

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23140

膨润土与秸秆配施对根区土壤有机碳化学结构和酶活性的影响

崔雪梅, 米俊珍*, 刘景辉, 赵宝平, 张兰英, 吴 胜, 胡可欣

(内蒙古农业大学农学院 / 全国农业科研杰出人才及其创新团队 / 内蒙古高校燕麦工程研究中心 / 内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 为揭示膨润土与秸秆配施后土壤有机碳及其化学结构特征, 选取黄土高原旱作区 3 年田间定位试验中的秸秆还田 (S)、单施膨润土 (B)、膨润土配施秸秆 (H)、不施膨润土和秸秆不还田 (CK) 4 个处理, 研究膨润土与秸秆配施对根际土壤有机碳含量、有机碳化学结构和酶活性的影响。结果表明: 施用膨润土和秸秆均能不同程度提高土壤有机碳含量, 其中 H 处理较 CK 显著提高了 19.65%。与 CK 相比, 仅有 H 处理显著增加了烷基碳和烷氧碳的相对含量和脂族碳 / 芳香碳值, 分别提高了 25.53%、18.00% 和 50.98%; 仅有 H 处理芳香性显著降低了 30.93%; 与 CK 相比, 各处理增加了烷基碳 / 烷氧碳值, 增幅为 5.26% ~ 17.54%, 差异不显著; 各处理降低了羧基碳和芳香碳相对含量, 降幅分别为 24.50% ~ 38.19% 和 1.29% ~ 21.97%, 差异不显著。与 CK 相比, S、B 和 H 处理蔗糖酶活性显著提高 12.63% ~ 33.16%; β -葡萄糖苷酶活性显著提高 10.72% ~ 45.56%; 锰过氧化物酶活性显著提高 25.10% ~ 70.98%。相关性分析表明, 土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性均与有机碳含量、烷基碳含量和烷基碳 / 烷氧碳值呈正相关, 与羧基碳和芳香性呈负相关。综上所述, 膨润土与秸秆配施能够提高土壤有机碳含量, 提高土壤酶活性, 增加活性有机碳含量, 使土壤有机碳分子活化, 有利于改善黄土高原旱作区土壤状况。

关键词: 膨润土; 秸秆还田; 土壤有机碳; 有机碳化学结构; 酶活性

内蒙古黄土高原区是我国北方典型的旱作区, 该区降雨量少且分布不均匀, 加之长期不合理的土地利用方式导致土壤质量差、作物产量低且不稳的问题, 严重制约了当地农业的发展。作为土壤肥力的核心指标, 有机碳的含量对于土壤培肥改良至关重要^[1-2]。因此, 为保证该地区作物生产力水平的提高, 提升土壤有机碳含量已成为关键。

膨润土因其具有吸附性、膨胀性、粘结性等良好特性^[3], 近年来被广泛应用于农田土壤的改良。膨润土具有良好的保水性, 研究表明施入膨润土能够增加农田土壤含水量, 提高土壤持水能力^[4-5]。我国拥有丰富的秸秆资源, 农作物秸秆本身含有大量的碳、氮等元素, 秸秆还田后可以不同

程度地改善土壤质量^[6]。李硕等^[7]研究发现, 作物秸秆还田可使土壤中有机碳含量得到提高, 具有明显的增碳固碳作用。因此, 将膨润土与秸秆配施既能做到充分保持土壤水分, 又能提高土壤有机碳含量, 是适宜于黄土高原区的良好改良材料。

众所周知, 土壤有机碳化学结构对准确评价土壤有机碳在土壤系统中的功能及其稳定性具有重要意义^[8]。前人研究主要集中于秸秆还田对土壤有机碳化学结构的影响。王学霞等^[9]在秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响研究中发现, 秸秆还田明显降低了烷基碳 / 烷氧碳值, 提高了土壤有机碳的矿化程度, 提高了土壤有机碳的不稳定性。而韩亚^[10]发现, 秸秆还田后土壤有机碳化学结构发生变化, 烷基碳相对比例增加, 羧基碳相对比例降低, 同时烷基碳 / 烷氧碳值升高, 土壤有机碳的腐殖化程度加深。由于不同研究所在地区的土壤类型、种植模式、气候条件等方面存在差异, 秸秆还田处理后对土壤有机碳化学结构影响的研究结果也各异。而有关施用膨润土与秸秆配施对土壤有机碳化学结构影响的研究鲜有报道。

土壤酶作为土壤三大组成部分之一, 参与土壤

收稿日期: 2023-03-06; 录用日期: 2023-05-29

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); 人才引进校级科研启动项目 (ndyb2018-29); 2022 年度留学人员创新创业启动支持计划项目; 燕麦全产业链科技创新团队。

作者简介: 崔雪梅 (1997-), 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: 991398727@qq.com。

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

中各种生理生化反应^[11]。前人关于秸秆还田和膨润土对土壤酶活性的影响进行了大量研究。秸秆等外源物质进入土壤后,必定与土壤酶发生作用^[12],土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶参与了土壤中的碳循环。其中蔗糖酶能够将蔗糖降解为葡萄糖和果糖,增加土壤中易溶性营养物质^[13],是影响土壤碳循环的关键酶^[14]。秸秆还田后土壤 β -葡萄糖苷酶和土壤锰过氧化物酶活性均增强^[15]。膨润土与秸秆配施显著提高了蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性并提高土壤有机碳含量^[16-17]。而土壤酶活性与土壤有机碳化学结构关系如何,以及土壤酶活性的提高是否影响土壤有机碳化学结构的变化尚不清楚。因此,本试验在能够充分利用膨润土与秸秆资源的基础上,将秸秆作为外源碳输入的同时配施膨润土,研究其对土壤有机碳含量、有机碳化学结构及土壤酶活性的影响,明确二者配施对土壤有机碳及其结构的影响,旨在为黄土高原旱作区农田土壤固碳提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区清水河县宏河镇一间房村(40° 6' N, 111° 39' E),该地区年平均温度7.1℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温2370℃,无霜期140 d,年均降水量365 mm,年蒸发量2577 mm,降水主要集中在7—8月,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。试验地0~20 cm土层土壤基础理化性质见表1。

表1 试验地基础理化性质

供试土壤	有机碳 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	总孔隙度 (%)
黄绵土	3.52	43.40	6.80	121.20	46.60

1.2 供试材料

试验作物为裸燕麦坝菽1号,膨润土主要成分为蒙脱石,吸水率为300%,成分分析见表2,由内蒙古地壳有限公司提供。秸秆为玉米秸秆(C:N:P:K=40.00%:0.87%:0.31%:1.34%),秸秆粉碎后小于5 cm,由清水河县农牧业局提供。

表2 膨润土主要成分分析 (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
73.20	11.40	2.67	1.05	2.58	0.31	0.29

1.3 试验设计

试验于2019年开始,采用随机区组设计,共设置CK(不施膨润土和秸秆不还田)、S(秸秆还田)、B(单施膨润土)、H(膨润土配施秸秆)4个处理,每个处理重复3次,共12个小区,小区面积为120 m²。膨润土只施用1年(2019年为施入第一年),施用量为18000 kg/hm²;秸秆每年收获后还田,秸秆还田量为6000 kg/hm²,秸秆还田方式采用秸秆粉碎翻压还田,即秋季将粉碎的玉米秸秆、膨润土进行翻耕,翻耕深度为20~30 cm。在6月3日采用机械条播的方式进行燕麦播种,播种量为150 kg/hm²,行距为25 cm,播种深度为3~5 cm,底肥为磷酸二铵150 kg/hm²,其他与当地田间管理相同。2021年燕麦成熟期测定持续3年处理后的土壤有机碳含量、有机碳化学结构及土壤酶活性。

1.4 测定项目与方法

于燕麦成熟期(2021年9月19日)在每个小区采用五点取样法进行燕麦根区取土。距燕麦植株水平0~10 cm处,在燕麦植株的东南西北4个方位用土钻取土,取土深度为0~40 cm。将4个方位的土样混匀放入一个塑封袋中。因为该取样方法所得的土样并不符合大田根际土的定义,但又与非根际土有所区别,本研究参考根区的概念,称之为根区土壤^[18-19]。

土壤有机碳含量采用H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法^[20]测定;土壤蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性采用试剂盒进行测定^[17]。土壤有机碳化学结构利用¹³C固体核磁共振技术,采用德国布鲁克(AVANCE NEO 400M)测试方法:固体核磁,交叉极化(CP)+去除边带(TOSS)法测定,采用的脉冲是CPtoSS转速为5 kHz,扫描次数为6000次,脉宽为3.84 μs ,弛豫时间是0.5 s^[21]。

1.5 数据统计与分析

有机碳化学结构的表征指标通过如下公式计算^[22-23]:

$$\text{烷基碳/烷氧碳值} = \text{烷基碳} / \text{烷氧碳}$$

$$\text{脂族碳/芳香碳值} = (\text{烷基碳} + \text{烷氧碳}) / \text{芳香碳}$$

$$\text{芳香性} = \text{芳香碳} / (\text{芳香碳} + \text{烷基碳} + \text{烷氧碳})$$

数据分析:应用Excel 2021进行数据处理,Excel 2021和Origin 2022进行绘图,采用SPSS 25.0

对数据进行差异显著性检验,采用最小显著性差异法(LSD)进行显著性分析($P<0.05$),用 Origin 2022 进行皮尔逊相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳变化

施加不同外源物质均可提高土壤有机碳含量(图1),各处理表现为 $H>S>B>CK$ 。与CK相比,仅有H处理可显著提高土壤有机碳含量,提高了19.65%;S和B处理分别提高了14.74%和10.40%,且处理间差异不显著。说明膨润土配施秸秆能够促进有机碳的积累,有利于土壤有机碳含量的增加。

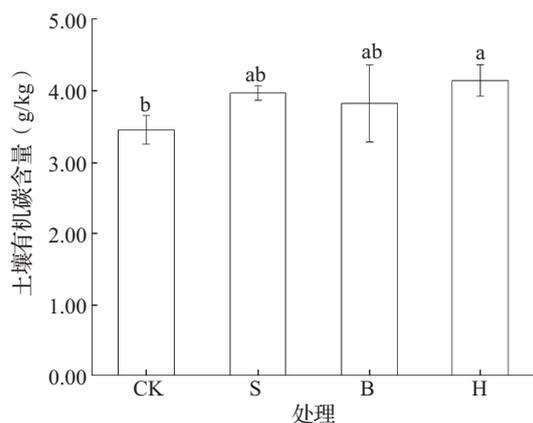


图1 不同处理下根区土壤有机碳的变化

注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 土壤有机碳化学结构变化

不同处理土壤有机碳化学结构如图2所示,在所有处理中,烷氧碳的相对含量所占比例最高,为46%~51%;其次烷基碳占26%~31%、芳香碳占12%~16%、羧基碳占7%~12%。与CK相比,仅有H处理显著增加了烷基碳和烷氧碳的相对含量,分别提升了25.53%和18.00%。与CK相比,各处理降低了芳香碳和羧基碳的相对含量,降低幅度分别为1.29%~21.97%和24.50%~38.19%,差异不显著。单施膨润土、单施秸秆、膨润土配施秸秆均能提高土壤有机碳中烷氧碳和烷基碳比例,降低羧基碳和芳香碳的比例,其中膨润土与秸秆配施处理最为明显,说明外源物质膨润土和秸秆的施入增加了易分解有机碳组分,减少了难分解有机碳组分,降低了土壤有机碳腐殖化程度。

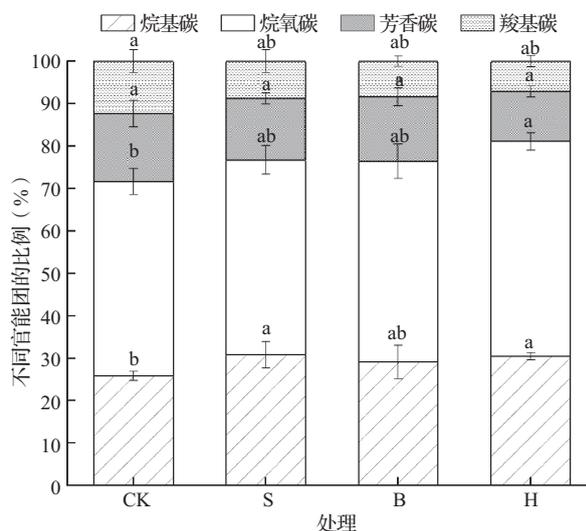


图2 不同处理下根区土壤有机碳化学结构

注:不同小写字母同一行表示处理间差异显著水平($P<0.05$)。

2.3 土壤有机碳的芳香性及不同有机碳的比值

由表3可以看出,各处理烷基碳/烷氧碳值的变化规律表现为 $S>B>H>CK$,脂族碳/芳香碳值的变化规律表现为 $H>S>B>CK$,芳香性的变化规律则表现为 $H<S<B<CK$ 。H处理的脂族碳/芳香碳值显著高于CK、S和B处理,分别增加了50.98%,30.58%和35.67%;各处理的芳香性均低于CK,仅有H处理差异显著,显著降低了30.93%;与CK相比,H、B和S处理增加了烷基碳/烷氧碳值,但差异不显著,增加幅度分别为5.26%、7.02%和17.54%;说明膨润土配施秸秆促使土壤中有机碳芳香性降低,有机碳结构的复杂程度降低,分子结构趋于简单化。

表3 不同处理下根区土壤有机碳性质

处理	烷基碳/烷氧碳值	脂族碳/芳香碳值	芳香性
CK	$0.57 \pm 0.05a$	$4.61 \pm 1.13b$	$18.27 \pm 3.39a$
S	$0.67 \pm 0.07a$	$5.33 \pm 0.79b$	$15.96 \pm 1.91ab$
B	$0.61 \pm 0.07a$	$5.13 \pm 1.11b$	$16.64 \pm 2.75ab$
H	$0.60 \pm 0.01a$	$6.96 \pm 0.66a$	$12.62 \pm 1.01b$

注:表中数据均为平均值 \pm 标准差。同一列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4 土壤酶活性

由表4可以看出,各处理土壤蔗糖酶活性的变化规律表现为 $S>H>B>CK$, β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性的变化规律均表现为 $S>B>H>CK$ 。其中,各处理蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性均表现为S、B和H处理显著高于CK处理,且以S处理表现最佳。与CK相比,S、B和H处

理的蔗糖酶活性分别显著提高了 33.16%、12.63% 和 26.24%； β -葡萄糖苷酶活性分别显著增加了 45.56%、24.24% 和 10.72%；锰过氧化物酶活性分别显著提升了 70.98%、40.56% 和 25.10%。说明秸秆还田和施加膨润土对根区土壤酶活性有积极作用。

表 4 不同处理下根区土壤酶活性

处理	蔗糖酶 (mg/g)	β -葡萄糖苷酶 (IU/L)	锰过氧化物酶 (U/L)
CK	13.30 ± 0.32d	32.75 ± 0.68d	28.60 ± 3.85d
S	17.71 ± 0.36a	47.67 ± 1.14a	48.90 ± 0.08a
B	14.98 ± 0.34c	40.69 ± 2.48b	40.20 ± 0.75b
H	16.79 ± 0.59b	36.26 ± 1.58c	35.78 ± 1.85c

2.5 土壤有机碳与化学结构及土壤酶活性的相关性

通过各指标之间的相关性分析 (图 3) 可知, 土壤有机碳与蔗糖酶活性呈显著正相关, 与烷基碳、锰过氧化物酶活性、脂族碳 / 芳香碳值、 β -葡萄糖苷酶活性和烷基碳含量呈正相关, 与羧基碳、芳香碳含量、芳香性和烷基碳 / 烷氧碳值呈负相关。土壤蔗糖酶活性与烷基碳含量呈显著正相关, 与烷基碳 / 烷氧碳值、烷氧碳含量和脂族碳 / 芳香碳值呈正相关, 与芳香性、羧基碳和芳香碳含量呈负相关。土壤 β -葡萄糖苷酶活性与烷基碳 / 烷氧碳值、蔗糖酶活性和烷基碳含量呈显著正相关, 与脂族碳 / 芳香碳值和烷氧碳含量呈正相关,

与羧基碳和芳香性呈负相关。土壤锰过氧化物酶活性与蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性呈极显著正相关, 与烷基碳含量和烷基碳 / 烷氧碳值呈显著正相关, 与烷氧碳含量和脂族碳 / 芳香碳值呈正相关, 与羧基碳和芳香性呈负相关。

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量的影响

农田土壤中的动植物残体与外源物质投入和分解之间的平衡决定于土壤有机碳的含量。本试验研究发现, 较对照相比, 单施膨润土、秸秆还田和膨润土配施秸秆处理均能不同程度提高土壤有机碳含量, 以膨润土配施秸秆处理表现最佳。分析其原因, 一方面, 由于膨润土和秸秆作为碳源投入, 增加了土壤有机碳含量, 研究报道发现, 膨润土的施加增加了土壤碳投入^[24], 提高了土壤有机碳含量^[25], 同时刘运峰^[26]和蔡丽君等^[27]研究结果一致, 均发现秸秆还田能增加土壤有机碳含量。另一方面, 膨润土具有吸附性, 施入土壤能够固持土壤中的水分, 有利于秸秆的降解, 增加有机物质的残留^[28]。而秸秆还田处理优于单施膨润土处理的主要原因是秸秆自身就含有较高的有机碳, 即有机碳的投入量与土壤有机碳含量呈显著正相关^[29]。

3.2 土壤有机碳化学结构的影响

一般情况下, 在土壤有机碳官能团结构中烷氧碳主要来源于植物残体中纤维素和半纤维素等化合物, 属于有机碳中较为容易分解的碳组分, 烷基碳则属于相对稳定和难以分解的碳组分^[30-31], 芳香碳主要来源于含苯环的有机化合物, 如木质素和黑碳等物质, 或来源于微生物代谢产物或植物体经过高热产生的物质, 意味着芳香碳属于难降解有机碳^[32]。本试验发现, 外源物质处理增加了土壤有机碳化学结构中的烷氧碳和烷基碳的含量, 降低了芳香碳和羧基碳的含量, 同时与其他有机碳化学结构相比均表现为烷氧碳的占比最高, 增加了土壤中易分解有机碳组分。前人研究发现, 秸秆还田和单施膨润土均能增加土壤有机碳物料的投入^[33-34]。秸秆还田能将地上部分生物量归还土壤^[35]; 单施膨润土, 一方面能够增加农作物地下的部分生物量^[36], 另一方面, 由于其自身特殊性状能够加速分解有机残体, 有利于土壤碳的积累。因此, 本研究推测烷氧碳相对含量的增加

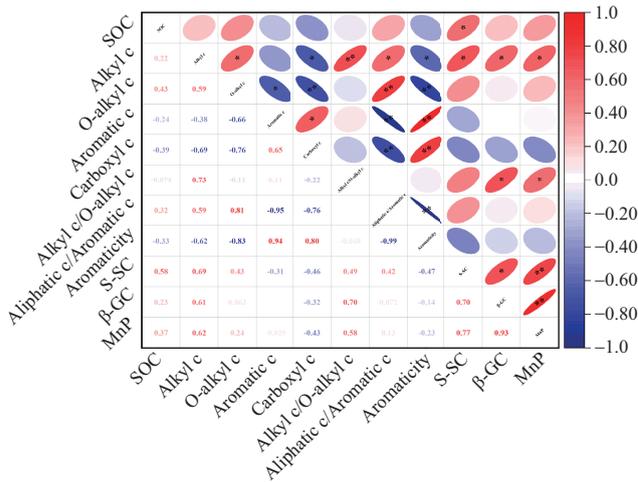


图 3 土壤有机碳指标与蔗糖酶的相关性

注: * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.001$; SOC: 土壤有机碳; Alkyl c / O-alkyl c: 烷基碳 / 烷氧碳值; Aliphatic c / Aromatic c: 脂族碳 / 芳香碳值; Alkyl c: 烷基碳; O-alkyl c: 烷氧碳; Aromatic c: 芳香碳; Carboxyl c: 羧基碳; Aromaticity: 芳香性; S-SC: 土壤蔗糖酶; β -GC: β -葡萄糖苷酶; MnP: 锰过氧化物酶。

主要来源于植物源有机残体的输入。烷基碳/烷氧碳值是土壤有机碳分解程度的敏感指标,可用于评价腐殖物质的烷基化程度,烷基碳/烷氧碳值越低,说明土壤有机碳的腐殖化程度越低^[37],而脂族碳/芳香碳值则表示土壤有机碳的脂族特性变化,其比值越高表征有机碳的芳香性越低,分子结构越简单化。本研究结果发现,与对照相比,膨润土配施秸秆处理显著提高了脂族碳/芳香碳值,说明膨润土配施秸秆增强了土壤有机碳的脂族特性,降低了芳香性,土壤难降解碳含量降低,易被微生物利用的碳含量增加。

然而,各处理下的芳香碳比例均低于对照,使得土壤中有机碳稳定性减弱,这与石含之等^[38]研究报道不一致,即添加秸秆后黑土中芳香碳比例比对照增加了40.3%~169.0%。产生上述情况的主要原因是黑土中加入秸秆后,由于黑土中拥有充足的能量物质和氮素,有利于外源微生物生长旺盛,从而抑制了土著微生物的生长,导致土壤原有有机碳的分解速率降低,即发生了负激发效应^[39]。负激发效应会抑制土壤有机碳的矿化,使得芳香碳含量提高^[40]。而本试验土壤属于黄绵土,黄绵土中的物质和营养元素远不及黑土丰富,秸秆施入后会发生正激发效应,降低了芳香碳比例。说明膨润土的施入和多年的秸秆还田降低了土壤有机碳的稳定性,加速了土壤有机碳的分解,有利于土壤养分的释放和作物产量的提高。

3.3 土壤蔗糖酶变化及其与有机碳化学结构的关系

土壤酶活性的强弱是土壤中生化过程的反映,是土壤肥力的重要指标。本试验研究表明,施用膨润土和秸秆还田对土壤酶活性均有明显影响。其中,单施膨润土、秸秆还田和膨润土配施秸秆处理显著提高了土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性,说明施用膨润土和秸秆还田均激发了土壤碳循环相关的土壤酶活性,一方面原因可能是外源物质的施加刺激了参与碳循环土壤酶活性的增加,加速了外源物质中的纤维素、半纤维素等碳物质的降解^[41]。另一方面,长期施用膨润土和秸秆还田能够增加土壤养分^[24, 42],改善土壤微生态环境^[43],为土壤酶活性提供了良好的土壤环境。本研究中各处理下土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性均显著高于对照,且以

秸秆还田处理最佳,与前人研究结果不一致^[17],解释其原因,从结果与分析中可以发现,与对照相比,秸秆还田和单施膨润土处理土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性分别显著提高了33.16%和12.63%、45.56%和24.24%、70.98%和40.56%,但是膨润土配施秸秆仅分别提高了26.24%、10.72%、25.10%,这可能与燕麦根系分泌物、根系微生物活性或者秸秆还田和膨润土配施存在负交互作用等有关,此问题值得进一步深入研究。

本试验结果发现,土壤蔗糖酶活性与土壤有机碳含量呈显著正相关,可能是因为蔗糖酶主要负责分解存在于植物细胞壁的纤维素和半纤维素等化合物。本研究发现,土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性均与羧基碳含量和芳香性呈负相关,而与烷基碳/烷氧碳值、脂族碳/芳香碳值和烷氧碳含量呈正相关,其原因可能是外源秸秆还田后秸秆会在土壤酶(土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶)的作用下不断地被分解,秸秆中的烷氧碳会快速分解进入土壤中,而烷基碳和芳香碳会保留,进而影响土壤有机碳的化学结构^[44]。此外,膨润土与秸秆还田下土壤有机碳组分和土壤微生物数量与土壤有机碳化学结构的关系如何尚未可知,关于膨润土与秸秆还田对黄绵土有机碳化学结构的研究还需持续监测。

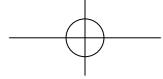
4 结论

通过连续3年的田间定位试验,膨润土与秸秆配施对根区有机碳化学结构和酶活性的影响研究与分析,得出如下结论:

(1) 单施膨润土、秸秆还田和膨润土配施秸秆均能提高根区0~40 cm土层土壤有机碳含量,且以膨润土配施秸秆处理表现最好。

(2) 单施膨润土、秸秆还田和膨润土配施秸秆对土壤有机碳化学结构均有一定的影响,增加了土壤有机碳中烷氧碳和烷基碳比例,降低了羧基碳和芳香碳的比例,提高了烷基碳/烷氧碳和脂族碳/芳香碳值,并降低了土壤芳香性,促进了土壤有机碳的矿化。

(3) 秸秆还田、单施膨润土和膨润土配施秸秆,土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶活性均有不同程度的提高,且以秸秆还田处理表现最佳。



(4) 相关性分析表明, 土壤酶(土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和锰过氧化物酶)活性均与有机碳含量、烷基碳含量和烷基碳/烷氧碳值呈正相关, 与羧基碳和芳香性呈负相关。

综合来看, 膨润土与秸秆配施能够加快土壤有机碳矿化速率, 促进土壤有机碳的不稳定性, 提高易分解有机碳含量, 土壤有机碳分子结构趋于简化, 二者配施是改善黄土高原旱作区土壤有机碳化学结构的重要措施。

参考文献:

- [1] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161.
- [2] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817-3825.
- [3] 王涵, 张忠庆, 刘金华, 等. 不同改良剂对苏打盐碱土的改良效果[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(5): 569-575.
- [4] 周春生, 龚萍, 刘伟, 等. 改性膨润土对沙地土壤改良及紫花苜蓿生物效应的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 16-22.
- [5] 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.
- [6] 曹丽花, 赵世伟. 土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007(3): 177-182, 187.
- [7] 李硕, 把余玲, 李有兵, 等. 添加作物秸秆对土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 153-161.
- [8] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用 ^{13}C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 796-812.
- [9] 王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774-1782.
- [10] 韩亚. 黑土区玉米秸秆腐解特征及其改土效果的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [11] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
- [12] 李倩, 张睿, 贾志宽. 玉米旱作栽培条件下不同秸秆覆盖量对土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 152-154.
- [13] 肖礼. 黄土丘陵区梯田土壤微生物群落和活性特征及其影响因素[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [14] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105-109.
- [15] 徐寓军. 秸秆还田条件下土壤活性有机碳含量和化学结构的变化及其与土壤酶活性的关系研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [16] 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.
- [17] 张兰英. 秸秆配施膨润土条件下旱作燕麦土壤固碳保墒增产机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [18] 周永强, 薛泉宏, 杨斌, 等. 生防放线菌对西瓜根域微生态的调整效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 143-150.
- [19] 李桂贞, 杨富裕, 张德罡, 等. 青海燕麦根区AM真菌的空间分布研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(5): 65-70.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物量 and 有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810-819.
- [22] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 922-930.
- [23] Spaccini R, Mbagwu J, Piccolo A, et al. Changes of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia[J]. Geoderma, 2006, 132(1-2): 9-19.
- [24] 米俊珍. 旱作谷子施用膨润土蓄水保墒增产生态机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [25] 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.
- [26] 刘运峰. 秸秆还田配施化肥对农田土壤剖面有机碳组分的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [27] 蔡丽君, 张敬涛, 刘婧, 等. 长期免耕秸秆还田对寒地土壤有机碳及大豆产量的影响[J]. 作物杂志, 2021, 205(6): 189-192.
- [28] 胡怀舟, 张绪林, 胡邦友, 等. 膨润土和有机肥施用对秸秆覆盖还田紫色土肥力影响及经济效益分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 306-316.
- [29] 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.
- [30] Dou S, Zhang J J, Li K. Effect of organic matter applications on ^{13}C -NMR spectra of humic acids of soil[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(3): 532-539.
- [31] Mathers N J, Xu Z. Solid-state ^{13}C NMR spectroscopy: Characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia[J]. Geoderma, 2003, 114(1/2): 19-31.
- [32] Lützw M, Kögel-Knabner I, Ekschmit K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their

- relevance under different soil conditions—a review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 426–445.
- [33] 雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30 (9): 1393–1408.
- [34] 王瑛. 天然钠基膨润土-菌渣复合材料对沙质土壤保水保肥性能的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
- [35] Lu F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20 (8): 1545–1568.
- [36] 师俊杰, 米雅竹, 何永美, 等. 丛枝菌根真菌与膨润土对蚕豆生长和重金属累积的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24 (5): 952–959.
- [37] 卓苏能, 文启孝. 核磁共振技术在土壤有机质研究中的应用的新进展 (上) [J]. *土壤学进展*, 1994, 22 (5): 46–52.
- [38] 石含之, 赵沛华, 黄永东, 等. 秸秆还田对土壤有机碳结构的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (3): 536–542.
- [39] 黄文昭, 赵秀兰, 朱建国, 等. 土壤碳库激发效应研究 [J]. *土壤通报*, 2007, 38 (1): 149–154.
- [40] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37 (3): 445–454.
- [41] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 (9): 1443–1451.
- [42] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41 (9): 4246–4252.
- [43] 高日平, 赵思华, 刁生鹏, 等. 秸秆还田对黄土风沙区土壤微生物、酶活性及作物产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2019, 50 (6): 1370–1377.
- [44] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20 (5): 1366–1381.

Effects of combined application of bentonite and straw on organic carbonation structure and enzyme activity of soil in root zone

CUI Xue-mei, MI Jun-zhen*, LIU Jing-hui, ZHAO Bao-ping, ZHANG Lan-ying, WU Sheng, HU Ke-xin (Agronomy College of Inner Mongolia Agricultural University/ National Outstanding Talents in Agricultural Research and Its Innovation Team/ Inner Mongolia University Oat Engineering Research Center/ Collaborative Innovation Center of Multi-grain Industry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot Inner Mongolia 010019)

Abstract: In order to reveal the characteristics of soil organic carbon and its chemical structure after combined application of bentonite and straw, this study selected four treatments from a 3-year field positioning experiment in the dryland area of the Loess Plateau, including straw returning (S), single application of bentonite (B), bentonite with straw (H), no application of bentonite and straw without returning (CK), to study the effects of bentonite and straw combination on the organic carbon content, organic carbon chemical structure and enzyme activity of the root zone soil. The results showed that both bentonite and straw application increased the soil organic carbon content to varying degrees, with H treatment significantly increasing by 19.65%, compared to CK treatment. Compared with CK treatment, only H treatment significantly increased the relative content of alkyl carbon and alkoxy carbon, as well as the aliphatic carbon/aromatic carbon ratio, by 25.53%, 18.00% and 50.98%, respectively; Only H treatment significantly reduced aromaticity by 30.93%. Compared with CK, each treatment increased the alkyl carbon/alkoxy carbon ratio, with an increase of 5.26%-17.54%, and the difference was not significant; Each treatment reduced the relative content of carboxyl carbon and aromatic carbon by 24.50%-38.19% and 1.29%-21.97%, respectively, with no significant difference. Compared with CK, the sucrase activity of S, B and H treatments was significantly increased by 12.63%-33.16%, β -glucosidase activity was significantly increased by 10.72%-45.56%, and manganese peroxidase activity was significantly increased by 25.10%-70.98%. Correlation analysis showed that soil sucrase, β -glucosidase and manganese peroxidase activities were positively correlated with organic carbon content, alkyl carbon content and alkyl carbon/alkoxy carbon ratio, but negatively correlated with carboxyl carbon and aromaticity. In summary, the combination application of bentonite and straw can increase soil organic carbon content, increase soil enzyme activity, increase active organic carbon content, activate soil organic carbon molecules, and promote good soil improvement in the arid areas of the Loess Plateau.

Key words: bentonite; straw mulching; soil organic carbon; organic carbonization structure; enzyme activity