

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202005031

氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作 生物量和光合特性的影响*

王力¹, 顾浩¹, 李嘉亮¹, 杨睿¹, 何军², 陈颐³, 何聪莲¹, 何承刚^{1**}

(1. 云南农业大学烟草学院, 云南昆明 650201; 2. 云南省烟草公司临沧市公司, 云南临沧 677000;

3. 云南省烟草农业科学研究院, 云南昆明 650021)

摘要:【目的】研究氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作生物量和光合特性的影响。【方法】以云烟 87 烤烟品种和中玉 335 青贮玉米品种为试验材料, 在坡度为 10° 的模拟小区进行套种试验。设置氮肥水平 (N) 和生物炭 (B) 2 个因素: 3 个氮肥施用量 (烤烟+青贮玉米) 分别为 0+0 (N₀)、52.5 kg/hm²+100 kg/hm² (N₁) 和 105 kg/hm²+200 kg/hm² (N₂); 2 个生物炭施用量分别为不添加生物炭 (B₀) 和添加 3% 生物炭 (每 100 kg 土添加 3 kg 生物炭, B₁)。测定烤烟和玉米成熟期的质体色素含量、光合参数及鲜干质量。【结果】在同一氮肥水平下, 添加生物炭可提高成熟期烤烟烟叶的质体色素含量; 氮肥配施生物炭对烤烟及青贮玉米的鲜干质量有积极作用, 可提高拔节期青贮玉米叶片的叶绿素含量, 对成熟期烤烟净光合速率、气孔导度和蒸腾速率有提高作用, 对拔节期青贮玉米的各项光合参数有提高作用。【结论】生物炭搭配常规施氮处理对提高烤烟鲜干质量和青贮玉米光合作用效果最好, 生物炭搭配常规氮肥减半处理次之。因此, 生物炭搭配减氮施肥能起到降低氮肥施用量的作用, 但具体氮肥的减少量需根据土壤类型和生物炭添加量而定。

关键词: 氮肥; 生物炭; 烤烟; 套种青贮玉米

中图分类号: S 344.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 06-0985-08

Effect of Nitrogen Fertilizer Combined with Biochar on the Biomass and Photosynthetic Characteristics of Flue-cured Tobacco/ Silage Corn Relay Intercropping on Slope Farmland

WANG Li¹, GU Hao¹, LI Jialiang¹, YANG Rui¹, HE Jun²,
CHEN Yi³, HE Conglian¹, HE Chenggang¹

(1. College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Tobacco Company Lincang Branch, Lincang 677000, China;

3. Yunnan Academy of Tobacco Agriculture Science, Kunming 650021, China)

Abstract: [Purpose] To study the effect of nitrogen fertilizer combined with biochar on biomass and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco/silage corn relay intercropping system.

[Method] Using Yunyan87 flue-cured tobacco variety and Zhongyu335 silage corn variety as test materials, interplanting experiments were conducted in a simulated plot with a slope of 10°. The ex-

收稿日期: 2020-05-21

修回日期: 2021-05-07

网络首发时间: 2021-11-17 09:42:58

*基金项目: 云南省烟草公司科技计划重点项目 (2020530000241025); 云南省技术创新人才项目 (2019HB068); 云南省万人计划 (YNWR-QNBJ-2018-400)。

作者简介: 王力 (1995—), 男, 河南郑州人, 在读硕士研究生, 主要从事烤烟生理与生态研究。

E-mail: 403809290@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 何承刚 (1972—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 副教授, 主要从事烤烟生理与生态研究。E-mail: 471624095@qq.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211116.1034.001.html>



periment set up two factors of nitrogen fertilizer level (N) and biochar level (B). The three nitrogen fertilizer application rates (flue-cured tobacco+silage corn) were 0+0 (N_0), 52.5 kg/hm²+100 kg/hm² (N_1) and 105 kg/hm²+200 kg/hm² (N_2); the two biochar application rates are B_0 without biochar addition, and B_1 with 3% biochar (adding 3 kg biochar per 100 kg soil). The content of plastid pigments, photosynthetic parameters and fresh and dry weight of flue-cured tobacco and corn at maturity stage were determined. [**Results**] Under the same nitrogen fertilizer level, the addition of biochar could increase the plastid pigment content of flue-cured tobacco leaves at the mature stage; the combined application of nitrogen fertilizer with biochar had a positive effect on the fresh and dry weight of flue-cured tobacco and silage corn, and could increase the chlorophyll content of silage corn leaves at the jointing stage. It could improve the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of flue-cured tobacco at maturity, and it could improve the photosynthetic parameters of silage maize at the jointing stage. [**Conclusion**] Biochar combined with conventional nitrogen application has the best effect on improving the fresh and dry weight of flue-cured tobacco and the photosynthesis intensity of silage corn, and the treatment with biochar combined with conventional nitrogen fertilizer halving is the second. Therefore, the combination of biochar and nitrogen-reducing fertilization can reduce the application of nitrogen fertilizer, but the specific amount of nitrogen fertilizer reduction needs to be determined according to the soil type and the amount of biochar added.

Keywords: nitrogen fertilizer; biochar; flue-cured tobacco; relay intercropping silage maize

坡耕地是高原山区农业最主要的土地资源, 中国坡耕地面积约占耕地总面积的 17.5%^[1]。坡耕地由于高强度降雨、坡度陡峭、植被覆盖度低以及人类的破坏, 极易发生水土流失现象, 导致坡耕地愈加贫瘠。为了提高作物的产质量, 农民增加了化肥农药的施用量, 这也导致流失的土壤中含有大量的化肥农药残留, 造成水体污染和富营养化^[2-3], 更加不利于作物生长。

生物炭是指生物质在完全或部分缺氧条件下热裂解产生的一种高碳、多孔、吸附能力强的固态产物^[4], 具有“取之于农, 用之于农”的特点, 符合农业可持续发展的需要, 目前广泛用于世界各地农业生产当中。研究表明: 添加生物炭对水稻^[5]、青贮玉米^[6]和烤烟^[7]等作物的产量均有不同程度的提高。套种是指在前季作物生长后期的株、行或畦间播种或移栽后季作物的一种种植方式^[8]。研究表明: 套种可提高作物对氮素的吸收, 对减少化肥的施用有积极作用^[9]。在中国不同地区的研究结果都表明套种有助于作物生长和提高作物产量^[10-11]。

近年来, 将生物和化学手段与传统方式的多元结合应用于坡耕地农业是新的趋势^[12]。但将生物炭用于坡耕地作物套种体系还鲜见报道。因此, 本研究基于微型小区模拟试验, 在套作系统

中添加生物炭, 旨在探索氮肥配施生物炭对套作作物生物量和光合特性的影响, 为今后生物炭在坡耕地农业中的应用提供应用实例和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验在云南省昆明市云南农业大学资源和水灌溉实验室开展 (海拔 1 930 m)。

1.2 试验材料

供试土壤为红壤土, 其理化性状为全氮含量 0.62 g/kg, 全磷含量 1.95 g/kg, 全钾含量 0.94 g/kg, 速效磷含量 8.12 mg/kg, 速效钾含量 118.25 mg/kg, 有机质含量 14.01 g/kg, 碱解氮含量 46.45 mg/kg, 铵态氮含量 37.84 mg/kg, 硝态氮含量 226.91 mg/kg, pH 值为 5.36。

供试烤烟品种为云烟 87, 供试青贮玉米品种为中玉 335, 供试生物炭原材料为烤烟烟秆 (品种为中烟 100), 炭化温度为 500 ℃。生物炭养分为: 有机碳含量 476.68 g/kg, 全氮含量 3.29 g/kg, 全磷含量 2.25 g/kg, 全钾含量 17.52 g/kg。

1.3 试验设计

1.3.1 试验装置

试验设置 18 个坡度为 10°的径流小区, 小区长

140.2 cm, 宽 53.3 cm, 高 26.4 cm, 装满经 10 mm 筛处理的土壤。

1.3.2 试验方法

研究采用双因素随机区组试验, 设置氮肥水平 (因素 N) 和生物炭 (因素 B) 2 个因素。设置 3 个氮肥施用量 (N_0 、 N_1 和 N_2): 烤烟施氮量分别为 0、52.5 和 105 kg/hm², 玉米施氮量分别为 0、100 和 200 kg/hm²; 设置 2 个生物炭施用量, 分别为不添加生物炭 (B_0) 和添加 3% 生物炭 (每 100 kg 土添加 3 kg 生物炭, B_1), 每个处理设 3 个重复。烤烟氮肥分基肥和追肥 2 次施用, 基肥和追肥各施用 50%, 各处理磷肥和钾肥施用量均相同, 磷肥用量 105 kg/hm², 钾肥用量为 210 kg/hm²; 玉米氮肥 (尿素) 分 2 次追肥施用, 分别在幼苗期和拔节期进行追肥, 幼苗期施肥量为 60%, 拔节期施肥量为 40%, 施肥方式均为环施。试验烤烟所用肥料为烤烟专用复合肥 [$m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=15:18:30$], 普钙 ($P_2O_5\geq 16\%$), 农业用硫酸钾 ($K_2O\geq 50\%$), 烤烟专用复合肥分基肥和追肥 2 次施用, 磷钾肥一次性作基肥施用; 玉米所用肥料为尿素 ($N\geq 46\%$), 分 2 次追肥施用, 玉米不施基肥。

设置烤烟行株距为 110 cm×55 cm, 于 2019 年 5 月 6 日将烟苗移栽入小区, 田间管理按优质烤烟栽培生产技术规范进行, 成熟时按烤烟成熟标准采收。烤烟第 2 次成熟采收前进行玉米育苗, 第 3 次成熟采收前将玉米苗移栽在烤烟两侧, 设置玉米行株距为 25 cm×55 cm, 二者共生期为 20 d。玉米中耕除草及病虫害防治按一般田间管理进

行, 在幼苗期和拔节期进行追肥。

1.4 测定项目与方法

作物鲜干质量测量: 取成熟期各处理烤烟烟叶、茎和根以及成熟期青贮玉米地上部分和根, 称量样品鲜质量, 样品杀青烘干后称量样品干质量。

作物光合参数测定: 采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪, 在烤烟成熟期和玉米拔节期选择晴朗的上午 (9:00—11:00) 测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度。

作物物质色素含量测定: 采用 95% 乙醇浸提法^[13]测定成熟期烤烟和拔节期玉米叶片质体色素含量。

2 结果与分析

2.1 氮肥配施生物炭对套种作物鲜干质量的影响

2.1.1 对烤烟成熟期各器官鲜干质量的影响

由表 1 可知: 施氮量对烤烟烟叶和茎鲜质量有极显著影响, 对烟根鲜质量有显著影响; 生物炭对茎鲜质量有显著影响; 二者互作对烤烟茎鲜质量有极显著影响。 B_1N_0 处理的各部位鲜质量均为最低。在施用氮肥的处理中, 添加生物炭的处理各部位鲜质量更高, B_1N_2 处理的烟叶和根鲜质量最高, B_1N_1 茎鲜质量最高。说明生物炭和氮肥配施的处理有利于物质积累, 单独施用生物炭而不施氮肥的处理表现最差。

由表 2 可知: 施氮量对烤烟茎和根干质量有极显著影响, 对烟叶干质量有显著影响; 生物炭

表 1 不同处理烤烟成熟期单株烤烟烟叶、茎和根鲜质量

Tab. 1 Fresh weight of per plant flue-cured tobacco leaf, stem and root at maturity stage with different treatments g			
处理 treatment	叶 leaf	茎 stem	根 root
B_0N_0	202.00±36.21 b	105.03±13.97 cd	21.19±8.27 c
B_0N_1	641.02±255.91 ab	284.69±110.23 bcd	53.09±30.23 bc
B_0N_2	822.86±28.21 a	336.89±38.85 ab	112.10±10.21 ab
B_1N_0	190.14±57.56 b	78.89±31.51 d	13.58±6.45 c
B_1N_1	799.04±179.97 a	515.93±70.48 a	114.22±50.34 ab
B_1N_2	917.03±1.84 a	317.61±18.62 abc	126.40±20.40 a
生物炭 biochar	NS	*	NS
氮 nitrogen	**	**	*
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	**	NS

注: B_0 . 不添加生物炭; B_1 . 添加3%生物炭; N_0 ~ N_2 . 氮肥施用量(烤烟+青贮玉米)分别为0+0、52.5 kg/hm²+100 kg/hm²和105 kg/hm²+200 kg/hm²; 同列不同小写字母代表 $P<0.05$ 水平下的差异; **. $P\leq 0.01$; *. $P\leq 0.05$; NS为差异不显著; 下同。

Note: B_0 . without biochar addition; B_1 . with 3% biochar; N_0 ~ N_2 . nitrogen fertilizer application rates (flue-cured tobacco+silage corn) were 0+0, 52.5 kg/hm²+100 kg/hm² and 105 kg/hm²+200 kg/hm², respectively; different letters in the same column represent differences at the level of $P<0.05$; **. $P\leq 0.01$; *. $P\leq 0.05$; NS is not significant; the same as below.

表 2 不同处理烤烟成熟期单株烤烟烟叶、茎和根干质量

Tab. 2 Dry weight of per plant flue-cured tobacco leaf, stem and root at maturity stage with different treatments g			
处理 treatment	叶 leaf	茎 stem	根 root
B ₀ N ₀	39.80±2.92 b	15.57±2.67 c	9.58±6.56 b
B ₀ N ₁	108.33±55.21 ab	47.87±22.53 b	31.66±24.91 ab
B ₀ N ₂	140.67±1.33 a	55.72±3.44 b	55.29±3.01 ab
B ₁ N ₀	34.53±9.86 b	11.73±4.63 c	6.49±3.15 b
B ₁ N ₁	135.31±48.92 a	93.71±15.80 a	61.74±28.13 a
B ₁ N ₂	145.83±29.33 a	53.32±5.43 b	74.71±26.16 a
生物炭 biochar	NS	*	NS
氮 nitrogen	*	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	**	NS

对茎干质量有显著影响；二者互作对烤烟茎干质量有极显著影响。不施氮肥处理的干质量较低，且 B₁N₀ 处理干质量最低，表明单独施用生物炭不利于烤烟的物质积累；B₁N₁ 处理的叶、茎和根干质量比 B₀N₁ 处理分别提高 24.91%、95.76% 和 95.01%，而 B₀N₂ 与 B₁N₂ 处理的干质量间无显著差异，说明在减氮施肥时生物炭的作用更加明显，常规施肥水平下，添加生物炭对烤烟的物质积累无明显作用。

2.1.2 对青贮玉米成熟期鲜干质量的影响

由表 3 可知：施氮量对成熟期青贮玉米鲜质量有极显著影响，生物炭与氮肥的交互作用显著影响其根鲜质量。B₁N₀ 处理的鲜质量显著低于其他处理，这可能是由于仅施用生物炭会将土壤已有养分完全吸收，导致青贮玉米的物质积累不足。生物炭配施氮肥的处理间存在差异，当施氮量为 N₂ 水平时，生物炭的添加使玉米地上部分、根和全株的鲜质量分别提高 5.58%、65.73% 和 9.93%。而 B₀N₁ 和 B₁N₁ 间无显著差异说明生

物炭减氮配施对青贮玉米鲜质量无显著影响。

由表 4 可知：施用氮肥对成熟期青贮玉米干质量有极显著影响，生物炭与氮肥互作对青贮玉米干质量有显著影响。B₁N₀ 处理的干质量显著低于其他处理，B₁N₂ 处理即生物炭搭配常规施氮玉米地上部分、根和全株的干质量均最高。

2.2 氮肥配施生物炭对作物物质体色素含量的影响

2.2.1 对旺长期烤烟质体色素含量的影响

由表 5 可知：生物炭对烤烟烟叶叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量有显著影响，对总叶绿素含量有极显著影响；氮肥对各质体色素含量都有极显著影响。不同处理下各项指标的大小顺序为 B₁N₂>B₀N₂>B₁N₁>B₀N₁>B₁N₀>B₀N₀，添加生物炭的处理均高于未添加的处理，说明生物炭与氮肥配施对烤烟叶绿素积累有积极作用。

2.2.2 对拔节期青贮玉米叶片叶绿素含量的影响

由表 6 可知：氮肥的施用对青贮玉米叶绿素含量有极显著影响；生物炭和氮肥互作对青贮玉米叶片叶绿素含量无显著影响。相同生物炭处理

表 3 不同处理成熟期单株青贮玉米鲜质量

Tab. 3 Fresh weight of per plant silage corn under different treatments g			
处理 treatment	地上部分 aboveground part	根 root	全株 whole plant
B ₀ N ₀	232.92±38.48 b	18.74±7.74 c	251.66±39.20 b
B ₀ N ₁	389.46±80.00 a	26.02±4.59 bc	415.48±78.75 a
B ₀ N ₂	421.67±104.84 a	32.86±8.10 b	454.53±102.33 a
B ₁ N ₀	76.50±10.32 c	5.32±3.12 d	81.82±12.71 c
B ₁ N ₁	375.06±86.65 a	30.14±9.58 b	405.20±80.88 a
B ₁ N ₂	445.20±93.6 a	54.46±7.24 a	499.66±100.90 a
生物炭 biochar	NS	NS	NS
氮 nitrogen	**	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	*	NS

表 4 不同处理成熟期单株青贮玉米干质量

Tab. 4 Dry weight of per plant silage corn under different treatments g

处理 treatment	地上部分 aboveground part	根 root	全株 whole plant
B ₀ N ₀	56.51±9.05 b	8.90±2.75 c	65.41±9.27 c
B ₀ N ₁	98.23±15.67 a	13.74±1.23 b	111.97±15.27 b
B ₀ N ₂	95.56±23.44 a	17.34±5.38 b	112.90±23.25 b
B ₁ N ₀	24.64±3.39 c	3.42±1.78 d	28.06±4.70 d
B ₁ N ₁	93.42±13.26 a	14.88±3.08 b	108.30±11.78 b
B ₁ N ₂	108.78±12.78 a	24.10±3.94 a	132.88±15.68 a
生物炭 biochar	NS	NS	NS
氮 nitrogen	**	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	*	*	*

表 5 不同处理烤烟烟叶的质体色素含量

Tab. 5 Plastid pigment content of flue-cured tobacco under different treatments mg/g

处理 treatment	叶绿素a含量 chlorophyll a content	叶绿素b含量 chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 carotenoid content	总叶绿素含量 total chlorophyll content
B ₀ N ₀	0.680±0.073 c	0.152±0.017 b	0.272±0.023 c	0.832±0.090 c
B ₀ N ₁	1.113±0.351 b	0.196±0.097 b	0.385±0.126 abc	1.310±0.448 abc
B ₀ N ₂	1.683±0.626 a	0.353±0.048 b	0.588±0.202 ab	2.036±0.774 ab
B ₁ N ₀	0.777±0.047 c	0.157±0.036 b	0.292±0.037 bc	0.933±0.011 bc
B ₁ N ₁	1.648±0.375 a	0.358±0.137 a	0.576±0.084 ab	2.006±0.513 ab
B ₁ N ₂	1.881±0.239 a	0.394±0.021 a	0.623±0.124 a	2.275±0.218 a
生物炭 biochar	*	*	*	**
氮 nitrogen	**	**	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	*	NS	NS

表 6 不同处理青贮玉米的叶绿素含量

Tab. 6 Chlorophyll content of silage corn under different treatments mg/g

处理 treatment	叶绿素a含量 chlorophyll a content	叶绿素b含量 chlorophyll b content	总叶绿素含量 total chlorophyll content
B ₀ N ₀	0.888±0.151 c	0.208±0.052 c	1.096±0.202 c
B ₀ N ₁	1.324±0.385 b	0.299±0.086 b	1.622±0.469 b
B ₀ N ₂	1.620±0.086 ab	0.363±0.024 ab	1.983±0.108 ab
B ₁ N ₀	0.533±0.057 d	0.100±0.017 d	0.632±0.071 d
B ₁ N ₁	1.484±0.289 ab	0.333±0.076 ab	1.816±0.363 ab
B ₁ N ₂	1.810±0.393 a	0.399±0.103 a	2.210±0.495 a
生物炭 biochar	NS	NS	NS
氮 nitrogen	**	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	NS	NS

间，叶绿素含量随施氮量的增加而增加；B₁N₀ 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均显著低于其他处理，表明只添加生物炭不施氮肥对青贮玉米的光合色素积累不利。

2.3 氮肥配施生物炭对作物光合参数的影响

2.3.1 对烤烟成熟期叶片光合参数的影响

由表 7 可知：添加生物炭和施用氮肥对烤烟

成熟期净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率有极显著影响；二者互作可极显著影响胞间 CO₂ 浓度。相同施氮水平下的处理，添加生物炭能够提高净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，降低胞间 CO₂ 浓度，且 B₁N₂ 和 B₁N₁ 在各项参数中都与其对应的不添加生物炭的处理有显著差异。不施氮肥的 2 个处理的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和气

表 7 不同处理烤烟的光合参数
Tab. 7 Photosynthetic parameters of flue-cured tobacco with different treatments

处理 treatment	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) net photosynthetic rate	胞间CO ₂ 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) intercellular CO ₂ concentration	气孔导度/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) stomatal conductance	蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) transpiration rate
B ₀ N ₀	8.380±1.005 c	381.853±3.920 a	0.512±0.051 d	6.797±0.300 d
B ₀ N ₁	9.198±0.562 c	372.333±3.615 b	0.587±0.273 c	7.768±0.381 c
B ₀ N ₂	11.013±0.438 b	349.249±3.521 c	0.638±0.164 b	8.227±0.359 b
B ₁ N ₀	8.458±0.686 c	376.317±4.517 ab	0.530±0.268 d	7.683±0.342 b
B ₁ N ₁	10.483±0.290 b	346.831±9.475 c	0.672±0.155 ab	8.323±0.220 b
B ₁ N ₂	13.000±0.591 a	291.500±7.232 d	0.708±0.034 a	8.927±0.756 a
生物炭 biochar	**	**	NS	**
氮 nitrogen	**	**	NS	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	NS	**	NS	NS

孔导度差异均不显著。

2.3.2 对拔节期青贮玉米叶片光合参数的影响

由表 8 可知：生物炭对青贮玉米净光合速率、气孔导度和蒸腾速率有显著影响；施氮量对各项光合参数都有极显著影响；二者的互作效应极显著影响净光合速率，显著影响胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率。B₁N₀ 处理的各光合参数均为最低，表明单独施用生物炭不利于后茬青贮玉米生长；在除 N₀ 外的相同施氮水平下的处理中，施用生物炭对各项参数都有不同程度的提高，且 B₁N₁ 处理的提高幅度最大，说明生物炭需要与氮肥配施才能发挥作用。

表 8 不同处理青贮玉米光合参数
Tab. 8 Photosynthetic parameters of silage corn under different treatments

处理 treatment	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) net photosynthetic rate	胞间CO ₂ 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) intercellular CO ₂ concentration	气孔导度/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) stomatal conductance	蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) transpiration rate
B ₀ N ₀	15.659±1.263 c	112.652±17.200 ab	0.501±0.048 c	1.670±0.202 c
B ₀ N ₁	21.230±0.256 b	122.335±15.472 a	0.666±0.012 b	2.253±0.021 b
B ₀ N ₂	27.094±2.125 a	152.415±31.166 a	0.762±0.058 ab	2.573±0.227 ab
B ₁ N ₀	12.328±2.940 c	42.195±48.994 b	0.452±0.054 c	1.601±0.186 c
B ₁ N ₁	27.970±2.503 a	137.941±16.242 a	0.857±0.107 a	2.890±0.315 a
B ₁ N ₂	30.091±1.534 a	168.208±26.192 a	0.873±0.089 a	2.945±0.262 a
生物炭 biochar	*	NS	*	*
氮 nitrogen	**	**	**	**
生物炭×氮 biochar×nitrogen	**	*	*	*

3 讨论

3.1 氮肥配施生物炭对套作作物鲜干质量的影响

鲜干质量可以预估作物的产量，对烤烟和青贮玉米产量都有较大影响，大多数研究认为添加生物炭对作物的物质积累与产量有积极作用^[14-16]。本研究中生物炭与氮肥配施对烤烟各部位鲜质量和干质量有积极作用，这与刘新源等^[17]的研究结果一致；李静静等^[18]认为：与减量氮肥配施相比，生物炭搭配常规施氮对鲜干质量有更好的提高效果，本研究与其结果相同。本研究中 B₁N₀ 处理的干物质积累量低于 B₀N₀，这可能是由于生

物炭的强吸附性将土壤原有养分吸附，造成 B₁N₀ 处理的养分不足，这一结果也与已有研究^[19]一致。

本研究表明：生物炭与氮肥配施的处理对青贮玉米地上部分的物质积累无显著作用，这与朱浩宇等^[20]的研究结果一致；而 B₁N₀ 处理的干物质积累量最低的原因可能也是生物炭将土壤已有养分吸附所致。综上所述，生物炭对烤烟的干物质积累量有一定作用，可能是生物炭具有缓释氮肥的作用，从而保证了烤烟各生长期所需氮肥量，但要注意与氮肥的配施比例。针对青贮玉米而言，添加生物炭对干物质积累并无显著的作

用, 但可以减少氮肥的施用量; 但在养分贫瘠的土壤上施用生物炭有可能会起反作用。

3.2 氮肥配施生物炭对套作作物叶片质体色素含量的影响

质体色素与植物光合作用密切相关, 烤烟烟叶质体色素含量对烤烟的品质有很大影响^[21]; 青贮玉米的叶绿素含量与其物质积累有较大关系^[22]。本研究表明: 各处理对烤烟叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素的含量影响一致, 均为 $B_1N_2 > B_0N_2 > B_1N_1 > B_0N_1 > B_1N_0 > B_0N_0$, 这可能是由于烤烟烟叶质体色素含量与叶片氮素营养之间存在密切关系^[23], 生物炭的添加提高了烟株对氮的吸收能力。本研究中生物炭与氮肥配施的处理各质体色素含量提升较为明显, 特别是生物炭搭配减氮施肥的处理, 各质体色素含量分别提高 48.07%、82.65%、49.61% 和 53.13%。生物炭搭配常规施肥处理的各质体色素含量最高, 这与刘领等^[24]的研究结果一致。

本研究中生物炭与氮肥配施的处理对青贮玉米叶片叶绿素含量有提高作用, 这和已有研究结果^[25]相同, 且土壤施氮量越高, 青贮玉米叶片的叶绿素含量越高。这说明生物炭的添加能够增加植株对氮肥的吸收, 从而提高叶绿素含量。卢晋晶等^[26]研究认为: 生物炭与氮肥配施与否都可提高玉米叶片的叶绿素含量, 而本研究只添加生物炭不施用氮肥处理的玉米叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量显著低于其他处理, 这可能是由于生物炭种类及玉米品种不同所致。综上所述, 生物炭配施氮肥对烤烟烟叶和青贮玉米叶片的色素含量有提高作用, 说明在同一施氮水平下, 添加生物炭有利于烤烟烟叶香气前体物的合成, 且适宜的减氮量对烤烟香气前体物的积累影响不显著。因此, 在增施生物炭时, 可以适当减少氮肥, 一方面是因为生物炭本身具有一定的肥力水平; 另一方面是因为生物炭的缓释氮肥作用, 减少氮肥流失, 提高氮肥利用率。在生物炭和氮肥施用比例方面, 其前提是土壤本身需要有合适的氮素养分, 同时生物炭与氮肥的配施比例也需要长期的试验来验证。青贮玉米对氮肥的需求与烤烟不同, 生物炭对套作系统不同作物的作用也不同, 在施用时需要考虑青贮玉米的需肥规律, 才能使生物炭在烤烟/青贮玉米套种系统中发挥作用。

3.3 氮肥配施生物炭对套作作物光合参数的影响

光合作用是植株物质积累和能量代谢的源泉, 是光对植株的直接作用^[27]。烤烟的产量和品质形成依赖光合作用^[28], 青贮玉米的产量与光合速率呈正相关趋势^[29]。本研究中, 除胞间 CO_2 浓度外, B_1N_2 处理的其他光合参数高于其他处理。施氮水平越高, 烟叶的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率越高, 胞间 CO_2 浓度越低; 同一施氮水平下, 添加生物炭处理的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率更高, 胞间 CO_2 浓度更低。烟叶的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的变化趋势与葛少华^[30]的研究结果一致, 但胞间 CO_2 浓度与其相反, 这可能是由于引起胞间 CO_2 浓度变化的原因不同所致^[31]。综合来看, 土壤氮素水平越高的处理光合作用强度越强, 与李彩斌等^[32]的研究结果相同, 表明生物炭的添加对烤烟光合作用强度有积极作用, 可能是由于生物炭的添加提高了烤烟氮素吸收利用效率, 使得烟叶氮素含量上升, 进而提高烟叶的光合作用强度。

本研究中 B_1N_0 处理下青贮玉米的光合参数低于其他处理, 说明单独施用生物炭不利于青贮玉米的光合作用。除 B_1N_0 处理外, 添加生物炭的处理中施氮水平越高, 光合参数越高; 同一施氮水平下, 添加生物炭处理的光合参数更高。生物炭与氮肥配施中, B_1N_1 处理各项光合参数的提高较 B_0N_1 处理明显, 各项最高值为 B_1N_2 处理, 这是因为 B_1N_2 处理添加的生物炭使土壤氮素储量提高, 对光合作用强度有积极作用, 这与王久龙等^[33]的研究结果一致。综上所述, 生物炭与氮肥配施对烤烟和青贮玉米的光合作用强度有提高作用, 且生物炭搭配常规施氮量表现最佳。

4 结论

在本研究条件下, 氮肥配施生物炭对烤烟及青贮玉米的鲜干质量有积极作用。添加生物炭能提高烟叶质体色素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率; 而生物炭配施氮肥可以提高青贮玉米的光合作用。其中, 以生物炭搭配常规施氮处理对提高烤烟物质积累量、增强青贮玉米光合作用效果最好, 生物炭搭配减半氮肥处理次之。因此, 生物炭搭配减氮施肥能够起到降低氮肥施用量的作用, 但具体氮肥的减少量需要根据土壤类型和生物炭添加量来做更准确的研究。

[参考文献]

- [1] 肖继兵, 孙占祥, 刘志, 等. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 159. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2017.04.16.
- [2] 李健娜, 严力蛟, 黄云. 我国水土流失的成因、危害与防治研究[C]//首届长三角科技论坛——生态环境与可持续发展分论坛论文集. 杭州: 浙江省科学技术协会, 2004.
- [3] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 8. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20160703.
- [4] 葛少华, 丁松爽, 杨永锋, 等. 生物炭与化肥氮配施对土壤氮素及烤烟利用的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 84. DOI: 10.16472/j.chinatobacco.2017.282.
- [5] KIM J H, YOO G Y, KIM D G, et al. Combined application of biochar and slow-release fertilizer reduces methane emission but enhances rice yield by different mechanisms[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 117: 57. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.05.006.
- [6] AGE GNEHU G, BASS A M, NELSON P N, et al. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 295. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.054.
- [7] 万海涛. 烤烟发育和产量品质及植烟土壤理化性状对生物炭的响应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [8] 郭文韬. 中国间套种的历史发展[J]. 云南农业科技, 1986(2): 5.
- [9] 郭美玉. 减氮对番茄老株更新套种菜豆产量及土壤化学性状的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [10] 蒋士东, 周冀衡, 高迟奎, 等. 文山地区烤烟合理套种作物及其时间的研究[J]. 核农学报, 2014, 28(7): 1334. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2014.07.1334.
- [11] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米—大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 642. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2015.00642.
- [12] 张冠华, 牛俊, 孙金伟, 等. 土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(1): 28. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2018.01.004.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 张广雨, 褚德朋, 刘元德, 等. 生物炭及海藻肥对烟草生长、土壤性状及青枯病发生的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(5): 15. DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2019.05.003.
- [15] 毛娟, 何晓冰, 许跃奇, 等. 生物炭基肥对豫中烤烟产质量的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(2): 48. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2019.02.007.
- [16] 殷大伟, 金梁, 郭晓红, 等. 生物炭基肥替代化肥对砂壤土养分含量及青贮玉米产量的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 19. DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2019.04.005.
- [17] 刘新源, 刘国顺, 刘宏恩, 等. 生物炭施用量对烟叶生长、产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(2): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.02.014.
- [18] 李静静, 常建伟, 任天宝, 等. 基于蒸汽爆破技术的烟秆炭对烤烟生长及烟叶品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 99. DOI: 10.11838/sfsc.20170415.
- [19] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 生物炭与氮肥配施对烤烟生长及烟叶主要化学成分的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 159. DOI: 10.7668/hbxb.2016.05.024.
- [20] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1921. DOI: 10.13227/j.hjkk.201909153.
- [21] 周冀衡, 王勇, 邵岩, 等. 产烟国部分烟区烤烟质体色素及主要挥发性香气物质含量的比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(2): 128. DOI: 10.3321/j.issn:1007-1032.2005.02.005.
- [22] 曹娜, 于海秋, 王绍斌, 等. 高产玉米群体的冠层结构及光合特性分析[J]. 玉米科学, 2006, 14(5): 94. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0906.2006.05.025.
- [23] 李佛琳, 赵春江, 王纪华, 等. 应用叶绿素计诊断烤烟氮素营养状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 136. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2007.01.023.
- [24] 刘领, 王艳芳, 宋久洋, 等. 生物炭与氮肥减量配施对烤烟生长及土壤酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(2): 62. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2016.02.013.
- [25] 刘领, 悦飞雪, 李继伟, 等. 秸秆生物炭和鸡粪对铅胁迫下玉米生长和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 262. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.041.
- [26] 卢晋晶, 邵春花, 李建华, 等. 秸秆生物炭对黄土区农田土壤养分和玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(33): 92. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb16090012.
- [27] 战吉宸, 黄卫东, 王利军. 植物弱光逆境生理研究综述[J]. 植物学报, 2003, 20(1): 43. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3466.2003.01.005.
- [28] 张生杰, 黄元炯, 任庆成, 等. 氮素对不同品种烤烟叶片衰老、光合特性及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 668. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2010.0098.
- [29] 白岚方, 张向前, 王瑞, 等. 不同玉米品种光合特性及青贮产量品质的差异性研究[J]. 作物杂志, 2020(1): 160. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2020.01.025.
- [30] 葛少华. 生物炭与化肥氮配施对植烟土壤特性和烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [31] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间CO₂浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 64. DOI: 10.13592/j.cnki.pppj.2010.01.007.
- [32] 李彩斌, 符德龙, 曹廷茂, 等. 炭基复混肥配方对土壤酶和烤烟生理、养分积累及产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2019(7): 48. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2019.007.013.
- [33] 王久龙, 王振华, 李文昊, 等. 施氮量对复播青贮玉米光合特性和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 250. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2017.05.37.

责任编辑: 何馨成