

# 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜生长、产量、品质和氮素利用率的影响

殷武平<sup>1,2</sup>, 袁祖华<sup>1,2</sup>, 彭莹<sup>1,2</sup>, 童辉<sup>1,2</sup>, 杨晓<sup>1,2</sup>

(1. 湖南省蔬菜研究所 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院 长沙 410125)

**摘要:**为探究化肥减施潜力和生物炭有机肥增效作用,缓解因化肥过量施用导致的蔬菜品质下降和肥料利用率降低等问题,以苋菜为试材,设6个施肥处理:不施肥(CK1)、100%常规施肥(CK2)、85%常规施肥+2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T1)、85%常规施肥+4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T2)、70%常规施肥+4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T3)、70%常规施肥+2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T4),对比分析各处理苋菜生长、产量、品质、氮肥吸收及利用的差异。结果表明,与CK1相比,施肥不同程度促进苋菜植株生长,增加苋菜根茎叶氮素积累量,苋菜产量提高5.83%~22.67%。与CK2相比,生物炭有机肥部分替代化肥显著增加苋菜的生物量,提升可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C含量,降低硝酸盐和有机酸含量;其中,T1和T2苋菜产量分别提高7.28%和11.87%,T2氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率分别提升16.74%、21.48 kg·kg<sup>-1</sup>。综上,T2为最优处理,可促进苋菜生长,提高苋菜产量和氮素利用率,改善品质,是实现肥料高效利用、减肥增效的良好施肥模式。

**关键词:**苋菜;化肥减施;生物炭有机肥;产量;氮素利用率;品质

中图分类号:S636.4

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2023)06-077-07

## Effects of partial substitution of chemical fertilizer by biochar organic fertilizer on the growth, yield, quality and N nutrient utilization of amaranth

YIN Wuping<sup>1,2</sup>, YUAN Zuhua<sup>1,2</sup>, PENG Ying<sup>1,2</sup>, TONG Hui<sup>1,2</sup>, YANG Xiao<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Province Vegetable Research Institute, Changsha 410125, Hunan, China; 2. Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, Hunan, China)

**Abstract:** In order to improve the situations of the excessive application of chemical fertilizers resulting in reduced vegetable quality, low fertilizer utilization rate, and so on, a field experiment was carried out using combined application of biochar organic fertilizer with chemical fertilizer to explore the potential of it in vegetable fields and the effect of biochar organic fertilizer, and provide a scientific basis for reasonable fertilization. In this study, amaranth field experiment was conducted to investigate the effects on growth, yield, quality, fertilizer contribution rate and N nutrient utilization under different combinations. Six treatments were as follows: non-fertilization (CK1), 100 % chemical fertilizer (CK2), 85% chemical fertilizer with 2250 kg·hm<sup>-2</sup> biochar organic fertilizer (T1), 85% chemical fertilizer with 4500 kg·hm<sup>-2</sup> biochar organic fertilizer (T2), 70% chemical fertilizer with 4500 kg·hm<sup>-2</sup> biochar organic fertilizer (T3), 70% chemical fertilizer with 2250 kg·hm<sup>-2</sup> biochar organic fertilizer (T4). The results showed that compared with CK1, fertilization promoted the growth of amaranth plant, increased the nitrogen accumulation of root, stem and leaf, and increased the yield of amaranth by 5.83%-22.67%. Compared with CK2, the combined application with chemical fertilizer treatments significantly increased biomass, soluble sugar, soluble protein and vitamin C contents. while reduced The contents of nitrate and organic acid. Compared with CK2, T1 and T2 treatments increased the yield of amaranth by 7.28% and 11.87%, respectively. Compared with CK2 treatment, the utilization rate, agronomic utilization rate of nitrogen fertilizer of T2 increased by 16.74%, 21.48 kg·kg<sup>-1</sup>. In conclusion, 85% of conventional chemical fertilizer with 4500 kg·hm<sup>-2</sup> biochar organic fertilizer promote growing, improved the nitrogen utilization rate, yield and quality in amaranth, which was a good fertilization

收稿日期:2022-10-25; 修回日期:2023-03-08

基金项目:湖南省种植业发展专项(湘财农指(2021)46号);湖南省蔬菜产业技术体系栽培岗位专家项目(湘财农指(2021)37号)

作者简介:殷武平,男,助理研究员,主要从事蔬菜生长发育调控及栽培生理研究。E-mail:wpin1987@163.com

通信作者:袁祖华,男,研究员,主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail:csyzh888@126.com

model to achieve the efficient utilization of fertilizer, weight loss and efficiency.

**Key words:** *Amaranthus tricolor* L.; Reduce fertilizer application; Biochar organic fertilizer; Yield; N efficiency; Quality

苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)是苋科苋属的一年生草本植物,又名赤苋、米苋、苋等;苋菜以嫩茎叶为食用部分,炒食或做汤,富含维生素C、胡萝卜素、蛋白质和铁、钙等物质,广受大众喜爱,在我国南北各地均有种植<sup>[1]</sup>。随着人民生活水平的提高,对健康高品质绿叶蔬菜的需求日益增加,但在苋菜种植中,大量化肥被施入土壤来保持或增加产量,而有机肥施用很少,甚至不施,因此土壤理化性质变差、土壤酸化、肥力水平下降,导致肥料利用率低、品质降低、硝酸盐积累等问题,亟需采用新的肥料或养分管理技术提高产量和改善品质。

有机肥料替代部分化肥,有利于保证作物产量、提高品质、改善土壤理化性质<sup>[2]</sup>。生物炭是生物残体在厌氧或缺氧的条件下,经高温裂解形成的一类稳定、高度芳香、碳含量丰富、质地轻的黑色固态物,其比表面积大,疏松多孔,富含羟基、羧基、羰基等基团,孔隙发达、阳离子交换能力较强,且在土壤中长期存在,不易分解<sup>[3]</sup>。生物炭具有提高作物产量及改善作物品质,实现废弃生物质资源化利用等作用<sup>[4-5]</sup>。生物炭有机肥是由生物炭和有机肥物料复混制成的肥料,由于生物炭特殊的结构可实现肥料养分缓慢释放,具有较高的养分持留能力和土壤改良作用,从而实现肥料养分高效利用<sup>[6]</sup>。前人研究表明,生物炭有机肥对番茄、生姜、小白菜、油菜、玉米、水稻、榨菜等作物的产量和养分利用率均有提高<sup>[5,7-11]</sup>,而生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜影响的研究鲜有报道。笔者研究了化肥减量并配施不同水平的生物炭有机肥对苋菜生长、氮素利用率、产量和品质的影响,明确苋菜生产中化肥减施比例和合适的生物炭有机肥配施量,在保证产量和品质的前提下,减少化肥使用量,提高肥料利用率,改善土壤性状,为生物炭有机肥在苋菜生产上的合理应用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

供试品种为韩国大红圆叶苋菜,购自长沙市庆农种子有限公司。化肥施用含N 46%的尿素、含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%的钙镁磷肥和含K<sub>2</sub>O 60%的氯化钾。供试的生物炭有机肥购自贵州金叶丰农业科技有限公司,有机肥成品有机质含量(w,后同)45%、生物炭

含量15%、N含量1.4%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量1.5%、K<sub>2</sub>O含量2.1%,pH值为8.69。供试土壤基础理化性质为:有机质含量26.25 g·kg<sup>-1</sup>、全氮含量1.89 g·kg<sup>-1</sup>、pH值为4.04、碱解氮含量137.5 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷含量570 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾含量333.5 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验地点位于湖南省蔬菜研究所试验基地薄膜大棚内,试验共设6个处理,CK1为不施肥对照,CK2为当地农户常规施肥对照;考虑作物需肥规律,兼顾肥料利用率,在当地农户普通化肥常规施肥的基础上,化肥施用总量较常规施肥减量15%和30%,分别为:85%常规施肥+2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T1)、85%常规施肥+4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T2)、70%常规施肥+4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T3)、70%常规施肥+2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥(T4)。试验采用随机区组排列,3次重复,小区面积16.8 m<sup>2</sup>(1.2 m×14.0 m),各处理施肥量见表1。苋菜于2022年4月15日直播,种子用量为67.5 kg·hm<sup>-2</sup>,即每个小区113.4 g。所有肥料均在播种前一周随耕整地一次性基施,而后旋入土壤中。无追肥,其余栽培、灌溉和田间管理措施均按常规统一管理,各地块保持一致。

表1 试验各处理的施肥量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理	生物炭有机肥施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	化肥施用量/%	化肥施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK1	0.00	0	0.00	0.00	0.00
CK2	0.00	100	225.00	19.00	109.00
T1	2 250.00	85	191.25	16.15	92.65
T2	4 500.00	85	191.25	16.15	92.65
T3	4 500.00	70	157.50	13.30	76.30
T4	2 250.00	70	157.50	13.30	76.30

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定 苋菜播种后35 d,选取达到采收要求的苋菜植株10株,洗净、用吸水纸擦干,用直尺测量株高(即地面至植株最高处距离),用游标卡尺测量茎粗(即植株中部最粗处直径),用电子天平测量植株鲜质量,并测量小区产量。并取苋菜植株,按不同器官(根、茎、叶)分开,分别称鲜质量后装信封袋,置于烘箱内105℃杀青30 min,然后在80℃条件下烘48 h至恒质量,称各部位干质量;根冠比为植株地下部干质量/地上部干质量。

1.3.2 品质指标测定 苋菜播种后35 d,称取第3~

第5片苋菜完全展开叶5.0 g,采用水杨酸比色法测定硝酸盐含量,采用滴定法测定有机酸含量,按苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒及程序处理,用分光光度计分别测定苋菜的可溶性糖、可溶性蛋白含量<sup>[12]</sup>。维生素C含量采用2,6-二氯靛酚钠滴定法测定<sup>[12]</sup>。

1.3.3 氮素利用相关指标测定 用粉碎机将烘干的样品粉碎后过筛,用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液消煮法,全氮用全自动凯氏定氮仪(K1100)测定N含量<sup>[13]</sup>。氮素积累量=干物质量×氮素含量;成熟期全株氮素积累量=根的氮素积累量+茎的氮素积累量+叶片的氮素积累量;成熟期根、茎、叶片的氮素分配率=根、茎、叶片的氮素积累量/成熟期全株的氮素积累量。

氮肥利用率(NRE,%)=(施肥区地上部作物氮积累量-不施肥区地上部作物氮积累量)/氮肥投入量×100;氮肥农学利用率(NAE,kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区作物产量-不施氮区作物产量)/氮肥投入量。肥料贡献率(FCR)是肥料对作物产量的贡献率,是把不施肥处理(CK1)的产量视为地力对产量的贡献,以其为基准进行计算反映投入肥料生产能力的指标。肥料贡献率/(FCR)=(施肥处理产量-不施肥处理产量)/施肥处理产量×100;增产率/%=(施肥产量-对照产量)/对照产量×100。

#### 1.4 数据分析

本试验数据采用Excel和DPS 7.05进行数据分析,采用Duncan多重比较进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜生长的影响

由表2可以看出,所有施肥处理的苋菜株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量均显著高于CK1,以T2最高,其株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量分别比CK1提高33.84%、35.46%、80.97%、60.87%、84.85%、72.73%。生物炭有机肥部分替代化肥施入能够显著促进苋菜植株的生长,T1、T2、T3、T4处理苋菜的株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量均显著高于CK2,以T2最高,其株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量分别比CK2提高了24.88%、28.10%、29.09%、23.33%、32.61%和26.67%。在相同的化肥施用量下,增施4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥的处理株高、茎粗、地上部鲜质量和地下部鲜质量均高于增施2250 kg·hm<sup>-2</sup>的处理。在增施2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥条件下,化肥减量15%处理的茎粗、地上部干鲜质量均显著高于化肥减量30%处理,两者的株高、地下部干鲜质量差异不显著;在增施4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥条件下,化肥减量15%处理的株高、茎粗、地上部干鲜质量和地下部干鲜质量均高于化肥减量30%处理,其中地上部干鲜质量和地下部干质量达

表2 不同施肥处理对苋菜生长的影响

处理	株高/cm	茎粗/mm	地上部鲜质量/g	地下部鲜质量/g	地上部干质量/g	地下部干质量/g	根冠比
CK1	13.95±0.11 d	3.13±0.04 e	3.31±0.05 e	0.23±0.01 c	0.33±0.01 f	0.022±0.00 d	0.068±0.01 a
CK2	14.95±0.13 c	3.31±0.02 d	4.64±0.03 d	0.30±0.01 b	0.46±0.01 e	0.030±0.00 c	0.065±0.00 a
T1	16.80±0.21 b	3.97±0.07 b	5.18±0.03 b	0.35±0.01 a	0.54±0.00 b	0.035±0.00 b	0.064±0.00 a
T2	18.67±0.13 a	4.24±0.02 a	5.99±0.02 a	0.37±0.00 a	0.61±0.01 a	0.038±0.00 a	0.062±0.00 a
T3	18.39±0.14 a	4.05±0.03 ab	5.20±0.04 b	0.36±0.00 a	0.52±0.00 c	0.035±0.00 b	0.069±0.00 a
T4	16.87±0.12 b	3.68±0.07 c	4.95±0.02 c	0.35±0.00 a	0.49±0.00 d	0.034±0.00 b	0.070±0.00 a

注:同列中不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

到显著水平。各处理的根冠比无显著差异。

### 2.2 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜产量、肥料贡献率及氮素利用效率的影响

由表3可知,各施肥处理的苋菜产量均显著高于CK1,其中T2产量最高,达34 830.5 kg·hm<sup>-2</sup>,各处理大小依次为T2>T1>CK2>T3>T4>CK1,前者依次比CK1提高了22.67%、17.64%、9.65%、8.52%和5.83%。在相同化肥施用水平下,增施4500 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥处理苋菜的产量均高于

增施2250 kg·hm<sup>-2</sup>生物炭有机肥处理,其中T1和T2之间差异达到显著水平。与CK2相比,T2、T1处理均有增产,增产率分别为11.87%和7.28%;T3、T4有一定的减产。肥料贡献率以T2最高,T1次之,T4最小,CK2和T3之间差异不显著,其他处理之间差异显著。

与CK2相比,生物炭有机肥部分替代化肥处理苋菜的氮肥利用率显著提高,T1、T2的氮肥农学利用率显著提升,均以T2处理最高,其氮肥利用率和

氮肥农学利用率为 26.57%、33.66 kg·kg<sup>-1</sup>，分别是 CK2 的 2.70 倍和 2.76 倍。氮肥农学利用率在 10.51~33.66 kg·kg<sup>-1</sup> 之间，与氮肥利用率变化趋势基本一致。在化肥减量 15% 条件下，增施 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理苋菜的氮肥利用

率和氮肥农学利用率均显著高于增施 2250 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理；在化肥减量 30% 条件下，增施 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理苋菜的氮肥利用率显著高于增施 2250 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理，2 个处理的氮肥农学利用率无显著差异。

表 3 不同施肥处理对苋菜产量和肥料贡献率的影响

处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	增产率/%	肥料贡献率/%	氮肥利用率/%	氮肥农学利用率/(kg·kg <sup>-1</sup> )
CK1	28 392.76±210.86 e				
CK2	31 133.42±312.98 c		8.79±0.62 c	9.83±0.50 e	12.18±0.94 c
T1	33 401.22±251.54 b	7.32±1.71 b	14.99±0.85 b	21.91±0.76 b	26.19±1.63 b
T2	34 830.50±228.62 a	11.90±1.25 a	18.47±1.01 a	26.57±0.78 a	33.66±2.03 a
T3	30 810.64±181.45 cd	-1.01±1.56 c	7.83±1.21 c	18.87±1.85 c	15.35±2.44 c
T4	30 048.35±200.72 d	-3.47±0.78 c	5.50±0.99 d	14.52±1.62 d	10.51±1.95 c

### 2.3 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜品质的影响

由表 4 可知，与 CK2 相比，生物炭有机肥部分替代化肥的处理苋菜叶片中硝酸盐含量均显著降低，且随着化肥施用量的减少而降低，T4、T3 处理苋菜叶片中硝酸盐含量分别显著低于 T1 和 T2，其中 T4 处理最低，硝酸盐含量为 316.61 mg·kg<sup>-1</sup>。苋菜叶片维生素 C、可溶性蛋白、可溶性糖含量均以 T2 最高，T3、T4 为第二梯队，三者均显著高于 CK2。各处理苋菜叶片可溶性糖含量大小顺序为：T2 > T3 > T4 > T1 > CK2 > CK1，前者依次分别比 CK1 提高了 30.45%、29.01%、27.21%、13.33% 和 10.18%；生物炭有机肥部分替代化肥处理的苋菜叶片可溶性糖含量较 CK2 均有提高，以 T2 提高幅度最大，其次为 T3，两者较 CK2 均显著提高，分别提高了 18.39% 和 17.07%。各处理苋菜叶片可溶性蛋白含量大小顺序为 T2 > T4 > T3 > T1 > CK2 >

CK1，以 T2 最高，鲜物质含量为 25.07 mg·g<sup>-1</sup>；与 CK2 相比，T2、T3、T4 处理可溶性蛋白含量均显著提高，T1、CK2、CK1 之间差异不显著。所有施肥处理的苋菜叶片维生素 C 含量较 CK1 均有显著提高；与 CK2 相比，生物炭有机肥部分替代化肥处理的苋菜叶片中维生素 C 含量均有提高，其中 T2、T3、T4 差异显著。在相同化肥施用水平下，增施生物炭有机肥的量为 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 处理苋菜叶片的维生素 C、可溶性糖含量高于施用量为 2250 kg·hm<sup>-2</sup> 的处理。在化肥减量 15% 条件下，增施 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理的苋菜可溶性蛋白显著高于增施 2250 kg·hm<sup>-2</sup> 生物炭有机肥处理；在化肥减量 30% 条件下不同生物炭有机肥增施量的处理之间无显著差异。各施肥处理苋菜的有机酸含量均显著低于 CK1，生物炭有机肥部分替代化肥 T1、T2、T3 处理苋菜叶片有机酸含量显著低于 CK2，T4 和 CK2 之间无显著差异。

表 4 不同施肥处理对苋菜叶品质的影响

处理	w(硝酸盐)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(维生素 C)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(可溶性糖)/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(可溶性蛋白)/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(有机酸)/%
CK1	349.60±7.60 c	216.84±2.06 d	11.10±0.44 c	19.64±0.27 c	0.53±0.01 a
CK2	501.82±3.52 a	241.15±1.53 c	12.23±0.10 b	19.65±0.30 c	0.45±0.01 b
T1	385.22±1.60 b	245.33±1.08 c	12.58±0.01 b	20.09±0.19 c	0.39±0.00 c
T2	350.77±4.99 c	270.83±1.67 a	14.48±0.33 a	25.07±0.09 a	0.39±0.02 c
T3	337.29±6.21 d	267.67±1.03 a	14.32±0.27 a	21.84±0.35 b	0.39±0.00 c
T4	316.61±2.21 e	258.52±1.50 b	14.12±0.12 a	21.95±0.59 b	0.43±0.03 b

### 2.4 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜氮素积累量及分配率的影响

由表 5 可知，所有施肥处理的苋菜根、茎、叶氮素积累量均显著高于 CK1，施肥对苋菜氮素吸收的促进作用明显。苋菜根、茎、叶氮素积累量以 T2 处

理最高，与 CK2 相比，其根、茎、叶氮素积累量分别提高 14.40%、29.48%、32.31%。同一化肥减量水平下，T2 处理的根、茎、叶氮素积累量依次比 T1 处理分别增加 0.53%、0.99%、12.15%，T3 处理的根、茎、叶氮素积累量依次比 T4 处理分别增加 11.54%、

表5 不同施肥处理对苋菜养分积累量和分配率的影响

处理	叶		茎		根	
	N 积累量/(kg·hm <sup>2</sup> )	分配率/%	N 积累量/(kg·hm <sup>2</sup> )	分配率/%	N 积累量/(kg·hm <sup>2</sup> )	分配率/%
CK1	47.47±0.67 e	64.99±0.12 a	22.03±0.40 c	30.16±0.16 d	3.54±0.14 c	4.85±0.25 ab
CK2	59.23±0.45 d	61.34±0.37 bc	32.39±0.43 b	33.55±0.46 bc	4.93±0.10 b	5.11±0.11 a
T1	69.88±0.95 b	59.71±0.66 d	41.53±0.62 a	35.49±0.60 a	5.61±0.09 a	4.80±0.09 ab
T2	78.37±0.41 a	62.22±0.17 b	41.94±0.26 a	33.30±0.19b c	5.64±0.14 a	4.48±0.12 b
T3	65.20±1.69 c	62.24±0.68 b	34.02±0.58 b	32.49±0.61 c	5.51±0.04 a	5.26±0.13 a
T4	59.16±1.00 d	60.79±0.08 cd	33.22±0.52 b	34.14±0.07 b	4.94±0.12 b	5.08±0.13 a

2.41%、10.21%。同一生物炭有机肥施用水平下,T4处理根、茎、叶的氮素积累量分别较T1处理降低了11.94%、20.01%、15.34%;T3较T2处理根、茎、叶氮素积累量分别降低了2.30%、18.08%、16.80%。苋菜各处理氮素分配比例在各器官中表现为叶>茎>根。叶片氮素分配率以CK1、T2、T3较大,T1最小。茎中氮素分配比例以T1最大,接下来依次是T4、CK2、T2、T3、CK1。根氮素分配率以T3最大,T2最小,各施肥处理的根氮素分配率大小顺序为T3>CK2>T4>CK1>T1>T2。

### 3 讨论与结论

施肥是促进作物生长的重要保障<sup>[14]</sup>,株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量是反映植株生长状况的主要指标<sup>[7,11,15-16]</sup>。本试验条件下,与不施肥CK1相比,常规施肥处理CK2、生物炭有机肥部分替代化肥处理均可显著增加苋菜株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量,这与王吉平等<sup>[17]</sup>、张钧恒等<sup>[18]</sup>、Wei等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。

有机肥适量替代化肥既能协调平衡养分供应,减少化肥的损失,还能为作物提供足够的养分<sup>[20-21]</sup>。笔者研究发现,与CK2相比,生物炭有机肥部分替代化肥处理苋菜株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量均有提高,以T2处理最高。在化肥减量15%水平下,用有机肥适当替代增施(T1、T2处理)提高了苋菜的株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量,且随着生物炭有机肥的增加作用越显著。化肥减量30%(T3、T4)的苋菜株高、茎粗、地上部干鲜质量、地下部干鲜质量较CK2均有提高,但较T2处理有所下降,这与张迎春等<sup>[22]</sup>、何东霞等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。在一定生物炭有机肥水平下,随化肥减施量的增加,株高、茎粗地上部干鲜质量和地下部干鲜质量均有所降低,说明减施化肥并配施适量生物炭有机肥能够促进作物生长,但过量减施不利于作物生长。

不同施肥处理对蔬菜产量和氮素利用率影响较大<sup>[24-25]</sup>。本试验结果表明,与不施肥相比,施肥会提高苋菜产量。与纯施化肥相比,生物炭有机肥部分替代化肥(T1、T2)可提高苋菜的产量和肥料贡献率;随着化肥减施量的增加,苋菜产量、肥料贡献率有所降低,说明生物炭有机肥替代化肥的合适比例非常重要,这与徐大兵等<sup>[20]</sup>、张迎春等<sup>[22]</sup>和谢军等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。笔者研究发现,与CK2相比,生物炭有机肥部分替代化肥可促进氮素的利用,以T2的氮肥利用率和氮肥农学利用率最高。在化肥减量15%的水平下,随着生物炭有机肥的增加,苋菜氮肥利用率和氮肥农学利用率相应提高;在化肥减量30%的水平下,T3、T4处理之间无显著差异,且均显著低于T2,这与何东霞等<sup>[23]</sup>、侯红乾等<sup>[27]</sup>的研究结果相似,说明减施化肥并配施适量生物炭有机肥能够促进作物氮素吸收利用,但过量减施效果会降低。可能是因为蔬菜生长前期根系不发达、养分吸收少,后期生长发育快且根系逐渐发达,养分需求旺盛,而化肥中的氮养分释放快,流失也快,很难匹配蔬菜作物的需肥规律<sup>[22]</sup>。而有机肥氮具有缓效性,肥效时间长,可以持续为作物提供营养元素,改善土壤微生物环境,优化土壤的理化性质,增加有机质的优点<sup>[28]</sup>。生物炭因其特殊的结构可影响土壤中氮素的周转率,进而加快土壤氮素的有效化<sup>[29]</sup>,同时,生物炭能吸附部分氮素,减少铵态氮、硝态氮的挥发和淋溶损失,提升氮素的缓释能力<sup>[30-31]</sup>,有利于提高氮素利用率,增加作物产量。

苋菜品质成分含量高低与其口感和价值密切相关,也是判断生物炭有机肥部分替代化肥处理是否合适的重要指标。肥料类型及施用量会影响苋菜植株中可溶性蛋白质、可溶性糖、有机酸、维生素C等可溶性固形物、含氮物质及非氮源营养成分的含量<sup>[24]</sup>。硝酸盐含量是苋菜安全卫生标准的重要评价指标之一,而苋菜产品中硝酸盐含量高低与氮素类型及施用量密切相关<sup>[22]</sup>。本研究结果显示,相比

CK2,生物炭有机肥部分替代化肥处理提高了苋菜中可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C的含量,以T2处理苋菜各项指标最高,这与徐大兵等<sup>[20]</sup>、张迎春等<sup>[22]</sup>的结果一致。生物炭有机肥提高了苋菜维生素C、蛋白质和可溶性糖含量可能是因为生物炭有机肥对肥料养分的吸附而具有缓释作用,能保证氮、磷、钾等养分供应的适量,并提高了土壤活性有机碳含量。生物炭有机肥部分替代化肥处理降低了苋菜植株中硝酸盐和有机酸含量,这与徐大兵等<sup>[20]</sup>和李大伟等<sup>[24]</sup>的结果一致,主要原因是化肥释放氮素较快,与苋菜生长发育及需肥规律不一致,造成了NO<sub>3</sub><sup>-</sup>大量积累;而具有多孔结构的生物质炭能够吸附土壤中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,可促进土壤中氮的固定,同时通过抑制铵态氮向硝态氮的转化,实现减少氮的损失,这样苋菜就能减少硝酸盐含量的积累<sup>[32]</sup>。生物炭有机肥中含有钙、锰和锌等微量元素,这些有益元素显著高于复合肥,且有研究发现,微量元素可显著提高蔬菜品质,可以提高维生素C和糖分含量,降低酸味物质含量<sup>[24,33]</sup>。

养分的积累和分配是作物生长的重要决定因素,且其因施肥不同有较大的差异,合理施肥有利于养分的积累和高效利用<sup>[23,34]</sup>。何东霞等<sup>[23]</sup>在韭菜、张俊峰等<sup>[33]</sup>在番茄、王赫等<sup>[35]</sup>在辣椒、张富鑫等<sup>[36]</sup>在甘蓝和李菊等<sup>[37]</sup>在松花菜的研究中指出:施用有机肥能够提高蔬菜作物氮、磷、钾积累量。本试验中,施肥处理显著提高了氮素积累量。与纯施化肥(CK2)相比,生物炭有机肥部分替代化肥(T1、T2、T3)可提高苋菜各器官中氮素积累量。在同一化肥施用水平下,增施生物炭有机肥有利于氮素的积累,可能是化肥减量配施生物炭有机肥后,增加了土壤有益微生物的数量且能充足供应其所需的碳源,且生物炭发达的孔隙结构、较大的比表面积,增强了根际微生物与根系互作,促进了营养元素从根系向地上部运输。增施相同生物炭有机肥水平下,化肥减量15%时更有利于根、茎、叶氮素积累,化肥减量30%时氮素积累效应较前者有所下降,可能是由于化肥减施30%与配施生物炭有机肥的协同效应有所降低。

综上所述,施肥可以显著促进苋菜植株生长、增加苋菜根、茎、叶的氮素积累量,苋菜产量提高5.83%~22.67%。与CK2相比,生物炭有机肥部分替代化肥处理显著促进苋菜生长,提高苋菜产量;显著改善了苋菜的营养品质;同时,显著增加苋菜根、茎、叶氮素积累量,提升氮肥利用率,促进土壤

养分平衡。综合来看,以T2为最优处理,较CK2处理苋菜可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、维生素C含量显著提高,硝酸盐和有机酸含量显著降低,同时,苋菜的产量提高了11.87%,氮肥利用率提升了16.74%,氮肥农学利用率升高了21.48 kg·kg<sup>-1</sup>。说明减施化肥并配施适量生物炭有机肥是促进苋菜高产优质、肥料高效利用、减肥增效的有效途径。

#### 参考文献

- [1] 肖昉,王乐,郑友峰,等. 苋菜 *AtrADH2* 基因克隆及表达分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 105-117.
- [2] YE L, ZHAO X, BAO E C, et al. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 177.
- [3] 王高飞,邢丹,牟玉梅,等. 稻秆/稻壳炭育苗基质对辣椒幼苗生长和氮磷钾养分含量的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4): 53-56.
- [4] 叶晓龙,冯棣,张金磊,等. 生物炭用量对拱棚番茄产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(7): 86-91.
- [5] HE X J, XIE H, GAO D M, et al. Biochar and intercropping with Potato-onion enhanced the growth and yield advantages of tomato by regulating the soil properties, nutrient uptake, and soil microbial community[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 695447.
- [6] 胡京钰,杨红军,刘大军,等. 酒糟生物炭与化肥配施对土壤理化特性及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(9): 1664-1672.
- [7] 吴萍萍,王静,李录久,等. 化肥减施下有机物料对砂姜黑土有机碳组分和养分含量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2286-2294.
- [8] 于南卓. 生物炭及炭基肥料对小白菜、油菜及玉米的生长和土壤养分的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2018.
- [9] 徐令旗,郭晓红,兰宇辰,等. 不同有机肥对旱直播水稻干物质积累和产量的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(2): 188-195.
- [10] 魏夏新,熊俊芬,李涛,等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380.
- [11] 徐茜,肖波,杨梅,等. 生物炭有机肥对榨菜主要性状·产量和品质的影响及效益分析[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(18): 164-167.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 黄倩楠,王朝辉,黄婷苗,等. 中国主要麦区农户小麦氮磷钾养分需求与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2722-2734.
- [15] 高文瑞,王欣,李德翠,等. 不同水肥组合对辣椒植株生长及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 49-56.
- [16] 李静,徐辉,钱坤,等. 不同有机肥配比对无土栽培柳叶白苋菜生长的影响[J]. 天津农业科学, 2022, 28(3): 9-13.
- [17] 王吉平,何铁光,张雨,等. 有机肥替代部分化肥对‘桂甜糯525’产量品质和土壤环境的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(9): 2594-2600.

- [18] 张钧恒,马乐乐,李建明.全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(14):2788-2798.
- [19] WEI W L, YAN Y, CAO J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2016, 225(3):86-92.
- [20] 徐大兵,赵书军,袁家富,等.有机肥替代氮肥对叶菜产量品质和土壤氮淋失的影响[J].农业工程学报,2018,34(S1):13-18.
- [21] 刘明月,张凯鸣,毛伟,等.有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J].华北农学报,2021,36(3):133-141.
- [22] 张迎春,颜建明,郁继华,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长、产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(1):66-73.
- [23] 何东霞,颜建明,何志学,等.生物有机肥部分替代化肥对韭菜生长生理及肥料利用率的影响[J].西北农业学报,2020,29(6):958-967.
- [24] 李大伟.生物炭基肥对番茄和辣椒产量、品质和氮素农学利用率的影响[D].南京:南京农业大学,2015.
- [25] 景博,牛宁,张文龙,等.不同施氮量对加工番茄生长及土壤氮素平衡的影响[J].新疆农业科学,2020,57(10):1830-1838.
- [26] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [27] 侯红乾,冀建华,刘秀梅,等.不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J].土壤,2020,52(4):758-765.
- [28] 徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):83-90.
- [29] SPOKAS K A, NOVAK J M, VENTEREA R T. Biochar's role as an alternative N- fertilizer: ammonia capture[J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2):35-42.
- [30] 吴嘉楠,闫海涛,彭桂新,等.生物质炭与氮肥配施对土壤氮素变化和烤烟氮素利用的影响[J].土壤,2018,50(2):256-263.
- [31] 尚晶涛,吴荣,曹梦琳,等.生物质炭与氮肥配施对土壤养分和谷子生长的影响[J].核农学报,2021,35(6):1451-1456.
- [32] 殷金玉,李阳,张玉兰,等.生物质炭与土质互作对土壤硝态氮含量的动态影响[J].中国农业科技导报,2019,21(6):143-151.
- [33] 张俊峰,颜建明,张玉鑫,等.生物有机肥部分替代化肥对日光温室番茄生长与光合特性及肥料利用率的影响[J].北方园艺,2022(11):44-50.
- [34] 张迎春,颜建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):196-205.
- [35] 王赫,李晓雪,王亚玲,等.化肥减量配施有机肥和菌剂对辣椒产量、品质和养分累积的影响[J].北方园艺,2021(16):1-7.
- [36] 张富鑫,颜建明,刘阳,等.不同施肥模式对结球甘蓝产量、养分吸收利用及土壤酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2022,(6):73-81.
- [37] 李菊,高程斐,马宁,等.化肥减量配施生物有机肥对松花菜养分吸收及产量的影响[J].华北农学报,2021,36(6):153-162.