发现, 施用膨润土提高了土壤有机碳含量, 本团队前期研究也发现在旱作农田和沙地施用膨润土同样能够显著提高土壤有机碳含量^[21-22], 但目前膨润土对于有机碳影响的相关研究还较少, 且以上研究均局限于膨润土单施对土壤有机碳的影响, 不足以全面反映有机碳在土壤中的转化和积累。另外, 关于秸秆与膨润土配施条件下旱作农田土壤有机碳及其组分如何变化值得深入探讨。同时对于不同的土壤类型, 由

收稿日期: 2022-06-21; 录用日期: 2022-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32160523); 内蒙古自然科学基金项目 (2020BS03005); 内蒙古农业大学人才启动项目 (NDYB2018-29); 2020 年研究生科研创新资助项目 (DC2000002123)。

作者简介: 张兰英 (1994-) 博士研究生, 主要从事农牧交错区农作制与农业生态研究。E-mail: 1477995692@qq.com。

通讯作者: 米俊珍, E-mail: mijunling1206@126.com。

于受土壤特性、区域气候条件等诸多因素的影响,土壤有机碳的转化和积累对农田管理措施的响应也存在差异,因此,针对特定土壤类型施用膨润土与秸秆土壤有机碳如何变化也值得系统性探究。

本研究针对黄土高原旱作区农业生产境况,以秸秆、膨润土单施的局限性为切入点,拟将其配施,系统分析其对旱作燕麦农田土壤有机碳、活性有机碳组分及其分配比例和碳库管理指数时空变化特征的影响,以期为黄土高原旱作区农田土壤培肥及土壤碳库管理提供理论依据与技术支持。同时,将玉米秸秆半量还田到燕麦地,既解决了玉米秸秆焚烧污染的问题,同时可为黄土高原旱作区玉米与燕麦的轮作、间作提供技术支持,对缓解连作障碍具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2019—2021年在内蒙古呼和浩特市清水河县宏河镇一间房村一新垦农田(39°57'N, 111°39'E)进行,该地区是典型的黄土高原旱作丘陵地区,平均海拔为1374 m,年平均气温为7.1℃,≥10℃积温为2370℃,无霜期为140 d,年均降水量为365 mm,年蒸发量为2577 mm,降雨主要集中在7—9月,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候,土壤类型为黄绵土。试验地0~20 cm土层土壤基础性状见表1,试验期间降水量和气温变化见图1。

表1 试验地土壤基本理化性质

有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
6.07	0.43	42.2	7.2	106.5	7.62

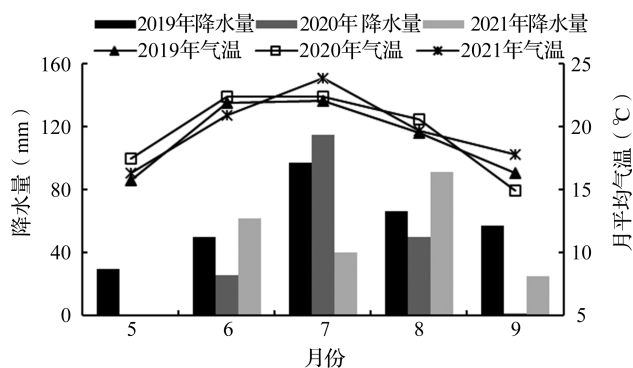


图1 试验期间降水量和气温变化

1.2 试验设计

试验设置4个处理,分别为不施膨润土和秸秆(CK)、单施秸秆(T1)、单施膨润土(T2)、秸秆配施膨润土(T3)。采用随机区组设计,重复3次,共12个小区(长×宽=15 m×8 m)。其中秸秆还田量为6000 kg/hm²,根据本课题组多年相关研究确定膨润土施用量为18000 kg/hm²。燕麦播种前一次性基施氮(N)、磷(P₂O₅)量分别为109.5和103.5 kg/hm²。秋季将粉碎的玉米秸秆、膨润土翻耕至地表下20~30 cm,膨润土只在2018年秋季施用1次,秸秆每年秋季还田。玉米秸秆由清水河县农业局提供,粉碎长度<5 cm。膨润土由内蒙古三岩实业有限公司提供,主要化学组分为Tl₂O₂、Al₂O₃、CaO、K₂O、MgO、Na₂O、Fe₂O₃和有机碳,其含量分别为73.2%、11.4%、2.67%、2.58%、1.05%、0.31%、0.29%和0.40%,粒径为75 μm。燕麦(坝莪1号)播种量为150 kg/hm²,行距为25 cm,播种深度为3~5 cm,于每年6月1日播种,9月15日收获,其他田间管理措施同当地一致。

1.3 测定指标与方法

于2019—2021年燕麦收获后进行取样,每个小区选取5点,按“S”形五点取样法用土钻钻取0~10、10~20、20~40 cm土层土样,将同一土层的5点土样均匀混合后,去除石砾和植物根系,带回实验室。取一部分过2 mm筛,保存在4℃冰箱内用于测定可溶性有机碳含量;另一部分自然风干后磨碎过2 mm筛,用于土壤有机碳组分测定。

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化法^[23]测定;土壤DOC含量采用去离子水提取法(水土比为5:1)^[24]测定;土壤POC含量采用六偏磷酸钠分散法^[25]测定;土壤LOC含量采用高锰酸钾氧化法^[26]测定,稳态碳即为土壤有机碳与易氧化有机碳的差值。

碳库管理指数:本试验以CK作为参考土壤,参照Blair等^[26]的方法进行计算:

土壤碳库管理指数(CPMI)=CPI×AI×100%

碳库指数(CPI)=样品土壤有机碳含量(g/kg)/参考土壤有机碳含量(g/kg)

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度

碳库活度(A)=土壤易氧化有机碳含量(g/kg)/土壤稳态碳含量(g/kg)

1.4 数据处理分析

采用 Excel 2019 处理数据并制图, 采用 SAS 9.4 进行单因素方差分析, 用 SPSS 26.0 进行双因素方差分析, 用 LSD 法进行多重比较 ($P<0.05$) 和 Pearson 双侧检验法相关性分析。

2 结果与分析

2.1 处理、土层、年份及其交互作用对土壤有机碳及其活性组分的影响

由表 2 可知, 处理和年份对 SOC、DOC、LOC 和 POC 有显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 的影响。此外, 土层还对 DOC 有显著 ($P<0.05$) 影响。而处理、土层以及年份之间的交互作用对 SOC、DOC、LOC 和 POC 的影响均不显著 ($P>0.05$)。

表 2 处理、土层、年份及其交互作用对土壤有机碳及其活性组分的影响

影响因子	自由度	有机碳	可溶性有机碳	易氧化有机碳	颗粒有机碳
处理	3	11.37***	6.36**	3.63*	10.42***
土层	2	3.14 ^{NS}	3.89*	1.60 ^{NS}	3.00 ^{NS}
年份	2	6.05**	7.90**	20.56***	4.60*
处理 × 土层	6	0.108 ^{NS}	0.335 ^{NS}	0.998 ^{NS}	0.978 ^{NS}
处理 × 年份	6	0.203 ^{NS}	0.378 ^{NS}	1.881 ^{NS}	1.795 ^{NS}
年份 × 土层	4	0.174 ^{NS}	0.232 ^{NS}	0.275 ^{NS}	0.051 ^{NS}

注: *、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著, NS 表示差异不显著; 表中的数值为 F 检验值。

2.2 秸秆配施膨润土对土壤有机碳含量的影响

图 2 为 3 年不同处理下 3 个土层 SOC 含量的变化情况。从 3 年 0 ~ 40 cm 土层平均 SOC 含量的变化看, 各处理均显著高于 CK ($P<0.05$), 增加幅度为 4.06% ~ 8.70%, 其中 T2 处理增幅最小、T3 处理增幅最大; T1 和 T2 处理差异不显著。年际间 SOC 含量存在显著性差异 ($P<0.05$) (表 2), 随年限增加, 各处理 SOC 含量先降低后升高, 2020 年显著低于 2019 和 2021 年。这可能是因为 2020 年 (降水量 191.5 mm) 较 2019 年 (降水量 245.68 mm) 和 2021 年 (降水量 211.7 mm) 生育期降水量较少且分布不均所致 (图 1), 干旱改变了微生物群落多样性, 抑制了微生物活性及养分释放, 使有机碳含量降低。随土层加深, 各处理 SOC 含量呈先升高后降低的趋势, 但差异不显著 (表 2)。对于不同土层而言, 0 ~ 10 cm 土层, 在 2019 和 2021 年 T1、T2 和 T3 处理较 CK 显著增加了 2.86% ~ 7.95% ($P<0.05$); 10 ~ 20 cm 土层, 连续 3 年 T1、T2 和 T3 处理较 CK 显著增加了 3.99% ~ 12.57% (除 2020 年 T2 与 CK 差异不显著外) ($P<0.05$); 20 ~ 40 cm 土层, 连续 3 年 T3 处理较 CK 显著增加了 6.07% ~ 9.97% ($P<0.05$), T1 和 T2 处理仅在 2020 年显著高于 CK ($P<0.05$), 增幅为 7.17%。不同土层均以 T2 处理增幅最小、T3 处理增幅最大。

经过连续 3 年的试验, 0 ~ 10 cm 土层, CK、T1、T2 和 T3 处理 SOC 含量较 2019 年增加了 0.02 ~ 0.07 g/kg; 10 ~ 20 cm 土层增加了 0.07 ~ 0.20 g/kg; 20 ~ 40 cm 土层增加了 0.02 ~ 0.10 g/kg, 不同土层均以 CK 处理增量最小、T3 处理增量最大。以上说明, 秸秆与膨润土配施更有利于土壤有机碳的提升。

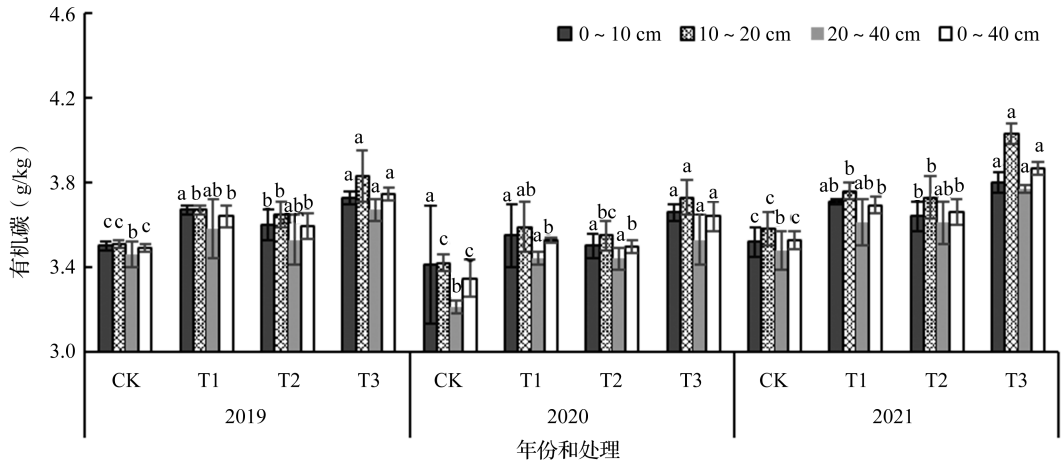
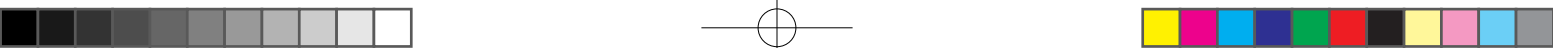


图 2 不同处理下不同土层有机碳含量

注: 不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。下同。



2.3 秸秆配施膨润土对土壤活性碳组分及其分配比例的影响

2.3.1 秸秆配施膨润土对土壤可溶性有机碳含量及其分配比例的影响

DOC 与 SOC 吸附—解吸、微生物活动等过程密切相关^[27]。从 3 年 0 ~ 40 cm 土层平均 DOC 含量的变化看, T1 和 T3 处理显著高于 CK ($P<0.05$), 增幅分别为 10.65% 和 15.36%。年际间 DOC 含量存在显著性差异 ($P<0.05$) (表 3), 随年限增加, DOC 含量先降低后升高, 在 2021 年显著高于前两年。土层间 DOC 含量同样差异显著 ($P<0.05$) (表 2), 其中 10 ~ 20 与 0 ~ 10 cm 土层差异不显著, 显著高于 20 ~ 40 cm 土层, 也就是说, DOC 主要富集在 0 ~ 20 cm 土层中。在 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层, 连续 3 年 T3 处理 DOC 含量较 CK 显著增加了 55.79% ~ 22.36%; 10 ~ 20 cm 土层, 连续 3 年 T1 处理较 CK 显著增加了 8.94% ~

21.2%, 在其他土层 T1 与 CK 处理差异均未达到显著水平。不同土层均以 T3 处理增幅最大, 整体上, T2 处理与 CK 差异不显著。

DOC/SOC 变化范围在 1.91% ~ 2.50%, 0 ~ 40 cm 土层平均 DOC/SOC 在不同年份处理间存在差异, 2019 年不同处理表现为 T3>T1>T2>CK, T3 显著高于 CK; 2020 年不同处理表现为 T3>T1>CK>T2, T3 显著高于 CK ($P<0.05$), T2 较 CK 显著减小; 2021 年不同处理表现为 T1>T3>CK>T2, T1 显著高于 CK ($P<0.05$)。2019—2021 年 T1 和 T3 处理 DOC/SOC 值均表现为增加, 说明秸秆还田和配施处理能提高土壤 SOC 中 DOC 的分配比例, 为土壤微生物提供更多物质和能量, 从而增加土壤中的有机碳源, T2 处理 DOC/SOC 在 2020 和 2021 年减小, 说明施用膨润土对 DOC 的吸附固定能力更强, 不利于土壤有机碳的矿化分解, 但提高了土壤有机碳的稳定性, 有利于碳的固定和积累。

表 3 不同处理下不同土层可溶性有机碳含量及其分配比例

指标	年份	处理	土层深度			
			0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	平均
可溶性有机碳 (mg/kg)	2019	CK	71.76 ± 4.87b	72.15 ± 1.35c	66.33 ± 3.19b	70.08 ± 1.32c
		T1	77.17 ± 5.24ab	82.21 ± 5.77ab	70.80 ± 6.18ab	76.73 ± 2.62b
		T2	74.10 ± 3.25ab	75.68 ± 2.98bc	69.15 ± 1.00b	72.97 ± 2.23c
		T3	81.38 ± 0.59a	85.83 ± 5.22a	77.36 ± 3.08a	81.52 ± 0.94a
	2020	CK	68.11 ± 1.13b	70.50 ± 2.00c	66.33 ± 3.19b	68.31 ± 0.23c
		T1	72.48 ± 6.02ab	76.80 ± 2.68ab	69.66 ± 5.75ab	72.98 ± 1.10b
		T2	68.21 ± 2.91b	72.06 ± 1.71bc	66.55 ± 1.65b	68.94 ± 1.28c
		T3	75.52 ± 0.52a	79.63 ± 4.04a	75.92 ± 1.98a	77.02 ± 0.77a
	2021	CK	73.04 ± 4.52b	77.49 ± 7.90b	74.72 ± 2.08b	75.08 ± 1.68b
		T1	89.07 ± 7.53a	93.92 ± 1.23a	76.56 ± 1.70ab	86.51 ± 3.30a
		T2	77.87 ± 9.33ab	78.47 ± 11.50b	75.44 ± 2.12b	77.26 ± 5.40b
		T3	89.37 ± 3.02a	94.72 ± 2.53a	79.05 ± 1.65a	87.71 ± 2.24a
可溶性有机碳 / 有机碳	2019	CK	2.05 ± 0.13a	2.06 ± 0.03b	1.91 ± 0.06a	2.01 ± 0.04b
		T1	2.10 ± 0.13a	2.24 ± 0.16a	1.98 ± 0.20a	2.11 ± 0.10ab
		T2	2.06 ± 0.05a	2.07 ± 0.05b	1.96 ± 0.08a	2.03 ± 0.04b
		T3	2.18 ± 0.03a	2.24 ± 0.06a	2.11 ± 0.09a	2.18 ± 0.02a
	2020	CK	2.00 ± 0.14a	2.06 ± 0.08ab	2.07 ± 0.09a	2.04 ± 0.06b
		T1	2.05 ± 0.26a	2.14 ± 0.02a	2.02 ± 0.17a	2.07 ± 0.03ab
		T2	1.95 ± 0.05a	2.03 ± 0.01b	1.94 ± 0.06a	1.97 ± 0.02c
		T3	2.06 ± 0.01a	2.13 ± 0.06a	2.15 ± 0.13a	2.12 ± 0.03a
	2021	CK	2.08 ± 0.16a	2.16 ± 0.19b	2.15 ± 0.04a	2.13 ± 0.03b
		T1	2.40 ± 0.20a	2.50 ± 0.06a	2.12 ± 0.09a	2.34 ± 0.10a
		T2	2.14 ± 0.28a	2.10 ± 0.27b	2.09 ± 0.09a	2.11 ± 0.12b
		T3	2.35 ± 0.07a	2.35 ± 0.04ab	2.10 ± 0.05a	2.27 ± 0.05ab

注: 表中数据后小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.3.2 秸秆配施膨润土对土壤易氧化有机碳含量及其分配比例的影响

如表 4 所示, 从 3 年 0 ~ 40 cm 土层平均 LOC 含量的变化看, T1 和 T3 处理显著高于 CK ($P<0.05$), 增幅分别为 27.96% 和 38.71%。年际间 LOC 含量存在显著性差异 (表 2), 随年限增加, 各处理 LOC 含量先降低后升高, 2020 年显著低于 2019 和 2021 年。随土层加深, 各处理呈先升高后降低趋势。在 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层, 连续 3 年 T3 处理较 CK 显著增加了 25.00% ~ 64.86% ($P<0.05$), 在

2019 和 2021 年 T1 处理较 CK 显著增加了 16.88% ~ 50.00% ($P<0.05$), T2 处理仅在 2019 年 0 ~ 10 cm 土层与 CK 差异显著 ($P<0.05$), 增幅为 17.39%, 不同土层均以 T3 处理增幅最大。

LOC/SOC 变化范围在 0.21% ~ 0.47%, 分析 0 ~ 40 cm 土层平均 LOC/SOC, 不同年份不同处理均表现为 T3>T1>T2>CK, 各处理均提高了 LOC/SOC, T3 处理显著高于 CK ($P<0.05$), T2 处理与 CK 差异不显著。可见, T3 处理对 0 ~ 40 cm 土层平均 LOC 含量提升作用最强。

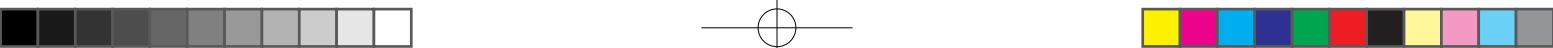
表 4 不同处理下不同土层易氧化有机碳含量及其分配比例

指标	年份	处理	土层深度			
			0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	平均
易氧化有机碳 (g/kg)	2019	CK	0.92 ± 0.01b	1.03 ± 0.08c	0.89 ± 0.08c	0.96 ± 0.07c
		T1	1.12 ± 0.04a	1.23 ± 0.07ab	1.06 ± 0.07ab	1.15 ± 0.05ab
		T2	1.08 ± 0.07a	1.11 ± 0.08bc	0.97 ± 0.10bc	1.04 ± 0.05bc
		T3	1.15 ± 0.05a	1.37 ± 0.14a	1.12 ± 0.06a	1.25 ± 0.10a
	2020	CK	0.77 ± 0.06b	0.82 ± 0.02b	0.68 ± 0.07b	0.76 ± 0.02c
		T1	0.90 ± 0.01ab	0.96 ± 0.13ab	0.81 ± 0.08ab	0.89 ± 0.07ab
		T2	0.85 ± 0.05ab	0.85 ± 0.09b	0.80 ± 0.12ab	0.84 ± 0.06bc
		T3	1.04 ± 0.22a	1.05 ± 0.04a	0.90 ± 0.02a	1.00 ± 0.08a
	2021	CK	1.06 ± 0.06b	1.11 ± 0.11b	1.05 ± 0.04c	1.07 ± 0.05c
		T1	1.59 ± 0.04a	1.76 ± 0.13a	1.27 ± 0.08b	1.54 ± 0.03a
		T2	1.18 ± 0.13b	1.35 ± 0.07b	1.11 ± 0.07c	1.22 ± 0.07b
		T3	1.64 ± 0.05a	1.83 ± 0.27a	1.43 ± 0.12a	1.63 ± 0.12a
易氧化有机碳 / 有机碳	2019	CK	0.26 ± 0.00b	0.29 ± 0.02b	0.26 ± 0.03b	0.27 ± 0.01c
		T1	0.31 ± 0.01a	0.34 ± 0.02ab	0.30 ± 0.02ab	0.31 ± 0.01ab
		T2	0.30 ± 0.02a	0.30 ± 0.02b	0.27 ± 0.03ab	0.29 ± 0.01bc
		T3	0.31 ± 0.01a	0.36 ± 0.03a	0.31 ± 0.02a	0.32 ± 0.01a
	2020	CK	0.23 ± 0.02a	0.24 ± 0.01a	0.21 ± 0.02a	0.23 ± 0.00b
		T1	0.25 ± 0.01a	0.27 ± 0.04a	0.24 ± 0.02a	0.25 ± 0.02ab
		T2	0.24 ± 0.01a	0.24 ± 0.03a	0.23 ± 0.03a	0.24 ± 0.02b
		T3	0.28 ± 0.06a	0.28 ± 0.02a	0.26 ± 0.01a	0.27 ± 0.02a
	2021	CK	0.30 ± 0.02b	0.31 ± 0.04b	0.30 ± 0.01b	0.30 ± 0.02b
		T1	0.43 ± 0.01a	0.47 ± 0.03a	0.35 ± 0.03a	0.42 ± 0.01a
		T2	0.32 ± 0.04b	0.36 ± 0.02b	0.31 ± 0.02b	0.33 ± 0.02b
		T3	0.43 ± 0.02a	0.45 ± 0.07a	0.38 ± 0.03a	0.42 ± 0.03a

2.3.3 秸秆配施膨润土对土壤颗粒有机碳含量及其分配比例的影响

土壤 POC 是由未完全分解的动植物和根系残体组成的^[28]。如表 5 所示, 从 3 年 0 ~ 40 cm 土层平均 POC 含量的变化看, T1 和 T3 处理显著高于 CK ($P<0.05$), 增幅分别为 60.47% 和 98.84%。年际间 POC 含量存在显著性差异 (表 2), 随年限增加, T1 和 T3 处理的 POC 含量逐年增加, CK 和 T2

处理先降低后升高。随土层加深, 各处理呈先升高后降低的趋势。对于不同土层而言, 在 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层, 连续 3 年 T1 和 T3 处理较 CK 显著增加了 20.00% ~ 229.09% ($P<0.05$); 20 ~ 40 cm 土层, 连续 3 年 T3 处理较 CK 显著增加了 64.79% ~ 196.00% ($P<0.05$), T1 处理仅在 2020 年显著高于 CK ($P<0.05$), 增幅为 130.00%。整体上, T2 处理与 CK 无显著性差异。不同土层均以 T3 处理增



幅最大,且不同土层各处理均在2020年与CK差异最大,增长率最高,这可能是因为干旱缺水导致土壤中养分的有效性下降,植物为获取养分促进根系生长,而根系SOC是土壤POC的主要来源之一^[29-30]。

POC/SOC变化范围在0.15%~0.61%,0~40

cm土层平均POC/SOC,不同年份不同处理均表现为T3>T1>T2>CK,各处理均提高了POC/SOC,整体看,T3和T1之间差异不显著,但显著高于CK,T2与CK差异不显著。可见,T3处理对0~40cm土层POC含量提升作用最强。

表5 不同处理下不同土层颗粒有机碳含量及其分配比例

指标	年份	处理	土层深度 (cm)			
			0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	平均
颗粒有机碳 (g/kg)	2019	CK	0.76 ± 0.16c	1.15 ± 0.17c	0.71 ± 0.05b	0.88 ± 0.10c
		T1	1.00 ± 0.14b	1.38 ± 0.05ab	0.88 ± 0.27ab	1.09 ± 0.12b
		T2	0.79 ± 0.05bc	1.24 ± 0.03bc	0.78 ± 0.09b	0.94 ± 0.02c
		T3	1.27 ± 0.08a	1.42 ± 0.03a	1.17 ± 0.09a	1.29 ± 0.03a
	2020	CK	0.55 ± 0.21c	0.78 ± 0.04c	0.50 ± 0.23c	0.61 ± 0.00c
		T1	1.16 ± 0.30b	1.57 ± 0.20b	1.15 ± 0.04b	1.29 ± 0.03b
		T2	0.75 ± 0.01c	0.81 ± 0.27c	0.66 ± 0.06c	0.74 ± 0.11c
		T3	1.81 ± 0.11a	2.26 ± 0.10a	1.48 ± 0.20a	1.85 ± 0.12a
	2021	CK	1.04 ± 0.29c	1.27 ± 0.08c	0.96 ± 0.24b	1.09 ± 0.19b
		T1	1.84 ± 0.15ab	2.15 ± 0.22b	1.31 ± 0.26ab	1.77 ± 0.05a
		T2	1.34 ± 0.40bc	1.44 ± 0.06c	1.24 ± 0.22ab	1.34 ± 0.19b
		T3	1.95 ± 0.36a	2.40 ± 0.08a	1.66 ± 0.46a	2.00 ± 0.25a
颗粒有机碳 / 有机碳	2019	CK	0.22 ± 0.05b	0.33 ± 0.05a	0.21 ± 0.02b	0.25 ± 0.03c
		T1	0.27 ± 0.04b	0.38 ± 0.01a	0.25 ± 0.07ab	0.30 ± 0.03b
		T2	0.22 ± 0.01b	0.34 ± 0.01a	0.22 ± 0.03b	0.26 ± 0.01bc
		T3	0.34 ± 0.02a	0.37 ± 0.01a	0.32 ± 0.03a	0.34 ± 0.01a
	2020	CK	0.16 ± 0.06c	0.23 ± 0.01c	0.15 ± 0.07c	0.18 ± 0.00c
		T1	0.33 ± 0.10b	0.44 ± 0.07b	0.33 ± 0.01b	0.37 ± 0.01b
		T2	0.21 ± 0.00c	0.23 ± 0.08c	0.19 ± 0.02c	0.21 ± 0.03c
		T3	0.49 ± 0.03a	0.61 ± 0.03a	0.42 ± 0.05a	0.51 ± 0.03a
	2021	CK	0.30 ± 0.09b	0.36 ± 0.03b	0.28 ± 0.06a	0.31 ± 0.06b
		T1	0.50 ± 0.04a	0.57 ± 0.05a	0.36 ± 0.08a	0.48 ± 0.02a
		T2	0.37 ± 0.11ab	0.39 ± 0.02b	0.34 ± 0.06a	0.37 ± 0.05b
		T3	0.51 ± 0.09a	0.60 ± 0.01a	0.44 ± 0.12a	0.52 ± 0.06a

2.4 秸秆配施膨润土对土壤碳库管理指数的影响

CPMI用于表征不同农业措施下土壤碳库状况,其值越高说明农业措施对土壤培肥作用越好^[31]。由表6可知,各处理对A和AI的影响则具有相似性。从0~40cm土层平均A和AI值可以看出,3年里T1和T3处理之间差异不显著,显著高于CK处理(除2020年T1与CK差异不显著外)($P<0.05$),A和AI的增幅分别为5.26%~68.18%和23.00%~70.00%,T2处理与CK无显著性差异(除2021年AI值外),说明施用膨润土有利于提高非活性有机碳含量,维持碳库稳定性。而0~40cm土层平均CPI表现为,连续3年均以T3处理最高,较CK显著

提高8.00%~10.00% ($P<0.05$),T1和T2处理在2019年与CK差异不显著,在2020和2021年较CK显著提高4.00%~6.00% ($P<0.05$)。对于CPMI,3年里0~40cm土层CPMI值均以T3处理最高,且与CK差异显著($P<0.05$),T2处理与CK差异不显著(除2019年0~10cm土层外)。从0~40cm土层平均CPMI的变化看,连续3年T1和T3处理均显著高于CK ($P<0.05$),增幅为22.48%~84.79%,T2处理仅在2021年较CK显著提高19.30%。综上所述,单施秸秆和秸秆配施膨润土模式具有培肥能力,能够显著提高土壤肥力,且以秸秆配施膨润土培肥作用最好,而单施膨润土则主要是增加了稳态碳含量,促进了碳库积累。

表 6 不同处理下不同土层的土壤碳库管理指数

年份	土层深度 (cm)	处理	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数
2019	0 ~ 10	CK	0.36 ± 0.00b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00b
		T1	0.44 ± 0.02a	1.24 ± 0.05a	1.05 ± 0.01a	129.56 ± 5.05a
		T2	0.43 ± 0.04a	1.21 ± 0.12a	1.03 ± 0.02b	124.48 ± 12.61a
		T3	0.45 ± 0.02a	1.25 ± 0.08a	1.07 ± 0.01a	133.41 ± 9.04a
		CK	0.29 ± 0.04a	1.00 ± 0.00a	1.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00b
		T1	0.34 ± 0.02a	1.17 ± 0.16a	1.04 ± 0.05a	121.63 ± 13.43ab
		T2	0.32 ± 0.02a	1.10 ± 0.09a	1.03 ± 0.06a	112.33 ± 3.33ab
		T3	0.40 ± 0.12a	1.41 ± 0.57a	1.08 ± 0.08a	148.55 ± 49.12a
		CK	0.43 ± 0.04b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00b
		T1	0.75 ± 0.03a	1.75 ± 0.11a	1.05 ± 0.02ab	183.98 ± 11.49a
		T2	0.48 ± 0.09b	1.13 ± 0.19b	1.03 ± 0.02bc	116.30 ± 17.48b
		T3	0.76 ± 0.05a	1.77 ± 0.22a	1.08 ± 0.04a	190.88 ± 17.47a
2020	10 ~ 20	CK	0.42 ± 0.05b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00b
		T1	0.51 ± 0.04ab	1.22 ± 0.20ab	1.05 ± 0.01b	128.08 ± 20.5ab
		T2	0.44 ± 0.03b	1.05 ± 0.17b	1.04 ± 0.02b	109.81 ± 19.82b
		T3	0.56 ± 0.07a	1.34 ± 0.11a	1.09 ± 0.04a	146.00 ± 10.32a
		CK	0.32 ± 0.01a	1.00 ± 0.00a	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00c
		T1	0.37 ± 0.08a	1.17 ± 0.24a	1.05 ± 0.04b	122.55 ± 20.46ab
		T2	0.32 ± 0.04a	1.00 ± 0.11a	1.04 ± 0.01b	104.02 ± 10.42bc
		T3	0.39 ± 0.03a	1.24 ± 0.07a	1.09 ± 0.01a	135.22 ± 5.81a
		CK	0.45 ± 0.08b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00b
		T1	0.88 ± 0.11a	1.96 ± 0.11a	1.05 ± 0.03b	205.48 ± 5.57a
		T2	0.57 ± 0.04b	1.32 ± 0.27b	1.04 ± 0.02bc	134.15 ± 27.99b
		T3	0.85 ± 0.23a	1.85 ± 0.17a	1.13 ± 0.04a	209.20 ± 23.95a
2021	20 ~ 40	CK	0.35 ± 0.05b	1.00 ± 0.00a	1.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00b
		T1	0.42 ± 0.03ab	1.23 ± 0.22a	1.03 ± 0.06a	127.09 ± 18.81a
		T2	0.38 ± 0.05ab	1.11 ± 0.21a	1.02 ± 0.05a	112.28 ± 17.36ab
		T3	0.44 ± 0.04a	1.28 ± 0.12a	1.06 ± 0.02a	135.43 ± 10.58a
		CK	0.27 ± 0.04b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00b	100.00 ± 0.00b
		T1	0.31 ± 0.03ab	1.15 ± 0.05ab	1.07 ± 0.02a	123.26 ± 5.26ab
		T2	0.31 ± 0.06ab	1.13 ± 0.07ab	1.07 ± 0.03a	120.93 ± 9.65ab
		T3	0.34 ± 0.03a	1.30 ± 0.28a	1.10 ± 0.05a	142.10 ± 25.52a
		CK	0.43 ± 0.02b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00b	100.00 ± 0.00c
		T1	0.55 ± 0.07ab	1.26 ± 0.13ab	1.04 ± 0.06ab	130.77 ± 8.20ab
		T2	0.45 ± 0.04b	1.04 ± 0.14b	1.04 ± 0.06ab	107.43 ± 14.45bc
		T3	0.61 ± 0.08a	1.49 ± 0.24a	1.08 ± 0.03a	154.30 ± 21.63a
2019	0 ~ 40	CK	0.38 ± 0.04c	1.00 ± 0.00c	1.00 ± 0.00b	100.00 ± 0.00c
		T1	0.46 ± 0.03ab	1.23 ± 0.20ab	1.04 ± 0.03ab	127.58 ± 19.6ab
		T2	0.41 ± 0.02bc	1.08 ± 0.08bc	1.03 ± 0.03b	111.05 ± 4.69bc
		T3	0.50 ± 0.06a	1.31 ± 0.01a	1.08 ± 0.01a	140.71 ± 2.92a
		CK	0.29 ± 0.00b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00c
		T1	0.34 ± 0.04ab	1.16 ± 0.11ab	1.06 ± 0.02b	122.48 ± 9.57b
		T2	0.31 ± 0.03b	1.07 ± 0.09b	1.05 ± 0.02b	112.43 ± 7.50bc
		T3	0.38 ± 0.04a	1.31 ± 0.13a	1.09 ± 0.02a	141.96 ± 11.22a
		CK	0.44 ± 0.03b	1.00 ± 0.00c	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00c
		T1	0.73 ± 0.03a	1.65 ± 0.11a	1.05 ± 0.02b	173.41 ± 8.08a
		T2	0.50 ± 0.04b	1.16 ± 0.09b	1.04 ± 0.01b	119.30 ± 10.45b
		T3	0.74 ± 0.09a	1.70 ± 0.06a	1.10 ± 0.02a	184.79 ± 9.42a



2.5 土壤有机碳和活性碳组分之间的相关分析

将 2019、2020、2021 年土壤有机碳和各有机碳组分的平均值进行相关性分析(表 7), SOC 与 DOC、LOC、POC、DOC/SOC、LOC/SOC、POC/SOC、CPMI 均呈显著正相关关系。说明土壤活性有机碳组分及其分配比例与 SOC 含量密切相关, SOC 含量很

大程度上决定了土壤活性有机碳组分含量。各活性有机碳组分中, 以土壤 LOC 与 SOC 相关性最强, 能够更加敏感地反映不同处理对土壤有机碳的影响。土壤 DOC、LOC、POC、DOC/SOC、LOC/SOC、POC/SOC 之间也存在显著正相关, 说明土壤不同活性有机碳组分之间关系密切、相互影响。

表 7 各指标相关性分析

指标	SOC	DOC	LOC	POC	DOC/SOC	LOC/SOC	POC/SOC	CPMI
SOC	1							
DOC	0.862**	1						
LOC	0.863**	0.932**	1					
POC	0.810**	0.847**	0.776**	1				
DOC/SOC	0.655**	0.943**	0.839**	0.751**	1			
LOC/SOC	0.819**	0.919**	0.994**	0.744**	0.850**	1		
POC/SOC	0.780**	0.833**	0.749**	0.993**	0.753**	0.723**	1	
CPMI	0.763**	0.862**	0.851**	0.806**	0.790**	0.833**	0.783**	1

注: ** 表示在 0.01 水平相关性显著。

3 讨论

土壤有机碳的变化通常是由外源物质输入、作物生物量、根系分泌物和微生物活性等引起的^[32]。本研究表明, 单施秸秆、单施膨润土和秸秆配施膨润土处理较对照均不同程度提高了土壤有机碳含量。大量研究表明, 秸秆还田直接向土壤中投入了大量外源有机碳, 能够显著提高土壤有机碳含量^[13, 33-35], 这与本研究结果一致。单施膨润土处理提升土壤有机碳除了直接向土壤中投入少量外源有机碳外, 还要归因于膨润土作为黏土矿物, 具有良好的粘结性、吸附性以及较大的比表面积, 能够促进团聚体形成, 为土壤有机碳的转化和积累提供保障。这与王润泷等^[19]和本课题组前期的研究成果^[21]一致, 王润泷等^[19]在潮土重金属镉污染农田施用膨润土提高了土壤有机碳含量, 本课题组前期研究表明, 施用 1 次膨润土在 5 ~ 7 年均能提高土壤有机碳含量, 表明膨润土具有长效性。同时, 本研究中秸秆配施膨润土处理对土壤有机碳含量提升效果优于单施, 这可能与秸秆和膨润土自身材料性质以及配施产生的积极作用有关。一方面秸秆和膨润土的施用直接增加了有机碳累积投入量, 这也是最主要的原因。研究表明, 有机碳投入量与有机碳含量呈显著正相关关系^[1], 这可能也解释了单施膨润土处理有机碳含量为何不及单施秸秆处理。

另一方面, 膨润土具有吸附性, 作为无机胶体可与秸秆产生的有机胶体结合形成有机无机复合体, 从而为有机碳提供保护, 减少有机碳的损失^[36]。同时, 膨润土还具有强保水持水能力, 它的施用不仅满足了秸秆腐解所需水分条件, 同时也改善了微生物生境, 增强了微生物活性, 进一步加速了秸秆分解, 提高了秸秆的利用效率^[37], 增加了有机碳含量。此外, 秸秆提供养分, 配合膨润土调控水分, 能够更好地改善作物生长条件, 共同促进作物生长, 进而增加土壤残茬和根系碳投入, 提高有机碳含量。这与李吉进等^[36]在田间条件下进行砂滤管试验得出的施用膨润土和玉米秸秆能显著提高砂土土壤含水量和有机质含量结果一致, 但本研究是在旱地开展的大田试验。汤家喜等^[38]同样研究表明, 玉米秸秆生物炭与膨润土混施可以显著提升沙化农田土壤有机碳, 与本文研究结果类似, 但本研究选用的是玉米秸秆直接粉碎还田。Vidal 等^[39]研究也得出了类似结论, 用矿物添加剂蒙脱石生产的有机改良剂促进植物生长和植物源碳向土壤转移, 从而在长期内提高土壤碳储量。可见, 秸秆配施膨润土处理是提升土壤有机碳含量的最佳措施, 这对于内蒙古黄土高原旱作区土壤有机碳含量的增加具有积极意义。

DOC、LOC 和 POC 等土壤活性有机碳受微生物活动的影响, 也是微生物活动的能源物质。本研

究中,单施秸秆、单施膨润土和秸秆配施膨润土处理均提高了黄土丘陵旱作区农田土壤活性有机碳组分 DOC、LOC 和 POC 含量。这可能是由于秸秆作为外源碳投入,为土壤微生物提供了充足的碳源,影响了微生物的生长和繁殖,而微生物分解、合成的有机物以及秸秆腐解物是有机碳及其活性组分的主要来源^[12, 40-41];此外,黄土高原旱作丘陵区存在降水量少、水分利用效率低、土壤结构差、土壤粘结能力弱等问题,而膨润土是一种矿物性黏土,其良好的粘结力有利于改善团粒结构,重塑土壤结构,改善水肥保蓄能力,从而通过对外部环境条件的改变来促进有机碳的转化,改变有机碳各组分含量^[42]。因此,相比于秸秆、膨润土单施,秸秆与膨润土配施后能够通过优势互补,进一步改善土壤理化性质,并为土壤微生物生长提供更好的环境,促进土壤微生物大量繁殖,提高微生物活性,进而促进有机碳的转化,提高其活性组分含量。同时,本研究表明,有机碳及其组分含量变化都表现为 0 ~ 20 cm > 20 ~ 40 cm 土层,即表层富集现象。这可能是因为随着土层深度的增加,土壤透气性变差,微生物活性和多样性降低,影响了土壤有机碳的分解转化^[12]。

DOC/SOC、LOC/SOC 和 POC/SOC 表示有机碳活性组分在土壤有机碳中的占比,可在一定程度上反映土壤有机碳的质量和稳定程度,活性组分分配比例越高表示碳素有效性高,易分解;比例小则表示土壤有机碳较稳定,不易被分解利用^[43-44]。本研究表明,单施秸秆、单施膨润土和秸秆配施膨润土处理均提高了 DOC/SOC、LOC/SOC 和 POC/SOC 值(除单施膨润土降低了 DOC/SOC 值外),单施秸秆处理对于有机碳及其活性组分含量和有机碳中活性组分分配比例的提高略优于单施膨润土处理,秸秆配施膨润土处理占据明显优势。其中,施用膨润土处理 DOC/SOC 值降低可能是由于膨润土自身的强吸附性吸附固定了一部分 DOC,有效减弱了土壤微生物对土壤有机质的降解,减少了 DOC 的损失,促进了 DOC 的积累^[45]。施用秸秆和秸秆配施膨润土处理比值提高可能是因为秸秆含有丰富的有机质,而膨润土的添加促进其快速腐解,提升秸秆中碳素有效性。

本研究表明,秸秆配施膨润土处理能不同程度提高 0 ~ 40 cm 土层土壤碳库活度、碳库活度指数、碳库指数及碳库管理指数,这是因为秸秆配施膨润

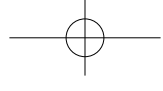
土处理能够向土壤输送大量活性有机碳,使土壤稳定态碳含量减少,促进有机碳的循环。通过相关性分析得知,土壤有机碳及其活性组分之间均呈显著正相关关系($P < 0.01$),说明土壤有机碳的增加与其他活性有机碳组分含量的增加密切相关,同时土壤活性有机碳组分变化能够很好地反映出土壤有机碳库的变化,且以土壤 LOC 与 SOC 相关性最强,说明易氧化有机碳含量的变化规律更接近于土壤有机碳含量的变化。

4 结论

3 年试验研究结果均表明,秸秆配施膨润土能提高旱作燕麦 0 ~ 40 cm 土层土壤有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳含量、各组分在土壤有机碳中的分配比例及碳库管理指数,易氧化有机碳与土壤有机碳相关性最大,故而可将易氧化有机碳作为旱作农田土壤中有有机物早期变化的敏感性指标。

参考文献:

- [1] 俄胜哲,丁宁平,李利利,等. 长期施肥条件下黄土高原黑垆土作物产量与土壤碳氮的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4047-4055.
- [2] 戴万宏,黄耀,武丽,等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.
- [3] 路文涛,贾志宽,张鹏,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
- [4] 王胜楠,邹洪涛,张玉龙,等. 秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 154-158.
- [5] Dong Q G, Yang Y, Yu K, et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 133-143.
- [6] 魏夏新,熊俊芬,李涛,等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380.
- [7] 杨滨娟,孙丹平,张颖睿,等. 不同水旱复种轮作方式对稻田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 456-462.
- [8] 王虎,王旭东,田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [9] 丛萍,李玉义,高志娟,等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报,



- 2019, 35 (1): 148–156.
- [10] 毛海兰, 王俊, 付鑫, 等. 秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (3): 347–356.
- [11] 郭万里, 武均, 蔡立群, 等. 不同氮素水平下生物质炭、秸秆添加对陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (1): 283–291.
- [12] 吴海梅, 周彦莉, 郑浩飞, 等. 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40 (1): 61–69.
- [13] 李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38 (2): 268–276.
- [14] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1381–1392.
- [15] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述 [J]. 核农学报, 2018, 32 (11): 2274–2280.
- [16] 马斌, 刘景辉, 杨彦明, 等. 不同膨润土施用量对旱作农田土壤保水能力和燕麦产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2015, 24 (8): 42–49.
- [17] Mi J, Gregorich E G, Xu S, et al. Effect of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, and millet photosynthesis and grain quality [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1): 1–11.
- [18] Mi J, Gregorich E G, Xu S, et al. Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region [J]. Field Crops Research, 2017, 212: 107–114.
- [19] 王润珑, 徐应明, 李然, 等. 膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (12): 2701–2710.
- [20] Zhou L, Monreal C M, Xu S, et al. Effect of bentonite-humic acid application on the improvement of soil structure and maize yield in a sandy soil of a semi-arid region [J]. Geoderma, 2019, 338: 269–280.
- [21] Mi J, Gregorich E G, Xu S, et al. Changes in soil biochemical properties following application of bentonite as a soil amendment [J]. European Journal of Soil Biology, 2021, 102: 103251.
- [22] Zhou L, Xu S T, Monreal C M, et al. Bentonite-humic acid improves soil organic carbon, microbial biomass, enzyme activities and grain quality in a sandy soil cropped to maize (*Zea mays* L.) in a semi-arid region [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21 (1): 208–221.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Jiang P K, Xu Q F, Xu Z H, et al. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236 (1): 30–36.
- [25] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (4): 1071–1076.
- [26] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46 (7): 393–406.
- [27] 缪闯和, 吕贻忠. 黑土、潮土和红壤可溶性有机质的光谱特征及结构差异 [J]. 土壤, 2021, 53 (1): 168–172.
- [28] Riggs C E, Hobbie S E, Bach E M, et al. Nitrogen addition changes grassland soil organic matter decomposition [J]. Biogeochemistry, 2015, 125 (2): 203–219.
- [29] 阎欣, 安慧. 土壤非保护性有机碳对荒漠草原沙漠化的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38 (8): 2846–2854.
- [30] 王鑫, 张运龙, 李腾腾, 等. 施用等养分量有机肥和化肥对干旱胁迫下玉米生物量影响的比较 [J]. 土壤通报, 2022, 53 (2): 421–428.
- [31] 朱长伟, 陈琛, 牛润芝, 等. 不同轮耕模式对豫北农田土壤固碳及碳库管理指数的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022, 30 (4): 671–682.
- [32] 徐文静, 张宇亭, 魏勇, 等. 长期施肥对稻麦轮作紫色土有机碳组分及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (2): 292–299.
- [33] 丛萍, 李玉义, 王婧, 等. 秸秆一次性深埋还田量对亚表层土壤肥力质量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (1): 74–85.
- [34] 彭畅, 张秀芝, 李强, 等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (22): 4613–4622.
- [35] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 等. 秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应 [J]. 水土保持研究, 2018, 25 (6): 36–44.
- [36] 李吉进, 徐秋明, 倪小会, 等. 施用膨润土对土壤含水量和有机质含量的影响 [J]. 华北农学报, 2002 (2): 88–91.
- [37] 赵雪淞, 杨晨曦, 冯良山, 等. 膨润土与肥料配施对土壤生化特性和微生物数量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 183–188.
- [38] 汤家喜, 李玉, 朱永乐, 等. 生物炭与膨润土对辽西北风沙土壤理化性质的影响研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36 (3): 143–150.
- [39] Vidal A, Lenhart T, Dignac M F, et al. Promoting plant growth and carbon transfer to soil with organic amendments produced with mineral additives [J]. Geoderma, 2020, 374: 114454.
- [40] 皇甫呈惠, 孙筱璐, 刘树堂, 等. 长期定位秸秆还田对土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 华北农学报, 2020, 35 (3): 153–159.
- [41] 李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 等. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (3): 777–787.

[42]

吕晓菡, 章明奎, 严建立. 黏土矿物改良剂对新垦砂壤质耕地土壤有机碳积累的影响 [J]. 农学学报, 2021, 11 (12): 48-52.

[43]

冷雪梅, 钱九盛, 张旭辉, 等. 添加外源有机物对长期不同施肥处理水稻土有机碳矿化的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2022, 45 (1): 103-112.

[44]

李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (9): 130-135.

[45]

陈梦蝶, 崔晓阳. 土壤有机碳矿物固持机制及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022, 30 (2): 175-183.

Effects of combined application of bentonite and straw on soil organic carbon and active carbon fractions in dry farmland

ZHANG Lan-ying, MI Jun-zhen*, LIU Jing-hui, ZHAO Bao-ping, CUI Xue-mei, HU Ke-xin (Inner Mogolia Agricultural University, Hohhot Inner Mogolia 010019)

Abstract: To clarify the effects of combined application of straw and bentonite on soil organic carbon (SOC) and active organic carbon fractions and their distribution ratios , as well as carbon pool management index in the 0 ~ 40 cm soil layer in dry farmland , a field experiment was conducted for three years from 2019 to 2021 at Yijianfang village , Qingshuihe county , Inner Mongolia. Four treatments were set up , including no application of bentonite and straw (CK) , single application of bentonite (T2) , single application of straw (T1) and straw combined with bentonite (T3) . The results showed that soil organic carbon and activated carbon fractions decreased first and then increased (except POC content) between years , and was in the order of 10 ~ 20 cm > 0 ~ 10 cm > 20 ~ 40 cm. All treatments increased soil organic carbon and its active fraction in 0 ~ 10 , 10 ~ 20 and 20 ~ 40 cm soil layers compared with CK , and the straw with bentonite combined application was more effective than straw single application. In the 0 ~ 40 cm soil layer , the three-year average values of SOC , DOC , LOC , and POC increased by 7.16% ~ 9.63%、12.35% ~ 18.05% , 15.55% ~ 41.97% and 100.73% ~ 127.90% , respectively , under the T3 treatment compared with CK ; straw combined with bentonite (T3) treatment simultaneously increased DOC/SOC , LOC/SOC , POC/SOC and CPMI in different soil layers ; There was a significant positive correlation between soil organic carbon and each fraction , with LOC having the largest correlation coefficient , indicating that LOC could better reflect the changes of SOC. It can be seen that the measure of straw return combined with bentonite in dry farming area can significantly increase the soil organic carbon , active organic carbon fraction and its distribution ratio and carbon pool management index , which is important for soil fertility enhancement and quality improvement in dry farmland.

Key words: straw return ; bentonite ; soil organic carbon ; soil active carbon fraction ; carbon pool management index ; dry farmland