

施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响*

武爱莲¹ 王劲松¹ 董二伟¹ 王立革¹ 郭珺¹ 南江宽¹ 韩雄¹

Louis McDonald² 焦晓燕^{1†}

(1 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031)

(2 Division of Plant and Soil Sciences, West Virginia University, West Virginia 26506-6108, USA)

摘要 为明确秸秆直接还田和秸秆炭化为生物炭后施入土壤对氮肥转化(植株吸收、土壤残留及损失)的影响,采用大田微区试验,运用¹⁵N标记示踪技术,分析了石灰性褐土施用生物炭和秸秆后氮肥的去向,并阐明其影响机制。试验共设3个处理,单施化肥(NPK)、施化肥并施生物炭(NPK+B)以及施化肥并施秸秆(NPK+S)。结果表明:石灰性褐土上高粱植株当季的氮肥吸收率、土壤残留率和损失率分别是18.41%~24.94%、22.67%~35.47%和46.12%~52.40%;与NPK处理相比,NPK+B和NPK+S处理高粱植株的氮肥利用率分别降低2.20个百分点和6.53个百分点($P<0.05$),土壤残留率分别增加5.58个百分点($P<0.05$)和12.80个百分点($P<0.05$),氮肥损失率分别降低3.40个百分点和6.28($P<0.05$)个百分点;施用秸秆显著提高了土壤活性有机碳含量、土壤微生物数量及代谢活性,增强了氮肥转化过程中土壤微生物对肥料氮的固定,从而减少氮肥损失。因此,与施用生物炭比较,秸秆直接还田是提高石灰性褐土氮肥有效性及秸秆资源合理利用的更有效途径。

关键词 秸秆;生物炭;氮肥利用率;氮肥损失;石灰性褐土

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A

我国农作物秸秆资源丰富,2001—2010年平均粮食作物秸秆产量约为 5.1×10^8 t^[1],将其还田是现代农业生产中的一项重要举措^[2],对实现农业可持续发展具有重要意义。多数作物秸秆的碳氮比(C/N)较高,施入土壤可增加土壤微生物活性,促进微生物固氮^[3],从而减少氮的淋失^[4],但同时也会增加土壤氧化亚氮(N₂O)和二氧化碳(CO₂)的排放^[5]。将农作物秸秆在低氧或缺氧条件下高温裂解为生物炭后施入土壤被认为是土壤固碳减排的有效途径^[6],且施入土壤后可增强土壤对铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的吸附和固持作用^[7]、减少N₂O的排放^[8],从而减少氮肥损失,提高氮肥利用率^[9-12]。但目前的研究多集中在对秸秆或生物炭的单一报道,且对氮肥利用率的计算多采用传统差减法的方式。

同一条件下秸秆直接还田和秸秆炭化为生物炭后施入土壤对氮肥利用率的影响尚不清楚,目前仅见刘娇等^[13]采用室内培养试验研究了玉米秸秆及其黑炭对黄绵土氮素净矿化及N₂O排放的影

* 国家现代农业谷子高粱产业技术体系项目(CARS-06-13.5-A20)和山西省农业科学院优势课题组自选项目(YYS1707)资助
Supported by the National Modern Agricultural Industrial Technology System of China (No. CARS-06-13.5-A20) and the Key Research Group Projects of Shanxi Academy of Agricultural Sciences in China (No. YYS1707)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiaoyan_jiao@126.com

作者简介:武爱莲(1981—),女,山西万荣人,硕士,助理研究员,主要从事土壤养分转化与根际微生物。E-mail: wuping.20088@163.com

收稿日期: 2018-04-09; 收到修改稿日期: 2018-06-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net):

响, 结果表明秸秆可减少 NO_3^- -N 的淋失, 但会造成 N_2O 的大量排放, 而生物炭会降低 N_2O 的排放, 但增加了 NO_3^- -N 的淋失; 葛顺峰等^[14]采用 ^{15}N 示踪技术发现在棕壤上添加等量的秸秆和生物炭降低了苹果园土壤容重, 提高了阳离子交换量和氮肥利用率, 添加生物炭的效果优于秸秆。石灰性褐土呈碱性, 氮肥在土壤中的转化速率较快, 易造成氮肥损失。因此, 本研究以玉米秸秆和以玉米秸秆为原料制成的生物炭 2 种类型的碳源为材料, 在田间条件下采用 ^{15}N 示踪技术, 研究石灰性褐土施用生物炭和秸秆对氮肥去向 (作物吸收、土壤残留以及氮肥损失) 的影响, 以期为合理利用秸秆资源、降低石灰性褐土氮肥损失提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验在山西省农业科学院东阳试验基地 ($37^{\circ}33'21''\text{N}$, $112^{\circ}40'2''\text{E}$) 进行, 该区域属北温带大陆性气候, 海拔 800 m, 年均气温 9.7°C , 年均降水量 440.7 mm, 主要集中在 7—8 月。土壤类型为石灰性褐土 (普通筒育干润淋溶土), 土壤质地为壤质砂土 (各粒级体积百分比分别为: 小于 0.002 mm 黏粒 1.63%, 0.02 ~ 0.002 mm 粉粒 11.29%, 2 ~ 0.02 mm 砂粒 87.09%)。供试土壤基本化学性质: pH 8.47, 电导率 0.28 mS cm^{-1} , 有机碳 10.21 g kg^{-1} , 全氮 0.84 g kg^{-1} , 有效磷 6.53 mg kg^{-1} , 速效钾 $143.67 \text{ mg kg}^{-1}$ 。供试玉米秸秆的全碳 448.4 g kg^{-1} , 全氮 9.41 g kg^{-1} , 全磷 0.71 g kg^{-1} , 全钾 13.57 g kg^{-1} ; 生物炭由山西省工霄商社生产, 原料为玉米秸秆, 化学性质为全碳 569.9 g kg^{-1} , 全氮 6.56 g kg^{-1} , 有效磷 0.69 g kg^{-1} , 速效钾 29.33 g kg^{-1} , pH 10.22, 电导率 10.97 mS cm^{-1} , 阳离子交换量 (CEC) $59.2 \text{ cmol kg}^{-1}$ 。种植作物高粱, 品种为晋杂 34 号。

1.2 研究方法

采用微区试验的方法, 微区面积为 1 m^2 , 挖好土柱后将 1.0 m (长) $\times 1.0 \text{ m}$ (宽) $\times 1.2 \text{ m}$ (高) 的聚氯乙烯 (Poly vinyl chloride, PVC) 框埋进土柱周围, 露出地表 15 cm 以免灌水将外部氮携带进微区, 保持微区框内为原状土。

试验处理: (1) 施肥处理 (NPK); (2) 施肥+生物炭 (NPK+B); (3) 施肥+秸秆 (NPK+S), 基于课题组前期的研究结果^[15-16], 生物炭施用量为耕层土壤质量的 0.5% (13.0 t hm^{-2}), 秸秆以等碳量施入 (16.5 t hm^{-2})。每个处理 3 次重复, 每个微区种植 2 行高粱, 共 18 株。使用的 ^{15}N 标记尿素 (含氮量为 46%) 丰度为 10.12%, 施纯氮为 225 kg hm^{-2} , 其中 50% 氮肥基施 (撒施), 50% 拔节期追施 (条施)。同时施入 P_2O_5 75 kg hm^{-2} (过磷酸钙) 和 K_2O 30 kg hm^{-2} (硫酸钾), 均作为底肥在播种前基施; 生物炭和秸秆 (粉碎约 2 ~ 3 cm) 于 2015 年 4 月 25 日撒施至各微区并与土壤充分混匀。试验于 2015 年 5 月 3 日施肥、播种, 10 月 2 日收获。收获时采集高粱植株和土壤样品, 高粱植株地上部分按器官分为茎、叶、穗梗和籽粒, 65°C 烘干后计量生物量并测定全氮和 ^{15}N 丰度; 采集 0 ~ 160 cm 土层的土壤样品风干后分析其全氮和 ^{15}N 丰度, 其中, 0 ~ 20 cm 土壤样品测定土壤有机碳 (SOC) 和活性有机碳 (LOC), 取部分该层次土壤新鲜样品放入液氮罐, 带回实验室置于 -20°C 冰箱, 用于土壤微生物数量和代谢活性的分析。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH (水土比 2.5: 1) 和 EC (水土比 5: 1) 分别采用 pH 计 (FE28, METTLER TOLEDO, 上海) 和电导率仪 (FE38, METTLER TOLEDO, 上海) 测定; 植株和土壤样品全氮采用浓 H_2SO_4 消煮, 全自动凯氏定氮仪 (Kjeltec 8400, FOSS, 丹麦) 测定。有效磷采用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提、钼锑抗试剂显色, 紫外可见分光光度计 (TU-1950, 普析, 北京) 测定; 速效钾采用 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提、火焰光度计 (FP6400A, AOPU, 上海) 测定; 土壤有机碳采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定。活性有机碳采用 $333 \text{ mmol L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 氧化法测定; ^{15}N 丰度由中国农业科学院原子能利用研究所采用稳定同位素质谱仪 (Isoprime 100, Isoprime, 英国) 测定。

土壤微生物数量采用平板稀释涂布法计数。细菌、真菌和放线菌分别用牛肉膏蛋白胨培养基、孟加拉红培养基和高氏 1 号培养基培养。

土壤微生物代谢活性采用 BIOLOG ECO 微平板法测定^[17]：称取 10.0 g 新鲜土样置于装有 90 mL 已灭菌生理盐水 (0.85% NaCl) 的三角瓶内，在转速 200 r min⁻¹ 下振荡 30 min，静置 10 min 后用生理盐水稀释至 10⁻³，将稀释好的土壤悬浊液 150 μL 接种至 Biolog-Eco 板 (BIOLOG, Hayward, 美国) 的每个微孔中，接种后的 Eco 板在 25℃ 下培养。每隔 24 h 用 Biolog Reader 仪 (BIOLOG, Hayward, 美国) 测定波长 590 nm 下的吸光值。

微生物的代谢活性采用孔的平均颜色变化率 (Average well color development, AWCD) 表示。

$$AWCD = \sum(A_i - A_0) / n$$

式中， A_i 为各单孔实际吸光值， A_0 为对照孔的吸光值， $A_i - A_0$ 为负值时则归为 0， n 为碳源种类 (Eco-MicroPlate 为 31)，AWCD 值为 3 次重复的平均值。

1.4 数据处理

Ndff (植物器官从肥料中吸收分配到的 ¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率, %) = (样品中 ¹⁵N 丰度 - 样品 ¹⁵N 自然丰度) / (肥料中 ¹⁵N 丰度 - 自然丰度) × 100

氮肥利用率 (%) = Ndff × 器官全氮量 (kg) / 施氮量 (kg)

土壤质量 (kg) = 土壤体积 (m³) × 土壤容重 (t m⁻³) × 1 000

土壤全氮量 (kg) = 土壤质量 (kg) × 全氮含量 (g kg⁻¹) / 1 000

土壤氮肥残留率 (%) = Ndff × 土壤全氮量 (kg) / 施肥量 (kg)

采用 Microsoft Excel 2016 及 SPSS 24.0 软件进行图表制作及数据统计分析，采用邓肯 (Duncan) 检验法对数据进行多重比较。

2 结果

2.1 不同处理对高粱干物质产量和氮素吸收量的影响

NPK、NPK+B 和 NPK+S 处理间高粱茎、叶、穗梗和籽粒的干物质产量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1)。以茎、叶和穗梗之和表示的高粱地上部秸秆生物量在各处理间差异也不显著 ($P > 0.05$)。NPK+B 处理的地上部秸秆的生物量和籽粒产量分别为 12.59 和 9.82 t hm⁻²，NPK+S 处理分别为 12.40 和 9.68 t hm⁻²，NPK 处理分别为 12.06 和 9.55 t hm⁻²，高粱地上部秸秆生物量高于籽粒的干物质质量。

NPK、NPK+B 和 NPK+S 处理间高粱茎、叶、穗梗和籽粒的氮素吸收量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1)。以茎、叶和穗梗之和表示的高粱地上部秸秆的氮素吸收量在各处理间差异也不显著 ($P > 0.05$)。NPK+S 处理的地上部秸秆和籽粒的氮素吸收量分别为 154.1 和 133.1 kg hm⁻²，NPK+B 处理分别为 149.5 和 131.9 kg hm⁻²，NPK 处理分别为 144.3 和 129.1 kg hm⁻²。高粱地上部秸秆的氮素吸收量高于籽粒，且地上部的氮素主要分配在高粱植株叶片中。

表 1 不同处理下高粱干物质产量和氮素吸收量

处理 Treatment	干物质产量 Dry matter yield (t hm ⁻²)				氮素吸收量 N uptake (kg hm ⁻²)			
	茎 Stem	叶 Leaf	穗梗 Panicle branch	籽粒 Grain	茎 Stem	叶 Leaf	穗梗 Panicle branch	籽粒 Grain
	NPK	3.10a	5.38a	3.58a	9.55a	23.21a	72.95a	48.18a

NPK+B	3.06a	6.11a	3.42a	9.82a	22.29a	83.26a	43.91a	131.93a
NPK+S	3.15a	5.73a	3.52a	9.68a	24.45a	82.04a	47.59a	133.07a

注: NPK: 单施化肥; NPK+B: 施化肥且施生物炭; NPK+S: 施化肥且施秸秆。表中数据为平均值 ($n=3$), 同一列中不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同 Note: NPK: Application of chemical fertilizer only; NPK+B: Application of chemical fertilizer plus straw biochar; NPK+S: Application of chemical fertilizer plus straw; Values are means ($n=3$) of replicates. Values affixed with different lowercase letters within the same column are significantly different at 0.05 level. The same below

2.2 不同处理对高粱氮肥利用率的影响

施用秸秆显著影响了高粱吸收的氮素来源于肥料的比例 ($P<0.05$) (表 2)。高粱茎、叶、穗梗和籽粒中来源于肥料氮的比例均大致表现为 $NPK>NPK+B>NPK+S$ 处理, 与 NPK 处理相比, NPK+B 处理的高粱茎、叶、穗梗和籽粒吸收的氮来自肥料的比例分别降低 8.24%、13.60%、12.56% 和 12.33%, NPK+S 处理分别显著降低 27.54%、33.55%、30.02% 和 28.42%。

施用秸秆显著影响了高粱的氮肥利用率 ($P<0.05$) (表 2)。不同处理高粱的氮肥利用率整体表现为 $NPK>NPK+B>NPK+S$ 处理。与 NPK 处理相比, NPK+B 处理高粱的氮肥利用率降低 2.20 个百分点, NPK+S 处理的氮肥利用率显著降低 6.53 个百分点。

表 2 不同处理下高粱的氮肥利用率

Table 2 Nitrogen utilization efficiency of sorghum relative to treatment

处理 Treatment	高粱吸收的氮来源于肥料的比例 Nitrogen derived from fertilizer (Ndff)/%				氮肥利用率 ¹⁵ N utilization efficiency/%					
	茎 Stem	叶 Leaf	穗梗 Panicle branch	籽粒 Grain	茎 Stem	叶 Leaf	穗梗 branch	Panicle	籽粒 Granin	合计 Total
NPK	16.38a	24.42a	18.66a	19.89a	1.68a	7.87a	4.00a		11.40a	24.94a
NPK+B	15.03ab	21.10ab	16.32b	17.44a	1.48ab	7.85a	3.18b		10.23ab	22.74a
NPK+S	11.87b	16.23b	13.06c	14.24b	1.29b	5.94b	2.75b		8.44b	18.41b

2.3 不同处理对土壤中肥料氮残留的影响

表 3 表明, 肥料氮在土壤中的残留量占施入量的 22.67% ~ 35.47%, 且主要分布在 0 ~ 40 cm 的土层中, 占总残留的 91.51% ~ 95.00%, 其中 0 ~ 20 cm 土层的残留量占总残留量的 84.27% ~ 91.59%。

施用生物炭和秸秆显著影响了肥料氮在土壤中的残留率 ($P<0.05$), 整体表现为 $NPK+S>NPK+B>NPK$ 处理。与 NPK 处理相比, NPK+B 和 NPK+S 处理的肥料氮在土壤中的残留率分别提高 5.58 个百分点 ($P<0.05$) 和 12.80 个百分点 ($P<0.05$); NPK+S 较 NPK+B 处理肥料氮在土壤中的残留率提高 7.22 个百分点 ($P<0.05$)。

表 3 肥料氮在土壤中的残留

Table 3 ¹⁵N residue in soil relative to treatment

处理 Treatment	各土层残留 Soil layers residue/(kg hm ⁻²)					总残留 Total residue /(kg hm ⁻²)	占施氮量比例 Percent of N application rate /%
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 160 cm		
NPK	42.98c	3.69ab	1.76a	0.59a	1.97a	51.00c	22.67c
NPK+B	56.30b	4.16a	1.14a	0.50a	1.48b	63.57b	28.25b
NPK+S	74.09a	2.79b	1.27a	0.43a	1.21c	79.80a	35.47a

2.4 不同处理对氮素去向的影响

施用秸秆显著影响了肥料氮的去向 ($P<0.05$) (表 4)。作物吸收的肥料氮各处理间大致表现为 $\text{NPK}>\text{NPK+B}>\text{NPK+S}$, 土壤残留肥料氮各处理间表现为 $\text{NPK+S}>\text{NPK+B}>\text{NPK}$, 氮肥损失量各处理大致表现为 $\text{NPK}>\text{NPK+B}>\text{NPK+S}$ 。与 NPK 处理相比, NPK+B 和 NPK+S 作物吸收的肥料氮分别降低 2.20 个百分点和 6.53 个百分点, 土壤残留的肥料氮分别增加 5.58 个百分点和 12.80 个百分点, 氮肥的损失率分别降低 3.40 个百分点和 6.28 个百分点。

NPK+B 与 NPK+S 处理在作物吸收的肥料氮以及土壤残留的肥料氮之间均存在显著差异 ($P<0.05$)。 NPK+B 较 NPK+S 处理的作物吸收的肥料氮增加 23.51%、土壤残留的肥料氮降低 20.34%, 损失率增加 2.88 个百分点。

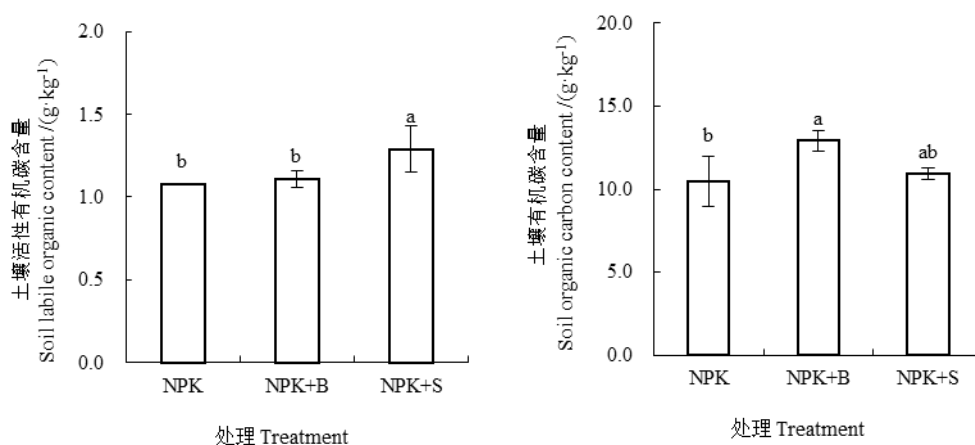
表 4 不同处理下肥料氮的去向

Table 4 Fate of fertilizer N relative to treatment

处理 Treatment	施氮量 N application rate $/(kg\ hm^{-2})$	作物吸收 Crop uptake $/(kg\ hm^{-2})$	土壤残留 Soil residue $/(kg\ hm^{-2})$	合计 Total $/(kg\ hm^{-2})$	回收率 Recovery ratio /%	损失量 N loss $/(kg\ hm^{-2})$	损失率 N loss ratio /%
NPK	225	56.11a	51.00c	107.1b	47.60b	117.9a	52.40a
NPK+B	225	51.17a	63.57b	114.7ab	51.00ab	110.3ab	49.00ab
NPK+S	225	41.43b	79.80a	121.2a	53.88a	103.8b	46.12b

2.5 不同处理对土壤有机碳的影响

生物炭和秸秆具有较高的 C/N, 碳含量丰富。活性有机碳是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应具有直接作用的那部分有机碳^[18]。图 1 表明, 施用生物炭显著提高了土壤有机碳含量 ($P<0.05$), 施用秸秆显著提高了土壤活性有机碳含量 ($P<0.05$)。与 NPK 处理相比, NPK+B 和 NPK+S 处理土壤有机碳含量分别提高了 23.50% 和 4.30%, 活性有机碳含量分别提高了 2.78% 和 19.44%。



注: 误差线表示标准差 ($n=3$); 不同字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同 Note: Error bar represents standard deviations ($n=3$); Different letters mean significant differences at 0.05 level. The same below

图1 0~20 cm 土壤有机碳及活性有机碳含量

Fig.1 Content of soil organic carbon and labile organic carbon in the soil 0~20 cm in depth

2.6 不同处理对土壤微生物数量的影响

土壤细菌数量总体表现为 NPK+B>NPK+S>NPK, NPK+B 和 NPK+S 较 NPK 处理分别增加 24.95%和 13.34%, NPK+B 较 NPK+S 处理增加 10.25%, 施用生物炭显著增加了土壤细菌数量; 土壤真菌数量总体表现为 NPK+S>>NPK+B>NPK, NPK+S 和 NPK+B 较 NPK 处理分别增加 29.26%和 161.1% ($P<0.05$), NPK+S 较 NPK+B 处理增加 102.0% ($P<0.05$), 施用生物炭和秸秆均显著增加了土壤真菌的数量, 但秸秆的贡献要远远大于生物炭; 土壤放线菌数量总体表现为 NPK+S>NPK>NPK+B, 与 NPK 处理相比, NPK+S 处理土壤放线菌数量增加 2.39%, 但 NPK+B 处理的土壤放线菌数量降低 6.70%, NPK+S 较 NPK+B 处理增加 9.73% ($P<0.05$)。

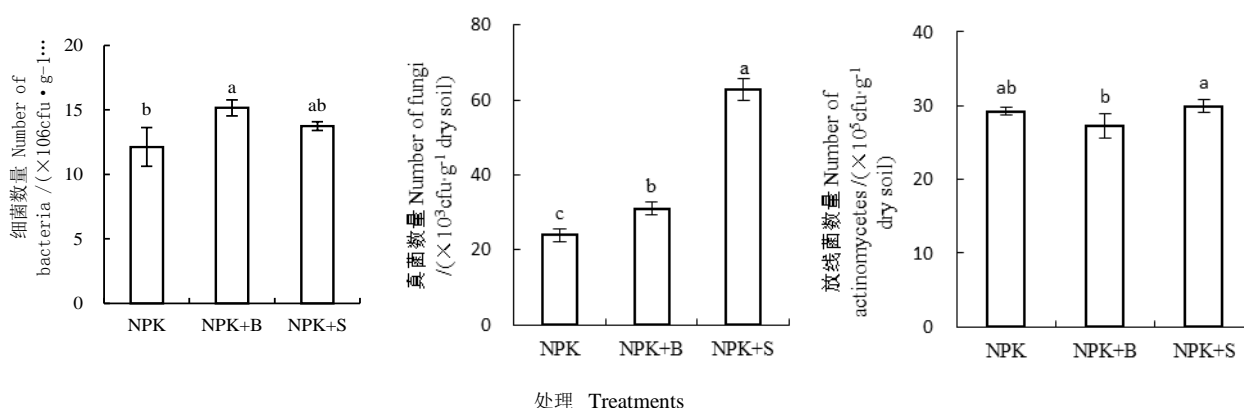


图2 土壤细菌、真菌以及放线菌数量

Fig.2 Population of soil bacteria, fungi and actinomycetes

2.7 不同处理对土壤微生物活性的影响

平均颜色变化率 (AWCD) 表示可培养微生物对不同底物 (碳源) 的利用能力, 在一定程度上反映了土壤微生物的生理代谢活性。通过对 31 种碳源 AWCD 值的动态监测 (每隔 24 h, 图 3) 可知: 随着培养时间的延长, 各处理 AWCD 均呈增长趋势。培养前 24 h 各处理 AWCD 均较低, 24 h 后迅速升高, 说明碳源逐渐被利用, 微生物代谢活性增强, NPK+S 处理的 AWCD 显著高于 NPK+B 和 NPK 处理, NPK+B 和 NPK 处理间差异不显著。从 48 h 至 168 h, NPK+S 处理的 AWCD 较 NPK+B 处理分别增加 112.7%、94.82%、103.7%、91.93%、71.07%、61.79% ($P<0.05$), 较 NPK 处理分别增加 228.2%、121.1%、72.81%、60.02%、43.23%、40.08% ($P<0.05$), 施用秸秆提高了微生物利用碳源的能力, 增强了土壤微生物代谢活性。

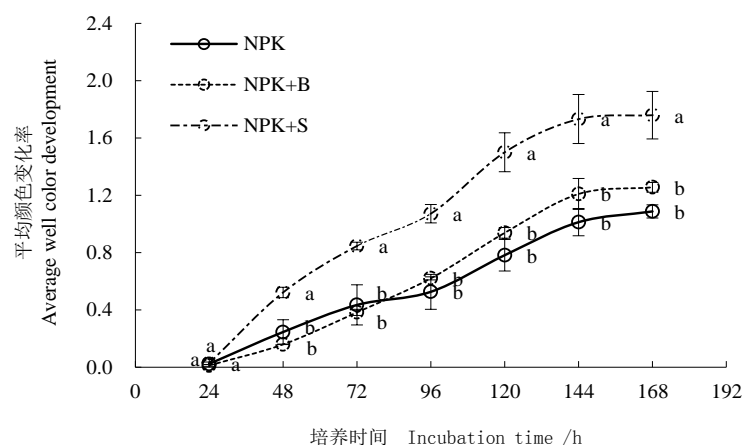


图3 土壤微生物利用不同种类源的平均颜色变化率(AWCD)
Fig.3 Average well color development(AWCD) of carbon source utilized by soil microbe relative to type of the carbon source

3 讨论

农田施用生物炭和秸秆是农业资源循环利用的一项重要举措,大量研究报道:施用生物炭和秸秆均可提高作物产量和吸氮量^[19-22]。本研究也得到相同的结论,与单施化肥相比,施用生物炭和秸秆使高粱干物质产量分别提高了 3.7%、2.2%,吸氮量分别提高了 2.9%和 5.0%,但差异不显著(表 1),其原因可能与氮肥对生物炭和秸秆的“激发效应”有关^[23],生物炭和秸秆自身含有一定的养分,并可显著提高土壤有机碳或活性有机碳的含量(图 1),无机氮肥(225 kg hm⁻²,以 N 计,下同)的施入为土壤微生物的生长提供了氮源,进而对生物炭和秸秆腐解以及土壤氮的矿化产生激发效应^[24],有利于生物炭和秸秆腐解过程中养分的释放。李琦等^[25]研究表明:生物炭施用量为 1.0%且与氮肥(260 kg hm⁻²)配施显著提高了棉花干物质和氮素吸收量;李晓峰等^[26]报道:秸秆施用量 6 t hm⁻²且与氮肥(300 kg hm⁻²)配施显著提高了水稻的产量和氮素累积量。但本研究发现,施用生物炭和秸秆对高粱的干物质产量和养分吸收影响不显著,这可能与生物炭、秸秆或氮肥的施用量、作物响应、土壤条件等有关。

关于施用生物炭和秸秆对作物氮肥利用率的影响,Steiner 等^[10]认为生物炭改善了土壤结构,提高土壤 pH 和阳离子交换能力,增强土壤对矿质养分的吸附,从而提高了氮肥利用率;张刚等^[27]研究认为,秸秆还田配施氮肥通过对土壤氮素矿化的激发效应提高水稻总吸氮量,以及减少氮素损失来提高氮肥利用率。与已报道的大部分研究结果不同,本研究结果表明,施用生物炭和秸秆处理的高粱当季氮肥利用率较单施化肥分别降低了 2.20 个百分点和 6.53 个百分点(表 2)。施用生物炭和秸秆虽提高了高粱地上部的氮素吸收量,但其来自肥料氮的比例较单施化肥分别降低了 11.3%和 29.7%,也就是说,施用生物炭和秸秆降低了肥料氮的有效性,这与土壤微生物对氮的固持作用^[28]有关,本研究中施用生物炭和秸秆后土壤微生物数量(图 2)和活性(图 3)以及土壤中肥料氮残留量的增加(表 3)也进一步印证了该问题。其次,研究方法的不同可能是导致本研究与以往研究结果不同的主要原因,本研究中对氮肥利用率的计算采用 ¹⁵N 同位素示踪方法,可明确高粱植株吸收的氮素来自肥料氮的部分,而以上文献报道结果多采用传统方法,计算的是氮肥的农学利用效率或表现利用效率,不能反映肥料养分的真实利用率^[29]。

氮肥损失的途径主要有气态损失、淋溶损失和径流损失等。本研究结果表明,施用生物炭和秸秆较单施化肥处理的肥料氮在土壤中的残留率分别增加了 5.58 个百分点和 12.80 个百分点,氮肥损失率分别降低了 3.40 个百分点和 6.28 个百分点,秸秆的效果优于生物炭。施用生物炭显著提高了土壤有机碳含量(图 1)以及土壤细菌和真菌的数量(图 2),但其对土壤微生物代谢活性的影响较小(图 3),这是因为生物炭是一种活性较低的碳,稳定性高、芳香性强,具有化学和微生物惰性^[30],与秸秆相比具有较低的土壤微生物量和微生物商^[31],其自身不易腐解也不会促进土壤原有有机碳的矿化^[32],会长期存留在环境中;但生物炭的比表面积较大且带有大量的负电荷,具有一定的吸附容量及离子交换能力^[6],可以吸附铵态氮^[33]和硝态氮^[34],但其在旱地土壤上的施用量仅有达到 2.0% 以上才能表现出显著的吸附效果^[11]。因此,生物炭的微生物作用以及其对肥料氮的吸附作用极为有限。本研究结果表明:施用秸秆显著提高了土壤活性有机碳(图 1)、土壤微生物数量(图 2)以及代谢活性(图 3),土壤活性有机碳是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应具有直接作用的那部分有机碳^[18],秸秆由易分解的成分如糖类等组成,且其自身含有较多的水溶性物质,可为微生物提供易利用的营养物质和能源物质^[35],调节土壤温度、提高根际土壤微生物数量及酶活性^[36]。氮肥的转化主要通过氨氧化微生物和亚硝酸盐氧化微生物将铵态氮转化为硝态氮后供作物吸收,本研究中生物炭和秸秆均具有较大的 C/N,而秸秆较生物炭具有更高的活性有机碳,为微生物的生长和繁殖提供了大量的碳源,刺激了微生物的生长,因此,在氮肥的转化过程中通过微生物作用固定了较多的肥料氮,进而将铵态氮或硝态氮转化为微生物量氮储存起来^[37],形成微生物与作物对氮肥的竞争,降低了高粱对当季氮肥的利用效率。

本研究中氮肥有效率(氮肥利用率+土壤残留率)为 48%~54%,损失率为 46%~52%,这与巨晓棠^[38]报道的我国现阶段氮肥有效率在 50%~60%,损失率在 40%~50%之间相一致;本研究结果也表明,高粱吸收的氮主要来自土壤,占地上部总吸氮量的 80%~85%,造成土壤氮素亏缺 166 kg hm⁻²。在不考虑干湿沉降对土壤氮素补充的情况下,施用生物炭土壤氮素亏缺约为 81.37 kg hm⁻²,施用等碳量的秸秆土壤氮素亏缺约为 10.66 kg hm⁻²,秸秆还田更有助于维持土壤氮素的平衡。本研究仅为一年的大田短期试验,未考虑肥料的残效,也未考虑肥料氮和土壤氮对氮素损失的贡献率,此外,土壤类型、气候、作物种类以及生物炭和秸秆的用量均影响着氮肥的转化。因此,今后仍需开展施用生物炭和秸秆比较的长期定位试验。

4 结论

秸秆直接还田以及秸秆炭化为生物炭施入土壤是目前农业生产中秸秆资源利用的主要方式。石灰性褐土施用生物炭和秸秆均降低了高粱当季的氮肥利用率,提高了氮肥在土壤中的残留率,从而降低了氮肥损失率,这与生物炭和秸秆提高了土壤有机碳和活性有机碳含量、土壤微生物数量以及代谢活性有关,氮肥在转化过程中通过微生物作用固定了较多的肥料氮,减少了氮肥损失;施用秸秆的效果要优于生物炭,且更有助于维持土壤氮素的平衡,是更有效的秸秆资源利用方式。

参考文献

- [1] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 1-7
- [2] Seufert V, Ramankutty N, Foley J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. Nature, 2012, 485(7397): 229-232

- [3] Shindo H, Nishio T. Immobilization and remineralization of N following addition of wheat straw into soil: Determination of gross N transformation rates by ^{15}N -ammonium isotope dilution technique. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(3): 425-432
- [4] 胡国庆, 刘肖, 何红波, 等. 免耕覆盖还田下玉米秸秆氮素的去向研究. *土壤学报*, 2016, 53(4): 963-971
Hu G Q, Liu X, He H B, et al. Fate of nitrogen contained in maize stalk mulch in no-tillage system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 963-971
- [5] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(6): 973-981
- [6] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395-419
- [7] 杜衍红, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 炭-肥互作对芥菜产量和肥料利用率的影响. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 59-64
Du Y H, Jiang E C, Wang M F, et al. Effect of interaction of biochar and fertilizer on mustard yield and fertilizer utilization rate (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 59-64
- [8] 王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中 N_2O 产排的影响. *土壤学报*, 2016, 53(3): 713-723
Wang J, Shi Y, Li Z Y, et al. Effects of biochar application on N_2O emission in degraded vegetable soil and in remediation process of the soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 713-723
- [9] Ding Y, Liu Y X, Wu W X. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 213(1/4): 47-55
- [10] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893-899
- [11] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54-61
Gao D C, Zhang L, Liu Q, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54-61
- [12] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45:113-124
- [13] 刘娇, 高健, 赵英. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土氮素转化的影响. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1361-1368
Liu J, Gao J, Zhao Y. Effect of addition of both maize stalk and its biochar to loess soil on N transformations (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6): 1361-1368
- [14] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 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. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 366-373
Ge S F, Peng L, Ren Y H, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 366-373
- [15] 王浩. 不同水分条件下生物炭对土壤特性和高粱生长的影响. 太原: 山西大学, 2015
Wang H. Effects of biochar on soil properties and sorghum growth under different levels of water (In Chinese). Taiyuan: Shanxi University, 2015
- [16] 武爱莲, 丁玉川, 焦晓燕, 等. 玉米秸秆生物炭对褐土微生物功能多样性及细菌群落的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 736-743
Wu A L, Ding Y C, Jiao X Y, et al. Effect of corn-stalk biochar on soil microbial functional diversity and bacterial community in cinnamon soils (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 736-743
- [17] Frac M, Oszust K, Lipiec J. Community level physiological profiles (CLPP), characterization and microbial activity of soil amended with dairy sewage sludge. *Sensors*, 2012, 12(3): 3253-3268

- [18] 许毛毛. 秸秆与秸秆炭对土壤碳库及养分的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016
Xu M M, Effects of straw and biochar on soil organic carbon pool management index and soil nutrients (In Chinese). Haerbin: Northeast Agricultural University, 2016
- [19] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475
- [20] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 1049-1055
Wang Y F, Lui Y X, Lü H H, et al. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1049-1055
- [21] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1096-1103
- [22] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦土壤氮素表观盈亏及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 561-570
Li W, Qiao Y Q, Chen H, et al. Effects of combined maize straw and N application on soil nitrogen surplus amount and yield of winter wheat (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 561-570
- [23] Bingemann C W, Varner J E, Martin W P. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Science Society of American Proceedings*, 1953, 17: 34-38
- [24] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响. *土壤学报*, 2016, 53(2): 438-449
Zhao J H, Zhang C Z, Zhang J B. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 438-449
- [25] 李琦, 马莉, 赵跃, 等. 不同温度制备的棉花秸秆生物炭对棉花生长及氮肥利用率 (^{15}N) 的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 600-607
Li Q, Ma L, Zhao Y, et al. Growth and ^{15}N use efficiency in cotton affected by biochar made in different temperatures (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 600-607
- [26] 李晓峰, 程金秋, 梁健, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插粳稻产量及氮素吸收利用的影响. *作物学报*, 2017, 43(6): 912-924
Li X F, Cheng J Q, Liang J, et al. Effects of total straw returning and nitrogen application on grain yield and nitrogen absorption and utilization of machine transplanted *Japonica* rice (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 912-924
- [27] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 877-885
Zhang G, Wang D J, Yu Y C, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 877-885
- [28] Chan K Y, van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 2007, 45(8): 629-634
- [29] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略. *土壤学报*, 2014, 51(2): 216-225
Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 216-225
- [30] Schmidt M I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implication, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(13): 777-793
- [31] 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. *生态学报*, 2016, 36(18): 5838-5845
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 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5838-5845

- [32] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(4): 1169-1179
- [33] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730
- [34] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257
- [35] 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. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 401-408
Zhang J, Huang J S, Liu J, et al. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw and lignin and their biochars (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 401-408
- [36] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响. *土壤学报*, 2014, 51(1): 150-157
Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150-157
- [37] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响. *土壤学报*, 2016, 53(2): 292-304
Wang J, Cheng Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 292-304
- [38] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区. *土壤学报*, 2014, 51(5): 921-933
Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921-933

Effect of Application of Biochar and Straw on Fate of Fertilizer N in Cinnamon Soil

WU Ailian¹ WANG Jinsong¹ DONG Erwei¹ WANG Lige¹ GUO Jun¹ NAN Jiangkuan¹
HAN Xiong¹ Louis McDonald² JIAO Xiaoyan^{1†}

(¹ Institute of Agricultural Environment & Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

(² Division of Plant and Soil Sciences, West Virginia University, West Virginia 26506-6108, USA)

Abstract 【Objective】Nowadays, application of straw directly or after it is pyrolyzed into biochar is the main practice of straw resource utilization. Application of straw, high in C/N ratio, can enhance immobilization of mineral nutrients, thus reducing loss of nutrients. Strong nitrification in calcareous cinnamon soil always results in heavy loss of fertilizer nitrogen. However, how application of straw directly or after it is pyrolyzed into biochar affects transformation of nitrogen is still not clear. 【Method】To answer the question, a field experiment was carried out to explore effect of the application on transformation of fertilizer N in calcareous cinnamon soil and its possible mechanism. Sorghum uptake, residual in soil and losses of fertilizer N were studied using the ¹⁵N isotope technique. The experiment was designed to have three treatments: NPK (chemical fertilizer only), NPK+B (chemical fertilizer with straw biochar), and NPK+S (chemical fertilizer with straw). 【Result】Sorghum nitrogen absorption rate, soil N retention rate, and N loss rate in the experiment was determined to be 18.4%~24.9%, 22.7%~35.5% and 46.1%~52.4%, respectively. Compared with NPK, NPK+B

and NPK+S was 2.20 and 6.53 ($P<0.05$) percentage point respectively lower in sorghum nitrogen absorption rate and 3.40 and 6.28 ($P<0.05$) percentage point lower in N loss rate, but 5.58 ($P<0.05$) and 12.80 ($P<0.05$) percentage point higher in soil N retention rate. Besides, NPK+B and NPK+S was 23.5% ($P<0.05$) and 4.3% respectively higher than NPK in content of soil organic carbon, 2.8% and 19.4% higher in soil labile organic carbon, 25.0% and 13.4% higher in population of soil bacteria, and 29.4% and 161.1% higher in population of fungi. However, no significant differences were found between the treatments in population of actinomycetes. Moreover, NPK+S was 103.7% and 72.8% higher than NPK+B and NPK in AWCD (Average well color development) value after 96 hours of incubation. **【Conclusion】** In conclusion, application of straw or straw-derived biochar may reduce nitrogen absorption rate of sorghum, increase N retention rate, and lower N loss rate in the calcareous cinnamon soil. Application of straw significantly increases soil labile organic carbon, soil microbial population and metabolic activity, which in turn improves nitrogen transformation from nitrogen fertilizer to soil nutrient, and consequently reduces N loss rate. Straw returning or application of straw directly is an effective measure to improve availability of nitrogen fertilizer to the crop in the calcareous soil and promote reasonable utilization of the straw resources.

Key words Straw; Biochar; Nitrogen use efficiency; Nitrogen loss; Cinnamon soil

(责任编辑: 陈荣府)