

玉米秸秆生物炭对烟田褐土水分库容及烤烟生物量的影响^①

王梅勋¹, 陈利军^{2,3*}, 王家民¹, 朱先志¹, 刘莉¹, 宗浩¹, 高强¹,
徐蕊¹, 武博¹, 谭效磊¹, 王文杰¹, 谢祖彬², 孙波²

(1 山东省烟草有限公司临沂市公司, 山东临沂 276001; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对山东临沂丘陵烟区干旱灾害频发, 且难以推广先进灌溉措施的问题, 研究了生物炭改良土壤水分库容、提高烟田抗旱能力的技术。在临沂市沂水烟草试验站开展褐土烟田施用生物炭的田间试验, 设置了 5 个处理: 不施肥处理(CK)、常规施肥处理(CF)、常规施肥添加 2 400 kg/hm² 生物炭处理(LB)、常规施肥添加 7 200 kg/hm² 生物炭处理(MB)和常规施肥添加 12 000 kg/hm² 生物炭处理(HB)。研究发现施用生物炭可以显著降低土壤体积质量(降低幅度为 6.84%~13.28%), 显著增加土壤大孔隙($d > 0.1 \mu\text{m}$)体积, 从而增加土壤水分有效库容和总库容, 而且土壤水分库容随生物炭施用量增大而增强。施用生物炭显著提高了土壤有机质和全氮含量, pH 提高了 0.12~0.55 单位, 烤烟生物量提高了 40% 以上, 其中施用中量生物炭的增产效应最大。土壤水分库容是影响临沂烤烟生长的主控因子, 对烤烟生物量的贡献率达 47.2%, 其次为土壤全钾(23.7%)和速效钾(5.89%)。上述结果表明, 对于丘陵山区烟田可以通过施用生物炭协同提升其土壤水分和养分库容, 进而促进烤烟生长。

关键词: 生物炭; 褐土; 土壤水分特征曲线; 土壤肥力; 烤烟生物量

中图分类号: S158.9; S154.31

土壤水分是影响作物生长发育, 从而影响作物产量和品质的一个重要因子^[1]。烟草起源于雨量充沛的亚热带, 整个生育期需要充足的水分供应^[2]。烟草植株较高、叶片较大、含水量多, 在烟株生长季节, 如果田间持水量不能保持在合理的水平, 烟株的叶片厚度、根系发育和生育期均会受到影响, 最终影响烤烟的产量和品质^[3]。

对对亚马逊盆地中部黑色土壤(Terra Preta)的研究开始, 国际上兴起了对生物炭改良土壤肥力和环境质量的各类研究^[4]。生物炭具有多孔微孔结构, 可以改善土壤持水性能, 提高土壤有效水分含量, 从而促进作物生长^[5]。生物炭吸湿能力比土壤有机质高 1~2 个数量级^[6], 富含生物炭土壤的田间持水量高于普通土壤^[7]。我国每年产出秸秆高达 7 亿 t^[8], 如果制备为生物炭可以促进农业废弃物的资源化, 改善土壤肥力, 提高水资源利用效率, 促进农作物高产和稳产。目前对生物炭提高土壤肥力、促进作物生长效应的研究集中瘠薄土壤上^[9-11], 研究结果发现生物炭既有促

进作用^[12-14], 也有抑制作用或没有效应^[15], 这与气候、土壤和作物条件以及生物炭的性质和施用量有关。因此, 如果在烟田土壤中施用生物炭改良土壤, 需要根据不同烟区的气候和土壤条件, 系统研究生物炭对土壤肥力和烟草生长的综合影响, 筛选适宜的生物炭种类和施用量水平。

有研究表明施用生物炭可以提高砂壤土大团聚体的稳定性及抗拉强度^[16], 且随添加量的增加土壤有效水含量显著上升, 容重(体积质量)显著下降^[17], 而 Jeffery 等^[18]则认为添加生物炭并不能显著提高砂性土壤的持水性和团聚体稳定性。生物炭的施用量达 1% 时可以显著提高红壤的 pH 和阳离子交换量^[19]。轻度酸性水稻土中施用生物炭对微生物总量影响不大, 但是微生物的群落结构会发生改变^[20]。国内已有生物炭对植烟土壤理化特性影响的研究报道^[21-26], 主要集中在 pH、体积质量、有机质、全氮、速效养分、土壤酶活性等, 也有一些关于生物炭对烟草产量和品质的影响方面的报道^[27-28], 但涉及生物炭对植烟土

基金项目: 中国烟草总公司山东省公司科技项目和山东临沂烟草有限公司科研项目(科 2014-6)资助。

* 通讯作者(ljchen@issas.ac.cn)

作者简介: 王梅勋(1968—), 女, 山东临沂人, 农艺师, 主要从事烟草栽培和土壤培肥技术研究。E-mail: wangmeixun128@sina.com

壤水分特性以及土壤属性对烟草生物量形成的相对贡献率方面信息甚少。山东临沂属半干润地区,主要植烟土壤类型为棕壤和褐土(全区棕壤面积 84.03 万 hm^2 , 褐土面积 60.59 万 hm^2)。一方面,烟田集中于丘陵岗地,难于灌溉,滴灌和喷灌等技术成本高、难以大面积推广;另一方面,土壤结构差,肥力低,保水保肥性能差。此外,长期施用化肥导致土壤酸化和板结,加剧了土壤结构的退化。针对上述问题,本文选择典型丘岗地的褐土烟田,开展生物炭的剂量-效应试验,研究生物炭对土壤物理结构、水分库容、养分含量和烟草生长的综合效应,为提出临沂烟区适宜性抗旱技术提供理论依据,促进临沂烟区烟草生产的提质增效。

1 材料与方法

1.1 供试小区及材料描述

临沂烟草公司沂水烟草实验站(118.63°E, 35.86°N)位于山东省临沂市沂水县,海拔 191 m,属暖温带大陆性季风气候,年均气温 14.1℃,降水量 849 mm,蒸发量约为 560 mm,无霜期 200 天以上,供试土壤类型为褐土(简育干润锥形土)。

2014 年设置大田小区试验,小区规格为长 5 m × 宽 2 m。试验前耕层(0~20 cm)土壤的基础地力为:pH 6.05,有机质 9.36 g/kg,全氮 0.66 g/kg,全磷 0.37 g/kg,全钾 22.65 g/kg,碱解氮 45.32 mg/kg,有效磷 29.23 mg/kg,速效钾 159 mg/kg,阳离子交换量(CEC)16.18 cmol/kg。

试验用生物炭由风干玉米秸秆在 450℃厌氧闷烧制成^[29],其基本性质为:pH 9.49,全氮 2.32 g/kg,全磷 3.03 g/kg,全钾 32.94 g/kg,碱解氮未检出,有效磷 336.24 mg/kg,速效钾 18 125 mg/kg,CEC 15.06 cmol/kg。其扫描电镜显示玉米秸秆孔隙结构丰富(图 1)。

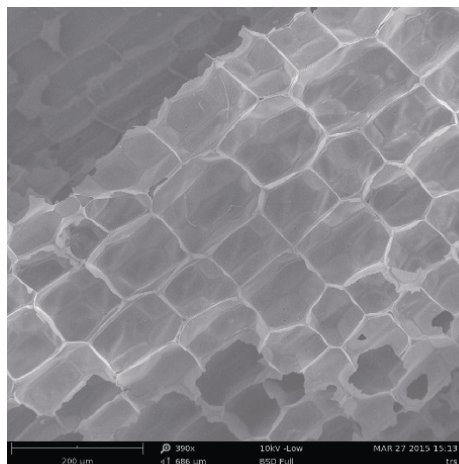


图 1 玉米秸秆生物炭的扫描电镜照片

Fig. 1 The SEM image of maize straw biochar

1.2 试验设计

试验设置 5 个处理:不施肥处理(CK);常规施肥处理(CF);常规施肥添加 2 400 kg/hm^2 生物炭处理(LB);农民常规施肥添加 7 200 kg/hm^2 生物炭处理(MB);农民常规施肥添加 12 000 kg/hm^2 生物炭处理(HB)。

常规施肥量为:纯氮 82.5 kg/hm^2 , 包括太阳岛复合肥(10:10:20)450 kg/hm^2 、硫酸钾 150 kg/hm^2 , 发酵豆饼 600 kg/hm^2 , 氮磷钾比例 1:1:3。生物炭和所有肥料作基肥采用沟施方法,于烟苗移栽前一周左右一次性施入。

供试烟草品种为 NC102,于 4 月 1 日育苗,5 月 2 日移栽,行距 1.1 m,株距 0.5 m,7 月 28 日第一次采收,8 月 26 号采收结束。

1.3 土样采集与测定方法

试验开始后于烤烟移栽期、团棵期、打顶期和成熟期分别观测烟株长势。每周两次测定土壤含水量,如遇降雨或人工灌溉则加大测定频率。于烟草成熟期采集土壤表层(0~20 cm)样品,每个小区利用土钻按“S”型采集 8 个点,混合均匀后用四分法取 2 kg 左右土样用于测定分析。

土壤样品测定项目与方法为:土壤体积质量测定采用环刀法;土壤水分含量测定采用 TDR-100 便携式土壤水分仪法;土壤水分特征曲线测定采用压力膜仪法(测定点分别为饱和含水率、0.002 5 MPa、0.006 MPa、0.01 MPa、0.03 MPa、0.1 MPa、1.5 MPa);pH 测定采用电位法(土水比 1:2.5);有机质测定采用重铬酸钾法;全氮测定采用重铬酸钾-硫酸消化法;碱解氮测定采用碱解扩散法;全磷测定采用高氯酸-硫酸溶-钼锑抗比色法;全钾和速效钾测定采用原子吸收分光光度法;速效磷测定采用碳酸氢钠提取法。具体测定方法详见文献[30]。

1.4 数据计算与分析方法

当量孔隙容积计算采用特征曲线法^[31]。将土壤中的孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,那么土壤水吸力 S 和毛管直径 D 的关系可表示为:

$$S = 4\sigma/D \quad (1)$$

式中: σ 为表面张力系数,室温条件下一般为 $75 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$ 。区别于真实孔径,将 D 称为当量孔径。若吸力的单位为 Pa,当量孔径 D 以 μm 计,则当量孔径 D 与吸力 S 的关系可以用 $D = 300/S$ 表示。

本文采用 Gardner 模型^[32]对土壤水分特征曲线实测值进行拟合,Gardner 模型可以表示为:

$$\theta = A \cdot S^{-B} \quad (2)$$

式中: θ 为土壤含水量(cm^3/cm^3); S 为土壤水吸力(kPa);参数 A 决定曲线的高低;参数 B 决定土壤含

水量随土壤水势降低而递减的快慢程度。

土壤水分总库容(V , mm)的计算公式为:

$$V = 100\rho \cdot w \cdot h \quad (3)$$

式中: ρ 为土壤体积质量(g/cm^3); w 为土壤质量含水量(g/kg); h 为土层厚度(cm)。

土壤基本理化性质和烟草相关指标均采用 Microsoft Office Excel 2013 和 IBM SPSS Statistics 20.0 进行相应统计分析, 聚合推进树(ABT)分析采用 R 语言完成; 回归方程采用逐步回归法, 相关性分析采用 Pearson 双侧检验法; 数据差异显著性分析采用方差分析法(ANOVA)的 Duncan 法。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对烟田土壤水分性质的影响

2.1.1 对烟草生长季土壤水分含量变化的影响 生物炭比表面积大, 内部孔隙结构丰富, 具有良好的保水蓄水能力。由图 2 可知, 整个烟草生长期内, 不施肥和常规施肥处理的土壤含水量趋于一致, 添加生物

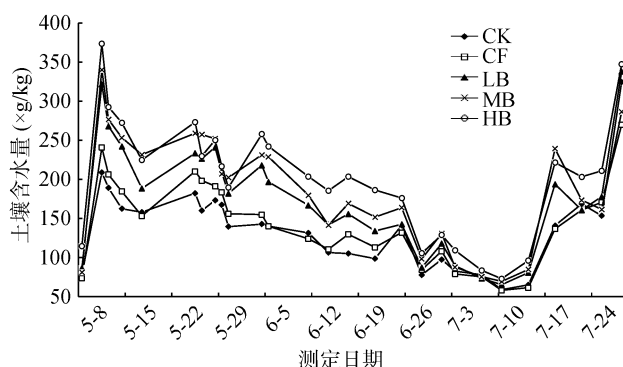
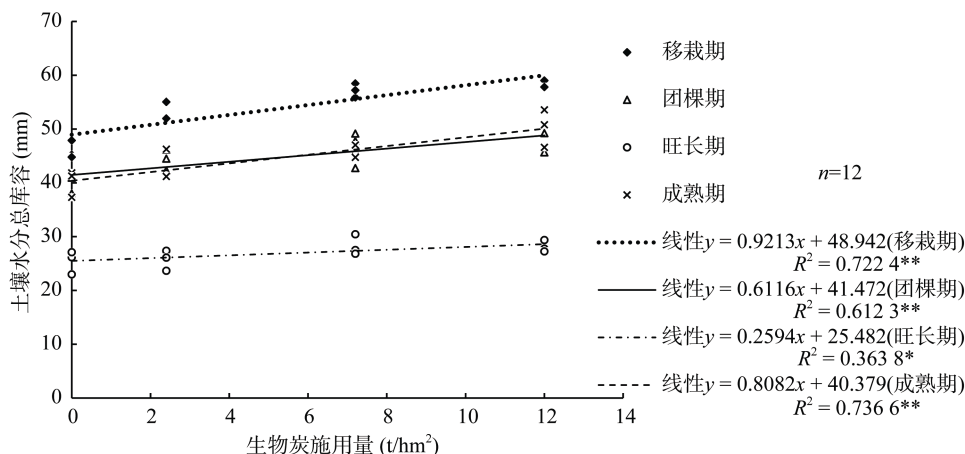


图 2 烟草生长季不同处理表层土壤(0~20 m)质量含水量的变化

Fig. 2 Changes of soil water contents in surface layers (0–20 cm) during tobacco growth season under different treatments



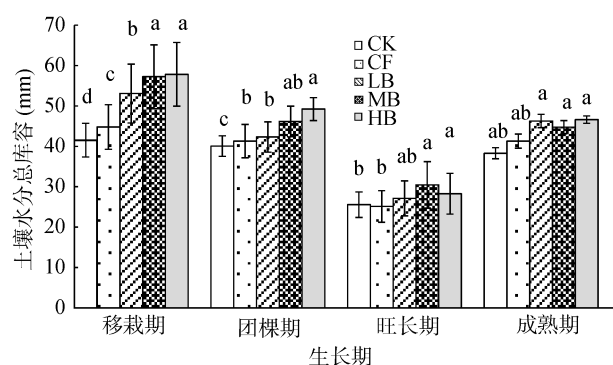
(*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关和极显著相关)

图 4 烟草各生长期生物炭施用量与表层土壤(0~20 cm)水分总库容之间的相关性

Fig. 4 Correlations between soil water total reservoir capacity and biochar application rate in surface layer (0–20 cm) in each grouping period of tobacco

炭处理(LB、MB 和 HB)的土壤含水量均高于未添加处理, 并且随生物炭施用量增加土壤含水量呈上升趋势。从移栽后一直延续至 6 月下旬施用生物炭显著提高土壤含水量, 囊括了烟草生长的 3 个重要时期(移栽期、团棵期和旺长期), 为烟草高产奠定了基础。

在烟草的 4 个关键生育期, 施用生物炭处理的土壤水分库容均大于不施肥(CK)和常规施肥(CF)处理(图 3)。同时烟草各关键生育期内土壤平均水分库容与生物炭添加量之间呈显著正相关关系(图 4), 两者之间的关系可以用公式 $y = ax + b$ 来表示(y 表示土壤水分总库容, x 表示生物炭施用量)。在移栽期、团棵期和打顶期, MB 和 HB 处理的土壤水分库容均显著高于 CK 和 CF 处理, LB 处理略高于未添加生物炭处理, 同时高量生物炭处理(HB)显著高于中、低量生物炭处理(MB 和 LB)。而成熟期内施用生物炭处理和施用化肥处理间虽有一定差异, 但都未达到显著水平。



(图中小写字母不同表示同一时期不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 3 不同生物炭处理下烟草 4 个生育期表层土壤(0~20 cm)水分总库容的变化

Fig. 3 Changes of soil water total reservoir capacities in surface layers (0–20 cm) under different biochar treatments in 4 tobacco growth stages

2.1.2 对烟田土壤水分特征曲线及当量孔径的影响 不同生物炭添加量处理土壤水分特征曲线(图 5A)表明,未添加生物炭的处理水分特征曲线几乎重合,添加生物炭各处理含水量在较大土壤水吸力下明显高于未添加处理,在较小土壤水吸力下所有处理的曲线几乎重合。当土壤水吸力大于 0.03 MPa 时各处理开始分异,大于 0.3 MPa 后各处理的水分特征曲线几乎平行。土壤水吸力 0.03 MPa 和 1.5 MPa 所对应的土壤含水量分别视为田间持水量和凋萎系

数^[33],田间持水量与凋萎系数之间的差值即土壤有效水含量,是植物易于吸收的有效水库容。与 CK 和 CF 处理相比,添加生物炭后土壤有效水最大含量增加,特别是 0.03 ~ 1.5 MPa 的有效水库容含量显著提高。因此,添加生物炭可以显著提高土壤持水能力。对图 5A 和图 5B 进行对比分析可知,添加生物炭可以提高土壤大空隙($d>0.1\mu\text{m}$)的体积,其中高量生物炭处理(HB)的增加显著高于低量(LB)和中量(MB)生物炭处理。

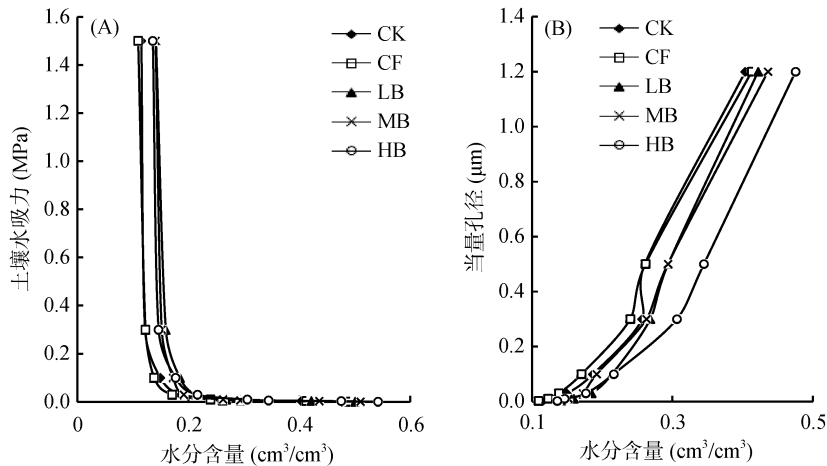


图 5 不同生物炭处理表层土壤(0~20 cm)水分特征曲线与 θ - d 关系曲线
Fig. 5 Soil water retention curves and θ - d curves of surface soils (0~20 cm) under different biochar treatments

2.1.3 对烟田土壤水分特征参数的影响 本文采用 Gardner 模型^[34]来定量研究土壤水分特征曲线,与实际观测值拟合效果较好,拟合结果见表 1。参数 A 决定曲线的高低,表示土壤持水能力大小;参数 B 决定土壤含水量随土壤水势降低而递减的快慢程度,表示土壤的释水能力。

表 1 不同生物炭处理表层土壤(0~20 cm)水分特征曲线的参数

处理	A	B	R^2
CK	16.43 bc	0.19 a	0.92
CF	15.75 c	0.20 a	0.90
LB	19.49 a	0.16 a	0.91
MB	18.86 ab	0.17 a	0.87
HB	19.61 a	0.19 a	0.93

注:表中同列小写字母不同表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著,下同。

拟合结果表明,参数 A 的大小顺序依次为 $\text{HB}>\text{LB}>\text{MB}>\text{CK}>\text{CF}$,其中 CK 和 CF 处理之间差异不显著,而所有添加生物炭处理的参数 A 均显著大于常规施肥处理,说明与常规施肥相比添加生物炭可

以显著提高土壤的持水性能。参数 B 的大小顺序表现为 $\text{CF}>\text{HB}(\text{CK})>\text{MB}>\text{LB}$,但不同施肥处理间差异不显著。

2.2 生物炭对烟田土壤肥力性质的影响

研究结果表明(表 2),施用生物炭可以显著降低土壤体积质量,其降低幅度随生物炭施用量增加而增大。施用低、中、高量生物炭处理(LB、MB 和 HB)土壤体积质量分别比 CK 处理下降 6.84%、8.58% 和 13.28%,比常规施肥处理(CF)降低了 6.11%、7.37% 和 12.60%,MB 和 HB 处理的下降幅度显著。

CF 处理导致烟田耕作层土壤酸化。种植一季以后,与 CK 相比,土壤 pH 下降了约 0.31 单位(表 2)。施用生物炭处理在种植一季烟草后土壤 pH 均有一定程度的提高,与 CK 相比,LB、MB 和 HB 处理分别提高了 0.12、0.27 和 0.55 单位。与 CF 处理相比,施用生物炭显著增加土壤全氮和有机质含量,但对全磷、全钾和阳离子交换量的增加效应不显著。LB、MB 和 HB 处理土壤全氮分别提高了 1.25%、34.0% 和 40.0%,土壤有机碳含量分别提高了 31.5%、147.4% 和 168.7%。

表 2 不同生物炭处理在种植一季烟草后表层(0~20 cm)土壤肥力指标的变化
Table 2 Changes of soil fertility factors in surface layers (0–20 cm) under different biochar treatments after one growing season of tobacco

处理	体积质量(g/cm ³)	pH	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	CEC(cmol/kg)	有机质(g/kg)
CK	1.30 c	6.02 bc	0.68 c	0.42 b	20.74 a	13.80 a	9.95 c
CF	1.29 bc	5.71 c	0.80 bc	0.45 ab	21.29 a	13.50 a	10.45 c
LB	1.21 ab	6.14 abc	0.81 b	0.48 ab	22.48 a	14.01 a	13.74 b
MB	1.20 a	6.39 ab	1.08 a	0.51 a	22.45 a	13.70 a	25.85 a
HB	1.13 a	6.57 a	1.12 a	0.52 a	23.55 a	14.79 a	28.08 a

2.3 生物炭对烟草生长的影响

生物炭能够在一定程度上促进烟草生长(图 6)。与常规施肥处理(CF)相比,施用低量生物炭处理(LB)对烟草株高的增加效应不显著,但施用中、高量生物炭处理(MB 和 HB)烟株株高显著增加(图 6A)。与对照(CK)相比,CF 处理在烤烟生长后期可以显著增加有效叶片数(图 6B),这可能是因为不施肥处理后期氮素营养供应不足,致使下部叶缺氮发黄坏死。施用生物炭可以提高烟草打顶以前的有效叶片数,MB 处理的增加效果最大(图 6B)。打顶以后,为了控制烤烟原叶质量,单株有效叶片数一般都保持在 18~22

片,因此施肥处理之间的差异减少。从烟草茎围变化看,施用生物炭处理与 CF 处理相比可以促进的烟株茎杆的膨大,且与生物炭的添加量呈正相关(图 6C)。

施用生物炭后,烟草当季生物量均有一定程度的提高(表 3)。与 CF 处理相比, LB、MB 和 HB 处理生物量分别增加了 40.5%、77.4% 和 40.5%;地上部生物量则分别增长了 37.7%、74.3% 和 34.4%,地下部生物量的增长率更高,分别达 52.3%、87.7% 和 66.2%,但是地下部生物量仅占总生物量的 20% 左右,其对烟草总生物量的形成的贡献远不如地上部大,根系体积则分别增大了 50.7%、100.9% 和 82.8%。

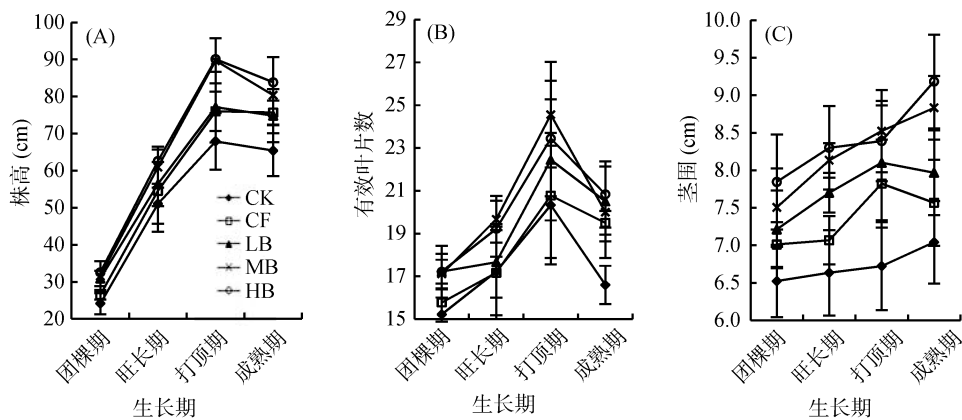


图 6 不同生物炭处理下烤烟生长期内株高、有效叶片数和茎围的变化
Fig. 6 Changes of plant heights, total numbers of effective leaves and stem circumference during the tobacco growth period under different biochar treatments

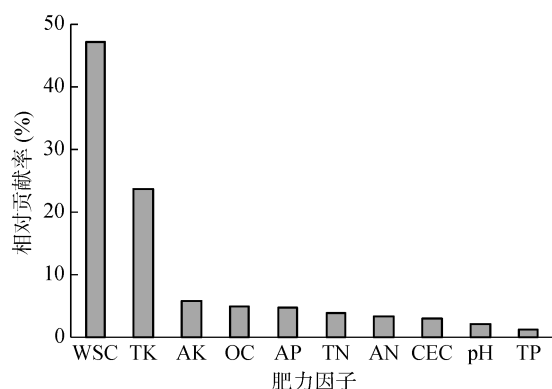
表 3 各处理当季烟草的生物量
Table 3 The biomasses of tobacco planting season under different treatments

处理	地上部生物量(t/hm ²)	地下部生物量(t/hm ²)	总生物量(t/hm ²)	根系体积(cm ³)
CK	1.55 c	0.37 c	1.92 c	56.17 c
CF	2.76 bc	0.65 bc	3.41 bc	96.67 bc
LB	3.80 ab	0.99 ab	4.79 ab	145.67 ab
MB	4.81 a	1.22 a	6.05 a	194.17 a
HB	3.71 ab	1.08 ab	4.79 ab	176.67 ab

2.4 土壤肥力因子对烟草生物量形成的影响

聚合推进树(ABT)可以解释不同影响因子对烟草生物量形成的相对贡献率。为探讨不同肥力因子对烟草生物量形成的相对贡献率,本文选择土壤水分库

容、有机质、碱解氮等 10 个对农作物生长影响较大的因子,应用 ABT 分析其分别对烟草生物量形成的相对贡献率。结果表明(图 7),土壤水分总库容对生物量形成最为重要,相对贡献达 47.15%;其次为土



(WSC: 土壤水分总库容; OC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; CEC: 阳离子交换量)

图7 表层(0~20 cm)土壤肥力因子对烤烟生物量影响的ABT分析

Fig. 7 Effects of soil fertility factors in surface layers (0~20 cm) on tobacco biomass formation (aggregated boosted tree (ABT) analysis)

壤全钾含量, 相对贡献率为 23.68%; 再次为速效钾含量, 相对贡献率为 5.89%, 其他各因子的累积相对贡献率约为 24% 左右。由此可见, 对旱作烟田而言, 土壤水分含量对烟草产量的形成, 起着至关重要的作用。

3 讨论

生物炭表面有大小不一的孔隙, 小到纳米, 大到微米^[35], 这些微孔为水分的蓄存提供了良好的库容。在砂壤土^[36]以及不同质地土壤^[37]上的研究均发现, 施用生物炭可以提高土壤含水率, 这种作用随生物炭施用量增加呈先增加后减小的趋势。但在壤土上土壤含水量随生物炭施用量提高呈先降低后升高趋势^[38]。一些研究发现在砂性土壤中施用生物炭可以提高土壤的持水能力^[39-41], 但在黏性土壤反而会导致土壤含水量减小^[40], 可能是因为生物炭具有疏水性造成的。本研究发现施用生物炭可以在整个烟草生长期提升土壤储水能力, 且土壤水分总库容随生物炭施用量的增加呈上升趋势。同时, 施用生物炭可以改变土壤水分特征曲线形态(参数 A 、 B), 显著提高土壤大空隙($d > 0.1 \mu\text{m}$)的体积, 增大土壤有效水含量, 从而为缓解干旱胁迫提供了土壤结构上的保障。

生物炭施入土壤可以降低土壤密度^[42], 导致土壤具有更大的孔隙度, 降低土壤体积质量, 从而保持更多的水分、空气和养分^[12]。本研究中发现施用生物炭可以显著降低烟田土壤的体积质量, 但是这种降低作用并未与生物炭的添加量呈正比关系。施用生物炭可以缓解烟田土壤酸化问题, 提高土壤养分含量。研究发现添加生物炭处理土壤 pH、全氮、全磷、全

钾和 CEC 均有一定程度的提升, 这与其他研究结果一致^[43-44]。Zwieten 等^[45]研究报道, 施入 10 t/hm^2 生物炭可以显著增加土壤的 pH。生物炭在生物和非生物的作用下氧化产生诸如羧基等类的官能团, 使生物炭的电荷量或 CEC 增大, 从而土壤的 CEC 显著增大^[46]。但是本研究发现添加生物炭并不能显著提高土壤 CEC, 这可能是因为生物炭施用量较低。

Jeffery 等^[47]应用数理统计方法(meta-analysis)分析了生物炭的增产效应, 发现生物炭主要是通过改善酸性(或中性)土壤的 pH、以及提高质地较粗(或中等)土壤的储水能力发挥增产效应。Kelly 等^[48]则认为在旱成土中施用柳枝稷生物炭短期内会导致玉米减产。本研究发现针对临沂烟区的褐土, 改善土壤水分库容是生物炭促进烟草生长的主要因子, 其对烟草生物量形成的相对贡献率达 47%, 其次为土壤钾素含量, 贡献率约为 30% 左右。pH 变化对临沂烟区烟草生长的贡献并不明显, 这可能是因为供试土壤本身的 pH 接近中性(pH 6.05), 属于植烟适宜范围, 已不是限制烟草生长的主控因子。

本研究发现施用生物炭可以提高烟草的株高、茎围和有效叶片数, 从而提高烟草的生物量, 其中以添加中量生物炭(7200 kg/hm^2)增产效果最佳, 与农民常规施肥相比生物量提高了 77.4%, 而施用高量生物炭(12000 kg/hm^2)的增产作用反而不及中量处理, 可能是因为高量生物炭处理下对土壤养分的吸持作用改变了土壤养分的供应模式, 从而影响了烤烟的正常生长。

利用 ^{15}N 标记法研究粉砂壤中添加生物炭对氮素供应的影响研究, 发现生物炭吸附的氮素具有很高的生物有效性, 能够减缓氮素流失^[49-50]。因此当生物炭施用量过高时, 土壤在烟草生长后期供氮能力较强可能会导致烟叶品质下降。在酸性土壤上的研究表明, 施用生物炭可以提高肥料利用率^[51]。但是生物炭对烟草品质的效应受生物炭特性、施用时间、烟草品种、土壤肥力特征以及配套施肥管理措施的综合影响, 需要进行进一步的研究。

4 结论

1) 采用沟施的方法施用 $2400 \sim 12000 \text{ kg/hm}^2$ 生物炭, 可提高烟田土壤储水能力, 且这种提高作用随生物炭施用量的增大而提高。

2) 施用生物炭可以提高土壤 pH, 其中施用高量生物炭(12000 kg/hm^2)土壤 pH 增加了 0.55 单位。施用生物炭也会显著提高土壤有机碳和全氮含量, 但对全磷、全钾和 CEC 的提高作用则不显著。

3) 施用生物炭可以促进烟草根系生长, 提高烟草生物量。其中施用中量生物炭(7 200 kg/hm²)的增产作用最好, 施用高量生物炭的增产效果不仅低于中量处理, 且可能由于后期供氮能力增强影响烤烟的品质。

参考文献:

- [1] Yan JQ, Wang J, Tissue D, Holaday A S, Allen R, Zhang H. Photo synthesis and seed production under water-deficit conditions in transgenic tobacco plants that over express an Arabidopsis ascorbate peroxidase gene[J]. *Crop Science*, 2003, 43(4): 1 477-1 483
- [2] 陈瑞泰. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987
- [3] 曾群望, 杨双兰. 云烟生产的土壤地质背景[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1993
- [4] Emma M. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442: 624-626
- [5] Piccolo A, Mbagwu JSC. Effects of different organic waste amendments on soil micro-aggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. *Plant and Soil*, 1990, 123(1): 27-37
- [6] Amymarie AD, Gschwend PM. Assessing the combined roles of natural organic matter and black carbon as sorbents in sediments insediments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36: 21-29
- [7] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. Blackcarbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 669-678
- [8] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. *生物工程学报*, 2010, 26(7): 855-863
- [9] 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 李伟, 庞昌乐, 董仁杰. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 119-125, 179
- [10] Marco A, Lehmann J. Biological nitrogen fixation by common beans increases with bio-char additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43: 699-708
- [11] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J. 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
- [12] Lehmann J, Joseph SM. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London UK: Earthscan, 2009: 1-448
- [13] Haefelea SM, Konboonc Y, Wongboon W. Effects and fate of biochar from rice residues in rice based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011: 430-440
- [14] Peng X, Ye LL, Wang CH. Temperature and duration dependent rice straw derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011: 159-166
- [15] Uzoma1 KC, Inoue M, Andry H. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 25(2): 205-212
- [16] Ataallah K, Muhammad N, Goswin H, Kumari KGID, Wollesen JL, Lars E, Hans-Jörg V, Iversen BV. Biochar Effects on Soil Aggregate Properties Under No-Till Maize [J]. *Soil Science*, 2014, 179 (6): 273-283
- [17] Peake LR, Reid BJ, Tang XY. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 182-190
- [18] Jeffery S, Meinders MBJ, Stoof CR, Bezemer TM, Voorde TFJ, Mommer L, Groenigen JW. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil [J]. *Geoderma*, 2015, 251-252: 47-54
- [19] Peng X, Ye LL, Wang CH, Zhou H, Sun B. Temperature- and duration dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil Tillage Research*, 2011, 112: 159-166
- [20] Chen JH, Liu XY, Zheng JW, Zhang B, Lu HF, Chi ZZ, Pan GX, Liu LQ, Zheng JF, Zhang XH, Wang JF, Yu XY. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71: 33-44
- [21] 赵殿峰. 不同生物炭施用量对烤烟土壤理化性状及长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 13-20
- [22] 王丽渊. 生物炭对植烟土壤主要性状及烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014: 15-17
- [23] 宋久洋. 生物炭输入对豫西烟区土壤保育及叶提质效应的研究[D]. 郑州: 河南科技大学, 2014: 37-38
- [24] 万海涛. 烤烟发育和产量品质及植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: 16-17
- [25] 刘新源. 生物炭与无机有肥料混合施用对土壤理化特性和烟叶产量品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014: 15-18
- [26] 万海涛, 刘国顺, 田晶晶, 邢雪霞. 生物炭改土对植烟土壤理化性状动态变化的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(4): 72-76
- [27] 陈敏, 杜相革. 生物炭对土壤特性及烟草产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥*, 2015(1): 80-83
- [28] 刘新源, 刘国顺, 刘宏恩, 田晶晶. 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): 58-62
- [29] 谢祖彬, 卑其成, 刘钢, 朱建国. 一种秸秆制炭装置: ZL 2009 2 2032191.9[P]. 2009-09-11
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [31] 黄昌勇. 土壤学[M]. 中国农业出版社, 2000
- [32] Gardner WR, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water: . Redistribution[J]. *Water Resource Research*, 1970, 6: 851-861
- [33] 李开元, 李玉山. 土壤水分特征曲线的意义及其应用[J]. *陕西农业科学*, 1991(4): 47-48

- [34] 吴华山, 陈效民, 叶民标, 吴华强, 施恩培. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 181–183
- [35] Lehmann J, da Silva Jr JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of Central Amazonia: fertilizer, and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343–357
- [36] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 高文慧, 孙贵芳. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1141–1147
- [37] 高海英, 何绪生, 耿增超, 余雕, 殷金岩. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207–213
- [38] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 眭彦伟, 温晓霞. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1 009–1 015
- [39] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, Sohi S. Biochar from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana[C]. 19th World Congress of Soil Science, Symposium 4.2.2, Soil and water-global change, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia. 2010: 9–12
- [40] Tryon EH. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1): 83–113
- [41] 郑瑞伦, 王宁宁, 孙国新, 谢祖彬, 庞卓, 王庆海, 武菊英. 生物炭对京郊沙化地土壤性质和苜蓿生长、养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 904–912
- [42] Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 117–128
- [43] Zhang AF, Bian RJ, Pan GX, Cui LQ, Hussain Q, Li LQ, Zheng JW, Zheng JF, Zhang XH, Han XJ, Yu XY. ECfects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153–160
- [44] Laird DA, Fleming P, Davis DD, Horton R, Wang B, Karlen DL. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158: 443–449
- [45] Zwieten VL, Kimber S, Morris S, Chan YK, Downie A, Rust J. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327 (1/2): 235–246
- [46] Cheng CH, Lehmann J, Thies JE, Burton SD, Engelhard MH. Oxidation of black carbon through biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(1): 1 477–1 488
- [47] Jeffery S, Verheijen FGA, van der Velde M, Bastos AC. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 144: 175–187
- [48] Kelly CN, Calderón FC, Acosta-Martínez V, Mikha MM, Benjamin J, Rutherford DW, Rostad CE. Switch grass biochar effects on plant biomass and microbial dynamics in two soils from different regions[J]. Pedosphere, 25(3): 329–342
- [49] Taghizadeh-Toosi A, Clough TJ, Sherlock RR, Condon LM. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. 2012, 350(1/2): 57–69
- [50] Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. 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: 81–84
- [51] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋. 小麦秸秆生物炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 288–291

Effects of Maize Straw Biochar on Soil Water Storage Capacity and Tobacco Biomass in Tobacco-planting Cinnamon Soil

WANG Mei-xun¹, CHEN Li-jun^{2,3*}, WANG Jia-min¹, ZHU Xian-zhi¹, LIU Li¹, ZONG Hao¹,
GAO Qiang¹, XU Rui¹, WU Bo¹, TAN Xiao-lei¹, WANG Wen-jie¹, XIE Zu-bin², SUN Bo²

(1 *Linyi Tobacco Company of Shandong Province, Linyi, Shandong 276001 China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Drought can severely hinder tobacco growth. Drought is easily happened for tobacco fields in the hills in Linyi City due to local climate influence, and it is difficult to adopt advanced irrigation practices such as drop and spray irrigation due to their high costs. Biochar is porous and has high capacity to hold water, therefore is potential to be used in improving soil water holding capacity. In this paper an experiment of maize straw biochar was conducted in tobacco planting cinnamon soil in Yishui Tobacco Experiment Station of Linyi City, which includes 5 treatments, i.e., non-fertilization (CK), conventional fertilization processing(CF), CF with 2 400 kg/hm² biochar treatment(LB), CF with 7 200 kg/hm² biochar treatment (MB) and CF with 12 000 kg/hm² biochar treatment(HB). It found that the soil moisture content had the significant impact to the formation of tobacco biomass with a relative contribution of 47.2%. Applying biochar decreased soil bulk density by 6.84%–3.28%, and increased soil porosity with diameter >0.1 μm. Soil total and effective water storage capacity in surface layer (0–20cm) increased with biochar application rate. With biochar addition, soil pH increased by 0.12–0.55 units, and soil organic matter and total nitrogen increased significantly. Consequently, tobacco biomass increased by 40% more, and the highest yield was achieved at the middle application rate of biochar (7 200 kg/hm²). In summary, biochar can improve synthetically soil physical and chemical properties and promote tobacco growth.

Key words: Biochar; Cinnamon soil; Soil water retention curve; Soil fertility; Tobacco biomass