

生物炭基肥对烤烟抗逆生理特性及经济性状的影响

宋 鹏¹, 李 慧¹, 江厚龙², 赵鹏宇¹, 李理想¹, 赵 彪¹, 张 均^{1*}

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000; 2. 重庆烟草科学研究所, 重庆 400715)

摘 要: 为了探究施用生物炭基肥对烤烟抗氧化系统、渗透调节能力及经济性状的调控效应, 以‘云烟 116’为研究对象, 设置常规施肥 (T1)、生物炭基有机肥 (T2) 和生物炭基复混肥 (T3) 3 个处理, 测定烤烟移栽后 30、60、90、120 d 的叶片和根系的抗逆生理特性, 包括超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性以及丙二醛、可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸等物质含量, 并分析烤后烟叶产量、产值、均价和中上等烟比例。结果表明, (1) 生物炭基肥具有提高烟株抗逆和渗透调节能力的作用, 且以 T2 处理效果最佳, 其叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性较 T1 处理分别提高 1.1% ~ 10.6% 和 2.1% ~ 9.5%, 丙二醛含量降低了 16.0% ~ 20.5%。与 T1 处理相比, T2 和 T3 处理的叶片可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量分别提高 1.4% ~ 102.1%、16.0% ~ 52.0% 和 7.8% ~ 41.1%。不同处理对根系抗逆特性与叶片的规律一致。(2) 生物炭基肥可提高烤烟产量、产值和上中等烟比例, 其中以 T2 处理的产量、产值最高, 与 T1 处理相比分别增加了 16.9% 和 21.8%。(3) 通过烤烟的生理指标和经济性状指标的相关分析可知, 在 4 个测定时期中, 两类指标之间呈现不同程度的相关性, 总体以移栽后 120 d 时相关性最为密切。综上, 施用生物炭基肥可提高烤烟的抗氧化能力、渗透调节能力及经济性状, 其中以 T2 处理的效果最好, 研究结果为合理施用生物炭基肥提供理论依据和技术支持。

关键词: 生物炭基肥; 烤烟; 抗氧化酶; 渗透调节物质; 经济性状

近年来, 由于部分烟区施肥不科学、碳氮失衡和外源碳补充不足等问题, 导致植烟土壤养分有效性降低、土壤板结, 烤烟质量和经济效益下降^[1]。生物炭是生物质经高温限氧热裂解而成的多孔状炭化物, 具有较大的孔隙度和比表面积, 是一种良好的吸附材料, 在肥料缓释、土壤改良等方面被人们认知^[2]。研究表明, 生物炭可以改变土壤的理化性质, 提高土壤中微生物的生物量和多样性, 将土壤和肥料中的养分吸附并缓慢释放, 从而延长并增加肥效, 促进植物的生长发育, 提高农作物的产量和品质^[3-4]。

生物炭基肥是一种以生物炭为基质, 根据不同区域土地特点、不同作物生长特点以及科学施肥原理, 添加有机质或和无机质配制而成的生态环保型

肥料, 因其具有生物炭的特性而被广泛应用于烟叶生产中^[5]。研究表明, 在烤烟生产中, 添加生物炭基肥不但可使烟叶的化学成分更加协调^[6], 而且对烤烟的经济性状有明显的促进作用^[7], 但其作用机理尚不明确。抗氧化酶系统和渗透调节物质在作物生长过程中发挥着重要作用, 能有效地清除活性氧基团, 提高细胞液浓度, 降低渗透势来保持水分, 对细胞具有保护功能^[8-10]。生物炭基肥可提高作物叶片抗氧化酶活性和根系活力, 降低叶片活性氧累积, 促进作物生长发育, 缓解逆境危害^[11-13]。

综上, 生物炭基肥在作物生产中已经得到较好的应用, 但相关研究多集中在其对烤烟的品质及其他作物的生理特性等方面, 而有关生物炭基肥对烤烟抗氧化酶、渗透调节物质和经济性状的影响鲜有报道。因此, 本研究立足烤烟生产实际, 以施用生物炭基肥提高烟株抗逆能力和提升烟农收益为出发点, 设置常规施肥、生物炭基有机肥和生物炭基复混肥 3 个处理, 研究施用生物炭基肥对烤烟叶片及根系的抗氧化酶、渗透调节物质和经济性状的影响, 旨在为科学施用生物炭基肥, 促进肥料适施增效提供理论依据和技术支持。

收稿日期: 2023-05-25; 录用日期: 2023-07-25

基金项目: 中国烟草总公司重庆公司科技项目 (A20201NY01-1301, A20201NY01-1306); 河南省科技攻关项目 (232102110040); 河南省高等学校重点科研项目 (22A210003); 河南省大学生创新创业训练计划项目 (202210464086)。

作者简介: 宋鹏 (1980-), 副教授, 博士, 研究方向为农业废弃物微生物转化与利用。E-mail: songpeng0826@126.com。

通讯作者: 张均, E-mail: zhangjun0105@126.com。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2020—2021年在重庆烟草科学研究所彭水试验站(北纬29.14°, 东经107.96°)进行。试验地属于亚热带湿润季风气候, 年均气温17.5℃, 年均降水量1240.6 mm。烟草种植制度为1年1熟, 冬季休闲。试验地土壤类型为黄壤, 肥力中等、地势平坦、无严重病害史, 烟株移栽前土壤耕层基本性质: pH为5.4, 有机质含量为24.1 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为88.8、12.8、147.8 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采取完全随机设计, 共设3个处理: 常规施肥(T1)按照当地农户习惯, 施农家肥2250 kg/hm²和烟草复合肥750 kg/hm²; 生物炭基有机肥(T2): 在T1基础上增施生物炭基有机肥1350 kg/hm²; 生物炭基复混肥(T3): 在农家肥2250 kg/hm²的基础上施生物炭基复混肥750 kg/hm²。其中, 烟草复合肥的氮磷钾质量比为6:12:25; 生物炭基有机肥的发酵原料为质量比例85%杏鲍菇渣和15%生物炭, 其中有机质含量50.3%, 全氮含量1.49%, 全磷含量0.81%, 全钾含量2.04%; 生物炭基复混肥中的氮磷钾和生物炭的质量比为8:10:20:18。T1、T3处理分别用尿素、过磷酸钙和硫酸钾补充配平, 保证两处理氮磷钾肥用量相同; 基于生物炭基有机肥中氮磷钾养分含量较低, T2处理中生物炭有机肥引入的氮磷钾量忽略不计。每个处理重复3次, 共9个小区。生物炭基有机肥和生物炭基复混肥均由贵州金叶丰农业科技有限公司提供。供试品种为‘云烟116’, 由重庆市烟草公司彭水县分公司提供。烟苗采用漂浮育苗, 于5月上旬移栽, 移栽密度16492株/hm², 移栽行距120 cm, 株距50 cm, 垄高40 cm。其他田间管理按照规范化栽培技术进行。

1.3 样品采集与处理

叶片和根系样品采集与处理: 分别在移栽后30、60、90和120 d, 每个处理选取具有代表性的烤烟3株, 每株选取长势一致的腰叶5片, 同时取烟株根系20 g, 置于-80℃超低温冰箱保存待测。

烤后样品采集与处理: 将移栽后120 d的烟叶自下而上进行采收, 采收后按照小区进行统一编杆烘烤, 待分析。

1.4 测定项目及方法

抗逆生理指标: 参照李小芳等^[14]的方法, 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定, 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定, 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸显色法测定, 可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝法测定, 可溶性糖(SS)含量采用蒽酮法测定, 脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸提取, 茚三酮显色法测定。

经济性状指标: 各小区烟叶单独采收编杆, 单独计产。待烟叶全部采收烘烤完毕后, 依照烤烟42级国家标准(GB 2635—1992)对烤后烟叶进行分级, 计算产值、产量与上等烟比例。

1.5 数据统计与分析

数据采用Excel 2019进行处理, SPSS 22.0进行显著性检验(Duncan)和相关性分析, Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭基肥对烤烟叶片和根系抗氧化参数的影响

2.1.1 超氧化物歧化酶活性

由图1可知, 随着移栽时间的推移, 叶片和根系的SOD活性均呈现先升后降的趋势, 叶片SOD活性均在移栽后90 d达到峰值, 而根系SOD活性T1和T3处理在移栽后60 d达到峰值, 而T2处理在移栽后90 d达到峰值。与T1处理相比, T2处理的叶片SOD活性在移栽后60、90和120 d分别显著提高10.6%、9.7%和3.7%, 根系SOD活性分别显著提高13.5%、19.2%和12.4%; T3处理的叶片SOD活性在移栽后90 d显著提高7.9%, 根系SOD活性在移栽后60和90 d分别显著提高13.7%和10.4%。与T2处理相比, T3处理移栽后60 d时的叶片SOD活性和移栽后90 d时的根系SOD活性分别显著降低10.8%和7.4%, 其他情况下无显著差异。可见, 增施生物炭基肥有利于提高烟株叶片及根系的SOD活性, 且以施用生物炭基有机肥的T2处理效果最优。

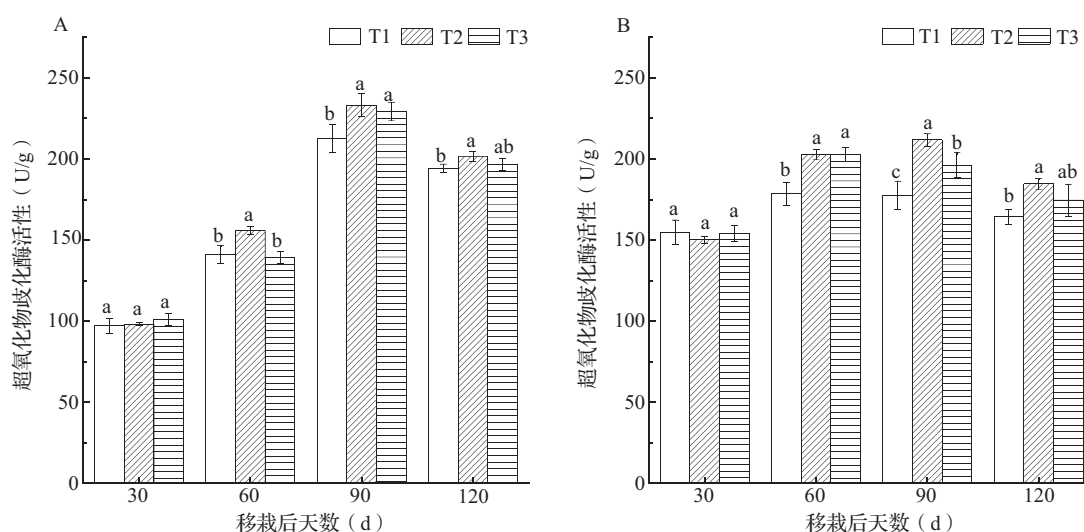


图1 生物炭基肥对烤烟叶片 (A) 及根系 (B) 超氧化物歧化酶活性的影响

注: 柱上不同小写字母表示同一移栽后天数下不同处理间在 0.05 水平上差异显著。酶活性以样品鲜重计。下同。

2.1.2 过氧化物酶活性

图2结果表明, 叶片和根系 POD 活性呈先升高后降低的趋势, 且除 T1 处理根系 POD 活性在移栽后 60 d 达到峰值外, 其余两个处理均在移栽后 90 d 达到峰值。在移栽后 30 d, 3 个处理间叶片 POD 活性无显著差异, 但 T2 和 T3 处理根系 POD 活性较 T1 处理显著提高。在移栽后 60 d, 烟叶的 POD 活性表现为 T3>T2>T1, T3 和 T2 处理的 POD 活性与 T1 处理呈显著差异; 根系 POD 活性以 T2 处理最高, 且 T2 与 T1 处理之间仍存在显著差异。

在移栽后 90 和 120 d, 3 个处理叶片和根系 POD 活性均表现为 T2>T3>T1。在移栽后 90 d, 叶片 POD 活性处理间存在显著差异, 根系 POD 活性 T3、T1 处理间差异不显著, 但均显著低于 T2 处理。在移栽后 120 d, 叶片及根系的 POD 活性也均以 T2 处理最高, 且 T3 处理下叶片 POD 活性相比根系降幅大, 其叶片 POD 活性较 T2 处理显著降低, 但 T3 处理根系 POD 活性仅稍低于 T2 处理。表明施用生物炭基肥均可提高烟株 POD 活性, 且以 T2 处理效果更优。

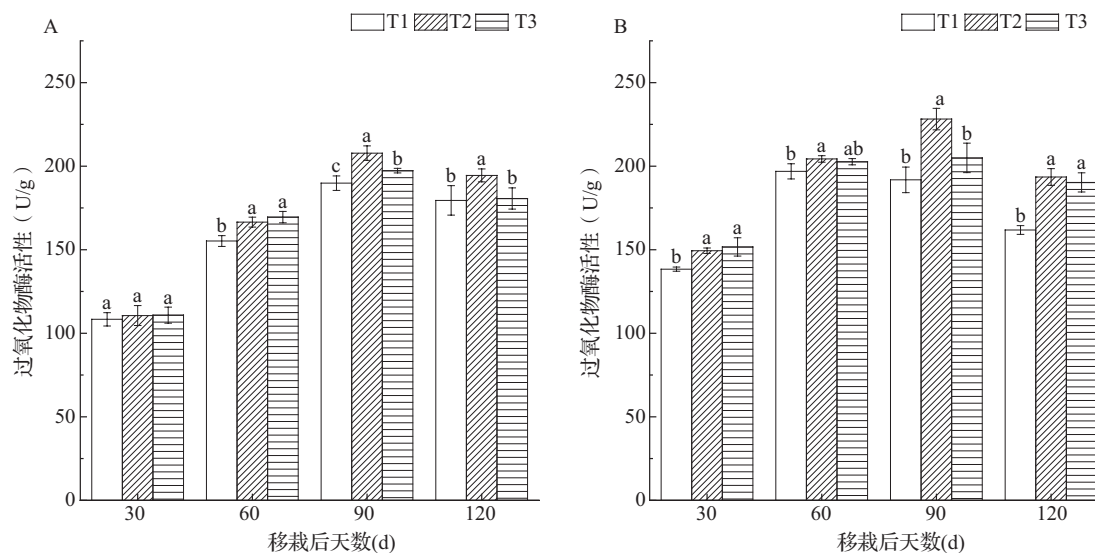


图2 生物炭基肥对烤烟叶片 (A) 和根系 (B) 过氧化物酶活性的影响

2.1.3 丙二醛含量

由图3可以看出,烟株叶片MDA含量与根系的变化趋势相同,均随着移栽后天数的增加呈不断上升趋势。在测定的4个时期中,除在移栽后60 d时T3处理的根系MDA含量最高外,叶片和根系的MDA含量均以T1处理最高。在移栽后的30 d,3个处理间的叶片MDA含量无显著差异,但T3处理的根系MDA含量较T1处理显著降低45.5%。在移栽后60 d,叶片和根系MDA含量均以T1处理最高,T2和T3处理的叶片MDA含量均显著低于T1处理,而T3处理的根系MDA含量与T1处理相比不显著,但较T2处理显著提高52.1%,说明移栽后30~60

d,T2处理能防止根系膜脂过氧化,减缓MDA累积。在移栽后的90和120 d时,烟株叶片及根系MDA含量均表现T1>T3>T2,其中叶片MDA含量在不同处理间均达到了显著水平,在移栽后90 d,T1处理的根系MDA含量显著高于T2和T3处理,分别增加了6.2和5.0 $\mu\text{mol/g}$ 。在移栽后120 d时,T3和T2处理的叶片MDA含量相比T1处理分别降低了14.1%和20.5%,而T3处理的根系MDA含量与T2处理相比提高了20.6%。以上结果表明施用生物炭基肥有效地降低了烟叶的MDA含量,在移栽后30和60 d,以T3处理的效果较好,但在移栽后的90和120 d以T2处理的效果较优。

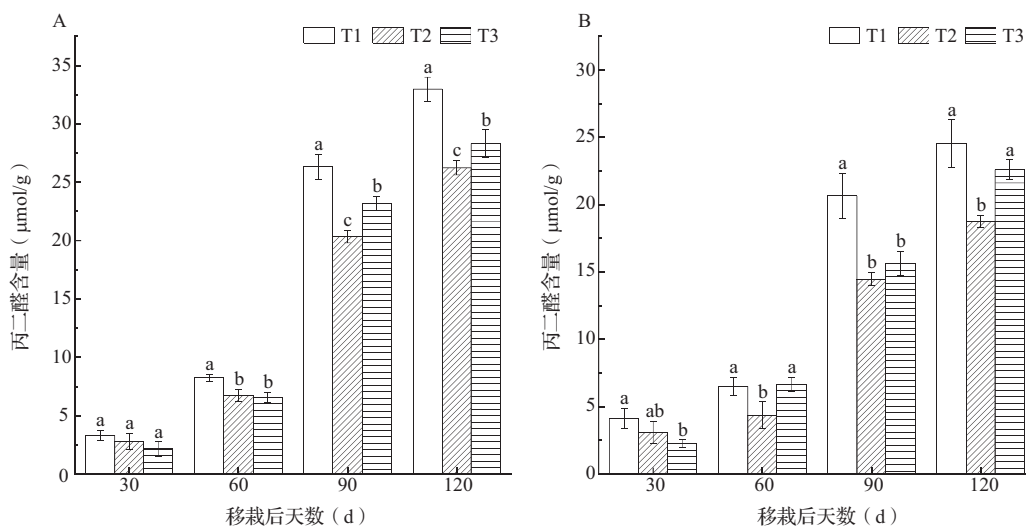


图3 生物炭基肥对烤烟叶片(A)和根系(B)丙二醛含量的影响

注:丙二醛含量以样品鲜重计。

2.2 生物炭基肥对烤烟叶片和根系渗透调节物质含量的影响

2.2.1 可溶性蛋白含量

图4反映了生物炭基肥在4个测定时期中对烤烟SP含量的影响。叶片和根系SP含量均在移栽后60 d时达到峰值,且在4个时期中均表现为叶片SP含量高于根系。在移栽后30 d时,T2处理叶片和根系的SP含量均显著高于T1和T3处理,其中根系SP含量与T1和T3处理相比分别增加50.3%和71.1%。在移栽后的60 d,T2和T3处理的叶片SP含量差异不显著,但较T1处理分别显著提高6.5%和6.8%;3个处理间根系SP含量的差异不显著。在移栽后的90 d时,叶片和根系的SP含量均为T2>T3>T1,且处理间差异均达到了显著水平。在移栽后的120 d时,3个处理的叶片和根系的SP

含量均以T2处理最高,且较T1处理分别显著提高102.1%和41.8%。综合分析得出,施用生物炭基肥有助于提升烟株根系的SP含量,但施用T3处理在移栽30和120 d时的效果不突出。

2.2.2 可溶性糖含量

从图5中可知,与SP含量相似,烟株叶片和根系SS含量也均在移栽后60 d达到峰值,且叶片SS含量总体高于根系。在4个测定时期中,T2和T3处理的叶片SS含量相比T1处理提升了16.0%~52.0%,根系SS含量提升了5.1%~23.0%,但在移栽后不同天数的表现存在一定的差异。在移栽后30 d时,3个处理间的叶片SS含量T3>T2>T1且处理间差异均达到显著水平,此期的根系SS含量以T2和T3显著高于T1处理。在移栽后60、90和120 d时叶片SS含量和在移栽后

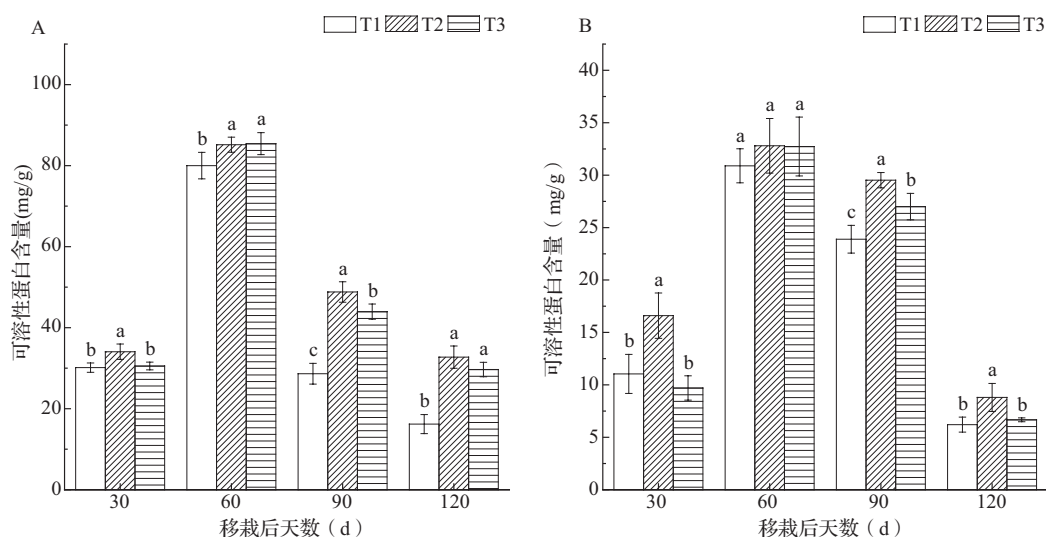


图4 生物炭基肥对烤烟叶片 (A) 和根系 (B) 可溶性蛋白含量的影响

注: 可溶性蛋白含量以样品鲜重计。

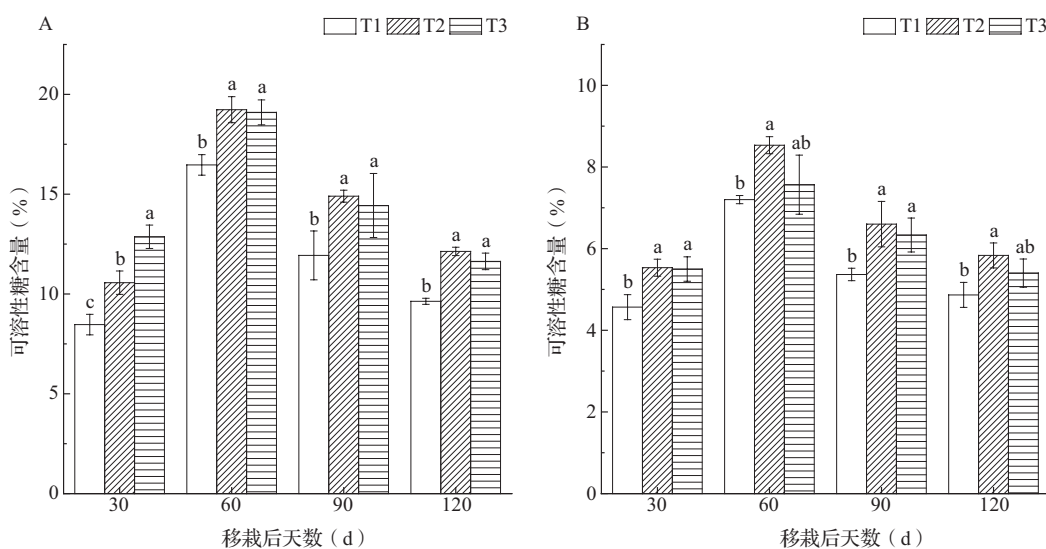


图5 生物炭基肥对烤烟叶片 (A) 和根系 (B) 可溶性糖含量的影响

90 d时根系 SS 含量均表现为 T2 与 T3 处理差异不显著, 但均显著高于 T1 处理。同时在移栽后 60 和 120 d, 3 个处理的根系 SS 含量均以 T2 处理最高, T3 处理其次, T1 处理最低, 且 T2 与 T1 处理存在显著差异。综合来看施用生物炭基肥可有效促进根系 SS 含量的积累。

2.2.3 脯氨酸含量

从图 6 可以得出, 3 个处理的叶片 Pro 含量在移栽后 90 d 达到峰值, 根系则在移栽后的 60 d 达到峰值。在移栽后 30 d, 3 个处理的叶片 Pro 含量无显著差异, 但 T2 和 T3 处理的根系 Pro 含量均显著高于 T1 处理。在移栽后 60 和 120 d 时, 3 个

处理的 Pro 含量均以 T2 处理最高, 其叶片的 Pro 含量相比 T1 处理分别增加了 41.1%、15.2%, 根系的 Pro 含量分别增加了 54.7%、75.8%。在移栽后 90 d, 以 T3 处理的叶片 Pro 含量最高, 达 1.0 mg/g, 显著高于 T1 处理 28.7%; 根系的 Pro 含量表现为 T2>T3>T1, 且 3 处理间差异均达到了差异水平。说明施用生物炭基肥能提高烟叶的 Pro 含量, 其中 T2 处理的效果最好。

2.3 生物炭基肥对烤烟经济性状的影响

施用生物炭基肥处理对烟叶经济性状有显著影响 (表 1)。烟叶的产量以 T2 处理最高, T3 处理其次, 且 T2 比 T1 处理显著提高 16.9%, 但 T3

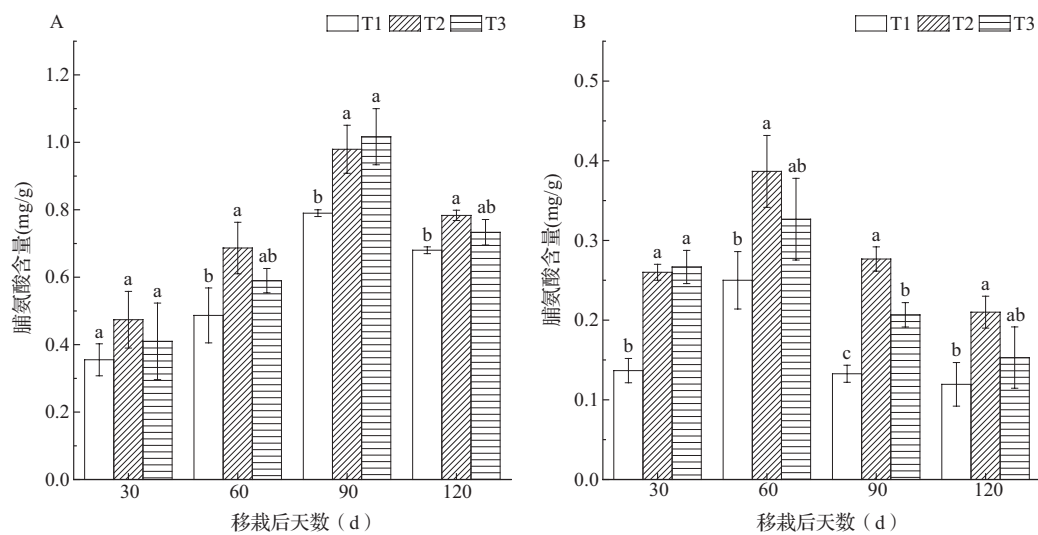


图6 生物炭基肥对烤烟叶片(A)和根系(B)脯氨酸含量的影响
注:脯氨酸含量以样品鲜重计。

表1 不同生物炭基肥处理经济性状比较				
处理	产量 (kg/hm ²)	产值 (万元/hm ²)	均价 (元/kg)	上中等烟比例 (%)
T1	1933b	5.3b	27.4a	83.1c
T2	2260a	6.5a	28.5a	86.0a
T3	2153ab	6.0ab	28.0a	84.6b

注:同一列标以不同英文字母的数据在0.05水平上差异显著(P<0.05)。

与T1处理间差异不显著。上中等烟比例表现为T2>T3>T1且处理间差异均达到了显著水平,从而有效提高了烟叶单价。从产值上看,总体上,T2和T3处理的产量、产值、均价和中上等烟比例均呈现出增加趋势,说明施用生物炭基肥对烤后烟的产量、产值及上中等烟比例均有明显的促进作用。整体以T2处理影响最显著。

2.4 烤烟抗逆生理特性和经济性状的关系

2.4.1 烤烟叶片生理指标与经济性状的相关分析

从图7烤烟叶片指标与经济性状指标的相关分析可知,在移栽后30d时,叶片指标中Pro含量与产值呈显著正相关(R=0.998^{*});在移栽后60d时,MDA含量与均价呈显著负相关(R=-0.997^{*});在移栽后90d时,SOD活性和SS含量与烤后烟的均价均呈显著正相关(R=0.999^{*},R=0.999^{*}),POD活性则与产值呈显著正相关(R=0.999^{*});在移栽后120d时,SOD活性与产量呈显著正相关(R=0.998^{*}),POD活性与产值呈显著正相关(R=0.999^{*}),SS含量与移栽后90d时规律一致,均与均价呈显著正相关(R=0.999^{*})。可见,烤烟的叶

片指标与经济性状指标的相关性随着烟株的生长时间逐渐密切,且以移栽后90和120d时,烤烟的叶片生长指标与经济性状最为密切。图7还表明,烤烟的叶片抗逆指标与经济性状指标在移栽后的4个时期中均存在不同程度的相关性,其中在移栽后90和120d时SOD活性分别与均价和产量呈显著正相关,SS含量在移栽后90和120d时均与均价呈显著正相关,POD活性则均与产值在移栽后90和120d时呈显著正相关。试验结果说明烤烟叶片抗逆指标与经济性状指标多显著相关,可通过调控叶片抗逆特性来改善烤烟的经济性状,从而增加经济效益。

2.4.2 烤烟根系生理指标与经济性状的相关分析

分别从移栽后的4个测定时期对烤烟的根系指标和经济性状指标进行相关分析(图8)。在移栽后30d时,烟株的根系指标与经济性状指标不存在显著相关性。在移栽后60d时,根系SS含量与产量呈极显著正相关(R=0.999^{**}),根系POD活性与均价呈显著正相关(R=0.997^{*})。在移栽后90d时,根系MDA含量与均价呈显著负相关(R=-0.999^{*})。在移栽后120d时,根系MDA含量与产量呈极显著负相关(R=-0.999^{**});根系Pro含量与产量呈极显著正相关(R=0.999^{**}),与产值呈显著正相关(R=0.997^{*});根系POD活性与产量、产值均呈显著正相关水平(R=0.999^{*},R=0.999^{*})。综合来看,烟草经济性状指标与移栽后120d时根系抗逆指标的关系更为密切,说明随着生长发育时间的推移根系抗逆特征对烤烟经济性状的影响越来越大。

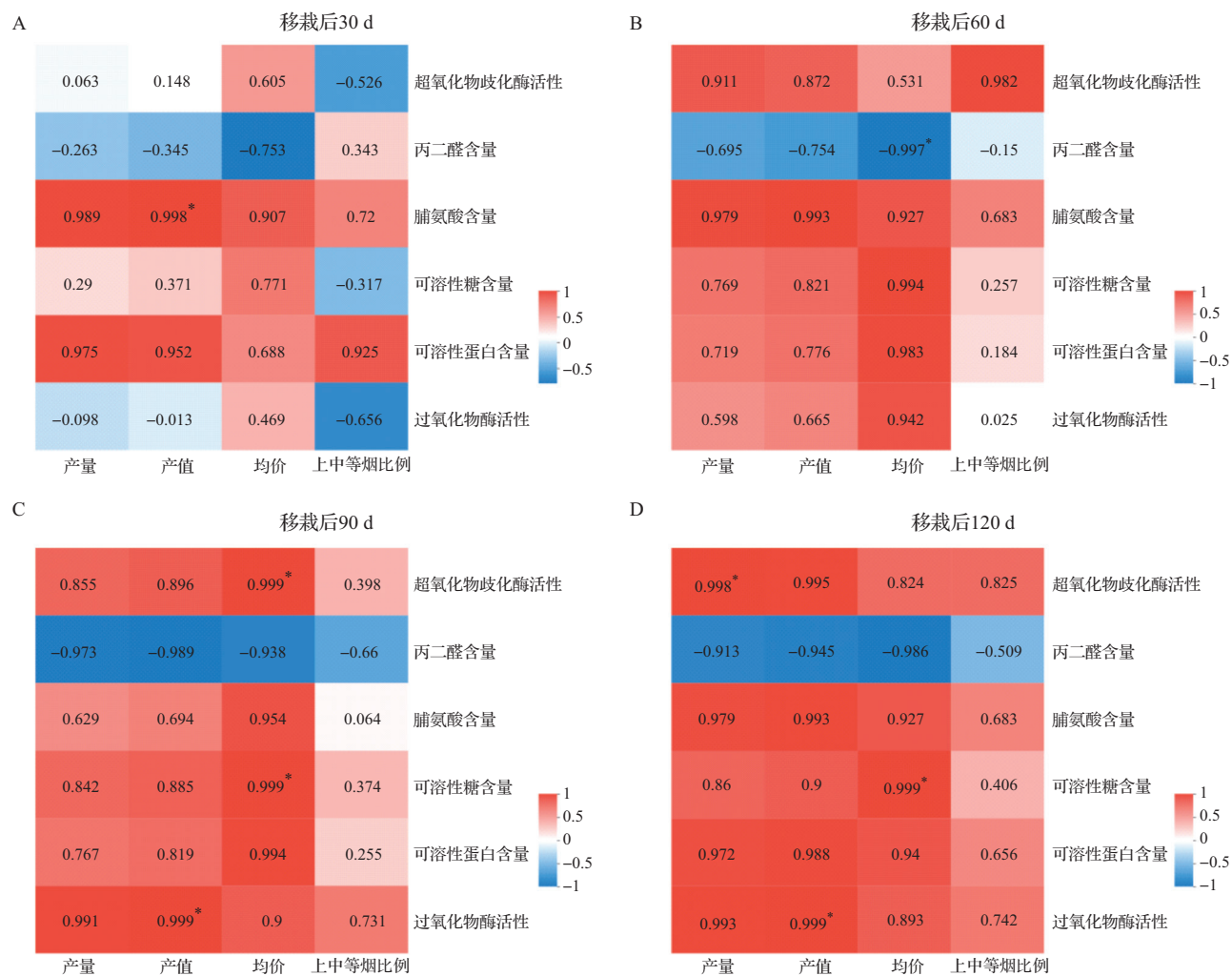
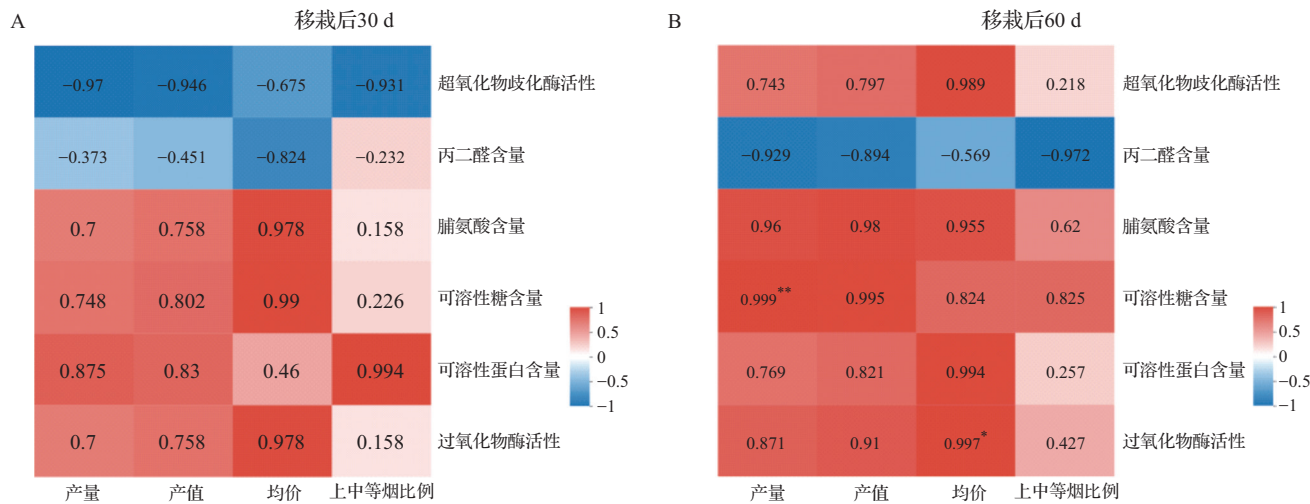


图 7 烤烟叶片指标与经济性状指标的相关分析

注：*、** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。下同。



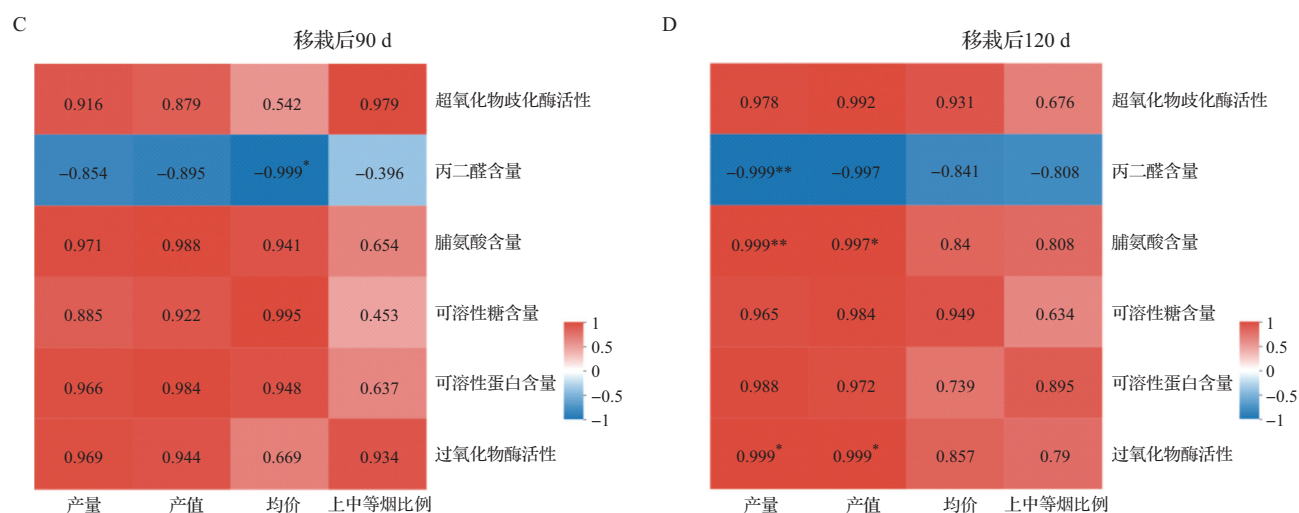


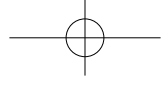
图 8 烤烟根系指标与经济性状的相关分析

3 讨论

近年来, 由于有机肥的使用量不足和烤烟连作障碍, 重庆植烟区出现了土壤酸化、黏化以及微生物群落结构恶化的现象, 重庆烟区的烤烟生产出现较为突出的土壤逆境问题, 从而影响了烤烟的产量、品质 and 经济效益^[1]。研究表明, 提高烟草的抗逆生理能力, 有利于促进烤烟的生长发育, 形成较优的产量和品质^[15-18]。SOD 和 POD 是植物抗氧化酶系统中的关键酶, 可消除自由基对植物细胞的氧化伤害, 降低 MDA 的累积, 促进植物生长^[19]。抗氧化酶活性高不但使烟株具有较强的抗逆能力, 而且可增加作物光合作用的强度, 降低其呼吸作用, 促进了优质烟叶的形成, 同时它们的活性水平也基本决定了膜脂过氧化反应的程度^[20]。前人研究表明, 生物炭基肥作为一种新型肥料, 既可优化土壤理化性质, 调节土壤微生物群落及数量, 又能有效吸附作物生长必需的营养元素, 提高植株本身的抗逆能力, 降低 MDA 含量, 延缓植株的衰老, 从而提高作物的产量和品质^[21-24]。本研究结果表明, 与常规施肥 (T1) 相比, 生物炭基有机肥 (T2) 和生物炭基复混肥 (T3) 处理在移栽后不同天数均可提高叶片和根系 SOD、POD 活性, 且可使根系 SOD、POD 活性的降幅变慢, 说明施用生物炭基肥可提升烟株的抗氧化酶活性, 延缓衰老。本试验条件下, 在移栽后 30 ~ 120 d, 常规施肥 (T1) 的叶片和根系 SOD、POD 活性较低, MDA 含量最高且增速最快, 生物炭基有机肥 (T2) 处理的抗逆酶活性较高, MDA 含量最低且增速最慢。这可

能是由于生物炭本身具有的疏松多孔结构和较强的表面吸附能力以及较大的阳离子交换量, 能将土壤中有效态的矿质元素吸附至近根区, 有利于改善土壤养分的供应, 且有机肥作为一个缓效肥, 在烟株生长后期仍可创造一个良好的养分供应环境, 促进烟株整个生育期的生长发育^[25-26]。本研究还发现, 3 个处理烟株叶片及根系 MDA 含量在移栽后 60 ~ 90 d 上升趋势加快, 与蒋光华等^[27]研究结果相一致, 可能是因为此阶段烟株进行打顶后进入成熟期, 烟叶内超氧阴离子自由基和过氧化氢迅速增加, 抗氧化酶活性呈持续下降趋势, 烟株衰老速度加快, 致使膜脂过氧化产物 MDA 含量增加^[28]。

渗透调节物质的积累是植物应对逆境的重要方式, 渗透调节物质积累量越大, 植物抗逆性越强。SP、SS 和 Pro 作为植物细胞内的渗透调节物质, 可调节植物体内水分平衡, 增加植物体的抗逆性^[29]。植物体在遭受逆境时, 会大量累积 SS、SP 和 Pro 以应对逆境^[30]。本研究结果表明, 叶片及根系的 SP、SS 和 Pro 含量规律一致, 生物炭基有机肥 (T2) 和生物炭基复混肥 (T3) 处理总体上优于对照 (T1) 处理, 这可能是由于生物炭在改善根区土壤结构、改善土壤养分供应能力和微生物活性、促进作物生长发育等方面都具有突出作用, 从而提高烟株的抗逆能力, 保持较高的渗透物质含量。进一步分析发现, 生物炭基有机肥 (T2) 的效果优于生物炭基复混肥 (T3), 说明在施用生物炭基肥的基础上施用有机肥还有一定的作用, 可能是由于 T2 处理中的生物炭和有机肥的加入延缓了肥料养分的释放, 从而保证了在烤烟生育后期的养分



供应, 增强了烤烟的抗逆性。

生物炭基肥处理的经济性状指标均优于对照, 且以生物炭基有机肥 (T2) 效果最佳, 说明施用生物炭基肥实现增产增收。相关性分析结果表明, 烤烟的抗逆生理指标与经济性状指标在不同测定时期存在着不同的相关性, 其中根系和叶片的 POD 活性和 Pro、可溶性糖含量均与经济性状指标呈显著正相关, MDA 含量与经济性状指标呈显著负相关, 这与孙佳尧等^[31]的研究相一致。这些结果说明可通过提高烟株根系和叶片的抗氧化酶活性和渗透调节能力、降低 MDA 含量间接提升烤烟产量, 提升烟叶品质和种植效益。

4 结论

生物炭基肥可有效提高烤烟叶片及根系的抗氧化酶活性及渗透调节物质含量, 降低叶片及根系中的 MDA 含量, 同时提高烤烟产量、产值和上中等烟比例等经济性状。在 4 个测定时期中, 烤烟抗逆与渗透指标和经济性状指标均呈现不同程度的相关性, 总体以移栽后 120 d 时相关性最为密切。生物炭基复混肥 (T3) 处理在前 2 个测定时期的效果较好, 但 4 个测定时期总体上以生物炭基有机肥 (T2) 处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 江厚龙, 张定志, 李钠钾, 等. 重庆烟区植烟土壤养分现状分析 [J]. 河南农业科学, 2015, 44 (6): 58–63.
- [2] 王欢欢, 赵园园, 陈小龙, 等. 生物炭对土壤碳组分及烟草生长发育的影响 [J]. 烟草科技, 2022, 55 (9): 36–43.
- [3] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010, 78: 1167–1171.
- [4] Steiner C, Teixeira W G, 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.
- [5] 高林, 王瑞, 张继光, 等. 生物炭与化肥混施对烤烟氮磷钾吸收累积的影响 [J]. 中国烟草科学, 2017, 38 (2): 19–24.
- [6] 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): 48–53.
- [7] 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): 48–50, 54.
- [8] 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.

- [9] 张功臣, 秦玉红, 王波, 等. 生物炭对盐胁迫下黄瓜叶片抗氧化酶活性和矿质元素累积的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53 (4): 931–938.
- [10] 宋文静, 赵永长, 况帅, 等. 干旱胁迫下黄腐酸钾对烤烟幼苗保水渗透调节能力的影响 [J]. 中国烟草科学, 2017, 38 (6): 61–66.
- [11] 王成己, 唐莉娜, 胡忠良, 等. 生物炭和炭基肥在烟草农业的应用及展望 [J]. 核农学报, 2021, 35 (4): 997–1007.
- [12] 季学军, 张国, 王道支, 等. 皖南不同土壤类型烤烟抗氧化能力差异分析 [J]. 中国烟草科学, 2011, 32 (6): 26–31.
- [13] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢 [J]. 植物学通报, 2001, 18 (4): 459–465.
- [14] 李小芳, 张志良. 植物生理学实验指导 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [15] 廖丽. 锥栗主栽品种主要生理生化差异及其对品质、产量的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
- [16] 单嘉烨, 张学伟, 鄢敏, 等. 喷施稀土微肥对干旱胁迫下烤烟生长及生理特性的影响 [J]. 作物杂志, 2023 (2): 100–105.
- [17] 张丽娟, 张晓明. 菜豆生理指标和产量相关性的研究 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49 (4): 888–890.
- [18] 童文杰, 邓小鹏, 谢贺, 等. 烤烟伸根期生理特性对于干旱胁迫的响应及其抗旱性评价 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20 (6): 28–40.
- [19] Li Z G, Long W B, Yang S Z, et al. Involvement of sulfhydryl compounds and antioxidant enzymes in H₂S-induced heat tolerance in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) suspension-cultured cells [J]. Plant Physiology, 2015, 51 (4): 428–437.
- [20] 黄亚成, 秦云霞. 植物中活性氧的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2012, 28 (36): 219–226.
- [21] 韩锦峰, 汪耀富, 林学梧, 等. 烤烟叶片成熟度与细胞膜脂过氧化及体内保护酶活性关系的研究 [J]. 中国烟草学报, 1994, 2 (1): 20–24.
- [22] 陈懿, 林英超, 黄化刚, 等. 炭基肥对植烟黄壤性状和烤烟养分积累、产量及品质的影响 [J]. 土壤学报, 2019, 56 (2): 495–504.
- [23] 彭静, 郭磊, 彭琼, 等. 不同灌溉方式对烤烟的生长及品质的影响 [J]. 植物生理学报, 2013, 49 (1): 53–56.
- [24] 甘万祥, 康超, 张腾, 等. 不同叶面喷施肥对烟草生理及产量、品质的影响 [J]. 河南农业科学, 2015, 44 (9): 40–44.
- [25] 王晓玲, 赵泽州, 任树鹏, 等. 生物炭基肥在我国的制备和应用研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (1): 230–238.
- [26] 宋如荻, 彭晓英, 王亦豪, 等. 微生物炭基土壤调理剂对水稻生长生理和镉吸收的影响 [J]. 激光生物学报, 2020, 29 (6): 561–569.
- [27] 蒋光华, 母少东, 李浩, 等. 不同植烟区土壤对中部烟叶抗氧化系统及部分质量指标的影响 [J]. 土壤, 2014, 46 (6): 1157–1163.

[28]

金佳威, 刘咏艳, 王惠, 等. 施氮量和留叶数对烤烟 LY1306 上部叶生理特性及产质量的影响 [J]. 山东农业科学, 2023, 55 (4): 56–64.

[29]

李晓青, 荆月婷, 冯全福, 等. PEG 模拟干旱胁迫对不同烤烟品种生理特性的影响 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37(3): 15–21.

[30]

毛浩田, 陈梦莹, 吴楠, 等. 干旱胁迫对不同倍性小麦和八倍体小黑麦苗期光合能力与抗氧化系统的影响 [J]. 麦类作物学报, 2018, 38 (10): 1246–1254.

[31]

孙佳尧, 李志刚, 孟祥军, 等. 氮肥处理下油莎豆叶片生理特性和籽粒品质与产量相关研究 [J]. 内蒙古民族大学学报 (自然科学版), 2020, 35 (4): 327–332.

Effects of biochar-based fertilizer on the physiological characteristics of stress resistance and economic traits of flue-cured tobacco

SONG Peng¹, LI Hui¹, JIANG Hou-long², ZHAO Peng-yu¹, LI Li-xiang¹, ZHAO Biao¹, ZHANG Jun^{1*} (1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471000; 2. Chongqing Tobacco Science Research Institute, Chongqing 400715)

Abstract: In order to explore the effects of biochar-based fertilizer on antioxidant enzyme, osmotic regulation ability and economic traits of flue-cured tobacco, ‘Yunyan 116’ was chosen as the research object and three treatments were set up, including conventional fertilization (T1), biochar-based organic fertilizer (T2) and biochar-based compound fertilizer (T3). The physiological characteristics of stress resistance of leaves and roots were determined at 30, 60, 90 and 120 d after transplanting, including activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) and contents of malondialdehyde (MDA), soluble protein (SP), soluble sugar (SS) and proline. Additionally, the yield, output value, average price, and ratio of upper middle grade leaves of tobacco after curing were analyzed. The main results were as follows. (1) Biochar-based fertilizer improved the stress resistance and osmotic adjustment ability of tobacco plants, and T2 treatment had the best effect. The activities of SOD and POD in leaves increased by 1.1%–10.6% and 2.1%–9.5%, respectively, compared with T1 treatment, and the content of MDA decreased by 16.0%–20.5%. At the same time, the contents of SP, SS, and proline in leaves treated with T2 and T3 increased by 1.4% to 102.1%, 16.0% to 52.0%, and 7.8% to 41.1%, respectively. The root stress resistance characteristics of different treatments were consistent with those of leaves. (2) Biochar-based fertilizer improved the yield, output value and ratio of upper middle grade leaves of flue-cured tobacco, with the highest yield and output value in T2 treatment, which increased by 16.9% and 21.8% compared to T1 treatment, respectively. (3) Through the correlation analysis of physiological and economic traits of flue-cured tobacco, it could be seen that there were varying degrees of correlation between the two types of indicators during the four measurement periods, with the overall correlation being the closest at 120 d after transplantation. In summary, the application of biochar-based fertilizer improved the antioxidant capacity, osmotic regulation ability, and economic traits of flue-cured tobacco, among which T2 treatment had the best effect. The research results could provide theoretical basis and technical support for the rational application of biochar-based fertilizer.

Key words: biochar-based fertilizer; flue-cured tobacco; antioxidant enzyme; osmoregulatory substance; economic trait