

# 有机物料添加对黑垆土和黄绵土 有机碳组分的影响

王丹丹<sup>1</sup>, 赵欢欢<sup>1</sup>, 许晨阳<sup>1,4</sup>, 李江文<sup>2,3</sup>, 胡斐南<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 水土保持与荒漠化整治国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究 12 种不同外源有机物料, 包括烟杆生物炭、果木枝条生物炭、小麦秸秆、油菜秸秆、鸡粪、牛粪、葡萄糖、纤维素、LB 培养基、聚丙烯酰胺(PAM)、腐植酸肥、壳聚糖, 对典型黄土(黑垆土与黄绵土)理化特性及土壤有机碳组分的影响, 为农田土壤质量提升过程中有机改良剂的选择与应用提供理论依据。[方法] 将有机物料与风干土壤以 3% 的质量比混合, 并进行 100 d 的室内培养试验, 同时设置不添加有机物料为对照组(CK)。利用密度浮选结合湿筛的方法分离并计算土壤游离态颗粒有机碳(FPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(OPOC)、颗粒态有机碳(POC)和矿质结合态有机碳(MOC) 4 个有机碳组分, 通过冗余分析(RDA)对土壤理化性质与有机碳组分之间的关系进行解析。[结果] ①与 CK 相比, 有机物料添加能够有效降低两种典型黄土的碳酸钙含量, 提高土壤电导率、TOC 以及全氮(纤维素添加除外)含量。②与 CK 相比, 土壤中 FPOC, OPOC, POC 和 MOC 含量均有所提高, 其中以果木枝条生物炭、烟杆生物炭、小麦秸秆添加处理下的 FPOC 增量最大, 黑垆土中相应各指标分别提高了 2 158.5%, 1 545.3%, 907.5%, 黄绵土中各指标含量分别提高了 2 971.8%, 1 717.9%, 1 730.8%。③FPOC, OPOC, POC 和 MOC 含量与 TOC 呈极显著的正相关关系( $p < 0.01$ )。C/N 及全氮含量是影响土壤各组分有机碳含量的主要原因, 其解释率在黑垆土和黄绵土中分别达到了 76.1% 和 76.3%。[结论] 有机物料添加使 TOC 含量升高, 有效地改善了土壤理化性质, 使土壤 FPOC, OPOC, POC 和 MOC 含量与 CK 相比均有所提高。C/N 及全氮含量是影响土壤各组分有机碳含量的主控因素。

**关键词:** 秸秆; 生物炭; 颗粒态有机碳; 有机碳组分; 矿质结合态有机碳; 黑垆土; 黄绵土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0267-10

中图分类号: S156.2

**文献参数:** 王丹丹, 赵欢欢, 许晨阳, 等. 有机物料添加对黑垆土和黄绵土有机碳组分的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 267-276. Wang Dandan, Zhao Huanhuan, Xu Chenyang, et al. Effects of organic material addition on organic carbon fractions in black loessial and loessial soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 267-276. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.019; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.019.

## Effects of organic material addition on organic carbon fractions in black loessial and loessial soils

Wang Dandan<sup>1</sup>, Zhao Huanhuan<sup>1</sup>, Xu Chenyang<sup>1,4</sup>, Li Jiangwen<sup>2,3</sup>, Hu Feinan<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil and

Water Conservation and Desertification Control, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Key Laboratory of Plant Nutrition and

Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of 12 different exogenous organic materials, including tobacco stalk biochar,

收稿日期: 2025-03-18

修回日期: 2025-04-27

采用日期: 2025-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“有机物质影响黄土区土壤结构稳定性的介尺度调控机理”(42277311)

第一作者: 王丹丹(1999—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤结构改良。Email: WangDanDan5635@163.com。

通信作者: 胡斐南(1986—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤化学与水土保持研究。Email: hufn@nwfau.edu.cn。

fruit tree branch biochar, wheat straw, rapeseed straw, chicken manure, cow manure, glucose, cellulose, LB medium, polyacrylamide (PAM), humic acid fertilizer and chitosan, on the physicochemical properties and soil organic carbon fractions of typical loess (black loessial and loessial soils) were studied to provide a theoretical basis for selecting and applying organic soil conditioners to improve the quality of cultivated soil. [Methods] Organic materials were mixed with air-dried soil at a mass ratio of 3%, and a 100-day indoor incubation experiment was conducted using a control group (CK) without organic material addition. Density flotation combined with wet sieving was used to separate and quantify four organic carbon fractions: free particulate organic carbon (FPOC), occluded particulate organic carbon (OPOC), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MOC). Redundancy analysis was performed to analyze the relationships between soil physicochemical properties and organic carbon fractions. [Results] ① Compared with CK, the addition of organic materials effectively reduced the calcium carbonate content of the two typical loess soils and increased the soil electrical conductivity, TOC and total nitrogen (except for cellulose addition). ② Compared with CK, the contents of FPOC, OPOC, POC, and MOC in the soil increased, with the largest increments in FPOC observed under treatments with fruit tree branch biochar, tobacco stalk biochar and wheat straw. In black loessial soil, the corresponding indicators increased by 2 158.5%, 1 545.3%, and 907.5%, respectively, whereas in loessial soil, the increases were 2 971.8%, 1 717.9% and 1 730.8%, respectively. ③ A highly significant positive correlation was noted between FPOC, OPOC, POC, MOC contents and TOC ( $p < 0.01$ ). The C/N ratio and total nitrogen content were the primary factors influencing the organic carbon content of the soil components, with explanation rates reaching 76.1% and 76.3% in black loessial and loessial soils, respectively. [Conclusion] The addition of organic materials increased TOC content, and effectively improved soil physicochemical properties. Compared with CK, the contents of FPOC, OPOC, POC, and MOC in the soil increased. The C/N ratio and total nitrogen content were the dominant factors influencing the organic carbon content of the soil components.

**Keywords:** straw; biochar; particulate organic carbon; organic carbon fractions; mineral-associated organic carbon; black loessial soil; loessial soil

土壤有机质(soil organic matter, SOM)作为土壤中不可或缺的重要组分,深刻影响着其物理结构、化学特性及生物活性,在农业生态系统中扮演着多重关键角色。它不仅是土壤养分储存库,还驱动着微生物群落的活动与养分循环过程,有效促进土壤结构优化和保水能力提升,显著降低土壤侵蚀风险<sup>[1-2]</sup>。SOM的数量与质量,直接关系到土壤的整体肥力及农业生产水平<sup>[3]</sup>。

外源有机物料添加长期被视为改良土壤质量的有效策略,通过增加土壤有机输入,显著改变SOM的数量与质量,进而优化土壤环境。然而,单纯依赖土壤总有机碳(total organic carbon, TOC)含量作为评估指标存在局限性,它仅能反映有机碳的总体变化,难以全面揭示土壤质量内在的动态变化过程<sup>[4]</sup>。因此,深入探索SOM功能性组分及其动态变化,是解析土壤质量提升原理的关键。土壤有机碳物理分组方法对土壤颗粒和有机碳的破坏性低,直接反映土壤结构与功能特性,因而受到广泛关注。该方法将土壤有机碳分为颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)及矿质结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MOC)两大类,其中POC又可细分为

游离态颗粒有机碳(free particulate organic carbon, FPOC)和闭蓄态颗粒有机碳(occluded particulate organic carbon, OPOC),每一类均承载着特定的土壤功能与稳定性特征<sup>[5-6]</sup>。

在全球范围内,因外源有机物料输入对土壤环境改善、功能提升及作物产量增加的显著贡献,正逐步成为替代传统无机肥料与短效肥料的重要选择<sup>[7-8]</sup>。目前,关于添加外源有机物料对土壤理化性质和土壤有机碳组分的影响,国内外学者已经进行了大量的相关研究<sup>[9-10]</sup>,明确了有机物料添加对土壤理化性质和有机碳组分影响的直接和间接作用<sup>[11]</sup>。然而,不同类型有机物料的添加效果受物料自身性质、添加量及试验条件等多种因素影响,展现出高度的复杂性与差异性<sup>[12]</sup>。因此,系统评估多种有机物料对土壤理化性质和有机碳组分影响的差异,对于科学指导有机改良剂在土壤管理中的应用至关重要。

本研究通过室内短期培养试验,选择生物炭、农作物秸秆、畜禽粪便、简单有机物、微生物培养基、合成高分子以及特殊有机肥料共7类代表性有机物料,深入探究其对黑垆土与黄绵土理化性质及不同形态

有机碳组分(FPOC, OPOC, POC, MOC)的影响。通过定量与定性分析,旨在全面揭示SOM对外源有机物料添加的响应机制,为农田土壤质量提升过程中有机改良剂的科学选择与合理应用提供理论与实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本试验供试土壤为黄绵土和黑垆土,于2023年4月采集,分别采自陕西延安安塞水土保持野外试验站和陕西咸阳长武农田生态系统野外试验站,且均为耕层土壤(0—20 cm),土样风干后去除动植物残体、石块、结核等,并全部过2 mm筛。于2023年7月进行室内培养,2023年10月培养结束取出,共培养100 d并开始进行试验。

采用常规分析方法分析其基本理化性质<sup>[13]</sup>,采用环刀法测得黑垆土和黄绵土的田间持水量分别为

21.4%和19.9%。有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用凯氏定氮仪测定(KDY-9 830, KETUO);土壤pH值采用电极法进行测定(土水比为1:2.5);土壤碳酸钙含量采用气量法测定;电导率利用电导率仪(DDSJ-308 F)进行测定;土壤颗粒分析采用英国马尔文公司生产的MS2000激光粒度仪测定,并按照国际制标准划分为砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)3个粒级,结果如表1所示。

本试验共选择了7类12种外源有机物料包括:生物炭(烟杆、果木枝条生物炭)、农作物秸秆(小麦、油菜秸秆)、畜禽粪便(鸡粪、牛粪)、简单有机物(葡萄糖、纤维素)、微生物培养基(LB培养基)、合成高分子(聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM))以及特殊有机肥料(腐植酸肥、壳聚糖)。使用元素分析仪(Elementar Vario EL III, 德国)对外源有机物料元素含量进行测定(表2)。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil

土壤类型	pH值	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碳酸钙/ (g·kg <sup>-1</sup> )	电导率/ (μS·cm <sup>-1</sup> )	颗粒组成/%		
						砂粒 (2.000~0.020 mm)	粉粒 (0.020~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
黑垆土	8.09±0.02	9.61±0.20	0.54±0.01	77.03±0.93	131.30±2.78	47.27±0.49	34.38±1.03	18.35±1.52
黄绵土	8.46±0.01	5.37±0.15	0.24±0.00	90.93±1.93	107.57±0.81	74.06±0.06	18.71±0.34	7.23±0.29

表2 12种外源有机物料元素组成

Table 2 Elemental composition of 12 types of exogenous organic materials

有机物料	元素组成/%					C/N
	C	H	O	N	S	
烟杆生物炭	51.23	1.40	20.33	1.45	0.56	35.38
果木枝条生物炭	56.36	2.19	17.58	0.69	0.00	81.44
小麦秸秆	23.33	2.93	21.75	0.84	0.00	27.70
油菜秸秆	27.39	3.86	29.76	2.61	0.52	10.51
鸡粪	16.16	2.87	26.61	3.35	0.59	4.83
牛粪	21.43	2.97	23.98	2.17	0.06	9.86
葡萄糖	35.52	6.44	54.46	0.00	0.00	—
纤维素	22.78	3.44	35.60	0.00	0.03	—
LB培养基	33.08	5.02	32.03	10.35	0.07	3.20
PAM	1.52	0.00	6.34	0.81	0.03	1.88
腐植酸肥	24.52	3.18	28.68	15.66	0.02	1.57
壳聚糖	40.21	6.47	42.26	7.47	0.00	5.38

### 1.2 试验设计

本试验为100 d的室内土壤培养试验。将外源

有机物料与风干土壤以3%的质量比(每个试验单元加入30 g有机物料和1 000 g土)充分混合均匀,放入带盖塑料盒中,加水至田间持水量,使土壤充分湿润,盖上盖子(盖子上打有数量一致的小孔,保证一定的空气和水气交换),然后置于温室,在自然温度下培养,试验期间采用恒重法定期加水以保持水分含量为田间持水量的70%,以不添加外源有机物作为对照(CK),设3组重复试验,共计78个试验单元。

### 1.3 测定方法

土壤理化性质采用常规分析方法测定<sup>[13]</sup>。

通过密度浮选结合湿筛的方法将土壤有机碳分为FPOC, OPOC, MOC 3个组分, POC含量则通过FPOC和OPOC二者之和计算得到。具体操作步骤如下<sup>[5-6]</sup>:

称取10.00 g过2 mm筛的风干土壤样品于100 ml的离心管中,加入密度为1.7 g/cm<sup>3</sup>的碘化钠50 ml,用手摇动1 min后放入摇床振荡(60 r/min)30 min,震荡完成后以3 500 r/min离心15 min,收集上清液并进行抽滤(过0.45 μm滤膜),用蒸馏水洗

滤膜上的样品,以此洗掉碘化钠,收集滤膜上的残渣即可测得 FPOC 的含量。

对离心管内的土壤残渣进一步进行 OPOC 和 MOC 的分离。具体操作方法如下:向土壤残渣中加入 50 ml 0.5% 的六偏磷酸钠溶液,以 200 r/min 的频率振荡 18 h,将振荡后的土壤溶液过 53  $\mu\text{m}$  筛子,通过筛子的为 MOC,残留在筛子中的为 OPOC。然后用蒸馏水洗涤上述 MOC 和 OPOC 数次,烘干(60  $^{\circ}\text{C}$ )后称重。

所有不同组分的有机碳含量用重铬酸钾外加热法进行测定。最后通过公式(1)分别计算土壤 FPOC, OPOC, MOC 含量。

$$C_x = \frac{F_x W_x}{W_t} \quad (1)$$

式中:  $C_x$  为土壤各组分有机碳含量(g/kg);  $F_x$  为各组分样品中有机碳含量(g/kg);  $W_x$  为土壤各组分样品质量(g);  $W_t$  为土壤总质量(g);  $x$  为 FPOC, OPOC, MOC 各组分。

#### 1.4 数据处理

用 SPSS 25.0 软件对土壤理化性质和有机碳组分含量进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及多重检验(least significant difference, LSD)。

显著性概率设为  $p < 0.05$ ; 利用 Origin 2021 软件中的皮尔逊(Pearson)相关分析研究土壤各有机碳组分间的相关性;通过 Canoco 5.0 软件进行土壤理化性质与有机碳组分间的冗余分析(RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机物料添加对土壤理化性质的影响

由表 3—4 可知,与 CK 相比,添加烟杆生物炭、果木枝条生物炭、纤维素、LB 培养基和 PAM 后,黑垆土与黄绵土 pH 值显著提高,其余处理 pH 值则降低,并且黑垆土与黄绵土 pH 值变化表现出相同的规律,其按大到小排序为:纤维素 > 烟杆生物炭 > 果木枝条生物炭 > LB 培养基 > PAM > CK > 小麦秸秆 > 腐植酸肥 > 葡萄糖 > 牛粪 > 油菜秸秆 > 鸡粪 > 壳聚糖。黑垆土与黄绵土电导率在有机物料添加后与 CK 相比均有所提高,且 PAM、纤维素和 LB 培养基添加后电导率显著高于其他处理,黑垆土显著提高了 4 553.3%, 2 133.3%, 2 080.0%, 黄绵土显著提高了 5 600.0%, 2 900.0%, 2 618.2%。与 CK 相比,有机物料添加使黑垆土和黄绵土碳酸钙含量降低,全氮含量升高(纤维素添加除外),其中壳聚糖、腐植酸肥、LB 培养基添加使全氮含量显著高于其他处理,黑垆土显著提高了 113.2%, 109.4%, 94.3%, 黄绵土显著提高了 476.2%, 195.2%, 157.1%。总有机碳含量与 CK 相比显著提高,并且按总有机碳含量从高到低排列顺序为:果木枝条生物炭 > 烟杆生物炭 > 壳聚糖 > 小麦秸秆 > 牛粪 > 纤维素 > PAM > 腐植酸肥 > 油菜秸秆 > 葡萄糖 > 鸡粪 > LB 培养基 > CK(黄绵土为油菜秸秆 > 腐植酸肥)。黑垆土和黄绵土 C/N 除 LB 培养基、腐植酸肥、壳聚糖添加后与 CK 相比显著降低外,其余有机物料添加则表现为降低不显著或有所提高。

表 3 有机物料添加对黑垆土理化性质的影响

Table 3 Effect of organic material addition on physical and chemical properties of black loessial soil

处理	pH 值	电导率/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	碳酸钙/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	总有机碳/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	C/N
CK	8.05 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.15 $\pm$ 0.00 <sup>k</sup>	76.07 $\pm$ 1.46 <sup>a</sup>	9.58 $\pm$ 0.31 <sup>h</sup>	0.53 $\pm$ 0.01 <sup>j</sup>	18.20 $\pm$ 0.81 <sup>g</sup>
烟杆生物炭	8.58 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.55 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	75.49 $\pm$ 0.63 <sup>a</sup>	24.69 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	0.60 $\pm$ 0.01 <sup>g</sup>	41.31 $\pm$ 0.70 <sup>b</sup>
果木枝条生物炭	8.28 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	0.17 $\pm$ 0.00 <sup>j</sup>	75.87 $\pm$ 0.61 <sup>a</sup>	26.36 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	0.54 $\pm$ 0.00 <sup>ji</sup>	48.94 $\pm$ 0.54 <sup>a</sup>
小麦秸秆	8.03 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.16 $\pm$ 0.01 <sup>jk</sup>	74.77 $\pm$ 1.28 <sup>a</sup>	17.98 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	0.56 $\pm$ 0.01 <sup>h</sup>	31.91 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>
油菜秸秆	7.80 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	0.99 $\pm$ 0.01 <sup>f</sup>	74.39 $\pm$ 4.42 <sup>ab</sup>	13.85 $\pm$ 0.57 <sup>f</sup>	0.74 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	18.61 $\pm$ 0.77 <sup>g</sup>
鸡粪	7.73 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	0.73 $\pm$ 0.00 <sup>g</sup>	73.86 $\pm$ 0.38 <sup>ab</sup>	13.46 $\pm$ 0.25 <sup>f</sup>	0.73 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	18.36 $\pm$ 0.41 <sup>g</sup>
牛粪	7.80 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	0.53 $\pm$ 0.01 <sup>h</sup>	70.90 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>	16.16 $\pm$ 0.42 <sup>d</sup>	0.66 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	24.62 $\pm$ 0.57 <sup>e</sup>
葡萄糖	7.98 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	0.24 $\pm$ 0.01 <sup>i</sup>	70.90 $\pm$ 1.10 <sup>b</sup>	13.55 $\pm$ 0.17 <sup>f</sup>	0.55 $\pm$ 0.00 <sup>hi</sup>	24.57 $\pm$ 0.32 <sup>e</sup>
纤维素	8.63 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	3.35 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	65.00 $\pm$ 0.45 <sup>c</sup>	15.67 $\pm$ 0.20 <sup>d</sup>	0.51 $\pm$ 0.00 <sup>k</sup>	30.90 $\pm$ 0.47 <sup>d</sup>
LB 培养基	8.28 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	3.27 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	71.04 $\pm$ 2.49 <sup>b</sup>	11.67 $\pm$ 0.43 <sup>g</sup>	1.03 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	11.29 $\pm$ 0.49 <sup>j</sup>
PAM	8.24 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	6.98 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	66.16 $\pm$ 1.44 <sup>c</sup>	14.81 $\pm$ 0.18 <sup>e</sup>	0.68 $\pm$ 0.00 <sup>e</sup>	21.69 $\pm$ 0.35 <sup>f</sup>
腐植酸肥	8.01 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	1.59 $\pm$ 0.00 <sup>e</sup>	63.11 $\pm$ 0.96 <sup>cd</sup>	14.73 $\pm$ 0.60 <sup>e</sup>	1.11 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	13.28 $\pm$ 0.35 <sup>i</sup>
壳聚糖	7.25 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	1.87 $\pm$ 0.00 <sup>d</sup>	60.24 $\pm$ 3.47 <sup>d</sup>	18.33 $\pm$ 0.22 <sup>c</sup>	1.13 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	16.28 $\pm$ 0.42 <sup>h</sup>

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

表4 有机物料添加对黄绵土理化性质的影响

Table 4 Effects of organic material addition on physical and chemical properties of loessial soil

处理	pH值	电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	碳酸钙/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N
CK	8.32±0.03 <sup>d</sup>	0.11±0.00 <sup>h</sup>	89.24±1.32 <sup>a</sup>	4.81±0.14 <sup>j</sup>	0.21±0.00 <sup>h</sup>	22.45±0.82 <sup>e</sup>
烟杆生物炭	8.92±0.01 <sup>a</sup>	0.49±0.06 <sup>f</sup>	82.29±3.02 <sup>bcd</sup>	19.52±0.37 <sup>a</sup>	0.27±0.01 <sup>g</sup>	71.56±3.50 <sup>b</sup>
果木枝条生物炭	8.56±0.01 <sup>b</sup>	0.11±0.00 <sup>h</sup>	83.86±2.25 <sup>bc</sup>	19.94±0.18 <sup>a</sup>	0.22±0.00 <sup>h</sup>	92.54±0.41 <sup>a</sup>
小麦秸秆	8.24±0.02 <sup>e</sup>	0.17±0.00 <sup>h</sup>	85.11±3.20 <sup>ab</sup>	13.62±0.32 <sup>e</sup>	0.22±0.03 <sup>h</sup>	62.08±8.86 <sup>e</sup>
油菜秸秆	7.76±0.03 <sup>h</sup>	0.84±0.01 <sup>e</sup>	79.71±1.43 <sup>cd</sup>	9.40±0.00 <sup>f</sup>	0.42±0.00 <sup>e</sup>	22.42±0.04 <sup>g</sup>
鸡粪	7.60±0.01 <sup>i</sup>	0.78±0.00 <sup>e</sup>	78.71±2.28 <sup>d</sup>	8.36±0.50 <sup>h</sup>	0.45±0.01 <sup>d</sup>	18.81±1.57 <sup>gh</sup>
牛粪	7.91±0.01 <sup>g</sup>	0.38±0.00 <sup>fg</sup>	82.88±1.81 <sup>bcd</sup>	11.02±0.44 <sup>d</sup>	0.40±0.01 <sup>f</sup>	27.87±1.11 <sup>f</sup>
葡萄糖	7.91±0.03 <sup>g</sup>	0.29±0.00 <sup>g</sup>	66.60±1.83 <sup>e</sup>	8.81±0.13 <sup>gh</sup>	0.22±0.01 <sup>h</sup>	40.31±2.29 <sup>e</sup>
纤维素	8.98±0.14 <sup>a</sup>	3.30±0.03 <sup>b</sup>	71.07±3.18 <sup>e</sup>	10.75±0.20 <sup>d</sup>	0.21±0.00 <sup>h</sup>	52.31±1.07 <sup>d</sup>
LB培养基	8.43±0.04 <sup>c</sup>	2.99±0.03 <sup>c</sup>	53.80±2.84 <sup>f</sup>	6.47±0.37 <sup>i</sup>	0.54±0.01 <sup>c</sup>	12.03±0.65 <sup>i</sup>
PAM	8.40±0.01 <sup>c</sup>	6.27±0.25 <sup>a</sup>	82.76±1.82 <sup>bcd</sup>	9.89±0.15 <sup>e</sup>	0.46±0.01 <sup>d</sup>	21.57±0.20 <sup>g</sup>
腐植酸肥	8.14±0.02 <sup>f</sup>	1.40±0.05 <sup>d</sup>	80.63±1.80 <sup>bcd</sup>	8.90±0.14 <sup>e</sup>	0.62±0.01 <sup>b</sup>	14.30±0.18 <sup>hi</sup>
壳聚糖	7.39±0.02 <sup>j</sup>	0.85±0.00 <sup>e</sup>	83.38±5.26 <sup>bcd</sup>	14.61±0.23 <sup>b</sup>	1.21±0.01 <sup>a</sup>	12.11±0.31 <sup>i</sup>

## 2.2 有机物料添加对土壤有机碳组分含量的影响

由图1可知,黑垆土与黄绵土FPOC, OPOC, POC和MOC含量与CK相比均有所提高。黑垆土的FPOC含量除LB培养基、PAM和壳聚糖添加后与CK相比提高不显著外,其余有机物料添加均使FPOC含量显著提高;黄绵土则在有机物料添加后均显著提高。与CK相比,果木枝条生物炭、烟杆生物炭、小麦秸秆、纤维素和油菜秸秆添加使FPOC增量高于其他处理,其中黑垆土提高了2158.5%,1545.3%,907.5%,888.7%,447.2%;黄绵土提高了2971.8%,1717.9%,1730.8%,948.7%,907.7%,而其他有机物料添加则使黑垆土提高了50.9%~377.4%,使黄绵土提高了300.0%~705.1% ( $p < 0.05$ ) (图1a),并且FPOC占TOC的比例除黑垆土PAM添加没有增加外,其余处理均有所增加,其中烟杆生物炭、果木枝条生物炭、小麦秸秆、油菜秸秆和纤维素添加使FPOC占TOC的比例高于其他处理(图2)。

有机物料添加对土壤OPOC含量的影响如图1b所示,与CK相比,有机物料添加使黑垆土OPOC含量显著提高,黄绵土则除纤维素、LB培养基和腐植酸肥添加后提高不显著外,其余有机物料添加均使OPOC含量显著提高。按OPOC含量与CK相比的增量排序黑垆土为:PAM(469.9%)>壳聚糖(449.5%)>烟杆生物炭(443.7%)>小麦秸秆(290.3%)>牛粪(281.6%)>果木枝条生物炭(276.7%)>鸡粪(200.0%);黄绵土为:烟杆生物炭(549.4%)>壳聚糖(461.4%)>牛粪(321.7%)>PAM(274.7%)>果木枝条生物炭(268.7%)>鸡粪

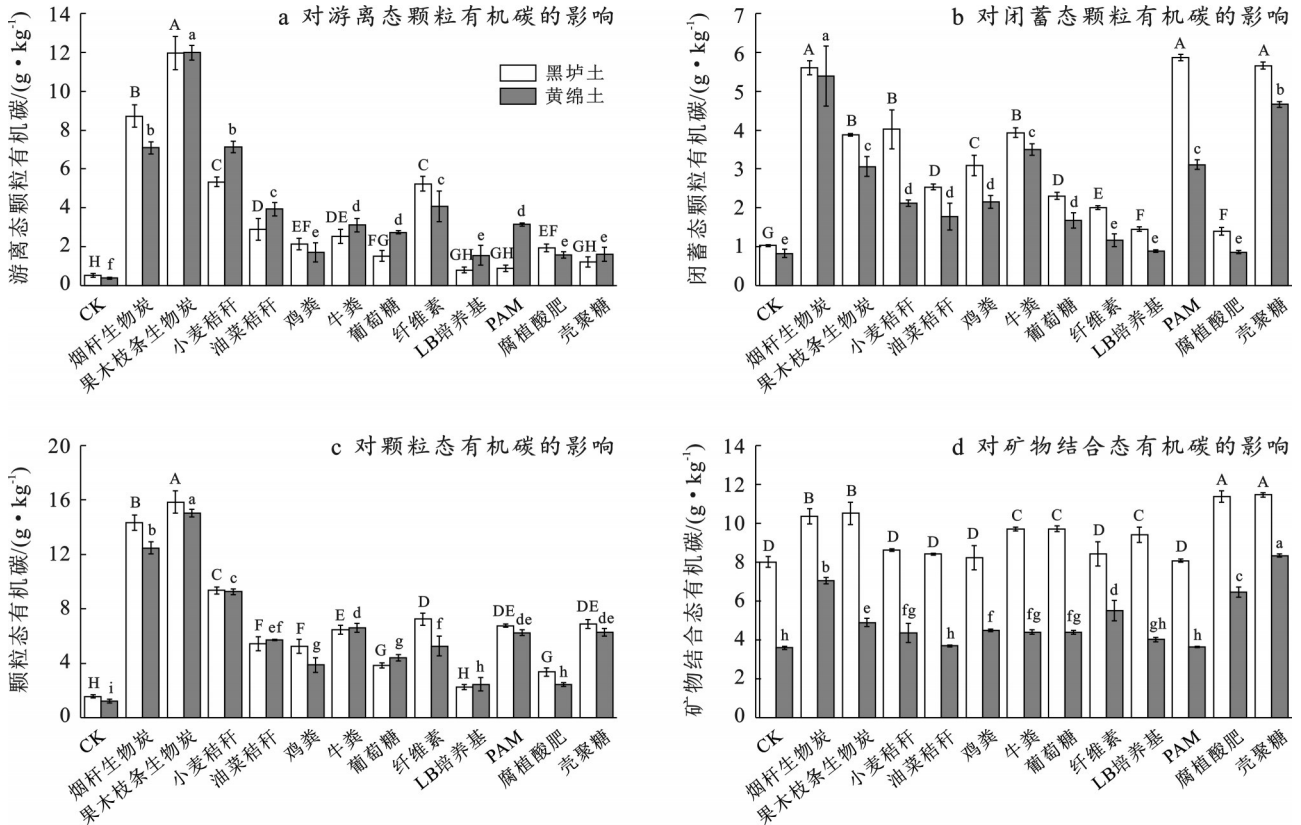
(159.0%)>小麦秸秆(155.4%),其余处理在黑垆土和黄绵土中均增量较低,且其顺序均为:油菜秸秆>葡萄糖>纤维素>LB培养基>腐植酸肥(黑垆土:35.9%~146.6%;黄绵土:3.6%~114.5%),并且黑垆土的OPOC含量在所有处理中均高于黄绵土 ( $p < 0.05$ )。由图2可知,因有机物料的加入使OPOC占总有机碳的比例增加(添加腐植酸肥除外),其中牛粪、PAM和壳聚糖添加使OPOC占总有机碳的比例较大。

有机物料添加后土壤POC含量与CK相比显著提高 ( $p < 0.05$ ),其中,果木枝条生物炭、烟杆生物炭和小麦秸秆添加使土壤POC含量显著高于其他处理,且其与CK相比,黑垆土显著提高了915.4%,817.9%,500.0%,黄绵土显著提高了1143.0%,931.4%,665.3%,其余处理黑垆土提高了44.2%~364.7%,黄绵土提高了101.7%~446.3%,并且LB培养基和腐植酸肥添加使土壤POC含量提高较少(图1c)。

有机物料添加对土壤MOC含量的影响如图1d所示,与CK相比,除小麦秸秆、油菜秸秆、鸡粪、纤维素和PAM添加处理外,其余有机物料添加均显著提高了黑垆土中的MOC含量。按黑垆土MOC含量与CK相比的增量排序为:壳聚糖(43.1%)>腐植酸肥(42.1%)>果木枝条生物炭(31.3%)>烟杆生物炭(29.5%)>葡萄糖(21.3%)>牛粪(21.1%)>LB培养基(17.5%)>小麦秸秆(7.7%)>纤维素(5.1%)>油菜秸秆(5.0%)>鸡粪(2.7%)>PAM(0.7%) ( $p < 0.05$ )。黄绵土各处理MOC占土壤TOC的含量均低于黑垆土,并且因有机物料的加入使黑垆土与黄绵土的MOC占总有机碳的比例降低,在果木枝条生物

炭、烟杆生物炭和小麦秸秆添加后, MOC 占总有机碳的比例与其他处理相比较小(图 2)。与 CK 相比, 除添加油菜秸秆、LB 培养基和 PAM 后 MOC 含量提高不显著外, 其余有机物料添加均使黄绵土 MOC 含量显著提高。按黄绵土 MOC 含量与 CK 相比的增量

排序为: 壳聚糖(131.4%) > 烟杆生物炭(95.6%) > 腐植酸肥(79.4%) > 纤维素(52.8%) > 果木枝条生物炭(36.1%) > 鸡粪(24.7%) > 牛粪(22.2%) > 葡萄糖(22.2%) > 小麦秸秆(21.1%) > LB 培养基(11.7%) > 油菜秸秆(2.5%) > PAM(1.1%) ( $p < 0.05$ )。



注: ①大写字母代表黑垆土, 小写字母代表黄绵土; ②不同字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 1 有机物料添加对土壤各组分有机碳含量的影响

Fig.1 Effects of organic material addition on organic carbon content of soil components

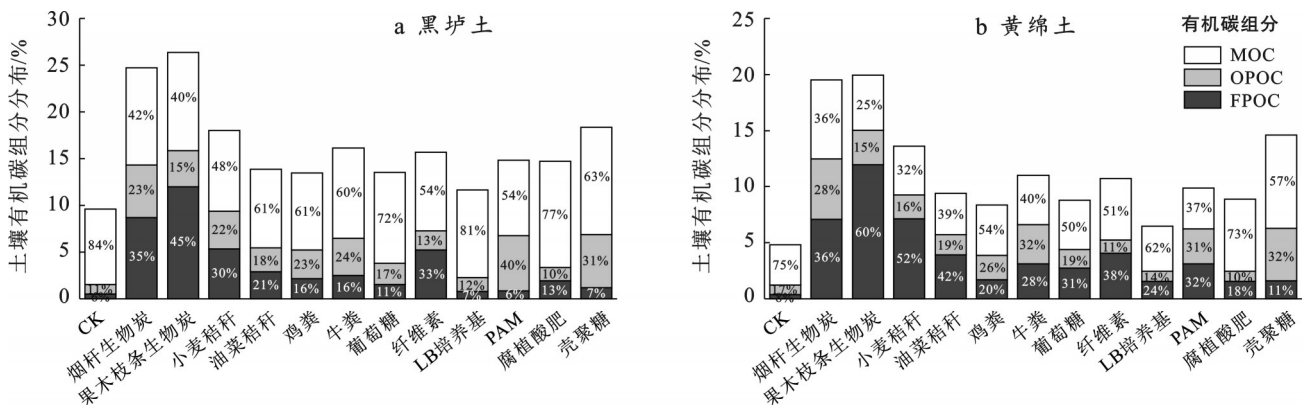


图 2 有机物料添加对土壤有机碳组分分布的影响

Fig.2 Effects of organic material addition on distribution of soil organic carbon components

### 2.3 土壤理化性质与有机碳组分间的相关性分析

由有机物料化学性质与土壤总有机碳的 Pearson 相关性分析可知(表 5), 黑垆土与黄绵土的 TOC 含量与有机物料的含碳量之间呈显著正相关 ( $p <$

0.05), 相关系数分别为 0.707\* 和 0.698\*, 与 C/N 之间呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.871\*\* 和 0.822\*\*, 说明土壤有机碳的变化不只与有机物料自身碳含量有关, 更受有机物料 C/N 的影响。

表 5 有机物料化学性质与土壤总有机碳的 Pearson 相关性分析

**Table 5 Pearson correlation analysis between chemical properties of organic materials and soil total organic carbon**

因素	C	C/N
黑垆土 TOC	0.707*	0.871**
黄绵土 TOC	0.698*	0.822**

土壤有机碳是衡量土壤质量的重要指标,土壤 TOC 及不同有机碳组分(FPOC, OPOC, POC, MOC)的相关关系如表 6 所示。在黑垆土中,FPOC, OPOC, POC, MOC 与土壤 TOC 间呈极显著相关(相关系数分别为 0.890\*\*, 0.620\*\*, 0.967\*\*, 0.499\*\*,  $n=39$ ),并且 POC 与 FPOC 和 OPOC 间也呈极显著相关(相关系数分别为 0.926\*\*和 0.631\*\*,  $n=39$ )。黄绵土的 FPOC, OPOC, POC, MOC 与土壤 TOC 间也呈极显著相关(相关系数分别为:0.833\*\*, 0.755\*\*, 0.950\*\*, 0.532\*\*,  $n=39$ ),并且不仅 POC 与 FPOC 和 OPOC 间呈极显著相关(相关系数分别为 0.938\*\*和 0.665\*\*,  $n=39$ ),同时 OPOC 与 FPOC 和 MOC 间也呈显著/极显著相关(相关系数分别为 0.364\*和 0.544\*\*,  $n=39$ ),其中黑垆土与黄绵土的 TOC 与 POC 和 FPOC 组分的相关系数均相对较高。

表 6 土壤有机碳与不同有机碳组分的相关性分析

**Table 6 Correlation analysis between soil organic carbon and different organic carbon components**

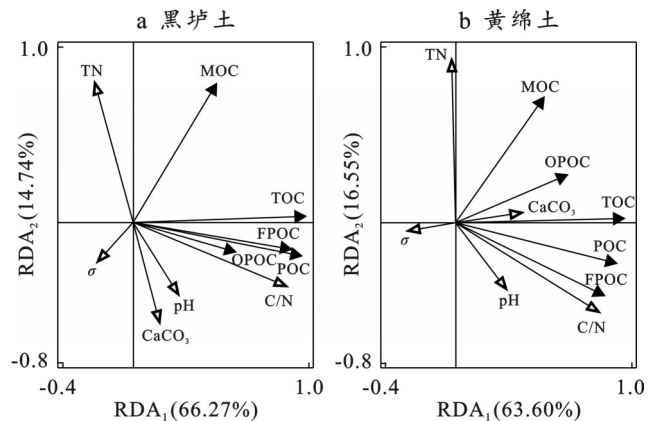
供试土壤	指标	有机碳组分				
		TOC	FPOC	OPOC	POC	MOC
黑垆土	TOC	1				
	FPOC	0.890**	1			
	OPOC	0.620**	0.291	1		
	POC	0.967**	0.926**	0.631**	1	
	MOC	0.499**	0.225	0.199	0.261	1
黄绵土	TOC	1				
	FPOC	0.833**	1			
	OPOC	0.755**	0.364*	1		
	POC	0.950**	0.938**	0.665**	1	
	MOC	0.532**	0.048	0.544**	0.241	1

注:\*表示在  $p<0.05$  水平相关显著; \*\*表示在  $p<0.01$  水平相关显著。

为了进一步分析土壤理化性质与土壤有机碳组分的相关程度,将 TOC, FPOC, OPOC, POC 和 MOC 作为响应变量,5 个土壤理化性质(pH、电导率、碳酸钙、全氮、C/N)作为解释变量进行冗余分析。由图 3a 可知,对于黑垆土,第一轴能够解释土壤有机碳组分含量变异量的 66.27%,第二轴可解释土壤有机

碳组分含量变异量的 14.74%,两轴累计解释量为 81.01%。影响 MOC 含量的主要因素是全氮,且全氮和 MOC 之间呈显著正相关( $p<0.05$ ),影响 TOC, FPOC, OPOC, POC 含量的主要因素是 C/N,且 TOC, FPOC, POC 和 C/N 之间呈极显著正相关( $p<0.01$ )。土壤因素的影响大小排序为 C/N、全氮、pH 值、电导率、碳酸钙,其中 C/N 可解释土壤有机碳组分含量变异的 52.2% ( $F=12, p=0.002$ ),全氮含量可解释土壤有机碳组分含量变异的 23.9% ( $F=10, p=0.002$ ),二者共同解释率达 76.1%。

由图 3b 可知,第一轴能够解释黄绵土有机碳组分含量变异量的 63.60%,第二轴可解释黄绵土有机碳组分含量变异量的 16.55%,两轴累计解释量为 80.15%。影响 MOC 和 OPOC 含量的主要因素是碳酸钙和全氮,且全氮和 MOC 之间呈显著正相关( $p<0.05$ ),影响 TOC, FPOC, POC 含量的主要因素是 C/N,且与 C/N 之间呈极显著正相关( $p<0.01$ )。土壤因素的影响大小排序为 C/N、全氮、电导率、碳酸钙、pH 值,其中 C/N 可解释土壤有机碳组分含量变异的 46.3% ( $F=9.5, p=0.006$ ),全氮含量可解释土壤有机碳组分含量变异的 30.0% ( $F=12.6, p=0.002$ ),二者共同解释率达 76.3%。整体来看,无论是黄绵土还是黑垆土,C/N 和全氮都是影响土壤有机碳组分的主控因素。



注:①图中实心箭头代表土壤各有机碳组分,空心箭头代表土壤理化性质。② $\sigma$ 为电导率, TN 为全氮,  $CaCO_3$  为碳酸钙。

图 3 不同处理下土壤有机碳组分与土壤理化性质的冗余分析(RDA)

**Fig.3 Redundancy analysis (RDA) of soil organic carbon components and soil physicochemical properties under different treatments**

### 3 讨论

#### 3.1 有机物料添加对土壤理化性质的影响

土壤 pH 值是影响土壤微生物生命活动的关键

因素,其中,大多数微生物在 pH 值介于 6.5 至 7.5 的范围内表现出最佳活性<sup>[14]</sup>。本研究中,黑垆土与黄绵土自身呈碱性,各类有机物料添加后黑垆土与黄绵土 pH 变化表现出相同的规律,与 CK 相比,小麦秸秆、腐植酸肥、葡萄糖、牛粪、油菜秸秆、鸡粪及壳聚糖等有机物的添加均有效降低了土壤 pH 值,其中壳聚糖的效果尤为显著,使土壤 pH 调节至大多数土壤微生物的最适范围内(黑垆土 pH 值为 7.25,黄绵土 pH 值为 7.39),为微生物的繁衍生息创造了理想环境。土壤电导率是衡量土壤水溶性盐含量的重要指标,在一定程度上可以指示土壤中钾、钠、钙、镁等主要盐基离子的含量变化<sup>[15]</sup>,一般来说土壤中水溶性盐的含量越高,其电导率值就越大。在生物炭的制备过程中,生物质原料中部分养分得以高度浓缩与富集,所以制备的生物炭中含有较高含量的  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  等盐基离子<sup>[16]</sup>,因此,生物炭的施入不仅提升了土壤的盐基饱和度,增加了电导率,还通过降低交换性  $H^+$  和  $Al^{3+}$  的比例,促进了土壤 pH 值的升高<sup>[17]</sup>。农作物秸秆与畜禽粪便的添加也因其自身富含多种养分元素,增加了土壤阳离子含量,进而提升了电导率<sup>[18]</sup>,而其他处理也使电导率升高,说明有机物料加入可使土壤中的盐基离子含量增加。有机物料添加使土壤碳酸钙含量降低,一方面可能是有机物料在分解过程中会释放腐植酸等有机酸,这些酸性物质可直接与土壤中的碳酸钙发生反应,导致其溶解<sup>[19]</sup>。另一方面可能是 SOC 含量增加会提高土壤中二氧化碳浓度,  $HCO_3^-$  和  $H^+$  含量从而提高,在土壤中形成酸性环境,促进碳酸钙溶解<sup>[20]</sup>。此外,本研究中有机物料添加不仅提高了全氮含量,还显著提高了土壤有机碳的含量,这一显著增长主要得益于所添加有机物料自身碳、氮含量较高。果木枝条生物炭、烟杆生物炭、壳聚糖自身碳含量与其他有机物料相比明显较高,所以这可能是以上 3 种有机物料添加进土壤后有机碳含量增加最多的原因之一,另外还可能是因为生物炭本身富含性质更加稳定的有机碳<sup>[16]</sup>。壳聚糖添加可使土壤达到了大多数微生物的最适 pH,因此可能促进了土壤有机碳的形成与积累。

### 3.2 有机物料添加对土壤有机碳组分的影响

土壤 POC 按照在土壤结构中的位置及受保护程度不同可以分为 FPOC 和 OPOC<sup>[21]</sup>。FPOC 填充在团聚体与团聚体之间的大孔隙中,主要是颗粒较大的未分解或半分解的动植物和根系残体;而 OPOC 是分布在团聚体内部的动植物残体<sup>[22]</sup>。本研究发现,有机物料添加后土壤 POC 占 TOC 的比例升高,表明有机物料的加入使土壤活性有机碳比例升高,

同时在黄绵土中除壳聚糖添加以及黑垆土中除壳聚糖和 PAM 添加外,其余处理与 CK 相比,FPOC 的增量均大于 OPOC 的增量,说明本研究大部分有机物料添加对 FPOC 的影响大于 OPOC。韩晓日等<sup>[21]</sup>的研究结果也表明土壤施用有机肥料等物质后 POC 含量升高,FPOC 的增长率大于 OPOC 的增长率,这与本研究结果基本一致。同时,本研究结果表明生物炭类和壳聚糖添加使 TOC 含量提高最显著,并且生物炭类添加主要影响的是 POC,尤其是其中的 FPOC 含量。此外,研究土壤各组分有机碳占总有机碳的比例随不同有机物的加入表现出不同的变化规律。武均等<sup>[23]</sup>研究表明,秸秆等有机物料施入黄绵土后,POC 占 TOC 比例升高,且 OPOC/TOC 高于 FPOC/TOC,王朔林等<sup>[24]</sup>研究发现栗褐土中施加有机肥等物质,POC/TOC 比例上升,并且 OPOC 成为 POC 的主要存在形式。但是,也有研究表明施用有机肥等有机物料能够降低 OPOC 含量,提高 FPOC 含量,使 FPOC/TOC 高于 OPOC/TOC<sup>[25]</sup>,说明有机物料添加提高了 POC 占 TOC 的比例,但对土壤 FPOC 和 OPOC 的影响不总是一致的,其可能与土壤类型、有机物料种类和性质不同表现出一定的差异。FPOC, OPOC 和 POC 与 C/N 之间呈显著正相关(图 3),说明较大的 C/N 可以相应的提高土壤 FPOC, OPOC 和 POC 的含量,可能是较高的 C/N 能够增强土壤微生物活性和胞外酶的分泌,从而产生正激发效应促进了土壤有机质分解,有利于活性有机碳的积累<sup>[26]</sup>。

MOC 是指黏附在土壤矿物颗粒表面的有机碳,它主要由微生物衍生的低分子量化合物组成,是有机物分解的最终产物,其稳定性较强<sup>[27]</sup>。本研究发现,虽然 MOC 占 TOC 的比例在有机物料添加后有所减少,但其含量均有所提高,究其原因可能是由于有机物料添加为微生物的生存提供了大量的能源物质,促进了微生物代谢活动的增强,进而使微生物代谢分泌物增加,而这些分泌物可以直接转移至细黏粒,致使土壤 MOC 积累<sup>[28]</sup>。本研究结果表明在壳聚糖添加处理下,MOC 含量提升最为显著,黑垆土的 MOC 含量普遍高于黄绵土,其原因可能是因为黑垆土的黏粉粒含量高于黄绵土,而黏粉粒上的有机碳高度腐殖化,极难分解<sup>[29]</sup>,因此黑垆土能够保留更多的 MOC,这也与佟小刚等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

本研究作为短期室内培养试验,在人工调控条件下虽具备变量控制优势,但也存在一定的局限性。一方面,高度均质化的环境条件与自然系统的时空异质性存在本质差异,可能导致机理研究向田间应

用的转化出现偏差;另一方面,受限的培养周期仅能捕捉有机物料输入的即时响应特征,未能对有机物料添加对土壤理化性质和有机碳含量的长期影响进行研究。因此,未来研究应构建长期野外定位监测体系,通过连续多年跟踪观测,以此来更准确评估有机物料添加对土壤有机碳各组分含量的长期改良效应。

## 4 结论

(1) 有机物料添加使黑垆土与黄绵土碳酸钙含量降低,电导率和总有机碳含量提高,全氮含量提高(纤维素添加除外),C/N在果木枝条生物炭、烟杆生物炭、小麦秸秆添加后显著提高,且显著高于其他处理( $p < 0.05$ )。

(2) 有机物料添加后,黑垆土与黄绵土的TOC, FPOC, OPOC, POC和MOC含量均提高,并且有机物料添加后改变了各组分有机碳的分配比例,提高了POC并降低了MOC的分配比例。

(3) 黑垆土与黄绵土FPOC, OPOC, POC, MOC含量与TOC之间呈极显著正相关( $p < 0.01$ )。C/N和全氮是影响土壤各组分有机碳含量的最主要原因,其解释率黑垆土和黄绵土分别达到了76.1%和76.3%。

(4) 生物炭类(烟杆生物炭和果木枝条生物炭)和壳聚糖添加使土壤TOC含量与CK相比显著增加且高于其他处理,生物炭类添加后土壤POC含量,尤其是FPOC含量显著高于其他处理,而壳聚糖添加则对MOC的影响尤为显著( $p < 0.05$ )。

### 参考文献 (References)

- [1] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367-385.
- [2] de la Paz Jimenez M, de la Horra A, Pruzzo L, et al. Soil quality: A new index based on microbiological and biochemical parameters [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 302-306.
- [3] 李传福,徐家林,明玉飞,等. 菇渣有机肥配施脱硫石膏对黄河三角洲盐碱土活性有机碳及其敏感性的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 387-397.  
Li Chuanfu, Xu Jialin, Ming Yufei, et al. Effects of mushroom residue organic fertilizer combined with desulfurized gypsum on active organic carbon and its sensitivity in saline-alkali soil of the Yellow River delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 387-397.
- [4] 陆永欢,戴全厚,姚一文,等. 工程堆积体植被类型对土壤有机碳组分特征及影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 316-322.
- [5] Lu Yonghuan, Dai Quanhong, Yao Yiwen, et al. Effects of vegetation types on soil organic carbon components characteristics and its influencing factors in engineering deposits [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 316-322.
- [6] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [7] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [8] Bonanomi G, De Filippis F, Zotti M, et al. Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota, improve soil fertility and increase crop yield [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156: 103714.
- [9] Demisie W, Liu Zhaoyun, Zhang Mingkui. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil [J]. *Catena*, 2014, 121: 214-221.
- [10] Peng Xiaoyu, Tong Xiaogang, Hao Liting, et al. Applicability of biochar for limiting interrill erosion and organic carbon export of sloping cropland in a semi-arid area of China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 280: 68-76.
- [11] 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.  
Li Huimin, Tian Shengying, Li Dandan, et al. Effect of application of organic materials on content of labile organic carbon and composition of microbial community in fluvio-aquatic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 777-787.
- [12] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 96-102.
- [13] Blanco-Canqui H. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 687-711.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao Shidan. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010.  
Huang Changyong, Xu Jianming. *Soil Science* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [16] 纪毛毛,张燕,高治群,等. 蚌埠市土壤电导率与pH分

- 布特征[J]. 广州化工, 2016, 44(12):140-142.
- Ji Maomao, Zhang Yan, Gao Zhiqun, et al. The distribution characteristics of soil electrical conductivity and pH in Bengbu City [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(12):140-142.
- [16] 戴静, 刘阳生. 生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6):1520-1525.
- Dai Jing, Liu Yangsheng. Review of research on the properties of biochar and its applications in soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6):1520-1525.
- [17] Shi Renyong, Hong Zhineng, Li Jiuyu, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic ultisol by crop residue-derived biochars [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(37):8111-8119.
- [18] Anning D K, Qiu Huizhen, Zhang Chunhong, et al. Maize straw return and nitrogen rate effects on potato (*Solanum tuberosum* L.) performance and soil physico-chemical characteristics in northwest China [J]. Sustainability, 2021, 13(10):5508.
- [19] Yassin S, Awadalla S, El-Hadidi E S, et al. Assessment of the compost addition and sandification to overcome the calcium carbonate problems in heavy clay calcareous soils at El-Farafra Oasis-Egypt [J]. Egyptian Journal of Soil Science, 2023, 63(3).
- [20] 李雄, 张旭博, 孙楠, 等. 不同土地利用方式对土壤有机无机碳比例的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1508-1519.
- Li Xiong, Zhang Xubo, Sun Nan, et al. Impact of land uses on the ratio of soil organic and inorganic carbon [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6):1508-1519.
- [21] 韩晓日, 王玲莉, 杨劲峰, 等. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(2):266-269.
- Han Xiaori, Wang Lingli, Yang Jinfeng, et al. Effect of long-term fertilizations on particulate organic carbon and enzyme activities in a brown earth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2):266-269.
- [22] 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.
- [23] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5):728-736.
- Wu Jun, Cai Liqun, Zhang Renzhi, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5):728-736.
- [24] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):104-111.
- Wang Shuolin, Wang Gailan, Zhao Xu, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1):104-111.
- [25] Hai Long, Li Xiaogang, Li Fengmin, et al. Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under a wheat-wheat-maize cropping system in an arid region of China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2):253-259.
- [26] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 等. 氮沉降增加情景下植物—土壤—微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(23):8285-8295.
- Cheng Shulan, Fang Huajun, Xu Meng, et al. Regulation of plant-soil-microbe interactions to soil organic carbon in natural ecosystems under elevated nitrogen deposition: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23):8285-8295.
- [27] 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.
- [28] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2):300-309.
- Fan Tinglu, Wang Shuying, Zhou Guangye, et al. Effects of long-term fertilizer application on soil organic carbon change and fraction in cumelic haplustoll of Loess Plateau in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2):300-309.
- [29] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R, et al. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4):767-772.
- [30] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11):3664-3671.
- Tong Xiaogang, Xu Minggang, Zhang Wenju, et al. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11):3664-3671.