

DOI: 10.11766/trxb202202250080

李毅, 梁嘉平, 王小芳, 杨哲, 樊向阳. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量[J]. 土壤学报, 2024, 61 (1): 64–76.

LI Yi, LIANG Jiaping, WANG Xiaofang, YANG Zhe, FAN Xiangyang. The Most Appropriate Biochar Application Rate for Improving Soil Physicochemical Properties and Crop Germination Rates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (1): 64–76.

改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量^{*}

李 毅^{1, 2}, 梁嘉平¹, 王小芳¹, 杨 哲¹, 樊向阳^{2†}

(1. 教育部农业水土工程重点实验室, 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所/中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点实验室, 河南新乡 453002)

摘 要: 确定改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量, 可为田间管理提供依据。以新疆盐碱土为研究对象, 在生物炭施用量分别为 0、10、50 及 100 t·hm⁻² 条件下, 开展了膜下滴灌田间小区试验, 对比了生物炭施用量对土壤容重、温度、有机碳等理化性质和作物出苗率的影响, 并进一步分析了作物出苗率与土壤理化性质的关系。结果表明, 生物炭施用量增加显著降低了 0~30 cm 土层的容重, 棉花和甜菜的土壤容重分别降低 0~0.32 和 0.04~0.25 g·cm⁻³。与不施用处理比较, 100 t·hm⁻² 的生物炭施用量显著增加了棉花和甜菜不同生育期的 5 cm 地温, 但 10 和 50 t·hm⁻² 的施用量只显著增加了棉花蕾期和铃期的 5 cm 地温。施用生物炭增加了棉花和甜菜的土壤有机碳含量, 不区分年份和生育期增幅相应为 0.98~13.2 和 0.66~12.1 g·kg⁻¹; 苗期和收获期 (不区分年份和作物) 增幅分别为 1.20~7.43 和 0.66~13.2 g·kg⁻¹, 苗期各施用量下有机碳均显著增加, 部分施用量下收获期的有机碳显著增加。随生物炭施用量增加, 棉花和甜菜的出苗率先增加后减小。出苗率大致随容重增加而增加, 随土壤温度增加先增加后减小, 最适宜作物出苗的温度为 22~26℃; 出苗率随土壤有机碳增加先增加后减小, 但高生物炭施用量导致的土壤有机碳增加过高抑制了作物出苗。当生物炭施用量为 10 t·hm⁻² 时, 棉花和甜菜的出苗率大于 0.7, 高于其他 3 种生物炭处理, 因此推荐 10 t·hm⁻² 作为最优生物炭施用量。

关键词: 生物炭; 土壤温度; 膜下滴灌; 棉花; 甜菜; 出苗率

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

The Most Appropriate Biochar Application Rate for Improving Soil Physicochemical Properties and Crop Germination Rates

LI Yi^{1, 2}, LIANG Jiaping¹, WANG Xiaofang¹, YANG Zhe¹, FAN Xiangyang^{2†}

(1. Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi, 712100, China; 2. Farmland Irrigation Research Institute, CAAS/Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: 【Objective】Biochar has been shown to improve soil physicochemical properties and enhance crop yields. The results

^{*} 国家重点研发计划 (2022YFD1900401) 和新疆自治区重点研发任务专项 (2022B02020-2) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFD1900401) and the Key Research and Development Program of Xinjiang Autonomous Region (No.2022B02020-2)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fxy0504@126.com

作者简介: 李 毅 (1974—), 女, 陕西武功县人, 博士, 教授, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: liyikitty@126.com

收稿日期: 2022-02-25; 收到修改稿日期: 2023-07-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-08-31

of previous studies on soil temperature were inconsistent, the changes of crop emergence rate under the change of biochar application rate were not analyzed in detail, and the relationship between crop emergence rate and soil physicochemical properties such as soil bulk density, temperature and organic carbon was neglected. Thus, it is important to estimate the most appropriate application rate of biochar for improving soil physicochemical properties and crop yield to provide a basis for field management. 【Method】In this paper, a salinization soil in south Xinjiang was researched and field cotton and sugarbeet growth experiments were carried out in plots under different biochar treatments (0, 10, 50, and 100 t·hm⁻²) and combined with drip irrigation mode under plastic mulching. The improvement extent and influences of biochar application on soil physicochemical properties and crop germination rates were detailed investigated at the biochar application rates. The relationship between germination rates and soil physicochemical properties was further investigated and compared. 【Result】The results showed that the fluctuations of daily air temperature and solar radiation directly affected the fluctuations of soil temperatures in various depths with biochar applications. The increase of biochar application amounts significantly reduced the soil bulk density at the 0-30 cm depths, in which cotton and sugar beet decreased by 0-0.32 and 0.04-0.25 g·cm⁻³, respectively. The application of biochar at 100 t·hm⁻² significantly increased the soil temperature at the 5 cm depth at different growth stages of cotton and sugar beet, but the application of biochar at 10 and 50 t·hm⁻² only significantly increased the soil temperatures of the 5 cm depth at seedling and bolling stages of cotton. During the two experimental years of 2018 and 2019, biochar application have significantly increased the soil organic carbon content of cotton and sugar beet at the seedling and harvesting stages by 0.98-13.2 and 0.66-12.1 g·kg⁻¹ if the differences of planting year and growth periods were not considered, respectively. Also, the increase rate was 1.20-7.43 at the cotton seedling stage and 0.66 to 13.2 g·kg⁻¹ at the harvest stage if the differences of planting year and crops were not considered, respectively, and was proportional to the application rates at the seedling stage. The emergence rate of cotton and sugar beet both increased with the increased soil bulk density, and increased first and then decreased with the increased soil temperature. The optimum temperature range for cotton and sugar beet germination was 22 to 26 °C. The germination rate increased first and then decreased with the increased soil organic carbon contents, indicating that the excess increase of soil organic carbon content caused by high biochar application rates inhibited crop germination. When the application amount of biochar was 10 t·hm⁻², the seedling emergence rates of cotton and sugar beet were greater than 0.7, which was higher than that of the other three biochar application rates. However, when the biochar application rate was greater than 10 t·hm⁻², the emergence rates of cotton and sugar beet were lower than that of the treatment without biochar application. 【Conclusion】Therefore, a biochar application amount of 10 t·hm⁻² is recommended as the optimal amount for cotton and sugar beet field management considering its comprehensive effects on improving soil properties and crop germination rate.

Key words: Biochar; Soil temperature; Drip irrigation under plastic mulch; Cotton; Sugar beet; Germination rate

重金属健康的土壤是保证粮食安全和农业可持续发展的基础。土壤理化性质是反映土壤健康的重要指标^[1]。土壤物理性质影响作物生根深度、土壤通气、入渗、植物水分养分有效性和微生物活性,从而影响生产力。生物炭是生物有机材料在缺氧或绝氧条件下、经过高温热裂解后产生的含碳量极其丰富的黑色有机物^[2]。它含有大量的有机质和作物生长所需的营养元素^[3-4],且具有较多的微孔和较大的比表面积,施用后不仅能增加土壤温度^[5]、提升土壤持水能力,还可促进作物生长。但是,过量施用会对水土环境造成危害,导致产量降低及品质下降^[6]。近年来,兼具滴灌和覆膜种植技术优点的膜

下滴灌技术已被广泛应用于新疆地区,取得了丰硕的经济效益,但应用多年后土壤质量并没有提升^[7-9]。因此,针对农业生产实际和不同作物情况,将生物炭与膜下滴灌有机结合,达到改善农田土壤理化性质的目的,对西北旱区农业可持续发展极为重要。

研究表明,由于生物炭自身的容重显著低于土壤容重,施用后可降低 8%~11%左右的土壤容重^[10-12]。生物炭施用量也是降低土壤容重的主要因素之一。如刘祥宏^[13]、Laird 等^[14]研究发现,与不施生物炭相比,施加生物炭可降低 0~20 cm 层的土壤容重,且生物炭施用量越高容重降低越显著。施用生物炭也影响土壤温度。生物炭呈黑色,添加后使土壤颜色

变深,可削弱地表反射率^[15],降低土壤热导率和热扩散率^[16-19],调节和改善土壤温度^[20],缓解温度胁迫^[17]。据报道,在非洲加纳的木炭生产窑周围,由于散落大量的黑色木炭,使周围土壤颜色变深,导致地表温度升高 4%^[21]。李昌见等^[16]开展了野外种植番茄试验,发现与不施加生物炭相比,生物炭处理可使地表温度增加 31.3%~58.1%,生物炭施用量与土壤温度之间具有显著的正相关关系。Ventura 等^[22]认为,施用生物炭提高表层土壤温度,但对 7.5 cm 深度的土壤温度无显著影响。添加生物炭使土壤容重降低,土壤热导率和热扩散率也随之降低,这是其影响土壤温度的重要原因^[23-25]。然而,前人的研究对生物炭影响土壤温度的研究结论不一致,也没有详尽地分析生物炭施用量如何作物出苗率,更未涉及出苗率与土壤容重、温度和有机碳等土壤理化性质之间的关系。

棉花和甜菜是新疆地区重要的经济作物和糖类作物,目前新疆棉花和甜菜的产量分别为 512.9 万吨和 515.9 万吨,其中棉花产量占全国棉花产量近九成(国家统计局,2018—2021)。农业技术水平对作物产量和经济效益影响巨大,也影响当地的社会经济发展。然而,施用生物炭究竟如何影响新疆棉花和甜菜地土壤理化性质和作物生长,目前没有定论。为揭示不同生物炭施用量对棉花和甜菜根区土壤理化性质及作物出苗率的影响,本文以南疆旱区盐碱地为研究对象,通过设计不同的生物炭施用量开展田间试验,结合观测数据,对生物炭施用量变

化情况下的土壤容重、土壤温度、土壤有机碳、作物出苗率变化规律进行分析,并进一步量化出苗率和土壤理化性质的关系,从而基于生物炭改善土壤理化性质和作物出苗率的效应,提出生物炭最佳施用策略。研究成果可为旱区农田施用生物炭和种植管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州的尉犁县 31 团 2 连(40°53'03"N, 86°56'58"E)开展田间试验。该区属孔雀河和塔里木河的冲积平原,地势平缓,平均海拔高度 990 m。该区昼夜温差和温度的年际变化大,冬寒夏热,干旱少雨,光热资源充足。多年平均气温为 10.9 ℃,日照时数为 2 942 h,年降水量为 34 mm,无霜期为 180~220 d,蒸发量为 2 417 mm,属于典型的北温带大陆性干旱荒漠气候。

1.2 试验方案

于 2018 年和 2019 年开展了田间小区试验。在 2018 年播种前,采集不同深度(0~100 cm)的土壤样品,将其风干,过 2 mm 筛,利用 Malvern 激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)测定土壤的黏粒、粉粒和砂粒含量。根据美国农业部土壤质地分类标准^[26],0~50 和 50~100 cm 的土壤质地分别为粉质壤土和砂土。0~100 cm 土层土壤的初始理化性质、饱和含水率、田间持水量及凋萎系数详见表 1。

表 1 试验区 0~100 cm 土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the soils at the depth range of 0~100 cm in the experimental field

土层	容重					含盐量		有机质	饱和含水量	田间持水量	凋萎系数
Soil layer	Bulk density	黏粒	粉粒	砂粒	土壤质地	Salt	pH	Organic	Saturated	Field capacity	Wilting point
/cm	/ (g·cm ⁻³)	Clay/%	Silt /%	Sand/%	Soil texture	content	(1 : 5)	matter	water content	(cm ³ ·cm ⁻³)	(cm ³ ·cm ⁻³)
						/ (g·kg ⁻¹)		/ (g·kg ⁻¹)	/ (cm ³ ·cm ⁻³)		
0~20	1.54	19.09	55.26	25.65	粉质壤土 Silt loam	1.84	8.9	8.04	0.373	0.274	0.063
20~40	1.55	19.06	54.92	26.02		1.70	8.5	7.30	0.376	0.276	0.054
40~50	1.52	15.51	46.68	37.81		1.66	8.6	6.65	0.373	0.277	0.062
50~60	1.56	1.55	2.43	96.02	砂土 Sand	1.71	8.4	4.86	0.332	0.246	0.043
60~80	1.62	1.38	1.63	96.99		1.33	8.4	3.98	0.341	0.252	0.041
80~100	1.59	1.37	1.42	97.21		1.47	8.3	3.72	0.348	0.256	0.035

自中国郑州永邦新能源装备科技有限公司购置了生物炭。该生物炭是以棕榈果枝为原料，在缺氧条件下经高温（500~600℃）热裂解后产生的富碳有机物。生物炭的电导率为 11.0 mS·cm⁻¹，有机碳含量为 472.2 g·kg⁻¹，pH 为 7.6，比表面积为 116.6 m²·g⁻¹，容重为 0.5 g·cm⁻³，粒径小于 2 mm。

2018 年和 2019 年的田间试验均设置 4 个生物炭水平，两年添加量均为 0、10、50 和 100 t·hm⁻²，处理名依次为 B0、B10、B50 和 B100。播种前通过旋耕机按不同小区将生物炭与表层 0~30 cm 的土

壤混合。B10、B50 和 B100 处理的生物炭与土壤的质量比分别为 0.22%、1.10%和 2.20%。每个处理重复 3 次，每个试验小区面积为 6 m×6 m，采用完全随机区组设计。棉花品种为新陆中 66 号，甜菜品种为德甜 7 号。先后于 2018 年 4 月 16 日和 2019 年 4 月 20 日机器播种，两年收获日期均为 9 月 24 日。参考当地经验，在上一年冬季（11 月左右）进行漫灌，灌水量为 300 mm，对土壤盐分进行淋洗。棉花采用“一膜两管四行”的方式种植，甜菜采用“一膜两管三行”的方式种植。棉花和甜菜的田间试验布置见图 1。

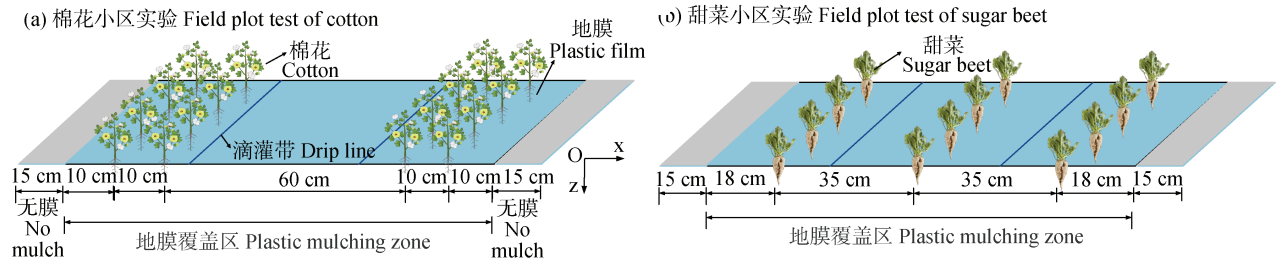


图 1 田间小区试验布置
Fig. 1 Experimental layout of field plot

所有棉花和甜菜试验小区均实行统一的膜下滴灌灌溉和施肥制度，灌水下限为田间持水量的 60%。2018 年及 2019 年生育期内（6—8 月）进行 11 和 10 次膜下滴灌，灌溉总量均为 260 mm。每年施尿

素（N≥46%）450 kg·hm⁻²、磷酸二铵（N≈18%，P₂O₅≥46%）265 kg·hm⁻²以及钾肥（K₂O ≥52%）100 kg·hm⁻²。两年度棉花—甜菜膜下滴灌的灌溉制度见表 2。

表 2 2018—2019 年棉花-甜菜膜下滴灌的灌溉制度

2018 年 Year 2018			2019 年 Year 2019		
日期 Date/（M-DD）	播后天数 Days after sowing/d	灌溉量 Irrigation amount/mm	日期 Date/（M-DD）	播后天数 Days after sowing/d	灌溉量 Irrigation amount/mm
6-14	65	25	6-15	65	22
6-21	72	20	6-23	73	23
6-29	80	25	7-02	82	25
7-07	88	20	7-10	90	30
7-13	94	30	7-18	98	30
7-19	100	30	7-26	106	30
7-26	107	30	8-03	114	30
8-03	115	20	8-11	122	30
8-11	123	20	8-19	129	20
8-19	131	20	8-27	137	30
8-27	139	20	-	-	-
合计 Subtotal		260	合计 Subtotal		260

表 3 棉花和甜菜的生育期

Table 3 Growth periods of cotton and sugar beet

作物	生育期	2018 年	2019 年	作物	生育期	2018 年	2019 年
Crop	Growth period	Year 2018/ (M-DD)	Year 2019/ (M-DD)	Crop	Growth period	Year 2018/ (M-DD)	Year 2019/ (M-DD)
棉花 Cotton	播种 Sowing	4-10	4-11	甜菜 Sugar beet	播种 Sowing	4-10	4-11
	苗期 Seedling	6-14	6-15		苗期 Seedling	6-04	6-06
	蕾期 Bud	6-25	6-26		叶丛繁茂期 Leaf fast growth	6-20	6-22
	花期 Flowering	7-07	7-10		块根糖分增长期 Root sugar increment	7-11	7-13
	铃期 Bolling	8-03	8-11		糖分积累期 Sugar accumulation	8-25	8-27
	吐絮期 Wadding	8-27	8-30				

注：用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析，用最小显著性差异法进行显著性水平 $P < 0.05$ 时的多重比较。Note: SPSS 17.0 was used for one-way ANOVA. The least significant difference method was used for multiple comparisons at a significance level of $P < 0.05$.

于 2018—2019 年的棉花和甜菜生长季,在膜间和覆膜（窄行）的中间位置安装直角地温计（购于中国河北省武强县红星热工公司）。在棉花和甜菜苗期到收获期，每天 8:00、14:00 和 20:00 记录各生物炭施用量下膜下和膜间 5、10、15、20 和 25cm 地温，每个处理重复 3 次。取 3 次重复在 3 个时刻的地温平均值进行分析。此外，在作物不同生育期进行土壤取样，采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定土壤有机碳含量。

表 3 列出了 2018 年和 2019 年棉花和甜菜生育

期开始的日期。

2 结 果

2.1 2018—2019 年气温和辐射变化规律

2018 年和 2019 年作物生育期平均气温分别为 23.5 和 24.1 $^{\circ}\text{C}$ ，降水量分别为 22.1 和 20 mm，平均风速为 1.32 和 0.81 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，平均太阳辐射分别为 227.5 和 265.2 $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ 。图 2 对比了生育期气温和太阳辐射波动规律。

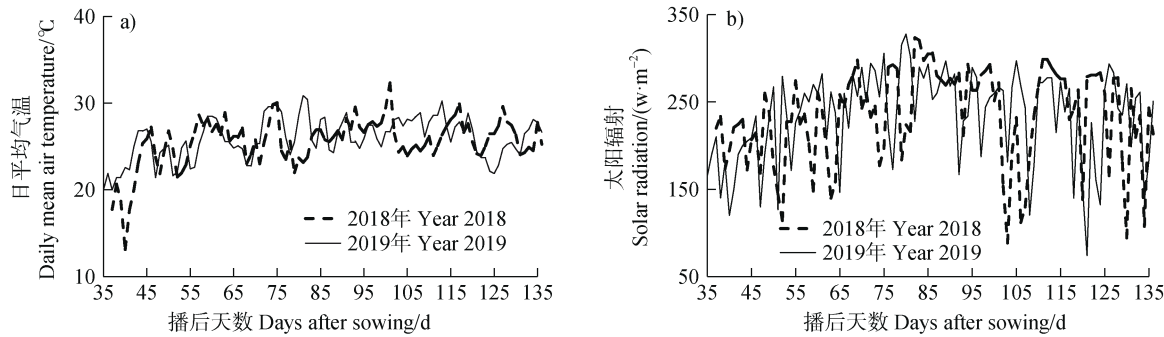


图 2 棉花生育期气温和辐射波动规律

Fig. 2 Air temperature and solar radiation fluctuations during cotton growth periods

2.2 施用生物炭对土壤容重的影响

2018 年和 2019 年期间,0~10、10~20 和 20~30 cm 层的土壤容重变化范围分别为 1.23~1.62、1.22~1.65 及 1.27~1.54 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (图 3)。随生物炭

施用量增加,棉花和甜菜 0~10 cm 和 10~20 cm 深度的土壤容重显著降低,20~30 cm 深度的土壤容重在部分施用量下显著降低;其中棉花 2018 年和 2019 年容重降幅分别为 0~0.26 和 0.01~0.32 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,

甜菜 2018 年和 2019 年容重降幅为 0.08~0.22 和 0.04~0.25 g·cm⁻³。理论上 2019 年土壤容重应低于 2018 年，但由于耕作、灌溉、取样位置和管理等多种因素的影响，田间土壤容重具有一定的空间变异性，因此出现部分深度和施用量下 2019 年容重高于 2018 年的现象。

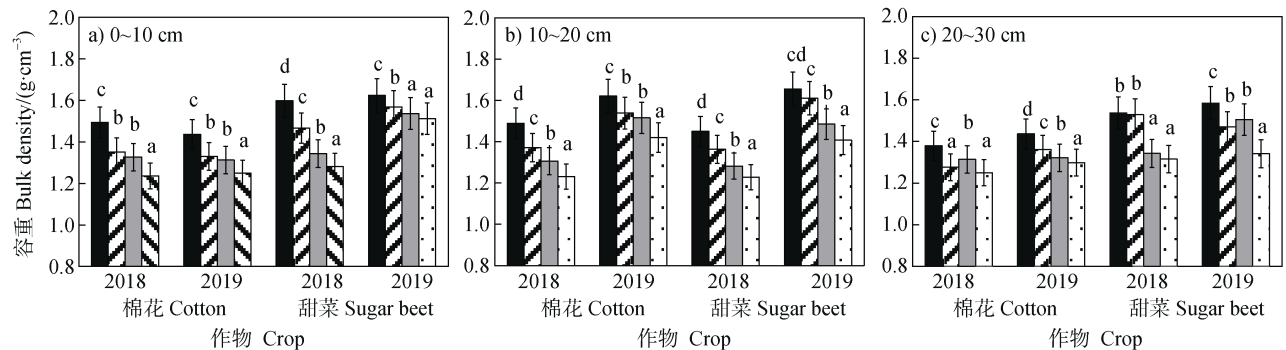


图 3 不同深度土壤容重随生物炭施用量的变化
Fig. 3 Soil bulk density change with biochar application rates at different depths

2.3 覆膜和施用生物炭对地温的影响

2.3.1 棉田地温变化规律 地温变化受土壤性质、地面覆盖材料和覆盖度、植被生长及冠层覆盖、灌水量和灌水时间、作物类型和品种等因素的综合影响。为分析地温在不同深度的变化，表 4 列出了 2018—2019 年棉花覆膜及不覆膜不同深度地温的统计特征值。与 5 cm 相比，10~15 cm 深度下最高、最低和平均地温大多具有显著差异，当深度大于 20 cm 地温的差异大多不显著。在 20 cm 以上的土层范围覆膜并未最高地温提高，但最低地温提高了（15 cm 除外），提高幅度 0.2~1.9℃不等。

表 5 列出了 2019 年不同生物炭施用量下 5 cm 土层地温在棉花生育期的变化规律。

表 5 中，棉花各生育期膜下地温整体高于膜间，

覆膜增温幅度为 0~3.9℃，收获期增温变幅差异较大。与 B0 相比，施用生物炭的三个处理下棉花各生育期地温大多具有显著差异，但三个施用量下棉花各生育期的地温大多差异不显著。B100 较 B0 处理显著提高了棉花和甜菜不同生育期的 5 cm 地温，但 10 及 50 t·hm⁻²施用量只显著提高了棉花蕾期和铃期的 5 cm 地温。

为对比地温随深度和覆膜的变化规律，图 4 绘出了 2018 年和 2019 年 B0 处理的膜间和膜下 5~25 cm 土壤温度在棉花生育期的变化规律。由图可知：（1）5 cm 地温整体更高，波动较其他深度更剧烈。随深度增加，地温呈整体降低趋势。（2）同条件下 2018 年、尤其 25 cm 的地温整体上较 2019 年低。（3）地温在不同条件下的变幅（最高和最低值

表 4 2018—2019 年膜下和膜间地温在不同深度的统计特征

Table 4 Soil temperature statistic under mulching and no mulching at different depths in years 2018—2019												
年份-覆盖	地温统计特征	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	年份-覆盖	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
Year-Mulching	Statistic (℃)						Year-Mulching					
2018 年膜间 No mulching in the year 2018	最高值 Max	32.1cd	29.6c	29.2b	27.4b	26.3a	2019 年膜间	32.3c	29.8b	29.9b	26.1ab	24.5a
	最低值 Min	19.3b	18.8b	19.7a	17.8a	17.0a	No mulching in the year 2019	19.1a	20.5a	22.3b	20.0a	19.5a
	平均值 Mean	24.5c	23.4b	23.8b	21.9a	21.1a		25.6bc	24.4b	24.9b	22.3a	21.5a
2018 年膜下 Under mulching in the year 2018	最高值 Max	30.3c	28.3b	28.0b	26.6a	26.3a	2019 年膜下	32.1c	29.2b	28.3a	26.6a	27.0a
	最低值 Min	20.3bc	18.8b	19.0b	18.0a	17.0a	Under mulching in the year 2019	21.0ab	20.8ab	21.0ab	20.9a	20.5a
	平均值 Mean	24.5c	23.0b	23.1b	22.2a	21.3a		25.8b	24.7ab	23.8a	22.9a	23.2a

注：同行不同字母表示不同深度间差异显著（ $P<0.01$ ）。Note: Different letters in the same line indicate significant differences at different depths ($P<0.01$).

表 5 不同生物炭施用量下 5 cm 土层地温随棉花生育期的变化

Table 5 Soil temperature at 5 cm depth during the cotton growth period for different biochar application rates											
生育期		覆盖	B0	B10	B50	B100	覆盖	B0	B10	B50	B100
Growth period		Mulching					Mulching				
棉花蕾期	Bud stage of cotton	膜间	27.9b	28.4a	28.6a	29.2a	膜下	28.2b	29.0ab	29.8a	30.3a
棉花花期	Flower stage of cotton		25.0ab	26.3a	26.3a	27.2a		26.2bc	26.4bc	27.8b	29.5a
棉花铃期	Bolling stage of cotton	No	24.3b	24.7b	25.3a	26.3a	Under	24.4b	25.2ab	26.5a	26.3a
棉花收获期	Harvesting stage of cotton	mulching	23.6b	23.9a	24.4a	25.3a	mulching	23.8ab	24.6a	25.3a	25.3a

注：表中同行不同字母表示不同生物炭处理间的差异显著。Note: Different letters in the same line indicate significant differences at different biochar treatments ($P<0.01$)。

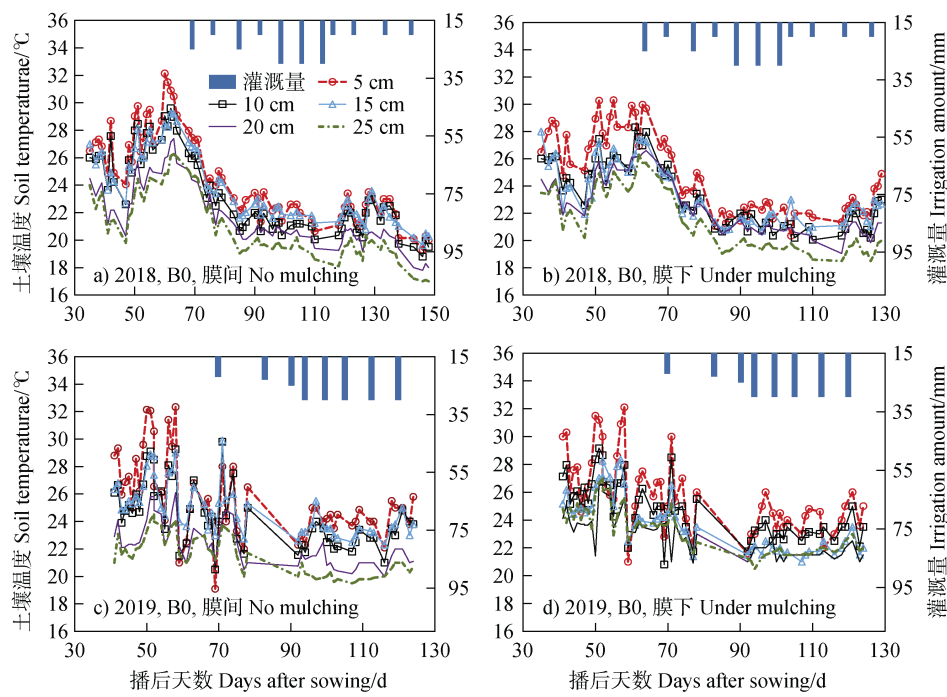


图 4 棉花生育期膜下和膜间 5~25 cm 地温的变化

Fig. 4 Soil temperature of 5 to 25 cm under mulching and no mulching during the cotton growth period

的差)为 17.0~32.3℃,均值为 23.8℃,其两年的具体变化范围有所不同。

图 5 对比了 2018 年和 2019 年棉田不同生物炭施用量对膜下(窄行)和膜间 5 cm 地温变化过程。由图可知:(1)不同生物炭施用量处理下,从棉花苗期到棉花现蕾前期,膜间和膜下窄行不同深度处地温呈增加趋势,在播种后第 65 天左右达到生育期峰值,这可能是由于苗期气温和太阳辐射呈波动式升高(见图 2),同时棉花的叶面积和株高均较低对地温影响不大造成的。(2)B0 处理的地温整体较低;生物炭施用量越大,地温越高。(3)播种第 65 天后气温逐渐上升,但地温逐渐降低,这主要是由于棉

花的叶面积逐渐增加所致。进入棉花花期、铃期和吐絮期时,地温先趋于平稳,随后逐渐下降,这主要是由于棉花郁闭度增加所致。

由于上述结果表明生物炭施用量、深度和覆膜均对地温有不同程度的影响,因此取地温变化最大的 5 cm 深度,在膜下和膜间、B0 处理和施量最大的 B100 处理的棉田地温在生育期变化过程进行对比(图 6)。图 6 表明,除前期地温存在时间上的变异外,棉花整个生育期内覆膜的增温效应非常明显,且当生物炭施用量增加时,覆膜的增温效应被放大,但作物生育后期,尤其接近收获期时,生物炭对膜下地温的增加效应减弱,即使最大生物炭施用量对

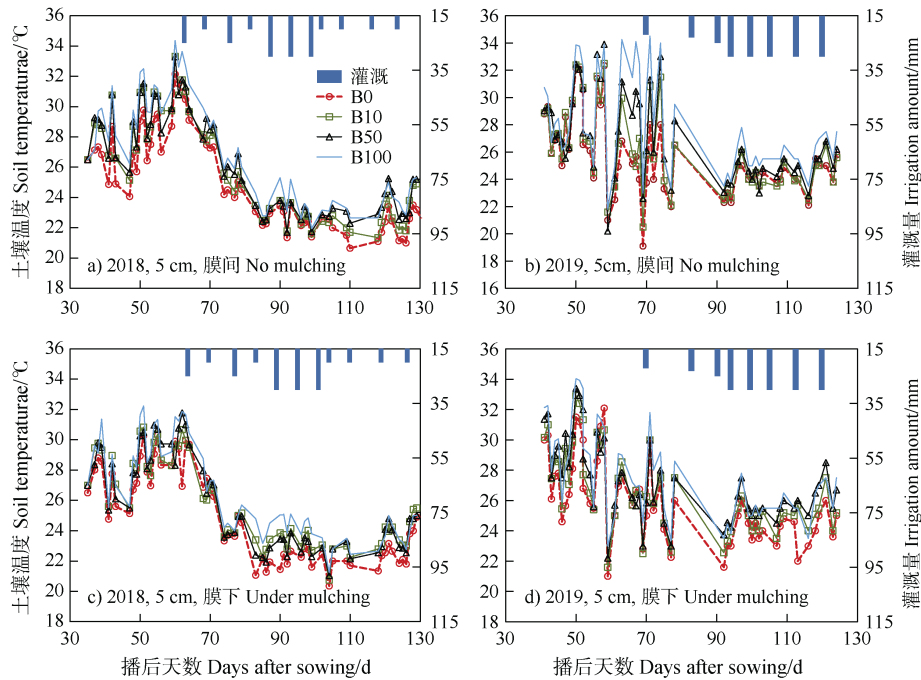


图 5 2018—2019 年不同生物炭施用量下棉田 5cm 深度地温随生育期的变化

Fig. 5 Soil temperature change of 5cm at different biochar application rates during the 2018—2019 cotton growth periods

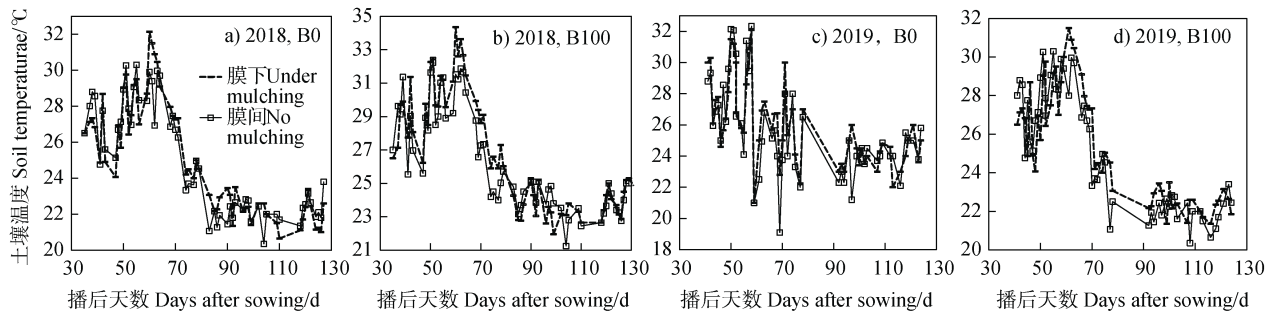


图 6 覆膜和施用生物炭对棉田 5 cm 深度地温的综合效应

Fig. 6 The overlapped effects of plastic mulching and biochar application on 5 cm soil temperature during the cotton growth period

地温也不再具有提升作用。这是因为棉花枝叶繁茂时对地面的遮盖度大，导致地面吸收太阳辐射减少、覆膜和生物炭的增温效应弱化。

2.3.2 甜菜地温变化规律 为对比覆膜和生物炭添加对甜菜地温的影响，选取 2019 年甜菜生育期 5 cm 深度下、不同生物炭施用量处理 (B0、B10、B50 和 B100) 的膜间和膜下地温随播后天数作图 (图 7)。由图 7 可知，与棉花类似，覆膜和施用生物炭对甜菜地温也有提升作用。但由于作物类型和品种不同，且受土壤属性时空变异的影响，甜菜 2018 年和 2019 年不同生物炭施用量下、膜间温度变化范围较膜下更大，分别为 20.8~39.0℃和 21.6~36.4℃。甜菜生育期地温的差异主要在中后

期，此外，生物炭施用量增加也对地温提升起重要作用，尤其 B100 处理的地温无论在膜下还是膜间整体上均处于高值。

表 6 列出了 2019 年生物炭对甜菜生育期 5 cm 地温的影响。甜菜的不同生育期膜下地温不低于膜间地温，膜下增温幅度为 0~3.6℃。施用生物炭对地温的影响在作物生长前期没有后期显著，B100 处理的地温并不总是比 B0 表现出显著差异。此外，与棉花相比，覆膜对甜菜田不同生育期的增温效果更优。这可能与甜菜和棉花植株对地面的覆盖度不同有关。尤其在春季地温较低的作物生长前期，甜菜的叶片遮盖度更高，结合覆膜的影响，增温效应更显著。

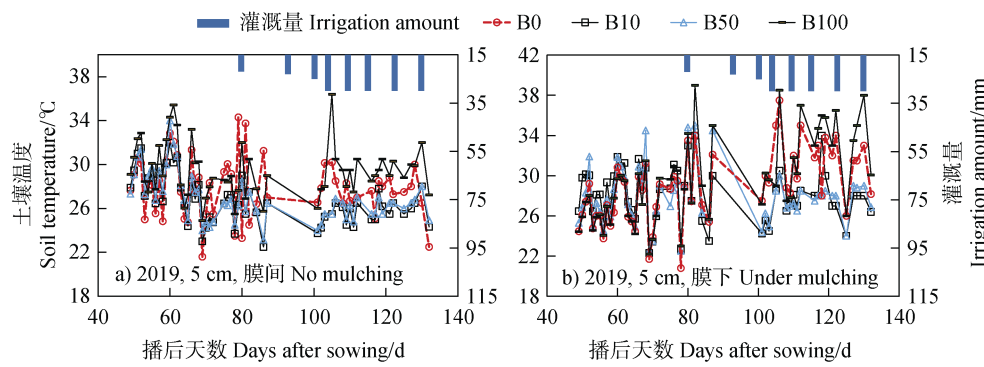


图 7 覆膜和施用生物炭对 5 cm 深度甜菜地温的影响
Fig. 7 Soil temperature at 5 cm depth affected by plastic mulching and biochar applications in the sugar beet field

表 6 不同生物炭施用量下地温随甜菜生育期的变化

Table 6 Soil temperature variations during the sugar beet growth period for different biochar application rates

覆盖 Mulching	生育期 Growth period	B0	B10	B50	B100
膜间 No mulching	苗期 Seedling	26.7 a	28.7b	27.7a	26.7a
	叶丛繁茂期 Leaf fast growth	27.6ab	26.1b	26.2b	28.6a
	块根糖分增长期 Root sugar increment	28.3a	26.0b	26.3b	29.8a
	收获期 Harvesting	27.9b	25.4c	25.6c	29.1a
膜下 Under mulching	苗期 Seedling	28.6b	29.1b	29.4b	30.6a
	叶丛繁茂期 Leaf fast growth	28.0 a	28.4a	28.4a	28.6a
	块根糖分增长期 Root sugar increment	31.5b	27.3c	27.7c	33.3a
	收获期 Harvesting	31.1a	27.7b	27.6b	31.8a

注：表中的同行不同字母表示不同生物炭处理间差异显著 ($P<0.01$)。Note: Different letters in the same line indicate significant differences at different biochar treatments ($P<0.01$) .

2.4 施用生物炭对土壤有机碳的影响

图 8 展示了施用生物炭对作物苗期和收获期土壤有机碳含量的影响。图 8 表明，有机碳含量的增加幅度大致上与生物炭施用量一致。施用生物炭在棉花苗期和收获期均使土壤有机碳含量增加，其中 2018—2019 年棉花和甜菜（不区分年份和生育期）的土壤有机碳增幅分别为 $0.98\sim13.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.66\sim12.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；苗期和收获期（不区分年份和作物）增幅分别为 $1.20\sim7.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.66\sim13.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中苗期增幅较均匀，且与不施用相比，生物炭施用量为 10、50 和 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，土壤有机碳均显著增加。收获期土壤有机碳含量在 50 和 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量下显著增加，2018 年棉花和 2019 年甜菜有机碳在 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量下增加不显著。收获期土壤有机碳含量变化大，是因为棉花的生理生态生长及形

成产量的过程要消耗有机碳。

2.5 施用生物炭对作物出苗率的影响

2.5.1 生物炭施用量对作物出苗率的影响 随生物炭施用量变化，2018 年棉花和甜菜的出苗率在 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量下达到最高值，B0 处理的作物出苗率居第二，其次为 50 和 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ （图 9）。与 B0 相比，不同施用量下 2018 年棉花和 2019 年甜菜的出苗率具有显著差异，但 2018 年甜菜和 2019 年棉花在施用量为 50 和 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时差异不显著。两年期间出苗率大致依生物炭施用量 10、0、50 及 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的顺序递减。施用量高值下（50 及 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）作物出苗率均较 B0 低，表明适宜作物生长的生物炭施用量不宜高于 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.5.2 作物出苗率与土壤理化性质的关系 为分析作物出苗率随容重变化规律，将 2018 年和 2019

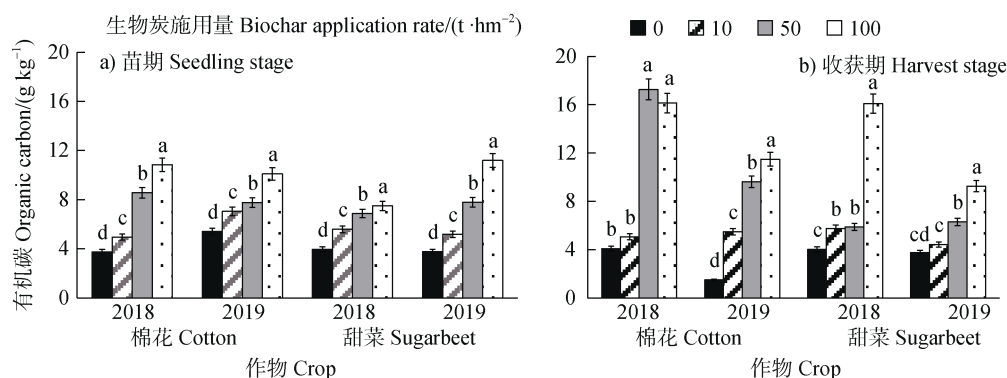


图 8 生物炭施用量对棉花和甜菜苗期和收获期土壤有机碳含量的影响

Fig. 8 Effects of biochar application rate on soil organic carbon content at cotton/sugar beet seedling/harvest stages

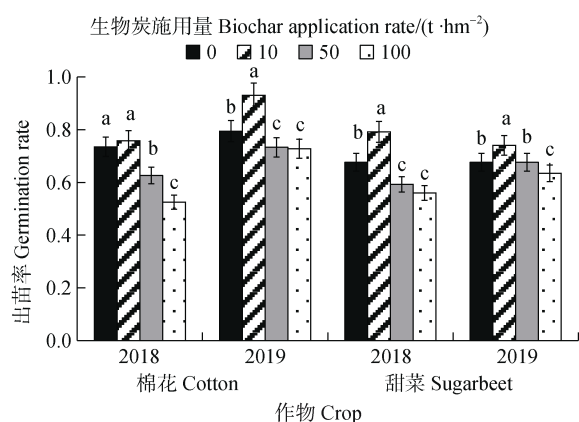


图 9 2018—2019 年棉花和甜菜出苗率的变化规律

Fig. 9 Germination rate variations of cotton and sugar beet during the year 2018–2019

年棉花和甜菜的出苗率随不同深度的容重、不同生育期的地温及土壤有机碳含量的变化及其回归方程作图 (图 10), 当 $p < 0.05$ 时回归关系显著。

图 10 表明: (1) 棉花和甜菜的出苗率基本随土壤容重增加而平缓增加 (图 10a 和图 10 b, 不同点据代表不同深度)。(2) 对比 2018 年和 2019 年度棉花出苗率随覆膜和膜下土壤温度 (不同生育期平均值) 变化规律可知 (图 10c 和图 10 d), 土壤温度高于 26°C 时, 棉花出苗率明显下降 ($0.5 \sim 0.7$); 而土壤温度在 $22^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 时, 棉花出苗率基本高于 0.7 。覆膜时出苗率随土壤温度的变化较不覆膜的更平稳、波动小。(3) 2018 年和 2019 年作物出苗率随苗期和收获期土壤有机碳含量的变化关系表明 (图 10e 和图 10f), 当土壤有机碳含量小于 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 (对应生物炭施用量 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 棉花和甜菜的出苗率均高于 0.7 ; 而土壤有机碳含量增加、即生物炭施用量

增加时, 棉花出苗率随之下降。该结果与图 10a、图 10b 一致, 均表明生物炭施用量不宜过高, 否则可能降低作物出苗率, 影响经济效益。(4) 出苗率与特定土壤属性的关系可分别用二次函数和线性关系表达。其中仅棉花出苗率与容重和不覆膜地温、甜菜出苗率和收获期土壤有机碳的回归关系显著, 决定系数 R^2 分别为 0.431 、 0.463 和 0.58 , 其他情况下回归关系均不显著。

3 讨论

3.1 生物炭对土壤理化性质的影响

生物炭作为一种有效的土壤改良剂, 可显著降低土壤容重并增加孔隙度^[27]。土壤性质的改善归因于: (1) 生物炭含有较高的有机质含量, 可稀释土壤矿物组分^[5]; (2) 生物炭含有大量的纳米孔和微孔, 密度低, 可稀释土壤体积, 降低土壤容重^[28], 可提高团聚体稳定性, 增加总孔隙体积^[11]。本研究发现, 与对照相比, 生物炭显著降低了 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层的容重。因此, 施用生物炭是改善土壤容重的有效措施。

以往研究表明, 由于生物炭为黑色颗粒物质, 添加到土壤中后可使土壤颜色变深, 降低土壤反射率, 提高日平均土壤温度和土壤积温^[18], 提升土壤的热量储存^[20]。本研究表明, 与不施加生物炭处理相比, 棉花和甜菜田施用生物炭可显著提高 $5 \sim 25 \text{ cm}$ 土层的温度。本研究部分情况下膜间地温高于膜下位置 (表 4), 这可能是田间土壤属性空间变异性所致。

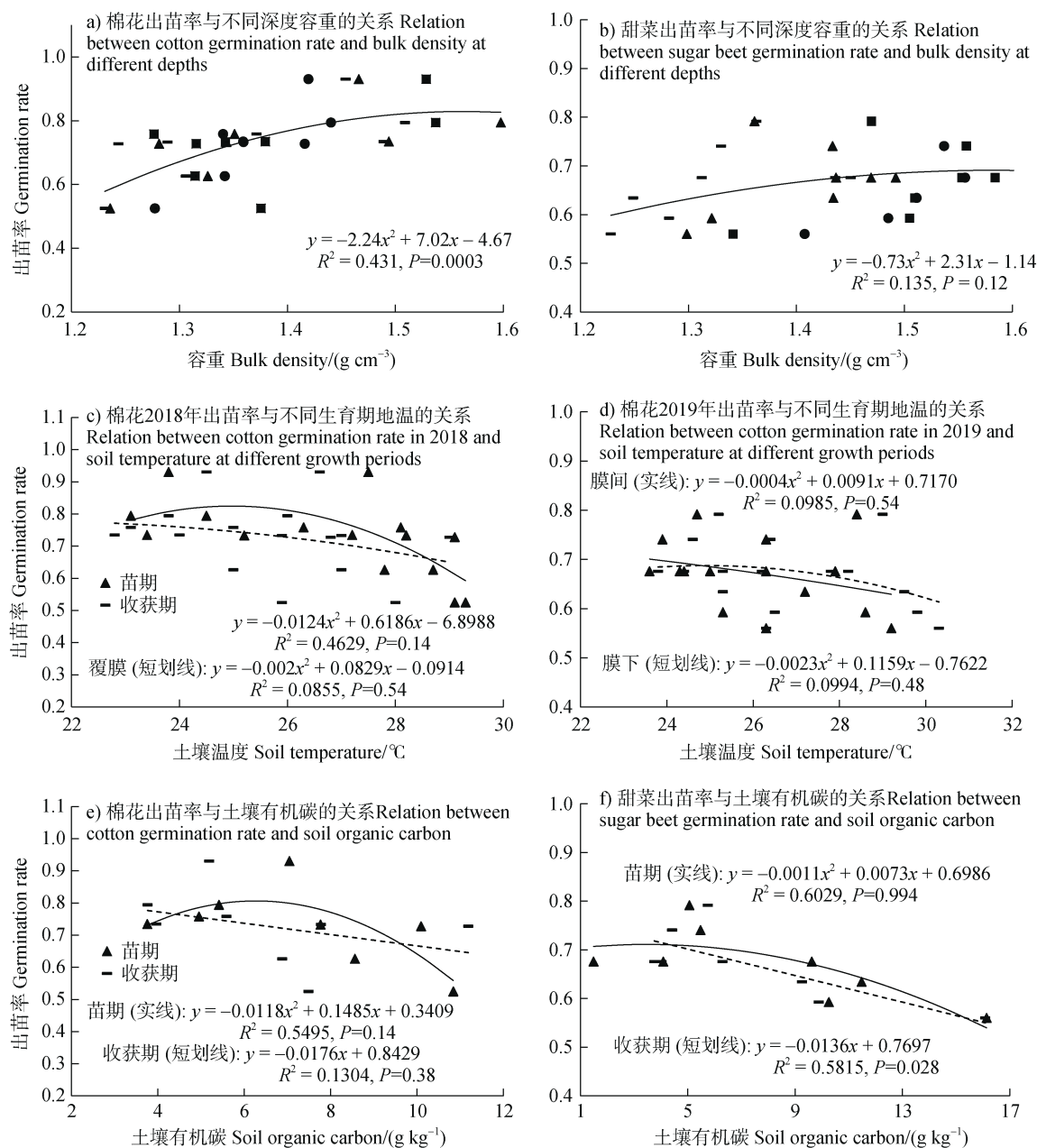


图 10 棉花和甜菜出苗率随土壤容重、土壤温度和土壤有机碳变化规律

Fig. 10 Variations of germination rates of cotton and sugar beet with soil bulk density, soil temperature and soil organic carbon

由于作物类型不同,即使在相同的灌溉、施肥、生物炭施用情况下,由于根系和冠层的不同反馈作用^[29],棉花和甜菜的地温也有一定的差异,作物的生长发育和水分养分的吸收对地温也起到一定的反馈作用。本研究中,与棉田相比,甜菜田间0~5、5~10、10~15、15~20和20~25 cm层的温度显著较高。这是因为与棉花相比,甜菜株高较低,甜菜的叶面覆盖仅仅在覆膜区,膜间郁闭度低。此外,田间土壤的颗粒含量、水分等有一定差异,地温的

观测在小区的位置是固定的,无法兼顾空间变异性的影响,因此观测到一部分甜菜地温高于棉花地温。

3.2 生物炭对作物出苗率的影响

作物出苗率受多种环境因素的影响,包括土壤调理剂、播期地温、作物品种、种植模式等。以往研究表明,生物炭施用量过高,在影响地温、容重和有机碳的同时,也对棉花和甜菜的出苗率有影响。生物炭施用量增加时,有机碳含量也相应增加,但并不利于作物出苗。在生物炭施用量为0~5.4%(质

量分数) 时影响碱性砂质土壤中种植的小麦出苗及幼苗生长^[30], 每盆施用 1~4 g 生物炭情况下白桦种子出苗率与幼苗生长^[31]均呈现出不同程度的抑制作用。碱性土中施用生物炭提高了土壤电导率, 从而抑制小麦出苗和幼苗生长。研究表明, 施用生物炭改变了地温、容重和有机碳含量, 影响了棉花和甜菜的出苗率。甜菜和棉花出苗率存在差异, 不仅和田间实际存在的地温、容重和有机碳含量的空间变异性有关, 也和作物类型和品种有关。此外, 当生物炭施用量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 棉花和甜菜的出苗率不低于 0.7, 出苗效果最优。因此, 推荐最适宜生物炭施用量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

4 结 论

气温和辐射的波动直接影响生物炭施用后的地温波动。生物炭施用量增加, 两年度棉花和甜菜田 0~30 cm 层的土壤容重显著降低, 有机碳含量依次增加。施用生物炭提高了棉花生育期 5~25 cm 层的温度, 且地温随着生物炭施用量的增加而增加, 导致 0~5 cm 层土壤温度的差异较深层更显著。棉花和甜菜的出苗率随土壤容重增加而增加, 随地温增加基本呈先增加后降低的趋势, 最适宜作物出苗的温度范围为 $22^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 。生物炭施用量增加导致的土壤有机碳含量增加抑制了作物出苗。生物炭施用量大于 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 棉花和甜菜的出苗率均低于不施用生物炭的处理。而在四个处理中, 生物炭施用量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时棉花和甜菜的出苗率最高、且不低于 0.7, 因此推荐 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为农田最佳的生物炭施用量。

参考文献 (References)

- [1] Liang J P. Effects of biochar application on soil properties and growth of cotton and sugar beet under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang of China[D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A & F University, 2021. [梁嘉平. 施用生物炭对南疆膜下滴灌土壤性质及棉花和甜菜生长的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]
- [2] Qi F J, Dong Z M, Lamb D, et al. Effects of acidic and neutral biochars on properties and cadmium retention of soils[J]. Chemosphere, 2017, 180: 564—573.
- [3] Liang J P, Li Y, Si B C, et al. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils[J]. Science of the Total Environment, 2021, 771: 144802.
- [4] Wang X F, Mei X L, Huang D P, et al. Effects of probiotics with biochar as carrier inhibiting tomato soil-borne bacterial wilt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 536—544. [王孝芳, 梅新兰, 黄大鹏, 等. 生物炭载体联合有益菌防控番茄土传青枯病的效果研究[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 536—544.]
- [5] Verheijen F G A, Zhuravel A, Silva F C, et al. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment[J]. Geoderma, 2019, 347: 194—202.
- [6] Yan Q Y, Dong F, Li J H, et al. Effects of maize straw-derived biochar application on soil temperature, water conditions and growth of winter wheat[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70 (6): 1280—1289.
- [7] Li M, Li Y, Cao W, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (10): 1210—1218. [李敏, 李毅, 曹伟, 等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析[J]. 水利学报, 2009, 40 (10): 1210—1218.]
- [8] Li M S, Liu H G, Zheng X R. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (22): 82—87. [李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (22): 82—87.]
- [9] Li Y, Wang W Y, Wang Q J, et al. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17 (1): 1—4. [李毅, 王文焰, 王全九, 等. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (1): 1—4.]
- [10] 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. [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.]
- [11] Omondi M O, Xia X, Nahayo A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data[J]. Geoderma, 2016, 274: 28—34.
- [12] Razzaghi F, Obour P B, Arthur E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis[J]. Geoderma, 2020, 361: 114055.
- [13] Liu X H. Effects of biochar application on soil improvement on the loess plateau[D]. Beijing: Research

- Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2013. [刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.]
- [14] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158 (3/4): 443—449.
- [15] Genesio L, Miglietta F, Lugato E, et al. Surface albedo following biochar application in durum wheat[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7 (1): 014025.
- [16] Li C J, Qu Z Y, Gou M M, et al. The research of BioChar's effect on soil humidity, fertility and temperature[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (7): 1141—1147. [李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 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.]
- [17] Lahori A H, Guo Z Y, Zhang Z Q, et al. Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: Prospects and challenges[J]. *Pedosphere*, 2017, 27 (6): 991—1014.
- [18] Xiu L Q, Zhang W M, Wu D, et al. Heat storage capacity and temporal-spatial response in the soil temperature of albic soil amended with maize-derived biochar for 2 years[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104762.
- [19] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (5): 1478—1487.
- [20] Zhao J K, Li J Z, Du Z L, et al. Effects of biochar application on soil physical properties: A review[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32 (3): 95—101. [赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32 (3): 95—101.]
- [21] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171 (4): 591—596.
- [22] Ventura F, Salvatorelli F, Piana S, et al. The effects of biochar on the physical properties of bare soil[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, 103 (1): 5—11.
- [23] Zhang Y Y, Hu X Y, Zhang D, et al. Effects of biochar on soil surface albedo, temperature and moisture in agricultural soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28 (8): 1234—1239. [张阳阳, 胡学玉, 张迪, 等. 生物炭对农田地表反照率及土壤温度与湿度的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28 (8): 1234—1239.]
- [24] Zhao J K, Ren T S, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80 (5): 1157—1166.
- [25] Sakhiya A K, Anand A, Kaushal P. Production, activation, and applications of biochar in recent times[J]. *Biochar*, 2020, 2 (3): 253—285.
- [26] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy, ninth ed [M]. NRCS, USDA, 2006.
- [27] Hardie M, Clothier B, Bound S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. *Plant and Soil*, 2014, 376 (1/2): 347—361.
- [28] Blanco-Canqui H. Biochar and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (4): 687—711.
- [29] Pan Y, Zhang Y, Wang Y, et al. Effects of typical components of root exudates on the stability and transport of biochar colloids [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023: 60 (3): 824—834. [潘岳, 张雨, 王洋, 等. 根系分泌物典型组分对生物炭胶体稳定性和迁移能力的影响 [J]. *土壤学报*, 2023: 60 (3): 824—834.]
- [30] Wu X H, Su B L, Qi L, et al. Effects of biochar on seed germination and seedling growth of *Betula platyphylla*[J]. *Forest Resources Management*, 2020 (6): 128—134. [吴星慧, 苏宝玲, 齐麟, 等. 生物炭对白桦种子出苗率与幼苗生长的影响[J]. *林业资源管理*, 2020 (6): 128—134.]
- [31] Dai H C, Chen Y Q, Wang D, et al. Effect of biochar amendment on wheat emergence and seedling growth in alkaline soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23 (4): 1—7. [代红翠, 陈源泉, 王东, 等. 生物炭对碱性砂质土壤小麦出苗及幼苗生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23 (4): 1—7.]

(责任编辑: 檀满枝)