

生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应

吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 冯志波, 孙媛媛, 修立群, 张伟明, 陈温福

引用本文:

吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 冯志波, 孙媛媛, 修立群, 张伟明, 陈温福. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 37–45.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0299>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响

邢钰媛, 姜运生, 王坤, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 451–463 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0879>

玉米芯生物炭对大豆的生物学效应

张伟明, 管学超, 黄玉威, 孙大荃, 孟军, 陈温福

农业环境科学学报. 2015(2): 391–400 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.025>

玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响

王雅梅, 许彦骁, 王亚露, 李静, 张海芳, 杨殿林, 赵建宁, 轩清霞

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2587–2595 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0348>

连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应

张伟明, 吴迪, 张鉉贵, 黄玉威, 管学超, 陈温福

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1843–1853 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0138>

不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响

刘迎霞, 姜运生, 王坤, 邢钰媛, 刘健, 苏磊, 汤丽玲

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2603–2613 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0317>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 37–45.

WU D, YUAN H C, GU W Q, et al. Photosynthetic physiological metabolism and yield response of continuous soybean cropping mediated by long-term application of biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 37–45.



开放科学 OSID

生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应

吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 冯志波, 孙媛媛, 修立群, 张伟明*, 陈温福*

(沈阳农业大学, 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要:为明确生物炭长期存在条件下对连作大豆光合生理和产量的调控效应及作用关系,探讨其应用可行性,采用大田长期定位试验方法,设置CK(施肥,不施炭)、B1(生物炭 12 t·hm⁻²)、B2(生物炭 24 t·hm⁻²)和 B3(生物炭 48 t·hm⁻²)4个处理,研究了施用生物炭(9年)对连作大豆进行光合作用的物质基础、生理功能、产物积累以及产量等方面的影响。施用生物炭可提升连作大豆叶绿素含量(Chla、Chlb)、叶面积及叶面积指数,明显增强连作大豆的光合作用能力,其净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、水分利用效率(WUE)明显提高,胞间CO₂浓度(Ci)降低,其中B3处理的Pn、Tr和Gs分别比CK处理提高15.44%、14.98%和117.73%。同时,生物炭介导的连作大豆PS II反应中心内禀光能转换效率(Fv/Fm)、潜在光化学效率(Fv/Fo)及热耗散量子比率(Fo/Fm)提高,进行光合的植物效率提升。生物炭处理的连作大豆可溶性蛋白、可溶性糖、蔗糖含量及叶片干物质质量均有不同程度提高,光合产物积累增加,且最终产量表现为生物炭处理均高于CK处理,其中B2、B3处理的大豆产量分别比CK处理提高7.69%、15.38%。相关分析表明,生物炭长期介导的连作大豆产量响应与Chla、Pn、Tr、Gs以及叶片可溶性糖含量密切相关,是促进连作大豆产量提升的重要因素。施用生物炭可增强大豆光合生理功能,促进光合产物积累,提高连作大豆产量。

关键词:生物炭;大豆;光合作用;连作栽培

中图分类号:S565.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0037-09 doi:10.11654/jaes.2022-0299

Photosynthetic physiological metabolism and yield response of continuous soybean cropping mediated by long-term application of biochar

WU Di, YUAN Hechong, GU Wenqi, FENG Zhibo, SUN Yuanyuan, XIU Liqun, ZHANG Weiming*, CHEN Wenfu*

(Shenyang Agricultural University, Biochar Engineering & Technology Research Center of Liaoning Province, Shenyang 110866, China)

Abstract: To clarify the effects of biochar on the regulation of photosynthetic physiology, yield of continuous cropping soybean and its relationships under long-term conditions and to explore the feasibility of biochar application, four treatments were set up: CK (fertilizer application, no biochar application), B1 (biochar 12 t·hm⁻²), B2 (biochar 24 t·hm⁻²), and B3 (biochar 48 t·hm⁻²) in a long-term field trial. The effects of biochar application (9 years) on the material basis of photosynthesis, physiological functions, product accumulation, and yield of continuous cropping soybean were investigated. The results showed that the application of biochar enhanced the chlorophyll content (Chla, Chlb), leaf area, and leaf area index of continuous cropping soybean significantly. At the same time, biochar enhanced the photosynthetic capacity of continuous cropping soybean, with a net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (Gs), and water-use efficiency significantly increased, and the intercellular CO₂ concentration (Ci) decreased. Additionally, the Pn, Tr,

收稿日期:2022-03-28 录用日期:2022-07-13

作者简介:吴迪(1996—),女,辽宁法库人,博士研究生,从事生物炭与土壤改良、作物高产等应用基础研究。E-mail:1484184496@qq.com

*通信作者:张伟明 E-mail:biochar_zwm@syau.edu.cn; 陈温福 E-mail:wfchen5512@126.com

基金项目:黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090300);生物炭基复合肥料研制与示范项目(2017YFD0200802-02);稻田生物炭基培肥产品的研制与施用技术项目(2016YFD0300904-4)

Project supported: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28090300); State Key Special Program of Biochar-Fertilizer Technology Research and Industrialization Demonstration (2017YFD0200802-02); Biochar-based Fertilizer Development and Application Technology for Soil Fertility Improvement in Rice (2016YFD0300904-4)

and Gs of the B3 treatment increased by 15.44%, 14.98%, and 117.73%, respectively, compared to the CK. Meanwhile, the biochar-mediated endowment light energy conversion efficiency (Fv/Fm), potential photochemical efficiency (Fv/Fo), and heat dissipation quantum ratio (Fo/Fm) in the PS II reaction center of continuous cropping soybean increased, and the plant efficiency of soybean photosynthesis was enhanced. Further, the soluble protein, soluble sugar, sucrose content, and leaf dry matter weight of the biochar-treated continuous cropping soybeans increased to varying degrees, and the accumulation of photosynthetic products increased. The final yields showed that the biochar treatments were higher than the CK, with the soybean yields of the B2 and B3 treatments being 7.69% and 15.38% higher than the CK, respectively. Further correlation analysis showed that the long-term biochar-mediated yield response of continuous soybean cropping was closely related to Chla, Pn, Tr, and Gs, as well as leaf soluble sugar content, important factors contributing to the yield enhancement of continuous soybean. Biochar application enhanced photosynthetic physiological functions of the soybean, promoted the accumulation of photosynthetic products, and increased the yield of the continuous cropping soybean.

Keywords: biochar; soybean; photosynthesis; continuous cultivation

大豆是我国乃至全球重要的粮油作物之一,在保障国家粮油安全中占据重要地位。我国大豆产量相对较低,大豆种植面积与产能提升受到严重制约,而植物体光合能力是决定光合产物积累及作物产量的重要因素^[1]。特别在大豆连作条件下,植物体光合作用受阻会直接影响产量形成^[2-3]。研究认为,连作可使作物根际微生态环境发生趋害变化,植物体水分、养分运输以及物质合成、代谢等生理过程受到明显抑制或损害^[4-5],作物光合生理活动减弱、光合能力下降,导致作物光合产物合成、积累受限,进而影响作物生长及产量形成。生物炭是近年国内外研究的热点,利用生物炭技术可将作物光合形成的“碳”,以稳定的碳形式(碳负效应)保存下来^[6],亦可改良土壤结构,改善土壤水、气、热、肥的环境条件,促进作物生长,提高产量^[7-9]。本研究旨在明确生物炭长期存在条件下对连作大豆光合生理代谢及产量的响应,揭示生物炭的长期农学效应及其调控作物生长的关键因子,为生物炭应用于大豆生产提供理论基础和依据,对促进大豆生产可持续发展具有重要的现实意义。

前人研究表明,生物炭对作物光合作用等生理功能的调控,是其重要的功效来源^[10]。生物炭的添加使植物光合速率提高了27.10%,气孔导度、蒸腾速率、叶绿素浓度分别提高了19.60%、26.90%、16.10%,促进了C3植物的光合作用,提高了生物量^[11]。生物炭对不同磷效率大豆的叶片净光合速率、叶绿素指数、氮平衡指数及可溶性糖、淀粉等均有正向影响,且该影响随施炭量增加而提高^[12]。Sarma等^[13]的研究表明,生物炭在提高小麦叶片叶绿素含量、净光合速率、叶片氮浓度的同时,还可以使生物量、籽粒总蛋白、碳水化合物和产量也明显提高。在不同的非生物胁迫条件下,生物炭对植物体光合作用亦有重要影响。Zoghi等^[14]的研究表明,在最低供水条件下,高施炭量

(30 g·kg⁻¹)可使植物光合作用、气孔导度分别提高38.00%、39.00%。在干旱或盐胁迫条件下,生物炭可促进植物光合作用、养分吸收和气体交换^[15],缓解干旱和盐胁迫对大豆产量和水分利用效率的负面影响^[16]。Huang等^[17]的研究表明,生物炭可通过维持较高的叶片相对含水量和较低的Na⁺/K⁺比值,以及增强作物光合作用来缓解盐胁迫,促进籽粒和产量形成。以上研究表明,生物炭对作物光合作用有重要影响,但在生物炭长期存在条件下连作对大豆光合生理代谢、产量等方面的调控作用尚不清楚,亦无相关报道。本研究通过大田长期定位试验,明确生物炭对连作大豆光合能力、产物积累及产量的调控效应及其作用关系,揭示生物炭的长期农学效应及其作物调控因子,为生物炭的农业应用提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验基于始于2013年的生物炭大田长期定位试验,试验区位于沈阳农业大学科研基地,该地属温带半湿润大陆性气候,全年平均降水量600~800 mm,全年无霜期148~180 d,试验于2021年(第9年)进行。供试土壤为棕壤土,其基本理化特性:有机质18.01 g·kg⁻¹,全氮1.46 g·kg⁻¹,全磷0.58 g·kg⁻¹,全钾18.35 g·kg⁻¹,碱解氮含量为88.00 mg·kg⁻¹,有效磷含量为18.80 mg·kg⁻¹,速效钾含量为83.50 mg·kg⁻¹,pH为5.46。大豆品种为铁丰40,由辽宁省铁岭市农业科学院提供。生物炭由辽宁金和福农业科技开发股份有限公司提供,其制备条件及基本理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

采用大田长期定位试验,随机区组排列设计,设置4个处理:常规施肥处理(施肥,不施炭)作为对照(CK);3个生物炭不同用量处理,分别为12、24、48 t·

表1 生物炭材料的基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of biochar

原料 Raw material	热解温度 Pyrolysis temperature/℃	粒径 Particle size/cm	pH	碳 Carbon/%	氮 Nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	磷 Phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	钾 Potassium/ (g·kg ⁻¹)	钙 Calcium/ (g·kg ⁻¹)	镁 Magnesium/ (g·kg ⁻¹)	铁 Iron/ (g·kg ⁻¹)	锰 Manganese/ (g·kg ⁻¹)
玉米秸秆	400~450	0.30~0.35	9.24	59.58	8.70	6.60	10.20	4.92	2.87	1.24	0.38

hm⁻²,记作B1、B2、B3。小区面积为24 m²,每个处理3次重复。常规施肥处理的肥料施用量为N 36 kg·hm⁻²、P 54 kg·hm⁻²、K 42 kg·hm⁻²(根据该大豆品种的推荐肥量)。在大豆种植第一年,将生物炭、肥料均匀混合施入土壤,然后进行翻地、播种等农事操作,其后年份不再施入生物炭,即一次性施入。在大豆生长期间,播种、除草、病虫害防治等栽培管理措施与当地常规管理方式相同,各处理条件一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合基础及生理特性

开花期是决定后期大豆产量形成的最重要时期^[18],在该时期选择天气晴朗的上午9:00—11:00,在每小区选取具有代表性且长势一致的10株大豆植株,采用便携式光合测定仪(LI-COR6400,美国)测定大豆功能叶片(倒三叶)的光合生理指标,包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)等。同时,在每小区选取有代表性且长势一致的5株大豆植株,用暗适应叶夹使叶片处于暗反应状态15 min后,在饱和脉冲光(3 000 μmol·m⁻²·s⁻¹)下暴露1 s,采用植物效率分析仪(Handy PEA,英国)测定荧光参数指标。

7月20日,取大豆主茎倒三叶鲜叶去除叶脉后备测,叶绿素含量相关测定采用分光光度法^[19-20]。同时,于每小区取1 m²的大豆植株叶片,测定叶面积,并计算叶面积指数,计算公式:

叶面积指数=单位土地上的总叶面积(m²)/单位土地面积(m²)。

1.3.2 光合产物形成与积累

在光合生理指标测定完成后,将叶片用液氮速冻后保存于-80℃超低温冰箱备测。采用蒽酮比色法测定可溶性糖和淀粉含量^[21],采用间苯二酚法测定蔗糖含量^[22],采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[23]。同时,于每小区选取3株长势一致的代表性大豆植株,取全部叶片放置于烘箱中,于105℃杀青0.5 h,然后置于80℃将叶片烘至质量恒定,用电子天秤测定叶片干质量,并记录相关数据。

1.3.3 大豆产量

10月4日,于大豆成熟期进行产量测定,按标准测产方法进行^[19]。

1.4 数据处理

采用Excel 2019和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析,采用单因素(One-way ANOVA)和Duncan法进行方差分析和多重比较。采用R 4.1.0软件进行产量与光合生理特性相关分析。利用Graphpad Prism 5.0软件制图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对连作大豆叶绿素合成及叶面积的影响

2.1.1 叶绿素含量

如表2所示,生物炭可提高大豆叶片叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素(a+b)的含量。其中,大豆叶片叶绿素a含量随施炭量增加而提高,B3、B2和B1处理分别比CK处理提高23.53%、17.94%和5.00%,且差异显著。中、高炭量处理(B2、B3)对叶绿素b有显著影响,B2、B3处理分别比CK处理提高7.92%、9.90%。叶绿素(a+b)含量表现为B3>B2>B1>CK,B3和B2处理分别比CK处理显著提高20.41%和13.60%。可见,施用生物炭可提高连作大豆叶绿素含量,且较高施炭量的作用更明显,生物炭为植物体进行光合作用提供了重要物质基础。

2.1.2 叶面积及叶面积指数

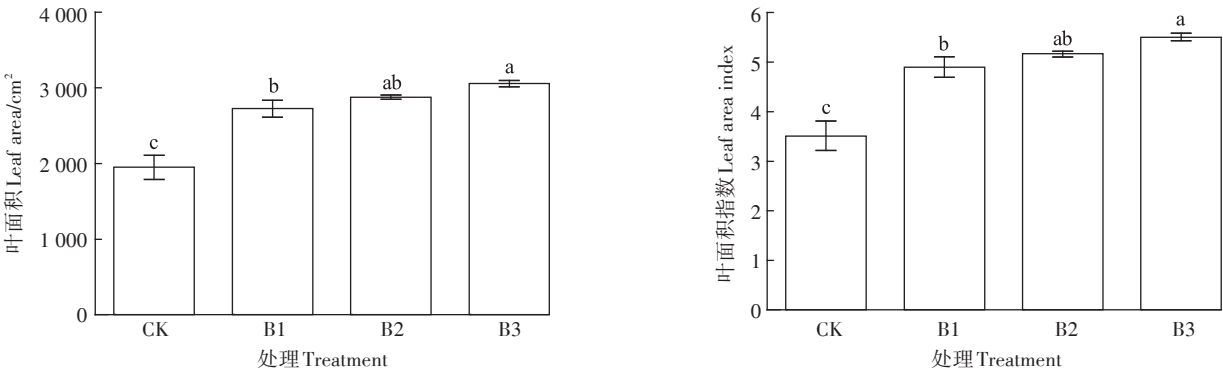
如图1所示,施用生物炭可显著提高大豆叶面积

表2 生物炭对连作大豆叶绿素含量的影响(mg·g⁻¹)

Table 2 Effect of biochar on soybean chlorophyll content under continuous cropping(mg·g⁻¹)

处理 Treatment	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	叶绿素(a+b) Chlorophyll(a+b)
CK	3.40±0.86d	1.01±0.02b	4.41±0.10c
B1	3.57±0.06c	0.95±0.01b	4.52±0.07c
B2	4.01±0.10b	1.09±0.04a	5.01±0.11b
B3	4.20±0.06a	1.11±0.04a	5.31±0.05a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same below

图1 生物炭对连作大豆叶面积及叶面积指数的影响

Figure 1 Effects of biochar on soybean leaf area and leaf area index under continuous cropping

及叶面积指数,且均表现为 $B3>B2>B1>CK$ 。B3、B2、B1处理的叶面积分别比CK处理显著提高54.57%、47.75%、40.09%,平均提高47.47%。B3、B2、B1处理的叶面积指数分别是CK处理的1.57、1.48、1.40倍。研究表明,施用生物炭有利于促进连作大豆叶片生长发育,为提高大豆光合利用率提供了先决条件。

2.2 生物炭介导的连作大豆光合生理响应

2.2.1 光合生理指标

由表3可知,生物炭处理的净光合速率、蒸腾速率均高于CK处理,其中B3处理的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,分别比CK处理提高15.44%、14.98%和117.73%,且差异显著,说明高施炭量对提升大豆光合能力的作用更明显。而对于胞间 CO_2 浓度,B2、B3处理均显著低于CK处理,表明高施炭量处理的大豆植物体对 CO_2 的利用加快,胞间 CO_2 加速扩散有利于促进大豆光合作用。

2.2.2 植物效率

植物效率是反映植物体进行光能转换效率的重要指标。 F_v/F_m 为PSⅡ反应中心内禀光能转换效率。由图2可知, F_v/F_m 表现为 $B3>B2>CK>B1$,B3处理的光能转换效率显著高于其他处理,表明高施炭量对提高植物

体光合作用能力具有重要作用。 F_v/F_o 为潜在光化学效率,B3、B2处理的 F_v/F_o 值分别比B1处理提高5.56%和4.00%。 F_o/F_m 为PSⅡ反应中心热耗散量子比率,B3处理的 F_o/F_m 分别比B1、CK处理提高4.56%、4.08%,且差异显著。总体上,施用生物炭对提升大豆植物效率具有一定促进作用,且高施炭量作用更明显。

2.2.3 水-温响应

如图3可知,B2处理的大豆叶片水分利用效率比CK处理显著提高22.20%,表明适宜的施炭量可提高大豆叶片水分利用效率,在满足作物光合代谢生理需求的同时,使植物体获得最优的水分调配和供应。对于叶片温度,生物炭处理均低于CK处理,其中B1、B3处理与CK处理差异显著,这有利于抑制叶片升温、蒸腾过快对植物生理进程及机体造成的伤害。

2.3 生物炭对连作大豆光合产物合成与积累的影响

2.3.1 营养物质合成

如图4所示,施用生物炭可显著提高大豆叶片可溶性蛋白含量,B3、B2和B1处理分别是CK处理的1.93、1.85倍和1.76倍,表明生物炭在提高大豆光合能力的同时,有效增强了氮代谢生理活动,促进了大豆营养物质的合成。可溶性糖含量表现为随施炭量的

表3 生物炭对连作大豆光合生理指标的影响

Table 3 Effects of biochar on soybean photosynthesis under continuous cropping

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate(Pn)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate(Tr)/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance(Gs)/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration(Ci)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
CK	29.60±1.82b	5.54±0.09b	179.67±17.10c	177.00±20.00a
B1	29.87±0.31b	5.61±0.18b	163.00±19.47c	187.00±11.15a
B2	32.27±1.29ab	5.95±0.17ab	275.33±15.65b	134.33±8.35b
B3	34.17±1.53a	6.37±0.06a	387.67±26.74a	123.67±7.26b

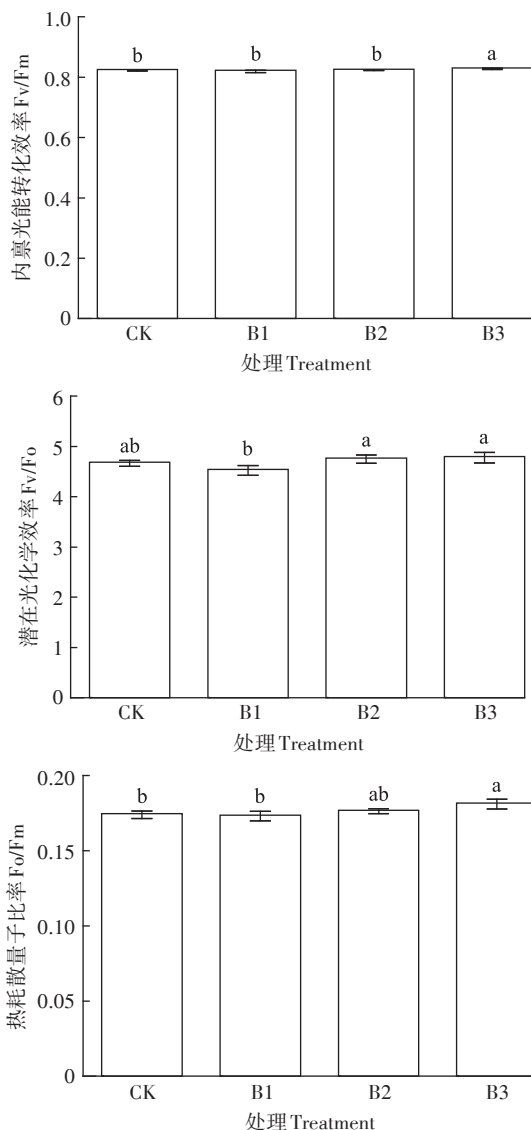


图2 生物炭对连作大豆植物效率的影响

Figure 2 Effects of biochar on soybean plant efficiency under continuous cropping

增加而提高, B2和B3处理分别比CK处理显著提高36.04%和57.37%,说明较高施炭量有利于促进光合产物合成。

2.3.2 光合产物积累

如表4所示, B3处理大豆叶片淀粉含量比CK处理显著提高9.47%,而B1、B2处理与CK处理无显著差异。而对于大豆叶片蔗糖含量,生物炭处理均显著高于CK处理,表现为随施炭量增加而提高, B1、B2和B3处理分别比CK处理提高29.12%、39.17%和58.91%,平均提高42.40%。可见,施用生物炭对促进大豆叶片光合产物(蔗糖)积累具有重要作用。

2.3.3 大豆叶片干物质量与产量

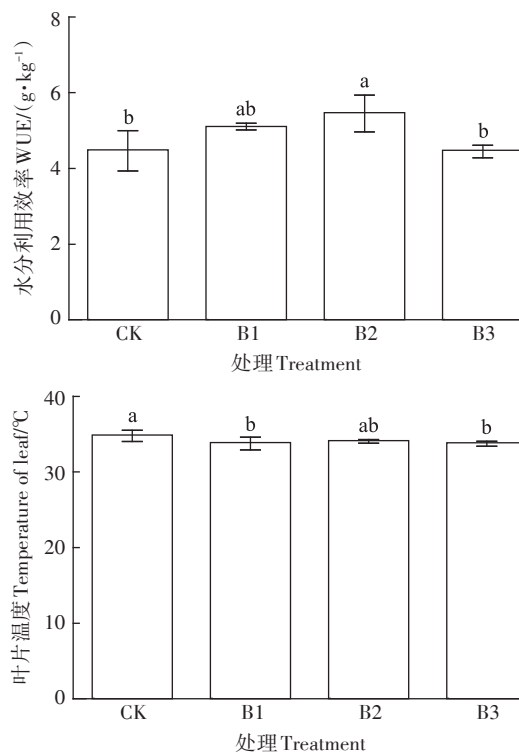


图3 生物炭介导的连作大豆叶片水分和温度响应

Figure 3 Biochar-mediated water and temperature response of soybean leaves under continuous cropping

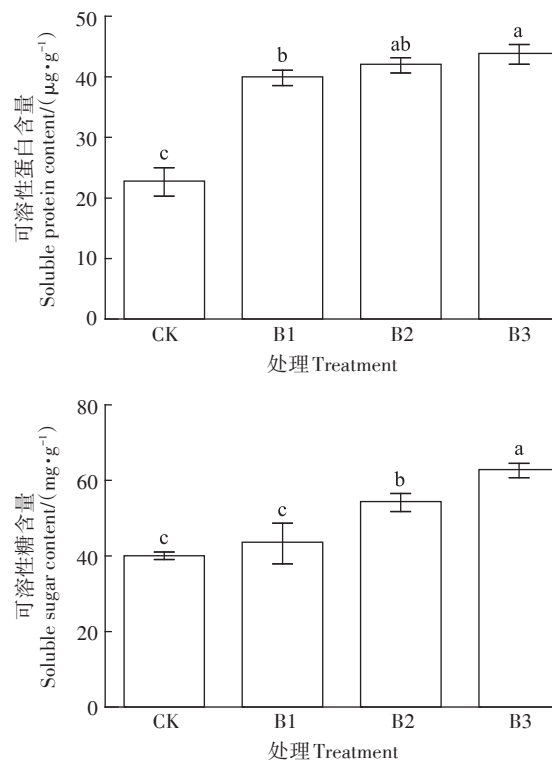


图4 生物炭对连作大豆可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

Figure 4 Effects of biochar on soybean soluble protein and soluble sugar content under continuous cropping

表4 生物炭对连作大豆光合产物积累的影响

Table 4 Effects of biochar on soybean photosynthetic product accumulation under continuous cropping

处理 Treatment	淀粉含量 Content of starch/(mg·g ⁻¹)	蔗糖含量 Content of sucrose/%
CK	20.90±2.15ab	16.2±1.26c
B1	19.21±0.45b	20.9±0.97b
B2	19.31±0.30b	22.6±0.10b
B3	22.88±0.60a	25.8±1.58a

如图5所示,施用生物炭可显著提高大豆叶片干物质质量,表现为随施炭量增加而提高,B1、B2、B3处理分别比CK处理提高41.77%、54.71%、58.77%,平均提高51.75%。由此可见,生物炭在提升大豆光合能力及产物积累的同时,有效增加了叶片干物质积累,为后期产量形成奠定了基础。大豆最终产量如图6所示,生物炭处理均高于CK处理,表现为随施炭量的增加而提高,其中B2、B3处理的大豆产量分别比CK处理显著提高7.69%、15.38%。

2.4 产量形成与光合生理特性的相关分析

相关分析结果(图7)表明,在生物炭长期存在条件下,连作大豆产量与叶绿素a、净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)以及可溶性糖含量(Ssug)呈显著正相关,对应的pearson相关系数分别为0.957、0.958、0.985、0.952和0.981($P<0.05$)。这进一步说明施用生物炭可通过提升大豆自身光合生理功能及其产物积累,对连作大豆产量产生重要影响。

3 讨论

3.1 生物炭对连作大豆光合生理指标的影响

理想的植物冠层是截获和有效利用光能的重要基础条件。本研究发现,施用生物炭可提高连作大豆叶面积及叶面积指数,形成可更多利用光能的群体冠层结构特征,为提高大豆光合能力及效率提供了良好的构型条件。诸多研究表明,生物炭可改良土壤结构,改善土壤水、气、热、肥等作物生长环境条件,促进作物根系生长以及植株对土壤养分、水分的吸收利用^[24],为叶片生长提供有效的“源”物质供应,从而促进叶片生长、增加叶面积、提高叶面积指数,为充分接收、利用光能提供了有利条件。

本研究还发现生物炭可提高连作大豆叶绿素含量以及净光合速率、蒸腾速率、气孔导度,降低胞间CO₂浓度,大豆光合能力明显提升。叶绿素是植物体

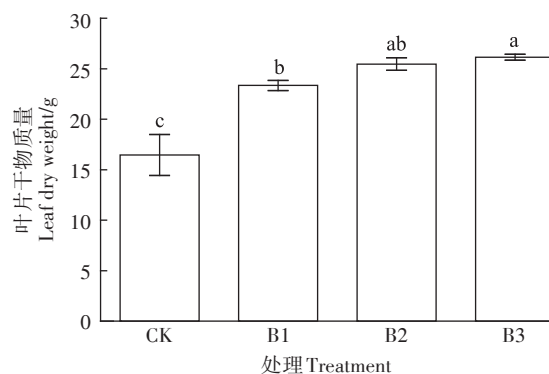


图5 生物炭对连作大豆叶片干物质质量的影响

Figure 5 Effects of biochar on dry matter weight of soybean leaves under continuous cropping

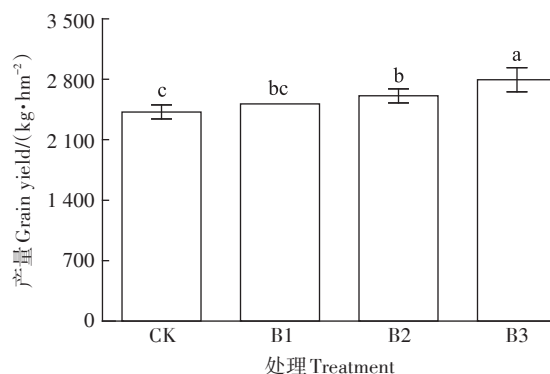
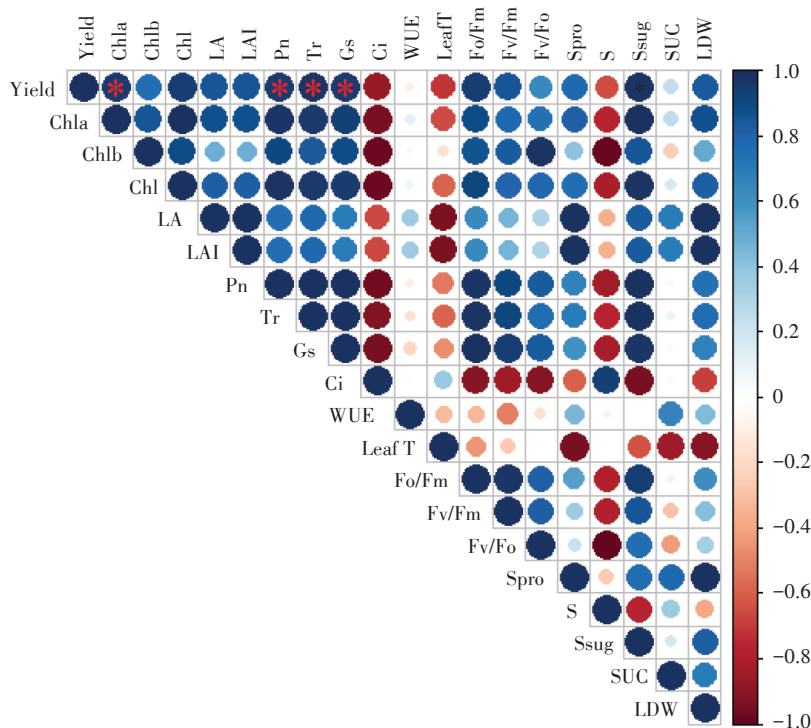


图6 生物炭对连作大豆产量的影响

Figure 6 Effects of biochar on soybean yield under continuous cropping

进行光合作用的重要载体,本研究中生物炭介导的连作大豆叶绿素a、b以及总叶绿素含量明显提高。一般认为,N、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn等养分元素是植物体参与叶绿素形成所必需的重要元素。研究表明,生物炭含有种类丰富的养分元素,其中包括N、P、K等大量元素以及Mg、Fe、Mn、Cu、Zn等植物体叶绿素合成所必需的中微量元素^[7],且由于生物炭比表面积大、吸附力强,可提高土壤大量养分元素和矿质元素含量^[25],从而为植物体叶绿素合成提供了充足的养分来源。另外,生物炭呈碱性,可提高土壤pH,影响土壤养分有效性,为植物体提供更多可利用的有效养分,从而促进植物体对养分的吸收和利用^[26],进而影响植物体叶绿素合成。

叶面积指数提高为提升植物体光能利用率创造了构型条件,而生物炭介导的植物体叶绿素增加,则为提高大豆光合生理能力提供了重要的代谢物质基础。另外,由于生物炭本身含有极其丰富的多微孔,



*代表两性状呈显著相关($P < 0.05$)。LA:叶面积;LAI:叶面积指数;WUE:水分利用效率;Leaf T:叶片温度;Spro:可溶性蛋白;S:淀粉;Ssug:可溶性糖;SUC:蔗糖;LDW:叶干物质质量

* represents a significant correlation between the two traits ($P < 0.05$). LA: Leaf area; LAI: Leaf area index; WUE: Water use efficiency; Leaf T: Leaf temperature; Spro: Soluble protein; S: Starch; Ssug: Soluble sugar; SUC: Sucrose; LDW: Leaf dry weight

图7 连作大豆产量形成与光合生理特性的相关分析

Figure 7 Correlation analysis of soybean yield formation and photosynthetic physiological characteristics under continuous cropping

且具有较强的吸附力,因此可增加土壤孔隙度,提高土壤通气透水性,提升土壤温度,改善土壤水、温、气等环境因子^[27],并进而影响大豆光合生理进程。特别地,生物炭可通过释放、吸持以及促进微生物分解、矿化等作用途径,提高土壤N、P、K等养分含量及其有效性^[24-25]。其中,K是植物体进行光合作用的必要元素,K匮乏可导致叶绿素含量下降、CO₂扩散受阻及羧化受限^[28-29],而生物炭对K的增促调控有效避免了K匮乏的负效应。P则是参与CO₂富集、卡尔文循环和组成电子传递系统蛋白质的主要元素,可影响植物光合速率和干物质积累^[30],生物炭对土壤P的促控作用,也为提高植物光合能力提供了养分基础和条件。此外,土壤有机质损失可导致作物光合作用和产量下降^[31-32],生物炭富碳,施入土壤可增加土壤碳汇,提高土壤有机质,从而促进植物光合作用。与此同时,本试验发现叶片水-温、胞间CO₂浓度和植物光合效率之间的协同作用,可能主要来源于生物炭的多微孔结构,该结构可提高土壤持水能力^[33],为大豆生长提供充足水分,从而提高叶片蒸腾速率、增加气孔导度

提供了驱动力,而蒸腾速率、气孔导度以及光合作用升高耗用更多CO₂,使叶片胞间CO₂浓度降低,同时代谢活动的增强,也进一步增加了热耗散,从而降低了叶片温度,这种协同响应使植物体处于高效光合状态。而进一步的研究发现,施用生物炭尤其是高施炭量处理的PS II反应中心内Fv/Fm、Fv/Fo和PS II反应中心Fo/Fm也明显提高,植物效率提升。叶绿素荧光参数变化反映植物叶绿体光系统PS I、PS II(主要是PS II)的光能吸收利用、传递及耗散过程,体现植物体光合的驱体变化及生理效率。本研究中,生物炭通过增加大豆光合代谢底物、扩大受光叶面积、提高光合速率来提高大豆光合生理能力,使大豆叶片避免强光胁迫而发生光抑制,提高PS II反应中心的光能转化率及其实际光合代谢能力,从而提高大豆光合的植物效率。

3.2 生物炭对连作大豆光合产物形成与积累的影响

碳、氮代谢是植物体最为重要的代谢途径,决定着光合产物的形成与积累。本试验表明,生物炭的输入可提高大豆叶片可溶性蛋白含量,说明氮代谢活跃

程度提高,植株氮代谢库增加^[34]。而可溶性糖、蔗糖和淀粉是植物碳代谢的主要产物,其含量变化与光合作用密切相关^[35]。本研究中,生物炭提高了大豆光合能力及效率,促使光合产物(碳水化合物)增加,同时土壤水分、养分等理化特性的改善,为可溶性糖、蔗糖及淀粉的合成、转化等提供了充足的代谢底物供应,从而增加了碳代谢产物,并进一步体现于叶片干物质积累的增加。

总体来看,施用生物炭可提高连作大豆光合代谢的基础(叶绿素含量及叶面积)、光合生理能力(净光合速率、蒸腾速率和气孔导度)及植物效率(光系统PS II的Fv/Fm、Fv/Fo和Fo/Fm),促进大豆光合产物积累,增加叶干物质量,从而提高连作大豆产量。有研究表明,在白浆土中施用生物炭可有效改良土壤,使大豆产量随连作年限增加而呈上升趋势^[8],而在黑土坡耕地连续施用2 a生物炭(50 t·hm⁻²),第二年的大豆产量比第一年提高15.23%^[36],这与本研究结果基本一致。通过相关分析进一步发现,生物炭长期存在条件下介导的连作大豆叶绿素a、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、可溶性糖含量与产量呈显著正相关,是影响连作大豆产量的重要因子。生物炭介导下的大豆光合生理正向、协同响应,是其促使连作大豆增产的重要途径,为促进大豆产能提升和可持续发展提供了新途径。

4 结论

(1)生物炭长期存在可提高连作大豆叶绿素含量、叶面积及叶片干物质量,为光合反应提供重要物质基础和条件。同时,生物炭可提高大豆净光合速率、蒸腾速率及光合植物效率(光系统PS II),降低胞间CO₂浓度,增强大豆光合生理功能。

(2)生物炭可提升大豆可溶性蛋白、可溶性糖及蔗糖含量,增加大豆光合产物积累,提高连作大豆产量,其中高炭量处理(48 t·hm⁻²)的增产作用更明显。

(3)生物炭介导的连作大豆叶绿素a含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及可溶性糖含量与产量呈显著正相关,是调控连作大豆增产的重要因子。生物炭可提高连作大豆光合能力及产量,对提升大豆种植面积和产能、促进大豆生产可持续发展具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] WU A, HAMMER G L, DOHERTY A, et al. Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield[J]. *Nature Plants*, 2019, 5(4):

380–388.

- [2] 杜长玉, 李东明, 庞全国. 大豆连作对植株营养水平、叶绿素含量、光合速率及其产物影响的研究[J]. *大豆科学*, 2003, 22(2): 146–150. DU C Y, LI D M, PANG Q G. Study on the effect of successive planting soybean to nutrient, chlorophyll photosynthetic efficiency and photosynthesis of soybean plants[J]. *Soybean Science*, 2003, 22(2): 146–150.
- [3] ZHUANG M, ZHANG J, KONG Z, et al. Potential environmental benefits of substituting nitrogen and phosphorus fertilizer with usable crop straw in China during 2000–2017[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122125.
- [4] SASSER J N, UZZELL G. Control of the soybean cyst nematode by crop rotation in combination with a nematicide[J]. *Journal of Nematology*, 1991, 23(3): 344–347.
- [5] SUN Y Y, JIANG G Y, WEI X C, et al. Autotoxicity effects of soils continuously cropped with tomato[J]. *Allelopathy Journal*, 2011, 28(2): 135–144.
- [6] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447: 143–144.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 821–828. CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821–828.
- [8] XIU L Q, ZHANG W M, WU D, et al. Biochar can improve biological nitrogen fixation by altering the root growth strategy of soybean in albic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773(1): 144564.
- [9] 张伟明, 吴迪, 张钦贵, 等. 连续施用农用玉米芯炭的马铃薯生物学响应[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1843–1853. ZHANG W M, WU D, ZHANG H G, et al. Biological effects of consecutive application of corn cob biochar to potato plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1843–1853.
- [10] EYLES A, BOUND S A, OLIVER G, et al. Impact of biochar amendment on the growth, physiology and fruit of a young commercial apple orchard[J]. *Trees-Structure and Function*, 2015, 29(6): 1817–1826.
- [11] HE Y H, YAO Y X, JI Y H, et al. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: A global synthesis[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(8): 605–617.
- [12] ZHU Q, KONG L J, SHAN Y Z, et al. Effect of biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(10): 2242–2254.
- [13] SARMA B, GOGOI N, BHARALI M, et al. Field evaluation of soil and wheat responses to combined application of hardwood biochar and inorganic fertilizers in acidic sandy loam soil[J]. *Experimental Agriculture*, 2018, 54(4): 507–519.
- [14] ZOGHI Z, HOSSEINI S M, KOUCHAKSARAEI M T, et al. The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress[J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138(6): 967–979.
- [15] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(14): 12700–

- 12712.
- [16] ZHANG Y J, DING J Q, WANG H, et al. Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency[J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 288.
- [17] HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHAI Y M, et al. Effect of straw biochar on soil properties and wheat production under saline water irrigation[J]. *Agronomy*, 2019, 9(8):457.
- [18] 邱丽娟, 常汝镇. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 58-75. QIU L J, CHANG R Z. Descriptors and data standard for soybean (*Glycine* spp.)[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2006: 58-75.
- [19] WELLBURN A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. *Journal Plant Physiology*, 1994, 144(3):307-313.
- [20] RICHARDSON A D, DUIGAN S P, BERLYN G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. *New Phytologist*, 2002, 153(1):185-194.
- [21] 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: 134-201. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-201.
- [22] 宋柏权, 刘丽君, 董守坤, 等. 大豆不同碳代谢产物含量变化研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(4):655-658. SONG B Q, LIU L J, DONG S K, et al. Study on changes of different carbohydrate matter content in soybean[J]. *Soybean Science*, 2009, 28(4):655-658.
- [23] 曲春香, 沈颂东, 王雪峰, 等. 用考马斯亮蓝测定植物粗提液中可溶性蛋白质含量方法的研究[J]. 苏州大学学报: 自然科学版, 2006, 22(2):82-85. QU C X, SHEN S D, WANG X F, et al. Method research of measuring soluble protein contents of plant rough extraction using Coomassie Brilliant Blue[J]. *Journal of Suzhou University(Natural Science Edition)*, 2006, 22(2):82-85.
- [24] XIANG Y Z, DENG Q, DUAN H L, et al. Effects of biochar application on root traits: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(10): 1563-1572.
- [25] ALKHARANSHEH H M, SELEIMAN M F, BATTAGLIA M L, et al. Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review[J]. *Agronomy*, 2021, 11(5): 993.
- [26] GLASER B, LEHR V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9338.
- [27] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J]. *Biochar*, 2020, 2(4):379-420.
- [28] ZÖRB C, SENBAYRAM M, PEITER E. Potassium in agriculture—status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656-669.
- [29] LU Z F, REN T, PAN Y H, et al. Differences on photosynthetic limitations between leaf margins and leaf centers under potassium deficiency for *Brassica napus* L.[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:21725.
- [30] JIN J, LAURICELLA D, ARMSTRONG R, et al. Phosphorus application and elevated CO₂ enhance drought tolerance in field pea grown in a phosphorus-deficient vertisol[J]. *Annals of Botany*, 2014, 116(6): 975-985.
- [31] LAL R. Carbon sequestration in dryland ecosystems[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(4):528-544.
- [32] ZHOU X Y, ZHANG C Y, GUO G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: A review[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7):1867-1874.
- [33] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):779-785. YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785.
- [34] JIN J, LIU X B, WANG G H. Some eco-physiological characteristics at R₄-R₅ stage in relation to soybean yield differing in maturities[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2004, 37(9):425-434.
- [35] WILCOX J R. Sixty years of improvement in publicly developed elite soybean lines[J]. *Crop Science*, 2001, 41(6):1711-1716.
- [36] 魏永霞, 张翼鹏, 张雨凤, 等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2):284-291, 312. WEI Y X, ZHANG Y P, ZHANG Y F, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2):284-291, 312.

(责任编辑:朱晓昱)