

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

王毅^{1,2,3}, 张俊清¹, 况帅¹, 管恩森³, 嵇其翠⁴, 宋晓培^{1,2}, 芦伟龙^{1,2},
王大海³, 刘跃东^{1,2}, 张继光^{1*}

(1 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101; 2 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;
3 山东潍坊烟草有限公司, 山东潍坊 262200; 4 山东省农业科学院作物研究所, 山东济南 250100)

摘要:【目的】以2年田间定位试验为依托, 研究小麦秸秆及其生物炭连续施用对植烟土壤理化性状和有机碳组分的影响, 为烟区土壤质量提升提供依据。【方法】田间试验在山东省诸城市潮褐土烟田上进行。试验设4个处理, 分别为: 常规施肥且秸秆不还田(CK), 常规施肥+小麦秸秆还田(FS), 常规施肥+小麦秸秆生物炭2.25 t/hm²(FB1)和4.50 t/hm²(FB2)。在烟叶收获后, 采集0—20 cm耕层土样, 测定了土壤基础理化指标和总有机碳(TOC)、微生物生物量碳(MBC)、热水溶性有机碳(HWC)、活性有机碳(LOC)及轻组有机碳(LFOC)含量, 并计算土壤碳库管理指数(CPMI)。【结果】连续施用小麦秸秆或其生物炭2年后, FB1和FB2处理TOC含量显著高于CK, 增幅分别为74.9%和116.0%, 而FS与CK处理间差异不显著。LFOC含量的变化趋势与TOC类似, FB1和FB2处理LFOC含量分别较CK处理显著增加154%和326%。FS处理HWC含量显著高于CK和FB1处理, 而与FB2处理差异不显著。与CK相比, FS处理HWC含量增加了107%。FS和FB2处理MBC含量较CK分别增加了252%和144%, 而FB1处理与CK相比差异不显著。FS处理LOC含量较CK显著增加了68.9%, 而FB1、FB2处理LOC含量与CK相比差异不显著。FS处理还能显著降低土壤容重、增加土壤含水量及有效磷含量, 其对部分土壤理化特性的改良效果优于生物炭处理(FB1和FB2)。此外, CPMI也以FS处理最高, 较CK显著增加了73.5%, 而FB1、FB2处理与CK处理差异不显著。【结论】连续秸秆还田有利于提升烟田土壤活性有机碳(MBC、HWC和LOC)含量, 降低土壤容重, 提高有效磷含量, 提高土壤CPMI。而同量秸秆转化为生物炭后连续还田能够提高土壤总有机碳和轻组有机碳含量, 更有利于土壤有机碳的长期固存。

关键词: 小麦秸秆; 生物炭; 土壤理化特性; 有机碳组分; 碳库管理指数

Effects of wheat straw and its biochar application on soil physiochemical properties and organic carbon fractions in flue-cured tobacco field

WANG Yi^{1,2,3}, ZHANG Jun-qing¹, KUANG Shuai¹, GUAN En-sen³, ZHUO Qi-cui⁴, SONG Xiao-pei^{1,2}, LU Wei-long^{1,2},
WANG Da-hai³, LIU Yue-dong^{1,2}, ZHANG Ji-guang^{1*}

(1 Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China; 2 The Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3 Weifang Tobacco Co., Ltd., Weifang, Shandong 262200, China; 4 Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: 【Objectives】To understand the effects of wheat straw and its biochar on soil physiochemical properties and organic carbon fractions to provide basis for improvement of flue-cured tobacco planting soil.

【Methods】A two-year field experiment was carried on the meadow-cinnamon soil in 2016 and 2017 in Zhucheng, Shandong Province. Four treatments were designed, namely, chemical fertilizer alone (CK), chemical fertilizer plus wheat straw (FS), chemical fertilizer plus biochar of 2.25 t/hm² (FB1), and 4.50 t/hm² (FB2). At

收稿日期: 2019-03-04 接受日期: 2019-07-19

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-TRIC06/03); 国家农产品质量安全风险评估专项(GJFP2019034)。

联系方式: 王毅 E-mail: 65202900@qq.com; *通信作者 张继光 E-mail: zhangjiguang@caas.cn

tobacco harvest, soil samples were collected in the plough layer (0–20 cm), and soil physiochemical properties and contents of microbial biomass C (MBC), hot-water extractable C (HWC), labile organic C (LOC), light fraction organic C (LFOC), and carbon pool management index (CPMI) were investigated. 【 **Results** 】 The TOC contents in FB1 and FB2 was 74.9% and 116.0% significantly higher than that in CK, whereas no significant difference was found between FS and CK. The variation trend of LFOC in the four treatments was similar to that of TOC, and LFOC content in FB1 and FB2 was 154% and 326% significantly higher than that in CK. No significant difference in HWC content was observed between FS and FB2, while HWC content in FS treatment was significantly higher than that in FB1 and CK. In comparison with CK, HWC content in FS was increased by 107%. MBC content in FS and FB2 was significantly higher by 252% and 144% than that in CK, but no significant difference was found between FB1 and CK. LOC content in FS was significantly increased by 68.9% compared to that in CK, while no significant difference was found among FB1, FB2 and CK treatments. In addition, wheat straw returning (FS) significantly decreased soil bulk density and increased soil water content and soil available P content, which had a better effect on some soil physical and chemical properties than those of biochar treatments. The FS treatment also had the highest value of CPMI, which was 73.5% significantly higher than that of CK. However, the biochar treatments (FB1 and FB2) decreased or changed a little CPMI in comparison with CK. 【 **Conclusions** 】 The continuous incorporation of wheat straw could increase the contents of soil labile organic carbon fractions of MBC, HWC and LOC, improve soil physiochemical properties, whereas wheat straw biochar could increase the stability of soil organic carbon, which is beneficial for the long-term stable fixation of soil organic carbon.

Key words: wheat straw; biochar; soil physiochemical properties; organic carbon fractions; carbon pool management index (CPMI)

潮褐土土体深厚, 肥力中等偏上, 是山东最适宜的植烟土壤之一, 由于常年的连作种植、有机物料投入不足以及化学肥料的大量使用, 致使土壤理化性状恶化, 肥力降低^[1], 已经严重制约了土壤的可持续利用及农业的可持续发展。土壤有机碳 (total organic carbon, TOC) 作为土壤质量和土壤肥力的核心, 与土壤的物理、化学及生物学特性密切相关, 在土壤养分循环中发挥重要作用^[2], 但 TOC 含量是一个矿化分解和合成的平衡结果, 短期内的数量变化难以灵敏反映土壤有机碳的周转速率以及土壤质量的变化^[3]。土壤活性有机碳组分是土壤有机碳库中活性较高、容易被微生物分解矿化以被作物直接吸收的部分, 它能够迅速响应农田管理措施的变化, 其中土壤微生物生物量碳 (microbial biomass C, MBC)、热水溶性有机碳 (hot-water extractable C, HWC)、活性有机碳 (labile organic C, LOC) 含量等是其常用的重要表征指标^[4]。Lefroy 等^[5]在土壤活性有机碳研究基础上提出了土壤碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI) 的概念, 它能全面动态地反映土壤碳库的有效性, 更加系统灵敏地揭示出土壤肥力的变化, 在农田土壤有机碳转化研究及管理方面得到了广泛应用^[6]。

农作物秸秆中含有丰富的碳、氮、钾及微量元素等养分, 作为资源高效循环利用的途径之一, 秸

秆直接还田能够增加土壤有机碳及活性组分含量^[7-9], 提高土壤微生物活性^[10], 改善土壤理化性状^[11]。但也有研究指出, 秸秆直接还田容易引起 CO₂ 等温室气体排放量增加^[12]。而秸秆在高温低氧条件下经过裂解形成的富碳多孔性物质—生物炭 (biochar), 具有容重小、比表面积大、吸附能力强、稳定性高等特点^[13]。土壤中添加秸秆生物炭, 不仅可以增加土壤有机碳的储备^[14], 改善土壤理化性状^[15], 还能调节温室气体排放^[14], 但土壤中不同活性有机碳组分对生物炭的响应还存在较大差异^[14,16-17]。目前, 秸秆还田及其生物炭在我国烟田土壤的应用多侧重于土壤改良及烟叶产质量影响方面^[18-19], 相比之下, 鲜见秸秆及其生物炭还田后烟田土壤有机碳组分及碳库管理指数 (CPMI) 动态变化方面的报道。为此, 本研究采用连续 2 年的田间小区试验, 研究小麦秸秆及其生物炭施用对烟田土壤基本理化性状、有机碳组分及 CPMI 的影响, 旨在为秸秆资源高效利用及烟田土壤质量提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016—2017 年在山东省诸城市贾悦镇西洛庄村 (N36°1'17.22"、E119°6'45.46") 进行, 试验区

地处鲁东丘陵区, 属温带季风气候区, 年均日照时数 2578 h, 平均气温 12.3°C, 降水量 773 mm, 无霜期 232 天。土壤类型为潮褐土, 质地为壤土, 常年种植烤烟。试验区耕层土壤 (0—20 cm) 的主要理化性状为: pH 7.82, 有机碳 8.58 g/kg, 碱解氮 91.0

mg/kg, 有效磷 20.6 mg/kg, 速效钾 214 mg/kg。

供试小麦秸秆为试验区自产, 小麦秸秆生物炭为当地自制 (400°C~500°C 热解 1 h), 小麦秸秆生物炭的转化率约为 33%。小麦秸秆及其麦秸生物炭的基本理化性状见表 1。

表 1 小麦秸秆及其生物炭的理化性状

Table 1 Basic physiochemical properties of wheat straw and its biochar

材料 Material	pH	全碳 (g/kg) Total C	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K	全钙 (g/kg) Total Ca	全镁 (g/kg) Total Mg
小麦秸秆 Wheat straw	7.62	395	11.6	0.977	11.84	3.57	2.32
麦秸生物炭 Wheat straw biochar	10.60	474	9.0	1.852	44.70	8.46	5.61

1.2 试验设计

根据小麦秸秆的不同还田方式及用量, 该试验共设置 4 个处理, 分别为: 1) 烟草常规施肥 N 76.5 kg/hm², P₂O₅ 84.2 kg/hm², K₂O 191.2 kg/hm², 无秸秆还田措施 (CK); 2) 常规施肥+小麦秸秆 6.75 t/hm²(FS); 3) 常规施肥+小麦秸秆生物炭 2.25 t/hm²(由 6.75 t 小麦秸秆烧制, FB1); 4) 常规施肥+小麦秸秆生物炭 4.50 t/hm²(FB2)。每个处理 3 次重复, 随机排列, 每个重复小区面积为 48 m²。

每年 3 月下旬烟田起垄前, 地表撒施小麦秸秆及其生物炭, 经翻耕混匀后, 再施肥起垄。各施肥种类及用量情况为: 烟草专用复合肥 (N 10%、P₂O₅ 10%、K₂O 20%) 施用量为 600 kg/hm², 硫酸钾 (K₂O 50%) 施用量为 105.0 kg/hm², 磷酸二铵 (N 16.5%、P₂O₅ 44.5%) 施用量为 60.0 kg/hm², 硝酸钾 (N 13.5%、K₂O 44.5%) 施用量为 45.0 kg/hm²。供试烤烟品种为 NC55, 5 月 10 号左右移栽, 烤烟的行株距为 1.2 m × 0.5 m, 移栽密度为 16500 株/hm²。其他大田管理参考当地优质烟叶生产技术规范进行。

1.3 样品采集与测定

待每年 9 月底烟叶采收结束后, 在每个试验小区垄体采集 0—20 cm 土层的 3 个环刀样, 同时用土钻以“S”法采集 5 个土样, 充分混匀后采用“四分法”留取 1.5 kg 土壤带回实验室。土样经去杂后, 过 2 mm 筛, 分成两份, 一份储藏于 4°C 冰箱中用于测定土壤 MBC 和 HWC 含量; 另一份风干后再过 0.25 mm 筛, 用于测定土壤其他指标。

土壤容重和质量含水量采用环刀法测定, TOC 含量采用重铬酸钾氧化—分光光度法测定, pH 采用电位计法 (水土比 2.5:1) 测定, 阳离子交换量 (CEC) 采用中性乙酸铵交换法测定, 全氮采用半微量凯氏法测定, 有效磷采用钼锑抗比色法测定, 速效钾采

用火焰光度计法^[20]测定。有机碳组分 HWC 的测定: 称取过 2 mm 筛的土壤, 加入蒸馏水后, 在恒温水浴锅煮沸 60 min, 取上清液测定其有机碳含量^[21]; 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定 MBC 含量^[22]: 用 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液分别浸提经氯仿熏蒸处理后及未熏蒸的土样, 过滤后, 用 K₂Cr₂O₇ 氧化法测定滤液中可溶性碳的浓度, 根据熏蒸后与熏蒸前差值, 除以转换系数, 即得到 MBC 含量; LOC 的检测: 土壤样品过筛称重后加入 KMnO₄ 溶液 (浓度为 333 mmol/L), 密封后振荡离心, 吸取上清液并稀释, 于波长 565 nm 处用分光光度计比色测定, 根据 KMnO₄ 用量, 计算 LOC 含量^[23]; 轻组有机碳 (light fraction organic carbon, LFOC) 的测定: 用 NaI 重液 (密度 1.8 g/cm³) 分离组分, 离心后过滤悬浮液, 获取的轻组部分经洗涤、烘干后称重, 测定其有机碳含量, 根据轻组部分的比例及测得的有机碳含量, 即可测算 LFOC 含量^[24]。

以 2016 年烟叶采收后常规施肥处理 CK 的土壤样品为对照, 土壤碳库管理指数及相关指标计算方法如下^[7]:

$$\text{碳库指数(CPI)} = \frac{\text{样品TOC含量}}{\text{对照土壤TOC含量}} \quad (1)$$

$$\text{碳库活度(L)} = \frac{\text{活性碳含量(LOC)}}{\text{稳态碳含量(TOC-LOC)}} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度指数(LI)} = \frac{\text{样品的碳库活度}}{\text{对照土壤的碳库活度}} \quad (3)$$

$$\text{碳库管理指数(CPMI)} = \text{CPI} \times \text{LI} \times 100 \quad (4)$$

1.4 数据处理

用 Excel 2013 计算数据的平均值、标准差, 并进行绘图; 用 IBM Statistics SPSS 19.0 软件进行单因

素方差分析、相关性分析, 用 LSD 法进行显著性检验, 图中误差线表示标准偏差 (SD)。

2 结果与分析

2.1 小麦秸秆及其生物炭对土壤理化特性的影响

表 2 显示, 与 CK 相比, FS 处理土壤容重显著降低了 14.0%, 土壤含水量显著增加了 33.4%, 而 FB1、FB2 与 CK 处理相比其土壤容重及含水量的差异均不显著; 此外, FS、FB1 和 FB2 处理的土壤阳离子交换量、pH、全氮及速效钾含量均略高于 CK, 但差异不显著; FS 和 FB2 处理的有效磷含量较 CK 处理显著增加, 增幅分别为 82.9% 和 66.5%, 而 FB1 处理与 CK 的差异则不显著。

2.2 小麦秸秆及其生物炭对土壤 TOC 的影响

小麦秸秆及其生物炭处理 TOC 含量呈增加趋势

(图 1), 但仅 FB1 处理 TOC 含量年度间差异显著, 其他处理差异不显著。施用秸秆及其生物炭两年后, 与 CK 相比, FS 处理 TOC 含量增加了 20.7%, 但差异不显著; FB1 和 FB2 的 TOC 含量较 CK 显著增加, 增幅分别为 74.9% 和 116.0%。

2.3 小麦秸秆及其生物炭对土壤活性有机碳组分的影响

由图 2 可知, 不同处理 HWC 含量年度间均无显著变化。连续施用两年后, HWC 含量以 FS 最高, 较 CK 显著增加了 107%, 而 FB1 和 FB2 处理与 CK 相比差异不显著。与 2016 年相比, 2017 年 FS、FB1 和 FB2 处理的 MBC 含量均显著增加, 增幅分别为 150.0%、28.2% 和 86.5%。秸秆及其生物炭施用两年后, FS 和 FB2 处理 MBC 含量分别较 CK 显著提高了 252% 和 144%, 而 FB1 与 CK 差异不显著。

表 2 小麦秸秆及生物炭处理的土壤理化性质

Table 2 Physiochemical properties of soils treated with wheat straw and its biochar

处理 Treatment	容重 (g/cm ³) Bulk density	土壤含水量 (%) Water content	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	pH	全氮 (g/kg) Total N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
CK	1.19 a	9.77 b	26.6 a	7.84 a	0.63 a	22.5 b	229 a
FS	1.03 b	13.0 a	27.9 a	7.86 a	0.80 a	41.1 a	254 a
FB1	1.15 ab	10.5 b	27.4 a	7.93 a	0.70 a	23.2 b	247 a
FB2	1.13 ab	12.1 b	28.1 a	8.01 a	0.69 a	37.4 a	308 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

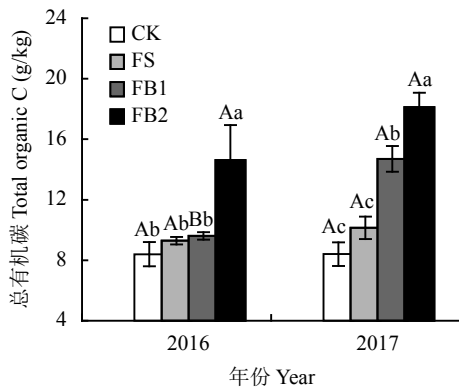


图 1 2016 和 2017 年小麦秸秆及其生物炭处理的土壤总有机碳含量

Fig. 1 Total organic carbon content of soils treated with wheat straw and its biochar in 2016 and 2017

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一年度不同处理间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同年度间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate difference among treatments in the same year, and different capital letters indicate significant difference between 2016 and 2017 in the same treatment ($P < 0.05$).]

各处理 LOC 含量两个年度间差异不显著。当年投入秸秆和生物炭对土壤 LOC 含量影响较小, 而连续施用两年后, 与 CK 相比, FS 处理 LOC 含量显著增加, 增幅为 68.9%, 而 FB1 和 FB2 增幅不显著。2017 年, FB1 和 FB2 处理 LFOC 含量较 2016 年分别显著增加了 90.4% 和 130.0%, 而 FS 处理 LFOC 含量增幅较小, 且差异不显著。连续 2 年投入秸秆和生物炭, 各处理 LFOC 含量以 FB2 处理最高, 其次是 FB1, 较 CK 分别显著增加了 326% 和 154%, 但 FS 处理与 CK 相比差异不显著。

2.4 土壤有机碳组分间及其与土壤理化特性间的关系

从土壤各有机碳组分间的相关性 (表 3) 可以看出, TOC 与 LFOC 呈极显著正相关 ($R^2 = 0.911$, $P < 0.01$), 表明 LFOC 的增加有助于 TOC 含量的提高; MBC 与 HWC、LOC 呈极显著的正相关 ($R^2 = 0.621$ 和 0.589 , $P < 0.01$), 说明各有机碳组分之间存在密

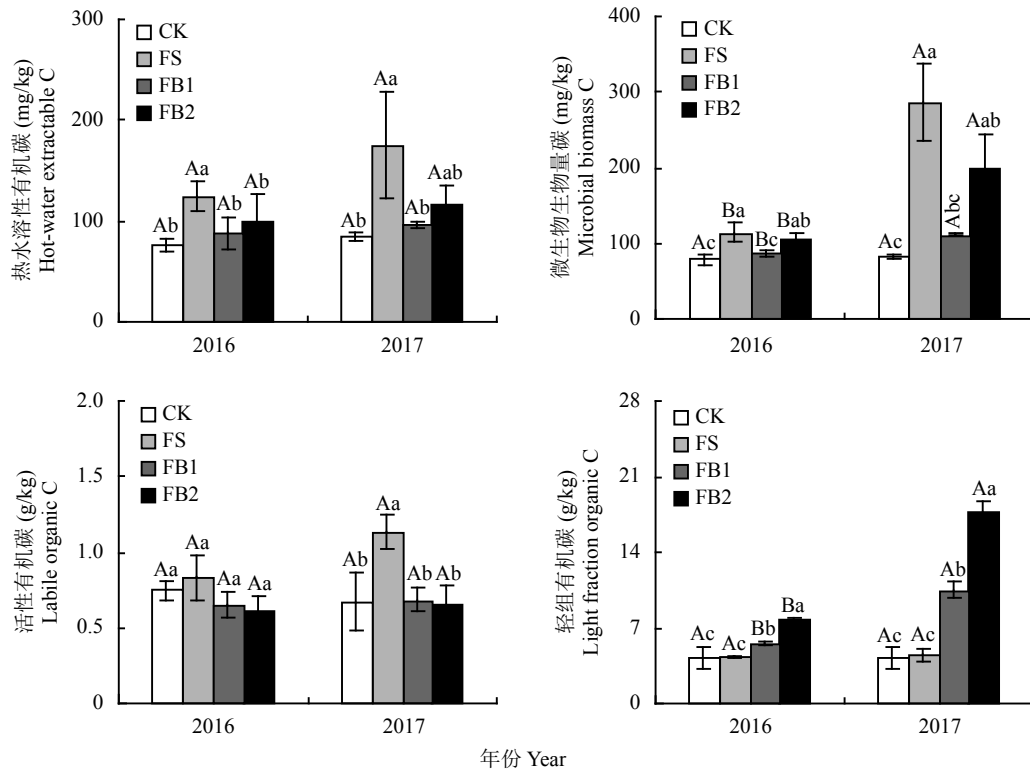


图 2 2016 和 2017 年施用小麦秸秆及其生物炭土壤活性有机碳组分含量

Fig. 2 Contents of labile organic carbon fractions in soils treated with wheat straw and its biochar in 2016 and 2017

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一年度不同处理间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同年度间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate difference among treatments in the same year, and different capital letters indicate significant difference between 2016 and 2017 in the same treatment ($P < 0.05$).]

切的转化关系。而从土壤有机碳组分与土壤理化特性间的相关性 (表 4) 来看, 不同土壤理化指标与 TOC 相关性较差, 而与 MBC、HWC 和 LOC 相关性较好。MBC 与土壤全氮含量、阳离子交换量、土壤含水量和有效磷含量呈显著或极显著的正相关, 与容重呈极显著的负相关; HWC 与土壤容重呈极显著的负相关, 与土壤含水量和有效磷含量呈显著的正相关; LOC 与全氮含量呈显著的正相关, 与土壤容重呈显著的负相关。

表 3 土壤有机碳组分间的相关性

Table 3 Pearson correlations among soil organic carbon fractions

指标 Index	TOC	MBC	HWC	LOC	LFOC
TOC	1				
MBC	0.255	1			
HWC	0.041	0.621**	1		
LOC	0.327	0.589**	0.716**	1	
LFOC	0.911**	0.232	0.026	0.331	1

注 (Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.5 小麦秸秆及其生物炭对土壤 CPMI 的影响

由表 5 可知, 与 CK 相比, 秸秆及其生物炭施用 1 年后, FB2 的 CPI 值最高, 较 CK 显著增加了 74.0%; 而 LI 值最低, 较 CK 显著降低了 54.8%, 不同处理间 CPMI 差异不显著; 秸秆及其生物炭施用 2 年后, FB1 和 FB2 的 CPI 值较 CK 分别显著增加了 75.0% 和 116.0%; LI 值以 FS 处理最高, 生物炭处理 (FB1 和 FB2) 最低; 与 CK 相比, FS 处理 LI 值增加了 40.9%, 生物炭处理则分别降低了 43.3% 和 57.9%; 各处理的 CPMI 值以 FS 处理为最高, 较 CK 显著增加了 73.5%, 但生物炭处理与 CK 差异不显著。

3 讨论

3.1 秸秆及其生物炭施用对土壤理化特性的影响

土壤容重影响土壤的通透性, 并与土壤的水、肥、气、热条件密切相关, 土壤容重降低通常意味着土壤结构及其通气性得到改善。本研究中, 与对照 CK 相比, FS 处理显著降低了土壤容重, 提高了土壤含水量, 而生物炭处理 (FB1 和 FB2) 的土壤容

表 4 土壤有机碳组分与土壤理化特性间的相关性

Table 4 Pearson correlation among soil organic carbon fractions and soil physiochemical properties

指标 Index	容重 Bulk density	土壤含水量 Water content	阳离子交换量 CEC	全氮 Total N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	pH
TOC	0.000	0.175	0.350	0.013	0.258	0.499	0.480
MBC	-0.755**	0.730**	0.656*	0.620*	0.788**	0.361	0.004
HWC	-0.771**	0.621*	0.240	0.499	0.660*	0.017	0.123
LOC	-0.674*	0.412	0.336	0.634*	0.419	0.257	0.072
LFOC	-0.096	0.167	0.307	0.103	0.230	0.537	0.520

注 (Note) : *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

表 5 秸秆与生物炭处理土壤碳库管理指数及相关指标

Table 5 Carbon pool management index and related indicators of soils treated with straw and biochar

年份 Year	处理 Treatment	碳库指数 CPI	碳库活度 L	碳库活度指数 LI	土壤碳库管理指数 CPMI
2016	CK	1.00 b	0.099 a	1.00 a	100.00 a
	FS	1.11 b	0.098 a	0.99 a	109.77 a
	FB1	1.14 b	0.073 ab	0.73 ab	83.86 a
	FB2	1.74 a	0.045 b	0.45 b	76.22 a
2017	CK	1.00 c	0.090 ab	0.91 ab	88.71 b
	FS	1.21 c	0.13 a	1.28 a	153.92 a
	FB1	1.75 b	0.049 bc	0.51 bc	89.55 b
	FB2	2.16 a	0.038 c	0.38 c	81.97 b

注 (Note) : CPI—Carbon pool index; L—Liability of carbon; LI—Liability index of carbon; CPMI—Carbon pool management index. 同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

重和含水量虽略有改善但差异不显著。赵海成等^[25]研究了水稻秸秆和生物炭添加对黑龙江盐碱土物理特性的影响,也得到类似结果。由于小麦秸秆密度较小、投入量较大,短期内秸秆在土壤中难以完全矿化分解,因而能够通过占据较大土壤空间,迅速降低土壤容重,改善土壤通透性,并提高土壤的含水量。秸秆在炭化过程中,其不稳定的有机组分挥发损失导致孔隙的形成,而木质素等难降解组分则保留下来形成富含大量微孔结构的生物炭,秸秆生物炭具有富含微孔和比表面积大的特性,持续施入土壤后能够通过吸附微小土壤团聚体颗粒达到持续改善土壤孔隙度,降低土壤容重的目的^[25-26]。

土壤 CEC 是土壤胶体所能吸附的阳离子总量,直接反映了土壤的保肥、供肥性能和缓冲能力的大小^[27]。刘楠等^[28]开展的培养试验表明,向淡黑钙土中添加秸秆能够增加土壤中有机胶体和有机-无机复合胶体含量,并提高土壤的 CEC 值。生物炭本身具有

较高的 CEC 值,Glaser 等^[29]认为少量施用生物炭即可显著增加 CEC 值。在本试验中,与常规施肥相比,小麦秸秆及其生物炭处理 CEC 值均未显著增加,这可能与试验开展时间短及 CEC 值响应滞后等因素有关。研究还发现,秸秆还田及生物炭处理 (FB2) 的烟田土壤有效磷含量均显著高于常规对照 (CK),土壤全氮和速效钾含量也呈上升趋势,但差异尚不显著。这是由于秸秆还田后能够被土壤微生物迅速降解,释放大量养分到土壤中,因而会增加土壤中养分的积累^[30-31];生物炭除了电荷密度较高,能够强烈吸附土壤中的养分,有效减少土壤中养分的淋失和流失^[32]外,还可以提高土壤中磷酸酶等微生物活性,释放土壤中的无效态磷,提高有效磷的含量^[33]。

3.2 秸秆及其生物炭施用对烟田土壤中有机碳及其组分的影响

小麦秸秆及其生物炭施用对土壤有机碳 (TOC)

及其组分特征具有重要影响, 且活性有机碳组分能更灵敏地反映土壤肥力的变化。本研究中秸秆还田处理的土壤 TOC 含量有所增加, 但与常规对照相比差异不显著。其原因可能是: 一方面土壤 TOC 背景值较高, 变化较慢, 对短期农业管理措施引起的变化不敏感^[34]; 另一方面秸秆中含有较多的新鲜有机质, 在土壤中易分解, 不利于土壤有机碳的长期固持^[31]。而秸秆生物炭处理 (FB1 和 FB2) 均能显著提高土壤 TOC 含量, 连续 2 年的结果发现其累积效应明显, 且以 FB2 处理效果更好 (图 1)。其原因是秸秆生物炭生物稳定性强, 土壤微生物难以分解其有机碳组分, 致使土壤施入的有机碳量远高于分解量, TOC 含量表现为碳积累^[35]。高梦雨等^[36]以棕壤为研究对象, 发现不同用量玉米芯生物炭处理间土壤 TOC 含量并无显著差异, 这与本文研究结果不同。造成这种差异的原因可能与供试土壤 TOC 本底值、碳库容量等因素有关。

土壤微生物生物量碳 (MBC) 在调控有机质分解、养分循环方面发挥重要作用, 是土壤生物学肥力的重要指标^[37]。本研究中, FS 及 FB2 处理 MBC 含量均显著高于常规对照, 且其含量逐年增加。秸秆还田能够增加土壤中碳氮输入, 改善土壤微生物繁育环境条件, 提高微生物的活性和数量^[3, 6]; 同时, 生物炭能够为土壤微生物提供充足的养分来源和良好的生境条件, 以增加土壤微生物数量^[6], 并最终改善土壤生物学肥力。热水溶性有机碳 (HWC) 与土壤微生物关系密切, 也是评价土壤有机碳生物潜在可用性的重要依据^[38]。增施有机物料是提高土壤 HWC 含量的有效手段^[39]。本研究中, 秸秆还田显著提高土壤中 HWC 含量, 而秸秆生物炭对 HWC 含量影响较小, 这说明与生物炭施用相比, 秸秆直接还田更有利于提高土壤有机碳的生物有效性。究其原因, 一方面秸秆在炭化过程中, 秸秆活性较高的组分多转化为惰性物质, 致使其生物活性降低^[40]; 另一方面生物炭可能会对热水溶性有机碳产生吸附作用, 从而使其在土壤溶液中的浓度降低。

轻组有机碳 (LFOC) 是指土壤有机碳密度组分中比重小的部分, 主要由处于不同分解阶段的植物碎片、植物根系和木炭等组成^[41]。已有研究发现, 土壤中的 LFOC 含量与归还到土壤中的植物残体或添加的有机物料种类密切相关^[42], 而不易分解的有机物料, 往往更有利于增加土壤中 LFOC 含量^[43]。本研究中生物炭处理 LFOC 含量显著高于常规对照, 这与生物炭密度小且形态稳定, 轻组部分能够在土壤中

大量集中且不易分解有关^[44]。相比 LFOC, 活性有机碳 (LOC) 检测方法更便捷、应用更加广泛^[35, 45]。不同秸秆还田方式对土壤 LOC 形成、转化有重要影响^[9]。本研究中, 秸秆还田处理 2017 年的 LOC 含量显著高于常规对照, 这与许多研究^[8, 45]结果类似。秸秆生物炭对土壤中 LOC 含量的影响, 不同研究者分歧较大。王宏燕等^[46]的培养试验表明, 添加 1% (相对土重) 的玉米秸秆炭后, 低有机碳含量和高有机碳含量的黑土 LOC 含量分别降低了 7.69% 和 2.66%; 张杰等^[47]利用小麦秸秆生物炭和木质素生物炭对潮土中 LOC 含量的影响研究也得到类似结果; 但贾俊香等^[48]通过盆栽试验, 认为复垦 3 和 5 年的采煤塌陷地添加玉米秸秆生物炭后, 土壤 LOC 含量增幅分别为 13.32% 和 18.72%。而本试验中, 不同用量生物炭处理的潮褐土 LOC 含量与常规对照相比无显著差异。可见, 添加生物炭对土壤 LOC 含量的影响, 因生物炭的种类、土壤类型及试验条件等而异。

3.3 秸秆与生物炭施用对土壤碳库管理指数 (CPMI) 的影响

土壤碳库管理指数 (CPMI) 是一项表征农田土壤有机碳积累与质量的动态的综合指标, 受土壤碳库和碳库活度的共同影响。一般认为, 土壤 CPMI 值越高, 土壤有机碳越易于被微生物分解和被植物吸收利用, 土壤碳库活度和质量也就越高^[6]。本研究结果表明, 与 CK 相比, 两年的秸秆还田处理显著提高了 CPMI, 而生物炭处理的 CPMI 略有降低或差异不大。这说明与秸秆生物炭相比, 秸秆直接还田处理更有利于土壤碳库活度的提高及质量的改善。其原因在于秸秆直接还田后增加了 LOC 含量, 提高了 LI 值, 而 CPI 变化不大, CPMI 表现为增加 (表 5); 生物炭输入土壤的多是稳定态碳, 更有利于土壤有机碳的积累, 而其中的活性部分在进入土壤后极易分解, 不易在土壤中储存, 土壤 LI 值表现为降低, 因而使其 CPMI 低于对照^[46]。由此可见, 碳库管理指数也是反映烟田土壤有机质变化的重要敏感性参数。

4 结论

小麦秸秆直接还田对潮褐土烟田土壤总有机碳 (TOC) 和轻组有机碳 (LFOC) 含量影响较小, 但能显著提高土壤热水溶性有机碳 (HWC)、微生物生物量碳 (MBC) 和活性有机碳 (LOC) 含量, 明显降低土壤容重, 提高土壤有效磷含量及土壤碳库管理指数 (CPMI)。同量秸秆转化为生物炭后还田能显著增加烟田土壤中总有机碳和轻组有机碳含量, 但对活性

高的碳组分影响较小,且CPMI也无显著增加。因此,小麦秸秆直接还田相较于转化为生物炭还田,更有利于土壤有机碳库活度的提升及有机碳质量的改善,而秸秆生物炭更有利于土壤有机碳的固存,其固碳效应更加明显,后续应根据不同需求采取科学合理的秸秆还田管理措施。

参考文献:

- [1] 李雪利,叶协锋,顾建国,等. 土壤 C/N 比对烤烟碳氮代谢关键酶活性和烟叶品质影响的研究[J]. *中国烟草学报*, 2011, 17(3): 32–36.
Li X L, Ye X F, Gu J G, *et al.* Effect of soil C/N ratio on activity of key enzymes involved in carbon and nitrogen metabolism and quality of flue-cured tobacco leaves[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2011, 17(3): 32–36.
- [2] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.
Lu X. Soil fertilizer science[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2002.
- [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, 31(3): 522–528.
Lu W T, Jia Z K, Zhang P, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 31(3): 522–528.
- [4] Liang B C, Mackenzie A E, Schnitzer M, *et al.* Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertil of Soils*, 1997, 26(2): 88–94.
- [5] Lefroy R D B, Blair C, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155–156(1): 399–402.
- [6] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723–729.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723–729.
- [7] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(2): 200–207.
- [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.
Wang H, Wang X D, Tian X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3491–3498.
- [9] 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): 130–134.
Li X H, Guo H H, Zhu Z L, *et al.* Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130–134.
- [10] 张聪,慕平,尚建明. 长期持续秸秆还田对土壤理化特性、酶活性和产量性状的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 92–98.
Zhang C, Mu P, Shang J M. Effects of continuous returning corn straw on soil chemical properties, enzyme activities and yield trait[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(1): 92–98.
- [11] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, *et al.* Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 131–136.
- [12] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2362–2367.
Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, *et al.* Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362–2367.
- [13] 武玉,徐刚,吕迎春,邵宏波. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68–79.
Wu Y, Xu G, Lü Y C, Shao H B. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 68–79.
- [14] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153–160.
- [15] 战秀梅,彭靖,王月,等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1633–1641.
Zhan X M, Peng J, Wang Y, *et al.* Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physiochemical properties and peanut yields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1633–1641.
- [16] 陆畅,徐畅,黄容,等. 秸秆和生物炭对油菜玉米轮作下紫色土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(3): 482–490.
Lu C, Xu C, Huang R, *et al.* Effect of straw and biochar on soil organic carbon and carbon pool management index in purple soil under rape-maize rotation[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(3): 482–490.
- [17] Demisie W, Liu Z, Zhang M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. *Catena*, 2014, 121: 214–221.
- [18] 李正风,张晓海,夏玉珍,等. 秸秆还田在植烟土壤性状改良上应用的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(5): 165–170.
Li Z F, Zhang X H, Xia Y Z, *et al.* Research progress on application of improving tobacco soil fertility by reusing of crop straws[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(5): 165–170.
- [19] 黄刘亚,孙永波,刘书武,等. 生物炭对植烟土壤主要性状和烤烟产质量影响的研究进展[J]. *作物杂志*, 2017, (4): 15–20.
Huang L Y, Sun Y B, Liu S W, *et al.* Research advance of the effects of biochar on the main properties of soil and yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Crops*, 2017, (4): 15–20.
- [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: 147–195.
Lu R K. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 128–129.
- [21] Chodak M, Khanna P, Beese F. Hot water extractable C and N in

- relation to microbiological properties of soils under beech forests[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 39: 123–130.
- [22] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- Wu J S. The measurement and application of soil microbial biomass[M]. Beijing: Meteorological Press, 2006.
- [23] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47–52.
- [24] Han X Z, Wang S Y, Veneman P L M, Xing B S. Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37: 1127–1137.
- [25] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土壤理化性状及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1836–1844.
- Zhao H C, Zheng G P, Jin M F, *et al.* Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9): 1836–1844.
- [26] Xiu L Q, Zhang W M, Sun Y Y, *et al.* Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. *Catena*, 2019, 173: 481–493.
- [27] 葛顺峰, 彭玲, 任怡华, 姜远茂. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 366–373.
- Ge S F, Peng L, Ren Y H, Jiang Y M. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 366–373.
- [28] 刘楠, 赵兰坡. 添加玉米秸秆和硫酸铝对淡黑钙土化学性质的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 84–91.
- Liu N, Zhao L P. Effects of adding straw and aluminum sulfate on chemical properties in light chernozems[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 84–91.
- [29] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [30] 马超, 周静, 郑学博, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 30–35.
- Ma C, Zhou J, Zheng X B, *et al.* Effects of returning rice straw into field on soil nutrients and wheat yields under promoting decay condition[J]. *Soils*, 2012, 44(1): 30–35.
- [31] Xu M, Lou Y, Sun X, *et al.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 745–752.
- [32] 牛政洋, 闫仲, 郭青青, 等. 生物炭对两种典型植烟土壤养分、碳库及烤烟产质量的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 155–161.
- Niu Z Y, Yan S, Guo Q Q, *et al.* Effects of biochar on yield and quality of flue-cured tobacco and nutrients and carbon pool in two typical soils planted with tobacco[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 155–161.
- [33] 张婷, 佟忠勇, 张广才, 等. 添加稻草生物炭对水稻土磷含量和形态的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1): 211–216.
- Zhang T, Tong Z Y, Zhang G C, *et al.* Effects of rice straw-derived biochar on phosphorus content and form in paddy soil[J]. *Agriculturae Boreali Sinica*, 2018, 33(1): 211–216.
- [34] Gong W, Yan X, Wang J, Hu T, *et al.* Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Geoderma*, 2011, 149: 318–324.
- [35] 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.
- Li J C, Gao M, Tian D, *et al.* Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 39–50.
- [36] 高梦雨, 江彤, 韩晓日, 杨劲峰. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2126–2135.
- Gao M Y, Jiang T, Han X R, Yang J F. Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2126–2135.
- [37] He Z L, Yang X E, Baligar V C, Calvert D V. Microbiological and biochemical indexing systems for assessing acid soil quality[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 78: 89–138.
- [38] Liang Q, Chen H, Gong Y, *et al.* Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(1): 21–33.
- [39] 潘艳斌, 朱巧红, 彭新华. 有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 209–214.
- Pan Y B, Zhu Q H, Peng X H. Effect of organic materials on soil aggregate stability in red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 209–214.
- [40] Sandhu S S, Ussiri D A N, Kumar S, *et al.* Analyzing the impacts of three types of biochar on soil carbon fractions and physiochemical properties in a corn-soybean rotation[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 473–481.
- [41] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2213–2218.
- Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, *et al.* Influence of cultivation on organic carbon in three typical soils of China Loess Plateau and Canada Prairies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2213–2218.
- [42] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- Liang Y, Han X Z, Song C, Li H B. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- [43] 宇万太, 柳敏, 赵鑫, 等. 不同有机物料及其配施对潮棕壤轻组有机碳的动态影响[J]. *土壤通报*, 2008, 6(39): 1307–1310.
- Yu W T, Liu M, Zhao X, *et al.* Effects of different organic materials on light fraction organic carbon of soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 6(39): 1307–1310.

- [44] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5838–5846.
Han W, Shen S H, Xie Z B, *et al.* Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5838–5846.
- [45] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371–377.
Hu N J, Han X Z, Yang M F, *et al.* Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 371–377.
- [46] 王宏燕, 许毛毛, 孟雨田, 等. 玉米秸秆与秸秆生物炭对 2 种黑土有机碳含量及碳库指数的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 228–232.
Wang H Y, Xu M M, Meng Y T, *et al.* Influences of maize straw and straw biochar on organic carbon content and carbon pool management index of two kinds of black soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(12): 228–232.
- [47] 张杰, 黄金生, 刘佳, 刘荣乐. 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.
Zhang J, Huang J S, Liu J, Liu R L. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw and lignin and their biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 401–408.
- [48] 贾俊香, 谢英荷, 李廷亮, 王玲. 秸秆与秸秆生物炭对采煤塌陷复垦区土壤活性有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 787–792.
Jia J X, Xie Y H, Li T L, Wang L. Effect of the straw and its biochar on active organic carbon in reclaimed mine soils[J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2016, 22(5): 787–792.