

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.022

杨昕, 王克勤, 宋娅丽, 等. 施用土壤改良剂对坡耕地烤烟土壤有机碳及其组分的影响. 土壤, 2023, 55(1): 178–186.

施用土壤改良剂对坡耕地烤烟土壤有机碳及其组分的影响^①

杨昕¹, 王克勤¹, 宋娅丽^{1*}, 张晓花¹, 陈炳绅², 温昌焘³

(1 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2 云南省玉溪市水利局, 云南玉溪 653199; 3 云南省玉溪市红塔区水土保持工作站, 云南玉溪 653100)

摘要: 以云南省玉溪市红塔区坡耕地烤烟土壤为研究对象, 选择生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆 4 种土壤改良剂, 研究施用不同土壤改良剂后土壤各层有机碳及其组分含量的变化特征。结果表明: 坡耕地烤烟土壤有机碳及其组分含量不同生育期表现为成熟期<现蕾期<旺长期, 不同土层表现为 5~10 cm>0~5 cm>10~20 cm, 其中以添加高量生物质炭处理(0.6%~47.0%)和高量秸秆处理(1.3%~38.2%)提升效果较为显著; 施用 4 种土壤改良剂在一定程度上均可提高土壤全氮和全磷含量, 其中以添加高量秸秆处理最为显著, 全氮、全磷含量分别提高 15.0%~32.8%、37.6%~40.2%; 各处理土壤 C:N 在 5.07~8.67, C:P 在 3.91~6.12, N:P 在 0.34~1.00; 土壤全氮与全磷、有机碳含量之间分别存在显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)正相关关系, 有机碳各组分间呈极显著正相关关系($P<0.01$); 土层深度、生育期和土壤改良剂种类对土壤有机碳组分的影响均极显著($P<0.01$)。添加生物质炭和秸秆对滇中红壤丘陵区植烟土壤有机碳及其各组分含量、土壤养分的生态化学计量特征的提升效果更佳, 尤其以添加 0.06 kg/m² 生物质炭和 0.5 kg/m² 秸秆效果较佳。

关键词: 土壤改良剂; 土壤有机碳; 活性有机碳; 烤烟; 坡耕地

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effects of Soil Modifiers on Soil Organic Carbon and Its Components in Sloping Farmland Soil of Flue-cured Tobacco

YANG Xin¹, WANG Keqin¹, SONG Yali^{1*}, ZHANG Xiaohua¹, CHEN Bingshen², WEN Changtao³

(1 College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Water-control Bureau, Yuxi, Yunnan 653199, China; 3 Soil and Water Conservation Workstation, Hongta District, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: In this study, the sloping farmland soil of flue-cured tobacco was taken as the study object in Hongta District, Yuxi City, Yunnan Province, and four soil amendments including biochar, lignin, polyacrylamide and straw were selected to study their effects on soil organic carbon (SOC) and its components in different soil layers. The results show that the contents of SOC and its components in different growth stages of tobacco are in the order of mature stage < emerging stage < flourishing stage, and the contents of SOC and its components in different soil layers are in the order of 5–10 cm > 0–5 cm > 10–20 cm. The effects of adding high biochar (0.6%–47.0%) and straw (1.3%–38.2%) are more significant. Application of the above amendments can increase soil total nitrogen and total phosphorus concentrations to a certain extent, and the high amount of straw are the most significant (15.0%–32.8% and 37.6%–40.2%, respectively). The ratios of C : N, C : P and N : P of each treatment are in the range of 5.07–8.67, 3.91–6.12 and 0.34–1.00, respectively. Soil total nitrogen has significant positive correlation with soil total phosphorus ($P<0.05$) and SOC ($P<0.01$), respectively. There are extremely significant positive correlations ($P<0.01$) among SOC components. Soil depth, growth period and soil conditioner type have extremely significant effects on SOC components ($P<0.01$). The addition of biochar and straw have better effects on the improvement of SOC and its components as well as the ecological stoichiometric characteristics of soil nutrients, and in particular, the effects of adding 0.06 kg/m² biochar and 0.5 kg/m² straw are better.

Key words: Soil modifier; Soil organic carbon; Active organic carbon; Flue-cured tobacco; Sloping farmland

①基金项目: 云南省科技计划项目(202203AC100001-03), 云南省重点研发计划项目(2018BB018)和云南省大学生创新创业训练计划项目(202110677076)资助。

* 通讯作者(songyali19851205@sina.com)

作者简介: 杨昕(1998—), 女, 云南武定人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复研究。E-mail: 1219174890@qq.com

烤烟是云南省主要经济作物之一,在全省区域内烤烟栽培面积约为 $39.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全国种植面积的 43.8%^[1]。近年来,因长期连作或化肥的不恰当应用而造成的土壤板结、土壤碳库下降、土壤营养减少等问题对烟叶品质产生了极大影响^[2]。而增加土壤有机碳含量对提高土壤碳汇能力、土壤肥力及固定 CO_2 延缓全球气候变暖有重要意义^[3]。

土壤改良剂可通过提高土壤有机碳及各组分含量,改良农田土壤质量,从而达到增产的目的。土壤改良剂可分为天然改良剂(生物质炭、木质素和秸秆等)和人工改良剂(聚丙烯酰胺等),其均可通过改善土壤结构,提高土壤质量。生物质炭由于富含有机碳,可通过增加土壤的 C/N,改善土壤质量,常被用作土壤改良剂和固碳剂^[4]。杜倩等^[5]通过田间试验发现,生物质炭处理土壤有机碳组分含量较不添加生物质炭处理明显增加(6.9%~51.3%)。木质素能够吸收水分和营养物质,并延缓养分的释放,从而提高土壤有机质存贮率,达到改善土壤质地的效果^[6]。宋彬等^[7]通过土柱淋溶和土壤静态吸收的方法,研究了不同添加剂量的木质素对土壤氮磷养分、水分的影响,结果表明对减少土壤氮、磷养分和水分损失效果最好的是木质素质量为全土质量的 2%。聚丙烯酰胺(PAM)能够使土壤中的细小粒子聚集生成大的团聚体,使土壤结构更加稳定,可提高土地生产力和作物产量^[8]。杨明金等^[9]认为,当土壤中 PAM 添加量为 $0.75 \sim 1.25 \text{ g/cm}^2$ 时,玉米产量增加。农作物秸秆施用到农田中腐熟分解可产生大量养分,增加外源碳的输入,提升土壤有机碳及其活性组分含量,达到改善土壤理化性质的效果^[10]。王毅等^[11]以 2 年田间定位试验结果为基础,得出添加秸秆处理可以有效提高土壤有机碳组分含量,秸秆持续性还田能够提升植烟土壤活性有机碳含量。

总之,大量学者对土壤改良剂的效果进行了研究,但目前对于土壤改良剂的研究大多集中于酸化、盐碱化和重金属污染等存在较严重问题的土壤在施用土壤改良剂后土壤肥力、理化性质等的变化特征上,且大多研究单一改良剂的效果,而根据某一区域大量种植的作物筛选出适宜改良剂的研究较少。为此,本研究选取滇中二龙潭小流域坡耕地烤烟土壤为研究对象,通过田间试验,研究不同添加量的生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆对土壤有机碳及其组分(可溶性有机碳、易氧化有机碳、颗粒态有机碳)的影响,并分析其与土壤理化性质的之间的关系,为筛

选出适宜该地区烤烟种植,并改良烤烟地土壤性质以及提高烤烟产量的土壤改良剂提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于云南省玉溪市红塔区高仓镇龙树村, $24^\circ 17' 11'' \text{N}$, $102^\circ 34' 47'' \text{E}$, 海拔 1 884.99 m, 属滇中二龙潭小流域。该地区多年平均降水量 909.1 mm, 平均降水日达 130~150 d, 干湿季分明, 汛期多年平均降水量为 701.4 mm, 占全年总降水量的 85%, 降水量符合优质烟生长发育的需水特性(550~750 mm)。小流域地处低纬度高原,光谱的季节变化规律也与优质烟区的光照条件相匹配,有利于优良烟叶生长发育。该地区土壤为山地红壤,土壤肥力低,氮磷钾养分含量较低,表层土壤(0~20 cm)的初始基本理化性质如表 1 所示。

表 1 表层(0~20 cm)土壤初始理化性质
Table 1 Initial properties of tested topsoil

| 土壤 | pH | 全氮 (g/kg) | 全磷 (g/kg) | 全钾 (g/kg) | 有机质 (g/kg) |
|------|------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 山地红壤 | 6.34 | 2.64 | 3.3 | 14.81 | 20.32 |

1.2 试验设计

本研究以滇中红壤丘陵区玉溪市红塔区高仓镇龙树村烤烟土壤为研究对象,其种植的烤烟品种为 K326。2020 年 4 月在烤烟样地中布设 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方 27 个,各样方间距不小于 2 m,每个样方为 1 个处理小区。在各样方内的土壤中加入不同土壤改良剂,土壤改良剂生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺、秸秆施用量分别参考叶协峰等^[2]、宋彬等^[7]、张海鸥和孙小梅^[8]、王虎等^[10]的研究。试验共设置 9 个处理,每个处理 3 个重复,随机排列。土壤改良剂于 2020 年 5 月 5 日施入土壤中,其他常规化肥施用量按照本地农户的栽培习惯,在定植当日(2020 年 4 月 18 日)施用基肥($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 12 : 6 : 24$),7 d 后施用提苗肥($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 12 : 6 : 24$),20 d 后进行追肥($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 28 : 0 : 5$)。具体的试验处理和肥料施用量如表 2 所示。样方的田间管理措施同当地农民的管理保持一致。

1.3 样品采集与测定

在烤烟定植后的各生长期(定植后 65、80、95 d 的旺长期、现蕾期和成熟期)于各样方内用土钻采取对角线法分别采集 0~5、5~10 和 10~20 cm 土壤样品,放入密封袋中送回实验室,去除动物残体和植

表 2 试验处理与肥料施用量
Table 2 Treatments and fertilizer application rates

| 处理代号 | 处理描述 | 基肥 (kg/m ²) | 提苗肥 (kg/m ²) | 追肥 (kg/m ²) | 有机肥 (kg/m ²) | 土壤改良剂添加量 (kg/m ²) | 折合纯 N (kg/m ²) | 折合纯 P (kg/m ²) |
|------|---------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| CK | 对照 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| BH | 高量生物质炭 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.06 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| BL | 低量生物质炭 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.03 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| LH | 高量木质素 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.06 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| LL | 低量木质素 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.03 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| PH | 高量聚丙烯酰胺 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.002 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| PL | 低量聚丙烯酰胺 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.001 | 0.088 4 | 0.044 2 |
| SH | 高量秸秆 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.5 | 0.090 1 | 0.044 5 |
| SL | 低量秸秆 | 0.09 | 0.015 | 0.24 | 1 | 0.25 | 0.089 2 | 0.044 4 |

株根系,经自然风干后碾碎分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,室温储存待测。

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定^[12];可溶性有机碳(DOC)含量采用硫酸钾浸提法测定^[13];易氧化有机碳(EOC)含量采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化-比色法测定^[13];颗粒态有机碳(POC)含量采用六偏磷酸钠分散法测定^[13];土壤 pH 采用电极法测定^[12];土壤全氮(TN)采用半微量凯氏法测定^[12];土壤全磷(TP)采用高氯酸-硫酸法测定^[12]。

1.4 数据处理

图表绘制采用 Excel 2010,数据方差分析使用 SPSS 22.0,通过最小显著性差异(LSD)法进行方差分析,以检验在施用不同土壤改良剂条件下土壤养分、有机碳及其组分含量的差异性。

2 结果与分析

2.1 不同土壤改良剂下土壤有机碳变化特征

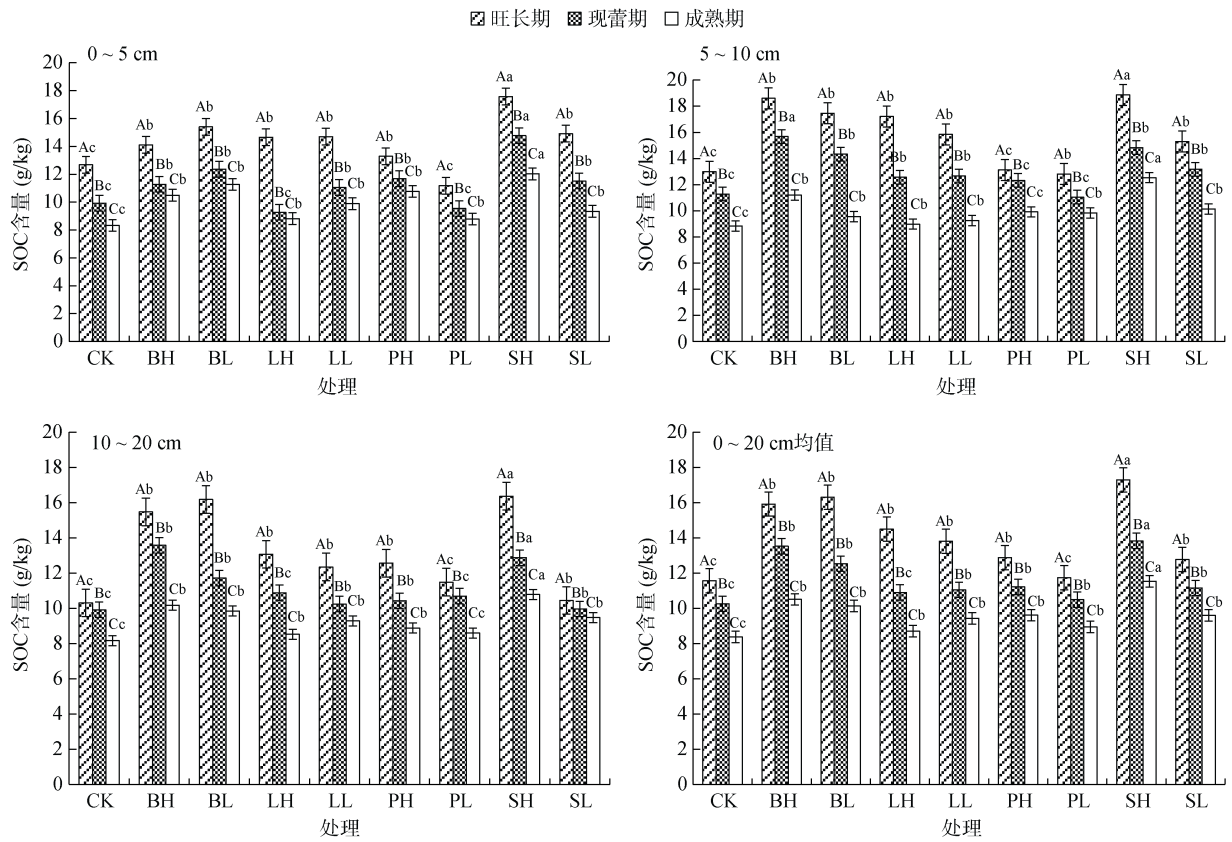
由图 1 可知,各改良剂处理下烤烟不同生育期 SOC 含量均高于对照处理, SOC 含量随着生育期的推进大多呈明显下降趋势。各土层 SOC 含量表现为: 10~20 cm<0~5 cm<5~10 cm。与对照处理相比,添加生物质炭、木质素和秸秆处理下各生长期 0~20 cm 土层 SOC 含量均值增幅高于聚丙烯酰胺处理;且添加高量和低量的生物质炭和木质素对 SOC 含量的提高差异不显著($P>0.05$),而添加高量秸秆处理显著高于低量秸秆处理 12.1%~36.2%($P<0.05$)。在旺长期和成熟期,添加高量秸秆处理较其他处理 SOC 含量增加最为显著,分别增加 15.2%~34.6% 和 22.0%~38.2%($P<0.05$);在现蕾期,添加高量生物质炭处理较其他处理 SOC 含量增加最为显著,增幅为 17.6%~31.4% ($P<0.05$)。由此可见,添加生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆均可增加 SOC 含量,其

中以添加高量秸秆和高量生物质炭效果最佳。

2.2 不同土壤改良剂下土壤有机碳组分变化特征

如图 2 所示,施用不同土壤改良剂均可提高各土层土壤 DOC 含量,各改良剂处理在不同生育期各土层土壤 DOC 含量均高于对照处理。在现蕾期添加高量和低量生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆对 0~20 cm 土壤 DOC 含量均值提高差异并不显著($P>0.05$),而添加高量秸秆处理下 0~20 cm 土壤 DOC 含量均值增幅(3.8%~13.1%)高于低量秸秆处理。在各土层各生育期土壤 DOC 含量最高的均为添加高量秸秆处理,其中在 0~5 cm 土层含量相较于其他处理在旺长期、现蕾期和成熟期分别增加了 8.84%~25.09%、6.57%~27.27% 和 4.81%~27.62%;在 5~10 cm 土层分别增加了 6.50%~21.94%、1.32%~19.38% 和 0.12%~19.66%;在 10~20 cm 土层分别增加了 4.62%~12.91%、0.62%~6.75% 和 0.02%~7.15%。

由图 3 可知,施用不同土壤改良剂均可提高各土层土壤 EOC 含量,各改良剂处理在不同生育期各土层土壤 EOC 含量均高于对照处理。添加生物质炭和秸秆处理下 0~20 cm 土壤 EOC 含量均值增幅高于添加木质素和聚丙烯酰胺处理,其增幅比木质素和聚丙烯酰胺处理高 4.6%~34.4%,且高量添加下土壤 EOC 含量高于低量添加 2.3%~30.7%。在不同时期各土层及 0~20 cm 均值土壤 EOC 含量最高的处理为添加高量生物质炭处理,其中在 0~5 cm 土层含量相较于其他处理在旺长期、现蕾期和成熟期分别增加了 4.86%~30.28%、1.24%~33.89% 和 8.34%~38.45%;在 5~10 cm 土层分别增加了 2.71%~26.60%、1.72%~24.92% 和 1.95%~39.29%;在 10~20 cm 土层分别增加了 5.58%~34.21%、0.59%~32.10% 和 1.69%~35.63%。



(不同大写字母表示同一处理不同生育期间差异性显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异性显著($P < 0.05$); 图中 0 ~ 20 cm 均值为各土层土壤有机碳含量的加权平均值, 即代表表层土壤(0 ~ 20 cm)有机碳含量; 下同)

图 1 不同土壤改良剂下 SOC 含量特征
Fig. 1 SOC contents under different soil amendments

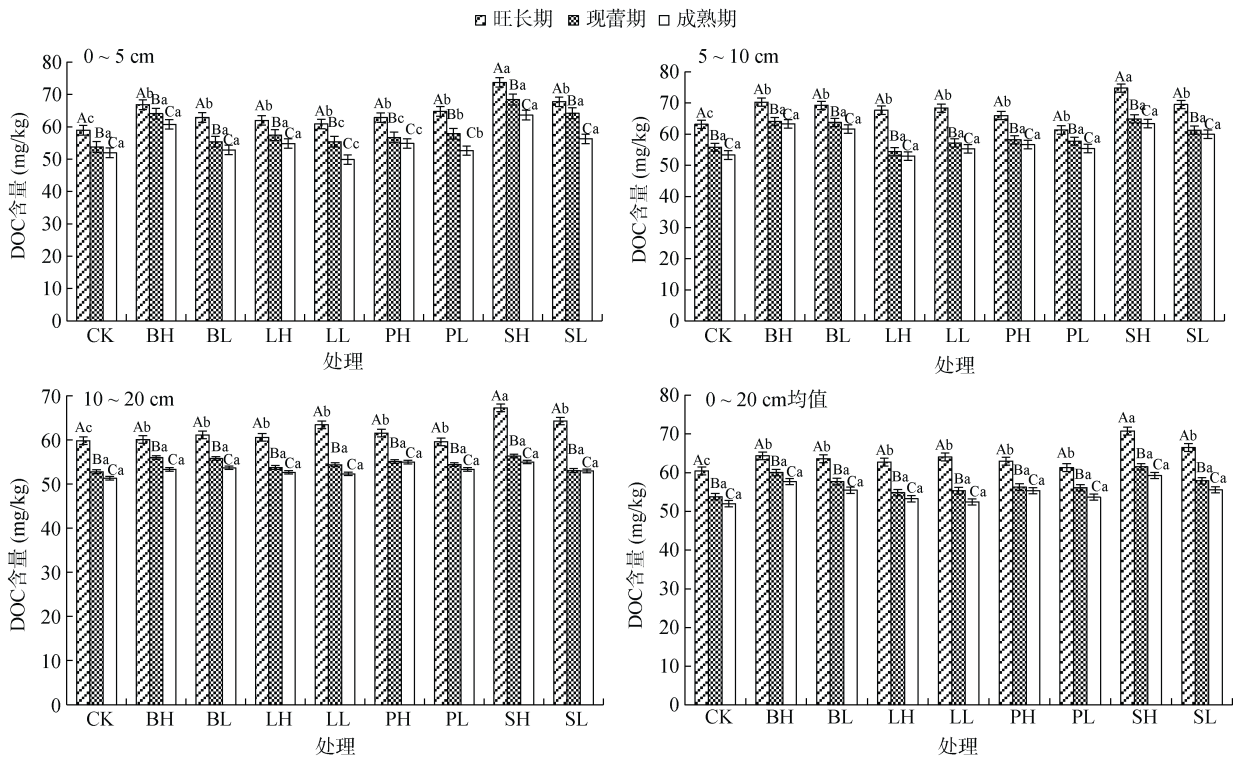


图 2 不同土壤改良剂下土壤 DOC 含量特征
Fig. 2 Soil DOC contents under different soil amendments

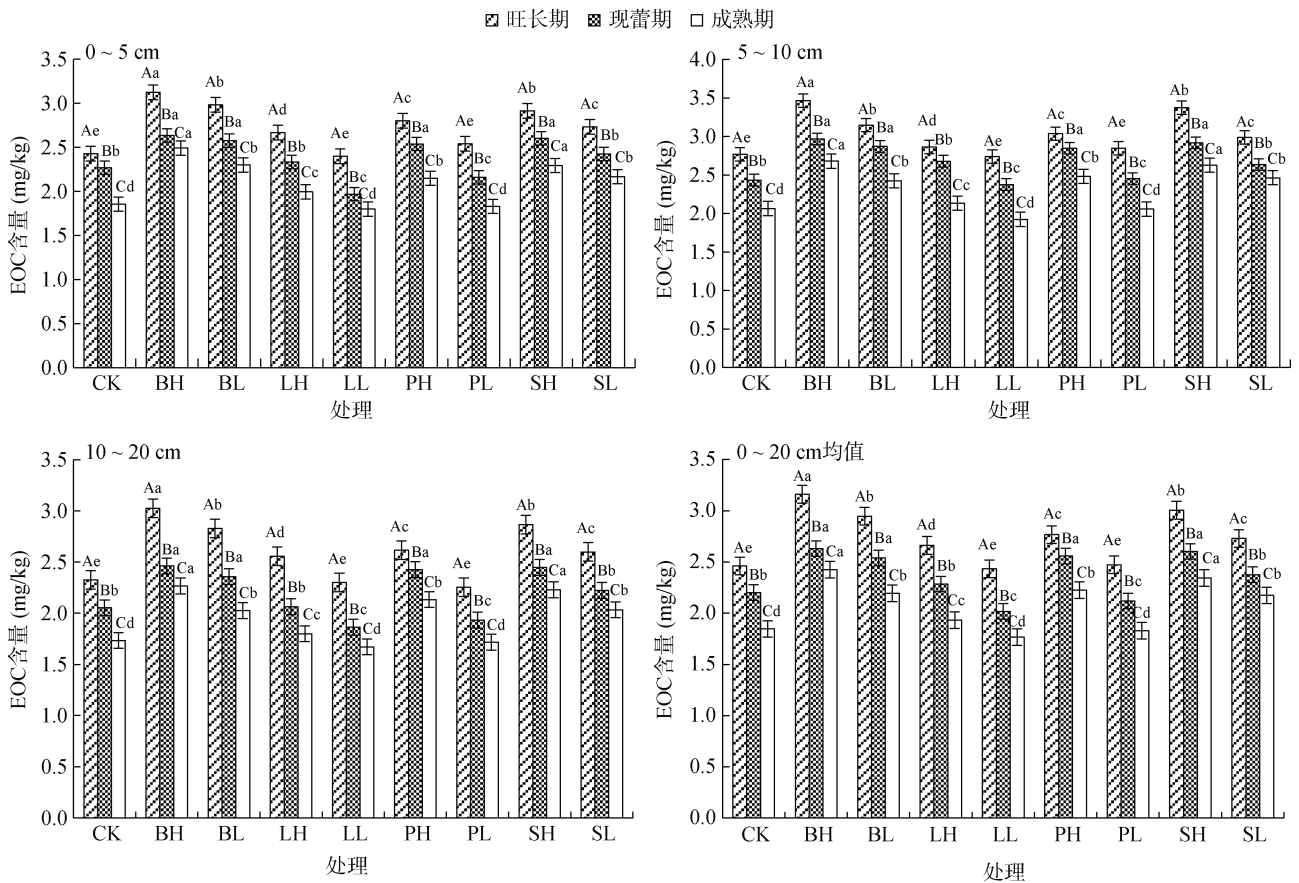


图 3 不同土壤改良剂下土壤 EOC 含量特征
Fig. 3 Soil EOC contents under different soil amendments

由图 4 可知, 土壤中 0~20 cm POC 含量均值在旺长期添加低量聚丙烯酰胺处理和现蕾期、成熟期添加低量木质素处理较对照处理降低, 而其他各处理在不同生育期的 0~20 cm 土壤 POC 含量均值均高于对照处理; 且在现蕾期各处理下 0~20 cm 土壤 POC 含量均值增幅差异并不明显($P>0.05$), 而高量添加生物质炭、秸秆处理下 0~20 cm 土壤 POC 含量均值增幅 (8.8%~53.2%) 高于低量添加处理。在不同时期各土层及 0~20 cm 均值土壤 POC 含量最高的处理为添加高量生物质炭处理, 其中在 0~5 cm 土层其含量相较于其他处理在旺长期、现蕾期和成熟期分别增加了 2.38%~62.09%、2.16%~63.67% 和 6.49%~89.69%; 在 5~10 cm 土层分别增加了 22.49%~47.29%、33.63%~88.63% 和 30.68%~82.12%; 在 10~20 cm 分别增加了 6.94%~33.72%、1.30%~34.00% 和 4.83%~44.07%。

综上, 坡耕地烤烟土壤施加生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆不同土壤改良剂均可在一定程度上提高土壤有机碳组分含量, 其中土壤 DOC 含量以添加高量秸秆处理效果最佳, 土壤 EOC 和 POC 以添

加高量生物质炭处理效果最佳, 各土层土壤有机碳各组分含量均表现为: 5~10 cm>0~5 cm>10~20 cm, 且在烤烟旺长期时高于其他生育期。

2.3 不同土壤改良剂下土壤养分含量特征

不同处理下烤烟成熟期土壤养分含量如表 3 所示。与对照处理相比, 土壤 pH 在添加生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺、秸秆处理下增加 0.03~0.56 个单位; 土壤全氮含量在添加生物质炭、聚丙烯酰胺和秸秆处理下增加 4.6%~35.9%, 在添加木质素处理降低 2.0%~25.5%; 土壤全磷含量在添加生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆处理下增加 1.7%~63.3%。土壤全氮含量表现为添加高量改良剂处理高于低量改良剂处理 1.7%~31.6%, 土壤全磷含量在添加生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺处理下表现为低量添加处理高于高量添加处理 12.9%~29.4%, 在添加秸秆处理下表现为高量添加处理高于低量添加处理 16.2%。其中, 添加高量秸秆处理下土壤全氮、全磷含量增幅高于其他处理, 相较于其他处理全氮含量增加了 19.5%~82.5%, 全磷含量增加了 6.8%~63.3%。各处理的 C:N 在 5.07~8.67, 相较于对照, 添加生物

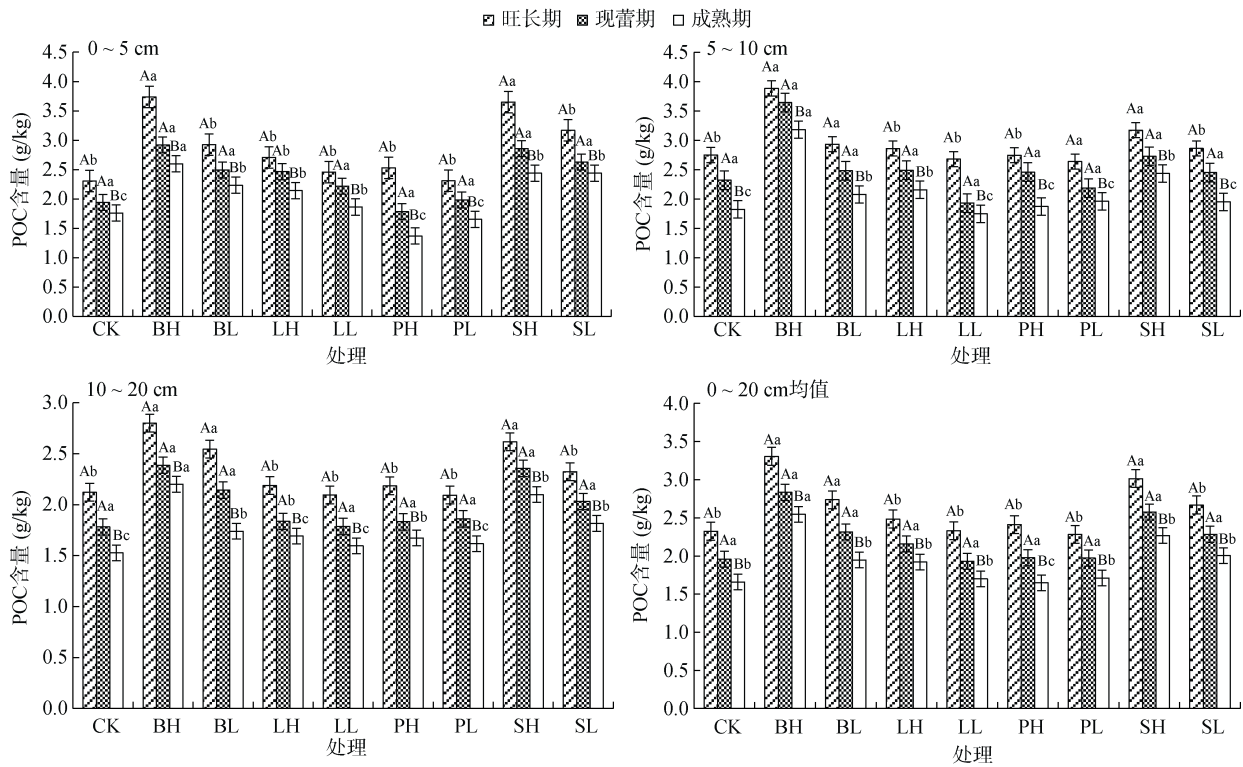


图 4 不同土壤改良剂下土壤 POC 含量特征

Fig. 4 Soil POC contents under different soil amendments

表 3 不同土壤改良剂下土壤理化性质及化学计量指标

Table 3 Soil physicochemical properties and stoichiometric indexes under different soil amendments

| 处理 | pH | SOC(g/kg) | TN(g/kg) | TP(g/kg) | C : N | C : P | N : P |
|----|----------------|--------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| CK | 6.83 ± 0.09 b | 8.84+1.14 c | 1.53 ± 0.09 bc | 1.80 ± 0.16 c | 5.79 ± 0.81 c | 4.91 ± 0.62 b | 0.73 ± 0.008 b |
| BH | 7.09 ± 0.06 ab | 11.20+2.23 b | 1.68 ± 0.12 bc | 1.83 ± 0.13 c | 7.55 ± 1.67 a | 6.12 ± 1.00 a | 0.81 ± 0.04 b |
| BL | 7.07 ± 0.05 ab | 9.55+1.75 b | 1.60 ± 0.40 bc | 2.23 ± 0.35 bc | 8.67 ± 1.82 a | 4.28 ± 1.50 c | 0.50 ± 0.06 c |
| LH | 7.33 ± 0.19 a | 8.98+1.52 b | 1.50 ± 0.31 c | 1.92 ± 0.13 c | 5.07 ± 0.73 c | 4.68 ± 1.07 b | 0.78 ± 0.11 b |
| LL | 7.15 ± 0.08 ab | 9.26+1.33 b | 1.14 ± 0.03 c | 2.07 ± 0.49 bc | 5.31 ± 1.24 c | 3.91 ± 0.22 c | 0.34 ± 0.03 c |
| PH | 6.97 ± 0.06 b | 9.91+0.45 b | 1.77 ± 0.14 ab | 1.86 ± 0.11 c | 6.62 ± 0.10 a | 5.33 ± 0.24 a | 1.00 ± 0.04 a |
| PL | 6.86 ± 0.11 c | 9.83+0.61 b | 1.74 ± 0.11 ab | 2.10 ± 0.40 bc | 8.61 ± 0.35 a | 4.68 ± 1.02 ab | 0.83 ± 0.12 a |
| SH | 7.39 ± 0.14 a | 12.53+1.39 a | 2.08 ± 0.32 a | 2.94 ± 0.27 a | 6.02 ± 1.18 c | 4.26 ± 1.71 c | 0.74 ± 0.17 b |
| SL | 6.9 ± 0.19 b | 10.14+0.72 b | 1.76 ± 0.24 ab | 2.53 ± 0.18 b | 5.76 ± 0.48 c | 4.01 ± 0.26 c | 0.91 ± 0.12 a |

注：表中数据为均值 ± 标准误差；同列不同小写字母表示不同处理间差异性显著(P<0.05)。

质炭、聚丙烯酰胺处理显著提高土壤的 C : N 14.2% ~ 49.7%(P<0.05)；各处理的 C : P 在 3.91 ~ 6.12，相较于对照，添加高量生物质炭和高量聚丙烯酰胺处理显著提高土壤的 C : P 35.5% ~ 47.1% (P<0.05)；各处理的 N : P 在 0.34 ~ 1.00，添加低量生物质炭和低量木质素处理显著降低土壤的 N : P 46.6% ~ 114.4%(P<0.05)。

2.4 土壤有机碳及其组分与理化性质的相关性

从表 4 得知，在不同土壤改良剂处理下，土壤 TN 含量与 TP、POC 含量呈显著正相关关系(P<0.05)，与土壤 SOC 含量呈极显著正相关关系(P<0.01)，但与

土壤 TK 含量呈极显著负相关关系(P<0.01)；土壤 TP 含量与土壤 TK 含量呈显著正相关关系(P<0.05)；土壤 TK 含量与土壤 SOC 含量呈显著负相关关系(P<0.01)。土壤 SOC 含量与土壤 DOC、EOC、POC 含量呈极显著正相关关系(P<0.01)，土壤 DOC 含量与土壤 EOC、POC 含量呈极显著正相关关系(P<0.05)，土壤 EOC 含量与土壤 POC 极显著正相关关系(P<0.05)。

双因素方差分析结果如表 5 所示，土层深度、烤烟生育期和土壤改良剂种类对土壤有机碳组分的影响均极显著(P<0.01)，其中烤烟生育期的影响高于土层深度和土壤改良剂的影响。各有机碳组分中，烤烟

表 4 土壤有机碳及其组分与理化性质之间的相关性
Table 4 Correlations among SOC, SOC components and physicochemical properties

| | TN | TP | TK | SOC | DOC | EOC | POC |
|-----|----|--------|----------|---------|---------|---------|---------|
| TN | 1 | 0.374* | -0.551** | 0.662** | 0.396 | 0.257 | 0.440* |
| TP | | 1 | 0.375* | 0.146 | -0.222 | -0.234 | -0.09 |
| TK | | | 1 | -0.414* | -0.318 | -0.204 | -0.068 |
| SOC | | | | 1 | 0.762** | 0.771** | 0.655** |
| DOC | | | | | 1 | 0.800** | 0.638** |
| EOC | | | | | | 1 | 0.711** |
| POC | | | | | | | 1 |

注: *, **分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平显著相关。

生育期影响最大的为 EOC, 其次是 SOC 和 DOC, 最小的是 POC。同时, 土层深度、生育期、土壤改良剂种类两两间的交互作用对土壤有机碳组分的影响不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

土壤有机碳含量的增加对提高土壤肥力和粮食作物产量, 改善土壤理化性质产生了显著的影响^[14]。本研究中施用不同土壤改良剂均不同程度影响土壤有机碳含量, 可以明显看出在施用土壤改良剂后 SOC 含量相较于对照处理有明显增加。这可能与各改良剂处理条件下外源输入物质的碳有关, 农田中加入生物

质炭中能够促进作物对 CO_2 的吸收, 提高根系的固碳能力, 从而达到 SOC 含量增加的效果^[15]; 添加秸秆能够增加农田土壤中微生物的活性和增加腐殖质含量, 提高 SOC 含量^[16]; 同时, 由于生物质炭和秸秆属于含碳物质, 分解过程中直接提高 SOC 及其各组分含量^[17]。但木质素和聚丙烯酰胺对 SOC 含量提高作用不显著, 这可能是由于木质素和聚丙烯酰胺改良土壤减缓土壤的水分和养分流失, 主要是通过改善土壤结构起作用的^[18], 其本身不属于含碳材料, 无法分解产生有机碳, 因此对 SOC 含量的增加不显著。在烤烟不同生育期中, SOC 含量表现为成熟期 < 现蕾期 < 旺长期, 这与杜倩等^[5]在四川凉山州所得试验结果一致, 这可能是由于烤烟生长过程中不断吸收土壤中的养分, 随着时间延长土壤中的有机碳含量有一定损耗导致的。不同土层土壤有机碳表现为 10 ~ 20 cm < 0 ~ 5 cm < 5 ~ 10 cm, 深层土壤的有机碳含量较浅层低, 这可能是由于土壤有机碳具有典型的表聚性, 作物根系大部分分布于表层土壤中, 分解后形成的有机质主要积累在土壤表层中所导致的^[19]。但本研究中存在 5 ~ 10 cm 土层的 SOC 含量比 0 ~ 5 cm 高的现象, 这可能是由于研究样地为烤烟地, 耕作过程中受到翻耕等农业措施的影响, 使得土壤原有的结构层次遭到破坏, 出现 SOC 含量 5 ~ 10 cm 土层含量更高的现象^[20]。

表 5 不同土层、生育期和土壤改良剂对有机碳组分影响的方差分析

Table 5 Variation analysis of effects of different soil layers, growth periods and soil amendments on SOC components

| 差异来源 | SOC | | DOC | | EOC | | POC | |
|-------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|
| | F | Sig. | F | Sig. | F | Sig. | F | Sig. |
| 土层深度 | 36.132 | 0.000 | 34.507 | 0.000 | 130.485 | 0.000 | 32.133 | 0.000 |
| 烤烟生育期 | 124.847 | 0.000 | 113.170 | 0.000 | 716.255 | 0.000 | 62.868 | 0.000 |
| 土壤改良剂 | 16.342 | 0.000 | 14.247 | 0.000 | 122.870 | 0.000 | 16.778 | 0.000 |
| 土层深度×烤烟生育期 | 1.485 | 0.216 | 0.353 | 0.841 | 0.112 | 0.978 | 0.320 | 0.824 |
| 土层深度×土壤改良剂 | 0.190 | 1.000 | 0.582 | 0.884 | 0.022 | 1.000 | 1.329 | 0.214 |
| 烤烟生育期×土壤改良剂 | 0.565 | 0.896 | 0.285 | 0.996 | 0.406 | 0.975 | 0.084 | 1.000 |

土壤中活性有机碳对土地管理措施的反应和对土壤碳库的改变反应敏感, 因此活性有机碳可用作反映土壤肥力和土壤理化性质变化的指标^[3]。在本研究中, 不同生育期和不同土层的土壤活性有机碳含量的表现与 SOC 一致, 不同土壤改良剂均可提高土壤活性有机碳含量, 总体上表现为生物质炭 > 秸秆 > 木质素 > 聚丙烯酰胺。本研究中, 4 种不同土壤改良剂中对 DOC 含量增加最为显著的是秸秆(4.9% ~ 22.0%), 这与张杰等^[21]的研究结果一致, 这可能是由于相较于其他添加物质, 秸秆在腐熟过程中会释放大量的

DOC 的结果。本研究中, 对 EOC 含量提高最为显著的改良剂是生物质炭(3.4% ~ 28.2%), 这可能是由于生物质炭进入农田可以使作物的生物量特别是根系生物量增加, 这使得土壤新鲜有机碳的输入量上升^[22]。土壤 POC 是长期施肥后 SOC 的主要存在形式, 其占比是 SOC 中除惰性有机碳外最高的部分, 本研究中 POC 含量提高最明显的改良剂同样是生物质炭(18.4% ~ 47.0%), SOC 的损失主要是来源于原土的 POC 分解, 生物质炭腐解过程中产生的 POC 可以减少原土 POC 的损失^[23]。

土壤氮、磷是植物生长发育所必需的元素,也是衡量土壤肥力的指标^[24]。本研究中,施用生物质炭、木质素、聚丙烯酰胺和秸秆在一定程度上可提高土壤氮、磷含量,其中以添加高量秸秆对土壤全氮、全磷含量的提高最为显著(增幅分别为 15.0% ~ 32.8%、37.6% ~ 40.2%),这与前人研究结果一致^[25]。这可能是由于添加秸秆使得土壤孔隙度增加,为微生物的生存提供了良好的环境,进一步加快了秸秆腐化程度,从而增加了土壤的氮、磷含量。本研究区坡耕地烤烟土壤 C : N 在 5.07 ~ 8.67, C : P 在 3.91 ~ 6.12, N : P 在 0.34 ~ 1.00, 相较于全国平均值(C : N 为 11.90、C : P 为 52.76 和 N : P 为 4.20)^[26]均较低,这可能是由于研究样地属连作农田,常年耕作导致土壤养分减少,碳、氮、磷元素积累较慢,造成其生态化学计量比值较低。本研究中, SOC 与 TN 含量呈极显著正相关,这与张春来等^[27]的研究结果一致,这可能是由于土壤氮、磷含量的提高,可以促进作物根系的生长,从而提高 SOC 含量。SOC 与 EOC、DOC 含量呈极显著正相关关系,这也与胡坤等^[28]的研究结果相符,这也说明了活性有机碳含量在较大程度上取决于 SOC 含量^[29]。DOC、EOC、POC 两两之间也呈极显著正相关关系,这与尚旭冉等^[30]的结果相同,这表明 SOC 各组分之间密切相关,而土壤中的活性有机碳是直接介入土壤生物化学转化过程中的重要成分,土壤活性有机碳和 SOC 在特定条件下也能够相互转化,最终达到动态平衡。根据土层深度、烤烟生育期和土壤改良剂的方差分析结果,当将土层深度、烤烟生育期和土壤改良剂分别作为主因素考虑时,其对 SOC、DOC、EOC、POC 含量的影响均较高,但其两两交互作用对 SOC、DOC、EOC、POC 含量的影响不显著。这说明土层深度、烤烟生育期和土壤改良剂分别对土壤有机碳含量有影响,但两两因子间无交互作用,各因素相互独立,不协同也不拮抗。这可能是由于土壤改良剂对土壤有机碳含量的影响不随土层深度或生育期变化而变化导致的,同理亦然。综上,不同改良剂对 SOC 及其组分的影响存在一定差异,添加高量生物质炭和高量秸秆对 SOC 及其各组分含量的提高效果最为显著。但因我国以烤烟为经济作物的地区自然条件各异,不同自然条件地区的改良剂施用量有待进一步研究。今后研究可集中于不同自然条件下生物质炭和秸秆对植烟土壤 SOC 的影响,以为我国烟草行业的进一步发展提供理论依据。

4 结论

相较于聚丙烯酰胺和木质素,添加生物质炭和秸秆对滇中红壤丘陵区植烟土壤 SOC 及其各组分含量、土壤养分的生态化学计量特征的提升效果更佳,尤其以添加 0.06 kg/m² 生物质炭和 0.5 kg/m² 秸秆效果较佳。

参考文献:

- [1] 范幸龙, 李炜, 张莉, 等. 云南不同生态区烟叶主要品质性状差异分析[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(3): 77-82.
- [2] 叶协锋, 李志鹏, 于晓娜, 等. 生物炭用量对植烟土壤碳库及烤后烟叶质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5): 33-41.
- [3] 黎嘉成, 高明, 田冬, 等. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 39-50.
- [4] 阎海涛. 生物炭对植烟褐土的改良效应及其微生态机理研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [5] 杜倩, 黄容, 李冰, 等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1440-1450.
- [6] 张杰, 汪洪, 李书田, 等. 施用木质素对土壤中尿素转化及释放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 16-20, 85.
- [7] 宋彬, 孙茹茹, 梁宏旭, 等. 添加木质素和生物炭对土壤氮、磷养分及水分损失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 227-232, 241.
- [8] 张海欧, 孙小梅. 聚丙烯酰胺(PAM)土壤改良剂与应用效应[J]. 农技服务, 2021, 38(6): 99-101.
- [9] 杨明金, 张勃, 王海军, 等. 聚丙烯酰胺和磷石膏对土壤导水性能的影响研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 747-750.
- [10] 王虎, 王旭东, 田宵鸿. 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.
- [11] 王毅, 张俊清, 况帅, 等. 施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 285-294.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [14] 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.
- [15] 李程, 李小平. 生物质炭制备及不同施用量对土壤碳库和植物生长的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(10): 1786-1791.
- [16] 李婧. 不同有机物料还田对黑土活性有机碳组分和大豆品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [17] 张继旭, 张继光, 张忠锋, 等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(5): 16-21.
- [18] 孙波, 吕春娟. 聚丙烯酰胺在土壤改良中的应用[J]. 水土保持应用技术, 2020(6): 23-26.
- [19] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性

- 有机碳分布特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246–1251.
- [20] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 911–919.
- [21] 张杰, 黄金生, 刘佳, 等. 秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO₂ 释放及有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 401–408.
- [22] 肖欣娟, 夏建国, 马黛玉, 等. 茶渣生物质炭对茶园土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 294–300.
- [23] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 278–286.
- [24] 胡义, 唐力, 张瑜, 等. 南郑区不同土地利用方式下土壤养分及生态化学计量特征[J]. 陕西林业科技, 2021, 49(3): 7–12.
- [25] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 16–21.
- [26] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [27] 张春来, 杨慧, 曹建华, 等. 岩溶区不同土地利用方式土壤碳、氮、磷生态化学计量的空间变异性研究[J]. 南方农业学报, 2020, 51(7): 1650–1659.
- [28] 胡坤, 张红雪, 郭力铭, 等. 烟秆炭基肥对薏苡土壤有机碳组分及微生物群落结构和丰度的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1592–1603.
- [29] 董扬红. 陕北黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分及酶活性特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [30] 尚旭冉, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山森林土壤有机碳组分对模拟氮沉降的响应[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(6): 838–845.