

生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响

张万杰¹, 李志芳¹, 张庆忠^{2*}, 杜章留², 马铭烨¹, 王一丁²

(1.中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:施用生物质炭是提高作物产量和氮肥利用效率的潜在有效措施。以菠菜为供试作物开展盆栽试验,研究了生物质炭与氮肥配施对菠菜产量、组织中硝酸盐含量及养分(氮磷钾)含量的影响。生物质炭设3个水平:C0(0 g·kg⁻¹)、C5(5 g·kg⁻¹)和C10(10 g·kg⁻¹),氮素3个水平分别为N0(0 mg·kg⁻¹)、N1(90 mg·kg⁻¹)和N2(120 mg·kg⁻¹)。试验结果表明,在N0和N1水平下,施用生物质炭显著提高了菠菜产量,增幅为16.6%~57.3%,而在N2水平下,生物质炭对菠菜产量无显著影响($P>0.05$)。同时,在N1水平下,与C0处理相比,C5和C10处理菠菜组织中硝酸盐含量分别增加了198.7%和233.4%;而在N2水平下,C5和C10处理的硝酸盐增幅分别为8.8%和46.3%。在不同氮素水平下,生物质炭的施用增加了菠菜对氮和钾的吸收,而对磷素吸收的影响不明显。总之,生物质炭与氮肥配施可以提高菠菜产量,明显增加氮肥当季利用效率。

关键词:生物质炭;菠菜;产量;菠菜组织中硝酸盐

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-1946-07

Impacts of Biochar and Nitrogen Fertilizer on Spinach Yield and Tissue Nitrate Content from a Pot Experiment

ZHANG Wan-jie¹, LI Zhi-fang¹, ZHANG Qing-zhong^{2*}, DU Zhang-liu², MA Ming-ye¹, WANG Yi-ding²

(1.College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Biochar as a soil amendment is being considered as a potential way to improve soil quality and nitrogen use efficiency. Biochar of this study was pyrolyzed by crop stalks(at 240~360 °C). Using a pot trial, we investigated the impacts of biochar and mineral fertilizer on spinach (*Spinacia oleracea* L.) yield, tissue nitrate and nutrients(N, P and K) uptake by spinach. Biochar had three levels: C0(0 g·kg⁻¹), C5(5 g·kg⁻¹) and C10(10 g·kg⁻¹), and nitrogen fertilizer also included three levels: N0(0 mg·kg⁻¹), N1(90 mg·kg⁻¹) and N2(120 mg·kg⁻¹). The two factor(biochar and nitrogen fertilizer) were compined freely. Results showed that for the N0 and N1 levels, application of biochar significantly increased spinach yield by ranging from 16.6% to 57.3%, whereas no significant change($P>0.05$) in yields were observed among biochar treatment in the N2 level condition. Meanwhile, for the N1 level, the C5 and C10 treatments increased tissue nitrate content by 198.7% and 233.4% respectively, as compared to the C0 treatment; on the other hand, when the N2 level was considered, the improvement in nitrate content under C5 and C10 treatments was by 8.8% and 46.3% respectively, relative to control. Irrespective of nitrogen fertilizer treatments, biochar-amended soils improved nitrogen and potassium uptake by spinach, while the effect on phosphorus uptake was not obvious. In conclusion, the interaction of biochar and nitrogen fertilizer could increase the yield of spinach and N use efficiency.

Keywords: biochar; spinach; yield; tissue nitrate of spinach

科学界普遍认为,人类活动加剧造成的大气CO₂等温室气体浓度上升,破坏了全球碳平衡,导致全球

变暖趋势日益严重^[1]。农田土壤碳截留与温室气体减排的潜力被视为保障粮食安全与缓解气候变化趋势的双赢战略^[2-3]。近年来,由于生物质炭具有高度稳定性和较强的吸附性能被视为增加土壤碳截留、改善土壤质量和提高氮肥利用效率的潜在有效措施^[4-7]。众多研究表明,施用生物质炭可以改善土壤物理特性如降低容重,增加持水性能和提高土壤团聚性

收稿日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40701090)

作者简介:张万杰(1984—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事有机蔬菜栽培研究。E-mail:konggu111@sina.com

* 通讯作者:张庆忠 E-mail:ecologyouth@163.com

等^[8-10]。此外,生物质炭还能提高土壤中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、磷以及其他养分的吸附性能,增加阳离子交换能力和养分循环^[11-13]。Glaser 等综述了在热带地区施用生物质炭对高度风化土壤理化特性的影响,施用生物质炭提高了养分有效性和土壤保持能力,这与阳离子交换量的增加密切相关^[14]。最近也有系列研究表明^[7,15-16],施用生物质炭对减少养分淋洗,提高养分利用效率和降低温室气体排放也具有积极影响。

施用生物质炭有助于土壤理化特性的改善,从而对提高作物产量具有积极作用^[10,14]。据 Steiner 等报道,在巴西亚马逊氧化土上施用生物质炭 1 年后 ($11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),在两年 4 个生长季中大米和高粱的产量提高了 75%^[16]。在肯尼亚的土壤退化地区, Kimetu 等发现,在两年中 3 次连续施用生物质炭 ($7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 使得玉米的产量增加一倍^[7]。然而, Asai 等基于老挝的旱地水稻土研究发现,施用生物质炭尽管能提高土壤饱和导水率,但对作物产量影响还与土壤本底肥力和肥料管理密切相关^[8]。生物质炭与矿质肥配施作物增产效果会更加明显^[14,19]。Verheijen 等利用元分析法系统分析了在盆栽和田间条件下共 86 个处理施用生物质炭对作物生产力的影响,发现施用生物质炭的增产效果与施用量、土壤类型和矿质肥管理等诸多因素有关,具有较大的不确定性^[20]。

近年来,我国一些学者已经关注生物质炭在增产方面的作用,并在大田作物增产方面做了一些研究^[21]。但有关生物质炭与氮肥配施对作物的增产效应,以及养分元素在植物组织中的含量还未见报道。由于蔬菜极易富集硝酸盐,人体摄入的大部分硝酸盐都来自蔬菜^[22],施用生物质炭是否能提高蔬菜的产量,同时是否有导致蔬菜中硝酸盐含量超标的风险值得关注。本研究基于盆栽试验选择菠菜作为供试作物,研究生物质炭与氮肥配施对菠菜产量和菠菜组织中硝酸盐含量的影响,为生物质炭在蔬菜生产中的应用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在中国农业大学温室中进行,温度变化范

围是 $15 \sim 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 试验用菠菜品种是荷兰菠菜 (*Spinacia oleracea* L.)。所用生物质炭由农作物的秸秆经缺氧条件燃烧生成 (温度为 $240 \sim 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 将其粉碎后过 2 mm 筛。盆栽所用土壤取自中国农业大学上庄试验站的表层土 ($0 \sim 15 \text{ cm}$), 质地为壤土, 过 2 mm 筛, 将土壤中可见的作物残留物去掉。土壤和生物质炭的理化性状见表 1。

1.2 试验设计

设生物质炭和氮肥两个因素, 其中生物质炭 3 个水平分别为 C0 ($0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不施用生物质炭)、 C5 ($5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 C10 ($10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 氮肥 (纯氮) 处理的 3 个水平分别为 N0 ($0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 N1 ($90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 N2 ($120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 所用氮肥为尿素。自由组合后共 9 个处理, 每处理 6 次重复, 随机摆放。

播种前将土壤与炭粉充分混匀, 将其装在塑料袋中, 后将塑料袋放入盆中 (盆尺寸为 $28 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$), 播种前先浇透底水, 每盆播种 15 株, 待长出两片真叶后间苗, 每盆留 5 株。所施氮肥用量由预试验结果得出 (数据未列出), 在预试验中有 0 、 30 、 60 、 90 、 120 、 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 6 个氮肥水平, 待菠菜生长 30 d 后用 SPAD 测定叶绿素含量, 在氮肥处理为 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时叶片中叶绿素含量最高, 即为菠菜生长最适宜的氮素含量。最终确定氮肥的处理为 0 、 90 、 $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, N1 和 N2 处理底肥施用量为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 氮肥, 待其出苗 25 d 后再分别追肥至试验设定量。每天浇水量是保持盆中土壤的含水量为 20%, 每次均称重浇水, 所用水为去离子水。每次浇水后按一定顺序改变盆的位置, 确保每盆作物都能得到均匀的光照。

1.3 分析方法

菠菜产量测定: 菠菜出苗 50 d 后收获, 收获时将菠菜紧贴土壤表层剪下, 将收获后的菠菜地上部分用水洗净, 然后用蒸馏水冲洗一遍, 用干净纱布吸干水分后称重。

菠菜地上部和地下部生物量测定: 将地上部和地下部的根系部分用水洗净, 然后置于 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干到恒重, 然后称重。

菠菜组织中硝酸盐含量分析: 取一定量的植物

表 1 土壤和生物质炭的理化性状

Table 1 Basic chemical and physical properties of biochar and soil used in the pot experiment

项目	pH (H_2O)	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
生物质炭	7.78	847	52.09	4.88	0.83	15.98	0.38	4.6	162.0	9 600.0	0.297
土壤	8.05	100	4.04	0.97	0.69	5.54	29.90	33.2	19.4	112.5	—

材料剪碎,准确称取 2 g 放到试管中,加入 10 mL 蒸馏水,在沸水中煮 30 min,后用水杨酸比色法测定其硝酸盐含量。

菠菜组织全氮磷钾含量:将烘干植物样粉碎,过 1 mm 筛,称取 0.2 g 粉碎的组织样加入到消煮管中,用硫酸和双氧水消煮。植物样中全氮含量测定用凯式定氮法,全磷含量测定用钼锑抗比色法,全钾含量测定采用火焰光度计法^[23]。

土壤速效氮含量在菠菜收获后测定:土壤中速效氮的提取用鲜土,用 Olsen 法提取(土液比为 24:200),后用流动分析仪进行测定。

1.4 数据分析

所有数据进行双因素方差分析,多重比较采用邓肯新复极差法(SSR),在无特殊说明的情况下,显著性检验在 $P=0.05$ 概率水平下进行。在本文中生物质炭、氮肥及其生物质炭与氮肥的交互作用是研究的主效应,分析他们对菠菜产量、硝酸盐含量、土壤速效氮及植物组织全氮磷钾含量的影响。

2 结果与分析

2.1 生物质炭和化肥配施对菠菜产量和生物量的影响

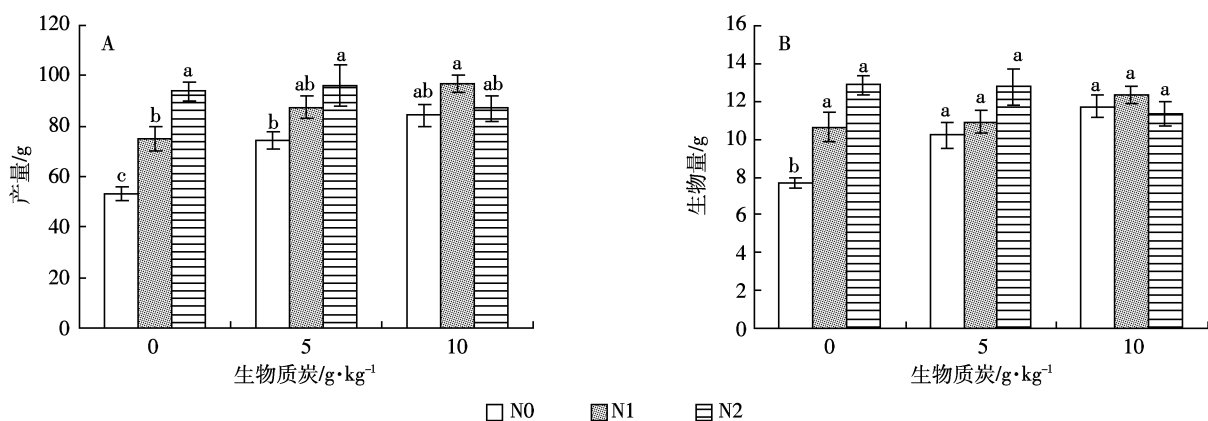
如图 1A 所示,在不施氮肥的情况下(N0),施用生物质炭显著($P<0.05$)增加了菠菜产量,其中 C0、C5、C10 处理每盆的产量分别为 53.53、74.27 g 和 84.21 g,与 C0 相比,C5 和 C10 处理的菠菜产量增幅分别为 27.9%和 57.3%。C10 与 C5 相比,菠菜产量有增加的趋势,但差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,C0、C5、C10 处理每盆的产量分别为 74.99、87.41 g 和

96.73 g。与 C0 相比较,C5 和 C10 处理菠菜产量的提高幅度分别为 16.6%和 29.0%。C10 与 C0 处理之间差异显著($P<0.05$),而 C5 和 C0 之间以及 C5 和 C10 之间差异不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,C5 处理的产量比 C0 提高了 2.5%,而 C10 处理与 C0 相比产量有所下降,但 C0、C5 和 C10 处理之间差异均不显著($P>0.05$)。

如图 1B 所示,在 N0 水平下,C0、C5 和 C10 处理每盆的生物量分别为 7.70、10.21 g 和 11.74 g。与 C0 相比,C5 和 C10 处理均显著($P<0.05$)提高了菠菜的生物量,提高幅度分别为 32.6%和 52.5%,但 C5 和 C10 处理之间的差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,C0、C5 和 C10 处理的生物量分别为 10.64、10.91 g 和 12.33 g。与 C0 相比较,C5 和 C10 处理虽然提高了菠菜的产量,但处理之间差异不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,C0、C5 和 C10 处理的生物量分别为 12.85、12.77 g 和 11.36 g,表明随施用生物质炭量的增加,菠菜的生物量有所下降,但处理之间差异不显著($P>0.05$)。

2.2 生物质炭和化肥配施对土壤速效氮含量的影响

各处理土壤速效氮含量见表 2。在 N0 水平下,C5 和 C10 处理的速效氮含量与 C0 处理相比分别提高了 30.9%和 15.0%,但各处理间差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理提高了土壤速效氮含量,提高幅度分别为 60.5%和 142.9%,其中,C10 与 C0 差异显著($P<0.05$),而 C5 与 C0 差异不显著($P>0.05$);C10 与 C5 相比,速效氮含量虽有增加趋势,但差异并不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,C5 和



处理间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),竖线为平均值的标准误差($n=6$)

Values followed by a different lowercase letter among treatments are significantly different ($P<0.05$). Bars are standard error ($n=6$)

图 1 施用生物质炭对菠菜产量和生物量的影响

Figure 1 Impacts of biochar and fertilizer treatments on yield and biomass of spinach

C10 处理中土壤速效氮含量相对于 C0 处理分别提高了 30.6%和 146.5%, 其中,C10 处理显著高于 C0 和 C5 处理($P<0.05$),而 C5 与 C0 之间无显著差异($P>0.05$)。从表 2 可以看出,生物质炭和氮肥处理均对土壤速效氮含量有极显著影响($P<0.001$),但两者之间的交互作用对土壤速效氮的影响差异不显著($P>0.05$)。

2.3 生物质炭和化肥配施对菠菜组织中硝酸盐含量及氮磷钾含量的影响

菠菜组织硝酸盐含量见表 2。在 N0 水平下,与 C0 相比,C10 处理提高了菠菜中硝酸盐含量,增幅为 9.3%,C5 处理降低了菠菜中硝酸盐含量,然而 C0、C5 和 C10 处理间的差异不显著 ($P>0.05$)。在 N1 情况下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理均显著($P<0.05$)提高了菠菜组织硝酸盐含量,提高幅度分别为 198.7%和 233.4%。随着施用生物质炭量增加,硝酸盐含量虽有所上升,但 C5 和 C10 处理之间的差异并不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理的硝酸盐含量分别提高了 8.8%和 46.3%,但处理之间的差异并不显著($P>0.05$)。总体而言,生物质炭和氮肥处理以及两者之间的交互作用均对菠菜硝酸盐含量有极显著影响($P<0.01$)。

在 N0 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理显著提高了菠菜组织中全氮浓度,提高幅度分别为 16.5%和 27.5%(表 2)。和 C5 处理相比,虽然 C10 处理中氮浓度有所增加但两者之间差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理提高了全氮浓度,提高的幅度分别为 8.5%和 8.6%,但各处理之间的差异并不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理的全氮浓度分别提高了 6.3%和 0.03%,同样差异不显著($P>0.05$)。生物质炭和氮肥处理及两者之间的交互作用均对菠菜组织全氮浓度有极显著

影响($P<0.01$)。

菠菜组织全磷浓度随着施用生物质炭量增加而减少(表 2)。在 N0 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理显著($P<0.05$)降低了全磷浓度,降低幅度分别为 13.6%和 25.6%,而且 C5 和 C10 之间差异也显著。在 N1 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理降低了全磷浓度,降低幅度分别为 3.2%和 10.9%,但处理间的差异不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理的全磷浓度分别降低了 12.6%和 12.9%,同样差异不显著($P>0.05$)。总体而言,生物质炭和氮肥处理均对菠菜组织全磷浓度有极显著影响($P<0.001$),两者之间的交互作用对全磷浓度的影响有显著差异($P<0.05$)。

随着施用生物质炭量增加,菠菜组织全钾浓度有上升趋势(表 2)。在 N0 水平下,C5 和 C10 处理中全钾浓度相对于 C0 处理分别提高了 18.4%和 13.8%,但差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理显著提高了全钾浓度,提高幅度分别为 35.5%和 69.8%;随着施炭量增加,全钾浓度呈增加趋势,C5 和 C10 与 C0 相比差异显著($P<0.05$),但 C5 和 C10 之间差异不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理提高了菠菜组织全钾浓度,提高幅度分别为 0.13%和 37.7%,其中,C10 与 C0 之间差异达显著水平($P<0.05$),而 C5 与 C0 之间差异不显著($P>0.05$)。生物质炭和氮肥处理均对全钾浓度有极显著影响($P<0.001$),两者之间的交互作用对全钾浓度的影响为极显著水平($P<0.01$)。

2.4 生物质炭和化肥配施对菠菜氮磷钾吸收量的影响

在 N0 水平下,生物质炭的施用显著提高了菠菜氮的吸收量,C5 和 C10 处理相对于 C0 处理分别提高了 52.3%和 93.4%(表 3),而且 C0、C5 和 C10 处理间

表 2 生物质炭和化肥配施处理下土壤速效氮浓度和菠菜硝酸盐含量及氮磷钾浓度

Table 2 Soil available N content, nitrate and nutrient (N, P and K) contents of spinach tissue under biochar and nitrogen fertilizer treatments

Biochar	N0			N1			N2			Significance level		
	C0	C5	C10	C0	C5	C10	C0	C5	C10	Biochar	N	Biochar×N
土壤速效氮/mg·kg ⁻¹	6.22c	8.14c	7.32c	9.46c	15.18bc	22.98ab	11.36bc	14.84bc	28.00a	***	***	n.s.
菠菜硝酸盐/mg·kg ⁻¹	75.20c	66.62c	82.18c	97.25bc	290.51a	324.19a	213.01ab	231.81a	311.59a	***	***	**
菠菜全氮/mg·g ⁻¹	24.07d	28.04c	30.68c	35.91b	38.98ab	38.99ab	38.81ab	41.27a	38.82ab	***	***	*
菠菜全磷/mg·g ⁻¹	4.72a	4.08b	3.51c	3.48c	3.37c	3.10c	3.42c	2.99c	2.98c	***	***	*
菠菜全钾/mg·g ⁻¹	27.92ab	33.07a	31.77a	19.39c	26.28ab	32.92a	22.69bc	22.72bc	31.24a	***	***	**

注:同一行中不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);*** $P<0.001$,** $P<0.01$,* $P<0.05$;n.s.无差异($P>0.05$)。下同。

Note: Values followed by the lowercase letter among treatments are not significantly different ($P<0.05$). *** $P<0.001$, ** $P<0.01$, * $P<0.05$, n.s. not significant ($P>0.05$). The same below.

表 3 不同处理菠菜氮磷钾的吸收量

Table 3 Uptake of nutrigen by spinach in different treatments

Biochar	N0			N1			N2			Significance level		
	C0	C5	C10	C0	C5	C10	C0	C5	C10	Biochar	N	Biochar×N
N/mg·pot ⁻¹	185.94f	283.13e	359.59d	380.54cd	427.45bcd	480.48ab	499.11ab	526.93a	438.69bc	***	***	***
P/mg·pot ⁻¹	36.11ab	41.46ab	41.08ab	37.21ab	37.24ab	38.06ab	43.95a	38.33ab	33.96b	*	*	**
K/mg·pot ⁻¹	212.79c	332.38ab	375.21a	209.12c	286.23b	401.54a	291.40b	294.79b	354.96ab	***	n.s.	*

差异均显著($P<0.05$)。在 N1 时,与 C0 相比,C5 和 C10 处理提高了菠菜对氮的吸收量,提高幅度分别为 12.3%和 26.3%,其中 C10 和 C0 处理间差异显著,而 C5 和 C0 处理间差异不显著($P>0.05$)。在 N2 时,与 C0 相比,C5 处理提高了氮的吸收量,提高的幅度为 5.6%,C10 处理虽然降低了氮的吸收量(降低的幅度为 12.1%),但是 C0 和 C10 处理间差异不显著($P>0.05$)。生物质炭和氮肥处理及两者之间的交互作用均对菠菜氮的吸收量有极显著影响($P<0.001$)。

以 N0C0 为空白对照,可以计算各施氮处理的当季氮肥利用率。在 N1 水平下,N1C0、N1C5 和 N1C10 处理的氮肥利用率分别为 51.5%、63.9%和 77.9%,在 N2 水平下,N2C0、N2C5 和 N2C10 处理的氮肥利用率分别为 62.1%、67.7%和 50.1%。

在 N0 水平下,C5 和 C10 处理中磷吸收量与 C0 处理相比分别提高了 14.8%和 13.8%(表 3),生物质炭虽然提高了磷的吸收量,但是各处理之间差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,C0、C5 和 C10 处理的磷吸收量随着施炭量增加呈增加趋势,但差异不显著($P>0.05$)。在 N2 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理降低了菠菜磷吸收量,降低幅度分别为 12.6%和 12.9%,其中 C10 和 C0 处理间差异显著($P<0.05$),而 C5 和 C0 处理间差异不显著($P>0.05$)。总体而言,生物质炭和氮肥处理均对磷吸收量有显著影响($P<0.05$),两者之间的交互作用对磷吸收量有极显著的影响($P<0.01$)(表 3)。

在 N0 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理显著提高了菠菜钾的吸收量,提高的幅度分别为 56.2%和 76.3%,随着施炭量增加,总体看随着施炭量的增加菠菜钾吸收量呈上升的趋势,但 C5 与 C10 之间差异不显著($P>0.05$)。在 N1 水平下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理均显著提高了菠菜钾的吸收量,提高的幅度分别为 36.9%和 92.0%,而且 C0、C5、C10 处理之间差异均显著($P<0.05$)。在 N2 水平下,随着生物质炭施用量的增加菠菜钾的吸收量增加,C5 和 C10 处理菠菜钾的吸收量比 C0 处理分别提高了 1.2%和 21.8%,但处理

之间的差异并不显著($P>0.05$)。

3 讨论

本研究结果表明,施用生物质炭不论对菠菜产量还是菠菜生物量都有显著影响($P<0.05$),且生物质炭和氮肥的交互作用对菠菜产量和生物量均有极显著影响($P<0.01$)。本研究中,施用生物质炭提高了菠菜产量,最高增产幅度为 57.3%(N0C10 处理),最低增产幅度为 2.5%(N2C5 处理),这与其他学者的研究一致^[16,21,24]。本研究中生物质炭的增产效果变幅较大,Chan 等基于盆栽试验也发现,在氮肥与高量生物质炭(100 t·hm⁻²)配施条件下,萝卜产量的增幅在 95%到 266%之间^[24],同样,Major 等在热带大草原氧化土上施用生物质炭连续 4 年的研究结果显示,在第 1 年内玉米产量没有增加,而后续 3 年产量增幅分别为 8%、30%和 140%^[25]。我们综合相关文献认为,施用生物质炭对产量影响变幅较大的原因可能与土壤肥力状况、生物质炭施用量、矿质肥管理、作物和土壤类型等因素有关。在本研究中,随着施氮量的增加,施用生物质炭的增产效果降低,显然,生物质炭与矿质肥料配施对产量的影响比单施生物质炭效果更显著,这与文献报道一致^[14,16,19,24]。施用生物质炭可以增产的原因,除了生物质炭自身含有一定的养分外,还可能与土壤物理特性改善^[10,24]、营养元素(K、P、Ca、Mg)的有效性增强以及土壤 pH 增加有关^[25-26]。

单施氮肥或生物质炭均对土壤速效氮含量有极显著影响($P<0.01$),而生物质炭和氮肥的交互作用对土壤中速效氮含量无显著影响($P>0.05$),这应该是因为生物质炭与化肥配施显著提高了菠菜的氮肥利用效率。

本研究表明,在施氮量 90 mg·kg⁻¹ 水平下,施用生物质炭显著提高了菠菜的硝酸盐含量($P<0.05$),且随着生物质炭施用量增加硝酸盐含量也呈增加趋势,在不施氮肥和施氮量达到 120 mg·kg⁻¹ 水平时,施用生物质炭对菠菜硝酸盐含量的影响都不显著($P>0.05$)。本研究中,菠菜组织中硝酸盐含量最高达 324.19 mg·

kg^{-1} 鲜重, 仍远远低于国家安全标准 ($\leq 3\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜重), 并未产生硝酸盐含量超标的风险。

单施生物质炭或氮肥对菠菜组织中氮磷钾的含量有极显著影响 ($P<0.01$), 且两者的交互作用对全氮和全磷有显著影响 ($P<0.05$), 对全钾浓度有极显著影响 ($P<0.01$)。在不施氮肥和施氮量 $90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下, 施用生物质炭显著提高菠菜氮吸收量 ($P<0.05$), 且随着生物质炭施用量的增加而增加。但当施氮量达到 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平时, 施炭量 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理不仅导致菠菜氮吸收量减少, 而且菠菜的产量和生物量也有所降低。Major 等的研究表明, 生物质炭和氮肥配施提高了土壤 pH 值, 使土壤中有效磷浓度降低^[25]。本研究中, 菠菜组织中磷浓度随生物质炭量的增加而呈现降低趋势, 其中 N2C10 处理的菠菜磷吸收量最低, 可能是该处理磷吸收量的减少阻碍了菠菜生长, 进而导致菠菜产量、生物量和氮吸收量都降低。对于每盆菠菜磷吸收总量而言, 在不施氮肥和施氮量 $90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平时, 随着生物质炭施用量的增加, 磷素吸收总量呈增加的趋势, 但差异并不显著 ($P>0.05$)。与磷吸收量趋势稍有不同, 无论施用氮肥与否, 随着生物质炭施用量增加, 每盆菠菜钾吸收量均显著增加。已有研究表明, 施用生物质炭有利于增加作物组织中磷、钾、钙、镁等元素吸收^[24-25]。Chan 等指出, 无论是否施用氮肥, 萝卜组织中的磷、钾吸收量随着生物质炭施用量 ($10, 50, 100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的增加而增加, 且生物质炭、氮肥及其交互作用对 P 吸收量的影响均呈极显著差异 ($P<0.001$)^[24]。在本研究中, 菠菜组织中磷吸收量与生物质炭施用量的正相关性没有钾元素响应显著, 可能是因为生物质炭施入土壤后导致 pH 增大, 而降低了磷素的有效性。

4 结论

施用生物质炭可以显著提高菠菜产量和生物量, 增幅在 2.5% 和 57.3% 之间, 随着施氮量的增加, 施用生物质炭的增产效果降低, 生物质炭与化肥配施对菠菜增产效果最好。施用生物质炭可以提高菠菜组织中全氮、全钾和硝酸盐的含量, 且随着生物质炭施用量增加硝酸盐含量有增加趋势, 但并未超过蔬菜硝酸盐含量国家标准, 对食用不构成风险。随着生物质炭施用量的增加, 菠菜组织中磷的浓度呈降低趋势, 但每盆菠菜磷吸收总量在不施氮肥和施氮量 $90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平时呈增加趋势, 而在施氮量为 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时呈下降趋势。施用生物质炭可以明显提高氮肥的利用

率, 氮肥当季利用率提高达到 26.4 个百分点, 这对减少氮肥施用量, 从而降低土壤氮素损失和面源污染风险具有积极的意义。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. 2007.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623–1627.
- [3] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107: 12052–12057.
- [4] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 350–355.
ZHANG Xu-dong, LIANG Chao, ZHUGE Yu-ping, et al. Roles of black carbon in the biogeochemical cycles of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 350–355.
- [5] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403–427.
- [6] Laird D A. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 178–181.
- [7] Singh B P, Hatton B J, 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: 1224–1235.
- [8] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of mediterranean soils[J]. *Soil Use and Management*, 1996, 12: 209–213.
- [9] Brodowski S, John B, Flessa H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 539–546.
- [10] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters and groundwater quality [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 526–530.
- [11] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 255–257.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1719–1730.
- [13] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 443–449.
- [14] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and fertility of soils*, 2002, 35: 219–230.
- [15] Renner R. Rethinking biochar[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(17): 5932–5933.
- [16] Steiner C, Teixeira W, Lehmann J, et al. Long term effects of manure,

- charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291: 275–290.
- [17] Kimetu J, Lehmann J, Ngoze S O, et al. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient[J]. *Ecosystems*, 2008, 11: 726–739.
- [18] Asai H, Samson B K, Haelele S M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111: 81–84.
- [19] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 15–21.
- [20] Verheijen F, Jeffery S, Bastos A C, et al. Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, Processes and functions [R]. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2010: 91–98.
- [21] 刘世杰, 窦 森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 3(1): 79–82.
- LIU Shi-jie, DOU Sen. The effects of black carbon on growth of maize and the absorption and leaching of nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 3(1): 79–82.
- [22] 刘永刚, 陈利军, 武志杰. 蔬菜中硝酸盐的积累机制及其调控措施[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 612–616.
- LIU Yong-gang, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Accumulation mechanisms of nitrate in vegetables and their regulation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 612–616.
- [23] 李合生. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [24] Chan K Y, Van Z L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 629–634.
- [25] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333: 117–128.
- [26] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F, et al. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2006, 52: 489–495.