

生物炭添加对重庆山区烟田土壤理化性质和烤烟生长、产量及产值的影响

琚晨仪¹, 王珍珍², 肖庆礼³, 赵伟浩¹, 彭奎³, 谭奇忠³, 黄明斌⁴

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西南大学 植物保护学院, 重庆 北碚 400715; 3.重庆中烟工业有限责任公司, 重庆 400060; 4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究不同生物炭添加对重庆山区烟田黄壤土的理化性质和烤烟生长、产量和产值的影响, 为生物炭在土壤保育和烟草生产中的应用提供技术支撑。[方法] 以烤烟 K326 为试验材料, 2022—2023 年在烟田中采用完全随机设计, 在常规施肥基础上, 设置 7 个处理, 分别为零添加 0 kg/hm² (CK), 750 kg/hm² (T₅₀), 1 500 kg/hm² (T₁₀₀), 3 000 kg/hm² (T₂₀₀), 4 500 kg/hm² (T₃₀₀), 6 000 kg/hm² (T₄₀₀) 和 7 500 kg/hm² (T₅₀₀)。试验期间, 对土壤理化性质和烤烟农艺性状、地下地上生物量、烟叶产量和产值进行了监测。[结果] ①添加生物炭能够提高土壤总孔隙度, 增加毛管持水量。第 2 年试验 T₄₀₀, T₅₀₀ 处理的土壤总孔隙度和毛管持水量均显著高于 CK; ②相对于 CK 处理, 生物炭添加都显著提高了耕层土壤速效氮、速效磷和速效钾含量, 同时 T₃₀₀, T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理显著提高了耕层土壤有机质含量和 pH 值, 能够有效缓解土壤酸化; ③相对于 CK 处理, T₃₀₀, T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理显著促进了烟叶生长和生物量积累, 显著提高了烟叶产量和产值, 但基于生物炭对烤烟产量和产值贡献率, T₄₀₀ 处理的效果最优。[结论] 在植烟土壤中添加适量的生物炭, 可以改善土壤理化性质, 提高土壤可耕性, 同时改善烟株生长发育状况, 提高烟株干物质积累, 提升烟叶产量和产值。

关键词: 生物炭; 土壤理化性质; 农艺性状; 产量; 重庆山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0205-10

中图分类号: S152.5, S152.7

文献参数: 琚晨仪, 王珍珍, 肖庆礼, 等. 生物炭添加对重庆山区烟田土壤理化性质和烤烟生长、产量及产值的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 205-214. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.022; Ju Chenyi, Wang Zhenzhen, Xiao Qingli, et al. Effects of different biochar additions on soil physicochemical properties and tobacco growth, yield, and output value in Chongqing mountainous region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 205-214.

Effects of Different Biochar Additions on Soil Physicochemical Properties and Tobacco Growth, Yield, and Output Value in Chongqing Mountainous Region

Ju Chenyi¹, Wang Zhenzhen², Xiao Qingli³, Zhao Weihao¹, Peng Kui³, Tan Qizhong³, Huang Mingbin⁴

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.College of protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3.China Tobacco Chongqing Industrial Co., Ltd., Chongqing 400060, China; 4.College of Soil and

Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of different biochar additions on the physical and chemical properties of yellow loam soil, tobacco growth, yield, and output value were analysed in the Chongqing mountainous region to provide technical support for the application of biochar in soil conservation and tobacco production. [Methods] Flue-cured tobacco K326 was used as the experimental material. In 2022—2023, a completely

收稿日期: 2024-01-20

修回日期: 2024-03-25

资助项目: 重庆中烟工业有限责任公司科技项目“重庆烟叶基地土壤保育技术集成与应用”(YL202201), “重庆优质烟叶健康栽培技术集成与应用”(YL202203)

第一作者: 琚晨仪(1999—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤物理和烟草栽培。Email: sxjuchenyi@163.com。

通信作者: 肖庆礼(1980—), 男(汉族), 河南省夏邑县人, 博士, 高级农艺师, 主要从事烟草栽培及土壤物理等方面的研究。Email: qinglixiao80@163.com。

黄明斌(1968—), 男(汉族), 湖北省钟祥市人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文和土壤物理方面的研究。Email: hmdb@nwsuaf.edu.cn。

random design was adopted for the tobacco field, and seven treatments of biochar addition were established based on the conventional film ridge cultivation and fertilisation methods. The seven biochar treatments were as follows: zero biochar addition (CK), 750 (T_{50}), 1 500 (T_{100}), 3 000 (T_{200}), 4 500 (T_{300}), 6 000 (T_{400}), and 7 500 kg/hm^2 (T_{500}) of biochar. During the study period, soil physical and chemical properties, tobacco agronomic traits, ground and aboveground dry matter, and yield and output values were measured. [Results] ① The application of biochar increased the soil porosity and capillary water capacity. The total porosity and capillary water capacity of soil treated with T_{400} and T_{500} were significantly higher than those treated with CK in the second year of the experiment. ② Compared with the CK treatment, biochar addition significantly increased the contents of available nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the 0—20 cm soil profile, and T_{300} , T_{400} , and T_{500} treatments significantly increased the organic matter content and pH value in the 0—20 cm soil profile, which could effectively alleviate soil acidification. ③ Compared with the CK treatment, the T_{300} , T_{400} , and T_{500} treatments significantly promoted the growth and biomass accumulation of tobacco and significantly increased the yield and output value of tobacco leaves. Considering the input-output ratio, the T_{400} treatment was optimal for improving the physical and chemical properties of soil, tobacco yield, and output value. [Conclusion] Adding suitable amounts of biochar to tobacco field soil can improve the physical and chemical properties of soil, increase soil cultivability, promote the growth, development, and dry matter accumulation of tobacco plants, and increase the yield and output value of tobacco leaves.

Keywords: biochar; physical and chemical properties of soil; agronomic traits; yield; Chongqing mountains region

近几年来,由于多年连作和不合理地施用化肥农药^[1],使得植烟土壤结构遭到破坏,土壤营养元素失衡,影响烟草正常的生长发育,造成烟叶品质和产量下降^[2],因此植烟土壤改良迫在眉睫。随着土壤改良措施的不断更新,生物炭作为土壤改良剂在土壤改良中的作用越来越受到人们的重视。生物炭是在高温厌氧的条件下产生的一种多孔、富碳、高度芳香化、难溶性的固态物质,同时具有容重小、比表面积大、吸附能力强和有机质含量高等特点^[3]。

在土壤中添加的生物炭能直接或间接参与农田生态系统土壤养分循环,对土壤养分产生重要影响,进而影响作物的生长发育和产量^[4]。研究表明,施用生物炭可以显著提高土壤 pH 值^[5]和土壤有机质含量^[6],增强土壤保肥和保水能力^[7],促进根系生长^[8],提高作物的生物量^[9]。纪立东等^[10]通过对灰钙土定位施肥发现,生物炭添加能显著增加土壤有机质,提升土壤速效养分含量,提高土壤稳定性。汪洋等^[11]在江西城门的研究发现,添加生物炭可以增加土壤有机碳和全氮含量,对土壤全磷也有增加,但效果不显著。Oladele S 等^[12]研究表明生物炭可以提高作物的农艺性状和养分吸收。王博等^[13]研究发现在土壤添加生物炭能够促进烟株根系发育,提高根系穿透能力,促进绿色烟叶的可持续发展。Jiang C 等^[14]和刘著文等^[15]分别通过田间试验发现,生物炭可以显著提高烟叶产量、品质及香气量。

生物炭添加对土壤理化性质、烟草生长发育及产量的影响方面已有部分研究^[16-18],但是最佳添加量却因土壤质地、养分含量、气候条件和烟草生长状况而不同,目前还缺乏针对山区气候、黏土质条件下生物炭添加对烤烟生长发育的影响和最佳添加量田间试验研究。为此,本文在重庆市彭水县黄家烟草种植基地黄壤土设置了 6 种生物炭添加量,探究其对土壤理化性质、烟草生长发育及产量的影响,结合经济成本,筛选出利于改良土壤、促进烤烟生长、提高烟叶产量的最佳生物炭添加量,以期生物炭在土壤保育和烟草生产中的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 3 月至 2023 年 10 月在重庆市彭水县黄家镇(108°05′90″E, 29°12′39″N)进行,供试烟草品种为 K326,土壤类型为黄壤土,土壤理化性质详见表 1,试验区属于典型的亚热带季风气候区,年平均气温 17.5 °C,平均降雨量 1 104 mm。试验所用烟苗采用漂浮育苗,中心花开放打顶,大田管理按照烤烟生产技术方案进行。在翻耕起垄前施用复合肥 700 kg/hm^2 (N : P_2O_5 : K_2O = 6 : 12 : 25),农家肥 1 500 kg/hm^2 ,芝麻饼肥 300 kg/hm^2 ,移栽时提苗肥施用 60 kg/hm^2 (N : P_2O_5 : K_2O = 20 : 15 : 10),在烟苗移栽后 1 个月施用硝酸钾 195 kg/hm^2 。供试生

物炭是由水稻秸秆粉碎后在 600~800 °C 高温缺氧条件经过 20 s 的快速裂解而成,过 0.25 mm 筛,pH 值

为 9,有机质含量为 85%,由江苏华丰农业生物工程有限公司生产。

表 1 黄壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of yellow loamy soil

项目	土壤质地			有机质/%	pH 值	全氮/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%
	黏粒/%	粉粒/%	沙粒/%					
数值	46.32	44.11	9.57	2.1	5.18	0.13	0.06	1.96

1.2 试验设计

本试验共设 7 个处理,每个处理 3 次重复,共计 21 个小区,所有小区均按照随机区组排列。各处理均按当地生产技术方案进行前期管理。烟草种植密度为行距 115 cm、株距 55~60 cm,平均种植密度为 16 500 株/hm²左右。7 个处理分别为添加生物炭:空白对照 0 kg/hm²(CK),750 kg/hm²(T₅₀),1 500 kg/hm²(T₁₀₀),3 000 kg/hm²(T₂₀₀),4 500 kg/hm²(T₃₀₀),6 000 kg/hm²(T₄₀₀)和 7 500 kg/hm²(T₅₀₀)。供试生物炭和氮磷钾复合肥均在每年 3 月起垄前均匀条施于土壤表层,并通过小型旋耕机将生物炭、复合肥与 0—20 cm 土壤耕层充分混匀,根据土壤墒情在 4 月中旬起垄盖膜。在 4 月下旬完成烟苗移栽工作。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤理化性质测定 在施用生物炭 150 d 后采集土壤样品,在各小区 0—20 cm 耕层中用环刀采集原状土,用于测定毛管持水量,计算土壤总孔隙度。同时在 0—20 cm 耕层中采集土壤,测定 pH 值、有机质和硝态氮、速效钾、速效磷含量。每个小区 3 次重复。

毛管持水量采用砂吸法测定;有机质含量采用外加热—重铬酸钾法测定;pH 值采用 pH 计测定;硝态氮采用 KCl 浸提法测定;速效钾采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度法测定;速效磷采用 NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;土壤总孔隙度^[19]根据土壤容重计算得出,并假设土壤比重为 2.65 g/cm³。

1.3.2 烤烟农艺性状调查 在每个处理的 3 个重复小区选择有代表性的植株 5~7 棵挂牌标记,按《烟草农艺性状调查方法(YC/T142—2010)》标准,定点定株在烟株团棵期(移栽后 30 d)、圆顶期(移栽后 75 d)测定烟株的农艺性状。主要包括株高、茎围、有效叶片数、最大叶面积等,其中,最大叶面积=最大叶长×最大叶宽×0.634 5^[20]。

1.3.3 烤烟生物量测定 本试验分别在烟株生长的团棵期和圆顶期采集烟株样品,每个处理每个小区采集 3 株长势相似的整株烟草样品,将烟株分为根、茎、

叶 3 部分,经过 105 °C 杀青 15 min 后,在 60 °C 下继续烘至恒重,分别称重,即为样品干物质量。

1.3.4 烤后烟叶产量和经济性状调查 每次烟叶采收后,按照试验小区单独上杆烘烤;烘烤结束后,按(GB2635—92)烤烟标准进行分级,并确定各试验小区的中上等烟比例、均价、产量和产值。生物炭添加对作物产量的贡献率^[21]=(生物炭添加处理产量—对照处理产量)/生物炭添加处理产量;生物炭添加对作物产值的贡献率^[21]=(某生物炭添加处理产值—对照处理产值)/生物炭添加处理产值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 及 SPSS(25.0)软件对数据进行统计分析,采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较,检验不同处理间在 $p < 0.05$ 的显著性水平。采用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对土壤物理性质的影响

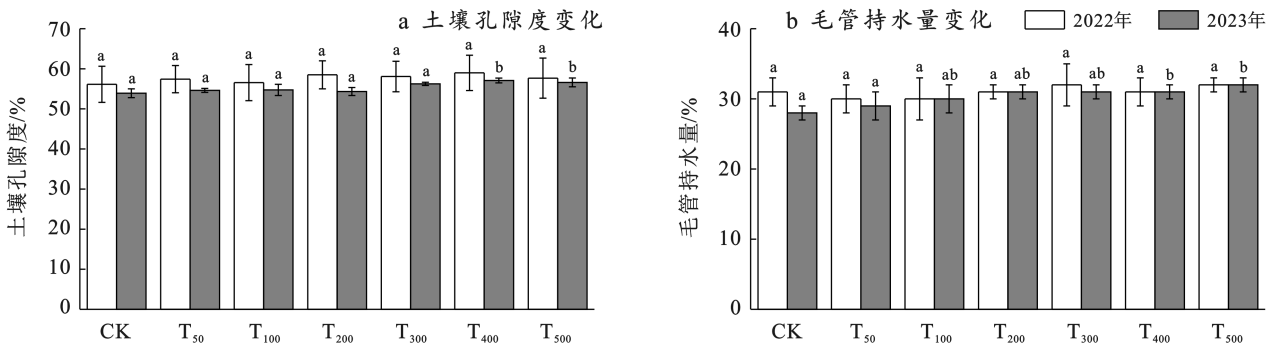
不同生物炭添加对土壤孔隙度和毛管持水量的影响如图 1 所示。由图 1 可知,在 2022 年,与 CK 处理相比较,不同生物炭添加处理对土壤孔隙度和毛管持水量的影响均不显著。在 2023 年,由于施用生物炭的累积效应,T₄₀₀,T₅₀₀ 处理的土壤孔隙度与 CK 处理表现出显著性差异。与 CK 处理相比,T₄₀₀,T₅₀₀ 处理的土壤孔隙度分别提高了 6.5% 和 5.6%,但 T₄₀₀,T₅₀₀ 处理间无显著差异,T₅₀,T₁₀₀,T₂₀₀,T₃₀₀ 处理与 CK 处理之间的差异不显著。T₄₀₀,T₅₀₀ 处理的毛管持水量要显著高于 CK 处理,较 CK 处理分别增加了 11.1% 和 11.8%。同时 T₄₀₀,T₅₀₀ 处理毛管持水量无显著差异,CK 处理与 T₅₀,T₁₀₀,T₂₀₀,T₃₀₀ 处理之间毛管持水量也无显著差异。

2.2 生物炭添加对土壤化学性质的影响

生物炭添加对耕层土壤化学性质的影响要大于土壤物理性质。不同生物炭添加对耕层土壤有机质、pH 值、硝态氮、速效磷、速效钾的影响如表 2 所示。数据显示,施用生物炭能够提高土壤有机质含量,2 a

间,不同生物炭添加处理的有机质含量均显著高于 CK。2022 年各处理土壤有机质较 CK 分别提高了 2.9%,14.6%,18.1%,30.9%,63.9%,74.9%;2023 年分别提高了 13.3%,15.4%,63.3%,92.0%,111.9%,121.7%。生物炭自身含碳量达 85%以上,随着生物炭添加量的增多,土壤有机质含量呈现线性增加。与 CK 相比,2 a 间 T_{300} 、 T_{400} 和 T_{500} 处理均显著提高了土壤 pH 值,2022 年分别提高了 5.3%,6.2%和 6.6%,2023 年分别提高了 6.6%,8.2%和 8.8%。而其他处理,土壤 pH 值与 CK 处理间无显著差异。生物炭呈碱性(pH 值为 9),4 500~7 000 kg/hm² 添加量能够有效提高土壤 pH 值,降低土壤酸性。数据分析显示,添加生物炭能够显著提高土壤硝态氮、速效磷、速效钾的含量,且增加趋势相同。在 2 a 的试验中, T_{50} — T_{500} 处理均显著提高了耕层土壤硝态氮含量,其

中, T_{500} 处理对土壤硝态氮含量的增加效果最好,与 CK 相比,2022 年、2023 年 T_{500} 处理分别增加了 93.1%和 91.5%。同时, T_{50} — T_{500} 处理均显著提高了耕层土壤速效磷含量,与 CK 相比,土壤速效磷的含量分别增加了 27.8%,55.0%,73.2%,110.0%,112.6%和 123.7%,2023 年分别增加了 12.8%,26.6%,81.4%,83.0%,89.9%和 97.2%。生物炭添加对耕层土壤速效钾有显著影响,与 CK 相比,2022 年 T_{50} — T_{500} 处理土壤速效钾分别增加了 22.1%,39.5%,77.5%,82.6%,95.6%和 135.0%,2023 年分别增加了 1.8%,4.1%,9.5%,12.1%,14.2%和 16.4%。试验结果证实,添加生物炭能够显著有效增加土壤速效养分,且随着生物炭添加量的增多,土壤速效养分呈现线性增加,在所有处理中, T_{500} 处理土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量增加幅度最大。



注:①图中 CK, T_{50} , T_{100} , T_{200} , T_{300} , T_{400} , T_{500} , 为试验的 7 个处理,分别为添加生物炭:0,750,1 500,3 000,4 500,6 000,7 500 kg/hm²; ②不同小写字母代表不同处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同生物炭添加对土壤孔隙度和毛管持水量的影响

Fig.1 Effects of different biochar addition treatments on soil porosity and capillary water capacity

表 2 不同生物炭施用量对土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of different biochar addition treatments on soil chemical properties

年份	处理	有机质/(g · kg ⁻¹)	pH 值	硝态氮/(mg · kg ⁻¹)	速效磷/(mg · kg ⁻¹)	速效钾/(mg · kg ⁻¹)
2022	CK	36.3 ± 3.2 ^d	5.1 ± 0.2 ^b	10.7 ± 1.7 ^d	43.8 ± 0.3 ^f	335.8 ± 1.4 ^g
	T_{50}	39.2 ± 2.3 ^c	5.2 ± 0.4 ^b	11.3 ± 0.7 ^c	55.9 ± 0.6 ^e	410.1 ± 1.2 ^f
	T_{100}	41.6 ± 8.2 ^{bc}	5.2 ± 0.3 ^b	12.5 ± 1.7 ^c	67.9 ± 1.3 ^d	468.4 ± 5.0 ^e
	T_{200}	42.9 ± 9.1 ^{bc}	5.3 ± 0.6 ^b	13.9 ± 0.5 ^b	75.9 ± 1.2 ^c	596.1 ± 0.7 ^d
	T_{300}	47.5 ± 7.1 ^b	5.4 ± 0.1 ^a	14.2 ± 0.8 ^b	91.9 ± 0.1 ^b	613.3 ± 0.7 ^c
	T_{400}	59.5 ± 6.1 ^a	5.5 ± 0.2 ^a	16.1 ± 0.1 ^b	93.1 ± 1.5 ^b	656.9 ± 18.2 ^b
	T_{500}	63.5 ± 5.8 ^a	5.5 ± 0.2 ^a	20.7 ± 0.9 ^a	97.9 ± 2.6 ^a	789.1 ± 4.4 ^a
2023	CK	28.6 ± 4.9 ^e	5.1 ± 0.02 ^b	8.0 ± 0.2 ^g	15.7 ± 1.3 ^d	642.2 ± 9.4 ^f
	T_{50}	32.4 ± 4.6 ^d	5.1 ± 0.02 ^b	9.7 ± 0.2 ^f	17.7 ± 0.4 ^c	653.6 ± 9.0 ^e
	T_{100}	33.0 ± 4.2 ^d	5.2 ± 0.07 ^b	10.4 ± 0.1 ^e	19.8 ± 1.8 ^b	668.5 ± 5.1 ^d
	T_{200}	46.7 ± 4.8 ^c	5.3 ± 0.07 ^b	12.9 ± 0.2 ^d	28.4 ± 1.6 ^a	703.1 ± 4.9 ^c
	T_{300}	54.9 ± 3.2 ^b	5.5 ± 0.11 ^a	13.8 ± 0.2 ^c	28.7 ± 2.0 ^a	719.9 ± 5.8 ^b
	T_{400}	60.6 ± 4.9 ^a	5.5 ± 0.08 ^a	14.5 ± 0.1 ^b	29.7 ± 2.5 ^a	733.8 ± 4.7 ^a
	T_{500}	63.4 ± 4.7 ^a	5.6 ± 0.03 ^a	15.4 ± 0.3 ^a	30.9 ± 1.2 ^a	747.3 ± 8.1 ^a

注:表中数值为平均值 ± SD; 同一列不同小写字母代表不同处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3 生物炭添加对烤烟农艺性状的影响

不同生物炭添加对烤烟团棵期和圆顶期农艺性状的影响详见表 3。在 2 a 的试验中,随着生物炭添加量的增加,团棵期各处理农艺性状呈现出一定差异, T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理对烤烟株高有显著影响,与 CK 处理相比,2022 年分别增加了 23.8%,40.6% 和 31.0%,2023 年分别增加了 52.4%,58.7% 和 84.9%,但 T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理间无明显差异。在土壤中增施生物炭对烤烟茎围的影响较小,2022 年各处理烟株茎围在 7.7~8.7 cm 范围内波动,且各处理均未达到显著性水平。2023 年 T_{500} 处理的茎围与 CK 相比,显著增加了 66.6%,同时其他处理与 CK 之间的差异不显著。生物炭添加对烤烟最大叶面积的影响比较显著, T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理的最大叶面积相对较大,与 CK 处理相比较,2022 年分别增加了 17.0%,35.3% 和 29.5%,2023 年分别增加了 39.7%,52.2% 和 48.6%,同时 T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理之间无显著差异, T_{50} , T_{100} , T_{200} 和 CK 处理之间差异不显著。在圆顶期,不同生

物炭添加对烤烟株高的影响较明显,2 a 间各处理的株高均高于 CK,其中,与 CK 相比,2022 年 T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理分别显著增加了 14.4%,28.7% 和 25.7%,2023 年分别增加了 38.3%,40.4% 和 47.8%,但 T_{50} , T_{100} , T_{200} 处理与 CK 之间无显著差异。2022 年生物炭添加对烤烟茎围无明显影响,各处理茎围均高于 CK 处理,但差异未达到显著水平。但 2023 年 T_{400} , T_{500} 处理的茎围与 CK 处理相比,显著增加了 11.2% 和 12.4%。2 a 中,不同生物炭添加对烤烟有效叶片数无显著影响,各处理间差异不明显。在 2 a 的试验中,生物炭添加对烤烟最大叶面积的影响比较显著, T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理均显著提高了烤烟的最大叶面积,较 CK 处理,2022 年分别提高了 14.1%,20.2% 和 10.2%,2023 年分别提高了 67.8%,20.2% 和 70.1%,同时 T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理间无显著差异。综合来看,施用生物炭后 T_{300} , T_{400} 和 T_{500} 处理对烟株农艺性状的影响比较显著,而 T_{50} , T_{100} 和 T_{200} 处理的影响不显著。

表 3 不同生物炭施用量对不同生育期烤烟农艺性状的影响

Table 3 Effects of different biochar addition treatments on agronomic traits of flue-cured tobacco at different growth stages

生长期	处理	2022 年			2023 年		
		株高/cm	茎围/cm	最大叶面积 (cm ² /片)	株高/cm	茎围/cm	最大叶面积 (cm ² /片)
团棵期	CK	26.1±6.2 ^b	7.7±0.9 ^a	954.4±157.7 ^b	12.6±0.7 ^c	4.7±0.3 ^b	432.1±29.9 ^{bc}
	T_{50}	28.8±0.2 ^{ab}	8.0±0.4 ^a	906.2±227.2 ^b	11.6±0.4 ^c	5.2±0.1 ^{ab}	359.7±25.8 ^c
	T_{100}	28.8±5.7 ^{ab}	8.0±0.6 ^a	1 015.9±182.4 ^b	16.0±0.7 ^{bc}	5.6±0.1 ^{ab}	416.5±123.4 ^c
	T_{200}	29.3±3.2 ^{ab}	7.7±0.1 ^a	1 059.1±61.1 ^b	19.1±0.6 ^{ab}	6.8±0.2 ^{ab}	496.3±14.5 ^{bc}
	T_{300}	32.3±3.2 ^a	8.3±0.4 ^a	1 117.0±52.6 ^a	19.2±5.1 ^{ab}	6.4±1.1 ^{ab}	603.5±121.7 ^{ab}
	T_{400}	36.7±6.2 ^a	8.6±0.3 ^a	1 291.3±134.9 ^a	20.0±4.0 ^{ab}	6.5±1.4 ^{ab}	657.5±65.5 ^a
	T_{500}	34.2±4.8 ^a	7.9±0.3 ^a	1 236.4±348.7 ^a	23.3±1.4 ^a	7.0±1.1 ^a	642.0±25.7 ^a
圆顶期	CK	99.4±7.2 ^c	9.8±1.1 ^a	1 199.5±55.8 ^b	73.8±12.7 ^b	8.9±0.8 ^c	359.7±25.8 ^b
	T_{50}	105.7±5.6 ^c	10.6±0.7 ^a	1 236.4±118.6 ^b	87.5±15.5 ^{ab}	9.3±0.3 ^{abc}	432.1±29.9 ^{ab}
	T_{100}	105.5±4.9 ^c	9.8±0.4 ^a	1 279.3±81.8 ^b	92.9±8.8 ^{ab}	9.0±0.1 ^{abc}	416.5±123.4 ^{ab}
	T_{200}	105.0±7.4 ^c	10.2±0.1 ^a	1 319.6±112.2 ^a	97.2±2.5 ^{ab}	9.5±0.4 ^{abc}	496.3±14.5 ^{ab}
	T_{300}	113.7±3.7 ^b	10.4±0.4 ^a	1 368.2±114.4 ^a	102.1±10.5 ^a	9.0±0 ^{abc}	603.5±121.7 ^a
	T_{400}	127.9±3.8 ^a	10.0±0.6 ^a	1 441.4±210.8 ^a	103.6±5.1 ^a	9.9±0.1 ^{ab}	614.0±127.0 ^a
	T_{500}	124.9±3.8 ^a	10.5±0.7 ^a	1 321.7±102.7 ^a	109.1±4.6 ^a	10.0±0.2 ^a	611.7±17.2 ^a

2.4 不同生物炭添加对不同时期烤烟生物量的影响

不同生物炭添加对团棵期烤烟地上和地下生物量的影响差异如图 2 所示。由图 2 可知,生物炭添加会影响到团棵期烤烟地上和地下生物量的积累。2 a 间, T_{50} — T_{500} 处理的地上生物量均显著高于 CK,2022 年各处理分别提高了 60.0%,7.5%,7.6%,8.7%,15.7% 和 16.9%,2023 年分别提高了 56.1%,56.6%,100.5%,117.7%,132.4% 和 143.8%。其中,

T_{400} , T_{500} 处理对烤烟地上生物量的积累效果最大,且 T_{400} 与 T_{500} 处理间差异不显著。在 2022 年不同生物炭添加各处理的地下生物量均高于 CK 处理,但差异不显著。2023 年 T_{200} , T_{300} , T_{400} , T_{500} 均显著提高了烤烟地下生物量,较 CK 处理分别提高了 80.6%,90.9%,93.5% 和 80.6%,同时 T_{200} , T_{300} , T_{400} , T_{500} 处理间的差异不显著,CK 和 T_{50} , T_{100} 处理间无显著差异。

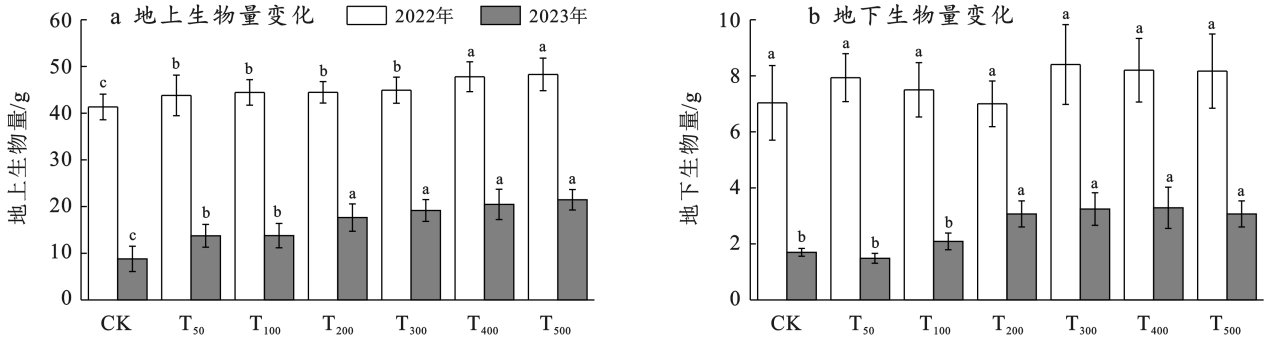


图2 不同生物炭添加对团棵期烤烟生物量的影响

Fig.2 Effects of different biochar addition treatments on biomass of flue-cured tobacco in tube-growing stage

不同生物炭添加对圆顶期烤烟地上和地下生物量的影响差异如图3所示。

由图3可知,在2a的试验中, T_{50} — T_{500} 生物炭添加处理的地上生物量均显著高于CK处理,与CK相比,2022年 T_{50} — T_{500} 处理的地上生物量分别提高了8.1%、12.8%、16.9%、16.0%、24.7%和21.0%,且 T_{50} — T_{500} 各处理间差异不显著;2023年 T_{50} — T_{500} 处理的地上生物量分别提高了32.1%、39.5%、41.9%、40.3%、76.2%和88.9%,同时 T_{400} 和 T_{500} 处理差异不

显著,但显著高于 T_{50} 、 T_{100} 、 T_{200} 和 T_{300} 处理。2022年 T_{200} 、 T_{300} 、 T_{400} 、 T_{500} 处理的地下生物量与CK处理呈现出显著性差异,与CK相比,分别提高了地下生物量10.8%、10.9%、13.7%和11.9%,且 T_{200} 、 T_{300} 、 T_{400} 、 T_{500} 处理间无显著差异,CK处理与 T_{50} 、 T_{100} 处理间也无显著差异。2023年, T_{50} — T_{500} 处理的地下生物量均显著高于CK处理,较CK处理分别提高了29.6%、46.5%、52.1%、56.6%、99.2%和105.9%。其中, T_{400} 、 T_{500} 处理与 T_{50} 、 T_{100} 、 T_{200} 、 T_{300} 处理间的差异显著。

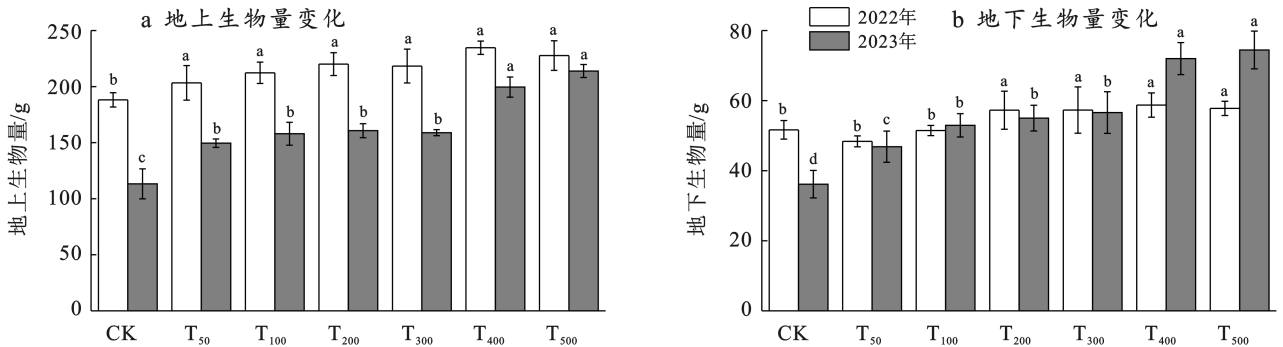


图3 不同生物炭添加对圆顶期烤烟生物量的影响

Fig.3 Effects of different biochar addition treatments on biomass of flue-cured tobacco in dome stage

2.5 不同生物炭添加对烤烟产量和产值的影响

2022年和2023年不同生物炭施用量对烤烟产量和经济性状的影响如表4所示。在2a试验中, T_{300} 、 T_{400} 和 T_{500} 处理同时显著提高了烟叶产量和产值。相对于CK处理,2022年 T_{300} 、 T_{400} 和 T_{500} 处理分别提高产量16.5%、21.4%和17.7%,分别提高产值28.0%、32.4%和20.5%。2023年分别提高产量6.6%、9.0%、8.3%,分别提高产值32.6%、39.9%、34.2%。同时,2a试验结果,烤烟中上等烟比例均是 T_{400} 处理最大,其次是 T_{500} 处理和 T_{300} 处理,最后是 T_{200} 、 T_{100} 处理。随着生物炭施用量的增加,对烤烟产量和产值的贡献率呈现出先升高后降低的趋势,在 T_{400} 处理时达到最大值。基于生物炭添加对烟叶产

量和产值的贡献率,本研究证实 T_{400} 处理是最适宜的添加量。

3 讨论

生物炭是一种碱性^[22]、疏松多孔、比表面积大、吸附能力强的富碳材料^[23],而黄壤质地偏黏,酸性较强,透气性较差。本研究生物炭作为改良剂添加到土壤中,在一定程度上降低了土壤容重,提高了土壤孔隙度和土壤毛管持水量,其中,6000和7000 kg/hm²的生物炭添加量对其改良效果最佳。这一方面可能是生物炭具有丰富的微小孔隙,比重较小,施入土壤后能够增加土壤孔隙度,进而增大土壤的比表面积,最终提高土壤毛管持水量;另一方面生物炭能够显著

提高土壤有机质含量,改善了土壤质地,也在一定程度上增加了土壤孔隙度。孙彤等^[24]在天津市黏质潮土的玉米产区也得出了类似结论。刘卉等^[25]针对黄灰土的研究发现,施用生物炭能够显著降低土壤容重,提高土壤孔隙度,显著提高毛管持水量,这与本研究结果基本一致。本研究发现,生物炭添加同时也提高了土壤 pH 值、有机质和土壤养分含量,且随着生物炭添加量的增多,土壤有机质含量和速效养分呈线性增加。主要原因是生物炭呈碱性,pH 值为 9,有机

质含量达 85%,且由于生物炭稳定的颗粒结构,在土壤中不易被矿化,所以增施生物炭能够提高土壤 pH 值和有机质含量;同时一方面由于生物炭自身含有部分养分,能够补充土壤养分;另一方面由于其疏松多孔和较强的吸附能力,对土壤中的养分有较强的吸附作用,可减少养分流失,增加土壤养分的有效性。张广雨等^[26]、陈心想等^[27]在褐质土和壤土中研究表明,单施或混施生物炭均能中和土壤酸度、提高土壤有机质、矿质态氮、有效磷和速效钾含量。

表 4 不同生物炭施用量对烤烟产量和产值的影响

Table 4 Effects of different biochar addition treatments on yield and output value of tobacco leaves

年份	处理	上等烟比例/%	中上等烟比例/%	产量/ (kg·hm ⁻²)	生物炭对产量 贡献率/%	产值/ (元·hm ⁻²)	生物炭对产值 贡献率/%
2022	CK	47.0±1.3 ^b	88.0±5.8 ^c	1 893.0±212.3 ^d	0.00	53 655.0±238.1 ^c	0.00
	T ₅₀	49.4±2.1 ^b	90.5±6.3 ^b	1 984.5±196.7 ^{cd}	4.61	55 501.5±362.4 ^c	3.33
	T ₁₀₀	50.8±2.6 ^b	90.8±1.4 ^b	2 067.0±165.6 ^{cd}	8.42	60 709.5±468.2 ^b	11.62
	T ₂₀₀	51.2±0.9 ^b	91.7±4.6 ^b	2 109.0±121.5 ^c	10.24	62 680.5±366.2 ^b	14.40
	T ₃₀₀	51.9±5.4 ^b	92.9±6.1 ^a	2 205.0±204.8 ^{ab}	14.15	68 697.0±298.7 ^a	21.90
	T ₄₀₀	62.6±1.8 ^a	93.6±2.8 ^a	2 298.0±139.7 ^a	17.62	71 064.0±364.8 ^a	24.50
	T ₅₀₀	58.6±3.8 ^a	92.3±5.1 ^a	2 227.5±116.3 ^{ab}	15.02	64 660.5±219.2 ^a	17.02
2023	CK	46.5±2.3 ^d	87.6±2.3 ^b	1 942.5±78.3 ^c	0.00	47 229.0±356.7 ^d	0.00
	T ₅₀	49.2±1.2 ^c	89.8±3.4 ^a	1 975.5±56.4 ^c	1.67	56 097.0±234.9 ^c	15.81
	T ₁₀₀	52.6±3.4 ^c	90.4±3.5 ^a	2 031.0±72.3 ^b	4.36	58 620.0±297.4 ^c	19.43
	T ₂₀₀	55.6±1.9 ^b	90.6±1.9 ^a	2 004.0±62.8 ^b	3.07	59 697.0±305.1 ^c	20.89
	T ₃₀₀	56.5±2.1 ^b	91.1±2.7 ^a	2 070.0±88.6 ^a	6.16	62 643.0±245.5 ^b	24.61
	T ₄₀₀	59.2±1.4 ^a	92.5±3.7 ^a	2 118.0±83.7 ^a	8.29	66 081.5±241.8 ^a	28.53
	T ₅₀₀	57.6±1.6 ^b	92.3±2.1 ^a	2 103.0±68.9 ^a	7.63	63 388.5±314.6 ^b	25.49

在本研究中,不同生物炭添加对团棵期和圆顶期烤烟的农艺性状的影响基本相同。在团棵期和圆顶期时,添加生物炭对烤烟株高和最大叶面积有显著影响,各处理烤烟茎围没有显著差异,4 500,6 000 和 7 500 kg/hm²的生物炭添加量对烤烟株高和最大叶面积的影响显著,且 7 500 kg/hm²的生物炭添加量对烤烟生长发育的影响最好。这可能是由于生物炭良好的吸附功能,在一定程度上可以提高土壤保水保肥能力,保证烤烟在各生长阶段有适宜的土壤水肥供应,进一步促进烟株的生长发育。李青山等^[17]在山东洛庄的研究发现,增施生物炭可以显著提高烟株的株高、茎围,同时增加烟叶的叶面积。李恪等^[18]在云南玉溪的研究发现,化肥配施生物炭均对烟草团棵期、旺长期和封顶期的株高、最大叶长以及最大叶面积有显著影响,这与本研究结果基本一致。

本研究结果表明,在团棵期和圆顶期,添加生物炭能够显著增加烤烟根系和地上部生物量,随着生物炭添加量的增多,烤烟根系生物量也在提高,同时,7 500 kg/hm²的生物炭添加量对增加烤烟生物量的

积累效果最好。由于生物炭孔隙结构丰富^[28],施用后可改善植烟土壤孔隙性质,改善烤烟根系通气状况,有利于根系生长。同时生物炭比表面积较大,具有丰富的表面官能团和较强的吸附能力^[29],可间接地提高烤烟根系对养分的吸收效率,同时增强了根际微生物的活动,改善了根际生长环境,有利于促进烤烟根系生理代谢。陈懿等^[30]研究发现,在土壤中增施生物炭能够显著提高烤烟根系干质量、地上部干质量和总干质量。这与本研究结果基本一致。张继旭等^[31]研究发现,随生物炭添加量的增加,烤烟根系生物量与根冠比也随之增加,其中以添加量 5.0%时烤烟根系生物量及根冠比最高。

本研究通过大田小区试验研究生物炭添加量对烤烟产量的影响,研究表明,烤烟产量随着生物炭添加量的增加,呈现出先增加后下降的趋势,当生物炭添加达到 6 000 kg/hm²时,烤烟产量达到最大值,之后随着生物炭添加量的增加,烤烟产量有所下降。主要原因可能是养分过剩导致的。生物炭对烤烟产量和产值的贡献率也随着添加量的增加而表现出先升

高再下降的趋势,在添加量为 6 000 kg/hm²时,生物炭对烤烟产量和产值的贡献率最大。这可能是因为增施生物炭,能够培肥土壤,增加肥效,提高生物炭的贡献率;同时过多地添加生物炭可能会导致养分过剩,植株无法吸收,造成生物炭对产量和产值贡献率的下降。李恪等^[18]在云南玉溪的研究也得出相似结论。牛政洋等^[32]在江西赣州地区的研究发现,施用生物炭后水稻土和紫色土的烤烟分别最高增产 52.9% 和 122.7%。综上所述,在植烟土壤中增施生物炭在一定程度上可以改良土壤理化性质,促进烟叶的生长发育,提高烟叶产量。但是,在不同类型的植烟土壤中施用生物炭对烟草生长影响作用存在差异,需要进一步研究。为了获得最佳的生物炭施用量和生物炭施用的累积效应,后续试验尚需继续开展。除此之外,还需要研究生物炭施用与常规化肥施用的协同效应,达到减少常规化肥施用量的目的。

4 结论

(1) 在 6 个不同生物炭添加量处理中,由于生物炭的累积效应,T₄₀₀,T₅₀₀ 处理能有效增加土壤孔隙度和毛管持水量。在 6 个生物炭添加处理中,T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理对土壤物理性质的改善效果较好。

(2) 相对于 CK 处理,所有生物炭添加处理都显著提高了耕层土壤速效氮、速效磷和速效钾含量,同时 T₃₀₀,T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理显著提高了耕层土壤有机质含量和 pH 值,使植烟土壤的 pH 值恢复到适合烟草生长土壤酸性环境(5.5~6.5 之间)。

(3) 相对于 CK 处理,T₃₀₀,T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理显著促进了烟叶生长,同时显著增加了烤烟根系和地上部生物量,显著提高了烟叶最终产量和产值。虽然 T₃₀₀,T₄₀₀ 和 T₅₀₀ 处理间差异不明显,但综合考虑产量和产值贡献率,T₄₀₀ 处理是目前可推荐的最佳施用量。

参考文献 (References)

[1] 李集勤,黄振瑞,杨少海,等.八种绿肥对土壤营养和烤烟产质量的影响[J].中国烟草科学,2020,41(6):24-29.
Li Jiqin, Huang Zhenrui, Yang Shaohai, et al. Effects of eight kinds of green manure on soil nutrition, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 2020,41(6):24-29.

[2] 王月玲,周凤,张帆,等.施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J].环境科学研究,2017,30(6):920-928.
Wang Yueling, Zhou Feng, Zhang Fan, et al. Influence of biochar on soil respiration and soil organic carbon

fractions [J]. Research of Environmental Sciences, 2017,30(6):920-928.

- [3] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011,140(1/2):309-313.
- [4] 方明,任天志,赖欣,等.施用生物炭对红壤和潮土种植小白菜氮素利用的影响[J].中国土壤与肥料,2019(6):123-133.
Fang Ming, Ren Tianzhi, Lai Xin, et al. Effect of biochar application on crop nitrogen utilization in red and fluoro-aquic soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(6):123-133.
- [5] Mansoor S, Kour N, Manhas S, et al. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity [J]. Chemosphere, 2021,271:129458.
- [6] 蒋惠,郭雁君,张小凤,等.生物炭对砂糖桔叶果和土壤理化性状的影响[J].生态环境学报,2017,26(12):2057-2063.
Jiang Hui, Guo Yanjun, Zhang Xiaofeng, et al. Effects of biochar on leaf, fruit and soil physicochemical properties in *Citrus reticulata* blanco cv. shatangju orchard [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017,26(12):2057-2063.
- [7] 姚奇,俞若涵,张洪宇,等.生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(3):68-74.
Yao Qi, Yu Ruohan, Zhang Hongyu, et al. Effects of biochar application on soil nutrients and crop yield in winter wheat farmland [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(3):68-74.
- [8] 刘晓涵,刘晓晖,郑好,等.生物炭对烟草幼苗氯化钠胁迫的缓解效应[J].中国烟草学报,2022,28(3):52-62.
Liu Xiaohan, Liu Xiaohui, Zheng Hao, et al. Alleviating effect of biochar on sodium chloride stress in tobacco seedlings [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022,28(3):52-62.
- [9] 王媛,王继明,年夫照,等.连季增施稻壳生物炭对植烟土壤理化性质及烤烟生长的影响[J].作物杂志,2023(1):219-225.
Wang Yuan, Wang Jiming, Nian Fuzhao, et al. Effects of continuous cropping with rice hull biochar on soil physical and chemical properties and growth of flue-cured tobacco [J]. Crops, 2023(1):219-225.
- [10] 纪立东,柳骁桐,司海丽,等.生物炭对土壤理化性质和玉米生长的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):114-120.
Ji Lidong, Liu Xiaotong, Si Haili, et al. Effects of biomass charcoal on soil physicochemical properties and

- corn growth [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021,39(5):114-120.
- [11] 汪洋,艾艳梅,陈泓璐,等.生物炭对铜矿区排土场污染土壤理化性质和重金属形态的影响[J].*水土保持研究*, 2023,30(2):444-450.
- Wang Yang, Ai Yanmei, Chen Honglu, et al. Effects of biochar on the physical and chemical properties and heavy metal forms of polluted soil in the dump of copper mining area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):444-450.
- [12] Oladele S, Adeyemo A, Awodun M, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties, nitrogen use efficiency and upland rice (*Oryza sativa*) yield grown on an Alfisol in Southwestern Nigeria [J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2019,8(3):295-308.
- [13] 王博,刘扣珠,任天宝,等.减氮条件下生物炭对烤烟根系发育及土壤微生物群落的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2021(3):45-50.
- Wang Bo, Liu Kouzhu, Ren Tianbao, et al. Effect of biochar on the roots and soil microorganisms of flue-cured tobacco under the condition of nitrogen reduction [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):45-50.
- [14] Jiang C, Zu C, Wang H, et al. Straw return with biochar in creased soil macro-aggregates and improved flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) yield and quality [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022,20(1):207-219.
- [15] 刘著文,杨龙飞,刘茂林,等.不同土壤改良剂对土壤养分及烤烟内在品质的影响[J].*中国农业科技导报*, 2022,24(11):190-198.
- Liu Zhuwen, Yang Longfei, Liu Maolin, et al. Effects of different soil amendments on soil nutrients and inherent quality of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022,24(11):190-198.
- [16] 龚丝雨,钟思荣,张世川,等.增施生物炭对烤烟生长及产量、质量的影响[J].*作物杂志*, 2018(2):154-160.
- Gong Siyu, Zhong Sirong, Zhang Shichuan, et al. Effects of biochar on growth, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. *Crops*, 2018(2):154-160.
- [17] 李青山,王德权,杜传印,等.有机无机肥与生物炭配施对烤烟生长发育和烟叶质量的影响[J].*土壤通报*, 2021,52(6):1393-1401.
- Li Qingshan, Wang Dequan, Du Chuanyin, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers and biochar on the growth and development of flue-cured tobacco and leaf quality [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021,52(6):1393-1401.
- [18] 李格,代快,李江舟,等.烟秆生物炭与化肥配施对烟草生长及产量的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2022(3):91-100.
- Li Ge, Dai Kuai, Li Jiangzhou, et al. Effects of combined application of tobacco stalk biochar and chemical fertilizer on tobacco growth and yield [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3):91-100.
- [19] 朱谥远,岩晓莹,郭天崎,等.黄土高塬沟壑区陡坡地典型植被不同恢复年限土壤物理性质比较研究:以陕西长武王东沟为例[J].*矿物岩石地球化学通报*, 2022,41(5):1033-1040.
- Zhu Miyuan, Yan Xiaoying, Guo Tianqi, et al. A comparative study on soil physical properties of steep slopes in the Gully Region of the Loess Plateau with different restoration years of typical vegetation: A case study of Wangdonggou in Changwu, shannxi Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022,41(5):1033-1040.
- [20] 魏光钰,胡勇,吴永琴,等.清镇烟区双行凹型垄不同垄高对烤烟生长和产质量的影响[J].*耕作与栽培*, 2020,40(5):40-41.
- Wei Guangyu, Hu Yong, Wu Yongqin, et al. Effects of double row concave ridge and different ridge height on growth, yield and quality of flue-cured tobacco in Qingzhen [J]. *Tillage and Cultivation*, 2020,40(5):40-41.
- [21] 张益望,刘文兆,王俊,等.定位施肥对冬小麦生长、产量及水分利用的影响[J].*生态经济*, 2009,25(10):35-39.
- Zhang Yiwang, Liu Wenzhao, Wang Jun, et al. Effects of continuous fertilization on the growth, yield and water consumption of winter wheat [J]. *Ecological Economy*, 2009,25(10):35-39.
- [22] 王莉,王忠晨,张广毅,等.小麦秸秆生物炭稳定土壤中金属镉及微生物群落响应[J].*化工环保*, 2023,43(2):200-205.
- Wang Li, Wang Zhongchen, Zhang Guangyi, et al. Stabilization of cadmium in soil by wheat straw biochar and response of microbial community [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2023,43(2):200-205.
- [23] Graber E R, Meller Harel Y, Kolton M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. *Plant and Soil*, 2010,337(1):481-496.
- [24] 孙彤,付宇童,李可,等.锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响[J].*环境科学*, 2020,41(7):3426-3433.
- Sun Tong, Fu Yutong, Li Ke, et al. Effect of Mn-modified biochar on the characteristics of aggregate structure and the content of Cd in weakly alkaline Cd-contaminated soil [J].

- Environmental Science, 2020,41(7):3426-3433.
- [25] 刘卉,周清明,黎娟,等.生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J].核农学报,2016,30(7):1411-1419.
Liu Hui, Zhou Qingming, Li Juan, et al. Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016,30(7):1411-1419.
- [26] 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.
Zhang Guangyu, Chu Depeng, Liu Yuande, et al. Effects of biochar and seaweed fertilizers on tobacco growth, soil properties and bacterial wilt occurrence [J]. Chinese Tobacco Science, 2019,40(5):15-22.
- [27] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
Chen Xinxiang, He Xusheng, Geng Zengchao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6534-6542.
- [28] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(16):3324-3333.
- [29] Cornelissen G, Kukulka Z, Kalaitzidis S, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(13):3632-3640.
- [30] 陈懿,陈伟,林叶春,等.生物炭对植烟土壤微生物生态和烤烟生理的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3781-3787.
Chen Yi, Chen Wei, Lin Yechun, et al. Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(12):3781-3787.
- [31] 张继旭,张继光,张忠锋,等.秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J].中国烟草科学,2016,37(5):16-21.
Zhang Jixu, Zhang Jiguang, Zhang Zhongfeng, et al. Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities [J]. Chinese Tobacco Science, 2016,37(5):16-21.
- [32] 牛政洋,闫仲,郭青青,等.生物炭对两种典型植烟土壤养分、碳库及烤烟产质量的影响[J].土壤通报,2017,48(1):155-161.
Niu Zhengyang, Yan Shen, Guo Qingqing, et al. Effects of biochar on yield and quality of flue-cured tobacco and nutrients and carbon pool in two typical soils planted with tobacco [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(1):155-161.

(上接第 204 页)

- [25] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61(19):4115-4137.
- [26] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. Journal of the Geological Society, 1987,144(4):531-542.
- [27] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994,58(22):4955-4972.
- [28] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978,38(1):1-25.
- [29] 雷开宇,刘池洋,张龙,等.鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征:物源与古沉积环境恢复[J].沉积学报,2017,35(3):621-636.
Lei Kaiyu, Liu Chiyang, Zhang Long, et al. Element geochemical characteristics of the Jurassic Mudstones in the Northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35 (3): 621-636.
- [30] 俞初安,李彤,杨桐旭,等.鄂尔多斯盆地西南缘中下侏罗统地层物源及构造演化对铀成矿的制约[J].地球科学,2024,49(5):1793-1809.
Yu Reng'an, Li Tong, Yang Tongxu, et al. Provenance and tectonic evolution of the Middle and Lower Jurassic strata constraints on the uranium mineralization in southwest margin of Ordos Basin [J]. Earth Science, 2024,49(5):1793-1809.