

网络出版时间:2021-05-17 13:11 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.11.016
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210517.1130.018.html

生物炭对豫西旱作玉米花后穗位叶光合生理特性及产量的影响

王艳芳,李乾云,悦飞雪,乔鑫鑫,焦念元,尹 飞,付国占,刘 领

(河南科技大学 农学院,河南 洛阳 471023)

【摘 要】【目的】探究生物炭对旱作玉米花后穗位叶光合生理特性及产量指标的影响,为在旱作农田合理施用生物炭,延缓功能叶衰老和提高产量提供理论依据。【方法】以玉米品种郑单 958 为材料,在河南科技大学实验农场,设置不施用生物炭(C0)、施用生物炭 20 t/hm²(C20)和 40 t/hm²(C40)3 个试验处理,研究生物炭对旱作玉米花后 0, 15, 30 和 45 d 穗位叶的叶绿素含量(SPAD)、光合特性、丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶活性及籽粒产量和其构成要素的影响。【结果】施用生物炭可提高旱作玉米花后穗位叶 SPAD、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s),降低旱作玉米花后穗位叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i),且 C40 处理效果较 C20 处理显著。除花后 0 d 外,花后 15, 30 和 45 d C20 和 C40 处理穗位叶 MDA 含量均显著降低,表现为 C40<C20<C0。施用生物炭可以提高穗位叶的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,而且随着花后时间延长其效果越发显著。施用生物炭显著提高了玉米穗长、行粒数、穗粒数、百粒质量和产量($P<0.05$),显著降低了玉米秃尖长($P<0.05$)。相关分析表明,生物炭施用量与 SPAD、 P_n 、CAT 活性呈极显著正相关($P<0.01$);与 T_r 、 G_s 、POD 活性、产量呈显著正相关($P<0.05$);与 C_i 和 MDA 含量呈显著负相关($P<0.05$)。【结论】施用生物炭能够改善旱作玉米花后穗位叶光合性能,提高穗位叶抗氧化酶活性,延缓穗位叶衰老,提高玉米产量,且以 40 t/hm² 的施用量增产效果最佳。

【关键词】 生物炭;旱作玉米;穗位叶;玉米产量;玉米栽培

【中图分类号】 S513

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)11-0125-09

Effects of biochar amendment on ear leaf photosynthetic physiological characteristics after anthesis and yields of rainfed maize in west Henan

WANG Yanfang, LI Qianyun, YUE Feixue, QIAO Xinxin, JIAO Nianyuan,

YIN Fei, FU Guozhan, LIU Ling

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: 【Objective】A field experiment was conducted to study the impact of biochar addition on ear leaves photosynthetic characteristics after anthesis and yield of rainfed maize, so as to provide theoretical basis for rational application of biochar to delay senescence of functional leaves and increase yield. 【Method】The field experiment using maize variety of Zhengdan 958 was carried out at the farm of Henan University of Science and Technology. Three treatments including 0 t/hm²(C0), 20 t/hm²(C20) and 40 t/hm²(C40) biochar addition rates were used to examine the effects on photosynthesis parameters, malondialdehyde (MDA) content, antioxidant enzymatic activities on ear leaves, yield and its components of rainfed maize at 0, 15, 30 and 45 days after anthesis. 【Result】The application of biochar increased chlorophyll con-

【收稿日期】 2020-11-27

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31700367);国家重点研发计划项目(2017YFD0301101)

【作者简介】 王艳芳(1977—),女,河南温县人,副教授,博士,主要从事农田生态学研究。E-mail: wyfll1977@126.com

【通信作者】 刘 领(1978—),男,河南项城人,副教授,博士,主要从事农田生态学研究。E-mail: liulinghenan@126.com

tent (SPAD), net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s), while reduced intercellular CO_2 concentration (C_i) of maize ear leaves with stronger effects in C40 treatment than in C20 treatment. The content of malondialdehyde (MDA) was significantly reduced under C20 and C40 treatments except at 0 day after anthesis with the order of $\text{C40} < \text{C20} < \text{C0}$. The application of biochar improved superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities of ear leaves, and the effect was more significant with the increase of time after anthesis. The application of biochar significantly increased maize ear length, row grain number, ear grain number, 100-grain weight and yield ($P < 0.05$), but significantly decreased barren tip length ($P < 0.05$). The correlation analysis showed that biochar addition rate had very significant positive correlations with SPAD value, net photosynthetic rate (P_n) and catalase (CAT) activity ($P < 0.01$) and significant positive correlations with transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), peroxidase (POD) activity and yield ($P < 0.05$). It also had significantly negative correlations with intercellular CO_2 concentration (C_i) and malondialdehyde (MDA) content ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The application of biochar improved photosynthetic performance, increased antioxidant enzymatic activities of ear leaves after anthesis, delayed senescence of ear leaves, and increased yield. The optimum biochar application rate was 40 t/hm^2 based on this experiment.

Key words: biochar; rainfed maize; ear leaves; maize yields; maize cultivation

玉米是我国主要的农作物,开花后是玉米产量形成的关键时期^[1]。玉米产量的形成主要来自开花后的光合物质积累,玉米穗位叶的光合能力在很大程度上影响产量形成,叶片的光合特性与衰老生理指标可以反映玉米光合能力大小。因此,生长后期叶片较高的生理活性是保证玉米高产的关键。学者们通过多种措施来改善玉米功能叶的光合特性,延缓功能叶的衰老,提高产量。郭书亚等^[2]研究表明,秸秆覆盖和深松措施可以延缓豫南地区夏玉米花后穗位叶衰老,提高玉米产量。李广浩等^[3]研究表明,控释尿素水氮耦合可以有效提高夏玉米花后穗位叶净光合速率,保证籽粒对营养物质的需求,提高夏玉米产量。邵国庆等^[4]指出,包膜控释尿素与灌溉可提高玉米花后穗位叶活性氧清除酶活性,降低丙二醛积累量,延缓叶片衰老,提高净光合速率和产量。王萌等^[5]研究表明,适宜的种植密度和空间布局能保证夏玉米郑单 958 穗位叶的净光合作用及其相关指标维持在较高水平。段宏凯等^[6]发现,秸秆还田和减追 25%氮肥可以在保证玉米穗位叶净光合速率、叶绿素含量以及叶面积不降低的前提下减少氮肥投入,且能够改善穗位叶光合特性。豫西(河南省西部)地区是旱作农业的典型区域,玉米是该地区主要农作物之一。但由于水分胁迫和土壤养分不足严重影响该地区玉米生产,特别是在玉米开花后、籽粒形成时期,往往由于干旱胁迫和肥力缺少影响植物的根系功能,进而引起叶片早衰,影响植物的光合作用和抗氧化酶活性,导致产量下降。因此,改善旱作玉

米生育后期土壤水肥状况和根系功能对提高功能叶光合性能及籽粒产量至关重要。

生物炭是由农作物秸秆、薪柴、杂草、粪便等生物物质在缺氧或低氧条件下通过高温裂解产生的富含碳素的固体产物^[7]。生物炭在农业生产中应用具有重要生态功能,包括增强土壤碳汇、改善土壤结构、促进养分利用及降低环境污染等^[8-10]。近年来,一些研究报道了生物炭在玉米农田中的应用效应。张娜等^[11]研究表明,施用生物炭有利于夏玉米的干物质积累,以及后期叶片光合性能的维持和籽粒产量的提高。孟繁昊等^[12]研究认为,施用生物炭能够显著降低玉米农田土壤容重,增加土壤孔隙度,生物炭配施氮肥可显著提高春玉米产量。刘国玲等^[13]研究表明,正常施肥配施生物炭处理郑单 958 玉米的光合特性改善,衰老延缓,籽粒产量提高。阚正荣等^[14]研究表明,施用生物炭可以减少夏玉米耗水量,提高水分利用效率,低量生物炭可以改善夏玉米的光合性能,提高籽粒产量,而施用中高量生物炭会降低光合性能。由于不同学者试验的土壤类型、土壤肥力、生物炭材质、施用量及研究方法等存在差异,目前关于生物炭对玉米光合性能、衰老及产量影响的研究结论并不一致,而且对于旱作条件下生物炭对玉米花后穗位叶的光合和衰老性能研究较少。为此,本研究以豫西地区旱作玉米为对象,探讨施入生物炭对旱作玉米花后穗位叶光合特性、衰老及产量的影响,并分析它们之间的相关性,以期旱作农田合理施用生物炭来延缓功能叶的衰老和提高产量。

提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在河南省洛阳市河南科技大学实验农场(34°41' N, 112°27' E)进行。该地区年均气温 13.7℃, 年均无霜期 216 d, 年降水量 600~800 mm, 土壤类型为褐土, 土壤基本理化性质为: pH 值 7.4, 有机质 1.51 g/kg, 总氮 1.0 g/kg, 碱解氮 78.6 mg/kg, 有效磷 9.2 mg/kg, 速效钾 116.5 mg/kg, 黏粒、粉粒、砂粒占比分别为 20.34%, 30.87% 和 48.79%。

1.2 试验材料

供试玉米品种为郑单 958, 由河南金博士种业股份有限公司提供。生物炭为河南商丘三利新能源有限公司提供的小麦秸秆生物炭, 生物炭热裂解炭化温度 350~450℃, pH 值 10.4, 比表面积 8.92 m²/g, 有机碳含量 522.3 g/kg, 全氮含量 5.9 g/kg, 全磷含量 0.89 g/kg, 全钾含量 23.2 g/kg。

1.3 试验设计

生物炭用量共设 3 个处理, 分别为不施用生物炭(C0)、施用生物炭 20 t/hm²(C20)和施用生物炭 40 t/hm²(C40); 每处理重复 3 次, 共 9 个小区。小区面积 32 m²(4 m×8 m)。2018 年 6 月 3 日种植玉米, 行距为 60 cm, 株距为 25 cm, 种植密度为 67 000 株/hm²。施氮量 225 kg/hm², 以含氮量 46% 的尿素为氮源, 分 2 次施用, 其中基肥占 60%, 大喇叭口期追肥占 40%; 施磷肥 80 kg/hm², 钾肥 100 kg/hm², 分别以含 P₂O₅ 12% 过磷酸钙和含 K₂O 45% 硫酸钾作为肥源。生物炭及基施氮肥、磷肥和钾肥均在播前撒于地表后用微耕机翻耕与 10 cm 左右土层混合均匀, 追施氮肥用点种器施入。9 月 25 日试验结束, 试验期间采用雨养方式, 不进行灌溉, 定期除草。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 花后穗位叶叶绿素含量 于玉米花后(7 月 29 日)0, 15, 30 和 45 d, 选取受光方向一致的穗位叶的中部, 采用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪(日本 Konica Minolta 公司)测定穗位叶叶绿素含量, 以 SPAD 值表示, 重复 3 次。

1.4.2 花后穗位叶光合指标 于玉米花后(7 月 29 日)0, 15, 30 和 45 d, 在晴天上午 09:00—10:30 选取受光方向一致的穗位叶, 采用 Li-6400 便携式光合仪(美国 Li-COR 公司)测定叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓

度(C_i)。测定时选择 Li-6400-02B 红蓝光光源叶室, 温度为 25℃, 使用开放式气路, 空气相对湿度为 50%~70%, 设定有效光合辐射为 800 μ mol/(m²·s), CO₂ 浓度为 400 μ mol/mol。

1.4.3 花后穗位叶丙二醛含量和抗氧化酶活性 于玉米花后 0, 15, 30 和 45 d, 取测完光合指标的穗位叶放于自封袋且置于冰盒中带回实验室, 用于测定丙二醛(MDA)含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)的活性。MDA 含量参照 Guo 等^[15]的方法测定, SOD 活性采用氮蓝四唑(nitro blue tetraolium, NBT)光化还原法^[16]测定, POD 活性采用愈创木酚法^[17]测定, CAT 活性采用紫外吸收法^[18]测定。

1.4.4 玉米产量 成熟期(9 月 25 日)每个小区取 2 m 双行玉米果穗, 风干后进行室内考种, 调查穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒数、秃尖长、百粒质量和产量。

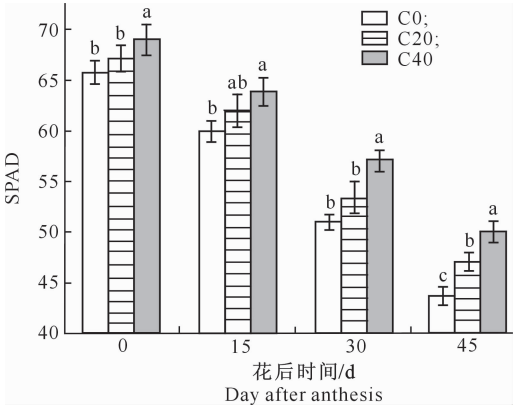
1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 对试验数据进行整理, 用 SPSS 17.0 对数据进行分析, 利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 法比较不同处理间的差异显著性($P<0.05$), 采用 Pearson 相关分析对生物炭施用量与光合指标、MDA 含量、抗氧化酶活性、产量之间的相关性和显著性进行分析, 差异极显著为 $P<0.01$, 差异显著为 $P<0.05$ 。用 Origin 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对旱作玉米花后穗位叶叶绿素含量的影响

叶绿素是叶片光合过程中参与光能吸收和转化的重要物质, 其含量反映了叶片的衰老程度。由图 1 可知, 随着花后时间的延长, 玉米穗位叶叶绿素含量整体呈降低趋势。与不施用生物炭(C0)相比, 在花后不同时期, 施用高水平生物炭均可显著提高玉米花后穗位叶叶绿素含量($P<0.05$); 施用中水平生物炭后, 除了花后 45 d 显著提高穗位叶叶绿素含量外($P<0.05$), 其他时期均不显著($P>0.05$)。在花后 0, 15, 30 和 45 d, 与 C0 处理相比, C20 处理穗位叶叶绿素含量分别提高了 2.15%, 3.40%, 4.71% 和 7.70%, C40 处理穗位叶叶绿素含量分别提高了 5.09%, 6.37%, 12.19% 和 14.54%。以上结果表明, 施用生物炭可提高玉米花后穗位叶叶绿素含量, 且施用高水平生物炭效果最好。



图柱上标不同小写字母表示同时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters mean significant difference among different treatments at same time at 0.05 level. The same below

图 1 生物炭对旱作玉米花后穗位叶叶绿素相对含量(SPAD)的影响

Fig.1 Effects of biochar on era leaf SPAD value of rainfed maize after anthesis

2.2 生物炭对旱作玉米花后穗位叶光合特性的影响

由图 2 可知,随着花后时间延长,玉米穗位叶净光合速率(P_n)呈下降趋势。与C0相比,C20处理

没有显著提高花后 0 和 15 d 玉米穗位叶净光合速率($P>0.05$);但显著提高了花后 30 和 45 d 玉米穗位叶净光合速率($P<0.05$),分别提高了25.13%和33.33%。与C0相比,C40处理均显著提高了玉米花后不同时期穗位叶净光合速率($P<0.05$),花后0,15,30和45 d,分别提高了13.79%,22.73%,50.02%和58.33%。

由图 2 还可知,随着花后时间延长,玉米穗位叶蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均呈现先增加后降低的趋势。与C0相比,C20处理没有显著提高花后45 d 玉米穗位叶蒸腾速率和气孔导度($P<0.05$),但显著提高了花后0,15和30 d 玉米穗位叶的蒸腾速率和气孔导度($P<0.05$),蒸腾速率分别提高12.14%,8.47%和13.18%,气孔导度分别提高10.93%,36.23%和24.32%。与C0相比,C40处理均显著提高了玉米花后不同时期的蒸腾速率和气孔导度($P<0.05$),花后0,15,30和45 d,蒸腾速率分别升高了21.62%,16.01%,42.91%和43.13%,气孔导度分别提高了22.38%,50.37%,43.97%和37.12%。

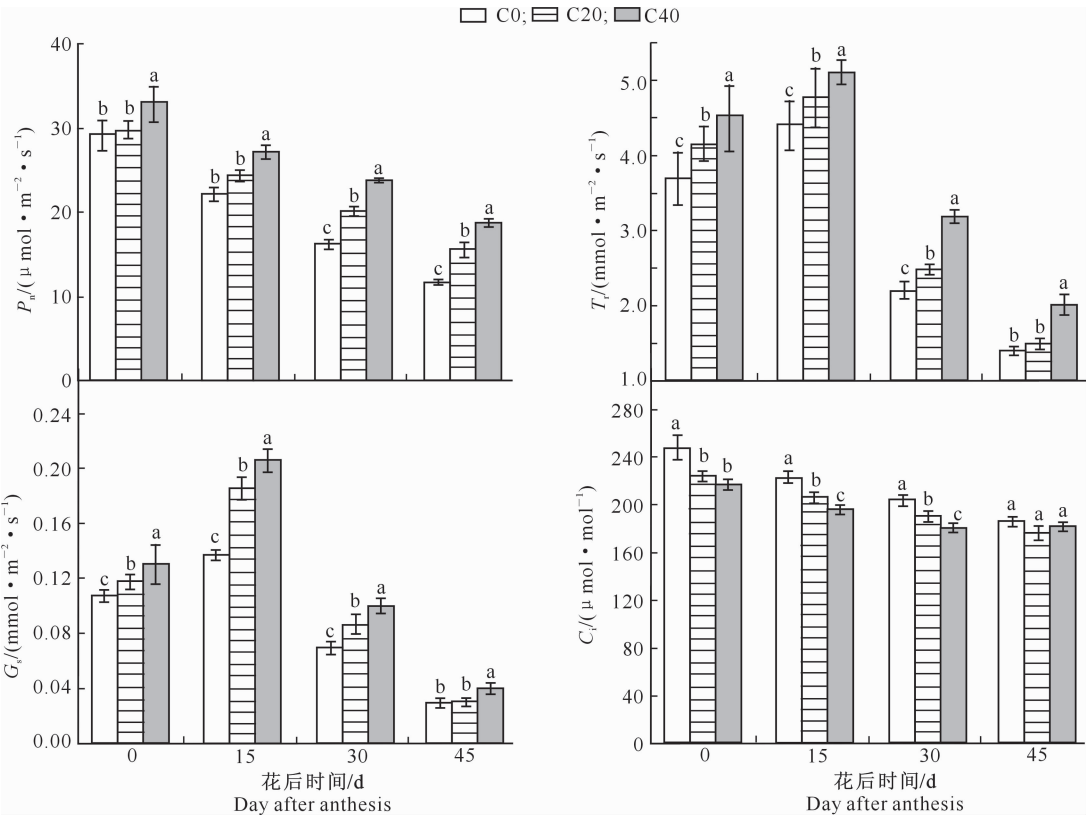


图 2 生物炭对旱作玉米花后穗位叶光合特性的影响

Fig.2 Effects of biochar on era leaf photosynthetic characteristic of rainfed maize after anthesis

由图 2 可以看出,随着花后时间延长,玉米穗位叶胞间 CO_2 浓度(C_i)呈现降低趋势。与C0相比,

C20和C40处理均未显著降低花后45 d 玉米穗位叶胞间 CO_2 浓度($P>0.05$),但均显著降低了玉米

花后 0, 15 和 30 d 穗位叶胞间 CO_2 浓度 ($P < 0.05$)。花后 0, 15 和 30 d, C20 处理胞间 CO_2 浓度较 C0 处理分别降低了 9.31%, 6.63% 和 6.47%, C40 处理胞间 CO_2 浓度较 C0 处理分别降低了 12.15%, 11.43% 和 11.72%。

2.3 生物炭对旱作玉米花后穗位叶 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知,随着花后时间延长,玉米穗位叶 MDA 含量呈逐渐增加的趋势,施用生物炭并不能改变 MDA 含量上升的总趋势。与 C0 相比,花后 15, 30 和 45 d, C20 和 C40 处理玉米花后穗位叶 MDA 含量均显著降低 ($P < 0.05$),且 C40 处理 MDA 含量均低于 C20 处理,表现为 $\text{C40} < \text{C20} < \text{C0}$ 。与 C0 相比,花后 0, 15, 30 和 45 d, C20 处理玉米花后穗位叶 MDA 含量分别降低了 5.80%, 16.13%, 18.28% 和 7.88%, C40 处理玉米花后穗位叶 MDA 含量分别降低了 8.09%, 24.20%, 24.61% 和 23.33%。

由图 3 可见,随着花后时间延长,玉米穗位叶 SOD 活性呈下降趋势。与 C0 相比, C20 处理未显著提高花后 0, 15 和 30 d 玉米穗位叶 SOD 活性 ($P > 0.05$),但显著提高了花后 45 d 玉米穗位叶

SOD 活性 ($P < 0.05$),提高了 17.86%。与 C0 相比, C40 处理均显著提高了玉米花后不同时期穗位叶 SOD 活性,花后 0, 15, 30 和 45 d 分别提高了 9.31%, 14.12%, 14.61% 和 33.12%。

由图 3 还可见,随着花后时间延长,玉米穗位叶 POD 活性呈先升高后降低趋势。花后 15 d 各处理 POD 活性均最高。与 C0 相比, C20 处理未显著提高花后 0 和 15 d 玉米穗位叶 POD 活性 ($P > 0.05$);但显著提高了花后 30 和 45 d 玉米穗位叶 POD 活性 ($P < 0.05$),分别提高了 40.70% 和 62.34%。与 C0 相比, C40 处理均显著提高玉米花后不同时期穗位叶 POD 活性 ($P < 0.05$),花后 0, 15, 30 和 45 d 分别提高了 21.52%, 22.32%, 58.89% 和 97.66%。

由图 3 还可以看出,随着花后时间延长,玉米穗位叶 CAT 活性呈下降趋势。与 C0 相比, C20 处理显著提高了花后 15, 30 和 45 d 玉米穗位叶 CAT 活性 ($P < 0.05$),分别提高了 8.50%, 19.58% 和 32.99%。与 C0 相比, C40 处理均显著提高了玉米花后不同时期穗位叶 CAT 活性 ($P < 0.05$),花后 0, 15, 30 和 45 d 分别提高了 22.20%, 30.53%, 36.18% 和 64.67%。

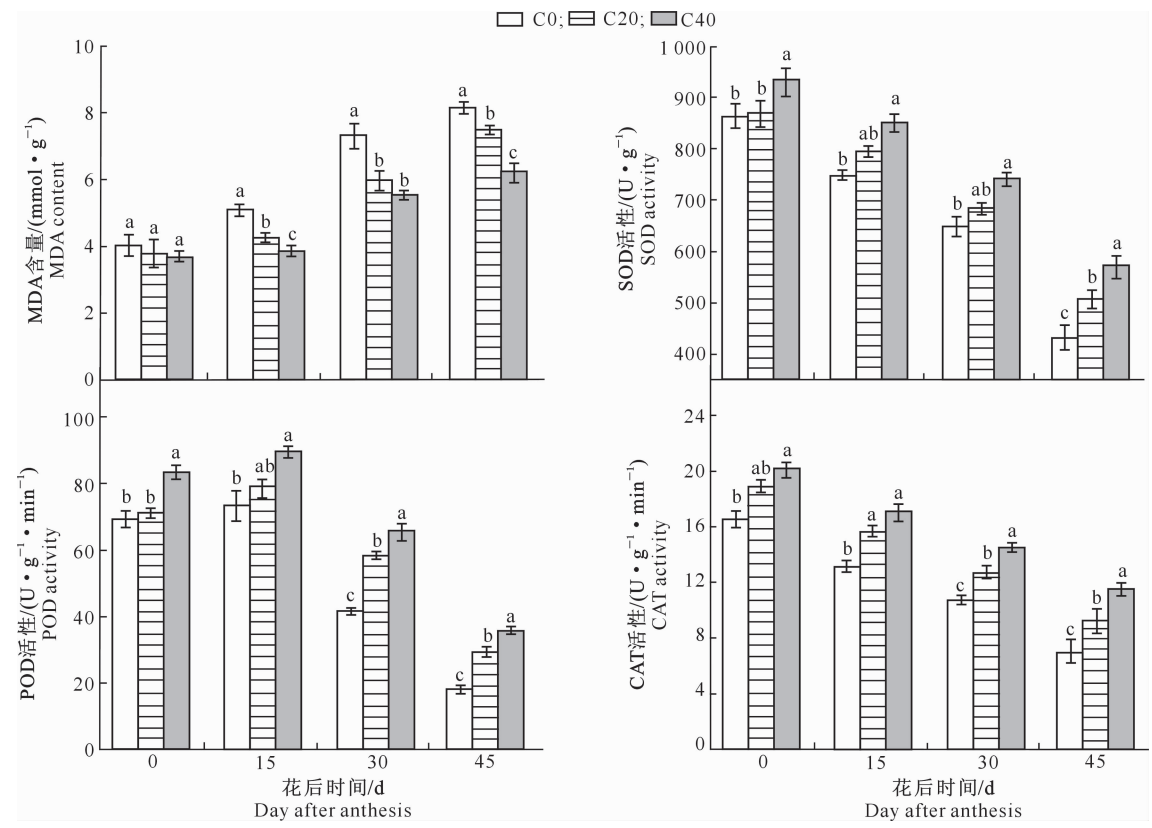


图 3 生物炭对旱作玉米花后穗位叶 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of biochar on era leaf MDA content and antioxidant enzyme activity of rainfed maize after anthesis

2.4 生物炭对旱作玉米产量及其构成要素的影响

由表 1 可知,与 C0 相比,施用生物炭后可以显著提高玉米穗长($P<0.05$),C20 和 C40 处理玉米穗长提高 4.51%和 5.62%;穗粗和穗行数有增加趋

势,但均未达到显著水平($P>0.05$);行粒数、穗粒数、百粒质量和产量均显著增加($P<0.05$),秃尖长显著缩短($P<0.05$),且施用生物炭的 C20 和 C40 处理间差异均不显著。

表 1 生物炭对旱作玉米产量及其构成要素的影响
Table 1 Effects of biochar on rainfed maize yield and its components

处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗行数 Row number per spike	行粒数 Grain number per row	穗粒数 Grain number per ear	秃尖长/cm Barren tip length	百粒质量/g 100-grain weight	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
C0	16.18±0.87 b	4.58±0.34 a	15.48±0.98 a	35.30±1.25 b	534.04±7.28 b	1.64±0.08 b	28.83±0.97 b	8 426.52±105.78 b
C20	16.91±1.20 a	4.87±0.45 a	15.50±0.75 a	37.22±2.14 a	562.42±10.23 a	1.57±0.11 a	30.24±1.31 a	8 950.26±117.56 a
C40	17.09±0.97 a	4.73±0.33 a	15.53±1.04 a	37.43±1.78 a	571.61±10.21 a	1.55±0.09 a	30.82±0.86 a	9 190.81±110.37 a

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters mean significant difference among treatments at $P<0.05$ level.

2.5 生物炭施用量与旱作玉米各指标的相关性

由表 2 可知,玉米穗位叶 SPAD 值、净光合速率(P_n)与生物炭施用量呈极显著正相关($P<0.01$);蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)与生物炭施用量呈显著正相关($P<0.05$);胞间 CO_2 浓度(C_i)与生物炭

施用量呈极显著负相关($P<0.01$)。玉米穗位叶 CAT 活性与生物炭施用量呈极显著正相关($P<0.01$);POD 活性、产量与生物炭施用量呈显著正相关($P<0.05$);MDA 含量与生物炭施用量呈显著负相关($P<0.05$)。

表 2 生物炭施用量与旱作玉米各指标的相关关系
Table 2 Pearson correlation coefficients between biochar application rate and indexes of rainfed maize

指标 Index	SPAD	P_n	T_r	G_s	C_i	MDA 含量 MDA content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	产量 Yield
生物炭施用量 Biochar application rate	0.329**	0.348**	0.291*	0.329*	-0.413**	-0.359*	0.279	0.336*	0.427**	0.350*

注: ** 表示相关性达 0.01 极显著水平; * 表示相关性达 0.05 显著水平。
Note: ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

3 讨 论

近年来,关于生物炭对作物产量影响的研究较多,且因所采用的生物炭材质、施炭量、土壤类型及环境条件不同存在一定差异,但总体上以正向效应居多。董成等^[19]研究发现,施用生物炭主要通过增加土壤耕层无机氮储量和土壤水分含量提高夏玉米产量。李传哲等^[20]研究表明,生物炭配施氮肥能够改善土壤微生态环境,提高土壤肥力,增加冬小麦作物产量。Zhang 等^[21]对河南省中部黄淮海平原黄潮土施加不同量的生物炭发现,施加生物炭能够降低土壤体积质量,提高土壤氮含量和玉米产量,且以 20 t/hm² 生物炭施用量增产效果最显著。蒋健等^[22]向棕壤土中施入不同量玉米秸秆生物炭发现,在玉米生育后期生物炭能在一定程度上延缓根系衰老,增加总根长、根体积和根干质量,提高根系活力和玉米籽粒产量,且施用生物炭 5 000 kg/hm² 效果优于 2 500 kg/hm² 处理。本研究发现,施用生物炭

可显著提高豫西褐土旱作玉米籽粒产量,且以 40 t/hm²生物炭施用量增产效果最佳,但 40 与 20 t/hm²生物炭处理间差异不显著。这主要是由于生物炭提高了花后穗位叶的叶绿素含量,改善了花后穗位叶的光合性能,延缓了穗位叶的衰老。
光合作用是植物生长发育的基础,也是植物合成有机物质和获得能量的根本来源^[23]。刘慧敏等^[24]研究表明,施用不同剂量的生物炭均显著改善了谷子幼苗除胞间 CO_2 浓度外的其他光合参数指标。阚正荣等^[25]研究认为,施用生物炭可以减弱冬小麦开花期和灌浆期的光合“午休”现象,增强光合性能和潜力,提高籽粒产量。李继伟等^[26]研究表明,施用生物炭能提高镉胁迫下玉米的光合色素含量,改善光合性能。本研究结果表明,施用生物炭可以提高旱作玉米花后穗位叶叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,降低旱作玉米花后穗位叶胞间 CO_2 浓度,且高水平生物炭施用效果优于中水平生物炭。相关分析表明,生物炭施用量与 SPAD

值、净光合速率呈极显著正相关。而阚正荣等^[14]研究表明,施用中高量生物炭显著降低了玉米主要生育期的 SPAD 值、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率以及花后干物质积累,还降低了籽粒产量;而低用量生物炭提高了玉米主要生育期的光合性能和籽粒产量,与本研究结果不一致。这可能是因为,一方面土壤类型不同会导致生物炭对玉米光合性能的影响存在差异;另一方面,土壤肥力状况也影响生物炭的效应,有研究认为生物炭施用于贫瘠土壤效果较好,而对肥沃土壤的效应较小^[27]。阚正荣等^[14]研究中 3 年连续施用生物炭并将小麦秸秆还田,因此土壤肥力较高,施用高量生物炭可能通过生物炭的固持和吸附作用导致土壤有效氮降低,限制植物氮素吸收,从而对植物光合性能和生长产生抑制作用。

植物处于逆境或衰老条件下时,体内会积累大量活性氧,引起膜脂过氧化而使植物细胞受到损伤。MDA 作为细胞膜脂过氧化的最终产物,常被用于评价细胞膜损伤程度和植物抗逆性的强弱^[28-29]。在逆境条件下,植物也会采取一些应对反应来减少活性氧对自身的伤害,其中起主要作用的是活性氧清除酶系统。SOD、POD 和 CAT 是植物体内活性氧清除酶系统中最主要的抗氧化酶,它们能有效清除活性氧,抑制膜脂过氧化作用,延缓植物衰老^[30]。本研究结果表明,随着玉米花后时间的延长,穗位叶 MDA 含量显著增加,SOD 和 CAT 活性呈降低趋势,POD 活性呈先升高后降低趋势,说明随着玉米生育期的推进,尽管可以通过自身调节来延缓衰老,但依旧无法清除体内过量的活性氧,改变不了衰老的进程。良好的环境条件和耕作栽培技术可以使植物体内维持较高的活性氧清除酶活性,延缓衰老^[2]。本研究结果表明,施用生物炭后,花后不同时间穗位叶 MDA 含量均降低,SOD、POD 和 CAT 活性均增大,说明生物炭能提高玉米穗位叶抗氧化酶活性,减轻膜脂过氧化程度,延缓衰老进程。这与李继伟等^[26]和赵铁民等^[31]对逆境胁迫下生物炭对玉米抗氧化系统的研究结果相一致,施用生物炭可以提高逆境胁迫下玉米叶片的抗氧化酶活性,缓解胁迫造成的伤害,改善玉米的生理性状。

生物炭提高旱作玉米花后穗位叶光合能力和抗氧化酶活性主要是因为:(1)生物炭可以改善土壤理化性状,生物炭的多孔结构和大的比表面积可以降低土壤体积质量、增加土壤孔隙度和持水保肥能力^[32-33]。(2)生物炭本身碳含量较高,在土壤中加入生物炭可以提高土壤有机碳含量,生物炭还可以增

加土壤有效磷含量,降低氮素损失和提高氮素的利用率,减少土壤养分淋失^[33]。(3)根系作为和生物炭颗粒直接接触的部位,对植物的生长有至关重要的影响,添加生物炭可在一定程度上使根系形态特征得到优化、根系生理功能增强,促进肥水吸收,增强光合能力,延缓衰老^[34]。(4)生物炭的多孔结构为微生物提供了良好的栖息微环境^[35-36],生物炭含碳量丰富,可为微生物的生长提供碳源^[37],特定微生物可以促进植物根系吸收土壤中水分和养分^[38],强化叶片的光合能力,延缓衰老,促进植物生长。(5)生物炭对肥料具有缓释作用,可以满足玉米生育后期的养分需求,增强光合能力,延缓穗位叶衰老,有利于干物质的积累^[39]。综上所述,施加生物炭可通过多个途径延缓旱作玉米穗位叶衰老,提高产量。但也有研究表明,生物炭对贫瘠的土壤上作物增产效果明显,而对肥沃土壤上的作物无显著增产效果^[40],过量施用生物炭反而会抑制作物的生长发育,出现减产现象^[39]。本研究试验地在豫西旱作土壤较贫瘠,土壤质量较差,所以施用量高的生物炭对玉米产量提高的影响显著。但是生物炭对玉米增产更深层次的作用机制及适宜用量需进一步研究。

[参考文献]

- [1] 田 畅,王 洋.行向和种植方式对成熟期玉米叶片衰老生理特性的影响[J].华北农学报,2018,33(S1):111-116.
Tian C,Wang Y. Effects of row and planting pattern on senescence physiological characteristics of maize leaves at mature period [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(S1): 111-116.
- [2] 郭书亚,张 新,张前进,等.秸秆覆盖深松对夏玉米花后穗位叶衰老和产量的影响[J].玉米科学,2012,20(1):104-107.
Guo S Y,Zhang X,Zhang Q J,et al. Effects of straw mulching and subsoiling on ear leaf senescence after anthesis and yield of summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(1): 104-107.
- [3] 李广浩,赵 斌,董树亭,等.控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(9):1406-1415.
Li G H,Zhao B,Dong S T,et al. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photo-synthetic characteristics in summer maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1406-1415.
- [4] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉与尿素类型对玉米花后穗位叶衰老、产量和效益的影响[J].中国农业科学,2009,42(10):3459-3466.
Shao G Q,Li Z J,Ning T Y,et al. Effects of irrigation and urea types on ear leaf senescence after anthesis, yield and economic benefit of maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3459-3466.

- [5] 王 萌,陈国强,金海燕,等. 密度和空间布局种植方式对夏玉米穗位叶光合生理性状的影响 [J]. 华北农学报, 2016, 31(2): 131-138.
Wang M, Chen G Q, Jin H Y, et al. Effects of planting densities and row spacing modes on photosynthetic and physiological traits of ear leaves of summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(2): 131-138.
- [6] 段宏凯,王宏富,鱼冰星,等. 多年秸秆还田后减追氮肥对玉米穗位叶光合特性和衰老生理的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(12): 8-14.
Duan H K, Wang H F, Yu B X, et al. Effects of reducing nitrogen application on photosynthetic characteristics and physiology of ear leaf senescence of maize in the field with continuous straw return [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(12): 8-14.
- [7] 李 力,刘 娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
Li L, Liu Y, Lu Y C, et al. Review on environmental effects and applications of biochar [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [8] Li S L, Shangguan Z P. Positive effects of apple branch biochar on wheat yield only appear at a low application rate, regardless of nitrogen and water conditions [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18: 3235-3243.
- [9] 悦飞雪,李继伟,王艳芳,等. 生物炭和 AM 真菌提高矿区土壤养分有效性的机理 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1325-1334.
Yue F X, Li J W, Wang Y F, et al. Mechanism of the improvement effect by biochar and AM fungi on the availability of soil nutrients in coal mining area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1325-1334.
- [10] Liu L, Li J W, Yue F X, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil [J]. Chemosphere, 2018, 194: 495-503.
- [11] 张 娜,李 佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569-1574.
Zhang N, Li J, Liu X H, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [12] 孟繁昊,于晓芳,王志刚,等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响 [J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 142-150.
Meng F H, Yu X F, Wang Z G, et al. Effects of physical property of soil and yield of spring corn by combined application of biochar and nitrogen [J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(1): 142-150.
- [13] 刘国玲,王宏伟,蒋 健,等. 生物炭对郑单 958 生理生化指标及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 105-109.
Liu G L, Wang H W, Jiang J, et al. Effects of biochar on physiology and biochemistry & yield in Zhengdan 958 [J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(4): 105-109.
- [14] 阚正荣,刘 鹏,李 超,等. 施用生物炭对华北平原土壤水分和夏玉米生长发育的影响 [J]. 玉米科学, 2019, 27(1): 142-150.
Kan Z R, Liu P, Li C, et al. Effects of biochar on soil water and growth of summer corn in the North China Plain [J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(1): 142-150.
- [15] Guo M J, Wang Y G, Yuan X Y, et al. Responses of the antioxidant system to fluroxypyr in foxtail millet (*Setaria italic* L.) at the seedling stage [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(3): 554-565.
- [16] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. Analytical Biochemistry, 1971, 44(1): 276-287.
- [17] Castillo F I, Penel I, Greppin H. Peroxidase release induced by ozone in *Sedum album* leaves: involvement of Ca^{2+} [J]. Plant Physiology, 1984, 74(4): 846-851.
- [18] 孙 群,胡景江. 植物生理学研究技术 [M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
Sun Q, Hu J J. Plant physiology research technology [M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2006.
- [19] 董 成,陈智勇,谢迎新,等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N_2O 排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 4024-4034.
Dong C, Chen Z Y, Xie Y X, et al. Effects of successive biochar addition to soil on nitrogen functional microorganisms and nitrous oxide emission [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 4024-4034.
- [20] 李传哲,章 欢,姚文静,等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3424-3432.
Li C Z, Zhang H, Yao W J, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and winter wheat yield in the typical ancient region of Yellow River, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3424-3432.
- [21] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. Plant and Soil, 2012, 351(1/2): 263-275.
- [22] 蒋 健,王宏伟,刘国玲,等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 62-66.
Jiang J, Wang H W, Liu G L, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(4): 62-66.
- [23] 李 宁,郭世荣,束 胜,等. 外源 24-表油菜素内酯对弱光胁迫下番茄幼苗叶片形态及光合特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 847-852.
Li N, Guo S R, Shu S, et al. Effects of exogenous 24-epibrassinolide on leaf morphology and photosynthetic characteristics of tomato seedlings under low light stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 847-852.
- [24] 刘慧敏,张圣也,郭怀刚,等. 生物炭对谷子幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 86-91, 116.

- Liu H M,Zhang S Y,Guo H G,et al. Effects of biochar supplement in soil on growth and photosynthetic characteristics of millet seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2020,38(1):86-91,116.
- [25] 阚正荣,马守田,祁剑英,等. 施用生物炭对冬小麦光合潜力和籽粒产量的影响 [J]. 麦类作物学报,2019,39(6):719-727.
- Kan Z R,Ma S T,Qi J Y,et al. Effects of biochar addition on photosynthetic potential and grain yield of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crop,2019,39(6):719-727.
- [26] 李继伟,悦飞雪,王艳芳,等. 施用生物炭和 AM 真菌对镉胁迫下玉米生长和生理生化指标的影响 [J]. 草业学报,2018,27(5):120-129.
- Li J W,Yue F X,Wang Y F,et al. Effects of biochar amendment and arbuscular mycorrhizal inoculation on maize growth and physiological biochemistry under cadmium stress [J]. Acta Prataculturae Sinica,2018,27(5):120-129.
- [27] Haelele S M,Konboon Y,Wongboon W,et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems [J]. Field Crops Research,2011,121(3):430-440.
- [28] Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions [J]. Plant Physiology,2006,141(2):391-396.
- [29] 王弯弯,诸葛玉平,王慧桥,等. 外源 NO 对盐胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 土壤学报,2017,54(2):516-524.
- Wang W W,Zhuge Y P,Wang H Q,et al. Effects of exogenous nitric oxide on growth and physiological characteristics of wheat seedlings under salt stress [J]. Acta Pedologica Sinica,2017,54(2):516-524.
- [30] 周翠香,孙军娜,张馨文,等. 生物炭对盐地碱蓬抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响 [J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2019,35(2):110-115.
- Zhou C X,Sun J N,Zhang X W,et al. Effects of biochar on the activities of antioxidant enzymes and the content of osmotic adjustment in *Suaeda salsa* (L.) [J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition),2019,35(2):110-115.
- [31] 赵铁民,李渊博,陈为峰,等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响 [J]. 水土保持学报,2019,33(2):196-200.
- Zhao T M,Li Y B,Chen W F,et al. Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(2):196-200.
- [32] Baiamonte G,Crescimanno G,Parrino F,et al. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil [J]. Catena,2019,175:294-303.
- [33] 武 玉,徐 刚,吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展,2014,29(1):68-79.
- Wu Y,Xu G,Lü Y C,et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps [J]. Advances in Earth Science,2014,29(1):68-79.
- [34] 张伟明,孟 军,王嘉宇,等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响 [J]. 作物学报,2013,39(8):1445-1451.
- Zhang W M,Meng J,Wang J Y,et al. Effect of biochar on root morphological and physiology characteristics and yield in rice [J]. Acta Agronomica Sinica,2013,39(8):1445-1451.
- [35] 刘 领,马宜林,悦飞雪,等. 生物炭对褐土旱地玉米季氮转化功能基因、丛枝菌根真菌及 N₂O 释放的影响 [J]. 生态学报,2021,41(7):1-13.
- Liu L,Ma Y L,Yue F X,et al. Effects of biochar on nitrogen transformation functional genes abundances, arbuscular mycorrhizal fungi and N₂O emission of rainfed maize season in cinnamon soil [J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(7):1-13.
- [36] Gomez J D,Denef K,Stewart C E,et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils [J]. European Journal of Soil Science,2014,65:28-39.
- [37] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy [J]. Biomass and Bioenergy,2007,31(6):426-432.
- [38] Hammer E C,Balogh-Brunstad Z,Jakobsen I,et al. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces [J]. Soil Biology and Biochemistry,2014,77:252-260.
- [39] 刘 悦,黎子涵,邹 博,等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展 [J]. 应用生态学报,2017,28(3):1030-1038.
- Liu Y,Li Z H,Zou B,et al. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(3):1030-1038.
- [40] Asai H,Samson B K,Stephan H 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(1/2):81-84.