

匡志豪,殷全玉,李 想,等. 生物炭对不同烤烟品种生理及烟草黑胫病的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(15):100-105.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.15.015

生物炭对不同烤烟品种生理及烟草黑胫病的影响

匡志豪^{1,2}, 殷全玉¹, 李 想¹, 任志超¹, 农世英³, 宋战锋³, 周文亮³

(1. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450002; 2. 安徽中烟工业有限责任公司阜阳卷烟厂, 安徽阜阳 236000;

3. 广西壮族自治区烟草公司百色市公司, 广西百色 533000)

摘要:为明确生物炭与烤烟品种的互作特性,促进绿色优质烟叶的生产,在温室盆栽条件下,以黑胫病高抗品种 G28、NC82,中抗品种 K326、云烟 87(YY87),高感品种红花大金元(HD)、净叶黄(JYH)为试验材料,探究生物炭对不同品种烤烟农艺性状、根系形态、光合生理、烟草黑胫病防治效果及抗氧化酶活性的影响。结果表明,施用生物炭能有效促进烟株生长,相比对照,高抗品种 G28 长势最强,其株高、茎围、叶面积、总根长、根表面积的提高幅度最大,分别为 15.72%、10.37%、30.98%、33.69%、54.65%。高抗品种 NC82 净光合速率、蒸腾速率较对照升高幅度最大,达到 34.52%、32.15%。施用生物炭对高抗品种 NC82、中抗品种 K326 烟草黑胫病的防治效果达到 80.21%、76.82%,烟株根系抗氧化酶(POD、CAT、SOD)活性大幅升高。施用生物炭后,烟株抗氧化酶活性和黑胫病防治效果整体表现与烤烟品种自身抗性呈正相关,即高抗品种 > 中抗品种 > 高感品种。综上所述,施用生物炭能有效提高烤烟光合作用,促进烟株生长,并在烟草疫霉胁迫下诱导烟草防御性酶活性升高,增强烟株对烟草黑胫病的抗性。

关键词:烤烟品种;生物炭;农艺性状;光合生理;烟草黑胫病;防治效果

中图分类号:S572.04;S435.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)15-0100-06

烟草黑胫病是由烟草疫霉 (*Phytophthora nicotianae*) 引起的一种土传真菌病害^[1],是烟叶生产中面临的突出性难题。该病一旦暴发流行,往往造成大面积烟株死亡,影响烟叶产质量^[2]。目前主要的防治措施包括种植抗病性品种和施用化学农药,但由于烟草工业对原料的需求和地域间烟草疫霉致病性差异等原因,抗性品种无法大面积推广^[3]。

生物炭是指生物有机材料在高温缺氧条件下碳化热解而产生的富碳固体物质^[4]。近年来,生物炭由于自身具有多孔性、比表面积大、离子交换能力强等优良特性,在农业生产中得到越来越广泛的应用^[5]。闫新伟等研究发现,生物炭显著增加了花生的株高、分枝数、根体积和主根长,有效改善了花生的农艺性状^[6]。丁俊男等通过对比不同生物炭用量发现,大豆的蒸腾速率和气孔导度均随生物炭

施用量的增加而升高,光合速率显著高于对照,生物炭可提高光合作用强度,增加光合产物积累,促进作物生长^[7]。除此自外,生物炭在植物病害的防治方面也表现出巨大潜力。Ogawa 等研究发现,生物炭和生物炭与堆肥混合物均能抑制细菌和真菌引起的土传病害^[8]。张广雨等发现,生物炭对烟草青枯病原菌有显著抑制作用,施用生物炭后,烟草青枯病发病率由 84.13% 降至 24.92%,防治效果达到 81.38%^[9]。目前,生物炭对植株生长和病害防治效应的研究报道多数来自水稻、大豆、花生等作物,在烟草上的应用研究相对较少。本研究以不同烤烟品种为材料,探究施用生物炭对烟株农艺性状、根系发育、光合生理及烟草黑胫病防治效果的影响,通过绿色防治手段,提高烟株自身抗性,降低黑胫病发生,促进优质烟叶生产,以为生物炭在烤烟生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试烟草品种 本试验选用的烤烟品种为高抗烟草黑胫病品种 G28、NC82,中抗烟草黑胫病品种 K326、云烟 87(YY87),高感烟草黑胫病品种红花大金元(HD)、净叶黄(JYH),均由河南农业大

收稿日期:2022-11-20

基金项目:中国烟草总公司广西壮族自治区公司科技创新计划(编号:201845000024137)。

作者简介:匡志豪(1997—),男,河南潢川人,硕士研究生,主要从事烟草栽培和生理生化研究。E-mail:1832786548@qq.com。

通信作者:周文亮,硕士,农艺师,主要从事烟叶生产科学研究及管理工作。E-mail:zhouwenliang9725@163.com。

学烟草学院提供。

1.1.2 供试生物炭 本试验选用的生物炭为河南惠农土质保育研发有限公司所生产,由花生壳粉碎后在 400 ℃ 条件下不完全燃烧 24 h 制成。其 pH 值为 8.33,总碳含量为 414.72 g/kg,总氮含量为 14.36 g/kg,碳氮比 28.88,比表面积 22.97 m²/g。

1.1.3 供试土壤 盆栽土壤采用大田耕层 0~30 cm 土壤,土壤基础肥力:pH 值 7.57,含有机质 11.5 g/kg、速效氮 81.59 mg/kg、速效磷 10.09 mg/kg、速效钾 134.57 mg/kg。

1.1.4 供试菌株及菌液制备 烟草疫霉由中国农业科学院农业微生物菌种保藏中心提供。烟草疫霉接入燕麦琼脂(OA)培养基,(26±1)℃ 培养 6~7 d 后,用无菌水冲洗孢子,并调节为 1×10⁵ CFU/mL 疫霉孢子悬浮液备用。

1.2 试验设计

本试验于 2020 年 5—9 月在河南农业大学许昌校区人工气候室内进行。试验采用双因素随机区组设计。试验因素为生物炭(施用与未施用)和烤烟品种(6 个品种),共 12 个处理组合,每个组合重复 3 次,每次重复 10 盆。

采用上口口径 33.0 cm、高 31.5 cm、底径 22.5 cm 的塑料盆栽培,盆栽土除去杂草和碎石后过 1 cm×1 cm 筛网,每盆按 1.83 g/kg 添加复合肥(N、P₂O₅、K₂O 质量比为 1:1.5:3)、100 g 生物炭(对照组不施加生物炭)与 15 kg 土壤充分混匀装盆。选取由常规漂浮育苗所培育的长势一致的不同烤烟品种烟苗,于 5 月 5 日进行移栽,浇足等量移栽水,栽培措施及后期管理措施保持一致。

1.3 试验测定指标及方法

1.3.1 农艺性状测定 按照 YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查方法》的标准,在烟苗移栽后 30 d,调查测定各处理烟株的株高、茎围、叶长、叶宽、有效叶数。叶面积计算公式:叶面积=叶长×叶宽×0.634 5^[10]。

1.3.2 根系形态测定 移栽后 30 d 挖出烟株,抖落根部土壤,用清水反复冲洗干净,切下整株烟株根系,通过 EPSON 根系扫描仪将完整扫描的根系图像存入计算机,利用 WinRHIZO 分析总根长、根体积、根表面积、平均根径、根投影面积、分枝数。

1.3.3 光合生理指标测定 移栽后 30 d,选择各处理烟株自上而下的第 5 张烟叶,用 Li-6400XT 便携式光合仪测定叶片光合参数。每张叶子测量 3 次,

取平均值。测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率,测量时间为 09:00—11:30,连续测量 3 d,取平均值。

1.3.4 烟草黑胫病防治效果 在烟苗移栽后 30 d,采用灌根接种法取配制好的烟草疫霉孢子悬浮液(1×10⁵ CFU/mL),按 20 mL/株均匀接种至烟株根部土壤,10 d 后调查发病率,计算病情指数和防治效果。

烟草黑胫病分级参照 GB/T 23222—2008《烟草病虫害分类及调查方法》标准进行。

发病率 = [病叶(株)数/调查总数(株数)] × 100% ;

病情指数 = Σ(病级数 × 该级病株数)/(最高病级数 × 调查总株数) × 100 ;

防治效果 = (对照病指 - 处理病指)/对照病指 × 100% 。

1.3.5 抗氧化酶活性测定 移栽后 40 d,取各处理烟株相同部位的叶片,参考赵世杰等的方法^[11],测定过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)的活性,采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,每个处理重复 3 次。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 生物炭对不同烤烟品种农艺性状的影响

由表 1 可知,移栽后 30 d,施加生物炭的各烤烟品种的株高、茎围、有效叶数、叶面积均显著高于对照,说明生物炭对烤烟地上部生长具有显著促进作用。与对照相比,G28、HD 在施加生物炭后,烟株的株高提升效果最显著,增幅分别达到 15.72%、14.74% (P<0.05)。G28、NC82 较对照茎围分别提高 10.37%、8.46% (P<0.05)。施用生物炭对烤烟 YY87 的有效叶数有较大促进作用,比未施用生物炭处理增加了 16.49% (P<0.05)。施用生物炭后 G28 的叶面积提升最显著,较对照提高 30.98% (P<0.05);其次是 NC82,较对照提高 28.29% (P<0.05)。综合各指标分析,施用生物炭对 G28 促进效果最显著。

2.2 生物炭对不同烤烟品种根系发育的影响

由表 2 可知,施加生物炭对各烤烟品种烟株根系发育有不同程度的促进作用。与对照相比,移栽

表 1 生物炭对不同烤烟品种农艺性状的影响

烤烟品种	处理	株高 (cm)	茎围 (cm)	有效叶数 (张)	叶面积 (cm ²)
G28	未施生物炭	43.76 ± 5.19b	4.92 ± 1.06b	14.06 ± 1.96b	482.14 ± 27.19b
	施用生物炭	50.64 ± 3.22a	5.43 ± 0.88a	15.79 ± 1.74a	631.51 ± 35.68a
NC82	未施生物炭	47.72 ± 4.81b	4.02 ± 1.13b	12.23 ± 1.65b	574.78 ± 41.92b
	施用生物炭	53.79 ± 4.92a	4.36 ± 0.59a	14.03 ± 1.55a	737.39 ± 63.11a
K326	未施生物炭	42.46 ± 4.32b	5.23 ± 0.78b	13.41 ± 1.36b	648.52 ± 31.86b
	施用生物炭	46.18 ± 3.27a	5.43 ± 0.96a	14.65 ± 2.75a	665.54 ± 33.94a
YY87	未施生物炭	52.71 ± 5.94b	5.09 ± 1.02b	13.52 ± 2.08b	618.27 ± 50.26b
	施用生物炭	55.59 ± 2.79a	5.41 ± 0.84a	15.75 ± 2.51a	671.21 ± 56.92a
HD	未施生物炭	42.61 ± 3.15b	5.23 ± 1.20b	14.54 ± 2.05b	692.52 ± 52.46b
	施用生物炭	48.89 ± 5.02a	5.51 ± 1.07a	14.98 ± 2.11a	759.83 ± 57.91a
JYH	未施生物炭	41.44 ± 3.76b	5.19 ± 0.81b	14.22 ± 1.27b	694.95 ± 38.42b
	施用生物炭	46.08 ± 3.12a	5.46 ± 0.92a	14.18 ± 1.64a	724.15 ± 29.93a

注:测值数据为平均值 ± 标准差;同列数据后小写字母表示同一烤烟品种数据差异达显著水平 ($P < 0.05$)。表 3、表 4 同。

表 2 生物炭对不同烤烟品种根系发育的影响

烤烟品种	处理	总根长 (cm)	根体积 (cm ³)	根表面积 (cm ²)	平均根直径 (mm)	分枝数 (个)
G28	未施生物炭	360.19 ± 20.91b	16.78 ± 2.01b	227.04 ± 25.54b	1.56 ± 0.17b	5 326.25 ± 173.62b
	施用生物炭	481.55 ± 39.62a	20.39 ± 3.72a	351.11 ± 20.92a	1.98 ± 0.15a	5 967.17 ± 272.42a
NC82	未施生物炭	335.72 ± 28.93b	18.03 ± 1.09b	192.30 ± 17.63b	1.79 ± 0.20b	4 065.64 ± 155.14b
	施用生物炭	361.16 ± 20.39a	22.32 ± 1.64a	230.76 ± 25.74a	2.10 ± 0.37a	4 682.71 ± 233.49a
K326	未施生物炭	321.74 ± 21.59b	15.07 ± 1.36b	257.58 ± 37.28b	1.96 ± 0.33b	4 746.17 ± 209.33b
	施用生物炭	386.21 ± 19.86a	19.89 ± 0.96a	322.86 ± 33.42a	2.34 ± 0.24a	4 982.49 ± 195.29a
YY87	未施生物炭	421.35 ± 26.34b	14.49 ± 1.21b	233.54 ± 29.61b	1.98 ± 0.26b	4 411.37 ± 185.98a
	施用生物炭	539.81 ± 46.27a	17.91 ± 1.64a	315.25 ± 19.89a	2.23 ± 0.51a	4 470.45 ± 255.31a
HD	未施生物炭	283.49 ± 40.51b	17.18 ± 2.33b	281.48 ± 23.69b	3.12 ± 0.29b	3 663.01 ± 196.93b
	施用生物炭	306.79 ± 19.65a	21.23 ± 1.72a	302.80 ± 30.28a	3.36 ± 0.48a	4 533.91 ± 268.49a
JYH	未施生物炭	284.95 ± 18.74b	16.42 ± 1.55b	234.49 ± 29.51b	1.75 ± 0.25b	3 800.87 ± 252.73b
	施用生物炭	332.04 ± 21.96a	20.51 ± 1.98a	275.81 ± 26.29a	1.96 ± 0.31a	4 391.68 ± 249.07a

后 30 d, G28 的总根长、根表面积、平均根直径增加效果最显著, 分别提高 33.69%、54.65%、26.92% ($P < 0.05$)。K326 的根体积较对照增幅达到最大, 为 31.98%; 其次是 JYH, 增幅为 24.91% ($P < 0.05$)。生物炭对 NC82、HD 的分枝数增加作用更显著, 分别上升 15.18%、23.78% ($P < 0.05$); 而 YY87 分枝数与对照数值接近, 不存在明显差异。整体来看, 施用生物炭更有利于 G28、K326 的根系扩展, 促使根系发达。

2.3 生物炭对不同烤烟品种光合生理的影响

由图 1 可知, 生物炭对 6 个烤烟品种的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、蒸腾速率均有显著

促进作用, 有效提高了叶片光合作用能力, 加快烟株生长和生物量积累。净光合速率和蒸腾速率均以 NC82、JYH 较其他处理提高更显著, 净光合速率相比对照增幅分别为 34.52%、30.17% ($P < 0.05$), 蒸腾速率提高了 32.15%、30.11% ($P < 0.05$), 相比之下, HD 对于净光合速率和蒸腾速率的响应程度略低。施加生物炭后, G28 的胞间 CO₂ 浓度达到最高, 增幅为 42.61% ($P < 0.05$); 其次是 JYH, 较未施用处理提高 38.03%。与对照相比, 各烤烟品种的气孔导度提升效果表现为 G28 > NC82 > JYH > HD > YY87 > K326, 其中 G28 增幅达到 54.18% ($P < 0.05$)。

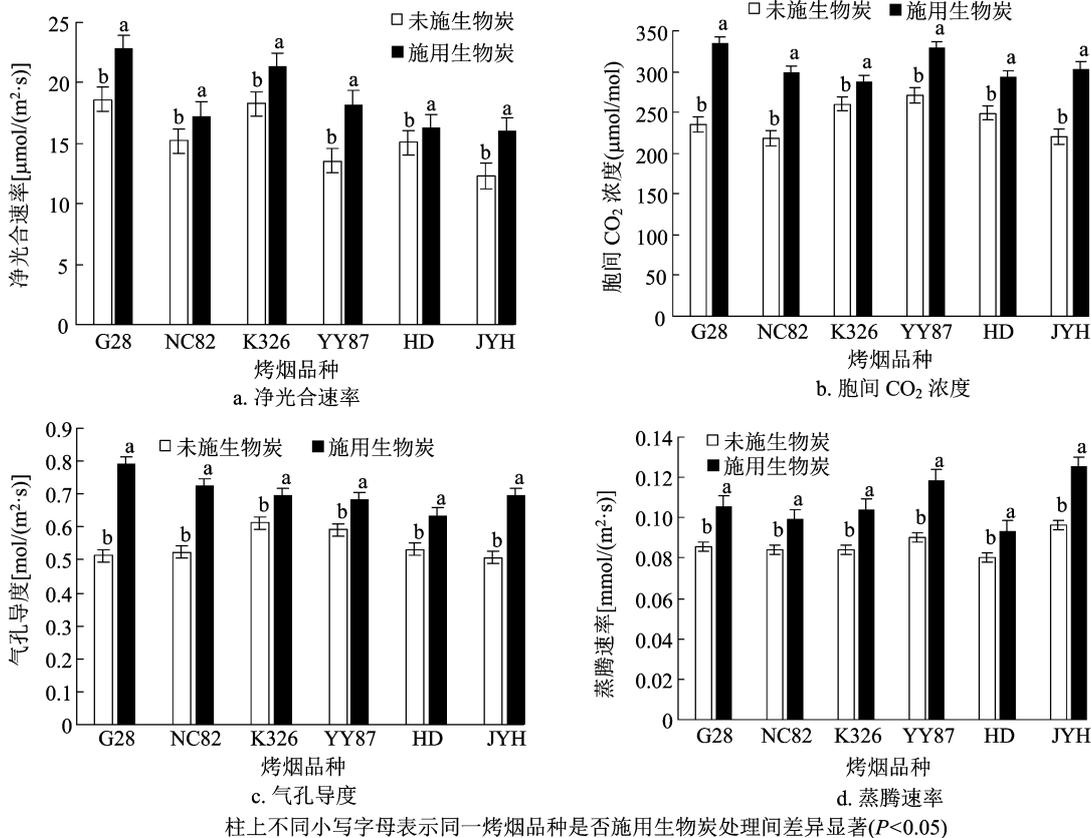


图1 生物炭对不同黑胥病抗性烤烟品种光合生理的影响

2.4 生物炭对不同烤烟品种烟草黑胥病防治效果的影响

由表3可知,施加生物炭后,不同黑胥病抗性烤烟品种的发病率、病情指数相比对照均显著下降。高抗黑胥病品种 G28、NC82 的发病率分别降至 27.65%、23.27% ($P < 0.05$),显著低于剩余烤烟品种,防治效果分别达到 73.65%、80.21% ($P <$

0.05);其次是中抗品种 K326、YY87,防治效果为 76.82%、62.86% ($P < 0.05$)。根据各烤烟品种特性分析,生物炭能有效抑制烟草黑胥病发生,且防治效果与烤烟自身抗性呈正相关,即防治效果由高到低排序为高抗黑胥病品种 > 中抗黑胥病品种 > 高感黑胥病品种。

表3 生物炭对不同烤烟品种烟草黑胥病的防治效果

烤烟品种	发病率 (%)		病情指数		防治效果 (%)
	未施生物炭	施用生物炭	未施生物炭	施用生物炭	
G28	67.93 ± 3.72c	27.65 ± 3.76c	41.86 ± 2.47b	17.26 ± 1.29c	73.65 ± 3.97
NC82	65.41 ± 2.29c	23.27 ± 4.37c	48.64 ± 3.05b	14.94 ± 0.83c	80.21 ± 6.46
K326	74.68 ± 4.72b	37.61 ± 3.25bc	63.59 ± 2.61a	22.65 ± 2.86b	76.82 ± 2.91
YY87	76.97 ± 5.66b	37.50 ± 1.94bc	58.71 ± 2.95b	26.37 ± 3.62a	62.86 ± 4.15
HD	89.27 ± 4.28a	45.08 ± 4.61b	67.34 ± 4.86a	35.94 ± 2.10a	58.73 ± 4.77
JYH	91.26 ± 6.51a	49.86 ± 4.75a	73.26 ± 5.93a	29.77 ± 3.45a	64.59 ± 5.24

注:测值数据为平均值 ± 标准差;同列数据后小写字母表示同一处理(施用生物炭或未施用生物炭)不同品种间数据差异达显著水平($P < 0.05$),下表同。

2.5 生物炭对不同烤烟品种抗氧化酶活性的影响

为探索生物炭诱导烤烟抗烟草黑胥病的机制,于移栽后 30 d 对施用生物炭的各烤烟品种接种烟

草疫霉孢子悬浮液,10 d 后对各处理烟株叶片的 POD、CAT、SOD 活性进行分析。由表4可知,生物炭对烟株体内抗氧化酶活性具有激发效应。

施加生物炭有助于提高各烤烟品种根系 POD 活性, 相比对照, 中抗品种 K326 和高感品种 HD、JYH 的 POD 活性升高幅度较大, 分别为 80.97%、76.55%、81.28% ($P < 0.05$), 高抗品种 G28、NC82 的 POD 活性较高。高抗品种 G28、中抗品种 YY87

的 CAT 活性增幅最大, 分别为 41.06%、37.56% ($P < 0.05$); 其他品种烤烟 CAT 活性升高幅度相近。高抗品种 G28、NC82 施用生物炭后, 烟株的 SOD 活性最高, 增幅最大。

表 4 生物炭对不同烤烟品种抗氧化酶活性的影响

烤烟品种	POD 活性[U/(g·min)]		CAT 活性[U/(g·min)]		SOD 活性[U/(g·min)]	
	未施生物炭	施用生物炭	未施生物炭	施用生物炭	未施生物炭	施用生物炭
G28	29.82 ± 4.61a	41.92 ± 2.98a	33.85 ± 2.56b	47.75 ± 4.78b	40.01 ± 3.71a	49.27 ± 2.94a
NC82	33.77 ± 1.92a	42.71 ± 2.99a	45.51 ± 2.75a	53.84 ± 3.58a	41.81 ± 3.95a	52.09 ± 2.06a
K326	19.29 ± 2.84b	34.91 ± 2.28b	27.57 ± 2.36bc	32.73 ± 2.45c	35.22 ± 2.72ab	41.77 ± 1.84ab
YY87	22.35 ± 3.78b	35.26 ± 3.15ab	25.29 ± 1.47bc	34.79 ± 2.80c	37.49 ± 2.99ab	43.13 ± 3.65ab
HD	18.68 ± 2.41b	32.98 ± 1.43b	25.61 ± 1.83bc	30.85 ± 2.01c	32.04 ± 2.17b	39.45 ± 2.93b
JYH	16.40 ± 2.58b	29.73 ± 3.27b	23.36 ± 3.22c	27.80 ± 2.69d	36.59 ± 3.09ab	42.20 ± 2.79ab

3 讨论与结论

株高和茎围是烟株生长过程中的重要农艺性状, 直接关系到烟株的形态构建和物质积累。叶片大小、叶片数与烟草后期产量、烟叶质量密切相关^[12]。生物炭的孔隙结构、巨大的表面积、丰富的芳香环结构和羧基等基团, 赋予生物炭强吸附能力和较大的离子交换量, 可以通过改善土壤离子交换量而提高土壤保肥能力^[13]。研究表明, 木材生物炭能有效提高土壤对 N 的固定能力, 从而提高作物对 N 的利用率^[14]。白雪等研究发现, 施用生物炭能显著提高元宝枫幼苗的株高、茎粗、叶面积、生物量积累^[15]。周劲松等通过对比生物炭不同施用量对水稻幼苗根系形态建成, 发现不同用量生物炭均能促进水稻根系生长, 总根长、根直径、根体积、根表面积均得到显著提高^[16]。本试验选取不同烤烟品种进行对比, 避免了单一品种造成的差异性。试验结果显示, 施用生物炭对烟株株高、茎围、有效叶数、叶面积均有显著促进作用, 总体上以 G28 品种各指标提高最显著。这可能是因为生物炭增加了土壤透水性和持水性, 改善土壤通透性, 降低土壤容重, 最终促进植物根系生长和地上部形态建成。与对照相比, 施用生物炭后, 烟株的总根长、根表面积、根体积、分枝数显著升高, 说明生物炭有利于烟株形成更发达的根系网络, 使得烟株根部与土壤间有更大的接触面积和吸收范围, 能在更广泛的土壤中获取水和养分, 进而提高烟株地上部的各种农艺性状。

光合作用是植物干物质生成和积累的主要过程, 也是影响烟叶产质量的重要机制。影响光合作用的因素有很多, 如光照、温度、水分、CO₂ 浓度、矿质营养元素等^[17]。王力等研究表明, 施用生物炭有效提高了青贮玉米净光合速率、气孔导度和蒸腾速率^[18]。张伟明等研究显示, 生物炭与化肥互作显著提高了大豆叶片光合作用的强度, 增强了大豆苗期和结荚期净光合作用速率与蒸腾速率, 促使大豆提质增产^[19]。本试验也取得了相似结果, 施用生物炭后各品种烤烟的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、蒸腾速率均有不同程度的增加, 其中以 G28 品种的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和气孔导度增加幅度最大, 光合强度最大。其原因可能是, 生物炭中富含能被植物吸收利用的矿质营养元素, 为烟株提供了丰富的养分^[20], 同时生物炭促进了烟株根系发育, 增强了对水肥的吸收能力, 进而提升烟株光合能力, 提高烟叶光能利用率, 促进烟株生长和干物质积累。

植物防卫机制的形成是在相关防御性酶催化下进行的一系列复杂生理生化代谢的结果^[21], 通常以 POD、CAT、SOD 等抗氧化酶活性作为植物抗病能力的评判标准^[22]。SOD、POD、CAT 是植物体内清除活性氧的主要酶, 且 POD 能清除胺类毒性, 诱导木质素的合成, 强化植物组织, 增加病原菌入侵阻力^[23]。刘悦等研究表明, 生物炭对小麦赤霉病具有一定的防治作用, 病情指数由 26.6 降至 11.5, 防治效果达到 57.0%^[24]。张广雨等研究发现, 起垄前撒施生物炭能显著降低烟草青枯病的发病率, 与对

照相比,旺长期青枯病发病率由 31.70% 降至 3.33%,采收期青枯病发病率由 66.73% 降至 14.50%^[25]。Akther 等发现,土壤中施入生物炭后能促进植株根系生长并且分泌更多次生代谢物,抵抗病菌侵染^[26]。本试验结果显示,不同抗性烤烟品种施用生物炭后,烟草黑胫病发病率、病情指数均显著降低,烟株体内抗氧化酶活性大幅升高,其中以高抗品种 NC82 体内 POD、CAT、SOD 的活性最高,分别较对照提高 26.47%、18.30%、24.59%,对烟草黑胫病防治效果达到 80.21%。可能原因是,一方面,施用生物炭促进了烟株生长,提高烟株自身抗性水平,包括抗氧化酶活性等,从而降低烟草黑胫病发病率;另一方面,生物炭吸附烟草疫霉或烟株根系相关代谢产物,改变病原菌对根际的趋向运动,减少病原菌的群集效应及在烟株根际的定殖,最终提高烤烟抗病能力。此外,施用生物炭可改变根际细菌群落组成,增加根际细菌群落多样性,抑制病原菌活动^[27],这可能也是烟草黑胫病发病率降低的重要原因。

生物炭能较大幅度地促进烤烟根系扩展,加强对水肥和矿质营养的吸收,提高叶片光合作用强度,加快干物质的生成和积累,促进烟株生长。在烟草疫霉胁迫下,生物炭能够激发烤烟抗氧化酶活性,降低烟草黑胫病的发生。

参考文献:

[1] 夏振远,谷医林,张宏越,等. 复合微生物制剂改善土壤生物学特性和防治烟草黑胫病的研究[J]. 中国土壤与肥料,2021(1): 192-196.

[2] 张凯,谢利丽,武云杰,等. 烟草黑胫病的发生及综合防治研究进展[J]. 中国农业科技导报,2015,17(4):62-70.

[3] 何宇,吕卫光,张娟琴,等. 生防菌对稻瘟病害控制的研究进展[J]. 江苏农业科学,2021,49(21):40-46.

[4] 白马,柴友正,陈安伟,等. 尖晶石型双金属修饰生物炭对水中镉的去除[J]. 农业环境科学学报,2022,41(7):1544-1554.

[5] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9):1812-1836.

[6] 闫新伟,王艳芳,李继伟,等. 施用生物炭对旱作花生生长和产量构成及土壤酶活性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2018,39(3):66-70,8.

[7] 丁俊男,于少鹏,李鑫,等. 生物炭对大豆生理指标和农艺性状的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(4):784-789.

[8] Ogawa M, Okimori Y. Pioneering works in biochar research, Japan [J]. Soil Research, 2010, 48(7):489.

[9] 张广雨,胡志明,褚德朋,等. 生物炭对根际土壤微生态的调控及

对烟草青枯病的防控作用[J]. 中国烟草学报,2020,26(6): 81-88.

[10] 潘金华,黄化刚,陈雪,等. 深耕与施肥对毕节烤烟生长及产质量的影响[J]. 中国烟草科学,2017,38(3):14-19.

[11] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科技出版社,1998:68-72.

[12] 李亚飞,张翔,常栋,等. 豆浆溶钾灌根对土壤养分及烟叶产质量的影响[J]. 河南农业科学,2021,50(6):44-53.

[13] 勾芒芒,屈忠义,王凡,等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报,2018,49(7):1-12.

[14] Steiner C, Glaser B, Gerdal de Teixeria W, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6):893-899.

[15] 白雪,李小英,邱宗海. 添加生物炭与菌肥的复合基质对元宝枫幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020, 40(4):14-22.

[16] 周劲松,闫平,张伟明,等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. 作物学报,2017,43(1): 72-81.

[17] 李亮,张翔,王亚宁,等. 不同栽培方式与追钾时间对烤烟光合特性、钾含量及产质量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2018(4):67-74,113.

[18] 王力,顾浩,李嘉亮,等. 氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作物量和光合特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2021,36(6):985-992.

[19] 张伟明,管学超,黄玉威,等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报,2015,41(1):109-122.

[20] 张红雪,吴凤英,陈宇琳,等. 烟秆生物炭对土壤不同形态钾含量及烟草光合特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2022,51(4):468-477.

[21] 陈亮,陈年来. 西瓜叶片防御酶活性与枯萎病抗性的关系[J]. 河南农业科学,2019,48(1):77-83,114.

[22] 马光恕,梁泉,李梅,等. 木霉菌对黄瓜生理特性及立枯病防治效果的影响[J]. 中国生物防治学报,2021,37(2):277-285.

[23] 刘海颖,司二静,郭铭,等. 外源水杨酸诱导大麦对条纹病的抗性研究[J]. 植物病理学报,2022,52(4):658-668.

[24] 刘悦,史文琦,曾凡松,等. 生物炭对小麦赤霉病的防治效果及产量的影响[J]. 植物保护,2020,46(4):270-274,281.

[25] 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): 15-22.

[26] Akhter A, Hage - Ahmed K, Soja G, et al. Potential of *Fusarium wilt* - inducing chlamydo spores, *in vitro* behaviour in root exudates and physiology of tomato in biochar and compost amended soil[J]. Plant and Soil, 2016, 406(1/2):425-440.

[27] Gu Y A, Hou Y G, Huang D P, et al. Application of biochar reduces *Ralstonia solanacearum* infection via effects on pathogen chemotaxis, swarming motility, and root exudate adsorption [J]. Plant and Soil, 2017, 415(1):269-281.