

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.012

张咏琪, 马东豪, 谢越, 等. 添加膨润土对黄绵土有机碳积累的影响. 土壤, 2024, 56(5): 1018–1026.

添加膨润土对黄绵土有机碳积累的影响^①

张咏琪^{1,2}, 马东豪², 谢越³, 霍亚文², 杨熙^{2,4}, 张佳宝^{1,2*}

(1 山西农业大学资源环境学院, 山西晋中 030801; 2 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 211135; 3 西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室, 陕西杨凌 712100; 4 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要: 通过盆栽试验, 设置单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式, 探究了膨润土添加对黄绵土土壤有机碳积累的影响。结果表明: ①与 CK 处理相比, 单施有机物料的秸秆还田(S)、施用有机肥(O)、秸秆还田+有机肥配施(SO)、木本泥炭+生物激发剂(WE)处理均可显著提升土壤有机碳含量, 增幅分别为 14.0%、30.5%、23.9%、30.8%, 且在配施 0.2% 的膨润土(B)后有机碳增加量可进一步提高到 14.8%(BS)、35.1%(BO)、26.2%(BSO)、31.8%(BWE); ②添加膨润土的秸秆还田处理(BS)和秸秆还田+有机肥处理(BSO)较 CK 处理可以更有效地提高大团聚体(>0.25 mm)的质量分数(增幅分别为 7.8% 和 8.3%), 进而提高土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD), 增强对有机碳的物理保护作用; ③膨润土添加可以较为明显地提升矿物结合态有机碳(MAOC)含量, B、BS、BO、BSO、BWE 处理下 MAOC 含量较 CK、S、O、SO、WE 处理分别提升了 20.6%、28.2%、9.5%、9.6%、1.4%, 且配施有机肥还可以同时提升颗粒态有机碳(POC)含量, 其中 BO 和 BSO 处理分别比 O 和 SO 处理提升了 16.9% 和 11.7%; ④膨润土的添加可以通过提高土壤矿物结合态碳饱和和容量, 降低土壤碳饱和和亏缺量, 提高土壤固碳速率。此外, 通过随机森林分析发现, 碳酸钙是碱性钙质土壤有机碳饱和和亏缺的主要驱动因子, 而膨润土的添加有利于缓解碳酸钙对有机质积累的负效应。总之, 添加膨润土可以改善土壤结构, 促进干旱半干旱地区土壤有机碳的积累。

关键词: 碱性钙质土; 干旱半干旱区; 地力提升; 土壤有机碳; 土壤团聚体

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Effect of Adding Bentonite on Organic Carbon Accumulation in Loess Soil

ZHANG Yongqi^{1,2}, MA Donghao², XIE Yue³, HUO Yawen², YANG Xi^{2,4}, ZHANG Jiabao^{1,2*}

(1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801, China; 2 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University/Key Laboratory of Green and Low Carbon Agriculture on Dryland in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The effects of bentonite addition on accumulation of organic carbon in loessal soil were investigated through a potting experiment, in which two different treatment modes including single application of different organic materials and combined application of bentonite and organic materials were set. The results showed that: 1) Compared with CK, straw returned to field (S), application of organic fertilizer (O), combined application of straw + organic fertilizer (SO), and woody peat + bio-stimulant (WE) treatments could significantly increase the soil organic carbon content by 14.0%, 30.5%, 23.9% and 30.8%, respectively, and the increase of organic carbon could be further increased to 14.8% (BS), 35.1% (BO), 26.2% (BSO) and 31.8% (BWE) after 0.2% bentonite (B) was applied. 2) The bentonite added straw returning to field (BS) treatment and straw returned to field with organic fertilizer (BSO) treatment were more effective than CK treatment in increasing the mass fraction of large aggregates (>0.25 mm) by 7.8% and 8.3% respectively, and thus increasing the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) of soil aggregates, and enhancing the physical protection of organic carbon. 3) The addition of bentonite could enhance the content of mineral-associated organic carbon (MAOC), which was 20.6%, 28.2%, 9.4%, 9.6% and 1.4% higher in B, BS, BO, BSO and

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42177292)和现代农业产业技术体系专项项目(CARS-03-15, CARS-52)资助。

* 通讯作者(jbzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 张咏琪(1998—), 女, 山西原平人, 硕士研究生, 主要从事耕地土壤改良研究。E-mail: sxzhangyongqi@163.com

BWE treatments compared with CK, S, O, SO and WE treatments, respectively. And the content of particulate organic carbon (POC) could be enhanced by the application of organic fertilizer, of which the BO and BSO treatments could enhance the content of particulate organic carbon (POC). The BO and BSO treatments enhanced the POC content by 16.9% and 11.7% over the O and SO treatment, respectively. 4) The addition of bentonite could improve the soil carbon sequestration rate by increasing soil mineral binding carbon saturation capacity and reduced soil carbon saturation deficit. In addition, random forest analysis found that calcium carbonate is the main driver of organic carbon saturation deficit in alkaline calcareous soils, and the addition of bentonite is beneficial to alleviate the negative effect of calcium carbonate on organic matter accumulation. In conclusion, the addition of bentonite can improve soil structure and promote the accumulation of soil organic carbon in arid and semi-arid regions.

Key words: Alkaline calcareous soil; Arid and semi-arid regions; Land productivity improvement; Soil organic carbon; Soil aggregates

我国人多地少,粮食安全是国家安全的基石,而“耕地是粮食生产的命根子”^[1]。在种子、化肥和水资源潜力充分挖掘的前提下,粮食进一步增产的潜力在于中低产田改造。中低产田改造的重点任务之一是农田内稳性地力提升,其实质是土壤有机质-结构-微生物的协同提升,关键是土壤有机质的提升^[2-3]。受土壤、气候和种植制度等的影响,土壤有机碳积累的关键过程不尽相同,制约了农田地力提升策略的制订。北方干旱半干旱区占国土总面积的 56%,耕地面积 0.51 亿 hm^2 , 约占全国总耕地面积的 51%,是我国农业生产的重要区域^[4]。但是,北方干旱半干旱区耕地多属中低产田,耕层质地较粗,矿物结合态有机碳(MAOC)饱和点低;碱性钙质土有机碳积累难,即使培肥多年,其有机碳含量也常停留在较低水平。因此,如何有效提升土壤有机碳含量,增强土壤有机碳的固存能力,提升农田内稳性地力是区域农业发展的重要任务。

土壤有机质是最大的土壤有机碳库^[5]。有机碳在土壤中能较为稳定存在很大程度上取决于土壤有机质的 3 种保护机制:与矿物表面相互作用的化学保护;团聚体遮挡的物理保护;以及形成顽固有机质化合物的生化保护^[6]。通常,矿物结合被认为是温带土壤有机碳最重要的稳定机制^[7]。Hassink^[8]的结果表明,矿物结合态有机质是主要的土壤碳库,其稳定有机碳的最大能力受到土壤中粉砂和黏土含量限制。此外,大量研究指出,与颗粒态有机碳(POC)相比,MAOC 是土壤总碳库中更稳定的部分,对团聚体稳定性的影响也更大,增加 MAOC 可能是增强土壤物理和化学保护进而持久固碳的关键^[9-10]。

有机物料如有机肥、秸秆等的添加是提高农田土壤有机碳的常用途径,但在质地较粗的干旱半干旱地区,农田土壤团聚结构较差,有机碳缺乏有效的物理

和化学保护,提升效果有限^[11]。有研究表明,黏粒是土壤中化学活性最强的颗粒,其数量与土壤有机碳含量具有很强的正相关性,是影响团聚体稳定性的主要因素之一^[12]。土壤中丰富的活性矿物质的存在可以促进 MAOC 的形成,对有机碳积累起着至关重要的作用^[13]。向有机质含量低的粗质地土壤中添加黏粒可以促进团聚体的合成,提高土壤有机碳稳定性,进而起到提高并稳定土壤有机质的作用^[14]。膨润土是富含黏粒的黏土矿物,具有强吸附性、膨胀性、黏结性和阳离子交换能力^[15]。罗瑞华等^[16]研究发现,膨润土与木本泥炭配施一定程度上提升了土壤有机碳含量并改良了土壤理化性质。胡怀舟等^[17]研究表明,在秸秆还田基础上配施膨润土与有机肥可有效提高土壤有机质及养分库容。尽管目前有少量研究表明,添加外源黏粒基质对土壤有机碳的积累及土壤结构的改良具有积极作用,但在我国北方干旱半干旱地区,外源黏粒基质添加对碱性钙质土壤有机碳积累的机制和作用效果尚不清楚。

黄绵土质地较粗,有机碳的稳定性较低,是我国典型的碱性钙质土,耕地面积约占黄土高原的 80%,是分布较广的一个土类^[18]。由此,本研究选择黄绵土进行试验,通过单施不同有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式,探究膨润土添加对黄绵土有机碳积累的影响及其机制,以及土壤 MAOC 最大饱和容量及饱和亏缺特征,以期对碱性钙质土壤改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试耕地土壤采自鄂尔多斯准格尔旗(39°16'N, 110°05'E),土壤类型为黄绵土,其基本理化性质为:砂粒 70.8%,粉粒 14.4% 和黏粒 14.8%,pH 8.61,

有机碳 3.16 g/kg, 全氮 0.1 g/kg, 有效磷 12.2 mg/kg, 速效钾 23.1 mg/kg, 碳酸钙 59.53 g/kg。供试膨润土、有机肥、木本泥炭、生物激发剂均从市场购置。其中小麦秸秆、有机肥、木本泥炭与生物激发剂的全氮含量分别为 7.3、24.3、6.0 和 2.0 g/kg; 有机碳含量分别为 420.0、299.6、416.0 和 268.9 g/kg。供试小麦品种为六合宁麦 13。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2022 年 2—7 月进行, 于江苏省南京市丰硕欢乐农场开展, 处于一个完全通风、防雨的室内温室中。将田间采集的土壤风干后除去石砾和植物残根等, 过 2 mm 筛充分混匀后备用。试验共设置 10 个处理(表 1), 每个处理重复 3 次。试验用盆高 22 cm, 内径 18 cm, 土壤容重为 1.3 g/cm³。纯秸秆还田处理的秸秆添加量为土壤质量的 1%, 其余处理参照纯秸秆还田处理的碳添加量进行等碳处理, 与秸秆配施处理的秸秆添加量为土壤质量的 0.5%, 木本泥炭与生物激发剂按 2 : 1 进行配施, 膨润土添加量为土壤质量的 0.2%。各处理在播种前均施入基肥(N 0.15 g/kg, P 0.30 g/kg, K 0.45 g/kg, 其中氮肥为尿素, 磷肥为磷酸氢二铵, 钾肥为氯化钾), 并分别在配置好的试验盆中播种 13 粒颗粒饱满的种子。试验期间定期称重补水, 控制土壤含水量为田间持水量的 70%。土壤样品的采集与测定在 2022 年 7 月小麦收获后进行, 一部分土样自然风干后, 过 2 mm 筛, 用于理化性质测定; 一部分原状土土样装入硬质塑料盒, 沿着自然结构掰成小块, 去除植物根和砾石等, 过 8 mm 筛, 自然风干, 用于团聚体分析。

表 1 试验处理及代码
Table 1 Treatments and codes of test

处理	代码	处理	代码
空白对照	CK	膨润土	B
小麦秸秆还田	S	膨润土+小麦秸秆还田	BS
施用有机肥	O	膨润土+施用有机肥	BO
小麦秸秆还田+有机肥	SO	膨润土+小麦秸秆还田+有机肥	BSO
木本泥炭+生物激发剂	WE	膨润土+木本泥炭+生物激发剂	BWE

1.3 测定项目与方法

土壤团聚体的分级^[19-20]: 首先使用干筛法将土壤团聚体分为 4 个粒级(>2、0.25 ~ 2、0.053 ~ 0.25、<0.053 mm); 然后将获得的各级土壤样品进行称重, 并按照各粒级团聚体百分含量配成 100 g 土样; 再采用湿筛-离心法将土样按 >0.25、0.053 ~ 0.25、0.002 ~

0.053、<0.002 mm 分为 4 个水稳定性粒级, 在 60 °C 下烘干至恒重, 计算不同粒径的团聚体质量分数。

土壤颗粒态有机碳(POC)、矿物结合态有机碳(MAOC)组分测定参考 Cambardella 和 Elliott^[21]报道的方法: 称取 10.00 g 过 2 mm 筛的风干土于 100 mL 离心管中, 加入 5% 的六偏磷酸钠 50 mL, 在振荡机上振荡 18 h(180 r/min), 将土壤溶液冲洗至 0.053 mm 的筛子上(冲洗至流下筛子的液体几乎澄清), 流出液置于铝盒中, 并将筛子上的土样转移至铝盒中, 二者在 60 °C 下烘干称重。通过筛网的组分为 MAOC 组分, 筛上剩余的部分为 POC 组分。

土壤理化性质^[22]的测定: 全土、POC 组分、MAOC 组分及各级水稳性团聚体中有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定; pH 采用电极法测定; 全氮采用凯氏定氮法测定; 有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定; 碳酸钙采用气量法测定; 交换态钙采用 ICP-OES 法测定。

1.4 数据处理与统计分析

水稳性团聚体的稳定性用平均重量直径(MWD, mm)和几何平均直径(GWD, mm)表征^[23]。计算公式如下:

$$MWD = \sum_i^n x_i w_i / \sum_i^n w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_i^n w_i \ln x_i}{\sum_i^n w_i} \right) \quad (2)$$

式中: x_i 为第 i 级水稳性团聚体平均直径(mm); w_i 为第 i 级水稳性团聚体质量分数(%)。

各级团聚体中有机碳对全土有机碳的贡献率采用下式进行计算:

$$\text{团聚体中有机碳贡献率(\%)} = \frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体质量分数}}{\text{土壤中总有机碳含量}} \times 100 \quad (3)$$

土壤碳饱和和亏缺的计算基于 Six 等^[24]的方法, 采用以下公式进行计算:

$$C_{\max} = 0.21x + 14.76 \quad (4)$$

$$C_{\max} = 0.26x + 5.5 \quad (5)$$

$$C_{\text{sd}} = 100 - C_{\text{cur}} / C_{\max} \times 100 \quad (6)$$

式中: C_{\max} 为土壤碳饱和度(g/kg), x 为 MAOC 组分(<0.053 mm)的质量分数(%); C_{cur} 为当前 MAOC 含量(g/kg); C_{sd} 为土壤碳饱和和亏缺(%). 公式(4)用于以 2 : 1 型黏土矿物为主的土壤, 公式(5)用于以 1 : 1 型黏土

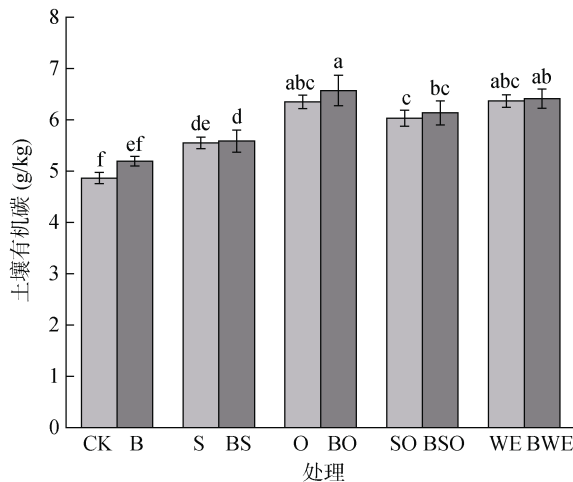
矿物为主的土壤，本研究供试土壤黄绵土为 2 : 1 型黏土矿物。

使用 Excel 2019 软件和 Origin 2021 软件对数据进行整理和绘图，使用 R 语言(4.1.3)中的 Random Forest 包进行影响因素的相对重要性分析，使用 SPSS 22 软件对数据进行单因素方差分析及显著性检验 (LSD 法, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量

由图 1 可知，单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种不同处理模式均可以增加土壤有机碳含量。与 CK 处理相比，单施有机物料的 S、O、SO、WE 处理均可显著提升土壤有机碳含量，增幅分别为 14.0%、30.5%、23.9%、30.8%；膨润土与有机物料配施的 BS、BO、BSO、BWE 处理下有机碳含量分别显著提升了 14.8%、35.1%、26.2%、31.8%。与不添加膨润土的 5 种处理相比，添加膨润土的有机物料处理均不同程度地提升了土壤有机碳含量，相对于 S、O、SO、WE 处理，添加膨润土后，有机碳在 BS、BO、BSO、BWE 处理下的增加量分别提高了 5.2%、15.1%、9.3%、3.1%。



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)；下同)

图 1 不同处理方式下土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon contents under different treatments

2.2 土壤团聚体粒径分布和稳定性

由表 2 可知，单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种不同处理模式下土壤水稳性团聚体的组成存在显著差异。大团聚体(>0.25 mm)是各处理中土壤团聚体的最大组成部分，单施有机物料模式下其质量分数为 64.12% ~ 69.13%，膨润土与有机物料配施模式下其质量分数为 66.37% ~ 70.18%。与 CK 处理相

比，S 和 SO 处理可以显著提高 >0.25 mm 粒径土壤团聚体质量分数，增幅为 6.3% 和 6.7%；BS 处理显著提高大团聚体(>0.25 mm)的质量分数，增幅为 7.8%，BSO 处理显著提高大团聚体(>0.25 mm)以及微团聚体(<0.002 mm)的质量分数，增幅分别为 8.3%、38.5%；B、BO 和 BWE 处理对 >0.25 mm 粒径团聚体质量分数的影响未达到显著水平，但显著提高了 <0.002 mm 粒径团聚体质量分数，增幅分别为 64.5%、47.7% 和 43.0%。

表 2 土壤水稳性团聚体质量组成比例

Table 2 Mass proportions of water-stable aggregates under different treatments

处理	水稳性团聚体质量分数(%)			
	>0.25 mm	0.053 ~ 0.25 mm	0.002 ~ 0.053 mm	<0.002 mm
CK	64.80 bc	30.91 ab	3.82 a	0.47 cd
S	68.85 ab	27.25 bcd	3.48 a	0.42 d
O	64.12 c	32.27 a	3.05 a	0.56 bcd
SO	69.13 a	27.53 bcd	2.74 a	0.60 bc
WE	65.95 abc	30.55 abc	2.92 a	0.57 bcd
B	68.45 ab	27.15 cd	3.62 a	0.77 a
BS	69.83 a	26.24 d	3.31 a	0.63 abc
BO	66.37 abc	29.87 abcd	3.07 a	0.69 ab
BSO	70.18 a	26.16 d	2.82 a	0.65 ab
BWE	66.72 abc	29.11 abcd	3.50 a	0.67 ab

注：表中同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

各处理对团聚体水稳性指标(MWD、GMD)的影响如图 2 所示，膨润土与有机物料配施模式下的 MWD 值均高于单施有机物料模式。与 CK 处理相比，BS、BSO 处理均显著增加了 MWD 值。在 BSO 处理下 MWD 值达到最大，为 2.94。不同处理下水稳性团聚体 GMD 变化规律与 MWD 基本一致，BS、BSO 处理均可显著提高 GWD 值，BSO 处理下 GWD 值最高，为 1.42。

2.3 土壤不同组分有机碳含量及各级团聚体有机碳贡献率

由图 3 可知，单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式均不同程度提高了 POC 与 MAOC 含量。与 CK 处理相比，O、SO、WE 处理下可以显著提升 POC 含量与 MAOC 含量，增幅分别为 39.8%、34.7%、62.6% 和 24.9%、18.4%、23.1%；在施用有机肥(O 和 SO)的情况下，配施膨润土(BO 和 BSO)可将 POC 的增量进一步提升到 16.9% 和 11.7%；但是，膨润土添加(BWE)不会进一步改善 WE 处理的 POC 提升效果，单纯的秸秆还田(S)对 POC 和 MAOC 的

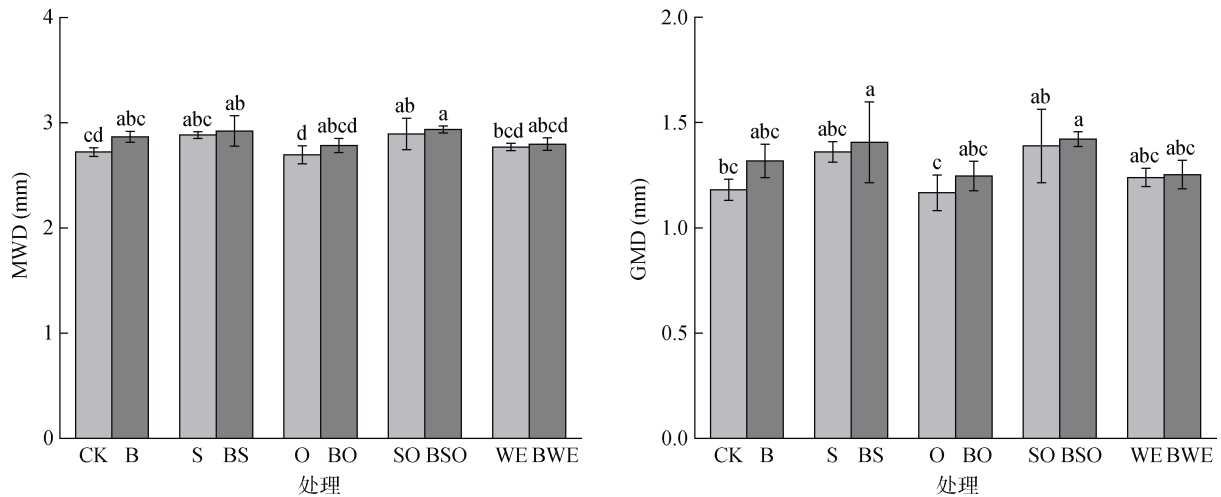


图 2 不同处理下水稳性团聚体稳定性指标
Fig. 2 Stability parameters of water-stable aggregates under different treatments

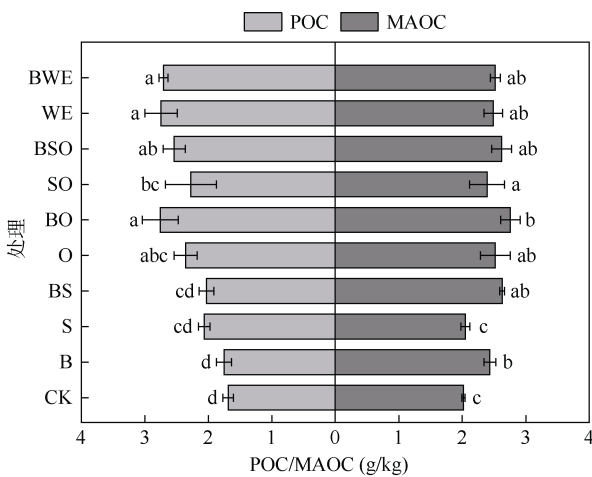


图 3 不同处理下 POC 与 MAOC 含量
Fig. 3 POC and MAOC contents under different treatments

提升效果都不显著,除了 WE 处理,膨润土添加在所有处理中都较大程度促进了 MAOC 的提升。相比于不添加膨润土的 CK、S、O、SO 和 WE 处理, B、BS、BO、BSO 和 BWE 处理的 MAOC 分别增加了 20.6%、28.2%、9.4%、9.6% 和 1.4%。

由表 3 可知,有机物料和膨润土的添加影响团聚体有机碳贡献率。各处理中有机碳主要分布在 >0.25 mm 的大团聚体中, <0.002 mm 的团聚体中贡献率较小,但相对含量较高。与 CK 处理相比,添加膨润土均可以提高 >0.25 mm 大团聚体和 <0.002 mm 微团聚体有机碳贡献率, B、BS、BO、BSO、BWE 处理下 >0.25 mm 大团聚体有机碳贡献率增幅分别为 2.4%、9.8%、4.8%、14.8%、4.4%; <0.002 mm 微团聚体有机碳贡献率分别为 16.5%、17.4%、19.2%、7.2%、8.5%。与不添加膨润土处理(S、O、SO、WE)相比,添加膨润土的有机物料处理(BS、BO、BSO、

BWE)分别将 >0.25 mm 土壤团聚体有机碳贡献率提高了 4.4%、4.9%、9.9%、5.0%。

表 3 土壤各级团聚体对全土有机碳的贡献率
Table 3 Contribution rates of aggregates with different sizes to total soil organic carbon

处理	不同粒径团聚体有机碳贡献率(%)			
	>0.25 mm	0.053 ~ 0.25 mm	0.002 ~ 0.053 mm	<0.002 mm
CK	58.60 b	32.31 a	3.21 a	1.24 a
S	61.66 ab	27.87 ab	2.93 ab	1.45 a
O	58.57 b	28.43 ab	2.70 ab	1.27 a
SO	61.20 ab	26.22 bc	2.15 b	1.29 a
WE	58.27 b	28.07 ab	2.64 ab	1.30 a
B	60.01 ab	26.66 bc	2.88 ab	1.44 a
BS	64.36 ab	25.22 bc	2.29 ab	1.45 a
BO	61.43 ab	24.61 bc	2.59 ab	1.48 a
BSO	67.25 a	22.28 c	2.40 ab	1.33 a
BWE	61.17 ab	28.46 ab	3.12 ab	1.34 a

2.4 土壤碳饱和和亏缺特征及各因素重要性

由图 4 可知,单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式均不同程度降低了土壤碳饱和和亏缺。与 CK 处理相比,单施有机物料的处理中,除 S 处理外, O、SO、WE 处理均显著降低了土壤碳饱和和亏缺,降幅分别为 3.9%、2.9%、3.6%,而添加膨润土的有机物料处理均显著降低了土壤碳饱和和亏缺, BS、BO、BSO、BWE 处理下分别降低了 4.8%、5.8%、4.7%、3.9%。与单施有机物料处理(S、O、SO、WE)相比,添加膨润土的有机物料处理(BS、BO、BSO、BWE)均降低了土壤碳饱和和亏缺,降幅分别为 4.5%、1.9%、1.8%、0.3%。通过 Pearson 相关性分析(图 5)可知,除速效钾外,其余因素均与土壤碳饱和和亏缺呈

负相关关系；利用随机森林模型进一步分析各因素对土壤碳饱和和亏缺变化的相对重要性，其中碳酸钙对土壤碳饱和和亏缺变化的相对重要性最高，为 24.83%；其次为土壤有效磷、有机碳，其相对重要性分别为 18.21%、13.36%；其余指标相对重要性较弱。

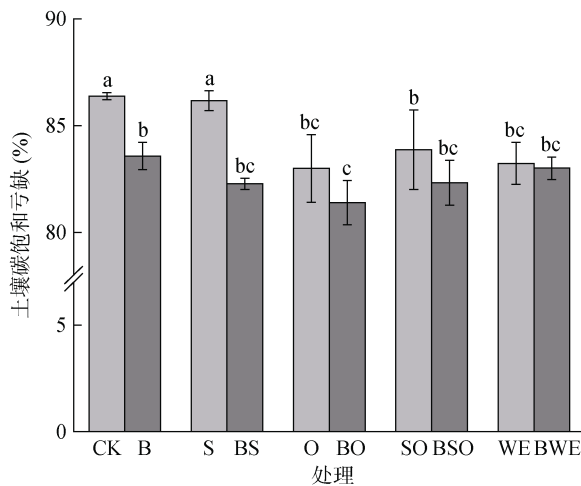
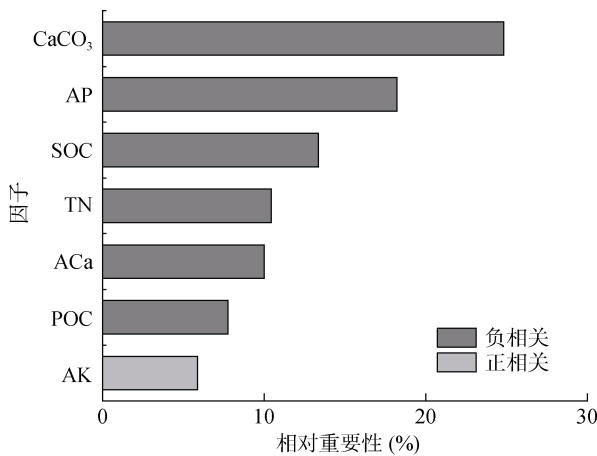


图 4 不同处理方式下土壤碳饱和和亏缺

Fig. 4 Soil carbon saturations and deficits under different treatment methods



(SOC: 土壤有机碳; POC: 颗粒态有机碳; CaCO₃: 碳酸钙; Aca: 交换态钙; TN: 全氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾)

图 5 各因素影响土壤碳饱和和亏缺变化的相对重要性
Fig. 5 Relative importance of factors affecting change of soil carbon saturation and deficit

3 讨论

3.1 添加膨润土对土壤有机碳积累的影响

砂质土壤质地较粗，缺乏细孔，与黏质土壤相比，保护有机碳免被土壤微生物分解的能力小。Mi 等^[25]发现连续 5 年施加膨润土显著提高了土壤有机碳储量，展现了膨润土对改善干旱或半干旱农田土壤的潜力。Karbout 等^[26]指出在干旱和半干旱地区矿物和有机物料的结合延缓了土壤有机碳的分解，是保存土壤

有机碳更好的选择。本研究结果表明，相较无膨润土添加的有机物处理，膨润土与有机物料配施的处理模式更有利于提升土壤有机碳含量，这与 Karbout 等^[27]的研究结果基本一致。由于膨润土的黏粒含量较高，通过膨润土与有机物料配施，促进了土壤有机矿物复合体的形成，加强了土壤对有机碳的化学保护^[28]。

土壤碳饱和和亏缺是反映土壤有机碳未来固碳潜力水平或固碳空间大小的关键性指标^[29]。本研究发现，CK 处理下的黄绵土土壤碳饱和和亏缺为 86.38%，表明其固碳潜力较大；相比于单施有机物料处理，膨润土的添加均降低了土壤碳饱和和亏缺，其中 BO 处理较 CK 处理对固碳潜力的影响最大。土壤碳饱和和亏缺受多因素相互影响，本研究表明碳酸钙、有效磷与土壤碳饱和和亏缺呈负相关关系，碳酸钙对该土壤碳饱和和亏缺影响较大，有效磷次之。张丽敏等^[30]指出可以控制土壤磷素水平来影响土壤有机碳饱和和亏缺，二者呈显著的负相关关系，与本研究结果大致相同。碳酸钙是黏粒和有机质含量低的钙质土壤中重要的胶结物质之一^[31]。陶澍等^[32]指出碳酸钙含量过高会影响微团聚体有机碳积累，Ca²⁺和次生碳酸钙有可能会抢占有机碳结合的位点，直接形成微团聚结构，致使有机碳得不到有效保护。本研究结果表明，在黄绵土中添加黏粒基质可能有助于缓解碳酸钙带来的负效应，使 MAOC 在黏土矿物(<53 μm)作用下得到较强的物理、化学及生物化学的交替保护^[33]，减缓土壤有机碳的矿化，促进土壤有机碳的积累。

3.2 添加膨润土对颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳含量的影响

土壤中的碳固存不是一个单一的过程，不同的环境背景下颗粒态有机质和矿物结合态有机质的形成途径具有不同的相关性，对多数土壤来说，在 MAOC 构建的同时构建 POC，才能最大限度地实现碳固存^[13]。POC 主要来自于植物，是游离有机质的一部分，更容易受到耕作的影响，相比之下 MAOC 是与矿物质结合或聚集在细微团聚体中的有机分子，土壤总碳库中更稳定的部分，其形成的可能机制包括氢键、阳离子桥接、阴离子交换、配体交换和范德华力^[10]。黄绵土质地较粗，活性矿物比例较低，无法积累大量 MAOC。膨润土具有较大的比表面积和较强的吸附能力，在有机物料的基础上添加黏粒基质对 POC 与 MAOC 的形成具有积极作用，在碳固存方面更具潜力。本研究结果表明，单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式均不同程度地提升了 POC 与 MAOC 含量；与单施有机物料处理相比，

膨润土的添加更有利于 MAOC 含量提升,这与 Sun 等^[34]研究结果基本一致。与 WE 处理相比,膨润土的添加(BWE)对 MAOC 的影响较小,这可能是由于本研究中的膨润土添加量较低导致的。付威等^[35]指出土壤有机质变化量随着土壤黏粒含量增加,呈现先降低后增加的趋势,不同黏粒含量的添加对外源有机物质在土壤中的稳定性可能不同。本研究同样表明,不施有机肥的情况下,膨润土添加对 POC 影响不大;配施有机肥时,膨润土添加可有效增加 POC 含量,黏土矿物有可能对腐化程度较高的有机肥中的 POC 有弱相互作用,形成一定固持或保护,但对腐化程度较轻的秸秆残体形态的 POC 缺乏作用,这可能是导致本研究结果的主要原因。

3.3 添加黏粒基质对土壤团聚体稳定性及团聚体有机碳贡献率的影响

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,其分布比例和稳定性变化在一定程度上反映了土壤的物理性质^[36]。碳酸钙是土壤团聚体形成的重要因子,但形成的团聚体稳定性差,土壤中缺乏黏粒,导致土壤分散后再团聚困难^[37]。微团聚体是土壤良好结构体的基础,黏粒可以通过自身的凝聚作用形成微团聚体,对土壤团聚体形成具有重大意义。本研究结果表明,与单施有机物料处理相比,在施加有机物料的基础上添加膨润土有利于形成土壤大团聚体(>0.25 mm),提高微团聚体(<0.002 mm)所占比例,并相应降低了 0.053 ~ 0.25 mm 和 0.002 ~ 0.053 mm 粒径团聚体质量分数;相较于 CK 处理,BSO 处理效果最好,能显著提高大团聚体(>0.25 mm)与微团聚体(<0.002 mm)的质量分数,与王钰皓等^[38]、Zhou 等^[39]研究结果大致相同。MWD、GMD 值是评价团聚体稳定性的关键指标,其值越大,说明土壤结构越好,稳定性越强^[40]。本研究发现,增加黏粒含量有利于增强团聚体稳定性,其中 BS 和 BSO 处理对 MWD、GMD 值提升效果显著,BSO 处理 MWD、GMD 值最高。秸秆与有机肥作为外源有机物质,含有较高的可利用养分含量,有助于改善土壤结构,促进团聚体的形成^[41-42];膨润土作为黏土矿物具有较高的 CEC 和表面积,具有良好的黏结性和吸附性,团聚作用较强。二者分别作为有机、无机胶结剂,可形成有机无机复合体,进而增强土壤团聚性和稳定性^[6,43]。

土壤有机碳积累与团聚体形成、分布、稳定性密切相关。土壤大团聚体中一般含有较多的有机碳,易发生矿化,属于不稳定的有机碳;小团聚体中的有机碳则大多是高度腐殖化的惰性组分,更新周期长、相

对稳定^[44]。本研究表明,土壤有机碳的积累主要发生在大团聚体中,在有机物料的基础上添加黏粒基质在一定程度上提高 >0.25 mm 和 <0.002 mm 土壤团聚体有机碳贡献率,以 BSO 处理效果最好。Pang 等^[45]和王威等^[46]研究表明,秸秆还田能够提高土壤 >0.25 mm 团聚体有机碳含量,提高大团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献,在施加有机物料的基础上添加黏粒基质更有利于土壤固碳并提高团聚体固碳量,本研究结果与其大体一致。向土壤中施加的膨润土通过吸附作用形成了矿物有机碳复合体,进一步结合形成大小不一的多孔土壤团聚体,使团聚体在土壤中更稳定地存在^[47],进而增强了团聚体对有机碳的物理保护,为土壤有机质提高和保持提供保障。

此外,本研究仅针对等量的膨润土添加效果进行了初步的探讨,对于哪种类型的黏粒基质及其用量和施用方式更有利于土壤有机碳的积累尚不清楚,后续研究将进一步探究外源黏粒基质的类型、用量、施用方式等对土壤有机碳积累的影响,并结合田间试验数据进行进一步的验证。

4 结论

单施有机物料、膨润土与有机物料配施两种处理模式对黄绵土有机碳含量均有不同程度的提升,膨润土添加有助于加强与矿物表面相互作用的化学保护,促进 MAOC 的形成,与有机肥配施可同时提升 POC 含量;膨润土与有机物料配施处理可增强土壤团聚性和稳定性,使土壤有机碳得到较强的物理保护,其中 BSO 处理下综合效果最好。总体而言,膨润土的添加可以减缓土壤有机碳的矿化,增强土壤对有机碳的保蓄能力,进而提高土壤固碳速率,对土壤有机质的长期稳定具有重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘洪彬,李顺婷,吴梦瑶,等.耕地数量、质量、生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J].土壤通报,2021,52(3):544-552.
- [2] 潘根兴,丁元君,陈硕桐,等.从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J].地球科学进展,2019,34(5):451-470.
- [3] Chenu C, Angers D A, Barré P, et al. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 188: 41-52.
- [4] 农业农村部新闻办公室.2019年全国耕地质量等级情况公报[J].中国农业综合开发,2020(6):6-12.
- [5] Badagliacca G, Petrovičová B, Pathan S I, et al. Use of solid anaerobic digestate and no-tillage practice for

- restoring the fertility status of two Mediterranean orchard soils with contrasting properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300: 107010.
- [6] Barré P, Fernandez-Ugalde O, Virto I, et al. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: Incomplete knowledge and exciting prospects[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 382–395.
- [7] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt 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(4): 426–445.
- [8] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77–87.
- [9] Georgiou K, Jackson R B, Vinduškova O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3797.
- [10] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261–273.
- [11] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695–2702.
- [12] 安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 等. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 45–50.
- [13] Angst G, Mueller K E, Castellano M J, et al. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: Multi-pool management as the key[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2967.
- [14] Wei H, Guenet B, Vicca S, et al. High clay content accelerates the decomposition of fresh organic matter in artificial soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 100–108.
- [15] 郑毅, 周磊, 刘景辉. 膨润土-腐殖酸型改良剂对沙质土壤氮素气态损失、氮肥利用率和玉米产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3887–3894.
- [16] 罗瑞华, 付威, 樊军, 等. 添加外源有机物和黏粒材料对沙黄土有机碳和菠菜生长的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 464–472.
- [17] 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.
- [18] 黄自立. 陕北地区黄绵土分类的研究[J]. *土壤学报*, 1987, 24(3): 266–271.
- [19] Sheldrick B H, Wang C. Particle size distribution. In: Carter M R, eds. *Soil sampling and methods of analysis* [M]. Canadian Society of Soil Science. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, Division of CRC Press, 1993, 499–511.
- [20] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. *CATENA*, 2017, 156: 176–183.
- [21] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [22] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1): 142–147.
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [25] Mi J Z, Gregorich E G, Xu S T, et al. Changes in soil biochemical properties following application of bentonite as a soil amendment[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 102: 103251.
- [26] Karbout N, Brahim N, Mlih R, et al. Bentonite clay combined with organic amendments to enhance soil fertility in oasis agrosystem[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 428.
- [27] Karbout N, Mlih R, Latifa D, et al. Farm manure and bentonite clay amendments enhance the date palm morphology and yield[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(9): 818.
- [28] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance?[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(1): 25–56.
- [29] Guan J H, Deng L, Zhang J G, et al. Soil organic carbon density and its driving factors in forest ecosystems across a northwestern province in China[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 1–12.
- [30] 张丽敏, 陈进, 王阳, 等. 茂兰不同演替阶段土壤有机碳饱和与亏缺特征及主要驱动因子[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(1): 396–405.
- [31] 张耀方, 赵世伟, 王子龙, 等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 145–150.
- [32] 陶灏, 马东豪, 张丛志, 等. 石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 715–722.
- [33] Stegarescu G, Escuer-Gatius J, Soosaar K, et al. Effect of crop residue decomposition on soil aggregate stability[J]. *Agriculture*, 2020, 10(11): 527.
- [34] Sun Q, Yang X, Bao Z R, et al. Responses of microbial necromass carbon and microbial community structure to straw- and straw-derived biochar in brown earth soil of Northeast China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 967746.
- [35] 付威, 雍晨旭, 马东豪, 等. 黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 252–261.
- [36] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.

- [37] Clough A, Skjemstad J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. *Soil Research*, 2000, 38(5): 1005.
- [38] 王钰皓, 庞津雯, 卫婷等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. *土壤学报*. 2024, 61(1): 274–282.
- [39] Zhou L, Monreal C M, Xu S T, 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.
- [40] Qiao X X, Wang C, Feng M C, et al. Hyperspectral response and quantitative estimation on soil aggregate characters[J]. *CATENA*, 2021, 202: 105286.
- [41] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627–643.
- [42] Yu K, Dong Q G, Chen H X, et al. Incorporation of pre-treated straw improves soil aggregate stability and increases crop productivity[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(5): 2253–2265.
- [43] Olagoke F K, Bettermann A, Nguyen P T B, et al. Importance of substrate quality and clay content on microbial extracellular polymeric substances production and aggregate stability in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2022, 58(4): 435–457.
- [44] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. *Geoderma*, 2016, 272: 39–50.
- [45] Pang D W, Chen J, Jin M, et al. Changes in soil micro- and macro-aggregate associated carbon storage following straw incorporation[J]. *CATENA*, 2020, 190: 104555.
- [46] 王威, 唐蛟, 殷金忠, 等. 秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(1): 53–61.
- [47] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4115.