

生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响

王 湛^{1,2} 李银坤¹ 王利春¹ 郭文忠¹ 徐志刚²

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要: 为探究生物炭对提升有机菜地土壤保水能力与菜心水分利用的作用, 基于田间小区定位试验, 研究不施肥(CK)、单施有机肥(MC0, 110 t/hm²)、有机肥+低量生物炭(MC1, 110 t/hm²+8.5 t/hm²)和有机肥+高量生物炭(MC2, 110 t/hm²+17 t/hm²)对土壤水分动态以及有机栽培菜心产量、品质及水分利用效率的影响。结果表明, 有机肥配施生物炭可显著提高有机菜地表层土壤(0~20 cm)含水率, 增加0~70 cm土壤贮水量, 与处理MC0相比, 处理MC1和MC2全生育期平均含水率分别提高4.7%和8.6% ($P < 0.05$), 0~70 cm土壤贮水量分别提高12.3%与3.4%。CK处理0~20 cm土层含水率变化幅度大(10.5%~31.2%), 处理MC1变化幅度相对较小, 为15.4%~30.4%。相比处理MC0、MC2和CK, 处理MC1可显著促进菜心生长, 增加产量, 改善菜薹品质。菜心株高、叶片数和叶围面积均以处理MC1为最高, 相比处理MC0, 处理MC1生物量与产量分别提高36.7%、59.1%, 而硝酸盐含量降低20.0%~44.3%。与MC2、MC0和CK相比, 处理MC1周年耗水量分别降低3.6%、6.8%和13.7% ($P < 0.05$), 而产量水分利用效率分别提高49.8%、75.7%和2264.8% ($P < 0.05$), 生物量水分利用效率分别提高45.4%、46.6%和720.1% ($P < 0.05$)。处理MC2与MC0相比, 菜心产量和水分利用效率虽明显增加, 但均显著低于处理MC1。研究结果可以为西北旱区有机蔬菜合理制定培肥制度提供理论依据。

关键词: 有机菜地; 生物炭; 土壤含水率; 产量; 水分利用

中图分类号: S963.91; X71 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0273-08

Effects of Biochar on Yield, Quality and Water Utilization of Organic Flowering Chinese Cabbage

WANG Zhan^{1,2} LI Yinkun¹ WANG Lichun¹ GUO Wenzhong¹ XU Zhigang²

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to explore the effects of biochar on improvement of soil water-retaining capacity and water utilization of flowering Chinese cabbage, based on the field experiment, the effects of four treatments, including no fertilizer (CK), mere organic fertilizer (MC0, 110 t/hm²), combination of organic fertilizer and a small amount of biochar (MC1, 110 t/hm²+8.5 t/hm²) and combination organic fertilizer and a large amount of biochar (MC2, 110 t/hm²+17 t/hm²) on soil moisture dynamic, yield, quality as well as water use efficiency of flowering Chinese cabbage were studied. As the result shown, organic fertilizer combined with biochar could significantly increase the water content in 0~20 cm soil layer and increase water reserve in 0~70 cm soil layer, the average water content of whole growth period of MC1 and MC2 was increased by 4.7% and 8.6% ($P < 0.05$) and the amount of water reserve in 0~70 cm soil layer was increased by 12.3% and 3.4%, respectively, compared with MC0. The water content in 0~20 cm soil layer under the treatment CK was changed drastically (10.5%~31.2%) and MC1 was changed relatively unnoticeable (15.4%~30.4%). MC1 apparently promoted the growth of flowering Chinese cabbage and improved the quality of vegetable sprouts compared with treatment MC0, MC2 and CK. The plant height, number of leaves, leaf area circumambient of MC1 all reached the highest. The biomass and yield of MC1 were increased by 36.7% and 59.1%, respectively, however the

收稿日期: 2018-08-20 修回日期: 2018-10-12

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD05B02)和国家自然科学基金项目(41501312)

作者简介: 王湛(1990—), 男, 博士生, 主要从事土壤水肥高效利用研究, E-mail: wzyjsjt@163.com

通信作者: 李银坤(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事作物水肥高效利用及水肥一体化技术研究, E-mail: lykun1218@163.com

content of nitrate was decreased by 20.0% ~ 44.3%, compared with CM0. Compared with CM2, MC0 and CK, MC1 annual water consumption was decreased by 3.6%, 6.8% and 13.7% ($P < 0.05$), the yield water use efficiency was increased by 49.8%, 75.7% and 2264.8% ($P < 0.05$), biomass water use efficiency was increased by 45.4%, 46.6% and 720.1% ($P < 0.05$), respectively. Compared with MC0, the yield and water use efficiency of MC2 were significantly increased, but they were significantly lower than that of MC1. The research result can provide a theoretical basis for the rational formulation of fertilization system for organic vegetables in the arid region of Northwest China.

Key words: organic vegetable field; biochar; soil moisture content; yield; water utilization

0 引言

宁夏是“冬菜北上,夏菜南下”和内陆出口蔬菜的重点生产区域,也是供港有机蔬菜的重要生产基地^[1]。当地水资源量少,蒸发强度大,地下水位深,蔬菜生产用水以引黄灌溉为主,由于地势起伏大,引水工程造价高,使得山区用水成本高,水资源显得尤为珍贵^[2]。但蔬菜生产中大引大排现象依旧存在,不仅造成大量水资源浪费,还产生次生盐渍化等一系列问题^[3]。近年来,随着当地工业园区、化工基地、城市生态水利等的建设,全区生活、生产、生态用水之间的矛盾将更加尖锐,土壤缺水干旱已成为限制当地农业发展的重要因素^[3]。因此通过合理的措施提高土壤贮水性能及作物水分利用效率是当地有机农业可持续发展的重要保证。

当地有机蔬菜以菜心 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee)、芥蓝等叶菜为主,生产过程中常以腐熟的牛、羊粪等作为肥源,施肥种类单一,长期施用单一的有机肥同样易造成次生盐渍化、养分不平衡等一系列生态环境问题^[1]。生物炭为农林废弃物在缺氧条件下高温裂解生成的富碳产物^[4]。相关研究表明,将生物炭施入土壤中能够降低长期施用单一肥料产生的危害,且具有增加水分库容作用^[5-6]。AMYMARIE 等^[7]研究发现,生物炭对水分的吸持能力比有机质高 1~2 个数量级,土壤含水率相比不施生物炭约增加 18%。齐瑞鹏等^[8]研究表明,生物炭可增加风沙土水分入渗量,提高土壤含水率,增加作物产量,进而提高水分利用效率^[9];勾芒芒等^[10]用室内盆栽方法定量分析砂壤土中添加生物炭后对水分利用效率的影响,结果表明生物炭添加可显著增加土壤含水率。目前有关生物炭在农业中的应用研究多集中在室内模拟、短期大田和盆栽试验上,而关于有机蔬菜地施用生物炭的研究报道较少,尤其在西北旱区水资源短缺条件下,生物炭施用对有机菜地作物水分利用影响的研究更为少见。本研究基于田间小区定位试验,研究有机肥配施生物炭对有机蔬菜地土壤水分动态变化及作物水分利用效率的影响,以明确有机蔬菜

地合理培肥模式及其在提高西北旱区土壤贮水性能方面的作用与效果。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况及生物炭

试验设在宁夏回族自治区吴忠市孙家滩吴忠国家农业科技园区 (37°32'23"N, 106°14'30"E), 该园区为供港有机蔬菜(主要为叶菜)的重要生产基地,菜心有较大栽培面积。当地属温带半干旱半湿润地区,降雨量 166.9~647.3 mm,主要集中在 6—9 月,蒸发量 1312.0~2204.0 mm,无霜期 105~163 d,日照时数 2250~3100 h,平均气温 5.3~9.9℃。试验当年 5—6 月气温变化幅度大,为 8.0~47.1℃,7—8 月为 20.4~33.6℃,9—11 月变化幅度最小,为 10.9~25.6℃。

供试土壤为砂壤土,播前 0~20 cm 土壤有机质质量比 1.57 g/kg,全氮质量比 0.20 g/kg,速效钾质量比 (K_2O) 130.2 mg/kg,有效磷质量比 (P_2O_5) 12.9 mg/kg。有机肥为腐熟牛粪,全氮质量比 12.9 g/kg,有机质质量比 194.9 g/kg,速效钾质量比 10.1 g/kg,有效磷质量比 1.18 g/kg。生物炭为玉米芯在 550℃ 条件下热解制备,全碳质量比为 289.0 g/kg,全氮质量比为 40.0 g/kg,有效磷质量比 0.97 g/kg,速效钾质量比 4.27 g/kg。

1.2 试验设计

试验于 2016 年进行,当年布置 3 茬试验,1、2、3 茬分别于 5 月 13 日、7 月 15 日、9 月 10 日由播种机播种,种植作物为菜心,品种为油绿 702(当地主栽品种),播种行距 15 cm,两叶一心时间苗,间苗后平均株距为 10 cm,分别于当年 6 月 23 日、8 月 18 日、10 月 22 日统一收获。试验设单施有机肥(MC0)、有机肥配施低量生物炭(MC1)、有机肥配施高量生物炭(MC2)和不施肥(CK)4 个处理,3 次重复,完全随机排列。其中有机肥施用量为当地菜农习惯用量 (110 t/hm²);生物炭用量依据文献中平均用量的较低和较高量施加^[11],处理 MC1 和 MC2 用量分别为 8.5、17 t/hm²;生物炭和有机肥在每年种植第 1 茬作物前一次性均匀翻入 0~20 cm 土层,试验小区面积

4.2 m × 1.4 m, 小区与小区间隔 0.3 m 作为缓冲带。每个小区内均匀铺设 4 条滴灌带, 滴头间距 10 cm, 流量 2.8 L/h, 同时小区中间安装一根深度 1 m 的探管, 用 TDR 型时域反射计 (PICO - BT, Andres Industries AG) 每 2 ~ 3 d 测定 0 ~ 20 cm 土层含水率, 当灌水或降雨后增加测量频率。为保证各小区灌水量一致, 当某小区实测含水率低于田间持水率 (文中未标明土壤含水率均为体积含水率) 的 80% 时灌溉, 灌溉到该小区田间持水率的 100%, 灌水量计算公式为

$$I = 100(\theta_f - \theta_i) \gamma H p \quad (1)$$

式中 I ——灌水量, mm

θ_f ——田间最大质量持水率, 处理 CK、MC0、MC1 和 MC2 分别为 19.5%、22.5%、18.8% 和 26.3%

θ_i ——各处理实测含水率, %

γ ——土壤容重, 处理 CK、MC0、MC1、MC2 分别为 1.48、1.35、1.36、1.21 g/cm³

H ——土层深度, 取 0.2 m

p ——滴灌水分利用效率, 取 0.95^[12]

1.3 观测项目及方法

1.3.1 生长指标及生物量

收获时随机选取 3 株菜心, 株高和叶围面积 (以单株菜心冠层最长处为长, 与其垂直冠层长度为宽, 二者相乘) 由直尺测量 (0.1 mm), 叶片数为单株全部绿叶数, 洗去植株表面灰尘后在 105℃ 杀青 30 min, 然后 80℃ 干燥至恒定质量, 测定生物量。

1.3.2 产量和品质

菜心成熟后每小区取 1 m² (1 m × 1 m) 用电子天平 (精确到 0.01 g) 进行计产, 采收时基部留 3 片叶, 切口要平。将收获后的菜薹进行品质分析, 其中硝酸盐含量采用硫酸-水杨酸法测定, 维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法。

1.3.3 菜心耗水量及水分利用效率

在菜心种植前及收获后, 用 TDR 测量 0 ~ 70 cm 土层含水率, 每 10 cm 为一层。土壤贮水量计算公式为

$$E = 10CH \quad (2)$$

式中 E ——贮水量, mm

C ——土壤水分体积分数, %

本试验所选旱地地面平整, 土层深厚, 土质均一, 生育期无降雨发生, 地下水位深, 因此不考虑地下水补给的影响; 且试验期间根据田间持水率灌溉, 每次灌溉量较少, 故地表径流与地下水位渗漏均不考虑。基于以上分析, 由简化的水分平衡方程计算菜心耗水量^[13], 即

$$ET = I + \Delta H \quad (3)$$

式中 ET ——田间耗水量, mm

ΔH ——菜心生育期前后 70 cm 土壤贮水量变化, mm

产量水分利用效率计算公式为^[14]

$$Y_{wue} = Y/ET \quad (4)$$

式中 Y_{wue} ——产量水分利用效率, kg/(hm²·mm)

Y ——菜心产量 (鲜质量), kg/hm²

生物量水分利用效率计算公式为

$$B_{wue} = B/ET \quad (5)$$

式中 B_{wue} ——生物量水分利用效率, kg/(hm²·mm)

B ——菜心生物量, kg/hm²

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 数据整理, Origin 93 (2016) 绘图, 用 SPSS 18.0 进行统计分析, 对于测定结果进行 F 检验, 差异显著性采用 LSD 法进行比较。

2 结果与分析

2.1 0 ~ 20 cm 土层水分动态变化特征

由图 1 (图中 * 表示当天进行灌水) 可知, 各处理 0 ~ 20 cm 土层含水率在不同茬口内的变化趋势相同, 土壤水分随着菜心生长时间的延长均有较大波动, 其峰值出现次数与试验期间灌水次数一致, 说明灌水是不同茬口 0 ~ 20 cm 土壤水分变化的重要因素。

土壤含水率的变化幅度随茬口的推进呈降低趋

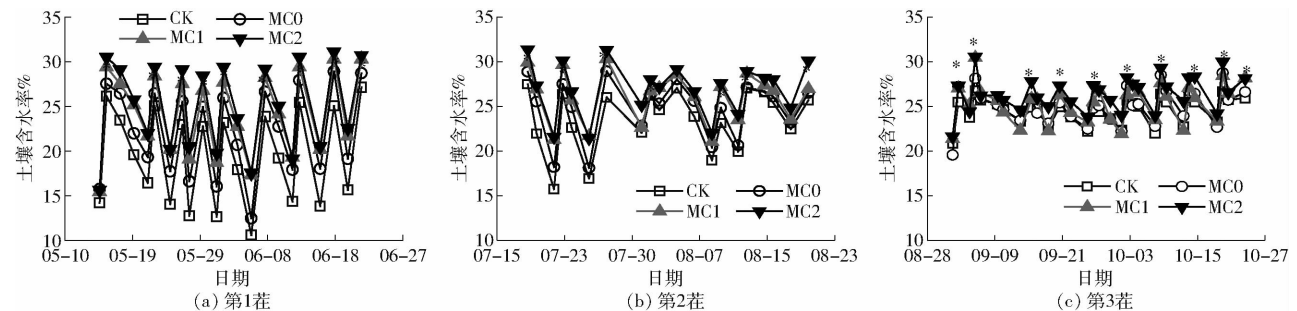


图 1 0 ~ 20 cm 土层含水率动态变化

Fig. 1 Dynamics change of water content of 0 ~ 20 cm topsoil

势,与温度波动呈显著正相关($P < 0.05$,数据未显示),其中第1茬土壤含水率波动幅度为10.5%~31.2%,而第3茬仅在20.9%~30.5%之间波动。说明随茬口的推进含水率变化幅度降低可能是气温变化引起的。添加生物炭的处理(MC1和MC2)土壤水分具有较低波动幅度,其中处理MC0变化幅度分别为12.4%~29.0%、18.1%~28.9%和19.6%~28.8%,处理CK变化幅度分别为10.5%~27.2%、15.7%~27.5%和20.9%~26.8%,而处理MC1第1、2、3茬变化幅度为15.4%~30.4%、21.0%~30.3%和21.4%~30.4%。从周年平均含水率分析,处理MC2条件下含水率最高,为26.2%,其次为处理MC1的25.2%,均显著高于处理MC0的24.1%和CK的22.7%。由此可见,有机肥配施生物炭不仅可以降低0~20 cm土层水分变化幅度,而且可增加土壤含水率,分析原因主要是生物

炭具有高表面积,当加入土壤时,土壤表面积增加,对土壤整体的吸附能力有益,随后提高土壤保水性。

2.2 菜心耗水量

由表1可知,处理MC1种植前的0~70 cm土层贮水量相比其他处理无显著性差异,但在收获时的土壤贮水量则显著增加。与处理MC0、MC2和CK相比,处理MC1收获后的土壤贮水量分别增加5.4%~12.9%、15.7%~31.9%和3.9%~16.9% ($P < 0.05$)。而处理MC2与MC0相比,第1茬、第2茬和第3茬收获时土壤贮水量无显著差异。这说明有机肥配施低量生物炭可提高0~70 cm土层贮水量,而配施高量生物炭0~70 cm土层贮水量反而降低,由于高量生物炭处理的0~20 cm土层含水率较处理MC0显著升高($P < 0.05$,图1),因此加入高量生物炭可抑制水分下渗,降低20~70 cm土层贮水量。

表1 有机肥配施生物炭对菜心耗水量的影响

Tab.1 Influence of organic fertilizer combined with biochar on water consumption

mm

茬数	处理	种植前贮水量	收获后贮水量	生育期灌水量	耗水量
第1茬	CK	(119.99 ± 2.59) ^a	(139.19 ± 2.80) ^c	280.50	(261.30 ± 0.69) ^a
	MC0	(123.66 ± 1.84) ^a	(149.11 ± 3.49) ^b	280.50	(255.06 ± 1.85) ^b
	MC1	(121.85 ± 2.75) ^a	(157.16 ± 1.06) ^a	280.50	(245.19 ± 1.70) ^c
	MC2	(120.40 ± 1.08) ^a	(146.95 ± 0.79) ^b	280.50	(253.95 ± 0.43) ^b
第2茬	CK	(174.53 ± 5.85) ^a	(128.99 ± 3.05) ^c	244.80	(290.34 ± 2.80) ^a
	MC0	(158.33 ± 8.64) ^{ab}	(131.78 ± 4.59) ^b	244.80	(271.35 ± 5.08) ^b
	MC1	(172.88 ± 6.81) ^{ab}	(170.13 ± 1.70) ^a	244.80	(247.56 ± 5.12) ^c
	MC2	(154.60 ± 8.29) ^b	(147.00 ± 7.71) ^b	244.80	(252.41 ± 7.60) ^c
第3茬	CK	(162.05 ± 2.24) ^a	(148.01 ± 0.91) ^c	121.20	(135.24 ± 1.33) ^a
	MC0	(153.07 ± 4.93) ^a	(164.61 ± 2.34) ^b	121.20	(109.66 ± 2.62) ^b
	MC1	(151.93 ± 4.56) ^a	(172.96 ± 5.06) ^a	121.20	(100.17 ± 1.95) ^c
	MC2	(154.34 ± 2.57) ^a	(166.54 ± 5.01) ^b	121.20	(109.00 ± 2.48) ^b
周年	CK			646.50	(686.89 ± 4.44) ^a
	MC0			646.50	(636.07 ± 6.03) ^b
	MC1			646.50	(592.92 ± 7.14) ^d
	MC2			646.50	(615.36 ± 5.63) ^c

注:同茬中,同一列数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。下同。

从耗水量看,不同处理在各茬中的耗水量由大到小均表现为CK、MC0、MC2、MC1,配施生物炭处理耗水量均小于单施有机肥及对照处理。其中处理MC1周年耗水量较处理MC2、MC0和CK分别降低3.6%、6.8%、13.7% ($P < 0.05$),处理MC2与MC0相比周年耗水量降低3.4% ($P < 0.05$)。

2.3 菜心生长指标

将有机肥和生物炭在第1茬菜心种植前一次性加入土壤中来探索有机菜心的周年变化,发现各处理随茬口的推进生长指标和产量呈下降趋势,如图2所示,可能是随着茬口的推移,土壤养分持续降低造成的。在不同处理下,各生长指标具有相似的

变化规律,处理MC1最高,显著大于其他各处理(除第3茬株高外)。其中第1茬,处理MC1与常规施肥MC0相比,株高、叶片数和叶围面积分别提高32.2%、21.1%和17.9% ($P < 0.05$);而处理MC2与MC0相比,菜心叶围面积和叶片数虽呈降低变化,但株高却显著增加($P < 0.05$)。这表明有机菜田中配施生物炭对菜心生长有明显促进作用,但生物炭用量与菜心生长间并不呈正相关,以配施低量生物炭的效果更优。

2.4 菜心产量及水分利用效率

不同处理下菜心产量和生物量变化规律相似(数据未显示),其中处理MC1最高,显著高于MC0

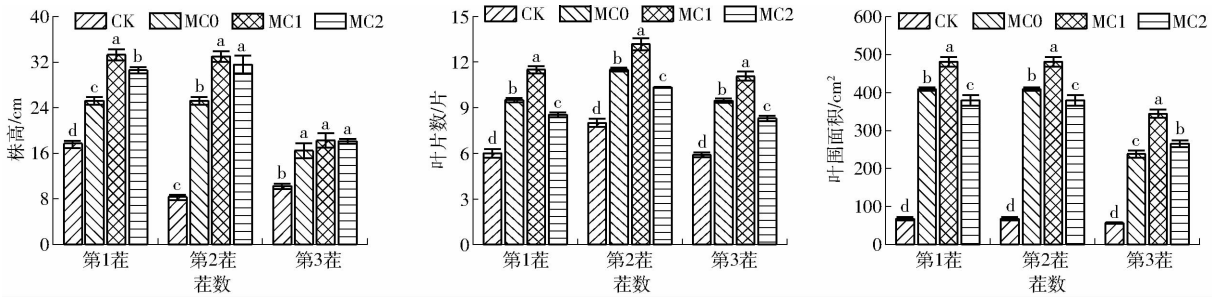


图 2 有机肥配施生物炭对菜心生长的影响

Fig. 2 Influence of organic fertilizer combined with biochar on growth of flowering Chinese cabbage

和 CK 处理。与 MC0 和 CK 相比,处理 MC1 的菜心周年产量分别增加 59.1% 和 2182.7%,生物量分别增加 36.7% 和 608.7%。处理 MC2 与 MC0 相比,菜心的周年产量显著增加,但与 MC1 相比反而降低。由此分析,配施生物炭可显著提高菜心产量,且低量生物炭处理的效果更优、更稳定。

从水分利用效率角度分析,各处理产量水分利用效率由大到小表现为 MC1、MC2、MC0、CK。处理 MC1 与 CK 相比,周年水分利用效率提高 2264.8%,与 MC0 和 MC2 相比也分别提高 75.7% 和 49.8%。处理 MC1 还具有提高菜心生物量水分利用效率的作用,与处理 MC2、MC0 和 CK 相比,分别提高 45.4%、46.6% 和 720.1%。处理 MC2 下产量水分利用效率较 MC0 高,但低于 MC1 处理。总体

而言,有机肥配施生物炭不仅增加菜心产量,而且提高水分利用效率,以低量生物炭处理的作用更大。

2.5 菜心营养品质

硝酸盐含量为评价蔬菜安全的指标,本试验中各处理菜薹硝酸盐质量比为 0.24 ~ 1.53 mg/g (表 2),远低于国家对无公害蔬菜安全要求的标准。生物炭配施的培肥模式菜薹硝酸盐含量低于单施有机肥培肥模式,与 MC0 相比,处理 MC1 的第 1、2、3 茬菜薹硝酸盐含量降低 44.3%、20.0% 和 27.0%,处理 MC2 分别降低 27.5%、16.1% 和 9.3%。维生素 C(Vc)为评价菜薹营养品质的重要指标。处理 MC2 和 MC1 与 MC0 相比,菜薹维生素 C 无显著性差异。总体而言,配施生物炭培肥模式降低硝态氮含量,保持菜薹中的维生素 C 含量,具有较佳的菜薹品质。

表 2 配施不同量生物炭对菜心品质的影响

Tab. 2 Influence of different amount of biochar on quality of flowering Chinese cabbage

茬数	硝酸盐质量比/(mg·g ⁻¹)				ADI/ (mg·g ⁻¹)	维生素 C 含量/%			
	CK	MC0	MC1	MC2		CK	MC0	MC1	MC2
第 1 茬	(0.98 ± 0.01) ^c	(1.53 ± 0.06) ^a	(1.06 ± 0.05) ^c	(1.20 ± 0.06) ^b	432.00	(26.35 ± 0.31) ^a	(25.80 ± 0.49) ^a	(23.35 ± 2.10) ^a	(25.42 ± 0.90) ^a
	(0.87 ± 0.02) ^b	(1.08 ± 0.03) ^a	(0.90 ± 0.03) ^b	(0.93 ± 0.02) ^b		(62.35 ± 1.52) ^a	(65.51 ± 1.68) ^a	(69.65 ± 3.86) ^a	(61.51 ± 3.76) ^a
第 2 茬	(0.24 ± 0.01) ^d	(0.47 ± 0.01) ^a	(0.37 ± 0.01) ^c	(0.43 ± 0.02) ^b	432.00	(63.49 ± 3.59) ^a	(60.95 ± 2.35) ^a	(53.8 ± 4.14) ^a	(69.05 ± 5.51) ^a

注:ADI 表示我国蔬菜的硝酸盐允许量。

3 讨论

3.1 配施生物炭下土壤水分的变化

水是维持植物生命活动的重要物质,是植物制造有机物质不可或缺的基础^[12,15]。文献[12]表明,持续稳定的适宜水分供给具有显著的增产提效作用,但有机蔬菜生产中,表层土壤水分变化剧烈,严重制约着有机蔬菜产业的发展^[14]。HAIDER 等^[16]发现,生物炭可协调作物需水和土壤供水间的矛盾,增加土壤保水性能,提高作物水分利用效率。从本试验结果看,各茬土壤含水率峰值出现次数与灌水次数相同,且均在灌水当天出现,说明灌水为影响土

壤水分的重要因素。试验期间各小区灌水相同,处理 MC1 和 MC2 的 0 ~ 20 cm 土层周年含水率分别在 15.4% ~ 30.4% 和 15.6% ~ 31.2% 区间变化,低于传统单施有机肥处理(MC0)的变化幅度(12.4% ~ 29.0%),而平均含水率分别高出 MC0 处理 4.7% 和 8.6% ($P < 0.05$)。表明生物炭可提高有机菜地表层含水率、降低水分变化幅度。

有研究认为,生物炭保水作用是持水性与斥水性相互作用的结果^[17-19],持水性为吸附和固定水分的能力^[5-6],增加土壤含水率^[20],斥水性指生物炭添加的土壤无法被水湿润的现象^[17]。灌水在斥水的土壤表面时,水珠停留在地表数小时不能入渗,以

蒸发的形式损失,降低了土壤含水率^[21]。大多数生物炭中,95%的孔隙直径小于 $0.02\ \mu\text{m}$,而有机菜地以施用有机肥为主,耕层土壤容重低,孔径大,当生物炭用量高时,将阻塞土壤的原有孔隙,阻止灌水下渗,表现为强斥水性^[22-24]。本试验中,处理MC2与MC1相比,0~20 cm土层周年含水率增加3.8%(图1),而收获后(0~70 cm)土壤贮水量平均降低8.6%($P < 0.05$)。试验用地平整,地下水位高,无地下水补给,说明高量生物炭具有强的持水性,可提高0~20 cm土层含水率,而斥水作用和细粒子结构阻塞了灌溉水下渗^[25],增强土壤表面蒸发^[22,26],因此降低了下层含水率,从而降低收获期贮水量(表1)。

3.2 配施生物炭下有机菜心产量及品质的变化

适宜的较高水分供应是促进植株生长,提高产量的关键所在。本试验条件下,处理MC1和MC2株高和周年产量较处理MC0显著增加($P < 0.05$)。可见,与常规施肥相比,配施生物炭可显著促进菜心生长,增加其产量。研究表明,生物炭实际可供作物利用的养分含量并不多,可促进作物生长原因可能为其表面积高,当加入土壤时,土壤表面积增加,对土壤整体的吸附力有益,随后提高土壤保水性^[27]。李绍等^[28]发现,较高的土壤水分供应可提高植株叶片中RuBP羧化酶活性,继而提高植株光合潜力和生产潜能。处理MC1和MC2菜茎硝酸盐含量较MC0相比均显著降低(表2)。由此可见,相对于传统单施有机肥培肥模式,生物炭培肥为提高有机菜心产量提供了新的技术途径。

生物炭用量与菜心生长及产量间并不呈正相关。处理MC1生长指标、生物量和产量均达最大值,显著高于CK、MC0和MC2;而处理MC2与MC1相比各生长指标、生物量和产量均显著降低($P < 0.05$,图2)。关于适量生物炭可更有效地促进作物生长,提高作物产量也有一些报道^[19],如UZOMA等^[11]将生物炭应用于砂质土壤中发现,当生物炭用量为 $15\ \text{t}/\text{hm}^2$ 和 $20\ \text{t}/\text{hm}^2$ 时,玉米产量分别提高150%和98%($P < 0.05$)。KISHIOMOTO等^[29]在土壤中添加生物炭 $0.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 时,大豆产量可以提高50%,然而随着生物炭用量增加,产量反而呈减小趋势。究其原因高量生物炭处理具有强的吸附性,可降低水分的生物有效性,大量的细粒子结构增加 $0.0003\sim 0.03\ \mu\text{m}$ 的孔隙数量,而大多数植物不能从小于 $0.2\ \mu\text{m}$ 的孔隙中提取土壤水^[23-24]。同时其斥水性降低深层土壤含水率,导致深层土壤可补给的分量降低,因此抑制作物生长,降低作物产量。

另外,生物炭具有较高的碳氮比(本试验生物炭碳氮比为72.3),施用高量生物炭(处理MC2的碳氮比为35.5)使得微生物对氮产生强烈的生物固定^[30],导致氮的生物利用率降低^[31],进而对作物生长产生负效应。

3.3 配施生物炭下菜心耗水及水分利用效率的变化

试验中,菜心耗水量随生物炭用量的增加呈先增加后降低的变化趋势(表1),其中以处理MC1最高,显著高于MC0,而处理MC2与MC0相比无显著性差异。这与HAIDER等^[16]研究结果一致。MC1处理的0~20 cm土层含水率较高,菜心生长旺盛(图1),地表裸露率降低,因此土壤表层蒸发减少,贮水量增加(表1)。另外,生物炭可改善耕层土壤结构,改变灌水下渗过程,增加水分入渗量^[24],最终增加土壤贮水量。种植前,各处理土壤贮水量无显著差异,收获后MC1的平均贮水量分别比处理MC0、MC2和CK增加12.3%、8.6%和20.2%($P < 0.05$),因此能够降低菜心周年耗水,并可显著提高菜心水分利用效率,其中处理MC1与MC0相比,生物量水分利用效率可提高46.6%($P < 0.05$),产量水分利用效率可提高75.7%($P < 0.05$)。可见,相对于单施有机肥培肥模式,配施低量生物炭不仅降低有机菜心耗水量,并显著提高水分利用效率。

4 结论

(1)配施 $8.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 和 $17\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭与单施有机肥相比,0~20 cm土层水分波动小,而平均含水率分别提高4.7%和8.6%($P < 0.05$),0~70 cm土壤贮水量分别提高12.3%与3.4%,说明有机菜田中配施生物炭的培肥模式可提高0~20 cm土层含水率,降低水分变化幅度,最终增加0~70 cm土壤贮水量。

(2)生物炭配施量为 $8.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 时,菜心株高、叶片数、叶围面积均为各处理最高,生物量比常规施肥分别提高36.7%,且为各处理最高,而配施 $17\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭的生物量显著低于配施 $8.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭,说明有机菜田配施低量生物炭为促进作物生长的最优模式。

(3)配施 $8.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭产量及产量水分利用率比常规施肥分别提高59.1%和75.7%的同时,硝酸盐含量显著降低。而配施 $17\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭周年产量虽增加,但显著低于配施 $8.5\ \text{t}/\text{hm}^2$ 生物炭。因此配施低量生物炭的配施模式不仅能确保有机菜心高产,而且可显著提高水分利用效率,保证菜心品质。

参 考 文 献

- 1 杨冬艳, 韩继山, 俞顺忠, 等. 宁夏露地有机菜心一年四收高产栽培技术[J]. 长江蔬菜, 2015(11): 39-41.
- 2 陈红翔, 高继红, 李琼. 宁夏水资源问题研究[J]. 水文, 2006, 26(5): 65-67.
CHEN Hongxiang, GAO Jihong, LI Qiong. Research on water resources in Ningxia[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(5): 65-67. (in Chinese)
- 3 张仁慧. 西部干旱半干旱地区水资源合理利用问题探讨[J]. 水土保持学报, 2003, 23(5): 78-81.
ZHANG Renhui. Reasonable usage issues of water resource in arid and semi-arid areas of west China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 23(5): 78-81. (in Chinese)
- 4 ANTAL M J, GRONLI M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42(8): 1619-1640.
- 5 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107-112.
WANG Honglan, TANG Xiangyu, ZHANG Wei, et al. Effects of biochar application on tilth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 107-112. (in Chinese)
- 6 ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1-2): 81-84.
- 7 AMYMARIE A D, GSCHWEND P M. Assessing the combined roles of natural organic matter and black carbon as sorbents in sediments[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(1): 21-29.
- 8 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2281-2288.
QI Ruipeng, ZHANG Lei, YAN Yonghao, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2281-2288. (in Chinese)
- 9 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113-119.
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 113-119. (in Chinese)
- 10 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?file_no=20140122&flag=1. 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)
- 11 UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 205-212.
- 12 李银坤, 郭文忠, 薛绪掌, 等. 不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3757-3765.
LI Yinkun, GUO Wenzhong, XUE Xuzhang, et al. Effects of different fertigation modes on tomato yield, fruit quality, and water and fertilizer utilization in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(19): 3757-3765. (in Chinese)
- 13 CHEN R Q, KANG S Z, HAO X M, et al. Variations in tomato yield and quality in relation to soil properties and evapotranspiration under greenhouse condition[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197: 318-328.
- 14 WILLER H, LERNOUD J. The world of organic agriculture statistics and emerging trends[M]. Nürnberg: Research Institute of Organic Agriculture, Frick and International Federation of Organic Agriculture Movements, 2014: 1-7.
- 15 MARCEL M M, KUYPER S, HANNAH K, et al. The microbial nitrogen-cycling network[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(5): 263-276.
- 16 HAIDER G, STEFFENS D, MOSER G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 237: 80-94.
- 17 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质的研究进展[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)
- 18 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.
- 19 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)
- 20 OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrient and Soil Science, 2008, 171: 591-596.

- 21 VERHEIJEN F, JEFFERY S, BASTOS A C, et al. Biochar application to soils[R]. JRC Scientific and Technical Reports, 2010.
- 22 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):1-12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180701&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigation emissions in agricultural fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1-12. (in Chinese)
- 23 MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Nutrient leaching in a Colombian savanna oxisol amended with biochar[J]. Journal of Environment Quality, 2012, 41(4): 1076-1086.
- 24 王睿垠, 魏永霞, 刘慧, 等. 生物炭对东北草甸黑土水分运动参数的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 186-194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180723&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.023.
WANG Ruiyin, WEI Yongxia, LIU Hui, et al. Influences of biochar on hydrodynamic parameters of meadow black soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 186-194. (in Chinese)
- 25 王湛, 李银坤, 王利春, 等. 生物炭配施有机肥对菜田土壤水分及水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(12): 771-779.
WANG Zhan, LI Yinkun, WANG Lichun, et al. Effects of organic fertilizer combined with biochar on soil moisture and water use efficiency in vegetable field[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(12): 771-779. (in Chinese)
- 26 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
XU Jian. Effect of biochar on soil water and salt transport[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 27 KOLB S E, FERMANICH K J, DORNBUSH M E, et al. Effect of charcoal quantity on microbial and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4):1173-1181.
- 28 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头灌溉对温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 225-229.
LI Shao, XUE Xuzhang, GUO Wenshan, et al. Effects of negative pressure irrigation on the growth, yield and quality of tomato in greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp.2): 225-229. (in Chinese)
- 29 KISHIMOTO S, SUGIURA G. Charcoal as a soil conditioner[C] // Symposium on Forest Product Research, International Achievements for the Future, 1985: 12-23.
- 30 王欣, 尹带霞, 张凤, 等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 248-257. (in Chinese)
- 31 DEENIK J L, MCCLELLAN T, UEHARA G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1259-1270.