

生物炭对亏缺灌溉下温室重壤土栽培番茄产量及品质的影响

杜兵杰,曹红霞,潘小燕,张泽宇

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:探究生物炭对亏缺灌溉下温室重壤土栽培番茄产量和品质的影响,确定番茄产量和综合品质最优的灌水量及生物炭添加量,为重壤土地地区温室番茄栽培提供灌水及生物炭施加依据。采用桶栽试验,设置 3 个生物炭添加量(0,3%,6%,按干土重的百分比计)和 3 个灌水水平(充分灌溉 W1:75%~85% θ_f ;中度亏缺 W2:55%~65% θ_f ;重度亏缺 W3:40%~50% θ_f 。 θ_f 为田间持水量),共 9 个处理。结果表明:无生物炭添加时,亏缺灌溉下番茄产量降低了 13.8%~54.0% ($P<0.05$),果实硬度、果色指数、VC、可溶性固形物、有机酸含量等营养品质指标均显著降低,果型指数、番茄红素则呈现增加的趋势,灌溉水利用效率在重度亏缺下降低了 10.9% ($P<0.05$);在充分灌溉条件下添加生物炭,番茄产量和灌溉水利用效率分别提高了 12.3%~22.0% 和 23.3%~28.6%,可溶性固形物含量降低了 6.4%~17.7% ($P<0.05$),对 VC、番茄红素、有机酸含量及外观品质无显著影响;在亏缺灌溉条件下添加生物炭不利于增产,C1W3、C2W3 处理产量较 C0W3 处理分别降低了 37.6% ($P<0.05$)、17.1% ($P>0.05$),但外观品质指标、VC、可溶性固形物均有一定幅度的提升,对灌溉水利用效率的影响表现为低添加量时降低而高添加量时提高。综合分析表明,各灌水水平下添加生物炭均能提高番茄品质的综合排名,充分灌溉下生物炭低添加量效果较好,而亏缺灌溉下高添加量较优,尤其是 C2W2 处理,番茄品质综合排名可达到充分灌溉的效果。综合考虑番茄品质、产量及灌溉水利用效率,C1W1 处理(灌水水平为 75%~85% θ_f ,施炭量为 3%)为最优处理。

关键词:番茄;生物炭;亏缺灌溉;产量;品质;温室

中图分类号:S641.2;S274 **文献标志码:**A

Effects of biochar on the tomato yield and quality in heavy loam soil in greenhouse under deficit irrigation

DU Bingjie, CAO Hongxia, PAN Xiaoyan, ZHANG Zeyu

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas/
Northwest A&F University, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objectives of this study were to explore the effects of biochar addition on the yield and quality of tomato cultivated in heavy loam soil under deficit irrigation in greenhouse, to determine the optimal amount of irrigation and biochar addition for the optimal yield and comprehensive quality of tomato, and to provide a theoretical basis for irrigation and biochar application for greenhouse tomato cultivation in heavy loam areas. Nine treatments including 3 biochar additions (0, 3%, and 6% of dry soil weight) and 3 irrigation levels: full irrigation (W1: 75%~85% θ_f), moderate deficit irrigation (W2: 55%~65% θ_f), and severe deficit irrigation (W3: 40%~50% θ_f , θ_f is the field water capacity) were set up in a bucket experiment. The results showed that the yield decreased by 13.8%~54.0%, and hardness, fruit shape index, vitamin C, soluble solids, and organic acid content of tomato significantly decreased under deficit irrigation without biochar addition, while the fruit shape index and lycopene content showed an increasing trend. Irrigation water use efficiency significantly decreased by 10.9% under severe deficit irrigation. The biochar addition increased yield and irrigation water use efficiency by 12.3%~22.0% and 23.3%~28.6%, re-

spectively, but had no significant effect on VC, lycopene, soluble solids, and appearance quality index under full irrigation. The content of soluble solids significantly decreased by 6.4%~17.7% under full irrigation with biochar addition. The biochar addition wasn't conducive to the yield improvement under deficit irrigation condition. Compared with C0W3, the yields of C1W3 and C2W3 treatments decreased by 37.6% and 17.1% ($P>0.05$), respectively, while the appearance quality index, VC, and soluble solids were improved to a certain extent. The irrigation water use efficiency decreased with low biochar addition amount and increased with high biochar addition amount under deficit irrigation. The results of comprehensive analysis showed that adding biochar under all irrigation treatments could optimize the comprehensive ranking of tomato, and the treatment with low biochar addition under full irrigation performed better, while high biochar addition was better under deficit irrigation, especially, under C2W2 treatment. Also, the comprehensive ranking of tomato achieved the result of full irrigation without the biochar addition. In conclusion, the C1W1 treatment (when the irrigation level was 75%~85% θ_f and the addition amount of biochar was 3%) resulted the best in comprehensive evaluation through the comprehensive consideration of comprehensive principal components of quality, yield, and irrigation water use efficiency.

Keywords: tomato; biochar; deficit irrigation; yield; quality; greenhouse

水分是作物生长发育必不可少的因素,缺水会影响番茄产量形成及物质积累^[1-2]。但长期以来,温室蔬菜栽培经常按照传统的高水高肥经验管理模式,虽然保证了产量,但使水分利用效率大大降低^[3-4],肥料的过量施用导致土壤富营养化、盐碱化等问题^[5],还会加剧温室气体的排放^[6-8],从而限制设施农业的健康发展。

生物炭是由生物有机材料在缺氧或低氧条件下热裂解的固体产物^[9],具有丰富的孔隙结构、巨大的比表面积且含有大量营养元素(C、N、P、K、Ca等)^[10-12]。有研究表明,生物炭可以通过改变土壤结构来提高土壤持水能力^[13-14],促进作物生长,进而提高作物产量。勾芒芒等^[15]研究发现砂壤土添加生物炭能提高土壤毛管持水量,进而促进番茄根系的发育和产量的提高;俞映惊等^[16]发现在酸性土壤中添加生物炭能缓解土壤酸化趋势,有效促进氮素的吸收转化,从而有利于维持小白菜高产并改善小白菜品质;张爱平等^[17]的研究结果表明,生物炭和氮肥配施可以显著增加水稻籽粒产量,并随生物炭用量(4 500~9 000 kg·hm⁻²)增加而增高。在澳大利亚半干旱土壤上作物也对生物炭和肥料相结合的盆栽试验显示出了积极的响应^[18]。

目前对于生物炭的研究多集中在土壤肥力贫瘠或持水性差的土壤上,生物炭与肥料配施方向的研究也屡见不鲜,而生物炭与亏缺灌溉耦合对土壤肥力较好的重壤土下番茄产量及品质的影响鲜有研究。因此,探究不同生物炭添加量对亏缺灌溉下番茄产量及品质的影响,通过综合评价方法确定在重壤土中添加生物炭的效果和可行性,可为生物炭在温室重壤土番茄栽培应用提供理论方案与技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于2019年4—8月在陕西杨凌西北农林科技大学旱区节水灌溉重点试验站(34°20'N, 108°24'E)内的温室里进行,当地海拔高度为521 m。试验期间试验站的平均气温为21.25℃,年降雨量为653 mm,日照时数为812.5 h,平均风速为1.6 m·s⁻¹。

试验采用规格一致的塑料桶(口径30 cm,底部直径25 cm,高30 cm),每桶装14 kg干土,桶内放两根PVC管,均匀打6个孔($d=2$ cm),用纱网缠住,用于灌水。桶底放有塑料托盘,防止水分损失。土壤表面铺一层珍珠岩,避免土壤板结。以番茄品种巴宝丽为试材,供试土壤取自西北农林科技大学周边0~20 cm耕作层,土壤质地为重壤土,容重为1.34 g·cm⁻³,田间持水量为23.9%(质量含水率),pH值为7.83。试验所用生物炭为苹果木炭,购于陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司,制备温度为450℃~480℃,炭化时间为8 h, pH值为9.28,容重为0.44 g·cm⁻³,总碳含量为724.11 g·kg⁻¹,总氮含量为11.56 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

设置3个灌水梯度(充分灌溉W1:75%~85% θ_f ;中度水分亏缺W2:55%~65% θ_f ;重度水分亏缺W3:40%~50% θ_f)和3个生物炭添加水平(C0:不添加;C1:3%;C2:6%)(以占干土重百分比计),共9个处理。即C0W1、C1W1、C2W1、C0W2、C1W2、C2W2、C0W3、C1W3、C2W3。每个处理重复15次,共计135桶。

土壤风干后过2 mm筛,与生物炭充分混合后

沉淀 1 周。肥料施用量按照 N、P、K 折纯量,分别为 0.240、0.132、0.210 g · kg⁻¹(按占干土重计)。磷肥一次性基施,氮肥和钾肥按照基追比为 1 : 2 的比例随灌水施入,追肥分别在第一穗果和第二穗果的果实膨大期进行。番茄于 4 月 10 日定植,定植后立即灌水至田间持水量,缓苗 10 d 左右。之后每天 8 : 00、18 : 00 采用称重法进行灌水。按照传统划分方法,将番茄生育期划分为苗期(4 月 20 日—5 月 3 日)、开花坐果期(5 月 3 日—6 月 25 日)、成熟采摘期(6 月 25 日—8 月 12 日),番茄四穗果后打顶,2019 年 8 月 12 日拉秧。

1.3 测定指标

品质:在果实成熟盛期,分别对一、二、三穗果进行品质测定,取 3 次测定的平均值。选择成熟度、大小一致,色泽相似,表面光滑的 5 个番茄,采摘后立即用水清洗,吸水纸吸水后测定番茄的外观品质(硬度、果形指数、果色指数)和营养品质(VC、番茄红素、可溶性固形物、可溶性糖、有机酸),重复 5 次取平均值。

外观品质:硬度用 FHR-5 型果实硬度计测量;游标卡尺测量番茄横径和纵径,通过公式(1)计算果型指数。

果型指数=

纵径

横径

(1)

用 SP60 色差仪在番茄周身平均选 6 个点测定颜色空间坐标 L^* 、 a^* 、 b^* ,测定 3 组取平均值,用(2)式计算果色指数。

果色指数=

$2000\ a^*$

$L^*\sqrt{a^{*2}+b^{*2}}$

(2)

营养品质:可溶性固形物用 IR200S 手持式糖度计测定;番茄红素用 EV300PC 型紫外-可见分光光度计法测定;VC 用钼蓝比色法测定;可溶性糖用硫酸-蒽酮比色法测定;有机酸用 0.1 mol · L⁻¹ NaOH 滴定法测定。

产量:在果实成熟期,随机选择 3 株,每次采摘用精度为 0.01 g 的电子秤称量并记录,通过种植密度计算最终产量。

灌溉水利用效率:根据番茄产量和累积灌溉水量计算灌溉水利用效率。

灌溉水利用效率=

产量

灌溉水量

(3)

1.4 生物炭对不同灌水水平下番茄产量和品质影响的综合分析

为综合评价生物炭对番茄产量和品质的影响,

通过 Excel 将各番茄品质指标标准化,用主成分分析的方法选出能代表番茄品质信息的综合主成分,基于品质综合主成分、产量及灌溉水利用效率,采用秩和比法对各处理进行综合排名,选出最优处理。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行整理,采用 SPSS 21.0 进行方差分析、主成分分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加量与灌溉水平对番茄产量及灌溉水利用效率的影响

由表 1 可知,亏缺灌溉降低了番茄的产量,与 C0W1 相比,C0W2、C0W3 处理的产量分别降低了 13.79%、53.95%,C0W3 与 C0W1 相比差异达极显著水平($P<0.01$)。在充分灌溉下添加生物炭能提高番茄的产量和灌溉水利用效率,与 C0W1 处理相比,C1W1 处理的番茄产量和灌溉水利用效率分别提高了 22.05%($P<0.05$)、28.62%($P<0.05$),C2W1 处

表 1 不同生物炭添加量和灌溉水平对番茄产量、灌水量及灌溉水利用效率的影响

Table 1 Effects of different amount of biochar and irrigation levels on the tomato yield and irrigation amount and irrigation water use efficiency				
灌溉水平 Irrigation level	生物炭处理 Biochar treatment	产量 Yield /(t · hm ⁻²)	灌水量 Irrigation amount /(m ³ · hm ⁻²)	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency /(kg · m ⁻³)
W1	C0	76.51bc	4470a	17.13d
	C1	98.15a	4090b	24.00a
	C2	87.26ab	3840d	22.71b
W2	C0	65.96cd	3880c	16.99d
	C1	49.56ef	3150e	15.71e
	C2	59.54de	2860f	19.62c
W3	C0	35.23fg	2380g	15.26f
	C1	21.99h	2020i	10.89g
	C2	28.20gh	2050h	15.83e
显著性检验 P 值 P value of significant test				
灌溉 Irrigation		0.000 **	0.000 **	0.000 **
生物炭 Biochar		0.409	0.000 **	0.000 **
灌溉×生物炭 Irrigation×biochar		0.000 **	0.000 **	0.000 **

注:不同小写字母表示 LSD 检验下处理间的差异显著($P<0.05$),*表示 $P<0.05$,达到显著水平,**表示 $P<0.01$,达到极显著水平,下同。

Note: Values within the same columns followed with different letters are significantly different at $P<0.05$ according to LSD test. *:significant at $P<0.05$; **: significant at $P<0.01$, the same below.

理产量及灌溉水利用效率分别提高了 12.32% ($P>0.05$)、24.57% ($P<0.05$);而在亏缺灌溉下低生物炭添加量处理显著降低了番茄产量和灌溉水利用效率,高添加量显著提高了灌溉水利用效率,而对产量无显著影响。在各灌水处理下添加生物炭均显著降低了灌水量,在各灌溉水平下与不添加生物炭相比,C1W1、C2W1、C1W2、C2W2、C1W3、C2W3 的灌水量分别减少了 8.5%、14.09%、18.81%、26.29%、15.13%、13.87%。

2.2 生物炭添加量与灌溉水平对番茄品质的影响

2.2.1 对番茄外观品质的影响 以果实硬度、果型指数、果色指数作为番茄的外观品质指标,不同生物炭添加量与灌溉水平对番茄外观品质的影响如表 2 所示。总体来看,灌溉对果实硬度、果型指数影响显著,生物炭及二者交互作用仅对果型指数影响显著。在不添加生物炭的条件下,果实硬度、果色指数均随水分亏缺程度的增加而减小,果型指数则相反。与 C0W1 处理相比,C0W3 的果实硬度降低了 17.99% ($P<0.05$)、果型指数提高了 17.56% ($P<0.05$),而对果色指数影响不显著 ($P>0.05$)。除了在重度水分亏缺下,其他各灌溉水平下添加生物炭对果实硬度、果型指数、果色指数均无显著性影响。其中 C1W3、C2W3 处理的果型指数与 C0W3 相比分别提高了 15.1% ($P<0.05$)、19.79% ($P<0.05$),C2W3 处理的果色指数较 C0W3 相比提高了 11.51% ($P<0.05$),而对果实硬度的影响不显著 ($P>0.05$)。

2.2.2 对番茄营养品质的影响 表 3 为生物炭添加量和灌溉水平对 VC、番茄红素、可溶性固形物、有

机酸、糖酸比等营养品质的影响。总体来看,灌溉对番茄红素、可溶性固形物、糖酸比影响显著,生物炭对 VC、番茄红素、可溶性固形物影响显著,二者交互作用对所有营养品质指标影响均显著。由表 3 可知,在充分灌溉下添加生物炭对 VC、番茄红素、有机酸、糖酸比均无显著影响,但可溶性固形物含量减少了 6.38%~17.66% ($P<0.05$),而在亏缺灌溉下添加生物炭显著提高了 VC 含量(C1W2 处理除外)和可溶性固形物含量,但对番茄红素(C2W2 处理除外)、有机酸和糖酸比无显著影响。其中与 C0W2 处理相比,C2W2 处理的 VC 含量增加了 29.78% ($P<0.05$),番茄红素含量减少了 30.62% ($P<0.05$)。

2.3 番茄综合品质的主成分分析

为评估分析添加生物炭对不同灌溉水平下番茄综合品质的影响,选取外观品质(硬度、果型指数、果色指数、单果重)、营养品质(VC、番茄红素、可溶性固形物、有机酸、糖酸比)等指标进行主成分分析,最后得出综合主成分进行排名。排名越靠前,番茄的综合品质越好。

各成分的特征值和方差贡献率如表 4 所示,前 3 个主成分的方差贡献率分别为 40.235%、32.187%、16.22%,累积贡献率达 88.642%,为获取到主要信息并且减少指标数量,一般将累积方差贡献率大于 85%的成分作为主成分进行综合评价,故可以用前 3 个主成分代表番茄的综合品质。

前 3 个主成分与各评价参数的成分荷载矩阵见表 5。由各自主成分荷载向量除以各自主成分特征值的算术平方根,得到各主成分的特征向量。主成分 1、2、3 的函数表达式见式(4)~(6)。

$$C_1 = 0.46X_1 - 0.158X_2 + 0.325X_3 + 0.361X_4 - 0.491X_5 + 0.201X_6 + 0.441X_7 - 0.225X_8 \tag{4}$$

$$C_2 = -0.236X_1 + 0.542X_2 + 0.219X_3 + 0.178X_4 + 0.112X_5 + 0.554X_6 + 0.232X_7 + 0.445X_8 \tag{5}$$

$$C_3 = -0.097X_1 + 0.24X_2 - 0.523X_3 + 0.538X_4 + 0.307X_5 - 0.097X_6 + 0.304X_7 - 0.417X_8 \tag{6}$$

式中, $X_1 \sim X_8$ 分别表示硬度、果型指数、果色指数、VC、番茄红素、可溶性固形物、有机酸、糖酸比的标准化的数据。

由式(4)~(6)可计算出各处理的主成分,以主成分的方差贡献率为权重,用(7)式计算各处理的综合主成分(Y)并排名,结果如表 6 所示。

表 2 生物炭添加量和灌水水平对番茄外观品质的影响
Table 2 Effect of different biochar amounts and irrigation level on tomato appearance quality

灌溉水平 Irrigation level	生物炭处理 Biochar treatment	硬度 Firmness /(kg·cm ⁻²)	果型指数 Fruit shape index	果色指数 Fruit color index
W1	C0	4.67a	0.765c	38.871ab
	C1	4.78ab	0.818bc	36.150b
	C2	4.50ab	0.881bc	37.303ab
W2	C0	3.94ab	0.878bc	35.215b
	C1	3.91ab	0.837bc	36.795ab
	C2	4.61ab	0.835bc	36.349b
W3	C0	3.83b	0.928b	35.765b
	C1	4.13ab	1.093a	35.645b
	C2	3.81b	1.157a	40.418a
显著性检验 P 值 P value of significant test				
灌溉 Irrigation		0.037 *	0.000 **	0.354
生物炭 Biochar		0.99	0.005 **	0.173
灌溉×生物炭 Irrigation×biochar		0.489	0.008 **	0.076

$Y = \eta_1 C_1 + \eta_2 C_2 + \eta_3 C_3$ (7)

式中, η_1 、 η_2 、 η_3 分别为 40.235%、32.187%、16.22%。

不同处理的番茄品质综合主成分及排名结果(表 6)表明,C2W3 处理的综合主成分最高,C1W3

处理次之,分别为 0.89、0.793,相比 C0W3 处理增加了 197.79%和 186.89%。C2W2 处理排名第三,较 C0W2 处理增加了 298.32%,而 C1W1、C2W1 处理较 C0W1 有所降低。说明在亏缺灌溉下添加生物炭能改善番茄的综合品质。

表 3 生物炭添加量和灌溉水平对番茄营养品质的影响

Table 3 Effect of different biochar amounts and irrigation level on tomato nutritional quality						
灌溉水平 Irrigation level	生物炭处理 Biochar treatment	VC /(mg · 100g ⁻¹)	番茄红素 Lycopene/(μg · g ⁻¹)	可溶性固形物 Soluble solid/%	有机酸 Organic acid/(g · 100g ⁻¹)	糖酸比 Sugar-acid ratio/%
W1	C0	21.163cd	30.867de	4.70e	0.320b	14.690abc
	C1	19.533de	36.967cde	4.40d	0.287b	15.74abc
	C2	22.158bc	28.433e	3.87e	0.270b	14.232bc
W2	C0	18.927de	59.867a	3.13g	0.207b	14.983abc
	C1	18.352e	49.200ab	3.63f	0.283b	12.769c
	C2	26.958a	41.533bcd	4.33d	0.347b	12.653c
W3	C0	14.237f	51.833ab	4.47d	0.250b	17.706ab
	C1	23.887b	45.367bc	4.87b	0.330b	14.754abc
	C2	23.887b	52.200ab	5.50a	0.293b	18.606a
显著性检验 <i>P</i> 值 <i>P</i> value of significant test						
灌溉 Irrigation		0.524	0.000 **	0.000 **	0.088	0.000 **
生物炭 Biochar		0.000 **	0.005 **	0.000 **	0.002	0.276
灌溉×生物炭 Irrigation×biochar		0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.004 **

表 4 番茄品质主成分的特征值、方差贡献率及累计贡献率

Table 4 Characteristic value, variance contribution rate and cumulative contribution rate of principal components of tomato quality						
成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extraction sums of the squared loadings		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution	方差累积贡献率/% Cumulative variance contribution	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution	方差累积贡献率/% Cumulative variance contribution
1	3.219	40.235	40.235	3.219	40.235	40.235
2	2.575	32.187	72.422	2.575	32.187	72.422
3	1.298	16.22	88.642	1.298	16.22	88.642
4	0.434	5.425	94.067			
5	0.322	4.03	98.096			
6	0.15	1.875	99.971			
7	0.002	0.026	99.991			
8	0	0.003	100			

表 5 番茄品质主成分与番茄品质指标的成分荷载矩阵

Table 5 Principal components of tomato quality and component load matrix of tomato quality indexes

评价参数 Evaluation parameter	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3
硬度 Firmness	0.825	-0.378	-0.11
果型指数 Fruit shape index	-0.284	0.869	0.274
果色指数 Fruit color index	0.583	0.351	-0.596
VC	0.648	0.285	0.613
番茄红素 Lycopene	-0.881	0.18	0.35
可溶性固形物 Soluble solid	0.36	0.889	-0.111
有机酸 Organic acid	0.792	0.373	0.346
糖酸比 Sugar-acid ratio	-0.404	0.714	-0.475

表 6 不同处理的番茄品质综合主成分及排名

Table 6 Comprehensive principal component and rank of fruit quality of tomato in different treatments

处理 Treatment	C1	C2	C3	综合主成分 Comprehensive principal component	排名 Rank
C0W1	2.355	-0.244	-1.523	0.622	4
C1W1	0.610	-0.823	-0.529	-0.105	6
C2W1	1.337	-0.765	-0.805	0.161	5
C0W2	-2.892	-1.622	0.904	-1.539	9
C1W2	-0.946	-1.393	0.429	-0.759	7
C2W2	1.918	-0.633	1.282	0.776	3
C0W3	-2.158	0.584	-1.130	-0.864	8
C1W3	0.332	1.451	1.184	0.793	2
C2W3	-0.558	3.445	0.037	0.890	1

2.4 番茄品质综合主成分代表性检验

为验证番茄品质综合主成分对各品质指标的代表性,采用非参数检验 K-S 方法进行正态检验,选择 95%的置信区间,结果显示显著性 $P<0.05$,说明品质综合主成分服从正态分布,具有良好的代表性,可用品质综合主成分代表所有的品质指标。

2.5 番茄综合品质、产量、灌溉水利用效率的综合评价

亏缺灌溉能提高番茄的品质,但同时伴随着产量的降低。以番茄品质综合主成分、产量及灌溉水利用效率为评价指标,用秩和比法(RSR)进行综合评价。

对品质综合主成分、产量及灌溉水利用效率进行排秩(R),仅以秩 R 进行计算,认为 3 个指标高优,按升序排秩,最小值排为 1。将各指标的 R 值相加,得到 ΣR , ΣR 值最大者最优。按下式计算 RSR 值:

$$RSR = \frac{\Sigma R}{mn}$$

(8)

式中, m 为指标个数,为 3; n 为参加排序的单位数,为 9。

RSR 值越接近于 1,说明综合评价结果越优。各处理的 RSR 值及排序结果如表 7 所示,结果表明,C1W1 处理最优,其次为 C2W1,C0W1 与 C2W2 处理并列第三。由表中数据可以看出,添加生物炭能提高各灌水处理下番茄综合排名(C1W2 除外)。

表 7 各处理 3 项指标的秩 R 及排序结果

Table 7 R and ranking results of three indexes with each treatment

处理 Treatment	品质综合主成分 Quality comprehensive principal component	产量 Yield	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency	ΣR	RSR	排名 Rank
C0W1	6	7	6	19	0.70	3
C1W1	4	9	9	22	0.81	1
C2W1	5	8	8	21	0.78	2
C0W2	1	6	5	12	0.44	5
C1W2	3	4	3	10	0.37	6
C2W2	7	5	7	19	0.70	3
C0W3	2	3	2	7	0.26	7
C1W3	8	1	1	10	0.37	6
C2W3	9	2	4	15	0.56	4

3 讨 论

有研究表明在土壤中添加生物炭能够提高作物产量^[19-22]。本研究发现,生物炭两种添加量在充分灌溉下均能提高番茄产量,相对于无生物炭添加的 C0W1 处理分别可增产 22.05%、12.32%,且分别

节水 8.42%、13.99%;而在亏缺灌溉下添加生物炭均降低了番茄产量,与无生物炭添加相比,C1W2、C1W3 处理产量降低了 24.78%、39.62% ($P<0.05$)。充分灌溉下添加生物炭显著提高了灌溉水利用效率,而亏缺灌溉下低生物炭添加量下的灌溉水利用效率显著低于其他处理,这是因为虽然添加生物炭的灌水量有所降低,但相应的产量也大幅下降,从而导致灌溉水利用效率并没有提高。生物炭对产量及灌水量的影响机制可能有以下几种:(1)由于生物炭本身的多孔结构,改变了土壤的孔隙分布,增加了土壤的微孔孔隙率,从而促进根系的生长,有利于提高产量。而在亏缺灌溉下,由于生物炭巨大的比表面积,对于水分的吸附作用更强,导致根系吸水速率小于植株蒸腾速率,从而抑制了干物质的积累;(2)生物炭含有丰富的营养物质,特别是碳含量极其丰富。添加到土壤后改变了 C/N,从而影响了微生物的调节作用,进而影响产量;(3)生物炭自身带入到土壤中丰富的养分(氮、磷、钾、钙、镁等)提高了土壤溶液浓度,在亏缺灌溉下导致番茄根系难以吸收水分和养分;(4)在土壤水分一定时,添加生物炭提高了土壤水吸力,且随着生物炭添加量增加,土壤水吸力同步增加^[23]。说明添加生物炭增加了土壤的持水能力,减少了无效的土壤蒸发,因此灌水量随着生物炭添加量的增加逐渐减小。

研究表明添加生物炭能提高果实品质^[24-27]。本研究发现在亏缺灌溉条件下添加生物炭果实硬度、果型指数、果色指数均有一定幅度的提升,与 C0W3 处理相比,C1W3、C2W3 处理的果型指数提高了 15.10%~19.19% ($P<0.05$),VC、可溶性固形物分别增加了 40.40%、8.21%~18.73%,C2W3 处理的果色指数提高了 11.51% ($P<0.05$)。充分灌溉下添加生物炭显著降低了可溶性固形物含量,对番茄外观品质无显著性影响,与 Bonetti 等^[28]的研究结果一致。本研究在充分灌溉条件下添加生物炭对番茄品质无显著影响,可能是在生育后期由于植株蒸腾耗水量增多,导致植株的营养生长优先于生殖生长,而未向果实营养积累。

通过主成分分析及秩和比法综合评价发现,在各灌水水平下添加生物炭均能优化番茄的综合排名,其中 C1W1 处理最优,C2W1 次之,C0W3 处理最差。出现这种情况的原因可能是因为亏缺灌溉虽然提高了番茄的综合品质,但产量有所下降,灌溉水利用效率未显著提升,而添加生物炭并没有弥补水分亏缺对产量的影响。值得注意的是,秩和比法评价结果显示,C2W2 处理的综合排名与 C0W1 处

理并列第三,说明在中度水分亏缺下添加 6%生物炭能达到充分灌溉的效果,这可为生物炭在水资源紧缺、无法实现充分灌溉的重壤土地区,确保番茄的优质稳产实施提供了理论依据。

4 结 论

1) 亏缺灌溉显著降低了番茄产量、累积灌水量,使果实硬度、果色指数、VC、可溶性固形物、有机酸含量显著降低,而果型指数、番茄红素则呈现增加的趋势,灌溉水利用效率在重度亏缺下显著降低。

2) 充分灌溉条件下添加生物炭可提高番茄产量和可溶性固形物含量,而在亏缺灌溉条件下添加生物炭不利于增产,但有利于外观品质、VC、可溶性固形物的提升。

3) 各灌水处理下添加生物炭均能提高番茄的综合排名。充分灌溉下 3%添加量的影响效果优于 6%添加量,而亏缺灌溉下 6%添加量的效果更好,但最佳添加量仍需进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 宋兵,高超丹,庄克云. 番茄产量及水分利用效率对灌水的响应[J]. 河南农业科学, 2018, 47(3):92-95.

[2] Coyago-Cruz E, Meléndez-Martínez A J, Moriana A, et al. Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes [J]. Agricultural Water Management, 2018, 213: 212-221.

[3] 马守臣,张伟强,段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8):9-14.

[4] 张锦源,徐欣,陈一民,等. 减水和减施化肥对设施黑土菜田茄子产量及水分利用率的影响[J]. 土壤与作物, 2018, 7(4):374-379.

[5] 欧阳萍,王俊. 农业环境污染治理初探[J]. 江西科学, 2015, 33(1):138-142.

[6] 张志勇,于旭昊,熊淑萍,等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020,39(2):418-428.

[7] 田昌,周旋,黄思怡,等. 控释尿素减施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及经济效益的影响[J]. 生态环境学报, 2019,28(11): 2223-2230.

[8] 郭腾飞,梁国庆,周卫,等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,22(2):337-345.

[9] 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]. 农业机械学报, 2018,49(7):1-12.

[10] 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.

[11] 马超然,张绪超,王朋,等. 生物炭理化性质对其反应活性的影响[J]. 环境化学, 2019,38(11):2425-2434.

[12] 韩晓日,葛银凤,李娜,等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4):392-398.

[13] 勾芒芒,屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013,(5):1-5.

[14] 陈温福,张伟明,孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014,33(5):821-828.

[15] 勾芒芒,屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013,22(8):1348-1352.

[16] 俞映琼,薛利红,杨林章,等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2015,52(4):759-767.

[17] 张爱平,刘汝亮,高霁,等.生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1352-1360.

[18] Chan K Y, Van Z L, Meszaros I. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46(5):437-444.

[19] 孙爱华,华信,叶晓思,等. 施加生物炭对节水灌溉水稻生长特征及产量影响[J]. 节水灌溉, 2016,(6):6-9.

[20] Saqib Salleem Akhtar, Li G T, Andersen M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138:37-44.

[21] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant Soil, 2012,351(12):263-275.

[22] 张娜,李佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014,33(8):1569-1574.

[23] 包维斌,白一茹,赵云鹏,等. 生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J]. 土壤通报, 2018,49(6): 1326-1332.

[24] Agbna G H D, She D L, Liu Z P, et al. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato[J]. Scientia Horticulturae, 2017,222:90-101.

[25] 王湛,李银坤,王利春,等. 生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业机械学报, 2018,49(12):273-280.

[26] 邵光成,吴世清,房凯,等.生物炭添加提高渍水条件下番茄产量改善品质[J]. 农业工程学报, 2019,35(19): 160-167.

[27] 张瑞花,兰超杰,刘雯,等. 生物炭对反季节露地樱桃番茄生长及产量品质的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14): 4831-4839.

[28] Petrucci R, Bonetti A, Traversi M L. Influence of biochar application on nutritional quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Crop & Pasture Science, 2015,66(7):1071-1081.