

DOI: 10.5846/stxb201806211362

蓝兴福, 王晓彤, 许旭萍, 陈晓旋, 陈优阳, 王维奇. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的后续影响. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Lan X F, Wang X T, Xu X P, Chen X X, Chen Y Y, Wang W Q. Subsequent effects of slag and biochar application on soil carbon pools and soil microorganisms in paddy fields. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的后续影响

蓝兴福¹, 王晓彤¹, 许旭萍^{1,*}, 陈晓旋², 陈优阳², 王维奇^{2,3}

1 福建师范大学生命科学学院, 福州 350108

2 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

3 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

摘要: 本研究以福州平原稻田为实验区, 在 2015 年早、晚稻秧苗移栽前, 对稻田进行施加生物炭、炉渣、生物炭+炉渣(混施)处理, 并以不施加处理作为对照。为了了解施加处理的后续效应, 于 2017 年检测早、晚稻拔节期和成熟期土壤有机碳含量及真菌、细菌数量。结果表明: 3 种施加处理稻田土壤有机碳(SOC)含量均比对照组有显著提高($P < 0.05$), 但溶解性有机碳(DOC)、易氧化碳(EOC)、土壤微生物量碳(MBC)含量各处理之间差异不显著($P > 0.05$)。与对照组相比, 各施加处理组在一定程度上提高了土壤中真菌和细菌数量, 但差异不显著($P > 0.05$)。细菌数量与 DOC 含量呈极显著负相关($P < 0.01$), 与 EOC 含量呈显著负相关($P < 0.05$), 与 MBC 含量呈显著正相关($P < 0.05$)。真菌/细菌比值与真菌数量、DOC 含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。说明炉渣和生物炭施加处理 2 年后, 仍可提高稻田土壤的碳库稳定性, 并增加土壤微生物数量。

关键词: 炉渣; 生物炭; 有机碳组分; 土壤微生物; 稻田

Subsequent effects of slag and biochar application on soil carbon pools and soil microorganisms in paddy fields

LAN Xingfu¹, WANG Xiaotong¹, XU Xuping^{1,*}, CHEN Xiaoxuan², CHEN Youyang², WANG Weiqi^{2,3}

1 College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350108, China

2 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Using the Fuzhou Plain paddy as the research area, biochar, slag, and biochar + slag (mixed application) were applied to the paddy before the transplantation of early and late rice seedlings in 2015. A no amendment treatment was used as a control. To understand the subsequent effects of the treatments, the soil organic carbon content and the number of fungi and bacteria were tested for during the rice jointing and maturity stages of the early and late paddy fields in 2017. The results showed: The soil organic carbon (SOC) content of the three applied treatments was significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$). However, there was no significant difference among the treatments in dissolved organic carbon (DOC), easily oxidized carbon (EOC), and soil microbial biomass carbon (MBC) ($P > 0.05$). Compared with the control group, each application treatment group showed an increase in the number of fungi and bacteria in the soil to some extent; however, the difference was not significant ($P > 0.05$). There was a significant negative correlation between the number of bacteria and DOC ($P < 0.01$), a significant negative correlation with EOC ($P < 0.05$), and a significant

基金项目: 国家自然科学基金(41571287), 福建省公益类研究专项(2018R1034-1), 福建省高校杰出青年科研人才培育计划 2017

收稿日期: 2018-06-21; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuping@fjnu.edu.cn

positive correlation with MBC ($P < 0.05$). The fungal/bacterial ratio was significantly positively correlated with the number of fungi and DOC ($P < 0.01$). This showed that improvement in the stability of carbon storage in paddy soil and the increase in the number of soil microorganisms still occurred 2 years after the application of slag and biochar.

Key Words: slag; biochar; organic carbon fractions; soil microorganisms; paddy fields

土壤碳库是陆地系统中最大的碳库,全球表层土壤中碳储量大约在 7.00×10^{17} — 29.46×10^{17} g 之间,占全球陆地生态系统碳储量的 $2/3$ — $3/4$ ^[1]。土壤碳库对维持全球碳平衡与减缓温室效应意义重大。土壤中活性有机碳组分是土壤有机碳的重要组成部分,其直接参与土壤生物化学转化过程,对外界环境变化的响应较为敏感,外界环境的微小变化都能导致土壤碳库组分发生改变^[2-3]。土壤 pH、容重、全氮等环境因子对土壤碳库组分的影响尤为明显^[4]。由于活性有机碳组分具有较高的动态性和活性,与土壤有机碳总量比较,活性有机碳组分更能够表征土壤质量的变化^[5],在维持生态功能和养分循环中发挥着更为关键的作用。土壤微生物在物质交换与生物化学转换中具有重要作用,土壤微生物的固碳机制主要包括两种:其一,生物体死亡后,形成难以降解的物质如木质素、几丁质等碳源物质;其二,通过提高自身的活性,加快有机质的分解利用,从而积累有机碳^[6]。生物学固碳作用不仅受到微生物生物量及群落组成结构等方面的直接影响,而且还受到土壤理化因子的间接影响^[7]。但是,究竟是微生物自身影响土壤碳库组分,还是环境因子影响土壤碳库组分,或是两者共同作用,目前尚不清楚,需要进一步研究。

近年来,研究人员已经探索出许多策略来提高土壤固碳能力。例如,Wang 等人研究发现在稻田中施加生物炭和炉渣等特殊材料可以提高粮食产量和减少温室气体的排放^[8]。生物炭是由农林废弃物在厌氧条件下热裂解产生的含碳丰富的固态稳定物质,具有巨大的比表面积、发达的孔隙结构和很强的吸附能力等特性,有利于固碳^[9]。炉渣来源于钢铁工业的废弃物,含有丰富的三价铁,可以通过氧化铁对土壤有机碳的保护作用提高土壤有机碳库。当前,炉渣和生物炭已经被广泛用于土壤改良剂^[10],但是关于生物炭与炉渣混合施加对稻田土壤碳库组成及其稳定性的影响研究较少,探讨生物炭与炉渣施加处理对稻田土壤碳库与微生物数量长时间尺度的影响效应更是鲜见报道。

众所周知,土壤是微生物的主要生存环境,土壤微生物是养分和土壤有机质动态的主要调控者,土壤有机碳主要受细菌、真菌的影响,那么土壤中细菌、真菌的数量以及它们的比值是否会对土壤碳库稳定性造成一定影响,这值得我们进行深入系统的研究。基于此,本文以福州平原红壤稻田为研究对象,选择生物炭和炉渣为施加物质,探讨炉渣和生物炭单一施加和混合施加处理对水稻拔节期和成熟期碳库组分及其相关微生物的长期影响,并分析微生物与土壤碳库稳定性之间的相关性,为明确炉渣和生物炭影响稻田土壤碳库的微生物学机制提供理论依据,对稻田的可持续生产具有重要的理论和现实指导意义。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

田间实验在福建省农科院吴凤村水稻研究所内进行 (26.1°N , 119.3°E),该实验基地共有水稻田 7 hm^2 ^[11],该实验区位于闽江河口福州平原的南分支,地处乌龙江的北岸,海拔一般为 3—5 米,典型的亚热带季风气候,气温适宜,温暖湿润,年均降水量为 1392 mm,年均气温为 19.6°C 。实验田一般采用早稻-晚稻-蔬菜的轮种模式,早稻生长期在 4—7 月,晚稻生长期 7—11 月^[12]。

1.2 施加物

炉渣来源于福建金星钢铁公司,主要含有 CaO (35.7%)、 SiO_2 (27.7%)、 Fe_2O_3 (6.2%)、 MgO (4.3%)、 K_2O (2.7%)、 SO_3 (1.3%)、 P_2O_5 (0.1%)。生物炭的制备材料为水稻秸秆,来源于江苏省南京市勤丰秸秆科技有限公司,采用炭化炉和亚高温缺氧干馏技术制备,制备温度为 600°C , 90min。主要含有 C (56.6%, 质量分数,下

同)、N(1.4%)、P(1.0%)、K(1.8%)、Mg(1.0%)、S(0.6%)、Ca(0.5%)和Fe(0.2%)。炉渣和生物炭都是碱性物质,pH 分别为(11.97±0.01)和(10.34±0.02)。

1.3 实验设计

炉渣和生物炭使用前均过 2 mm 筛处理^[8]。在水稻移栽之前一次性施加到(0—15 cm)犁耕层土壤中,并进行充分混匀。每个处理设置 3 个重复,共 12 个小区,每个小区面积 10 m²随机区组排列。各小区之间用 0.5 cm 厚、30 cm 高的 PVC 板隔开,防止各个小区之间进行水和营养物质的交换。本研究中的主要施加肥料为复合肥(N-P₂O₅-K₂O,16:16:16)和尿素(46%),底肥在移栽前一天施加,施加量分别为 42 kg/hm²(以 N 计)、40 kg/hm²(以 P₂O₅计)和 40 kg/hm²(以 K₂O 计),分蘖肥在移栽大约 1 周后施加,施加量分别为 35 kg/hm²(以 N 计)、20 kg/hm²(以 P₂O₅计)和 20 kg/hm²(以 K₂O 计),穗肥在大约 8 周后施加,施加量分别为 18 kg/hm²(以 N 计)、10 kg/hm²(以 P₂O₅计)和 10 kg/hm²(以 K₂O 计)^[13]。实验前对翻耕后的土地进行人工平整,以保持土壤的均一性。本实验分别于 2015 年早稻和晚稻种植前进行生物炭、炉渣的施加处理,其中四个处理分别为:对照组(0 t/hm² 炉渣+0 t/hm² 生物炭)、炉渣(8 t/hm² 炉渣)、生物炭(8 t/hm² 生物炭)、混施(8 t/hm² 炉渣+8 t/hm² 生物炭)。各个处理之间均施加相同质量的复合肥和尿素。2016 年和 2017 年不进行生物炭、炉渣的施加处理,各处理之间只施加相同质量的复合肥和尿素。

1.4 样品采集与测定

分别于 2017 年的早稻拔节期、早稻成熟期、晚稻拔节期、晚稻成熟期,在每个样地分别用采样器采集犁耕层(0—15 cm)的土壤,用自封袋装好,带回实验室,挑去石块,植物根系等杂物。一部分土放实验室自然风干,用于理化分析,另一部分放入-20℃的冰箱保存用于后续微生物数量测定。土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)测定采用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAX CN, Germany);溶解性有机碳(DOC)采用去离子水浸提,用 TOC-VCPH 分析仪测定^[14];微生物生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸 0.5 mol/L 硫酸钾浸提法,浸提液中有机碳浓度用 TOC-V_{CPH} 分析仪测定,并根据 MBC=EC/0.38(EC 为熏蒸与未熏蒸土壤有机碳含量差值)公式计算^[15];易氧化碳(EOC)含量采用 333 mmol/L KMnO₄氧化比色法测定^[16]。土壤容重采用环刀法测定,含水量采用烘干法测定^[17]。电导率、土温采用便携式电导计(2265FS, USA)测定。土壤 pH 值采用水土质量比为 5:1,摇床振荡 30min,静置后用便携式 pH 计(PHS-3C, 中国)测定。真菌数量采用马铃薯-葡萄糖琼脂(PDA)培养基,细菌数量采用 LB 琼脂培养基,进行平板菌落计数^[18],测定每克干土含菌量。

1.5 数据处理与分析

运用 Excel 2013、Origin 8.0、SPSS 20.0 软件进行数据处理与分析,采用 Excel 2013 计算原始数据的均值及标准差,用 Origin 8.0 软件进行作图,采用 SPSS 20.0 中的单因素方差分析对土壤中碳组分、真菌数量、细菌数量、理化因子进行差异显著性分析。环境因子、土壤碳组分、真菌、细菌数量的相关性分析采用 SPSS 20.0 的 Pearson 相关性分析软件。

2 结果与分析

2.1 炉渣与生物炭施加对稻田土壤有机碳和活性有机碳的影响

分别于 2017 年早、晚稻拔节期和成熟期(即炉渣与生物炭施加处理 2 年后),采集土壤样品,测定土壤中的有机碳(SOC)及溶解性有机碳(DOC)、易氧化碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)等活性有机碳的含量,结果见图 1。

土壤有机碳(SOC)含量如图 1a 所示,对照组 SOC 含量的平均值为 15.36±0.07 g/kg,炉渣施加处理为 15.96±0.30 g/kg,生物炭施加处理为 16.80±0.07 g/kg,混施处理为 16.25±0.03 g/kg。从早晚稻 SOC 含量的平均值来看,3 种施加处理都能增加稻田土壤 SOC 含量。但是,施加处理对不同水稻生长时期 SOC 含量的影响不同。在早稻拔节期,与对照相比,炉渣和混施处理分别增加了 4.28%和 4.32%,达到显著差异($P<0.05$)。在早稻成熟期,与对照相比生物炭处理 SOC 含量增加了 13.43%($P<0.05$)。在晚稻拔节期,生物炭处理 SOC 含

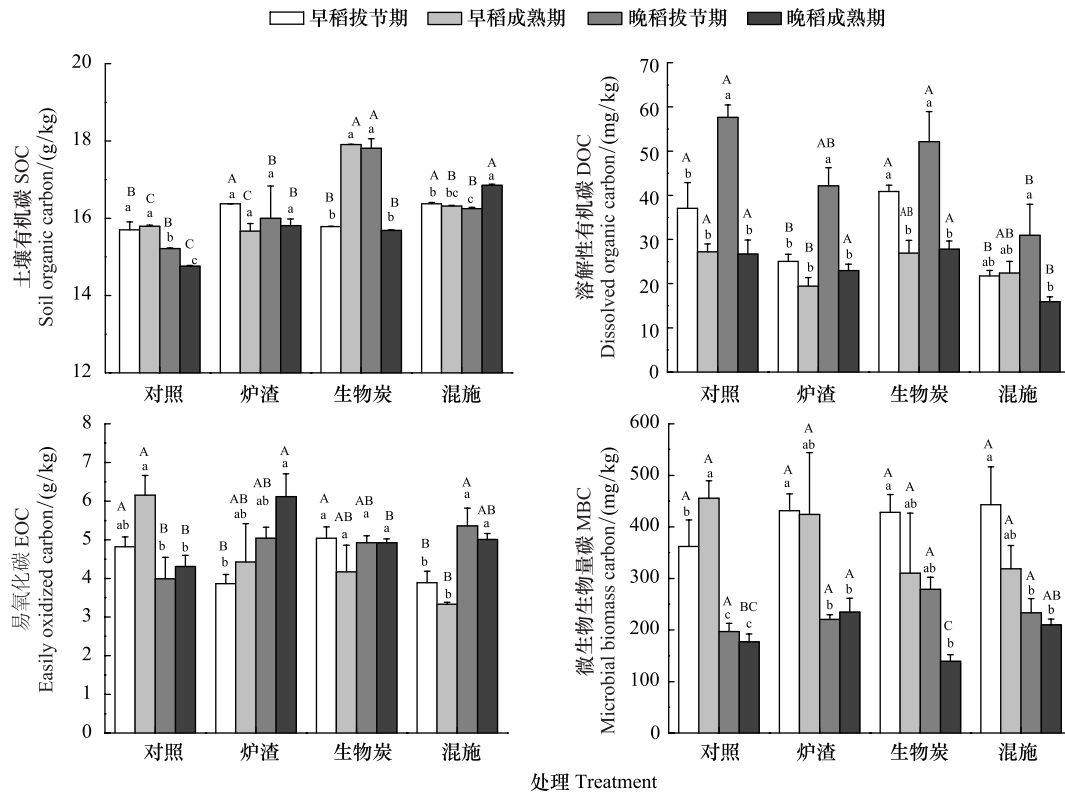


图 1 炉渣与生物炭施加处理对稻田土壤有机碳含量的影响

Fig.1 Effects of slag and biochar treatments on soil organic carbon content in paddy soil

SOC:土壤有机碳, soil organic carbon; DOC:溶解性有机碳, dissolved organic carbon; EOC:易氧化碳, easily oxidized carbon; MBC:微生物生物量碳, microbial biomass carbon; 图中不同大写字母表示同一时期不同施加处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一处理不同时期间差异显著 ($P < 0.05$)

量增加了 17.08% ($P < 0.05$)。在晚稻成熟期, 与对照相比, 炉渣、生物炭、混施处理 SOC 含量分别增加了 7.10%、6.28%、14.15% ($P < 0.05$)。

溶解性有机碳 (DOC) 含量如图 1b 所示, 对照组 DOC 含量的平均值为 37.16 ± 3.40 mg/kg, 炉渣施加处理为 27.42 ± 2.53 mg/kg, 生物炭施加处理为 36.92 ± 3.23 mg/kg, 混施处理为 22.75 ± 2.99 mg/kg。与对照相比, 炉渣、生物炭均无显著差异 ($P > 0.05$), 而混施处理显著降低了稻田土壤 DOC 的含量, 降低比例为 38.79% ($P < 0.05$)。但是, 施加处理对不同水稻生长时期 DOC 含量的影响不同。在早稻拔节期, 与对照相比炉渣、混施处理分别减少了 32.36%、41.33%, 达到差异显著 ($P < 0.05$)。在早稻成熟期, 与对照相比炉渣处理降低比例达 28.44% ($P < 0.05$)。在晚稻拔节期, 与对照相比混施处理降低比例为 46.39% ($P < 0.05$)。在晚稻成熟期, 与对照相比混施处理降低比例为 40.22% ($P < 0.05$)。

易氧化碳 (EOC) 含量如图 1c 所示, 对照组 EOC 含量的平均值为 4.82 ± 0.40 g/kg, 炉渣施加处理为 4.86 ± 0.53 g/kg, 生物炭施加处理为 4.76 ± 0.32 g/kg, 混施处理为 4.40 ± 0.24 g/kg。与对照相比, 炉渣、生物炭、混合施加均未达到差异显著 ($P > 0.05$)。但是, 施加处理对水稻不同生长时期稻田土壤 EOC 含量的影响不同。在早稻拔节期, 与对照相比炉渣与混施分别降低了 19.77%、19.79% ($P < 0.05$)。在早稻成熟期, 与对照相比, 炉渣、生物炭、混施分别降低了 28.19%、32.27%、55.00% ($P < 0.05$)。在晚稻拔节期, 与对照相比混合施加增加了 34.30% ($P < 0.05$)。在晚稻成熟期, 与对照相比炉渣处理增加了 41.89% ($P < 0.05$)。

微生物生物量碳 (MBC) 含量如图 1d 所示, 对照组 MBC 含量的平均值为 297.81 ± 29.21 mg/kg, 炉渣施加处理为 327.66 ± 47.26 mg/kg, 生物炭施加处理为 289.04 ± 46.89 mg/kg, 混施处理为 301.32 ± 40.50 mg/kg。与对照相比, 炉渣、生物炭、混合施加均未达到差异显著 ($P > 0.05$)。在晚稻成熟期, 与对照相比炉渣处理增加了

32.52% ($P<0.05$)。

以上结果显示,混施处理 2 年后,仍可使稻田土壤的 SOC 含量较对照有显著增加,而 DOC 含量则较对照有显著降低 ($P<0.05$),说明混合施加处理可提高土壤碳库的稳定性,并且具有持续效应。

2.2 炉渣与生物炭施加对水稻土微生物数量的影响

于 2017 年早、晚稻生长的拔节期和成熟期(施加处理 2 年后)采集土壤样品,分别测定细菌数量和真菌数量,结果见图 2。

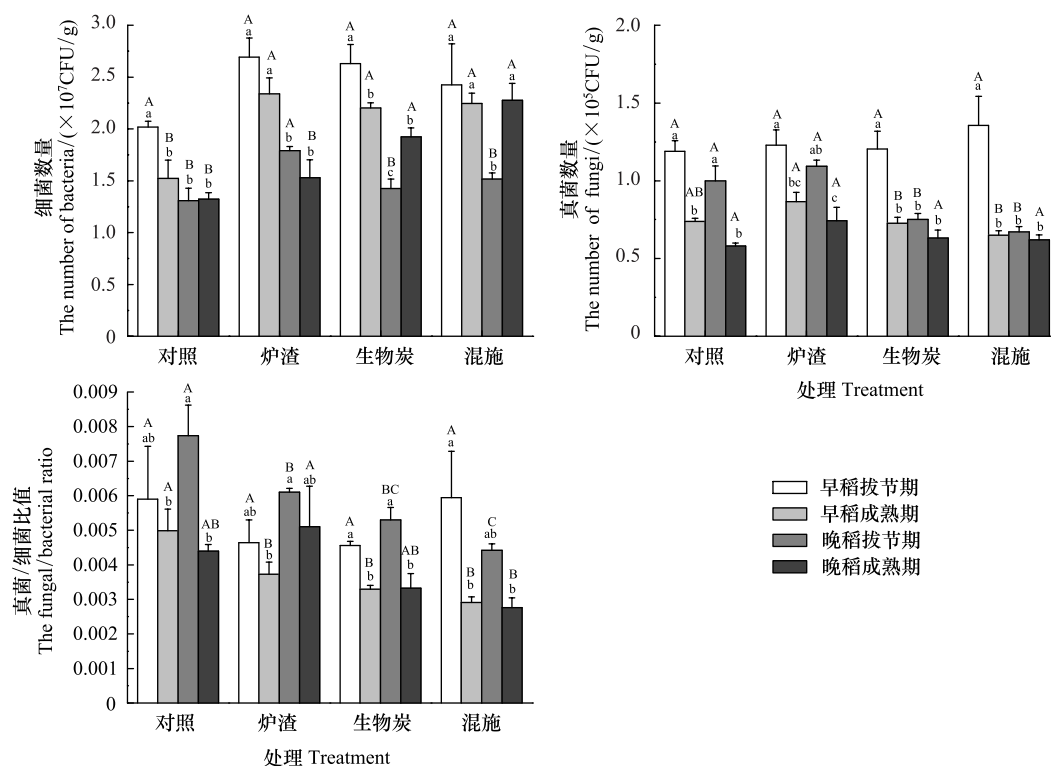


图 2 炉渣与生物炭施加处理对土壤微生物数量及比值的影响

Fig.2 Effect of slag and biochar application on the amount and ratio of soil microorganisms

图中不同大写字母表示同一时期不同施加处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一处理不同时期间差异显著 ($P<0.05$)

土壤细菌数量如图 2a 所示: 对照组细菌数量平均值为 $1.54 \times 10^7 \pm 0.11 \times 10^7$ CFU/g, 炉渣施加处理为 $2.09 \times 10^7 \pm 0.14 \times 10^7$ CFU/g, 生物炭施加处理为 $2.06 \times 10^7 \pm 0.10 \times 10^7$ CFU/g, 混施处理为 $2.12 \times 10^7 \pm 0.18 \times 10^7$ CFU/g。从早、晚稻拔节期和成熟期细菌数量的均值来看, 炉渣、生物炭、混施处理都增加了细菌数量。但是, 施加处理对不同水稻生长时期土壤细菌数量的影响不同。在早稻拔节期, 炉渣、生物炭、混合施加处理使土壤细菌数量分别增加了 33.31%、30.28%、20.11%, 但与对照之间差异不显著 ($P>0.05$)。在早稻成熟期, 对照与炉渣、生物炭、混合施加处理之间差异显著, 3 种施加处理都显著增加了土壤细菌数量 ($P<0.05$), 增加比例分别为 53.44%、44.51%、47.34%。在晚稻拔节期, 炉渣处理土壤细菌数量显著高于对照 ($P<0.05$), 增加比例为 36.85%。在晚稻成熟期, 与对照相比, 生物炭和混施处理增加了细菌数量 ($P<0.05$), 增加比例分别为 45.31%、71.89%。

土壤真菌数量如图 2b 所示: 对照组真菌数量平均值为 $8.77 \times 10^4 \pm 0.51 \times 10^4$ CFU/g, 炉渣施加处理为 $9.83 \times 10^4 \pm 0.71 \times 10^4$ CFU/g, 生物炭施加处理为 $8.29 \times 10^4 \pm 0.69 \times 10^4$ CFU/g, 混施处理为 $8.24 \times 10^4 \pm 0.71 \times 10^4$ CFU/g。从总体看来只有炉渣施加处理增加了真菌数量, 生物炭、混施处理真菌数量略有下降。但是施加处理对水稻不同生长时期真菌数量的影响不同。在早稻拔节期, 对照与炉渣、生物炭、混合施加处理之间差异不显著 ($P>0.05$) 增加比例分别为 3.29%、11.26%、13.88%。在早稻成熟期, 炉渣处理显著增加了土壤真菌数量 ($P<0.05$), 增加比例为 17.11%。在晚稻拔节期, 炉渣与混施处理显著降低了土壤真菌数量 ($P<0.05$), 减少比例分

别为 24.74%、32.89%。在晚稻成熟期,炉渣、生物炭、混合施加处理都增加了土壤真菌的数量均未达到差异显著($P>0.05$),增加比例分别达到 28.09%、9.10%、7.00%。

土壤真菌/细菌比值如图 2c 所示;对照处理真菌/细菌比值的平均值为 $5.76 \times 10^{-3} \pm 0.53 \times 10^{-3}$,炉渣处理为 $4.90 \times 10^{-3} \pm 0.57 \times 10^{-3}$,生物炭处理为 $4.12 \times 10^{-3} \pm 0.25 \times 10^{-3}$,混施处理为 $4.10 \times 10^{-3} \pm 0.49 \times 10^{-3}$ 。在早稻拔节期与对照相比,3 种处理差异均不显著($P>0.05$)。在早稻成熟期,与对照相比,3 种处理的真菌/细菌比值均显著降低($P<0.05$),分别降低了 25.21%、33.90%、41.68%。在晚稻拔节期,与对照相比,3 种处理的真菌/细菌比值均显著降低($P<0.05$),分别降低了 21.06%、31.47%、42.82%。在晚稻成熟期,对照与各施加处理之间差异不显著($P>0.05$)。

2.3 环境因子与稻田土壤有机碳含量及微生物的相关性

炉渣与生物炭施加处理条件下土壤理化因子与活性有机碳含量及微生物之间的相关性分析结果如表 1 所示。由表 1 可知,SOC 含量与碳/氮比值呈极显著正相关($P<0.01$),与总氮呈显著正相关($P<0.05$),与容重呈显著负相关($P<0.05$)。DOC 含量与土温、含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重、pH 呈极显著负相关($P<0.01$)。MBC 含量与电导率呈显著负相关($P<0.05$)。EOC 含量与 pH 呈显著负相关($P<0.05$)。细菌数量与 pH 呈极显著正相关($P<0.01$),与土温呈极显著负相关($P<0.01$)。真菌数量与含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$)。真菌/细菌比值与含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$),与土温呈显著正相关($P<0.05$)。

表 1 环境因子与土壤有机碳、细菌和真菌的 Pearson 相关性

Table 1 Pearson correlation between environmental factors and soil organic carbon, bacteria and fungi

	总氮 Total nitrogen	碳/氮 Carbon/nitrogen ratio	容重 Bulk weight	电导率 Conductivity	pH	土温 Soil temperature	含水量 Water content
SOC	0.361 *	0.605 **	-0.326 *	0.025	0.004	0.143	0.193
DOC	-0.182	0.194	-0.617 **	-0.064	-0.504 **	0.563 **	0.511 **
EOC	-0.145	0.137	0.170	-0.295 *	0.242	-0.094	-0.043
MBC	0.243	-0.053	-0.088	0.120	-0.330 *	-0.004	0.080
细菌 Bacterial	0.137	-0.033	0.171	0.047	0.437 **	-0.477 **	0.244
真菌 Fungi	0.090	-0.041	-0.440 **	0.039	0.284	-0.166	0.445 **
真菌/细菌 Fungal/bacterial	-0.016	-0.032	-0.556 **	-0.012	-0.122	0.296 *	0.442 **

* $P<0.05$, ** $P<0.01$;SOC:土壤有机碳,soil organic carbon; DOC:溶解性有机碳,dissolved organic carbon; EOC:易氧化碳,easily oxidized carbon;MBC:微生物生物量碳,microbial biomass carbon

2.4 稻田土壤有机碳含量与微生物的相关性

稻田土壤有机碳含量与微生物的相关性分析结果如表 2 所示。由表 2 可知,细菌数量与 DOC 含量呈极显著负相关($P<0.01$),与 MBC 含量呈显著正相关($P<0.05$),与 EOC 含量呈显著负相关($P<0.05$)。真菌数量与真菌/细菌比值呈极显著正相关($P<0.01$)。真菌/细菌比值与 DOC 含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 2 有机碳与土壤微生物的 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlation between organic carbon and soil bacteria and fungi

	细菌 Bacterial	真菌 Fungi	真菌/细菌 Fungal/bacterial	SOC	DOC	MBC	EOC
细菌 Bacterial	1						
真菌 Fungi	0.248	1					
真菌/细菌 Fungal/bacterial	-0.254	0.863 **	1				
SOC	0.095	-0.042	-0.091	1			
DOC	-0.400 **	0.160	0.393 **	0.043	1		
MBC	0.361 *	0.097	-0.059	0.02	-0.146	1	
EOC	-0.322 *	-0.042	0.116	0.161	-0.013	0.135	1

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; SOC:土壤有机碳,soil organic carbon; DOC:溶解性有机碳,dissolved organic carbon; EOC:易氧化碳,easily oxidized carbon;MBC:微生物生物量碳,microbial biomass carbon

3 讨论

3.1 炉渣与生物炭施加对稻田土壤有机碳的后续效应影响

Wang 等人^[19]在施加当年分析了稻田土壤中各种碳组分的含量,发现生物炭、炉渣单一施加和混合施加处理,均可提高早、晚稻土壤 SOC、DOC、MBC 的含量,但降低了 EOC 的含量。本研究在施加处理 2 年后(2017 年),再次检测土壤中各有机碳的含量,结果显示施加处理组的 SOC 含量仍然高于对照组,DOC 含量较对照组低,与对照组相比,施加处理提高了早稻土壤 EOC 含量,但降低晚稻土壤 EOC 含量。各施加处理组晚稻 MBC 含量较对照组高。说明炉渣与生物炭具有较为长期尺度上的碳固定与稳定作用。

稻田施加炉渣与生物炭 2 年后,于 2017 年对土壤 SOC 含量进行检测,发现各施加处理组土壤中 SOC 含量保持相对稳定,这是因为生物炭矿化速率很低^[20]。与对照相比处理组 SOC 的含量有显著提高,其作用机制初步认为是由于炉渣中铁离子、钙离子与碳结合形成铁结合态碳和钙结合态碳,在一定程度上增加了 SOC 稳定性,从而促进土壤碳的固持;其次在水稻生长过程中,炉渣和生物炭的施加可以增加土壤中氮的输入,促进植物根系的生长,根系的生长过程中会分泌出大量营养物质,微生物可以直接利用这一部分营养物质,减少对土壤中碳源的利用,从而进一步影响 SOC^[21]。本研究进一步显示土壤 SOC 与土壤容重呈显著负相关,这与邓艳林^[22]的研究相似,主要是由于容重通过影响土壤通透性进一步影响植物生长,从而增加植物向土壤中的碳输入。另外在通气性较好的条件下,植物残体分解较快,可以向土壤中输入更多的碳。DOC 主要来源于表层有机质的淋洗、溶解,同时也是微生物可以直接利用的碳源。本研究发现拔节期的 DOC 含量比成熟期的高,一方面在拔节期土壤长期处于淹水状态会使土壤孔隙中丰富的 DOC 释放到水中,造成土壤中 DOC 的流失^[23],另一方面土壤 DOC 含量同样也受人为耕作条件、微生物活性等一系列因素控制^[24]。表 1 显示土壤 DOC 与土温呈极显著正相关,这与 Toosi 等^[25]的研究结果一致,主要是因为温度高有利于有机质的分解从而促进土壤可溶性有机碳含量的增加。EOC 是土壤有机碳中最容易被氧化的活性有机碳,其含量与 SOC 含量密切相关。土壤中 SOC 含量高的时期,其 EOC 的含量也相对较高。图 1 显示在早稻生长期炉渣、生物炭、混施处理 EOC 的含量都比对照低,主要因为炉渣和生物炭的施加使土壤的 pH 升高,pH 值可以影响土壤微生物的活性和类群,从而进一步影响 EOC 的循环^[26]。另外外源物质施加之后,作为重要的胶结物质可以增强土壤有机碳保护机制的形成,如团聚体物理保护、铁铝化学保护以及微生物作用的影响,进而逐步使得活性碳向惰性碳转化。MBC 主要是真菌、细菌等土壤微生物体内结合的有机碳,是土壤中最活跃的有机碳,与土壤有机碳之间的转换密切相关。与对照组比,施加处理增加了 MBC 含量,主要是因为炉渣与生物炭施加后经过一定时间的迁移、转化,可以进一步改善土壤结构,形成一种适合于微生物生长的环境,从而促进了微生物生物量在施加两年后进一步提高。本研究发现在早稻生长期对照组及各施加处理组 MBC 的含量都比晚稻的高,其原因可能是在上一年植物残体分解为微生物提供了大量可利用的碳源,促进了微生物的繁殖,所以早稻的 MBC 含量高于晚稻的 MBC^[27]。另一方面,经过早稻生长期,土壤中的营养物质被大量利用,导致微生物可利用的营养物质减少,从而导致 MBC 的含量也相对较少^[28]。

3.2 炉渣与生物炭施加对稻田土壤微生物的影响

微生物是土壤有机质的主要分解者,微生物的数量、活性及群落结构变化会使微生物的代谢发生变化,从而进一步影响土壤中碳的储量^[29]。图 2 显示炉渣、生物炭、混合施加对土壤微生物的数量都有较大影响。拔节期真菌、细菌数量高于成熟期,这与王妙莹^[13]的研究结果一致。水稻在拔节期生长旺盛,根系分泌出大量的营养物质可供微生物利用,其次在拔节期土壤容重低,土壤通透性好,更有利于微生物的生长繁殖^[30]。生物炭、炉渣呈碱性,施加生物炭、炉渣后可以提高土壤 pH,在一定的程度上增加了细菌数量^[31],炉渣中还含有大量的微量元素和矿物质,炉渣的施加可以补充土壤中的微量元素,从而提高细菌数量。早稻生长期和晚稻生长期相比,早稻的细菌数量明显多于晚稻,其原因是经过一两个月的土地休整期,土壤中的细菌数量恢复到较高水平;其二是植物残体腐烂为土壤提供了大量腐殖质,微生物利用这些营养物质进行大量繁殖,这与宗庆

株^[32]研究一致。在 2015 年炉渣和生物炭施加当年,本课题组曾对真菌数量、细菌数量进行过测定,结果显示炉渣和生物炭施加会降低细菌和真菌的数量。初步认为炉渣中富含丰富的矿物质,缺乏有机质,施加后使土壤中微生物可利用的碳源减少,从而抑制微生物的生长繁殖^[33]。而且施加的生物炭大多以稳定芳香环不规则叠层堆积存在,表现出高度的微生物和化学惰性,施进土壤后难以被土壤微生物利用^[34]。但是,施加处理 2 年后(2017 年)的检测结果显示,早、晚稻生长期各处理组的细菌数量都高于对照组。可能原因是炉渣和生物炭施加后,土壤微生物逐渐适应改变后的环境,加上生物炭富含微孔,可以使水分和养料保存在微孔中,可为微生物提供良好的生存环境,避免被其他生物捕食^[35]。

3.3 稻田土壤有机碳含量、微生物及其与环境因子的关系

细菌数量对有机碳和环境变化敏感,其中 MBC 含量与细菌数量呈显著正相关,其原因是细菌是土壤中重要的微生物种类,也是 MBC 的主要贡献者,因此,细菌数量越高,MBC 含量也高。EOC 和 DOC 分别与细菌数量呈显著和极显著负相关,其原因可能是因为细菌数量增多时,土壤中的 EOC 和 DOC 被细菌大量利用,从而导致在土壤中的含量相对较少。土壤温度与细菌数量呈极显著正相关,土壤温度升高,酶的活性加强,从而导致微生物的生命活动加强^[36]。土壤中的木质素和纤维素主要是通过真菌分解的,因此施加处理对真菌数量的影响较小。从图 2b 可以看出拔节期的真菌数量比成熟期的真菌数量都要多,其原因可能是在拔节期水稻田处于淹水状态,而土壤湿度和通气量可能是影响真菌最大的影响因素^[37],其次在拔节期水稻的秸秆没有完全降解,真菌可以直接利用这些秸秆作为碳源进行生长繁殖。此外,本研究发现低 SOC 的土壤中细菌、真菌的数量也相对较少,这些研究结果与近年来相关的研究结果基本一致^[38]。真菌/细菌比值可作为土壤微生物群落变化的指标。有研究表明,真菌/细菌的比值越高,土壤生态系统的稳定性和健康程度越高^[39],本研究发现在水稻的拔节期真菌/细菌比值都比成熟期高,说明在拔节期土壤生态系统要比成熟期的好。

4 结论

(1)炉渣和生物炭单一施加和混合施加 2 年后,施加处理组土壤 SOC 含量较对照组仍有显著提高;DOC、EOC、MBC 含量与对照组差异不显著。

(2)炉渣和生物炭单一施加和混合施加 2 年后,与对照组对比,施加处理组真菌数量、细菌数量增加并不显著。单纯比较细菌、真菌数量及其比值对土壤碳库稳定性的指示作用不强。

(3)真菌、细菌并未对土壤 SOC 产生明显影响。细菌数量和 DOC 及 EOC 呈负相关,说明细菌数量的升高不利于土壤碳库的稳定。

致谢:本研究在野外采样与室内分析过程中得到福建师范大学杨柳明老师,以及刘旭阳,金强同学的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Blyth E M, Oliver R, Gedney N. A study of the role of wetlands in defining spatial patterns of near-surface (top 1 m) soil carbon in the Northern Latitudes. *Biogeosciences Discussions*, 2014, 11(12): 17967-18002.
- [2] Naik S K, Maurya S, Bhatt B P. Soil organic carbon stocks and fractions in different orchards of eastern plateau and hill region of India. *Agroforestry Systems*, 2017, 91(3): 541-552.
- [3] Li Y C, Li Y F, Chang S X, Liang S X, Qin X, Chen J H, Xu Q F. Linking soil fungal community structure and function to soil organic carbon chemical composition in intensively managed subtropical bamboo forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 19-31.
- [4] 廖丹, 于东升, 赵永存, 王宁, 张海东, 潘剑君, 史学正. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究. *土壤学报*, 2015, 52(3): 517-527.
- [5] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 龙高飞, 杨丽蓉, 贾永霞, 徐小逊, 李云. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 367-377.
- [6] Ekschmitt K, Liu M Q, Vetter S, Fox O, Wolters V. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability — why is dead organic matter left over in the soil? *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 167-176.
- [7] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 李禄军, 李娜, 宋显军. 农田土壤有机碳固存的主要影响因素及其稳定机制. *土壤通报*, 2012, 43(3): 737-744.

- [8] Wang W, Sardans J, Lai D Y F, Wang C, Zeng C, Tong C, Liang Y, Peñuelas J. Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China. *Field Crops Research*, 2015, 171: 146-156.
- [9] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 胡锋. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响. *土壤*, 2012, 44(4): 570-575.
- [10] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, Wang H L, Chen Y X, Wu W X. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 930-939.
- [11] Wang W Q, Lai D Y F, Sardans J, Wang C, Datta A, Pan T, Zeng C S, Bartrons M, Peñuelas J. Rice straw incorporation affects global warming potential differently in early vs. late cropping seasons in Southeastern China. *Field Crops Research*, 2015, 181: 42-51.
- [12] Wang W Q, Sardans J, Wang C, Pan T, Zeng C S, Lai D Y F, Bartrons M, Peñuelas J. Straw application strategy to optimize nutrient release in a Southeastern China Rice Cropland. *Agronomy*, 2017, 7(4): 84.
- [13] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 王广磊, 苏程举, 安婉丽. 炉渣与生物炭施加对稻田温室气体排放及其相关微生物影响. *环境科学学报*, 2017, 37(3): 1046-1056.
- [14] 田静, 郭景恒, 陈海清, 范明生, 吕润海, 魏荔, 李晓林. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响. *土壤学报*, 2011, 48(2): 338-346.
- [15] Burtelow A E, Bohlen P J, Groffman P M. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter, microbial biomass and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/3): 197-202.
- [16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [17] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, Baumgartl T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59(3/4): 97-106.
- [18] 时立波, 王振华, 刘静, 吴海燕, 李秀侠. 几种杀线剂对土壤微生物数量及真菌多样性影响. *农药*, 2008, 47(12): 917-919.
- [19] Wang W Q, Lai D Y F, Abid A A, Neogi S, Xu X P, Wang C. Effects of steel slag and biochar incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field. *Agronomy*, 2018, 8(8): 135.
- [20] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [21] Tang F K, Cui M, Lu Q, Liu Y G, Guo H Y, Zhou J X. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region. *Solid Earth Discussions*, 2015, 7(3): 2213-2242.
- [22] 邓艳林, 陈芳芳, 张景, 唐菲菲, 何介南, 吴立潮. 莽山不同次生林土壤有机碳分布与土壤物理性质的相关性. *南方农业学报*, 2017, 48(4): 616-622.
- [23] 陈桂香, 高灯州, 陈刚, 曾从盛, 王维奇. 互花米草入侵对我国红树林湿地土壤碳组分的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 249-256.
- [24] 张翰林, 赵峥, 陆贻通, 曹林奎. 稻田土壤溶液中溶解性有机氮、碳的空间分布及其微生物降解特性. *环境污染与防治*, 2014, 36(10): 7-12.
- [25] Toosi E R, Schmidt J P, Castellano M J. Soil temperature is an important regulatory control on dissolved organic carbon supply and uptake of soil solution nitrate. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61: 68-71.
- [26] 王国兵, 赵小龙, 王明慧, 阮宏华, 徐长柏, 徐亚明. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 921-926.
- [27] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 张文菊, 李兆强, 张敬业. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2792-2798.
- [28] 葛萍, 蔡婷, 达良俊, 崔易翀, 王跃宏, 余方德. 不同恢复时期马尾松次生林土壤养分与微生物的演变. *中国农学通报*, 2014, 30(22): 22-27.
- [29] 郝晓晖, 胡荣桂, 吴金水, 汤水荣, 罗希茜. 长期施肥对稻田土壤有机氮、微生物生物量及功能多样性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1477-1484.
- [30] 王群, 尹飞, 郝四平, 李潮海. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(6): 3096-3104.
- [31] 聂新星, 李志国, 张润花, 汪霄, 顾焜明, 刘毅, 张过师, 陈防. 生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响. *中国农学通报*, 2016, 32(9): 27-32.
- [32] 宗庆姝, 杨冬艳, 张雪艳, 张学忠, 田蕾. 4 种园艺废弃物还田对设施西芹土壤微生物活性的影响. *广东农业科学*, 2015, 42(2): 54-58, 67-67.
- [33] Okuda T, Lin F Y, Nakai S, Nishijima W, Katayama Y, Okada M. Effect of changes in the physicochemical properties of sand-alternatives on bacterial community structure in coastal sediments. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 177-185.
- [34] Pan F X, Li Y Y, Chapman S J, Khan S, Yao H Y. Microbial utilization of rice straw and its derived biochar in a paddy soil. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 15-23.
- [35] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota — a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [36] 李世清, 任书杰, 李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1): 18-23.
- [37] 刘振香, 刘鹏, 贾绪存, 程乙, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 杨今胜. 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 113-121.
- [38] Yuan H Z, Ge T D, Zhou P, Liu S L, Roberts P, Zhu H H, Zou Z Y, Tong C L, Wu J H. Soil microbial biomass and bacterial and fungal community structures responses to long-term fertilization in paddy soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(5): 877-886.
- [39] Vries F T, Hoffland E, Van Eekeren N, Brussaard L, Bloem J. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2092-2103.