

¹⁵N 示踪法研究生物炭施用对油菜氮素吸收和转运的影响

许堃, 党秀丽, 董旭, 丛源欣, 陈璐, 张兴, 吕金朔

(沈阳农业大学土地与环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

摘要: 以棕壤为供试土壤, 采用¹⁵N 示踪法研究水稻稻壳制成的生物炭在不同用量(0, 0.5%, 1%, 2%)下对连续种植两季油菜的土壤中氮含量、油菜产量、油菜地上及地下部分的吸氮量以及 N₂O 气体损失的影响, 并计算肥料氮的氮素利用率及其不同去向所占比例, 探明生物炭施用对油菜肥料氮吸收及转运的影响。结果表明: (1) 施加生物炭显著提高了第1季、第2季油菜的产量。(2) 0.5%生物炭用量与对照相比, 第1季油菜吸收土壤氮素的比例提高了2.0%; 0.5%, 1%, 2%生物炭用量使第2季油菜吸收土壤氮素的比例分别提高了0.8%, 2.4%, 3.2%。第1季、第2季油菜叶和根对氮素的吸收随生物炭施用量的增加而增加。(3) 与对照相比, 施加生物炭处理显著降低了两季油菜 N₂O 气体排放, 2%生物炭用量使第1季、第2季 N₂O 气体排放分别减少了0.30, 0.10 mg/kg。(4) 2%生物炭用量处理与对照相比, 第1季氮素利用率提高了16.3%; 两季氮素利用率的结果显示, 0.5%, 1%, 2%处理分别比对照提高了0.4%, 0.7%, 5.3%, 其中以2%生物炭施用量效果最佳。

关键词: 生物炭; 氮素利用率; 产量; 油菜

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0197-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.032

Effect of Biochar Application on Nitrogen Uptake and Transport in Rape by ¹⁵N Tracing Method

XU Kun, DANG Xiuli, DONG Xu, CONG Yuanxin, CHEN Lu, ZHANG Xing, LÜ Jinshuo

(Shenyang Agricultural University College of Land and Environment, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture, National

Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866)

Abstract: Using the brown soil as the tested soil, pot experiment was conducted to investigate the effects of biochar derived from rice husk on soil nitrogen content, rape yield, nitrogen contents of aboveground and underground of rape, and the loss of N₂O gas under two consecutive cropping seasons using ¹⁵N tracing method. Nitrogen utilization efficiency of nitrogen fertilizer and the proportion of different fate were calculated to study the effect of biochar addition on uptake and transport of nitrogen in rape. Biochar was applied at four rates (0, 0.5%, 1% and 2%) to the soil. The results showed that biochar application significantly increased the yield of rape in the first and the second cropping seasons. Compared with no biochar addition, the ratio of soil nitrogen uptake by rape was increased by 2% in the first season in the treatment of 0.5% biochar application, and it was increased by 0.8%, 2.4% and 3.2% in the second cropping season, in the treatments of 0.5%, 1% and 2% biochar application, respectively. The nitrogen contents of leaves and roots increased with the increasing of biochar application. Compared with no biochar addition, biochar application significantly decreased N₂O gas emission of rape in the two seasons, and the N₂O gas emission reduced amount was 0.30 and 0.10 mg/kg in the first season and the second season, respectively, in the treatment of 2% biochar application. Compared with no biochar addition, nitrogen utilization efficiency of rape increased by 16.3% in the treatment of 2% biochar application. The average nitrogen utilization efficiency of two seasons increased by 0.42%, 0.72% and 5.3% in the treatment of 0.5%, 1% and 2% biochar application, respectively. Thus, 2% biochar application should be considered as a suitable soil amendment.

Keywords: biochar; nitrogen utilization efficiency; yield; rape

收稿日期: 2018-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41301530); 国家重点研发计划项目(2017YFD0801103-3); 农业部东北耕地保育重点实验室开放基金项目; 受格平绿色行动—辽宁环境科研“123工程”项目

第一作者: 许堃(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事生物炭对土壤氮素吸收转化研究。E-mail: xukun0903@yahoo.com

通信作者: 党秀丽(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤改良与农业节水研究。E-mail: dangxiuli@163.com

氮作为生命体的核心元素,它的活性组分含量及其有效性与土壤肥力和生产力息息相关^[1]。全国平均一季蔬菜施氮量一般为 600~800 kg/hm² (以 N 计。下同),个别菜地的氮肥施用量高达 1 000 kg/hm²^[2],而氮肥利用率仅达到 8%~15%^[3],导致大量氮素残留在土壤中。左红娟^[4]研究表明,第 1 茬作物对肥料氮的当季利用率为 22.11%~32.37%,约为 3%~7%的肥料氮能够在第 2 茬被作物回收利用。因此,残留在土壤中的氮如何对后茬植物生长及氮肥利用效率产生影响,是近年来土壤学家密切关心的问题。

我国是粮食生产大国,农作物秸秆资源丰富,年产量达 17 多亿 t^[5]。秸秆是一种很好的生物质能源,富含氮、磷、钾、镁、钙和有机质等物质。近年来,有关于生物炭施用对氮素吸收转化、氮素利用影响的研究越来越多^[6]。生物炭是将植物生物质在厌氧条件下经 300~700 °C 热解产生的一类高度芳香化难溶物质^[7]。由于生物炭具有表面负电荷、大量的孔隙结构及巨大的比表面积^[8],对改善土壤理化性质、持留养分元素、增加作物对养分的吸收具有良好的效果^[9]。将生物炭作为土壤改良剂施加到土壤中,一方面可以改良土壤;另一方面也可以节约资源,保护环境,有利于实现农业可持续发展。

目前,关于生物炭的研究主要集中于大田作物产量以及对氮素的吸收利用,而施用生物炭对于连续多季种植作物的氮素吸收、分配及损耗的影响尚不多见。本研究利用¹⁵N 同位素示踪技术,研究生物炭施用对连续种植两季的油菜不同生育时期氮素吸收、转运及氮素后效的影响,为生产中提高氮素利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集于沈阳农业大学科研基地 0—20 cm 的表层土壤,土壤类型为棕壤,pH 6.98,速效氮、有效磷、有效钾和有机质含量分别为 76.95、26.34、59.94 mg/kg 和 15.31 g/kg。

试验所用生物炭以稻壳为原料,在缺氧条件下经 500 °C 高温裂解而成。生产的生物炭过 2 mm 筛后测定其理化性质,其中 pH 9.76,灰分含量 61.13%,含碳量 26.33%,含氮量 0.378%。

1.2 试验设计

试验于 2016 年 8 月 6 日至 10 月 29 日在沈阳农业大学后山试验基地温室大棚进行。采用聚乙烯盆进行盆栽试验,每盆装过 10 目筛的风干土 2 kg。生物炭施用量(质量比)设 4 个水平:不施炭 0(C₀)、低量炭 0.5%(C_{0.5})、中量炭 1%(C₁)、高量炭 2%(C₂)。每个处理重复 3 次,盆栽试验共种植两季。

试验用油菜品种为苏州青。基肥与生物炭混合均匀后在播种前一次性施入土壤中,其中磷肥为过磷酸钙,用量为 0.2 g(P₂O₅)/kg 土,钾肥为硫酸钾,用量为 0.3 g(K₂O)/kg 土,氮肥为稳定同位素¹⁵N 标记的硫酸铵(丰度 10.16%),每盆用量为 2.7 g(土壤含氮量为 0.3 g/kg)。设置等量磷肥、钾肥不施氮肥的处理作为对照。基肥施到土壤中稳定 1 周后进行播种,出苗后每盆定苗 5 株。在第 1 季油菜收获后继续播种,进行第 2 季种植,各处理均不再施肥,其他条件与第 1 季保持一致。利用称重法控制油菜生长过程中土壤含水量,使其保持在田间持水量的 60%。在每个生长季,根据油菜生育期分别在 2 叶期、4 叶期、6 叶期采集土壤和油菜样品。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤氮素含量测定 待不同生育期的油菜取样后,将盆栽土壤全部倒出混合均匀,每盆取土壤鲜样 50 g,于烘箱内 60 °C 烘干至恒重,土壤全氮量、¹⁵N 丰度等指标采用元素分析—同位素质谱仪(EA—IRMS)测定^[10]。计算公式为:

$$\text{土壤肥料氮残留量}(\text{mg/kg}) = \text{土壤干重}(\text{mg/kg}) \times \text{土壤 N}\% \times (\text{土壤}^{15}\text{N 丰度} - 0.3663) / (\text{肥料中}^{15}\text{N 丰度} - 0.3663)$$

$$^{15}\text{N 肥料残留率}(\%) = \text{土壤肥料氮残留量}(\text{mg/kg}) / \text{施氮量}(\text{mg}) \times 100\%$$

1.3.2 植株氮素含量测定 将不同生育期采集的植株样品进行叶片和根分离,于烘箱内 105 °C 杀青 30 min,60 °C 烘干至恒重,测定干物质重量。将烘干植株研磨过 60 目筛后用元素分析—同位素质谱仪(EA—IRMS)分别测定油菜根及地上部全氮、¹⁵N 丰度等指标^[11]。计算公式为:

$$\text{植株吸氮量}(\text{mg/kg}) = \text{生物量}(\text{mg/kg}) \times \text{植株 N 含量}(\%) / 100\%$$

$$\text{植株氮素来自肥料的比例}(\%) = (\text{植株}^{15}\text{N 丰度} - 0.3663) / (\text{肥料}^{15}\text{N 丰度} - 0.3663) \times 100\%$$

$$\text{植株吸收的肥料氮}(\text{mg/kg}) = \text{植株吸氮量}(\text{mg/kg}) \times \text{植株氮素来自肥料的比例}(\%)$$

$$\text{植株氮素来自土壤的比例}(\%) = 1 - \text{植株氮素来自肥料的比例}(\%)$$

$$\text{植株吸收的土壤氮} = \text{植株吸氮量} - \text{植株吸收的肥料氮}$$

$$\text{氮肥利用率}(\%) = \text{植株吸收的肥料氮} / \text{施氮量} \times 100\%$$

1.3.3 N₂O 气体测定 在油菜不同生育期将聚乙烯盆整体放入集气装置进行密闭采气。集气装置由 PVC 管制成(直径 25 cm×高 40 cm),顶部安有一个由三通阀控制的抽气孔,用于收集气体。装置密闭 6 h 后,每间隔 5 min 用注射器抽取 200 mL 气体注入

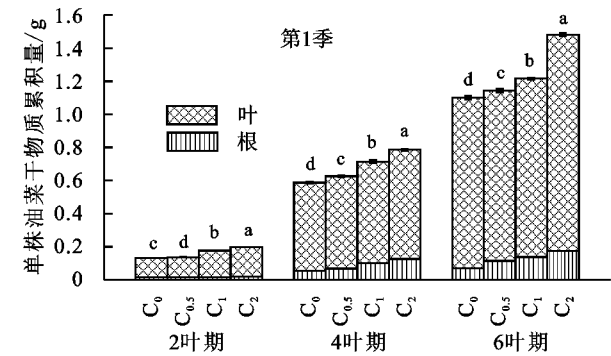
集气袋。收集的 N₂O 气体用稳定同位素比例质谱仪测¹⁵N 原子百分超,用元素分析仪测 N₂O 浓度^[12]。计算公式为:

$$\text{N}_2\text{O 通量}(\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})) = [273/(273 + T)] \times (28/22.4) \times H \times (\text{dc}/\text{dt})$$

式中: *T* 为集气罩内温度(℃);28 为每摩尔 N₂O 分子中 N 的质量数(g/mol);22.4 为温度在 273 K 时的 N₂O 摩尔体积(L/mol);*H* 为集气罩高度(m);*c* 为 N₂O 气体浓度(μL/L);*dc/dt* 为集气罩内 N₂O 气体浓度的变化率(μL/(L · h))。

$$^{15}\text{N}_2\text{O}-\text{N 量}(\text{mg}/\text{kg}) = \text{气体}^{15}\text{N 原子百分超} \times \text{气体总 N 量}(\text{mg}/\text{kg})$$

1.3.4 数据处理分析 试验数据采用 Origin 9.0 和



注:不同小写字母表示各处理间叶和根的干物质累积总量差异显著($P<0.05$)。

图 1 油菜干物质积累和分配

2.2 生物炭施用对油菜不同来源氮素累积的影响

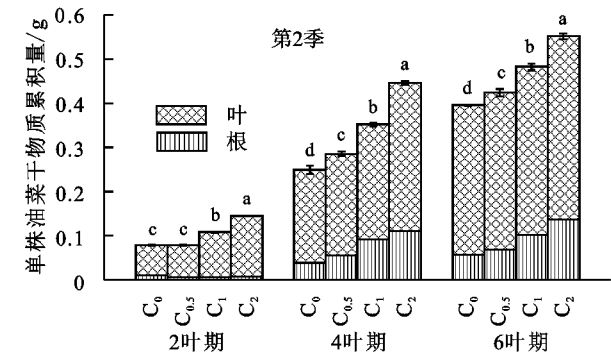
由表 1 可知,第 1 季油菜 4 叶期植株累积的氮素 65.2%~70.4%来自土壤氮,29.6%~34.8%来自肥料氮。与对照相比,施加生物炭处理显著增加了油菜体内氮素总累积量,同时也促进了油菜对土壤氮和肥料氮的吸收。6 叶期时,施加 2%,0.5%生物炭处理与对照相比油菜氮素总累积量显著提高,分别提高了 19.1%,8.7%,1%生物炭处理与对照相比差异不显著。第 2 季油菜 4 叶期植株累积的氮素 62.1%~67.4%来自土壤氮,33.6%~37.9%来自肥料氮,与对照相比,施加 0.5%、1%生物炭的处理油菜氮素总累积量、来自肥料氮的量、来自土壤氮的量差异不显著,而 2%生物炭施用量的处理促进了油菜氮素总累积量的增加,同时油菜吸收肥料氮与土壤氮的量也显著增加。6 叶期累积的氮素来自土壤氮的比例为 56.6%~59.8%,来自肥料氮的比例为 40.2%~43.4%。施用中、高量生物炭可以提高油菜氮素总累积量,1%,2%生物炭施用量的处理与对照相比,油菜氮素总累积量分别提高了 1.42,7.25 mg/kg,而施加 0.5%处理与对照相比差异不显著。施用高量炭可以显著提高油菜吸收肥料氮、土壤氮的比例,还可以促进油菜氮素总累积量的增加。总体来看,施加生物炭处理与对照相比,第 2 季油菜 4 叶期、6 叶期对肥料

Excel 软件作图,并用 SPSS 软件进行单因素统计分析,方差分析在 $\alpha=0.05$ 水平上进行。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对油菜生物量的影响

由图 1 可知,施加生物炭显著提高了油菜第 1 季和第 2 季的产量。随着生育时期的推移,油菜各器官的干物质量逐渐增加,4 叶期之后根部的干物质量变化不显著。在不同的生育期,油菜干物质量随生物炭施加量的增加显著增大,第 1 季、第 2 季 6 叶期时 C_{0.5}、C₁ 和 C₂ 处理的产量分别比 C₀ 提高了 3.6%,10%,34.5%和 7.6%,22.3%,39.9%。以上结果表明,生物炭施加量在 2%条件下油菜增产效果最明显。



氮吸收的比例大于第 1 季,说明施用生物炭可以提高第 2 季油菜对肥料氮的吸收利用。

表 1 两季油菜不同来源氮素的积累量及其比例

生育期	处理	氮素总累积量/ (mg · kg ⁻¹)	来自肥料氮		来自土壤氮	
			含量/ (mg · kg ⁻¹)	占比/ %	含量/ (mg · kg ⁻¹)	占比/ %
4 叶期	C ₀	60.13d	20.93d	34.8a	39.20d	65.2b
	C _{0.5}	83.58c	28.90c	34.6a	54.68c	65.4b
	C ₁	101.93b	31.28b	30.7b	70.63b	69.3a
	C ₂	112.78a	33.43a	29.6b	79.35a	70.4a
	C ₀	135.40c	47.08b	34.8b	88.33b	65.2b
6 叶期	C _{0.5}	147.13b	48.23b	32.8c	98.90a	67.2a
	C ₁	135.58c	47.13b	34.8b	88.45c	65.2b
	C ₂	161.30a	59.15a	36.7a	102.15a	63.3c
	C ₀	10.30b	3.90b	37.9a	6.40b	62.1c
	C _{0.5}	10.38b	3.53b	33.9c	6.85b	66.1a
4 叶期	C ₁	9.98b	3.65b	36.6b	6.33b	63.4b
	C ₂	22.00a	7.40a	33.6c	14.60a	66.4a
	C ₀	10.93c	4.75b	43.4a	6.20c	56.6b
	C _{0.5}	11.88bc	4.78b	40.2b	7.10b	59.8a
	C ₁	12.35b	5.05b	41.0b	7.28b	59.0a
6 叶期	C ₂	18.18a	7.75a	42.6a	10.43a	57.4b

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 生物炭施用对油菜不同器官氮素吸收与积累的影响

由表 2 可知,第 1 季、第 2 季油菜 6 叶期叶片的

吸氮量均大于根,植株总吸氮量以 2%生物炭用量效果最明显。与对照相比,第 1 季 2%,0.5%生物炭用量的处理植株吸氮总量分别提高了 19.1%,8.7%,而 1%生物炭用量的处理植株吸氮总量降低了 3.9%。前茬施加的氮肥对第 2 季油菜根、叶片及整株吸氮总量仍有显著影响,油菜整株吸氮总量随生物炭施用量的增加而增加。与对照相比,第 2 季施加 2%,1%和 0.5%生物炭的处理植株吸氮总量分别提高了 66.4%,13.1%,8.7%;高用量(2%)的生物炭促进了叶片对氮的吸收,而中低用量(1%,0.5%)的生物炭降低了叶片的吸氮量。随着生物炭施用量的增加,油菜根部吸氮量也显著增加。

表 2 生物炭施用对两季油菜不同器官吸氮量的影响

单位:mg/kg			
处理	叶	根	植株
C ₀	130.80c	4.60d	135.40c
C _{0.5}	139.85b	7.28c	147.13b
C ₁	122.20d	7.95b	130.15d
C ₂	152.43a	8.88a	161.30a
C ₀	8.68b	2.25d	10.93c
C _{0.5}	7.68c	4.20c	11.88bc
C ₁	7.33c	5.03b	12.35b
C ₂	11.95a	6.23a	18.18a

2.4 生物炭施用对肥料氮素去向的影响

盆栽试验中由于塑料盆底部被密封,灌溉水无法

淋洗出土体,因此施到土壤中的硫酸铵一部分被作物吸收进入植株体内,较大部分被土壤胶体吸附而残留在土壤中,少部分以 N₂O 气体、氨挥发等形式损失到大气中。由表 3、表 4 可知,与对照相比,在添加等量氮肥的条件下,施加生物炭的处理显著提高了土壤中氮的残留量,减少了 N₂O 气体的损失量,提高了肥料氮的回收率;同时,高用量生物炭(2%)促进了油菜对肥料氮的吸收,而中低用量的生物炭(C₁、C_{0.5})对油菜吸收肥料氮影响不显著,说明高炭量有利于作物对肥料氮的吸收,也有利于土壤对肥料氮的固定。而土壤残留的肥料氮显著高于作物吸收的肥料氮,说明施加到土壤中的肥料氮大部分残留在土壤中,小部分被作物吸收。C₂ 处理第 1 季和第 2 季的肥料氮回收率最高(90.4%,74.4%),C₀ 处理第 1 季和第 2 季肥料氮回收率最低(81.9%,67.3%)。

2.5 生物炭施用对油菜氮素利用率的影响

由表 5 可知,2%生物炭施用量显著提高油菜对肥料氮的吸收,与对照相比氮肥利用率提高了 4.7%,而 1%,0.5%处理与对照相比氮肥利用率差异不显著。由表 6 可知,不同处理两季油菜氮肥利用率均高于第 1 季油菜氮肥利用率。2%生物炭用量的处理显著提高了两季氮肥利用率提高,与未施用生物炭的处理相比氮肥利用率提高了 5.3%,而 1%,0.5%用量的生物炭处理与对照差异不显著。

表 3 生物炭施用对第 1 季油菜¹⁵N 肥料去向的影响

处理	回收氮量/(mg·kg ⁻¹)			回收率 ¹ / %	损失氮量/(mg·kg ⁻¹)			损失率 ² / %
	作物吸收	土壤残留	合计		¹⁵ N ₂ O-N 损失	其他	合计	
C ₀	47.08b	195.80c	242.85d	84.8d	0.60a	42.86a	43.46a	15.2a
C _{0.5}	48.23b	197.86b	246.08c	85.9c	0.42b	39.98b	40.40b	14.1b
C ₁	48.82b	200.12a	248.93b	86.8b	0.37c	37.46c	37.82c	13.2c
C ₂	59.15a	199.92a	259.07a	90.4a	0.31d	27.20d	27.51d	9.6d

注:回收率¹(%)=(作物残留+土壤残留)/总施氮量×100%;损失率²(%)=1-回收率¹(%)。

表 4 生物炭施用对第 2 季油菜¹⁵N 肥料去向的影响

处理	回收氮量/(mg·kg ⁻¹)			回收率 ³ / %	损失氮量/(mg·kg ⁻¹)			损失率 ⁴ / %
	作物吸收	土壤残留	合计		¹⁵ N ₂ O-N 损失	其他	合计	
C ₀	4.62b	141.14c	145.75c	74.4c	0.28a	49.78a	50.06a	25.6a
C _{0.5}	4.77b	143.81b	148.58b	75.1bc	0.23b	49.05a	49.28a	24.9ab
C ₁	5.06b	124.81a	152.37a	76.1ab	0.21c	47.55ab	47.75ab	23.9bc
C ₂	7.75a	146.25a	153.99a	77.0a	0.18d	45.75b	45.93b	23.0c

注:回收率³(%)=(作物残留+土壤残留)/第 1 季土壤氮素残留×100%;损失率⁴(%)=1-回收率³(%)。

表 5 生物炭对第 1 季油菜氮肥利用率的影响

处理	吸收 ¹⁵ N 量/(mg·kg ⁻¹)	氮肥利用率/%
C ₀	47.08b	16.18c
C _{0.5}	48.23b	16.74b
C ₁	48.82b	16.67b
C ₂	59.15a	20.86a

表 6 生物炭对两季油菜氮肥利用率的影响

处理	吸收 ¹⁵ N 量/(mg·kg ⁻¹)	氮肥利用率/%
C ₀	51.69b	18.05b
C _{0.5}	53.00b	18.47b
C ₁	53.87b	18.77b
C ₂	66.89a	23.35a

3 讨论

目前生物炭在农业生产中已经得到广泛的应用。本研究表明,施用生物炭可以显著提高第1季和第2季的油菜产量,这与多数研究认为生物炭能够促进作物生长和产量的结果一致。王震宇等^[13]通过盆栽试验得出,单独施加生物炭对油菜产量无显著影响,但是将生物炭与氮肥配施可以使油菜生物量增加106%~140%。Asai等^[14]研究表明,生物炭与氮肥配施,水稻产量随其用量的增多而增加,生物炭对产量的影响主要是通过影响土壤理化性质来改善作物生长发育的情况进而提高作物产量,与氮肥施用量及土壤本身的含氮量水平也密切相关。

本研究表明,第1季、第2季油菜吸收的氮素更多的来自于土壤氮,少部分氮素吸收来自于肥料氮。从两季油菜不同生育期来看,施加高量的生物炭(2%)促进了植株氮素总积累量的增加,同时植株吸收的肥料氮与土壤氮的量也显著增加,而中低用量的生物炭促进植株吸氮量增加的效果不明显,尤其在第2季时作用效果更不显著。大量研究^[4]表明,作物吸收的氮素主要来自于土壤,且作物不同器官氮素来自肥料氮的比例也有差异。高娜^[15]通过¹⁵N同位素示踪法研究得出,油菜约18.51%~32.57%的氮来自肥料,其余则来自土壤。施加高量炭处理与对照相比,作物吸收土壤氮的比例增加最显著,这可能是由于施用生物炭可以促进土壤硝化作用,可以增加土壤中易被作物吸收利用的矿质氮。

硫酸铵施加到土壤中,在好氧条件下发生硝化反应,水解成 NH_4^+ —N,而生物炭本身含有丰富的有机大分子和丰富的孔隙,施加到土壤中容易形成团聚体,通过提高阳离子交换量增加其对 NH_4^+ 的吸附,并且可以在作物生长的过程中不断释放出来,供给作物吸收利用,从而提高作物的吸氮量。俞映惊等^[16]通过连续种植5季小白菜的盆栽试验研究发现,第1季施加生物炭处理比对照处理的小白菜氮累积量高16%以上,生物炭的施加使小白菜氮积累水平连续5年保持在一个稳定的水平,这可能是由于施用生物炭改变了土壤的C/N,导致土壤中的N向微生物生物量氮或者有机态氮等缓效态转化,影响了作物对氮的吸收^[17]。

本研究结果表明,施加生物炭显著降低了气态氮的损失。Kathuria等^[18]研究表明,生物炭的多孔性改善了土壤的通气状况,抑制了厌氧条件下氮素微生物的反硝化作用,从而减少了氮氧化物的形成和排放。本研究中,合计损失氮量为总施氮量与合计回收氮量的差值,其他损失氮量为合计损失氮量与 N_2O 损失量的差值,这个差值代表的是氨挥发的损失量。本研究表明(表3和

表4),在盆栽系统中氮素以 N_2O 气体的形式损失的比例较小,而以氨挥发损失的比例较大,随生物炭用量的增加, N_2O 和氨挥发的损失量显著降低。

肥料后效的问题前人已有不少研究,后茬作物对残留的¹⁵N肥料的利用率一般比较低,在6%~13%^[19]。本试验中¹⁵N标记肥料两季油菜的综合回收利用率为74.4%~77.0%,略低于第1季的84.8%~90.4%,这是因为第2季油菜种植时没有向土壤中补施氮肥,而上述研究中后茬作物增施了未标记的氮肥,使标记的氮肥得到稀释,因此综合回收利用率降低。

许多研究^[8,20]表明,施加生物炭可以促进氮素利用率,俞映惊等^[8]对连续种植5季小白菜的研究发现,施用生物炭对肥料利用率提升效果显著,连续种植5季的综合利用率为33.9%,是未施加生物炭处理的6.4倍。Lehmann等^[20]研究表明,生物炭的比表面积巨大且表面的官能团数量多,可以提高土壤的阳离子交换量,吸附更多的养分离子,促进作物的吸收及土壤对氮素的吸附,从而增加土壤肥力以及作物的氮素利用率,达到农业生产的增产、资源循环利用和环境污染控制的多重效果。

4 结论

(1)随生物炭用量的增加第1季、第2季油菜产量显著增加,2%生物炭处理的增产率分别为34.5%和39.9%,但未施加氮肥的第2季油菜产量显著低于第1季油菜产量。

(2)油菜对氮素的吸收和积累随生物炭用量的增加而增加,施加生物炭促进了油菜对肥料氮的吸收,且第1季土壤中残留的肥料氮会更好的被第2季油菜吸收利用。

(3)施加生物炭减少了第1季和第2季油菜 N_2O 气体的排放,减少了两季肥料氮的损失,第1季肥料利用率提高了0.49%~4.68%;0.5%和1%用量的生物炭对第2季氮肥利用率无显著影响,2%生物炭用量使第2季氮肥利用率提高了5.3%,提高氮肥后效效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨馨逸,刘小虎,韩晓日.施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2561-2571.
- [2] 王朝辉,宗志强,李生秀.菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异[J].应用生态学报,2002,13(9):1091-1094.
- [3] 赵秉强,杨相东,李燕婷,等.我国新型肥料发展若干问题的探讨[J].磷肥与复肥,2012,27(3):1-4.
- [4] 左红娟.基于高丰度¹⁵N的氮肥去向及利用研究[D].北京:中国科学院大学,2012.

- [6] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,等. 六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J]. 生态学报,2017,37(10):3471-3481.
- [7] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(1): 40-57.
- [8] Pérez-Suárez M, Arredondo-Moreno J T, Huber-Sannwald E, et al. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico [J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 532-543.
- [9] Teale N G, Mahan H, Bleakney S, et al. Impacts of vegetation and precipitation on throughfall heterogeneity in a tropical pre-montane transitional cloud forest [J]. *Biotropica*, 2015, 46(6): 667-676.
- [10] 次仁曲西,毕华兴,潘迪,等. 晋西黄土区单株油松树下穿透雨空间分布特征研究[J]. 水土保持通报,2013,33(5):161-164.
- [11] 李振新,郑华,欧阳志云,等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报,2004,24(5):1015-1021.
- [12] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性[J]. 生态学报,2006, 26(9):2877-2886.
- [13] 高国龙,杜华强,韩凝,等. 基于特征优选的面向对象毛竹林分布信息提取[J]. 林业科学, 2016, 52(9):77-85.
- [14] 朱霖. 中国竹产业发展现状[C]//中国竹藤资源利用学术研讨会. 安徽 霍山:中国林学会竹藤资源利用分会,2013.
- [15] 万艳芳,刘贤德,王顺利,等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素[J]. 水土保持学报,2016, 30(5):224-229.
- [16] Zimmermann A, Wilcke W, Elsenbeer H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 343(1/2): 80-96.
- [17] 曹云,黄志刚,郑华,等. 柑桔园林下穿透雨的分布特征[J]. 水科学进展,2007,18(6):853-857.
- [18] Brandt C J. Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1990, 15(8): 687-698.
- [19] Ford E D, Deans J D. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1978, 15(3): 905-917.
- [20] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 406-416.
- (上接第201页)
- [5] 郑勇. 我国苹果汁价格波动及其风险控制研究:兼论推出浓缩苹果汁期货[J]. 价格理论与实践,2010(5):61-62.
- [6] 潘逸凡,杨敏,董达,等. 生物炭对土壤氮素循环的影响极其机理研究进展[J]. 应用生态学报,2013, 24(9): 2666-2673.
- [7] 王风. 稻壳生物炭对重金属镉的吸附特性及对镉污染土壤的修复效应[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [8] 曲晶晶,郑金伟,郑聚锋,等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(3):288-293.
- [9] Van Z L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agromic performance and soil fertility [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [10] 高娜,张玉龙,曲晶,等. 水氮联合调控对小油菜生长、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(4): 84-89.
- [11] 徐彩龙,王振林,尹桦萍,等. ¹⁵N 示踪法研究弱光对不同穗型冬小麦氮素积累的转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(1):1-10.
- [12] 张仲新,李玉娥,华路,等. 不同施肥量对设施菜地 N₂O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(5):269-275.
- [13] 王震宇,宋晓娜,陈蕾,等. 生物炭对宁夏夏质土壤中油菜生长及氮素利用的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2015,45(12):94-101.
- [14] Asai H, Samson B, Stephan H, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [15] 高娜. 水氮调控对白菜型油菜氮素吸收利用的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [16] 俞映惊,薛利红,杨林章,等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报,2015,52(4): 759-767.
- [17] 徐秋桐,邱志腾,章明奎. 生物质炭对不同 pH 土壤中碳氮磷的转化与形态的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2014,58(3):303-313.
- [18] Kathuria A, Hatton B, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [19] Kenza I, Mohammed I, Jamal I. The use of ¹³C and ¹⁵N based isotopic techniques for assessing soil C and N changes under conservation agriculture [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 64: 1-7.
- [20] Lehmann J, Silva J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal mendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.