

添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响

王娟^{1,2} 张丽君¹ 姚槐应^{1,2,*}

(¹浙江大学 环境与资源学院资源科学系, 浙江 杭州 310058; ²中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 310058; * 通讯联系人, E-mail: huaiyingyao@zju.edu.cn)

Effects of Straw and Black Carbon Addition on C-N Transformation and Microbial Metabolism Profile in Paddy Soil

WANG Juan^{1,2}, ZHANG Li-jun¹, YAO Huai-ying^{1,2,*}

(¹Department of Resource Science, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ² Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; * Corresponding author, E-mail: huaiyingyao@zju.edu.cn)

WANG Juan, ZHANG Lijun, YAO Huaiying. Effects of straw and black carbon addition on C-N transformation and microbial metabolism profile in paddy soil. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(1): 97-104.

Abstract: The effects of straw and black carbon addition to paddy soil on carbon and nitrogen transformation were studied in a pot experiment. At booting and mature stages, soil C-N transformation and microbial metabolism profile were analyzed. According to the results of organic carbon, total nitrogen, ammonium concentration, both straw and black carbon addition could promote C-N transformation of paddy soil, thereby enhancing the yield of rice grain to some extent. The results of microbial metabolism identified by Microresp suggested that rising concentrations of straw and carbon had an increasing influence on microbial metabolism. The main reason behind the difference was the higher utilization of fructose, alanine, acetyl glucosamine and lysine-HCl after the soil was amended with straw and black carbon. The effect of straw addition on microbial biomass carbon and net carbon mineralization was significantly higher than that of black carbon. Conversely, black carbon had higher effects on the yield of rice grain and soil carbon sequestration.

Key words: rice straw; black carbon; yield; Microresp

王娟, 张丽君, 姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响. *中国水稻科学*, 2013, 27(1): 97-104.

摘 要: 通过向水稻土中添加秸秆和黑炭进行水稻盆栽实验(秸秆的添加量为 2 g/kg 和 10 g/kg, 黑炭的添加量为 5 g/kg 和 25 g/kg), 分别在孕穗期和成熟期取样研究土壤碳氮转化及微生物代谢剖面的变化。对土壤有机碳、全氮、铵氮等含量的测定结果显示, 秸秆和黑炭均能于一定程度上促进土壤碳氮转化, 提高水稻产量; Microresp 方法检测的微生物代谢图谱表明, 秸秆和黑炭的添加量越大, 对微生物的代谢影响越大。造成这些差异的主要原因是添加秸秆和黑炭后微生物对果糖、丙氨酸、乙酰葡萄糖胺和赖氨酸盐酸盐的利用率上升。另外, 秸秆对微生物碳和净碳矿化速率的影响显著高于黑炭, 而黑炭对水稻产量和土壤固碳的影响更大。

关键词: 秸秆; 黑炭; 产量; Microresp

中图分类号: S141.4; S511.061 文献标识码: A 文章编号: 1001-7216(2013)01-0097-08

据报道, 2005 年我国农业总秸秆产量为 8.4×10^8 t, 而粮食生产产生的秸秆就有 5.4×10^8 t, 占 63.8%^[1]。随着农村劳动力的减少及化肥的广泛使用, 大量秸秆被燃烧, 造成了大气污染、土质下降等一系列环境问题, 秸秆还田再度引起研究者们关

注。大量的研究表明, 秸秆还田能改善土壤物理性质^[2]和氮磷供应^[3], 提高土壤肥力, 但同时也能增加土壤二氧化碳等温室气体的释放^[4-5], 尽管这可能要比直接焚烧排放的温室气体要少。而向土壤中添加同样来自于生物质的黑炭则由于其难分解性可以

更好地固碳并减少温室气体 N_2O 的排放^[6]。黑炭施入土壤中同样有提高土壤 CEC^[7] 和 pH^[8]、改善土壤肥力和健康状况、增加作物产量^[9-10] 等作用,同时,黑炭还有持留土壤重金属^[11]、钝化土壤有机毒物^[11-12] 等环境效应。因此,将废弃生物质炭化后代替生物质直接施入土壤被认为是改善土壤质量的重要途径。

土壤微生物是土壤-植物间养分转化迁移的重要参与者,秸秆对土壤微生物的影响也往往成为研究者们探索秸秆增产的要素^[13]。虽然目前已有研究者开展了稻草还田和添加黑炭对水稻土肥力及水稻产量影响的研究,但鲜见同时研究秸秆和黑炭对土壤微生物活性、功能结构及碳氮转化影响的差异。本研究在比较秸秆和黑炭对水稻产量影响基础上,明确了秸秆和黑炭对土壤 C、N 转化及微生物代谢的影响,探索了秸秆和黑炭改变土壤肥力的生物机制。

1 材料与方法

1.1 实验样品

土壤取自浙江大学华家池校区东门农场的水稻田,为渗育水稻土,土壤的有机质含量为 25.6 g/kg,全氮含量为 1.29 g/kg。秸秆为晚稻秸秆。黑炭购自上海海诺炭业有限公司,过 100 目筛,比表面积为 192.03 m^2/g 。水稻品种为中早 39。秸秆剪成 1 cm 小段备用。

1.2 实验设计

实验共有五个处理,包括不加秸秆和黑炭的对照(CK),添加 2 g/kg 的秸秆(0.2%SR),添加 10 g/kg 的秸秆(1.0%SR),添加 5 g/kg 的黑炭(0.5%SR)和添加 25 g/kg 的黑炭(2.5%SR)。

每个处理 8 个重复。实验前分别将添加的秸秆和黑炭与 3 kg 过 2 mm 筛的土壤、基肥混匀,再装入盆钵中,2011 年 7 月 28 日每盆移栽 5 株已育好的秧苗,于浙江大学紫金港温室内培养。

管理措施:施纯 N(硝酸铵)0.1 g/kg、 P_2O_5 (磷酸二氢钾)0.15 g/kg、 K_2O (磷酸二氢钾)0.1 g/kg。其中,氮肥以 $m_{\text{基肥}} : m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{穗肥}} = 5 : 3 : 2$ 的比例施入,磷肥、钾肥作基肥和穗肥的比例均为 50%。水分管理大致按“有水活蔸、浅水分蘖、中间搁田、湿润长穗、干湿壮籽”进行。

取样:2011 年 9 月 11 日孕穗初期每个处理取 4 盆,移去稻苗后,一部分土壤 4℃ 下储藏并于 24 h

内开始基础呼吸和净碳矿化速率的测定,一部分风干过筛后用于理化性质的测定。余下 4 盆用于 10 月 26 日黄熟期取样,采摘的稻谷 40℃ 下烘干 48 h 后称量计算产量。土壤用同样的方法进行处理。

1.3 土壤性质的测定

碳氮测定:土壤有机碳采用重铬酸钾-容量法^[14] 进行测定;全氮采用凯氏消煮法^[14] 测定;碱解氮采用碱解扩散法^[14] 测定;铵氮采用 2 mol/L KCl 1 : 5 土水比浸提,流动分析仪测定。

净碳矿化速率测定:称取 40 g 湿土置于 250 mL 三角瓶中,加 10 mL 蒸馏水($m_{\text{土}} : m_{\text{水}} \approx 1 : 1$),加入盛有 10 mL 0.1 mol/L NaOH 的尖底小试管中,25℃ 下培养箱中避光培养 48 h 后盐酸滴定测定二氧化碳的产生量。土壤继续培养,并分别于第 5、8、12、16 d 时测定二氧化碳产生量,以时间为横坐标,累积二氧化碳产生量为纵坐标作直线,斜率即为净碳矿化速率。

微生物量碳:因为取样时土壤仍处于淹水状态,故采用添加氯仿熏蒸-水浴法浸提土壤中的可溶性碳^[15],并用可溶性碳自动分析仪(Shimazu TOC-500)进行测定。

Microresp 方法^[16] 可用来测定土壤微生物对碳源的利用情况,表征土壤微生物代谢、功能结构的差异。所选碳源除丙氨酸、半胱氨酸盐酸盐浓度为 15 mg/mL,原儿茶酸浓度为 7.5 mg/mL,其余碳源的最终添加浓度为 30 mg/mL。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行数据处理。方差分析采用 LSD 比较法进行。

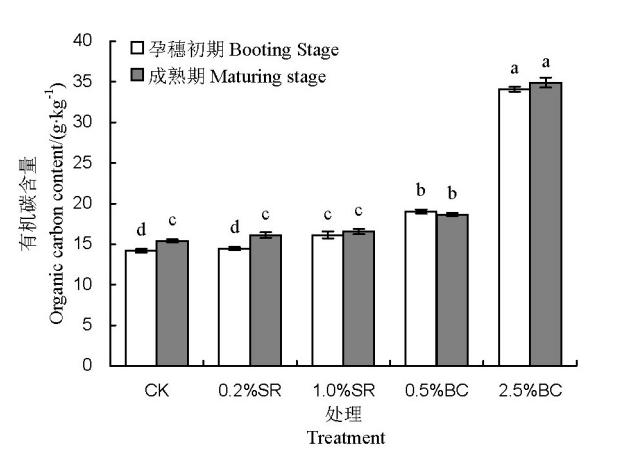
2 结果与分析

2.1 添加秸秆和黑炭对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可见,添加黑炭显著提高了土壤的有机碳含量,添加 25 g/kg 黑炭处理土壤有机碳含量显著高于其他处理(约 34.5 g/kg),而其他处理的有机碳含量均低于 20 g/kg。添加 10 g/kg 秸秆处理在孕穗初期有机碳含量高于对照,但在成熟期以及添加 2 g/kg 秸秆处理的土壤有机碳含量都与对照没有显著差异。

2.2 添加秸秆和黑炭对土壤全氮和铵态氮含量的影响

从表 1 中可见,添加秸秆既增加了土壤的铵氮、碱解氮含量,也增加了土壤的全氮含量(添加 2 g/kg



同一采样期，柱上不同小写字母表示在 0.05 的水平上差异显著。CK—对照(无添加物)；0.2%SR—添加 2 g/kg 秸秆；1.0%SR—添加 2 g/kg 秸秆；0.5%BC—添加 5 g/kg 的黑炭；2.5%BC—添加 25 g/kg 黑炭。下同。

Different lowercase letters above the bars mean significant difference at $P<0.05$ for the same sampling period.

CK, Control(without amendment); 0.2% SR, Addition of 2 g/kg straw residue; 1.0% SR, Addition of 10 g/kg straw residue; 0.5% BC, Addition of 5 g/kg black carbon; 2.5% BC, Addition of 5 g/kg black carbon. The same as below.

图 1 添加秸秆和黑炭对水稻土有机碳含量的影响
Fig. 1. Influence of straw and black carbon addition on the organic carbon of paddy soil at different sampling periods.

的秸秆处理在成熟期取样时碱解氮含量低于对照)。添加 10 g/kg 秸秆比添加 2 g/kg 秸秆处理的铵氮、碱解氮要高,但全氮含量低于后者。孕穗初期取样时,添加黑炭的处理铵氮、碱解氮、全氮都高于对照,而成熟期取样时,除添加 25 g/kg 黑炭的处理全氮含量高于对照,添加黑炭处理铵氮、碱解氮、全氮反

表 1 添加秸秆和黑炭对水稻土铵态氮、碱解氮和全氮含量的影响

Table 1. Influence of straw and black carbon addition on the ammonium, available N, total nitrogen contents of paddy soil.

处理 Treatment	铵氮 Ammonium concentration		碱解氮 Available nitrogen		全氮 Total nitrogen	
	/(mg · kg ⁻¹)		/(mg · kg ⁻¹)		/(g · kg ⁻¹)	
	孕穗初期	成熟期	孕穗初期	成熟期	孕穗初期	成熟期
	Booting stage	Mature stage	Booting stage	Mature stage	Booting stage	Mature stage
CK	4.89±0.33 b	6.38±0.29 ab	27.57±0.44 a	34.01±1.67 ab	1.00±0.11 b	1.23±0.11 ab
0.2% SR	5.38±0.34 b	7.13±0.40 ab	28.52±1.54 a	25.42±2.40 b	1.52±0.05 a	1.34±0.04 ab
1.0% SR	7.59±0.05 a	7.39±0.40 a	34.32±4.33 a	43.60±9.40 a	1.36±0.11 ab	1.28±0.05 ab
0.5% BC	5.90±0.54 b	6.16±0.24 bc	31.26±1.94 a	31.46±2.56 ab	1.27±0.13 ab	1.17±0.13 b
2.5% BC	5.98±0.42 c	5.27±0.38 c	32.71±2.03 a	30.02±2.07 ab	1.39±0.06 a	1.47±0.04 a

同一列数据后跟不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。

Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different at $P<0.05$.

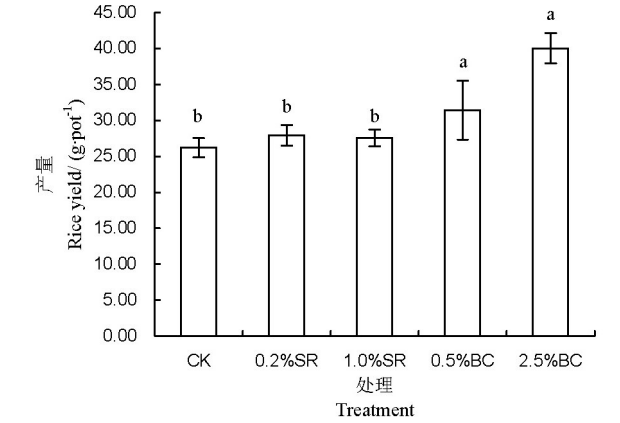


图 2 添加秸秆和黑炭对水稻产量的影响
Fig. 2. Influence of straw and black carbon addition on the yield of rice grain at different sampling periods.

而低于对照。

2.3 添加秸秆和黑炭对水稻产量的影响

从图 2 中可以看出,添加秸秆后,水稻产量虽然有所增加,但增幅并不显著,而添加黑炭后,水稻产量显著增加,而且添加 25 g/kg 的黑炭比添加 5 g/kg 的黑炭更为明显。

2.4 添加秸秆和黑炭对土壤微生物量和微生物活性的影响

2.4.1 秸秆和黑炭对土壤微生物量的影响

微生物量碳是表征微生物群落丰度的一个指标。由图 3 可知,秸秆的添加量为 10 g/kg 时,土壤的微生物量碳达到所有处理的最高值,两次取样分别比对照高 62%、59%。在孕穗初期,所有添加秸秆和黑炭的处理微生物量碳都要高于对照,而成熟期时,除添加了 10g/kg 秸秆的处理外,其余处理

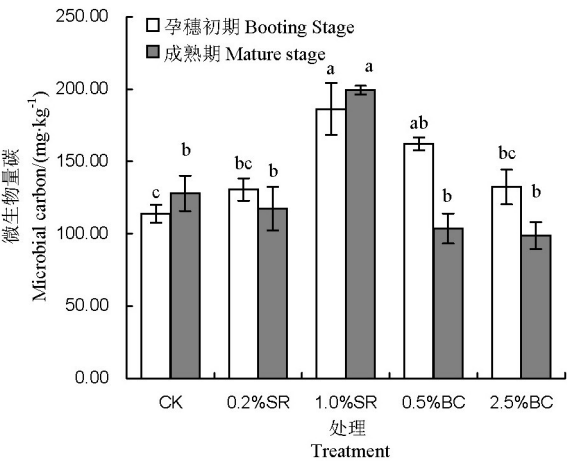


图 3 添加秸秆和黑炭对水稻土壤微生物量碳的影响

Fig. 3. Influence of straw and black carbon addition on the microbial biomass carbon of paddy soil.

的微生物量碳都低于对照,但差异并未达到显著水平。从图 3 中可以看出,25 g/kg 的黑炭添加量反而比添加 5 g/kg 的黑炭微生物量碳值要小。

2.4.2 添加秸秆和黑炭对土壤净碳矿化的影响

添加秸秆和黑炭都加速了土壤的净碳矿化,并且成熟期取样时的净碳矿化速率低于孕穗初期(图 4)。两次取样都是添加 10 g/kg 秸秆处理的净碳矿化速率最高,孕穗初期和成熟期分别为 43.6、24.6 mL/(kg·d);添加 2 g/kg 秸秆处理与添加 25 g/kg 黑炭处理的净碳矿化速率高于添加 5 g/kg 黑炭的处理。

2.5 添加秸秆和黑炭对土壤微生物功能结构的影响

对 15 种碳源引发的诱导呼吸进行主成分分析,结果显示,微生物对碳源利用的变异主要在 PC1 上,从孕穗初期看,添加少量秸秆和黑炭在 PC1 上发生了显著变化(图 5-A),且添加较多的秸秆和黑炭在 PC1 上发生了更为显著的变化,说明秸秆和黑炭的添加量越大,对土壤微生物的功能结构影响越大。从荷载图看,土壤微生物对葡萄糖、糖胺、半胱氨酸盐酸盐、半乳糖、果糖、赖氨酸盐酸盐、丙氨酸的利用率较高,而添加精氨酸、阿拉伯糖、草酸的诱导呼吸甚至小于仅添加水时二氧化碳产生量(图 6-A)。成熟期的采样与孕穗初期相比,添加 5 g/kg 黑炭的处理与对照的差异更为明显,其余处理的变化趋势与孕穗初期一致(图 5),土壤微生物对果糖、

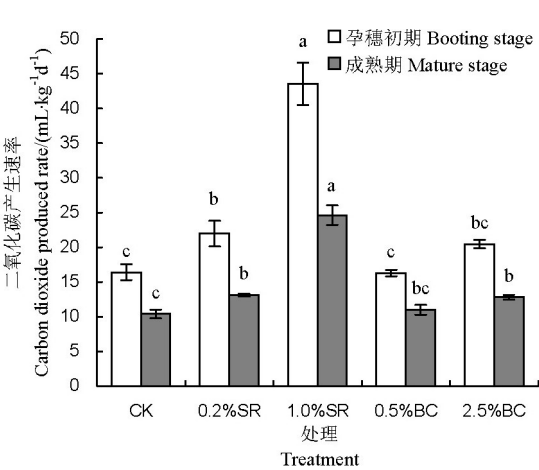


图 4 添加秸秆和黑炭对水稻土净碳矿化速率的影响

Fig. 4. Influence of straw and black carbon addition on the net carbon mineralization rate of paddy soil.

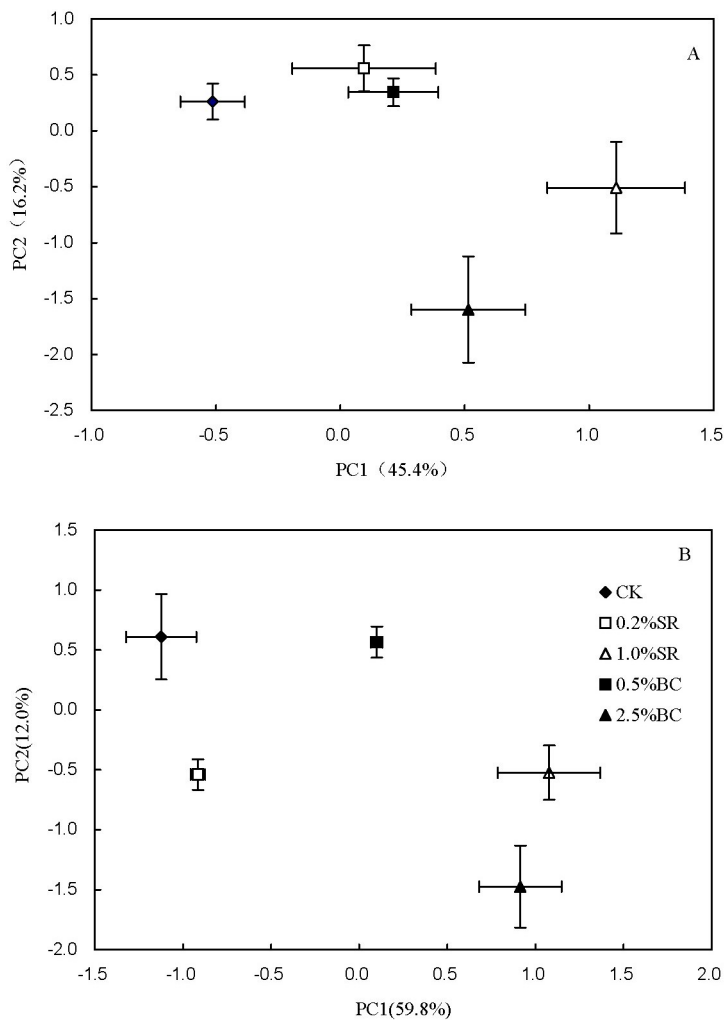
丙氨酸、赖氨酸盐酸盐、糖胺的利用率依然很高,对精氨酸、苹果酸的利用率极低(图 6-B)。

3 讨论

3.1 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及产量的影响

土壤有机碳的转化速率较慢,成熟期取样土壤的有机碳含量仅比孕穗初期增加了 2%~11%,是土壤中相对稳定的指标。虽然秸秆中碳的矿化速率要快于黑炭,但由于添加的黑炭经过粉碎施入土壤后,能充分与土壤混合,成为土壤的组成成分,且其本身以芳香环形式存在的碳含量很高,加入黑炭能显著提升土壤的总有机碳;而秸秆并未粉碎,只有分解到一定程度才能成为土壤有机质的组分,故至取样时,秸秆的降解所引起的有机碳的增加仍不够显著。有研究显示,秸秆并不使土壤中两年内总碳浓度和碳储备发生明显变化^[17],说明秸秆的矿化对土壤有机碳短期的影响不大。

由于水稻土在栽培过程中主要处于淹育状态,因而土壤中的无机氮以铵态氮为主,水稻对氮素的吸收也以铵氮为主,碱解氮较全氮更能反映土壤氮素的植物有效性。添加秸秆和黑炭对土壤铵氮、碱解氮和全氮 3 个指标的影响并不一致,这可能是由于秸秆、黑炭在土壤中的降解速率不同,它们与土壤氮素间的相互影响存在差异,作物对两者释放的养分的吸收也存在差异,由此导致的土壤理化性质



A—孕穗初期；B—成熟期。PC1—第一主成份；PC2—第二主成分。图 6 同。

A, Booting stage; B, Mature stage. PC1, Principal component 1; PC2, Principal component 2. The same as in Fig. 6.

图 5 添加秸秆和黑炭对水稻土微生物功能结构影响的主成分分析

Fig. 5. Principal component analysis about the influence of addition of straw and black carbon on the microbial function structure of paddy soil at different sampling periods.

和微生物结构的不同也可能是引起土壤氮素含量变化的原因。秸秆和黑炭对水稻产量的影响是它们对土壤物理、化学、生物性质共同影响的结果。Vac-cari 等^[18]将大量黑炭(30、60 t/hm²)施于地中海温带气候的小麦地中,使生物量增加 30%,而且黑炭对作物产量的影响还会表现出一定的后效性及滞后效应,黑炭增加后茬作物或仅增加后茬作物的产量,这都是由黑炭与土壤的作用持久及黑炭养分释放缓慢所导致的。在本研究中,黑炭对水稻产量的增加效应显著,一方面说明黑炭与土壤充分混合,对当茬作物即能产生一定的正效应,另一方面即使 5 g/kg 的黑炭也能显著增加生物量,说明低浓度的黑炭也能对作物生长产生积极效应。虽然在不少情况下秸

秆可以增加作物的产量和生物量^[19-20],但即使在众多报道增产的实验中,仍然有很多情况^[21-22],秸秆并未能增加作物的产量。在本研究中,秸秆并未能如黑炭那样显著增加水稻的生物量,这可能是秸秆在降解过程虽然能显著提高微生物活性、土壤的净碳矿化速率,秸秆的降解速率要高于黑炭,但短期内,秸秆养分释放速率小于黑炭,甚而由于秸秆 C : N 比高,土壤微生物与作物竞争氮源养分等,导致秸秆的增产效应不显著。

3.2 添加秸秆和黑炭对土壤微生物量、净碳矿化速率及微生物代谢的影响

土壤中的微生物量碳与可溶性有机碳间有显著相关性^[23],添加秸秆后土壤的微生物量碳增加,表

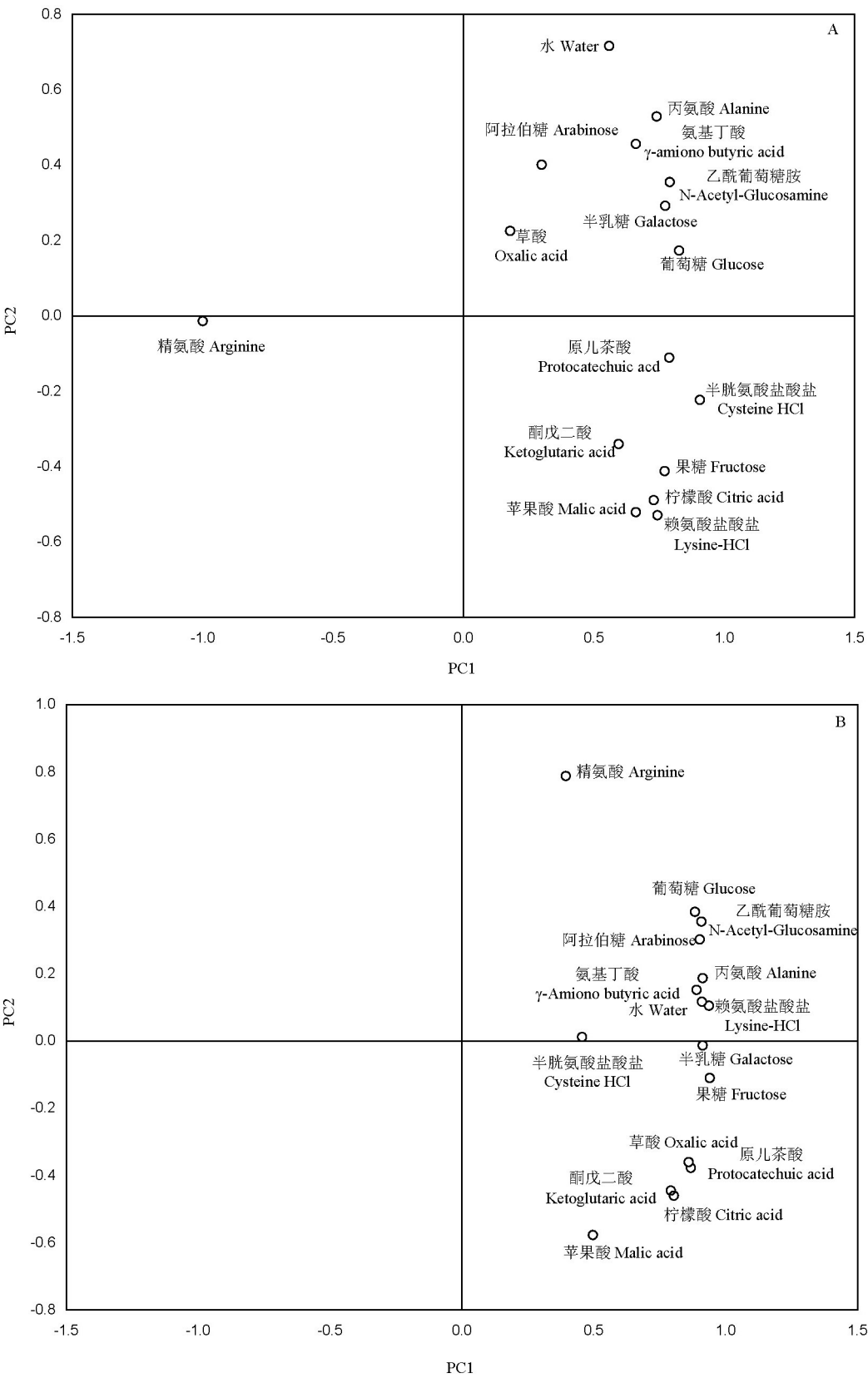


图 6 添加秸秆和黑炭对碳源主成分载荷的影响

Fig. 6. Principal component analysis of loading values for carbon sources as affected by carbon and straw addition at different sampling periods.

明添加秸秆后土壤中易分解有机碳含量升高^[17],增加了土壤的微生物量。本研究中微生物量碳与净碳矿化也存在极显著相关($r=0.581, P<0.01$),说明秸秆微生物量的增加与秸秆的降解有关。秸秆施入不仅会影响土壤的微生物丰度,还能改变土壤微生物群落结构^[24-25]、功能结构^[26]。Wu等^[27]的研究中施用稻秆就影响了土壤的 β -变形菌和疣微菌,而单施化肥则是影响 γ -变形菌和 δ -变形菌。

在本研究中,成熟期取样,添加黑炭处理的微生物量碳反而低于对照,但差异未达到显著水平,这与Zavalloni等^[28]的结果比较一致,即添加黑炭不能显著影响土壤的微生物量。这一方面可能是黑炭所释放的微生物可利用碳较少;另一方面,利用氯仿熏蒸法测定含黑炭土壤的微生物量,由于黑炭的吸附作用可能会低估土壤的微生物量碳^[23]。

净碳矿化速率是表征添加的有机物质矿化以及土壤有机物质降解的重要指标。黑炭的性质稳定,降解缓慢,其半衰期可以达到上千年^[7]。虽然干枯的稻草矿化比较缓慢,但其矿化速率仍然要显著快于黑炭。在Knoblauch等^[4]的研究中,三年里稻壳在有氧和无氧条件下的降解率分别是黑炭的17.5~22.7和3.6~6.4倍。添加黑炭后,土壤碳的矿化速率略高,但这可能是黑炭中的少量易分解组分被利用,而并未引起土壤中原有有机质损失^[29]。黑炭会降低易矿化有机质中碳的矿化速率,且易矿化有机质含量越高,效应越明显^[30],有些情况下甚至可发生负起爆效应^[31],因而添加黑炭有助于土壤碳的固定。从有机碳的变化也可以看出,添加黑炭比添加秸秆和对照处理的土壤有机碳含量都高,充分说明了黑炭有固碳的作用;而秸秆对土壤本身的可溶性有机质的释放有明显的起爆效应^[32],不利于土壤原有碳的固定。

底物诱导呼吸(SIR)可以在一定程度上反映土壤的微生物功能结构。利用Microresp方法测定土壤的诱导呼吸具有比传统培养方法简单快速的优点,而且,由于此方法是用原土进行培养,可以比利用土壤浸提液的Biolog方法更为准确地反映土壤对底物的利用情况^[33]。微生物对碳源利用的差异反映了微生物功能结构的变化,从两次取样的结果看,微生物对果糖、丙氨酸、乙酰葡萄糖胺、赖氨酸盐酸盐的代谢较强,而高浓度的精氨酸较大程度上抑制了土壤的微生物活性。

总之,添加黑炭和秸秆都能提升土壤有机碳含

量,添加黑炭有机碳的提升幅度要大于秸秆。添加秸秆一定程度上增加了土壤的铵氮、碱解氮和全氮含量,而添加黑炭在不同取样时间对土壤的铵氮、碱解氮和全氮影响却不一致,但与对照间的差异不大。黑炭对水稻的增产效应高于秸秆。

高添加量的秸秆可以显著增加土壤的微生物量碳和净碳矿化速率,而黑炭难以显著增加土壤的微生物量碳和净碳矿化速率,更有利于土壤碳的固定。虽然添加秸秆和黑炭在微生物量碳和净碳矿化速率上的影响有差异,但高添加量的秸秆和黑炭都显著改变了微生物的代谢图谱,提高了微生物对果糖、丙氨酸、乙酰葡萄糖胺、赖氨酸盐酸盐等碳源的利用,影响了微生物的功能结构。

参考文献:

- [1] Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. The Assessment and utilization of straw resources in China. *Arg Sci China*, 2010, 9(12): 1807-1815.
- [2] 邱孝煊,蔡元呈,林勇,等.稻草还田对红壤性水稻土肥力的影响. *中国农学通报*, 2006, 22(1): 188-190.
- [3] 王玄德,石孝均,宋光煜.长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 302-307.
- [4] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils. *Soil Bio Biochem*, 2010, 43(9): 1768-1778.
- [5] Liu C, Wang K, Meng S, et al. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China. *Agr Ecosyst Environ*, 2011, 140(1/2): 226-233.
- [6] Karhu K, Mattila T, Bergstrom I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study. *Agr Ecosyst Environ*, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [7] Peng X, Ye L, Wang C, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil Till Res*, 2011, 111(1): 159-166.
- [8] Laird D A, Fleming P, Davis DD, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [9] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [10] Vaccari F, Baronti S, Lugato E, et al. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *Eur J Agron*, 2011, 34(4): 231-238.
- [11] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of

- biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ Pollut*, 2010, 158(6): 2282-2287.
- [12] Gomez-Eyles J L, Sizmur T, Collins C D, et al. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environ Pollut*, 2010, 159(2): 616-622.
- [13] 谭周进, 李倩, 陈冬林, 等. 稻草还田对晚稻土壤微生物及酶活性的影响. 生态学报, 2006, 26(10): 3385-3392.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学与分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术. 北京: 科学出版社, 2006: 147-148.
- [16] Campbell C D, Chapman S J, Cameron C M, et al. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Appl Environ Microb*, 2003, 69(6): 3593-3599.
- [17] Xu M, Lou Y, Sun X, et al. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation. *Biol Fert Soils*, 2011, 47(7): 745-752.
- [18] Vaccari F, Baronti S, Lugato E, et al. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *Eur J Agron*, 2011, 34(4): 231-238.
- [19] 肖小平, 汤海涛, 纪雄辉. 稻草还田模式对稻田土壤速效氮、钾含量及晚稻生长的影响. 作物学报, 2008, 34(8): 1464-1469.
- [20] 彭英湘, 王凯荣, 谢小立, 等. 水肥条件与稻草还田对土壤供氮及水稻产量的影响. 中国土壤与肥料, 2007(4): 40-43.
- [21] 吴家梅, 彭华, 纪雄辉, 等. 稻草还田方式对双季稻田耕层土壤有机碳积累的影响. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2360-2366.
- [22] Malhi S, Nyborg M, Solberg E, et al. Improving crop yield and N uptake with long-term straw retention in two contrasting soil types. *Field Crop Res*, 2011, 124(3): 378-391.
- [23] Liang B, Yang X, He X, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. *Biol Fert Soils*, 2011, 47(2): 121-128.
- [24] Aciego P J, Brookes P. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Bio Biochem*, 2009, 41(7): 1396-1405.
- [25] Dilly O, Bloem J, Vos A, et al. Bacterial diversity in agricultural soils during litter decomposition. *Appl Environ Microb*, 2004, 70(1): 468-474.
- [26] 周文新, 陈冬林, 卜毓坚, 等. 稻草还田对土壤微生物群落功能多样性的影响. 环境科学学报, 2008, 28(2): 326-3305.
- [27] Wu M, Qin H, Chen Z, et al. Effect of long-term fertilization on bacterial composition in rice paddy soil. *Biol Fert Soils*, 2011, 47(7): 397-405.
- [28] Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, et al. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Appl Soil Ecol*, 2011, 50: 45-51.
- [29] Jones D, Murphy D, Khalid M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Bio Biochem*, 2011, 43(8): 1723-1731.
- [30] Keith A, Singh B, Singh B P. Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(22): 9611-9618.
- [31] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Bio Biochem*, 2011, 43(10): 2127-2134.
- [32] De Troyer I, Amery F, van Moorleghe C, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ¹³C labelled residue: A batch incubation study. *Soil Bio Biochem*, 2010, 43(3): 513-519.
- [33] Chapman S J, Campbell C D, Artz R R E. Assessing CLPPs using MicroRespTM. *J Soil Sedimen*, 2007, 7(6): 406-410.