

日光温室起垄内嵌式栽培基质配比对甜椒根区 温度和植株生长及产量的影响

李宗耕 杨其长 刘文科* 查凌雁 张玉彬

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

摘要 为探究起垄内嵌式栽培基质配比对甜椒生长和根区温度的影响,在日光温室中以土壤栽培为对照,共设置4种不同基质配比(体积比):草炭:蛭石:珍珠岩=1:1:1、2:1:1、3:1:1和3:2:1。结果表明:根区基质温度受两侧土壤温度的影响,与两侧土壤温度呈极显著相关;不同基质配比根区温度日变化规律不一致,但日平均温度无显著差异;4种基质配比的根区昼夜平均温差均比土壤低1.0~2.0℃。基质配比对不同生育阶段甜椒的株高、茎粗和SPAD值没有显著性影响,但2:1:1配比处理能显著提高甜椒的干物质量。4种基质栽培的甜椒产量均高于土壤,其中2:1:1配比处理产量最高为6.46 kg/m²,比土壤高103.1%。总而言之,起垄内嵌基质栽培能够提高根区温度的缓冲能力和稳定性;不同基质配比对根区温度影响不显著,但草炭:蛭石:珍珠岩=2:1:1基质配比能够显著促进甜椒干物质量积累和产量的提高,更适合应用于日光温室甜椒生产。

关键词 日光温室;起垄内嵌栽培;基质配比;甜椒;根区温度

中图分类号 S625.4

文章编号 1007-4333(2019)01-0100-08

文献标志码 A

Effects of substrate composition on the root zone temperature of soil ridged substrate-embedded cultivation and sweet pepper growth

LI Zonggeng, YANG Qichang, LIU Wenke*, ZHA Lingyan, ZHANG Yubin

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/ Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Soil ridged substrate-embedded cultivation (SSC) with different substrate ratios (peat : vermiculite : perlite = 1 : 1 : 1, 2 : 1 : 1, 3 : 1 : 1, and 3 : 2 : 1) were used for planting sweet pepper in Chinese solar greenhouse to explore its effect on the growth and root zone temperature of sweet pepper. The results showed that root zone substrate temperature was significantly affected by soil temperature on both sides. The substrate temperature daily variations of different substrate ratios were different, but the difference of diurnal average temperature was not significant. The temperature differences between day and night of SSC with four substrate ratios were approximately 1.0–2.0 °C lower than soil. The substrate ratio had no significant effect on the plant height, stem diameter and SPAD of sweet pepper in different growth stages. But 2 : 1 : 1 substrate ratio significantly increased the dry mass of sweet pepper compared with other substrate ratios. The yield of sweet pepper cultivated in SSC with different substrate ratios was all higher than that of sweet pepper cultivated in soil, among them 2 : 1 : 1 substrate ratio had the highest yield (6.46 kg/m²) and was 103.1% higher than that of the soil. In conclusion, SSC improved the buffer capacity and stability of root zone temperature. Substrate ratio had no significant effect on root zone temperature. However, 2 : 1 : 1 substrate ratio could remarkably improve the dry mass and yield of sweet pepper, indicating that 2 : 1 : 1 substrate ratio was more suitable for the production of sweet pepper in solar greenhouse.

Keywords Chinese solar greenhouse; SSC; substrate ratio; sweet pepper; root zone temperature

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目课题(2016YFD0801001);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目
第一作者: 李宗耕, 硕士研究生, E-mail: lizonggeng93@163.com

通讯作者: 刘文科, 研究员, 主要从事设施园艺营养与光温调控工程研究, E-mail: liuwenke@caas.cn

日光温室作为我国设施农业生产中的主要形式,在解决我国北方地区冬季新鲜蔬菜供应,增加农民收入和丰富“菜篮子”等方面做出了巨大贡献^[1]。但由于日光温室传统土壤栽培高强度,高集约化的生产方式以及大水大肥的栽培管理模式,造成了养分利用率低,土壤次生盐渍化和土壤连作障碍等严重问题,降低了作物的品质和产量^[2-4]。近年来,随着无土栽培技术的发展,基质栽培的研究受到了广泛的关注。无土基质能够给作物提供适宜的生长条件,起到支持和固定植株的作用,充当水分和养分的载体^[5],有效解决水、气和养分之间的矛盾,充分发挥作物的潜力,同时能够减少土传病害,克服土壤连作障碍、土壤次生盐渍化等问题,实现水肥地高效吸收,缩短生育期^[6-8]。

在冬季日光温室生产中,单一的基质栽培由于保温性差,致使吸热、蓄热和保温能力较差而使根区温度环境稳定性差,不利于抵抗冬季低温胁迫^[9]。针对上述问题,本研究提出了一种新型的栽培方式——起垄内嵌式基质栽培(Soil ridged substrate-embedded cultivation, SSC),即将基质嵌入到土垄中进行栽培。SSC新型栽培方法将土壤栽培与无土栽培结合,不但可充分发挥无土栽培的高产高效优势,还充分利用了土垄的蓄热保温性能,且不同于传统的地上筑槽基质栽培,方便操作,节省建筑材料的使用成本。前期试验表明,在低温环境下SSC栽培能够有效提高根区温度的稳定性,增强根区温度的缓冲能力,并能提高甜椒产量^[10],而在前期的研究中并为探究基质比对根区温度和作物生长的影响。

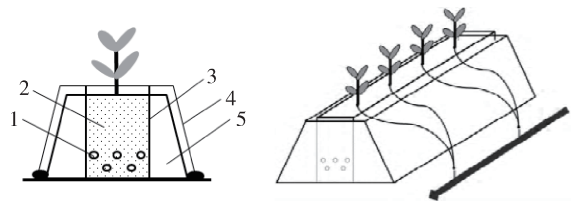
基质是影响蔬菜生长发育的重要因素。大量研究表明,适宜的基质配比能够对栽培作物的生长具有积极的作用,有利于作物生长,促进干物质积累,提高作物的光合能力和最终产量^[11-13]。并且宋晓晓等^[14-16]表明不同基质配比能够提高蔬菜中的Vc含量、可溶性蛋白和还原糖含量,降低亚硝酸盐含量,提高蔬菜品质。在以往的基质配比研究中更多的是集中在秸秆和菇渣等有机型基质中,而对草炭、蛭石和珍珠岩三者配比的研究较少。此外,有研究表明蛭石具有提高地温和保温的作用^[17],而基质对根区温度的影响未见报道。本研究采用起垄内嵌基质栽培种植甜椒探究草炭、蛭石和珍珠岩三者不同配比对冬季日光温室中根区温度和甜椒生长的影响,以期筛选出适合日光温室冬季蔬菜生产的基质配方,为新型栽培方式的推广提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验在北京市顺义区大孙各庄镇的日光温室中进行,温室东西向长60 m,跨度8 m,脊高3.8 m。试验小区东西向长16 m,宽3 m,小区距温室最南端2 m,距西侧山墙4 m。供试作物为甜椒(*Capsicum annuum* L.),品种为‘海丰16号’(北京海花生物科技有限公司),采用穴盘育苗,育苗时间为2017年9月13日,两叶一心时移栽定植,定植时间为2017年10月28日。

甜椒栽培采用起垄内嵌式基质栽培(SSC)方式,全营养液滴灌方法(Hoagland营养液配方)。SSC栽培方式为:铁丝网槽内(长×宽×高=3.0 m×0.10 m×0.15 m)铺上厚度为0.12 mm塑料薄膜,在塑料薄膜侧面距离底部5 cm打通气孔,孔径1 cm,孔距10 cm,膜的侧面下方打孔便于水热交换,将铁丝网槽沿南北方向摆放整齐,装入按配比均匀混合的栽培基质;然后在栽培槽四周按照一定的标准培土起垄,将栽培槽嵌在土垄中,外侧培土后覆盖地膜,形成起垄内嵌式基质栽培(SSC)模式,具体结构见图1。



1. 通气孔 Venthole; 2. 基质 Substrate; 3. 铁丝网槽 Groove; 4. 地膜 Plastic film; 5. 土壤 Soil
图1 垄嵌式基质栽培法(SSC)横切面和俯视图

Fig. 1 Cross section and aerial view of SSC for solar greenhouse

1.2 试验设计

试验以土壤栽培为对照,设置4种不同的基质配比(体积比):配比1为草炭:蛭石:珍珠岩=1:1:1,配比2为草炭:蛭石:珍珠岩=2:1:1,配比3为草炭:蛭石:珍珠岩=3:1:1,配比4为草炭:蛭石:珍珠岩=3:2:1,每个处理重复3次。每条垄长3.0 m,垄高0.15 m,垄上底宽0.20 m,垄下底宽0.40 m,处理内行距为0.20 m,处理间行距为0.40 m,定植株距为0.30 m,每垄定植10株甜椒,并在试验小区两侧设置保护行。

1.3 测定方法

1.3.1 仪器布置

试验采用美国生产的 CR1000 数据采集器和热电偶线来采集各处理温度数据,温度测点分别布置在每个处理栽培垄根区基质和两侧土壤的南、中和北部 3 个不同的部位,埋设深度均为 5 cm;另外在日光温室内设置 2 个测点,用来测量室内空气温度,悬挂高度为 2.5 m,在室外设置 1 个测点来测定室外温度的变化,悬挂高度为 2.5 m;室内外测点置于辐射罩内,避免太阳直射。根据日光温室保温被开闭,设定 08:31—17:00 为白天,17:01—08:30(次日)为夜间。选取 2018 年 1 月 1—5 日的数据进行分析。

1.3.2 理化性质

4 种不同配比基质理化性质测定方法参照荆延德法^[18]。

1.3.3 生长指标

每个处理随机选取 5 株甜椒测定各阶段生长指标,采用游标卡尺测定甜椒茎粗,直尺测定株高,SPAD502 叶绿素含量测定仪测定甜椒叶绿素值。

1.3.4 干物质量

在甜椒拉秧时,将选取的 5 株甜椒的根、茎、叶各器官分开,然后用电热鼓风干燥箱(DHG-9620-A)

于 80 °C 杀青,烘干至恒质量,记录各器官的干质量。

1.3.5 产量

分别于 2018 年 1 月 10 日、1 月 31 日、2 月 21 日、3 月 14 日和 4 月 4 日分 5 次采摘成熟果实。每个处理随机选取 5 株取样,统计 5 次采摘果实鲜重之和,即为试验整个阶段单株甜椒产量,并根据种植密度和面积,计算单位面积产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 件处理数据, GraphPad Prism 6.0 软件绘图,并采用 SAS 8.2 软件进行数据统计分析。通过人为划分的白天和夜间计算 5 d 中每天白天平均温度、夜间平均温度、最高温和最低温,并进行统计分析;此外对以上的 4 项温度指标取 5 d 的平均值进行分析比较。

2 结果分析

2.1 不同基质配比理化性质

表 1 反应了 4 种不同基质配比混合基质的理化性质,从表中可以看出不同基质配比之间的各项理化性质相差不大。总的来看,4 种基质配比的 pH、EC 值和容重均处于适宜作物生长的范围内,但配比 1 和配比 2 的总孔隙度要优于配比 3 和配比 4,更有利于作物生长^[19]。

表 1 不同基质配比理化性质

Table 1 The physicochemical properties of different substrate ratios

处理 Treatment	pH	EC/(mS/cm)	容重/(g/cm ³) Volume density	总孔隙度/% Total porosity	通气孔隙/% Aeration pore	持水孔隙/% Water holding pore
配比 1	6.47±0.02 a	0.225±0.004 b	0.29±0.01 b	60.30±2.50 a	9.34±0.88 a	50.97±2.94 a
配比 2	6.36±0.04 b	0.265±0.005 a	0.35±0.01 a	61.05±5.32 a	6.13±1.42 ab	54.93±6.87 ab
配比 3	6.22±0.05 c	0.265±0.005 a	0.36±0.00 a	55.41±2.31 ab	6.62±0.27 ab	48.79±4.31 ab
配比 4	5.88±0.05 d	0.254±0.006 c	0.30±0.00 b	48.10±2.48 b	3.88±2.00 b	44.22±1.79 b

注:同组数据上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 日光温室室内外环境与栽培垄根区温度变化

图 2 反映了日光温室室内外空气温度和不同基质配比根区温度的变化情况。从图 2 可以看出室内外的温度变化比较剧烈,两者呈现同升同降的变化趋势。室内室外温度在 7:00 左右出现最低温,在 13:00 左右出现最高温;连续 5 d 中室外昼夜平均温度为 4.6 °C,最低温平均值为 -11.1 °C,最高温平均值为 2.9 °C;室内温度的昼夜平均值为 14.2 °C,最

低温平均值为 8.2 °C,最高温平均值为 27.5 °C。室外温度波动为 -10.0~10.0 °C,室内温度为 10.0~35.0 °C。

由图 2 可知,不同基质配比栽培垄根区温度变化存在差异。在白天高温时段,以配比 3 根区温度最高,最高温的平均值为 20.9 °C,以配比 2 根区温度最低,最高温平均值为 19.8 °C;夜间低温时段以配比 2 根区温度较高,最低温平均值为 13.2 °C,配

比 1 根区温度最低,最低温平均值为 12.9 °C。5 个处理中根区夜间平均温度以土垄最低,为 15.5 °C,以配比 4 最高为 16.1 °C;白天平均温度以配比 4 最低为 16.2 °C,以土垄最高为 17.4 °C。连续 5 d 中土壤栽培、配比 1、配比 2、配比 3 和配比 4 各处理的

根区最低温度的平均值分别为 13.0、12.9、13.2、13.1 和 13.2 °C;最高温度的平均值为 20.1、20.3、19.8、20.9 和 20.5 °C;白天温度的平均值为 17.4、16.6、16.3、16.7 和 16.2 °C;夜间温度的平均值为 15.1、15.8、15.7、16.0 和 16.1 °C。

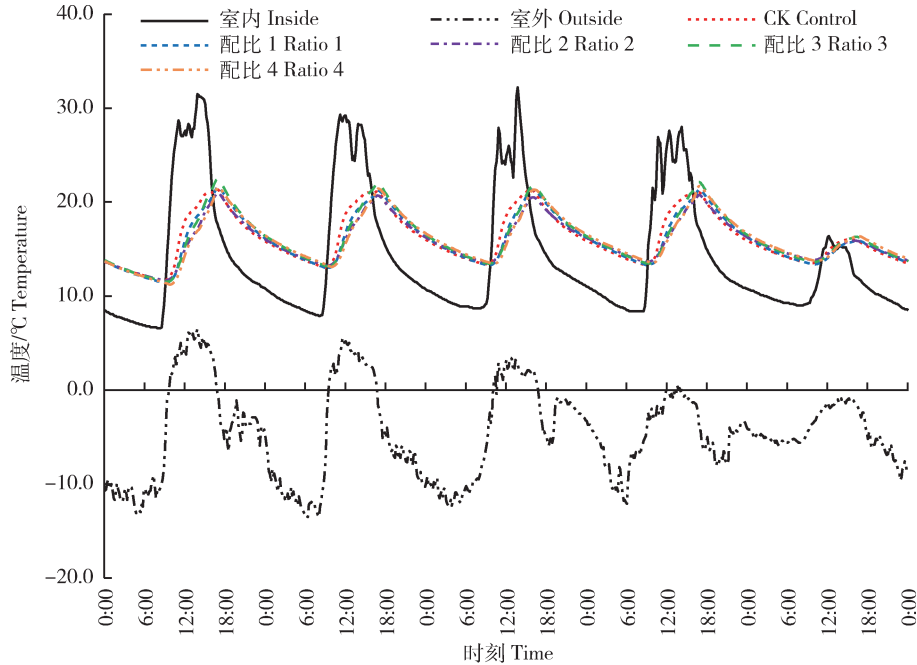


图 2 日光温室室内外环境与不同基质配比根区温度变化

Fig. 2 Temperature changes of indoor and outdoor in Chinese solar greenhouse

2.3 日光温室 SSC 栽培根区温差变化

图 3 反映土壤和 4 种不同基质配比栽培垄根区昼夜平均温差和最高温平均值与最低温平均值差值大小变化。从图 3 中可以看出昼夜温差以土壤栽培最高为 1.9 °C,以配比 4 最低为 0.1 °C。最高温的平均值与最低温的平均值的差值没有统一的变化规

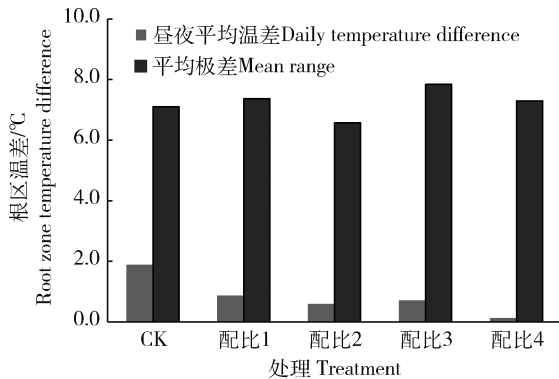


图 3 基质配比对栽培垄根区温差的影响

Fig. 3 Effect of matrix composition on root zone temperature difference of cultivated ridge

律,其中以配比 3 差值最大为 7.8 °C,以配比 2 差值最小为 6.6 °C,各处理差值由大到小依次为:配比 3>配比 1>配比 4>土壤>配比 2。

2.4 SSC 栽培垄东西两侧土壤温度变化

由图 4 可知,相同时刻不同处理栽培垄根区两侧土壤温度变化表现不同。各处理东侧土壤温度变化为:白天高温时以配比 4 温度最高,配比 2 温度最低,夜间时刻则呈现相反的趋势。各处理西侧土壤温度变化表现为,白天时刻以配比 1 温度最高,以配比 4 温度最低;夜间时刻以配比 4 温度最高,配比 3 温度最低。5 d 中 CK、配比 1、配比 2、配比 3 和配比 4 东侧土壤最低温平均值依次为 13.4、13.6、13.6、13.5 和 13.2 °C;最高温平均值依次为 19.5、19.3、19.2、19.6 和 19.9 °C。CK、配比 1、配比 2、配比 3 和配比 4 西侧土壤最低温平均值为 14.0、13.6、13.7、13.1 和 14.3 °C;最高温平均值为 19.8、20.7、20.5、19.9 和 19.5 °C。CK、配比 1、配比 2、配比 3 和配比 4 东侧土壤白天平均温度为 17.1、17.4、

16.7、17.3 和 17.7 °C；夜间温度平均值为 15.7、15.7、15.8、15.8 和 15.5 °C；西侧土壤白天温度的平

均值为 17.2、17.6、17.4、16.8 和 17.2 °C；西侧土壤夜间温度平均值为 15.9、15.7、15.7、15.2 和 16.1 °C。

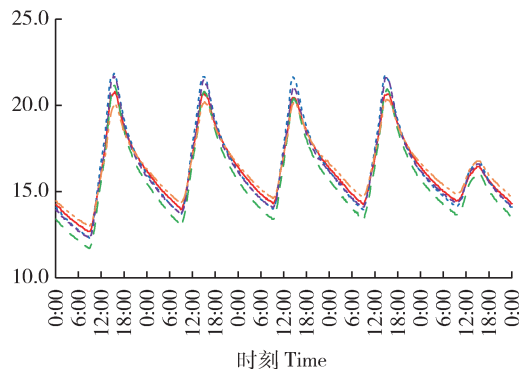
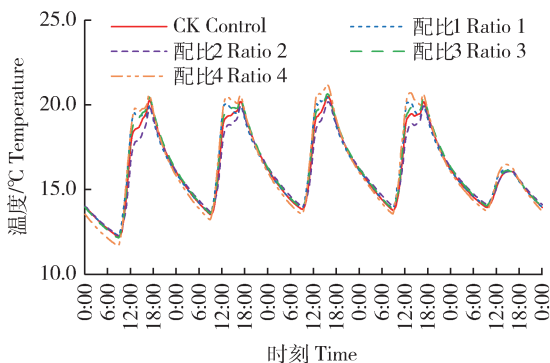


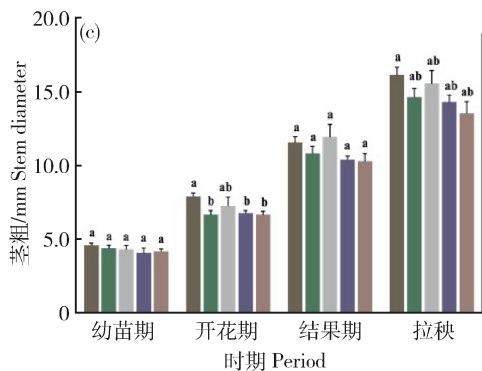
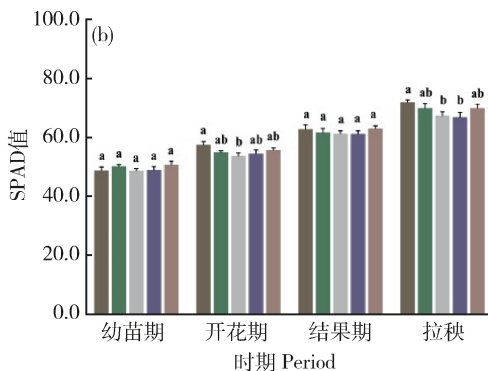
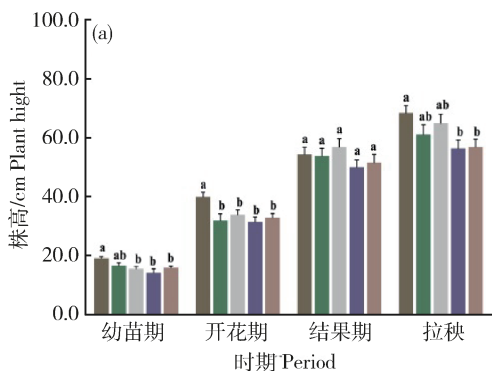
图4 基质配比对栽培垄东侧(E)和西侧(W)土壤温度变化的影响

Fig. 4 Effects of substrate composition on soil temperature change in the east side and west side of cultivation ridge

2.5 SSC栽培基质比对甜椒生长的影响

图5反映了基质比对甜椒不同生育时期株高、茎粗和叶绿素值变化的影响。由图5中可以看出,随着生育期的推进,甜椒株高、茎粗和SPAD值呈现逐步增加的趋势,但在相同的生育期内,不同生长指标之间的变化存在一定差异。相比与前一个生育时期甜椒株高均所增加,但是在不同的生长阶段,株高的增长率不同,其中幼苗期到开花期株高的增长率最大,而后随着生育期的延长,株高的增长速率逐渐降低;而在甜椒的不同生长阶

段,均以CK处理的株高相对较高,并且不同基质比对甜椒株高的影响差异不显著。从图5中可以看出,在甜椒的整个生育阶段内,不同基质比对甜椒茎粗的影响没有显著性差异;而与株高的增长率不同的是茎粗在结果期之前均能保持一个稳定且快速的的增长,而在结果期后增长率显著降低。在甜椒的整个生育阶段内,各处理甜椒叶片SPAD值均呈现一个低速稳定的增长,并且不同基质比对叶片SPAD值的影响差异不显著。



处理 Treatment

- CK Control
- 配比3 Ratio 3
- 配比1 Ratio 1
- 配比4 Ratio 4
- 配比2 Ratio 2

图5 基质比对甜椒株高、茎粗和SPAD值的影响
Fig.5 Effects of substrate composition on plant height, stem diameter and SPAD of sweet pepper

2.6 SSC栽培不同基质比对甜椒器官干物质分配和产量的影响

表2反映了不同基质比对甜椒各器官干物质分配和产量的影响。由表2中可知,在甜椒根、茎和叶3个不同部位中以茎秆干物质分配最多;并且在0.05水平下,根、茎、叶的干物质质量呈极显著相关。对照处理中的干物质质量较试验组各处理高,但产

量为各处理中最低;试验组中各处理以配比2甜椒植株干物质质量最高,以配比4干物质质量最低,二者之间差异显著,而从表2中可以看出,甜椒产量以对照最低,以配比2最高,两者之间差异显著;配比1、配比2、配比3和配比4处理的甜椒产量较对照分别提高了50.0%、103.1%、28.1%和65.6%,说明基质栽培可以促进产量的提高。

表2 基质比对甜椒植株干物质分配和产量的影响

Table 2 Effects of substrate composition on dry matter distribution and yield of sweet pepper

处理 Treatments	质量/g Mass				产量/(kg/m ²) Yield
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	总干物 Total dry	
CK	44.9±4.2 a	40.0±4.8 ab	15.9±1.0 a	100.8±9.8 a	3.24±0.4 b
配比1	29.0±2.4 bc	31.5±3.0 bc	10.0±0.6 c	70.5±5.7 b	4.76±0.1 ab
配比2	37.8±1.8 ab	45.3±2.9 a	15.0±1.5 ab	98.0±5.2 a	6.46±0.8 a
配比2	29.4±3.6 bc	31.1±2.7 bc	13.7±1.6 abc	74.2±7.7 b	4.05±0.7 b
配比4	27.5±1.3 c	28.6±1.8 c	11.0±1.2 c	67.0±3.9 b	5.25±0.7 ab

3 结论与讨论

混合基质是由2种及2种以上的基质按照特定比例混合而成的,能够克服单一基质的物理性质不适宜,充分发挥各组分的优点,相互补充,从而使基质更适宜作物生长,因而广泛应用于生产实践中^[20]。在基质栽培中,草炭、蛭石和珍珠岩是应用较为广泛且栽培技术较为成熟的3种基质,但三者的理化性质上存在较大的差异。草炭为有机基质,具有质地细腻,保水保肥能力强等优点^[21],能够增加基质的渗透能力,具有抵抗养分流失和酸碱骤变的能力,是公认地最适宜的栽培基质。蛭石和珍珠岩均为无机基质,蛭石具有较强的通透性和吸水性,但长时间使用会导致通风和排水能力下降,影响植物根系生长;珍珠岩具有很强的吸水能力,性状稳定,能够抵抗各类理化因子的作用。生产中草炭、蛭石和珍珠岩三者相互配比形成混合基质,栽培基质的好坏直接影响到蔬菜的生长和发育^[2]。大量研究表明,不同的基质比对种植作物的形态、产量和品质有不同的影响。本试验结果表明,不同基质比对甜椒株高、茎粗和SPAD值的影响并不显著。而在甜椒的产量和干物质质量方面以配比2草炭:蛭石:珍珠岩=2:1:1(体积比)时产量最高,并且

根茎叶中的干物质质量明显较其他处理高,这与梁志卿等^[22]的试验结果相符。造成这一结果的原因是配比2的基质理化性质相对较优^[23],能够好的协调根区基质中的水、肥和气之间的关系,适宜甜椒的生长。此外,马丽等^[24]研究表明当草炭、蛭石和珍珠岩的比例为2:1:1(体积比)时能够显著提高根际真菌的数量,改善根际基质环境,从而促进甜椒干物质质量积累和产量的提高。

不同配比的混合基质的持水能力存在较大的差异,而含水量的多少对温度变化具有明显的影响。由图2可以看出,在相同的滴灌水平下不同基质配比根区温度日变化之间存在一定的差异,但各基质配比处理根区昼夜平均温度之间相差1.0℃左右,说明在相同的灌溉水平下,基质组分的变化对根区温度没有显著影响。而由图3可知,在相同的灌溉量下,以土壤栽培的昼夜温差最大,并且明显高于相同条件下4种内嵌基质栽培,在相同条件下相比于土壤栽培起垄内嵌式基质栽培昼夜温度波动小,具有更强的温度缓冲能力,有利于维持根区温度的稳定性。不同基质配比处理的根区温度与东西侧土壤温度的变化不相同,其中配比1和配比2处理东侧、根区和西侧3个部位最高温均以西侧最高,东侧最低;配比3和配比4处理3个部位的最高温以根区

最高,东侧最低。经统计分析,各处理东西侧土壤温度与根区温度的 P 值均 < 0.01 , 并且相关性系数 R 值均在 0.9 以上,说明根区温度与两侧土壤温度具有极显著相关性。

试验结果表明,起垄内嵌基质栽培能够提高冬季日光温室根区温度的缓冲能力,增强根区温度的稳定性。在同一个滴灌水平下,4 种基质配比的根区昼夜平均温度均在 $16.0 \sim 17.0 \text{ } ^\circ\text{C}$,因此在相同的滴灌水平下,不同基质对比对根区温度的影响不显著。但与其他处理相比,配比 2 能够显著促进甜椒干质量的积累产量的提高,具有最优的生产性能,因此在日光温室生产中草炭:蛭石:珍珠岩 = 2:1:1 (体积比)更具应用价值。

参考文献 References

- [1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2):131-138
Li T L. Current situation and prospects of green house industry development in China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2):131-138(in Chinese)
- [2] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 李晶. 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5):43-52
Guo S R, Sun J, Shu S, Li J. General situations, characteristics and trends of protected horticulture in foreign countries[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(5):43-52(in Chinese)
- [3] Yong H, Yang J, Zhu B, Zhu Z J. Low root zone temperature exacerbates the ion imbalance and photosynthesis inhibition and induces antioxidant responses in tomato plants under salinity[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1):89-99
- [4] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 杨云马, 周亚鹏, 赵立宾. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1):81-84
Wang Y Q, Peng Z P, Xue S C, Yang Y M, Zhou Y P, Zhao L B. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(s1):81-84(in Chinese)
- [5] 谷林林, 李永生, 姚延涛. 无土栽培基质的研究进展[J]. 山西林业科技, 2008(4):31-33
Gu L L, Li Y S, Yao Y D. Prospects of research on growing media of soilless culture[J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2008, 37(4):31-33(in Chinese)
- [6] 李婷婷, 马蓉丽, 成妍, 吴海涛, 焦彦生, 乔宁. 中国蔬菜基质栽培研究新进展[J]. 农学学报, 2013, 3(4):30-34
Li T T, Ma L R, Cheng Y, Wu H T, Jiao Y S, Qiao N. New research progress of substrate cultivation for vegetables in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2013, 3(4):30-34(in Chinese)
- [7] 徐永艳. 我国无土栽培发展的动态研究[J]. 云南林业科技, 2002(3):90-94
Xu Y Y. To the study progress of soilless culture of China[J]. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 2002, 31(3):90-94(in Chinese)
- [8] 孙艳艳, 蒋桂英, 刘建国, 张伟, 唐志敏. 加工番茄连作对农田土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13):3599-3607
Sun Y Y, Jiang G Y, Liu J G, Zhang W, Tang Z M. Effects of continuous cropping tomato for processing on soil enzyme activities and microbial flora[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13):3599-3607(in Chinese)
- [9] 傅国海, 刘文科. 日光温室甜椒起垄内嵌式基质栽培根区温度日变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1):47-55
Fu G H, Liu W K. Diurnal change in root zone temperature of soil ridge substrate-embedded cultivation method for sweet pepper in solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1):47-55(in Chinese)
- [10] 傅国海, 杨其长, 刘文科. 日光温室不同类型起垄内嵌式基质栽培冬季温热变化及甜椒苗期生长比较[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(10):103-112
Fu G H, Yang Q C, Liu W K. Diurnal temperature and heat exchange changes of soil ridged substrate-embedded cultivation ridges as well as their sweet pepper seedlings growth differences in winter in Chinese solar greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(10):103-112(in Chinese)
- [11] 刘升学, 于贤昌, 刘伟, 孙晓琦, 艾希珍. 有机基质配方对袋培番茄生长及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3):184-188
Liu X S, Yu X C, Liu W, Sun X Q, Ai X Z. Effects of organic substrate compositions on growth and yield of tomato cultivated in bag[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(3):184-188(in Chinese)
- [12] 张跃群. 不同配比的中药渣基质对番茄生长、产量及品质的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2004
Zhang Y Q. The effects of the different rates of CTM residues on the growth yield and quality of tomato[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2004(in Chinese)
- [13] 聂书明, 杜中平. 不同基质配方对番茄果实品质及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16):149-152
Nie S M, Du Z P. Effects of different substrate formulas on fruit quality and yield of tomato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(16):149-152(in Chinese)
- [14] 宋晓晓, 邹志荣, 曹凯, 赵艳艳. 不同有机基质对生菜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(6):153-160
Song X X, Zou Z R, Cao K, Zhao Y Y. Effects of different organic substrates on the yield and quality of lettuce[J].

- Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2013, 41(6):153-160(in Chinese)
- [15] 郭世荣, 李式军, 程斐, 马娜娜. 有机基质培在蔬菜无土栽培上的应用研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1):89-92
Guo S R, Li S J Cheng F, Ma N N. A study on the technique of vegetable soilless culture with organic [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(1):89-92(in Chinese)
- [16] 周艳丽, 程智慧, 孟焕文, 杜慧芳, 姚静. 有机基质对比对番茄生长发育及产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1):79-82
Zhou Y L, Cheng Z H, Meng H W, Du H F, Yao J. Effects of organic substrate compositions on growth, yield and quality of tomato [J]. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2005, 33(1):79-82(in Chinese)
- [17] 张新生, 王金国. 浅析蛭石及蛭石复合肥农用增产机理[J]. 新疆农业科技, 2010(4):53-53
Zhang X S, Wang J G. Analysis on the agricultural yield increasing mechanism of vermiculite and vermiculite compound fertilizer [J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2010(4):53-53(in Chinese)
- [18] 荆延德, 张志国. 栽培基质常用理化性质“一条龙”测定法[J]. 北方园艺, 2002(3):18-19
Jing Y D, Zhang Z G. Continually monitoring method of usual physical and chemical properties of growth media[J]. *Northern Horticulture*, 2002(3):18-19(in Chinese)
- [19] 康红梅, 张启翔, 唐菁. 栽培基质的研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1):124-127
Kang H M, Zhang Q X, Tang J. Research advances on growth media[J] *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1):124-127(in Chinese)
- [20] 周艺敏, 程奕, 孟昭芳, 张玺, 李玉华, 王正祥. 不同营养液及基质对黄瓜产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(1):82-87
Zhou Y M, Cheng Y, Meng Z F, Zhang X, Li Y H, Wang Z X. Effects of different nutrient liquids and substrates on cucumber yield and quality[J]. *Acta Agriculturae Borealisinica*, 2002, 17(1):82-87(in Chinese)
- [21] 王康峰. 几种基质配方对日光温室番茄栽培影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007
Wang K F. Study on effect of several substrate formula on tomato cultivation in solar greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007(in Chinese)
- [22] 梁志卿, 赵瑞, 孙吉娜, 陈俊琴. 基质中不同比例珍珠岩的添加对番茄穴盘苗的矮化效应[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(4):72-76
Liang Z Q, Zhao R, Sun J N, Chen J Q. Dwarf effects of adding in different ratios' perlite on tomato plug seedling[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(4):72-76(in Chinese)
- [23] 李耀龙, 季延海, 于平彬, 武占会, 刘明池. 基于不同基质理化特性的无土栽培混合基质筛选[J]. 北方园艺, 2016(8):36-40
Li Y L, Ji Y H, Yu P B, Wu Z H, Liu M C. Screening test for mixed soilless culture matrix based on different physical and chemical properties [J]. *Northern Horticulture*, 2016(8):36-40(in Chinese)
- [24] 马丽, 戚瑗娜, 张锐, 夏清燕. 不同基质对比对草莓根际微生物的影响[J]. 湖北农业科学, 2014(7):1551-1554
Ma L, Qi A N, Zhang R, Xia Q Y. Effects substrates with different ratios on rhizosphere microorganism of strawberry [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014(7):1551-1554(in Chinese)

责任编辑: 王燕华