

生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响

勾芒芒¹ 屈忠义^{2,3}

(1. 内蒙古机电职业技术学院水利与土木建筑工程系, 呼和浩特 010070;

2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

3. 内蒙古农业大学寒旱区灌溉排水研究所, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响, 设置5个生物炭水平: 0 t/hm² (B1)、10 t/hm² (B2)、20 t/hm² (B3)、40 t/hm² (B4)、60 t/hm² (B5), 2个化肥水平: 中肥 (F1) 和低肥 (F2), 进行大田试验。结果表明: 0~20 cm 土层土壤含水率均随生物炭施用量增加呈增大趋势; 番茄生长阶段, 0~20 cm 高炭处理增幅显著, 其中 B4F1 处理增幅达 40%; 20~40 cm 土壤含水率与 0~20 cm 变化规律恰好相反, 与对照相比, 施炭处理土壤含水率均呈下降趋势, 其中 B4F1 和 B4F2 含水率最低, 为对照的 70%。施加生物炭后土壤含水率变化幅度 (K_a) 和变异程度 (C_v) 减弱, 同一深度土壤随着施炭量增加 K_a 和 C_v 均减小。与对照相比, 较高施炭处理 (B4F1、B4F2、B5F1、B5F2) 变异系数 C_v 相对较小。随着番茄生长, 土壤含水率在垂直剖面影响表现为较高施炭量 (B4F1、B4F2、B5F1、B5F2) 能有效保持耕作层有效水分, 与对照相比差异显著。随着施炭量增加, 番茄产量增幅呈现先升高、后降低的趋势, 且均高于对照。B4F1、B4F2、B5F1、B5F2 分别增加 46.34%、58.61%、49.63% 和 39.18%, 其中 B4F2 产量最高。同一施炭处理、不同施肥处理间差异不显著。研究成果可为内蒙古半干旱地区农业生产提供依据。

关键词: 番茄; 生物炭; 化肥; 土壤含水率; 产量; 内蒙古半干旱地区

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0283-06

Coupling Effect of Biochar and Fertilizer on Soil Water Content and Tomato Yield

GOU Mangmang¹ QU Zhongyi^{2,3}

(1. Water Conservancy and Civil Engineering Department, Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Huhhot 010070, China

2. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

3. Institute of Irrigation and Drainage in Cold and Arid Regions, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: To explore the effects of biochar and fertilizer interaction on tomato soil moisture content and yield, five biochar levels were set at 0 t/hm² (B1), 10 t/hm² (B2), 20 t/hm² (B3), 40 t/hm² (B4) and 60 t/hm² (B5); two fertilization levels were set at mid-fertilizer (F1) and low-fertilizer (F2). The results showed that with the increase of biochar application, the soil water content of the high-biochars were increased. Among them, B4F1 was the most significant and was increased by 40%. However, the soil water content in 20~40 cm was opposite to that of 0~20 cm. Compared with the control, it showed a downward trend. Among them, B4F1 and B4F2 had the smallest soil water content, which was only 70% of the control. The overall changing trend of soil water content in 40~80 cm was consistent with that in 20~40 cm. After the application of biochar, the changing range (K_a) and variation degree (C_v) of soil water content were decreased. For the same depth of soil, with the increase of application rate, the biochar K_a and C_v appeared decreasing trend. Compared with the control, the C_v under high application of charcoal (B4F1, B4F2, B5F1 and B5F2) was relatively small. With the growth of tomatoes, the effect of soil water content on the vertical profile showed that compared with the control the higher application of biochar (B4F1, B4F2, B5F1 and B5F2) effectively maintained the effective water. With

收稿日期: 2018-03-23 修回日期: 2018-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779117、41161038)和内蒙古自然科学基金项目(2018LH03026)

作者简介: 勾芒芒(1980—),女,讲师,博士,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: gougoumang@163.com

通信作者: 屈忠义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事节水理论与农田水土环境效应研究,E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

the increase of biochar application, the increase in tomato yields was firstly increased and then decreased, and both were higher than that of control. The yield of B4F1, B4F2, B5F1 and B5F2 were increased by 46.34%, 58.61%, 49.63% and 39.18%, respectively. Among them, the yield of B4F2 treatment was the highest. There was no significant difference in different fertilization treatments. The research results can provide a basis for agricultural production in semi-arid regions of Inner Mongolia.

Key words: tomato; biochar; fertilizer; soil water content; yield; semi-arid region of Inner Mongolia

0 引言

番茄是内蒙古自治区中西部地区的重要蔬菜之一,番茄产业在农民增收和种植结构调整等方面举足轻重。长期以来,当地干旱少雨,降水时空分配不均,农业增收主要依靠大量化肥施入,而化肥利用率低也导致大量养分流失、土壤越来越贫瘠,特别是肥料中的氮、磷等化学养分流失到河流中,造成严重面源污染^[1]。

生物炭是面向未来、低成本、可再生的生物质资源,被誉为“黑色黄金”^[2]。生物炭是指农林废弃物在低氧或缺氧条件下高温裂解而形成富含碳的稳定物质。其组成主要包括碳、氢、氧等元素,剩下是灰分。生物炭性质稳定,比表面积大,孔隙结构丰富,表面高电荷密度和负电荷可以较多地吸附土壤阳离子,增加阳离子交换量。田丹等^[3]、勾芒芒等^[4]通过室内土柱实验发现,添加生物炭可以改善土壤理化性质,提高土壤保水持水能力,施加生物炭改善不同质地土壤结构差异显著。大量研究表明,添加生物炭可减轻土壤氮素淋洗,提高土壤含水率和养分利用率^[5-8]。同时,研究者发现,单纯以生物炭代替化肥还存在一定难度,为了既发挥其自身优势又能减少肥料投入带来的负面影响,以达到作物增产增收目的,沈阳农业大学生物炭研究中心以生物炭为基质制造炭基缓释肥料施入土壤中,作物增产效果明显^[9]。

近年来,国内外多家知名番茄加工企业进驻内蒙古,为当地农产品产业化发展注入生机。然而,如何缓解番茄需水与降水时空分布不均造成的番茄生长期需水矛盾是解决当前番茄种植技术问题关键所在。本文旨在探明生物炭与化肥互作对番茄土壤含水率与产量的影响,为内蒙古半干旱地区农业生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013年5月中旬—2014年10月上旬在内蒙古呼和浩特市和林县樊家夭乡家堡营村附近的内蒙古水利科技试验示范(和林)基地进行。该地属于中温带半干旱大陆性季风气候,风大气候干燥,

降水时空分布不均,多年平均降雨量为417.5 mm,主要集中在7—8月,占全年降雨量的70%。昼夜温差大,多年平均气温为5.6℃,平均日照数为2941.8 h,多年平均蒸发量为1850 mm,是降雨量的4.3倍,多年平均风速2.2 m/s,土壤最大冻结深度为1.75 m。

1.2 供试材料

试验区土壤为砂壤土,经测定土壤基本性质为:砂粒质量分数64.15%、粉粒质量分数16.49%、粘粒质量分数19.36%。土壤容重 1.39 g/cm^3 ,孔隙度43.52%,田间持水率(体积分数)31%,pH值7.85,电导率 $141.8 \mu\text{S/cm}$ 。有机质质量比6.66 g/kg,碱解氮质量比48.07 mg/kg,速效磷质量比为12.06 mg/kg,速效钾质量比146.98 mg/kg。

试验生物炭选用辽宁金和福农业开发有限公司的生物炭成品。生物炭主要性质:碳质量分数为47.17%、氮质量分数为0.71%、氢质量分数为3.83%、碳氮比67.03%,pH值9.04,有机质质量比925.74 g/kg,碱解氮质量比159.15 mg/kg,速效磷质量比394.18 mg/kg,速效钾质量比783.98 mg/kg。

试验用化肥为尿素(N质量分数为46%),磷酸二胺(P_2O_5 质量分数为46%),氯化钾(KCl质量分数50%)。供试作物为番茄,品种为上海合作918。

1.3 试验设计

采用大田试验,随机区组试验设计。试验小区面积为 15 m^2 (长5 m×宽3 m)。将生物炭均匀施于土壤表面,用旋耕机翻混入耕层土壤。化肥以底肥形式一次性施入。番茄种植密度为4.5万株/ hm^2 ,灌溉定额为 $1575 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (苗期—开花着果期 $675 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,开花着果期—结果盛期 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,结果盛期—后期 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)。

试验设计为2个因素:生物炭和化肥。其中生物炭设计5个水平,分别为:生物炭B1($0 \text{ t}/\text{hm}^2$)、生物炭B2($10 \text{ t}/\text{hm}^2$)、生物炭B3($20 \text{ t}/\text{hm}^2$)、生物炭B4($40 \text{ t}/\text{hm}^2$)、生物炭B5($60 \text{ t}/\text{hm}^2$)。化肥设计2个水平,分别为化肥1水平F1:尿素 $408 \text{ kg}/\text{hm}^2$,磷酸二胺 $163 \text{ kg}/\text{hm}^2$,氯化钾 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$;化肥2水平F2:在化肥1各水平基础上减25%。试验设计为10个处理,每个处理3个重复,共计30个小区。具体情况见表1。

表 1 大田试验方案设计代码

Tab.1 Program design in field experiment

	生物炭 1	生物炭 2	生物炭 3	生物炭 4	生物炭 5
化肥 1	B1F1 (对照)	B2F1	B3F1	B4F1	B5F1
化肥 2	B1F2	B2F2	B3F2	B4F2	B5F2

1.4 测定内容及方法

土壤含水率测定。采用铝盒干燥称量法,在番茄各生育阶段灌水后,在各小区每隔 20 cm 土层用土钻取土,测至 80 cm。每层土样混合均匀,取适量装入铝盒称取湿质量,带回实验室放入干燥箱在 105℃ 条件下干燥 8 h,称取干质量,计算出土壤质量含水率。

番茄产量测定。从 8 月 15 日开始采摘,至 10 月 1 日结束,平均每 4~5 d 进行 1 次,共取 11 次。每个小区取 3 个重复,每个重复标记 12 株,每次收获时将各计产小区分别称量,计算产量。

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 进行数据计算和作图;使用 SAS 9.0 进行单因素方差分析,采用 LSD 方法进行显著性检验 ($P < 0.05$),采用 Surfer 8.0 制图软件绘制等值线图。

2 结果与分析

2.1 时间分布

图 1 为土层 0~20 cm 土壤含水率变化情况。结果表明,土壤含水率总体表现为随着生物炭施用量增加而增大。与对照相比,各处理差异显著 ($P < 0.05$)。整个生育阶段内土壤含水率表现为先增加后减少趋势。在苗期—开花着果期,与对照相比,B3F2、B4F1、B4F2、B5F1、B5F2 土壤含水率分别增加了 13.7%、40.5%、38.5%、19.3% 和 17.8%,其中 B4F1 增幅最大,增幅超过 40%。随着作物生长,生育后期这种增幅趋势大体一致,其中 B4F1 增幅超过 20%。

图 2 是土层 20~40 cm 土壤含水率变化。整体

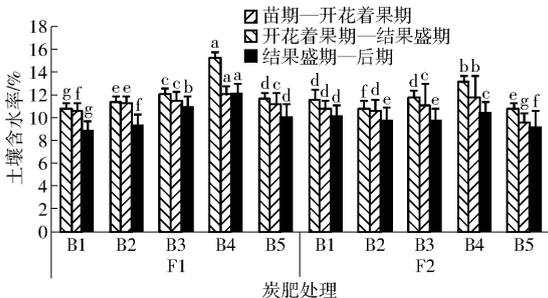


图 1 全生育期内土壤 0~20 cm 土壤含水率变化

Fig.1 Variation of soil water content in 0~20 cm within whole growth period

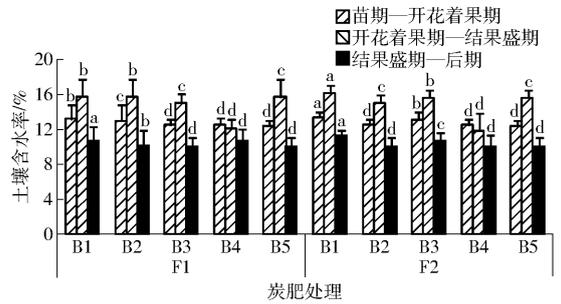


图 2 全生育期内土壤 20~40 cm 土壤含水率变化

Fig.2 Variation of soil water content in 20~40 cm within whole growth period

表现为随着番茄生长土壤含水率呈现先增加后减少趋势,低炭与高炭处理间差异显著 ($P < 0.05$)。在开花着果—结果盛期,与 B1F1 (对照) 相比,施炭处理土壤含水率均呈下降趋势,其中 B4F1 和 B4F2 含水率最小,仅为 B1F1 的 70% 左右。分析可知,砂壤土中施加生物炭可有效降低土壤深层渗漏,有效提高土壤耕层持水蓄水能力,改善作物水土环境。土层 40~60 cm、60~80 cm 土壤含水率整体变化趋势与其一致,即生物炭处理的土壤含水率均小于对照。

2.2 土壤剖面土壤含水率变化

数理统计学中常用极值比 K_a 和变异系数 C_v 进行表征数值的变化程度,计算式为

$$K_a = X_{max} / X_{min} \quad (1)$$

$$C_v = \sigma / \bar{x} \quad (2)$$

式中 X_{max} ——土壤含水率最大值

X_{min} ——土壤含水率最小值

K_a ——土壤含水率的变化幅度

C_v ——变异系数 σ ——均方差

\bar{x} ——算术平均值

在土壤垂直剖面上,耕层土壤受外界环境影响较大,随着土壤深度增加土壤受外界影响逐步减小。由于试验方案中生物炭和化肥混施在土壤耕层,与对照相比能够较好保持耕层土壤水分,防止水分渗漏,及时供给作物生长所需水分。从表 2 分析可知,随着土层深度增加,同一处理 K_a 和 C_v 总体上呈现减小趋势,B1F1 (对照) 的 K_a 值为 1.645, B4F1、B4F2、B5F1 和 B5F2 的 K_a 值均在 1.2 左右。这表明,施加生物炭后土壤含水率变化幅度和变异程度减弱。对于同一深度土壤而言,随着施炭量增加, K_a 和 C_v 减小。与 B1F1 相比,较高施炭处理 (B4F1、B4F2、B5F1、B5F2) 的土壤剖面土壤含水率变异系数 C_v 相对较小,表明生物炭具有稳定保水能力。

2.3 空间分布特征

土壤剖面含水率时空变化趋势通过土壤含水率等值线图来表征。等值线疏密程度和曲面图平缓曲

表2 开花结果期—结果盛期土壤剖面含水率变化的统计学分析结果

Tab.2 Statistical analysis result of soil moisture variation

处理		土层深度/cm			
		20	40	60	80
B1F1	K_a	1.645	1.533	1.347	1.340
	C_v	2.044	2.160	1.889	1.835
B1F2	K_a	1.570	1.532	1.494	1.492
	C_v	1.904	2.269	2.214	2.354
B2F1	K_a	1.456	1.531	1.354	1.340
	C_v	1.912	1.937	1.680	1.610
B2F2	K_a	1.487	1.532	1.338	1.345
	C_v	1.444	1.866	1.267	1.499
B3F1	K_a	1.487	1.532	1.338	1.340
	C_v	1.985	1.827	1.434	1.549
B3F2	K_a	1.674	1.530	1.354	1.504
	C_v	2.558	2.068	1.570	2.190
B4F1	K_a	1.375	1.393	1.247	1.250
	C_v	1.820	1.387	0.919	0.829
B4F2	K_a	1.250	1.266	1.134	1.136
	C_v	1.279	0.981	0.596	0.542
B5F1	K_a	1.218	1.232	1.230	1.190
	C_v	1.230	1.098	1.257	0.926
B5F2	K_a	1.287	1.231	1.238	1.209
	C_v	1.748	1.988	1.396	1.190

折反映了不同处理间土壤含水率时空变化。在番茄生育期 100 d 内, 0 ~ 80 cm 土层土壤水分空间分布规律较为明显。尤其在开花结果期—结果盛期, 施炭处理的土壤含水率与对照相比, 差异显著, 能有效保持作物耕层土壤水分。水分动态变化过程可以从图 3 清晰可见, B1F1 (对照) 在耕层土壤 0 ~ 20 cm 土壤含水率较低, 且等值线较密, 反映了其土壤含水率梯度较大, 在空间上变化剧烈, 水分垂直运移, 土壤含水率增大。随着作物生长, 水分需求增大, 然而从图 3 可见, 耕层土壤水分严重不足, 这也说明, 砂壤土水分渗漏比较严重, 耕层持水能力差, 番茄耕层供水能力不足。B1F2 处理土壤含水率分布特征与 B1F1 大体一致。

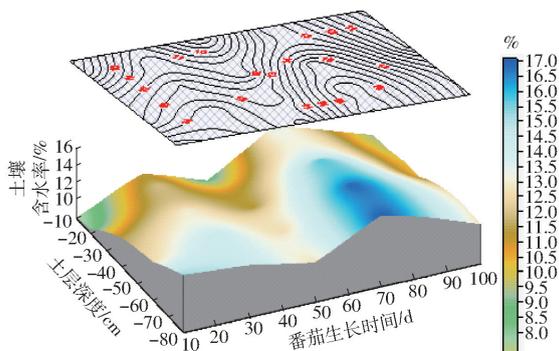


图3 B1F1处理的土壤含水率等值线图

Fig.3 Soil moisture contour map of B1F1 treatment

与 B1F1 (对照) 相比, 随着土壤施炭量增加, 土壤耕层 (0 ~ 20 cm) 持水、保水能力增强, 有限水分

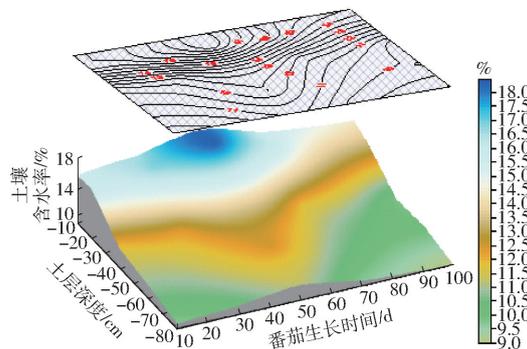


图4 B4F1处理的土壤含水率等值线图

Fig.4 Soil moisture contour map of B4F1 treatment

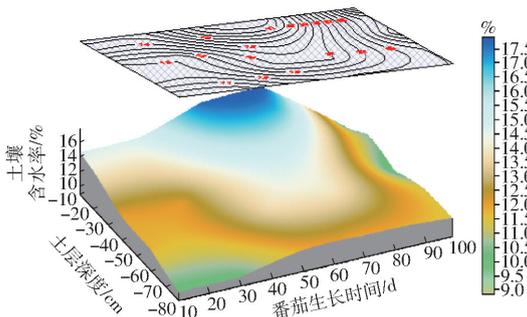


图5 B5F1处理的土壤含水率等值线图

Fig.5 Soil moisture contour map of B5F1 treatment

可以充分供给番茄生长所需, 解决番茄生育阶段内水分时空分布不均匀导致的作物缺水问题。这种保水现象在较高施炭处理 (B4F1、B4F2、B5F1、B5F2) 中更为显著 (图 4、5)。通过土壤含水率等值线图和曲面图可以直观发现, 生物炭具有很好的保水、持水及减缓砂壤土水分快速渗漏作用。在我国干旱、半干旱地区土壤生产力和土壤肥力较差, 降雨存在时空分布不均现象, 水土流失比较严重。追其原因, 大部分是因为土壤持水能力差, 土壤有机质淋洗流失所致。砂壤土中施加生物炭可有效缓解这种矛盾。

2.4 对番茄产量的影响

从图 6 分析可知, 与 B1F1 (对照) 相比, 随着施炭量的增加番茄产量增幅出现先升高后降低的趋势, 但是整体增幅较对照相比差异显著。其中, 与 B1F1 相比, 不施炭减少化肥用量的 B1F2 处理出现减产; B2F1、B2F2、B3F1、B3F2、B4F1、B4F2、B5F1、B5F2 分别增幅 17.80%、18.03%、40.12%、44.01%、46.34%、58.61%、49.63% 和 39.18%。其中 B4F2 产量最高。同一施炭不同施肥处理间差异不显著, 可考虑减少化肥用量, 指导番茄田间种植达到增产增收的目的。产生这种结果的原因主要是施加生物炭后番茄土壤含水率有效提高, 保证了番茄植株生长, 提高光合和蒸腾速率, 提高番茄植株干物质积累, 从而提高产量。番茄生育阶段供水不足将直接影响植株生长发育。

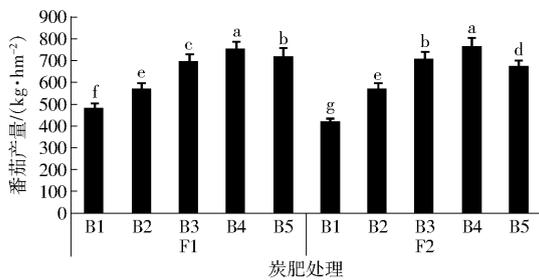


图 6 生物炭对番茄产量的影响

Fig. 6 Effect of biochar on tomato yield

3 讨论

生物炭通过改善土壤理化性质进而提高土壤含水率。前人的研究结果表明生物炭施入土壤中可以增大土壤孔隙度,有利于增加土壤含水率^[10-11]。生物炭具有较大比表面积和多孔结构,具有亲水性、吸附力大等特点,可以使土壤保持更多水分,尤其能够提高砂质土壤持水能力,随着生物炭用量增加,持水能力增强。本研究表明,施入生物炭可有效提高砂壤土土壤含水率,与这些研究结论基本一致。随着生物炭施用量进一步增加,土壤含水率呈现下降趋势,可能是因为较大施用生物炭会导致土壤通气孔隙增加,毛细孔隙减小,吸水保水能力降低所致。对于质地较粘的土壤来说,生物炭增大了土壤通透性,促进土壤水分入渗,但对于质地较轻土壤可以抑制水分渗漏。随着生物炭施用量增大,不同质地土壤水分渗透率均出现逐渐减少趋势。本试验通过土壤 0~80 cm 垂直入渗剖面等值线分析可知,耕层土壤施入生物炭可以增强土壤持水能力,防止水分深层渗漏和流失。这与高海英等^[12]的研究结论大体相同。

大量研究成果已经表明施用生物炭可以有效提高土壤中有机质含量^[13-14]。生物炭本身碳含量较高,施入土壤中增加肥力。同时生物炭表面具有较丰富含氧官能团,其所带负电荷和复杂孔隙结构赋予其较大的阳离子交换量和强大吸附力,可以作为肥料缓释载体从而延缓肥料养分释放,保持和固定一部分肥料以免流失和淋洗,达到持肥保肥作用^[15]。所以,炭肥耦合可以提高土壤肥料利用率,改善作物生长过程所需养分,达到增产增收目的。

近年来,国内有关施加生物炭增加作物产量报道逐渐增多。张伟明等^[9]研究表明,以不同标准在砂壤土中施入生物炭,水稻产量均比对照平均提高 21.98%。黄超等^[16]在每千克红壤土中施用 10、50、200 g 生物炭种植黑麦草,产量可分别增加 7%、27% 和 53%。唐光木等^[17]在新疆灰漠土中添加生物炭种植玉米,结果表明施入 40 t/hm²的生物炭玉米产量提高近 50%,增产效果显著。然而,在生物

炭对作物生长作用方面还存在一些不同观点。KISHIMOTO 等^[18]认为,壤土中施加生物炭(0.5 t/hm²)大豆产量可增加 50%;然而,随着施用量增加产量出现减少趋势且 15 t/hm²时减产近 70%。张晗芝等^[19]在中层砂浆水稻土中施加生物炭研究其对玉米影响,发现在玉米苗期生物炭抑制了植株生长发育,添加量越大抑制效果越明显,随着玉米生长这种抑制效应逐渐消失。沈阳农业大学生物炭研究中心以生物炭为基质制造炭基缓释肥料施入土壤中,作物增产效果明显且用量少,可以大幅度降低化肥使用量或不使用化肥,这也是生物炭应用的重要研究成果^[20]。

前述学者们对生物炭在农作物生长影响方面研究已经具有一定学术成果,多数学者认为施用生物炭可以提高作物产量,但是施用量越大不一定作物产量增幅最大,有的甚至出现施用量增大产量反而降低现象;同时,通过生物炭在作物种植方面研究发现,贫瘠的砂质土壤上应用生物炭提高作物生物量效果最为明显。本研究中炭肥耦合对番茄产量影响显著,较高施炭量与低肥耦合(B4F2)综合作用效果较优。

4 结论

(1) 0~20 cm 土层土壤含水率均随生物炭施用量的增加呈增大的趋势。番茄生长初期,0~20 cm 高炭处理增幅显著,其中 B4F1 处理增幅达 40%;番茄生长后期,各处理土壤含水率增幅与早期规律基本一致,0~20 cm 增幅超过 20% (B4F1)。20~40 cm 土层土壤含水率与 0~20 cm 的变化规律恰好相反,与对照相比,施炭处理的土壤含水率均呈现下降趋势,其中 B4F1 和 B4F2 含水率最小,仅为对照的 70%。土层 40~60 cm、60~80 cm 的土壤含水率整体变化趋势与其一致,即生物炭处理的土壤含水率均小于对照。

(2) 施加生物炭后土壤含水率的变化幅度和变异程度减弱。对于同一深度的土壤而言,随着施炭量的增加, K_s 和 C_v 均减小,与对照相比,较高施炭处理(B4F1、B4F2、B5F1、B5F2)的土壤剖面土壤含水率变异系数 C_v 相对较小。

(3) 随着番茄的生长,土壤含水率在垂直剖面的影响表现为较高施炭量(B4F1、B4F2、B5F1、B5F2)处理的土壤含水率均高于对照,差异显著。

(4) 随着施炭量的增加,番茄产量增幅出现先升高、后降低的趋势,且均高于对照。B4F1、B4F2、B5F1、B5F2 分别增幅 46.34%、58.61%、49.63% 和 39.18%,其中 B4F2 产量最高。同一施炭处理、不同施肥处理间差异不显著。

参 考 文 献

- 1 张锋. 中国化肥投入的面源污染问题研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
ZHAGN Feng. Study on the non-point pollution of the agricultural fertilizer input in China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 2 EMMA M. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442: 624 - 626.
- 3 田丹, 屈忠义, 李波, 等. 生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(3): 135 - 137.
TIAN Dan, QU Zhongyi, LI Bo, et al. Influence of biochar on sandy soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(3): 135 - 137. (in Chinese)
- 4 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 137 - 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 137 - 142. (in Chinese)
- 5 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161123&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023.
- 6 LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological carbon on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 172 - 178. (in Chinese)
- 7 吕一甲, 屈忠义. 生物炭肥料对河套灌区耕层土壤肥力及含水率影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2015(3): 18 - 21.
LÜ Yijia, QU Zhongyi. Effect of biochar fertilizer on topsoil of soil fertility and moisture content in Hetao Irrigation Area [J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(3): 18 - 21. (in Chinese)
- 7 STEINER C, GLASER B, TEIXEIRA W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central amazonian ferrasol amended with compost and charcoal[J]. *Plant and Soil*, 2008, 171(6): 893 - 899.
- 8 KIMETU J M, LEHMANN J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 577 - 585.
- 9 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445 - 1451.
ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445 - 1451. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 201 - 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 201 - 207. (in Chinese)
- 12 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及氨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.
GAO Haiying, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 207 - 213. (in Chinese)
- 13 KIMETU J M, LEHMANN J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 577 - 585.
- 14 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68 - 79.
WU Yu, XU Gang, LÜ Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 68 - 79. (in Chinese)
- 15 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1 - 7.
HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 1 - 7. (in Chinese)
- 16 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(4): 439 - 445.
HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2011, 37(4): 439 - 445. (in Chinese)
- 17 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆荒漠土肥力与玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1797 - 1802.
TANG Guangmu, GE Chunhui, XU Wanli, et al. Effect of applying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1797 - 1802. (in Chinese)
- 18 KISHIMOTO S, SUGIURA G. Charcoal as a soil conditioner[J]. *Int Achieve Future*, 1985, 5: 12 - 23.
- 19 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2713 - 2717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(11): 2713 - 2717. (in Chinese)
- 20 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. (in Chinese)