

生物炭连续施用对油菜产量及旱地红壤溶解性有机碳光谱特征的影响

林小兵¹, 王馨悦¹, 黄尚书¹, 何绍浪¹, 刘艳琴², 张 昆¹,
王斌强¹, 黄欠如¹, 成艳红^{1*}

(1. 江西省红壤研究所, 江西省红壤耕地保育重点实验室/国家红壤改良工程研究中心/农业部江西耕地保育科学观测试验站, 江西 南昌 331717; 2. 吉安市农业农村产业发展服务中心, 江西 吉安 343000)

摘要: 【目的】揭示生物炭连续添加对旱地红壤溶解性有机碳的影响。【方法】通过定位试验, 探讨了低剂量 (0.75 ~ 1.5 t hm⁻²) 生物炭连续施用 7 年后油菜产量、土壤理化性质和溶解性有机碳荧光光谱组分及参数变化特征。【结果】与对照 (CK) 相比, 生物炭施用降低了土壤交换性 Al³⁺ 含量 (0.69 ~ 0.87 cmol kg⁻¹), 提高了土壤 pH (0.13 ~ 0.21 个单位)、有机质含量 (11.7% ~ 18.1%) 和可溶性碳含量 (127.5% ~ 127.8%); 油菜单株角果数提高了 39.8% ~ 45.2%, 油菜产量增加了 3.5% ~ 20.3%, 其产量随着生物炭添加量呈递增趋势。连续施用生物炭有利于增加溶解性有机碳中类酪氨酸和类富里酸的比例, 且显著降低了微生物代谢产物的比例。与 CK 相比, 连续施用生物炭后土壤溶解性有机碳荧光指数降低了 4.4% ~ 10.6%, 新鲜度指数降低了 17.4% ~ 18.4%, 自生源指数降低了 0.26 (22.6%), 而腐殖化指数增加了 1.2% ~ 5.1%。相关分析表明溶解性有机碳与 pH 呈显著正相关, 而与交换性 Al³⁺ 呈显著负相关; 微生物代谢产物与 pH 呈显著负相关, 而与交换性 Al³⁺ 呈显著正相关; 土壤类酪氨酸与交换性 Al³⁺ 呈显著负相关。冗余分析表明土壤 pH 和交换性 H⁺ 是影响溶解性有机碳及其光谱特征变化的主要指标。【结论】红壤旱地低剂量生物炭连续施用可以增加油菜产量, 改良红壤酸度, 增加土壤溶解性有机碳含量, 且更利于溶解性有机碳中类富里酸物质的增加, 增加溶解性有机碳的腐殖化系数, 提高其稳定性。

关键词: 生物炭; 连续施用; 油菜; 溶解性有机碳; 三维荧光分析

中图分类号: S153.5 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2023)01-0030-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021111902

林小兵, 王馨悦, 黄尚书, 何绍浪, 刘艳琴, 张 昆, 王斌强, 黄欠如, 成艳红. 生物炭连续施用对油菜产量及旱地红壤溶解性有机碳光谱特征的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 30 - 38

LIN Xiao-bing, WANG Xin-yue, HUANG Shang-shu, HE Shao-lang, LIU Yan-qin, ZHANG Kun, WANG Bin-qiang, HUANG Qian-ru, CHENG Yan-hong. Effects of Continuous Biochar Application on Rapeseed Yield and Spectral Characteristics of Dissolved Organic Carbon in Upland Red Soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 30 - 38

【研究意义】溶解性有机碳 (DOC) 是土壤有机质的重要组成部分, 也是土壤有机质中最活跃的组分之一, 具有高度流动性和不稳定性^[1-2]。土壤 DOC 主要来源于动植物残体、根系分泌物、土壤微生物活动及有机质分解等^[3], 是具有不同结构的有机分子的混合体^[4], 且不同组分的生物活性和生态作用各不相同^[5]。DOC 含量和质量对调节土壤肥力、植物生长、微生物生长代谢及养分循环都具有重要作用^[6]。【前人研究进展】生物炭作为秸秆资源化利用的有效途径及固碳减排的重要功能性材料^[6-7], 具有

含碳量高、比表面积大、孔隙结构丰富、碳稳定性强等特点^[8-9], 在水土保持^[10]、改善土壤质量^[11]、固碳减排^[12]、阻控土壤酸化^[13]、增加作物产量^[14]等方面具有良好的应用潜力。研究表明添加生物炭能够增加土壤有机质含量, 促进作物对营养物质的吸收^[15], 并通过影响 DOC 的分子组成进而增强 DOC 的稳定性, 减少其淋溶损失^[16-17]。近年来, 随着政府对秸秆焚烧的严厉管控和全面提升离田秸秆综合利用效率迫切需求, 秸秆生物炭业已成为旱地红壤控酸培肥固碳的重要材料之一。【本研究切入点】目前对生

收稿日期: 2021-11-20; 修订日期: 2022-02-23

基金项目: 国家红壤改良工程技术研究中心开放基金 (2020NETRCRSI-10)、博士科研基金项目 (HRBS03) 和江西省重点研发计划项目 (20181BBF68009) 资助

作者简介: 林小兵 (1992-), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为土壤资源与环境生态研究。E-mail: linxiaobing14@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者: E-mail: yanhongch007@163.com

物炭影响土壤有机碳含量和组成的研究多集中在生物炭一次性大量施用的短期影响上^[17-18], 但南方红壤区生物炭一次大量施用, 不但经济成本高, 同时因南方红壤区春蚀秋旱的气候特点, 致使 70% 以上的生物炭随径流而流失, 成为秸秆生物炭在红壤旱地推广应用的瓶颈。本团队前期研究结果表明施用少量生物炭能提高土壤 pH, 增加土壤有机碳含量和作物产量^[19-21], 但低量生物炭连续施用对土壤有机碳、DOC 含量和组成的长期效应仍不明确。三维荧光光谱通过改变激发波长与发射光波长获取相关物质的荧光特征, 是一种快速、灵敏的检测技术, 具有灵敏度高、信息量大、快速且受化学药品影响较小等优点^[2,22], 近年来被广泛应用于定性区分和定量测定土壤中 DOC 的组成、来源及结构特征^[23-24]。【拟解决的问题】本文以 2013 年开展的长期定位试验为平台, 采用三维荧光光谱技术, 研究低量生物炭长期连续施用土壤 DOC 含量及结构特征变化, 探究其与土壤酸度指标的关系, 以为生物炭利用的可持续性、旱地红壤土壤碳库稳定性的深入研究以及旱地红壤肥力稳定提升和酸化防治“共赢”提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省红壤研究所 (116°20'24" E, 28°15'30" N), 该区域属于中亚热带季风气候, 无霜期 282 d, 年均气温 17.5 °C, 年均降雨量 1587 mm, 年蒸发量 1100 ~ 1200 mm, 年均日照时数 1900 ~ 2000 h。土壤类型为第四纪黏土母质发育而成的红壤, 0 ~ 20 cm 耕层土壤基本理化性质: pH (H₂O) 5.0, 阳离子交换量 (CEC) 13.93 cmol kg⁻¹, 有机质含量 12.18 g kg⁻¹, 全氮 (N) 含量 1.64 g kg⁻¹, 全磷 (P) 含量 1.01 g kg⁻¹, 全钾 (K) 含量 7.73 g kg⁻¹。

1.2 试验设计

定位试验始于 2013 年, 根据全国小麦/水稻等秸秆每公顷每季产量, 按照秸秆炭化率 30% 计算得到的每公顷秸秆生物炭量 (500 °C, 4 h)^[12], 设置不施秸秆生物炭 (对照, CK)、半量炭化还田 (C1) 和全量炭化还田 (C2) 3 个处理 (当地秸秆产生量为 6000 ~ 7500 kg hm⁻², 可收集量约 4500 kg hm⁻² 左右, 按照秸秆全量炭化还田的用量约为 1500 kg hm⁻², 半量炭化还田量约为 750 kg hm⁻²), 每个处理 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积 21 m² (3.5 m × 6.0 m)。

供试生物炭由小麦秸秆于 450 °C 条件下厌氧烧制而成, 购于河南商丘三利新能源有限公司, 制备率约为 35%, 其基本理化性质为: pH 10.35, 有机碳 467.20 g kg⁻¹, 全 N 5.90 g kg⁻¹, 全 P 14.43 g kg⁻¹, 有效 P 4.70 mg kg⁻¹, 全 K 11.50 g kg⁻¹, CEC 21.70 cmol kg⁻¹。生物炭每年 4 月底施入 (油菜收获后), 施用方法为表层施用, 再翻耕。试验采用红薯—油菜轮作 (当地常用的轮作模式), 每年 5 ~ 9 月种植红薯 (苏薯 8 号), 10 月至次年 4 月种植油菜 (丰油 730)。试验地各处理施肥按 N 150 kg hm⁻²、P₂O₅ 60 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻² 施加, 油菜肥料分 2 次施用, 基施 70% 氮肥、80% 钾肥和全部磷肥, 冬前追施剩余的氮肥和钾肥, 各季作物栽培方式和田间管理措施按照当地习惯进行。

1.3 测定指标及方法

在油菜收获前 1 d, 每个小区随机采 5 株油菜, 风干后考查每株角果数、每角粒数和千粒质量。2016 ~ 2020 年, 分小区单独收获籽粒, 晾干后测定实际产量。

2020 年油菜收获后, 按五点取样法采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品, 在室内剔除石砾、肉眼可见的植物残体及根系等杂质后, 一部分自然风干磨碎过筛, 另一部分鲜土样密封并保存于 4 °C 冰箱中备用。土壤 pH、交换性氢 (H⁺)、交换性铝 (Al³⁺) 和土壤有机质含量均采用常规分析方法测定^[25] (本试验中土壤交换性 H⁺ 和 Al³⁺ 都是潜性酸)。土壤微生物量碳 (MBC) 通过 K₂SO₄ 溶液浸提, 并采用氯仿熏蒸浸提方法测定。

土壤 DOC 采用水浸提法提取, 按水土比 5 : 1 充分摇匀分散后震荡 30 min, 离心 10 min (4000 r min⁻¹), 上清液采用 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 滤液于 4 °C 下保存待测, 待测液采用 TOC 分析仪 (Vario TOC cube, 德国) 测定 DOC 含量, 待测液采用荧光光谱分析仪 (Cary Eclipse G9800A Hitachi F-4500, 日本) 进行三维荧光光谱分析。三维荧光光谱分析中所测结果均扣除超纯水的三维荧光光谱; 测定时将待测液 DOC 浓度稀释至 10 mg L⁻¹, 以最大程度地减少内部过滤影响并使它们可相互对比。使用光程为 1 cm 的石英比色皿, 扫描速度为 1200 nm min⁻¹, 激发和发射狭缝宽度为 5 nm, 其中, 激发波长 (Ex) 200 ~ 500 nm, 步长 10 nm, 发射波长 (Em) 250 ~ 600 nm, 步长 5 nm。根据陈诗雨等^[22] 提出的荧光区域积分法,

将三维荧光光谱划分为 5 个区域, 通过计算各区域积分体积, 然后对各积分体积进行标准化后计算各区域标准积分体积所占比例, 并引入荧光光谱指数

(表 1 和表 2), 以进一步分析不同处理下 DOC 荧光组分的差异。

表 1 水溶性有机碳(DOC)三维荧光 5 个常见荧光峰区域特征^[26]
Table 1 Five common fluorescent peaks in three-dimensional fluorescence of dissolved organic carbon

荧光谱峰 Fluorescence peak	荧光峰激发和发射波长范围 Excitation and emission wavelength range of fluorescence peak	荧光基团 Fluorophore
PeakI	$\lambda_{ex} = 200 \sim 250 \text{ nm}, \lambda_{em} = 280 \sim 330 \text{ nm}$	类酪氨酸蛋白质物质
PeakII	$\lambda_{ex} = 200 \sim 250 \text{ nm}, \lambda_{em} = 330 \sim 380 \text{ nm}$	类色氨酸蛋白质物质
PeakIII	$\lambda_{ex} = 200 \sim 250 \text{ nm}, \lambda_{em} = 380 \sim 550 \text{ nm}$	类富里酸物质
PeakIV	$\lambda_{ex} = 250 \sim 280 \text{ nm}, \lambda_{em} = 280 \sim 380 \text{ nm}$	微生物代谢产物
PeakV	$\lambda_{ex} = 250 \sim 400 \text{ nm}, \lambda_{em} = 380 \sim 550 \text{ nm}$	类腐殖酸(大腐殖酸)物质

表 2 水溶性有机碳(DOC)三维荧光光谱指标描述^[27]
Table 2 Description of three-dimensional fluorescence spectra of dissolved organic carbon

荧光光谱指标 Fluorescence spectral index	计算方法 Method of calculation	意义 Significance
荧光指数 (FI)	$f_{450 \text{ nm}}/f_{500 \text{ nm}}, \lambda_{ex} = 370 \text{ nm}$	表征微生物来源有机质占总有机质的比例
腐殖化指数 (HIX)	$f_{435-480 \text{ nm}}/f_{300-345 \text{ nm}}, \lambda_{ex} = 255 \text{ nm}$	表征腐殖化程度, 值越大, 土壤溶解性有机质腐殖化程度越高, 结构越复杂
生源指数 (BIX)	$380/430, \lambda_{ex} = 310 \text{ nm}$	表示新产生的微生物来源的土壤溶解性有机质在总土壤溶解性有机质中所占的比例, 值越大表示微生物来源的土壤溶解性有机质比重较大
新鲜度指数 ($\beta:\alpha$)	$380/420-435, \lambda_{ex} = 310 \text{ nm}$	反映新生土壤溶解性有机质的比例占整体土壤溶解性有机质比例

注: f_x :发射波长为x时的荧光强度; λ_{ex} :激发波长; λ_{em} :发射波长。

1.4 数据处理

采用 Excel 对数据进行整理和分析, 并通过 R 语言软件程序包 ggplot2 软件进行作图。不同处理间作物产量、土壤理化性质及土壤 DOC 结构指标的显著差异性采用单因素方差分析, 并通过 Tukey HSD 检验法对各处理进行差异显著性检验, 并对不同处理土壤 pH、交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 等土壤理化指标与土壤 DOC 及其荧光光谱特征进行相关性分析和冗余分析。图表中数据为平均值±标准误差。

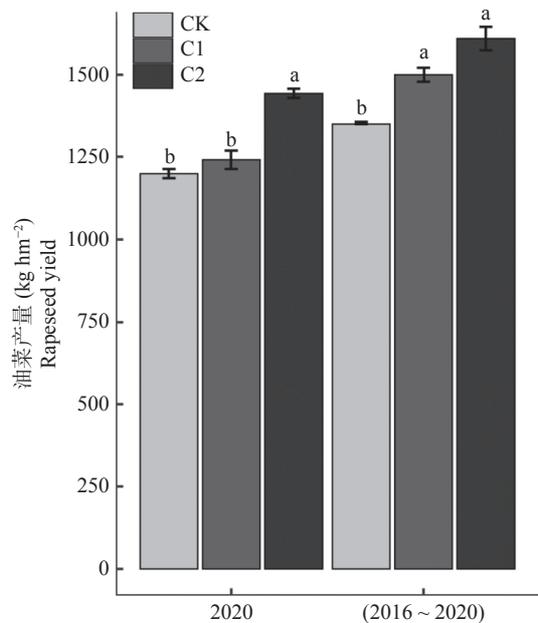
2 结果与分析

2.1 施用生物炭对油菜产量的影响

由图 1 可知, 低量生物炭连续施用可以提高油菜产量。2020 年, C1 和 C2 处理油菜产量分别较 CK 处理增加 3.5% 和 20.3%, 其中, C2 处理达显著水平。此外, 通过对各处理连续 5 年 (2016~2020) 油菜平均产量的比较发现, 连续低量施用生物炭能显著增加油菜产量, 其中 C2 处理油菜 5 年平均产量最高, 但不同生物炭用量间差异不显著。

从 2020 年油菜产量构成来看 (表 3), 生物炭对油菜单株角果数影响较大, 而对角粒数和千粒重的影响较小。与 CK 处理相比, C1 和 C2 处理显著

提高了油菜单株角果数 39.8% 和 45.2%; 同时, C2 处理显著增加了成熟期油菜株高 11.1%。



注:不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平, 下同。

图 1 施用生物炭对油菜产量的影响
Fig.1 Effect of biochar on rapeseed yield

2.2 施用生物炭对土壤理化性质的影响

由图 2 可知, 与 CK 相比, C1 和 C2 处理土壤

表 3 施用生物炭对油菜产量构成的影响
Table 3 Effects of biochar on yield components of rapeseed

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	单株角果数 Number of pods per plant	角粒数 Corner number	千粒重 Thousand-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm ⁻²)
CK	94.23 ± 3.6 b	141.10 ± 12.0 b	22.46 ± 1.7 a	4.04 ± 0.09 a	1211.87 ± 37.58 b
C1	93.54 ± 3.7 b	197.25 ± 11.7 a	25.01 ± 1.3 a	4.11 ± 0.09 a	1254.60 ± 76.01 b
C2	104.71 ± 2.8 a	204.83 ± 5.8 a	23.22 ± 1.9 a	4.08 ± 0.06 a	1457.86 ± 29.05 a

pH 分别提高了 0.13 和 0.21 个单位, 土壤交换性 Al³⁺ 含量显著降低 0.69 和 0.87 cmol kg⁻¹, 而对交换性 H⁺ 含量和 MBC 无显著影响。同时, 与 CK 相比, C1 和 C2 处理增加了土壤有机质含量 11.7% 和 18.1%。

C1 和 C2 处理土壤 DOC 含量相比 CK 处理均显著增加约 2.3 倍, 但 C1 和 C2 处理间土壤 DOC 含量无显著差异。

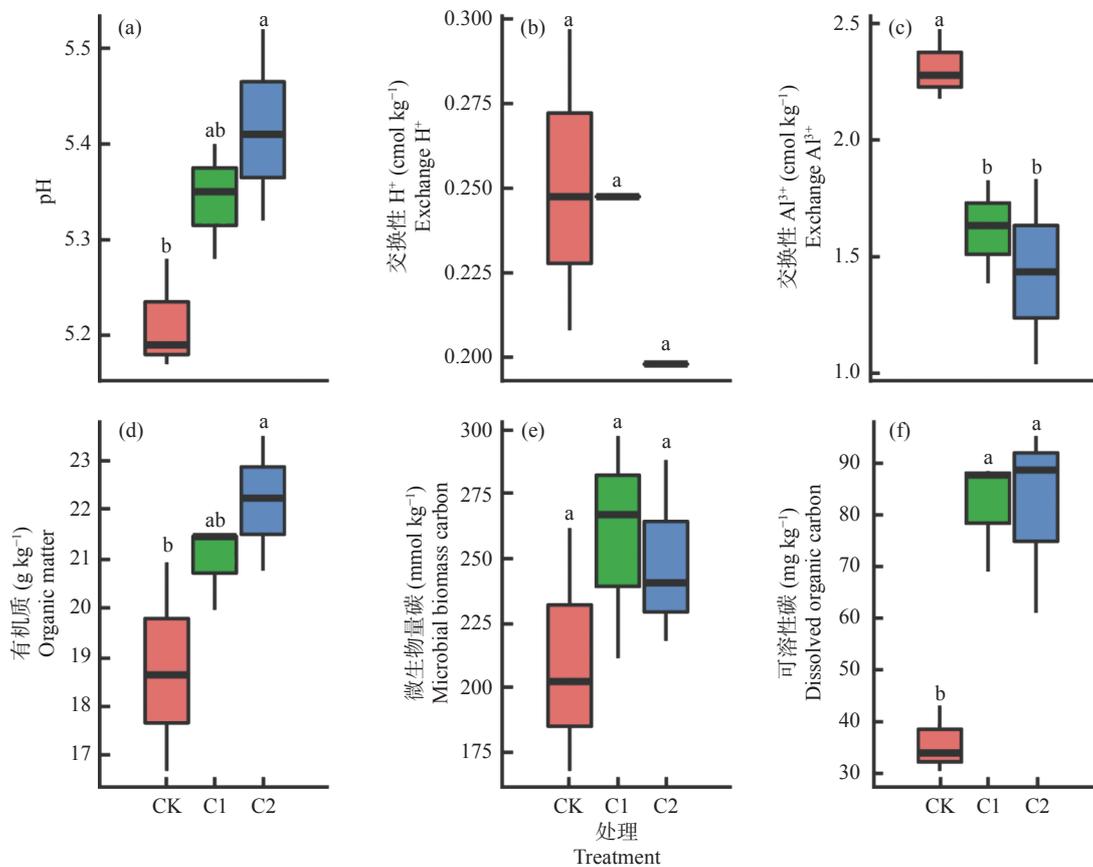


图 2 施用生物炭对土壤理化性质的影响
Fig.2 Effects of biochar on soil physicochemical properties

2.3 施用生物炭对土壤 DOC 荧光组分变化特征的影响

各荧光区域的积分值占总积分值的比例如图 3 所示, 不施生物炭 (CK) 和施用生物炭处理 (C1、C2) 土壤 DOC 中有机碳成分主要是类富里酸, 约占 30% 以上, 其次为类色氨酸蛋白质, 约占 20% 以上, 占比最少的为微生物代谢产物 (约 10%)。连续施用生物炭有利于增加 DOC 中类酪氨酸和类富里酸的占比, 显著降低了微生物代谢产物的占比, 但

C1 和 C2 处理间无显著差异。

2.4 施用生物炭对土壤 DOC 荧光参数变化特征的影响

土壤 DOC 三维荧光光谱参数结果如图 4 所示。DOC 荧光指数是衡量 DOC 来源及降解程度的指标, 当 FI ≤ 1.4 时, DOC 主要来源于外来输入, FI ≥ 1.9 时 DOC 主要来源于土壤中微生物代谢产物。图 4 结果表明, 土壤 DOC 的荧光指数介于 1.43 ~ 1.60 之间, 说明土壤 DOM 来源兼具内外源特征, 与 CK 相比,

C1 和 C2 处理 FI 降低了 4.4%~10.6%，施用生物炭后有逐渐从土壤自生源转为外源的趋势，土壤芳香性增强，腐殖化程度增大。腐殖化指数是表征 DOC 的腐殖化程度，施用生物炭后土壤 DOC 腐殖化程度有增强趋势（图 4），增幅为 1.2%~5.1%，但未达显著水平。自生源指数表示 DOC 自生源强度，BIX

大于 1 表明微生物活性强，自生源特征强，与 CK 相比，C1 和 C2 处理 BIX 均显著降低，降幅为 22.6%，说明施用生物炭后土壤 DOC 自生源特征逐渐减弱。与 CK 相比，C1 和 C2 处理新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 略有降低，但对 DOC 的新鲜度指数无显著影响。

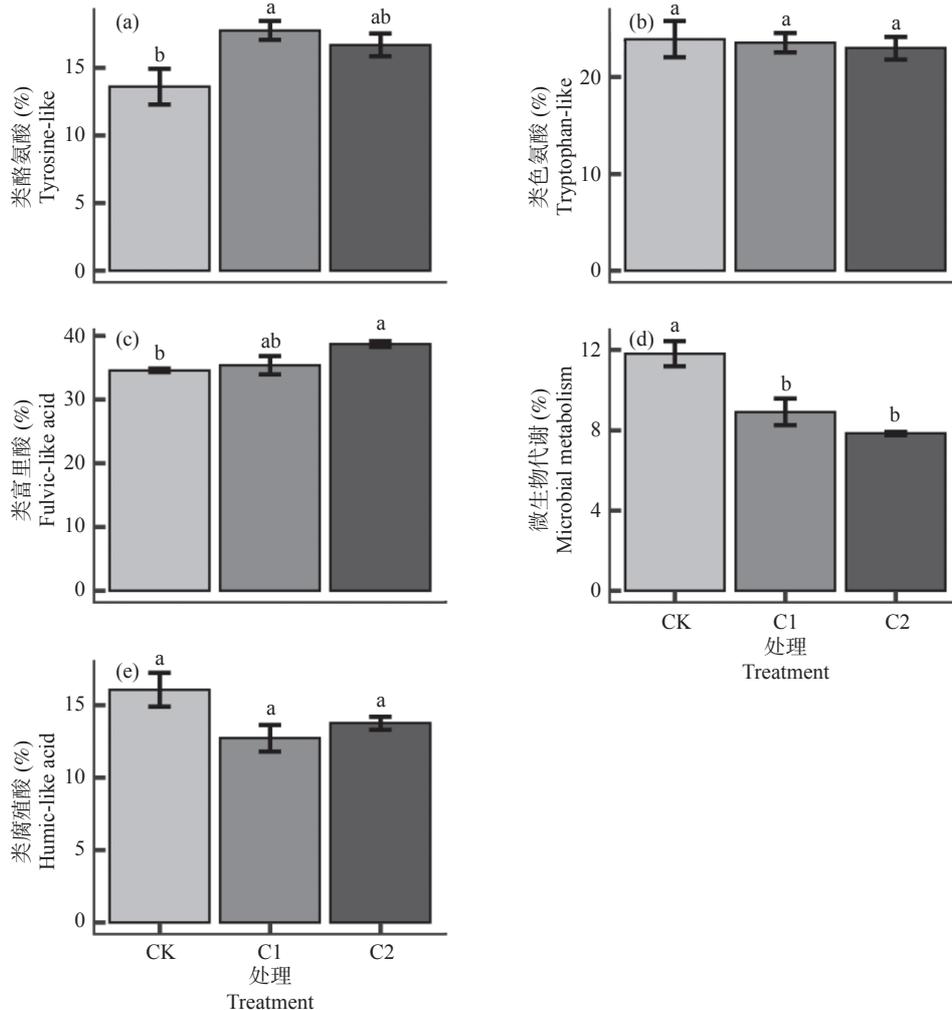


图 3 施用生物炭对土壤 DOC 荧光组分变化特征的影响

Fig.3 Effect of biochar on variation characteristics of soil DOC fluorescence components

2.5 土壤 DOC 光谱特征与土壤性质的相互关系

将土壤类酪氨酸 (I)、类色氨酸 (II)、类富里酸 (III)、微生物代谢 (IV)、类腐殖酸 (V)、荧光指数 (FI)、腐殖化指数 (HIX)、自生源指数 (BIX)、新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 与土壤 pH、交换 H^+ 、交换 Al^{3+} 、MBC、有机质和 DOC 进行相关性分析 (图 5)。结果表明，土壤 pH 与土壤 DOC ($R=0.85$, $P<0.01$) 呈显著正相关，而与交换性 Al^{3+} ($R=-0.82$, $P<0.01$)、微生物代谢产物 (IV, $R=-0.69$,

$P<0.05$) 呈显著负相关。土壤交换性 Al^{3+} 与土壤 DOC ($R=-0.84$, $P<0.01$)、MBC ($R=-0.71$, $P<0.05$)、土壤类酪氨酸 (I, $R=-0.70$, $P<0.05$) 呈显著负相关，而与微生物代谢产物 (IV, $R=0.68$, $P<0.05$) 呈显著正相关。

为进一步探讨有机质、MBC、DOC 及其光谱特征与土壤性质 (pH、 H^+ 、 Al^{3+}) 的相互关系，将土壤 DOC 及其光谱特征与相应环境因子进行冗余分析 (RDA)。结果表明 (图 6)，第一、二主成分贡献

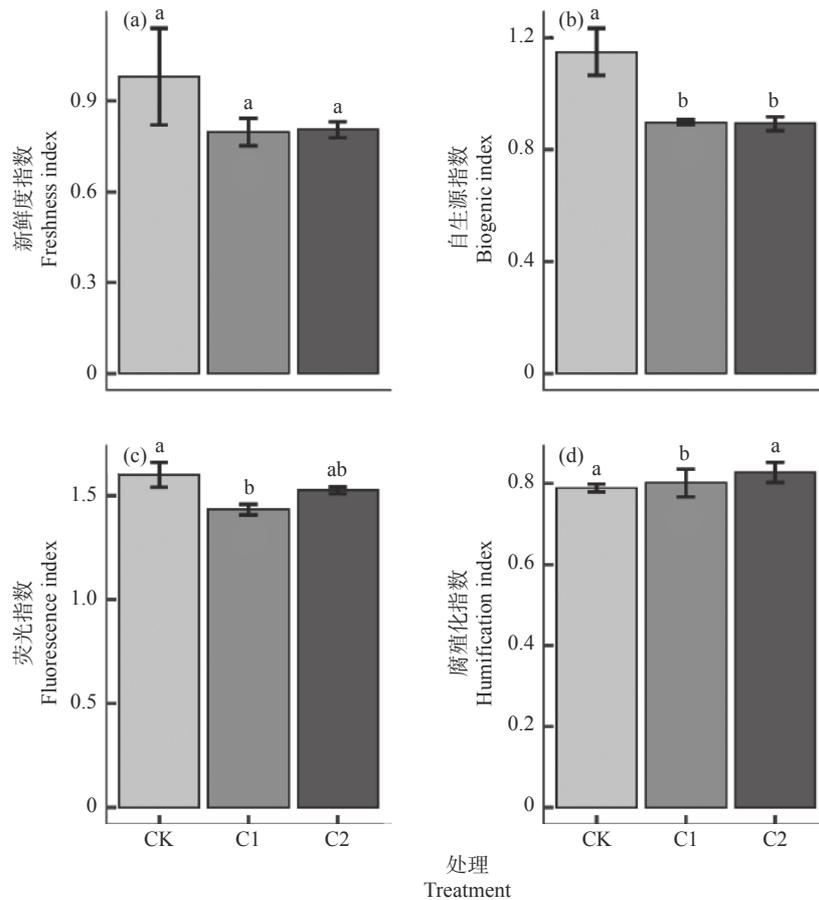
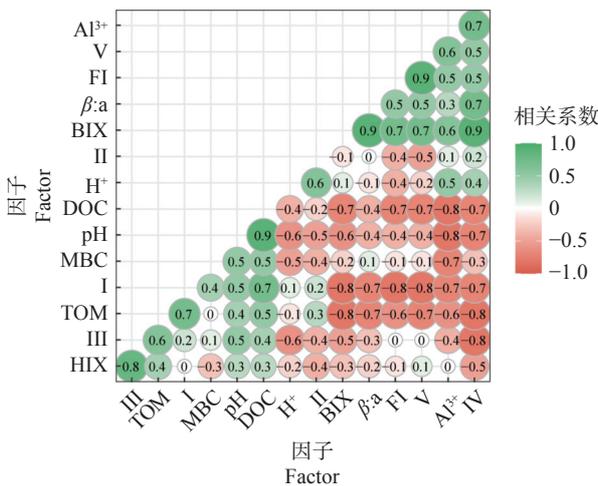


图 4 施用生物炭对土壤 DOC 荧光特征参数变化的影响

Fig.4 Effects of biochar on changes of fluorescence characteristic parameters of soil DOC



注: 中相关系数临界值 $R_{0.05} = 0.67$, $R_{0.01} = 0.80$ 。I: 土壤类酪氨酸、II: 类色氨酸、III: 类富里酸、IV: 微生物代谢、V: 类腐殖酸、FI: 荧光指数、HIX: 腐殖化指数、BIX: 自生源指数、 $\beta:a$: 新鲜度指数、 H^+ : 交换性 H^+ 、 Al^{3+} : 交换性 Al^{3+} 、MBC: 微生物量碳、TOM: 有机质、DOC: 可溶性碳, 下同。

图 5 土壤 DOC 组分变化特征、荧光参数变化特征与理化性质的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of components variation characteristics, fluorescence characteristic parameters in soil DOC and physicochemical properties

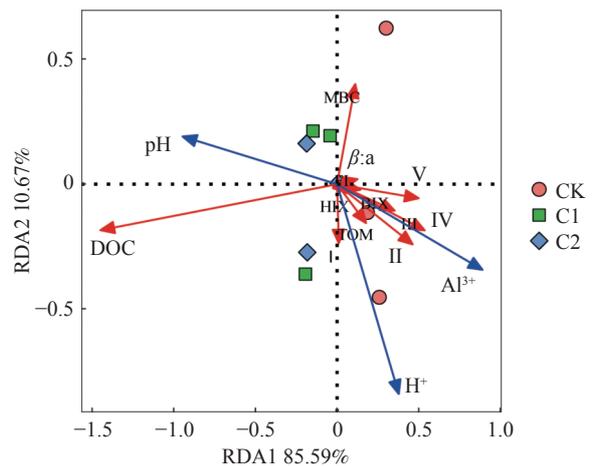


图 6 土壤 DOC 及光谱特征与土壤性质的冗余分析图

Fig.6 Redundancy analysis (RDA) biplots representing relationships among soil DOC, spectral characteristics and soil properties

率分别为 85.59% 和 10.67%。CK 处理投射点分布在第一和第四象限, C1 和 C2 处理投射点分布在第二和第三象限, 说明不同处理土壤 DOC 及其光谱特征有较明显差异。同时, 土壤 pH ($R^2 = 0.75$, $P < 0.05$) 和交换性 H^+ ($R^2 = 0.81$, $P < 0.01$) 是影响土壤 DOC

及其光谱特征变化的重要指标 (图 6)。

3 讨论

3.1 生物炭对油菜产量的影响

生物炭 (2500 ~ 30000 kg hm⁻²) 一次施用的增产、控酸、培肥、增碳等改良效果在旱地红壤已得到充分验证^[24, 28]。本研究中, 与对照 CK 相比, 低量生物炭 (750 和 1500 kg hm⁻²) 施用下油菜当季产量增加了 3.5% 和 20.3%, 油菜单株角果数提高了 39.8% ~ 45.2%, 5 年连续施用油菜产量平均显著增加 8.7% 和 16.0%。这与董成等^[12] 研究发现连续施用生物炭 6 年后可显著提高潮土农田玉米籽粒产量研究结果相似, 由此说明旱地红壤较低用量的生物炭连续施用可以实现作物增产。张文峰等^[14] 研究表明施用低剂量生物炭通过改善土壤理化性质和提高土壤肥力, 进而有效增加红薯产量 (18.0% ~ 23.7%)。纪立东等^[28] 试验表明施用生物炭可以促进玉米和玉米根系的生长发育, 其中适量生物炭 (4500 kg hm⁻²) 对玉米的增产效果最佳。试验中通过施用生物炭调节土壤酸性, 增加土壤养分等是促进油菜产量增加的重要因素。

3.2 生物炭对土壤理化性质的影响

生物炭对酸性土壤中交换性 Al³⁺ 的影响主要是通过调节土壤的 pH 实现的。连续施用碱性生物炭可以提高土壤 pH, 进而降低交换性 Al³⁺ 含量^[29]。同时, 生物炭作为富含碳的物质、具有较高的比表面积和疏松的结构^[8-9], 施入土壤能增加土壤有机碳含量, 增加土壤养分含量, 改善土壤容重、水分等土壤环境因子^[30], 生物炭还可影响土壤微生物活性和结构, 从而改变土壤有机质的分解转化, 有利于土壤 DOC 含量的增加, 但不同生物炭用量对土壤有机碳累积转化的影响还存在差异^[31]。本研究中, 与不施生物炭相比, 两种生物炭用量 (750 和 1500 kg hm⁻²) 连续施用 5 年后, 均能提高土壤 pH, 降低交换性 Al³⁺ 含量, 增加土壤有机质和 DOC 含量, 其中 1500 kg hm⁻² 处理土壤有机质含量和 pH 显著增加, 而两种生物炭用量对土壤有机质和 pH、交换性 H⁺ 等理化性质的长期累积效应差异仍需进一步长期定位研究。

3.3 生物炭对土壤 DOC 荧光光谱特征的影响

本研究中土壤 DOC 组成以类富里酸和类色氨酸为主, 生物炭的连续施入后增加了土壤 DOC 中类酪氨酸和类富里酸的比例。这与以往研究结果相似,

生物炭施用后在微生物的作用下溶出部分 DOC 进入土壤, 且生物炭溶出的 DOC 组分主要以类富里酸和类腐殖酸为主^[32]。土壤富里酸及类色氨酸类物质属于土壤中的易变组分, 它们的增加能够促进土壤活性, 有利于土壤养分活化能力的增强^[33]。Yu 等^[34] 研究也表明, 有机物料施用能刺激微生物活性, 促使土壤有机碳中蛋白质类物质向更加稳定的类富里酸等物质转化, 因此生物炭处理中类酪氨酸和类富里酸含量的增加可能与土壤 DOC 中不同组分在一定条件下进行分解或合成转化有关^[34]。而类微生物代谢产物含量的降低可能是由于类富里酸物质较高的荧光强度掩盖了类蛋白质与类溶解性微生物代谢产物的峰^[35]。同时, 有机物料施用还能增加氧化还原酶、蔗糖酶等影响代谢产物周转酶的活性, 加速微生物代谢产物的周转利用^[36], 可能是导致类微生物代谢产物含量降低的另一个原因, 但具体原因还有待进一步研究。

荧光指数是表征 DOC 来源于微生物代谢还是外源输入的指标。连续施用生物炭后降低了土壤 DOC 荧光指数, 说明施用生物炭后土壤 DOC 来源由自生源转为外源的趋势。新鲜度指数和自生源指数的降低也说明自生源特征逐渐减弱, 土壤芳香性增强, 腐殖化程度增大^[24]。这可能因为添加生物炭可促进微生物的活性, 其分解能力增强进而加速外源碳的分解, 导致土壤 DOC 中外源组分比例增加, 荧光指数有所降低^[37]。较对照相比, 生物炭处理的新鲜度指数降低了 18.4%, 说明生物炭的施用促进了 DOC 的利用, 说明生物炭带来的营养物质可促进微生物降解有机质。张文浩等^[38] 研究表明土壤 DOC 含量的增加可以明显促进溶解性有机碳腐殖化指数的增加, 本试验表明施用生物炭后可以明显增加土壤中 DOC 含量。而土壤 pH、碳、氮等养分以及土壤结构等因素直接或间接影响土壤 DOC 的分子量和芳香性的改变^[39], 生物炭施用直接影响有机碳矿化的同时, 还通过影响土壤物理化学性质和生物活性进而间接影响 DOC 含量和组成。

4 结论

综上所述, 旱地红壤低量生物炭连续施用可以增加油菜产量, 改良红壤酸度, 增加土壤 DOC 含量, 且更利于 DOC 中类富里酸物质的增加, 增加土壤 DOC 的腐殖化系数, 提高其稳定性, 而秸秆半量炭化或全量炭化还田的经济成本和固碳增收差异及其

影响因素还需要长期定位研究。

参考文献:

- [1] Bolan N S. Dissolved organic matter[M]. *Advances in Agronomy* Amsterdam: Elsevier, 2011: 1 – 75.
- [2] 杨威杉, 李 猛, 孙笑蕾, 等. 不同海拔下青海草甸土中溶解性有机质的荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(5): 1477 – 1482.
- [3] Zsolnay A. Dissolved organic matter: Artefacts, definitions, and functions[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 187 – 209.
- [4] 刘慧云, 鲜青松, 刘琛, 等. 生物炭对紫色土耕地土壤中溶解性有机物含量和组成特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4): 718 – 726.
- [5] 韦梦雪, 王 彬, 谌 书, 等. 川西平原还田秸秆腐解释放DOM的光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(9): 2861 – 2868.
- [6] Wang J J, Liu Y, Bowden R, et al. Long-term nitrogen addition alters the composition of soil-derived dissolved organic matter[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020, 4(2): 189 – 201.
- [7] Chen Z, Liu T, Tang J J, et al. Characteristics and mechanisms of cadmium adsorption from aqueous solution using lotus seedpod-derived biochar at two pyrolytic temperatures[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(12): 11854 – 11866.
- [8] Blanco C H. Biochar and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 687 – 711.
- [9] Wang J L, Wang S Z. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227(4): 1002 – 1022.
- [10] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施用量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 113 – 119.
- [11] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 161 – 172.
- [12] 董 成, 陈智勇, 谢迎新, 等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及N₂O排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 4024 – 4034.
- [13] 龙良俊, 张晓娅, 罗晶晶, 等. 生物炭材料的制备与改性及其在土壤修复中的应用[J]. *应用化工*, 2021, 50(12): 3510 – 3514.
- [14] 张文锋, 周际海, 袁颖红, 等. 低剂量生物炭对旱地红壤增肥增产效果[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 647 – 654.
- [15] Jeffery S, Verheijen F G A, Van D V M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175 – 187.
- [16] Hailegnaw N S, Mercl F, Pracke K, et al. High temperature-produced biochar can be efficient in nitrate loss prevention and carbon sequestration[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 48 – 55.
- [17] Smebye A, Alling V, Vogt R D, et al. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 100 – 105.
- [18] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typic Kandiuult[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3-4): 281 – 288.
- [19] 张晓玲, 陈效民, 陶朋闯, 等. 施用生物炭对旱地红壤有机碳矿化及碳库的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 191 – 196.
- [20] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 115 – 123.
- [21] 黄尚书, 叶 川, 钟义军, 等. 红壤旱地生物炭的低剂量施用技术[J]. *农技服务*, 2019, 36(3): 77.
- [22] 陈诗雨, 李 燕, 李爱民. 溶解性有机物研究中三维荧光光谱分析的应用[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(5): 64 – 68.
- [23] 陈滢伊, 司友涛, 鲍 勇, 等. 隔离降雨对亚热带米槠天然林土壤可溶性有机质数量及光谱学特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 2964 – 2972.
- [24] 张 莉, 刘 涵, 赵海超, 等. 不同年限露天煤矿排土场土壤剖面溶解性有机质荧光和吸光特征[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(8): 1941 – 1951.
- [25] 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, 1999.
- [26] 秦纪洪, 王 姝, 刘 琛, 等. 海拔梯度上川西高山土壤溶解性有机质(DOM)光谱特征[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4321 – 4328.
- [27] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, et al. Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effects of biological and photolytic degradation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(3): 1015 – 1032.
- [28] 纪立东, 柳晓桐, 司海丽, 等. 生物炭对土壤理化性质和玉米生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(5): 114 – 120.
- [29] 应介官, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对铝富集酸性土壤的毒性缓解效应及潜在机制[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4576 – 4583.
- [30] 韩晓日, 葛银凤, 李 娜, 等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(4): 392 – 398.
- [31] 董心亮, 林启美. 生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1846 – 1854.
- [32] 关 强, 蒲瑶瑶, 张 欣, 等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 115 – 121.
- [33] 林 颖, 索慧慧, 王 坤, 等. 生物炭添加对旱作农田土壤溶解性有机质及其动态影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 149 – 155.
- [34] Yu G H, Wu M J, Wei G R, et al. Binding of organic ligands with Al (III) in dissolved organic matter from soil: Implications for soil organic carbon storage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(11): 6102 – 6109.
- [35] Zhao M X, Zhou J B, Kalbitz K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(2): 158 – 165.
- [36] 袁颖红, 芮绍云, 周际海, 等. 生物炭及过氧化钙对旱地红壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (1): 93 – 101.

- [37] 吉春阳, 何云华, 马亚培, 等. 强还原处理和生物炭对设施蔬菜土壤DOM数量和光谱特征的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 1066 – 1073.
- [38] 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 等. 太白山自然保护区水体CDOM吸收与三维荧光特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4958 – 4969.
- [39] Han L F, Sun K, Yang Y, et. al. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114184.

Effects of Continuous Biochar Application on Rapeseed Yield and Spectral Characteristics of Dissolved Organic Carbon in Upland Red Soil

LIN Xiao-bing¹, WANG Xin-yue¹, HUANG Shang-shu¹, HE Shao-lang¹, LIU Yan-qin², ZHANG Kun¹, WANG Bin-qiang¹, HUANG Qian-ru¹, CHENG Yan-hong^{1*}

(1. *Jiangxi Key Laboratory of Red Soil Arable Land Conservation/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Jiangxi Province Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China*; 2. *Ji'an Agricultural and Rural Industrial Development Service Center, Ji'an 343000, China*)

Abstract: [Objective] The paper aims to make sure the effects of continuous biochar application on dissolved organic carbon (DOC) in upland red soil. [Method] The soil physicochemical properties, rapeseed yield, DOC fluorescence spectrum components, and parameters were detected after 7 years of low-dose (750-1500 kg hm⁻²) biochar application. [Result] Biochar application reduced soil exchange Al³⁺ (0.69-0.87 cmol kg⁻¹), but decreased the soil pH (0.13-0.21), organic matter (11.7%-18.1%), and soluble carbon contents (127.5%-127.8%) compared with control. The pods' number and the yield were increased 39.8%-45.1% and 3.5%-20.3%, respectively. And the trend was increased with the amount of biochar application. Continuous biochar application increased the proportion of tyrosine and fulvic acid-like in DOC, but reduced the proportion of microbial metabolites. Biochar application decreased fluorescence index (4.4%-10.6%), freshness index (17.4%-18.4%) and biogenic index 0.26 (22.6%), and increased the humification index (1.2%-5.1%) in soil DOC. Correlation analysis indicated that soil DOC was positively correlated with soil pH, and negatively correlated with exchange Al³⁺. Microbial metabolites were negatively correlated with pH, and positively correlated with exchange Al³⁺. Soil tyrosine was negatively correlated with exchange Al³⁺. Redundancy analysis showed that soil pH and exchangeable H⁺ were the main indicators affecting the changes of soil DOC and its spectral characteristics. [Conclusion] Continuous low-volume biochar application in red soil dryland can increase rapeseed yield, improve the acidity of red soil, increase DOC content, fulvic acid-like substances, and humification coefficient to improve stability in DOC soil.

Key words: Biochar; Continuous application; Rapeseed; Dissolved organic carbon; Three dimensional fluorescence analysis

[责任编辑: 张玉玲]