

日光温室不同类型起垄内嵌式基质栽培垄冬季 温热变化及甜椒苗期生长比较

傅国海 杨其长 刘文科*

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

摘要 为对比不同类型起垄内嵌式基质栽培垄的温热性能,设置处理1为梯形土垄(T1),底宽40 cm,高15 cm;处理2为栽培槽(基质)宽度减小一半SSC垄(T2),底宽为35 cm;处理3为槽体全嵌入(15 cm)地平表面的SSC垄(T3),高度为0 cm;处理4为半嵌入(5 cm)地平表面的SSC垄(T4),高度为10 cm;处理5为外侧无土包被的单一裸槽垄(T5),宽度为10 cm;处理6为标准SSC垄(T6),规格与土垄一致。分别探究了宽度差异(T1、T2、T5和T6)和嵌入深度差异(T3、T4、T5和T6)栽培垄的根区温热变化特征及其甜椒苗生长情况。结果表明,宽度差异的栽培垄中,T6根区抵御环境低温的能力最强,最低温度分别比T1、T2和T5高0.55、1.27和1.33℃。T6的侧面和垂直方向上的热量传递较为缓慢和持久,能够蓄积更多的热量。嵌入深度和土壤包被差异的栽培垄中,T5抗低温能力最弱,T6抗低温能力最强,最低温度分别比T3、T4和T5高0.44、0.84和1.55℃。T3根区温度的稳定性较强。相对的,T3侧面和垂直方向上的根区热量传递缓慢,T5热量传导最为剧烈,T6在2个方向上的吸热时间较长。此外,宽度差异栽培垄中,T2、T5和T6甜椒幼苗生长优于T1,且T6最优;嵌入深度和土壤包被差异栽培垄中,T5甜椒幼苗的生长比其他处理差,T3和T6甜椒的各项指标差异不显著,但T6更有优势。总之,T6抗低温的能力比其他处理强,能够有效蓄积热量并且减缓热量散失,为冬季日光温室甜椒幼苗生长创造良好的根区温度条件,促进甜椒幼苗的生长。

关键词 日光温室;SSC垄;根区温度;热通量;甜椒幼苗生长

中图分类号 S625.4

文章编号 1007-4333(2017)10-0103-10

文献标志码 A

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

FU Guohai, YANG Qichang, LIU Wenke*

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

Abstract In order to explore the temperature of different ridges by using soil ridged substrate-embedded cultivation (SSC) method, soil ridge with 40 cm width, 15 cm height as treatment 1 (T1), SSC ridge with 35 cm width as treatment 2 (T2), SSC ridge with 0 cm height as treatment 3 (T3), SSC ridge with 10 cm height as treatment 4 (T4), naked substrate tank with 10 cm width as treatment 5 (T5) and SSC ridge with 40 cm width, 15 cm height as treatment 6 (T6) were set. The results showed that the root zone temperature was low in winter in CSG, ranging from 10–20℃. Under different width of cultivation ridges, the ability of T6 root zone to resist low-temperature stress was the strongest, and it was 0.55, 1.27 and 1.33℃ higher than T1, T2 and T5, respectively. Correspondingly, the heat exchange of the lateral and vertical direction of T6 was relatively slow, and T6 was able to accumulate more energy. For different embedded

收稿日期:2016-11-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2013AA103001);“十三五”国家重点研发计划项目课题(2016YFD0801001)

第一作者:傅国海,硕士研究生,E-mail:haifengzhisheng@126.com

通讯作者:刘文科,研究员,主要从事设施园艺营养与光温生物学及调控工程方面研究,E-mail:liuwenke@caas.cn

depth and lateral soil forms, the ability of T5 root zone to resist the low-temperature stress was the worst, while T6 was the strongest with 0.44, 0.84 and 1.55 °C higher compared with T3, T4 and T5. Although, the root zone temperature stability of T3 was strong, the diurnal root zone temperature was low. Correspondingly, the heat transfer of lateral and vertical direction of T3 were slow with less heat incoming compared with T6 which in the two directions of heating for a long time and store more heat, while T5 was violent. In addition, for different width of cultivation ridges, sweet pepper seedlings growth of T3, T5 and T6 was superior to that of T1, and T6 performance best. For different embedded depth and lateral soil forms of cultivation ridges, sweet pepper seedlings growth of T5 were worse than that of the other treatments, and growth indexes of T3 and T6 had no significant difference, but T6 has more advantages. In conclusion, the ability of T6 under low root zone temperature was stronger than other treatments. It could effectively accumulate heat and slow heat dissipation, and create a good root zone temperature conditions for CSG crops growth in winter, and ultimately promote the growth and yield of crops.

Keywords solar greenhouse; SSC ridge; root zone temperature; heat flux; sweet pepper seedling growth

日光温室由于其良好的蓄热保温和节能高效的性能,在中国北方蔬菜的跨季节生产中得到广泛应用^[1]。截至目前,中国日光温室栽培面积已超过 1×10^6 hm²,约占中国设施栽培面积的25%,成为中国北方蔬菜生产最为重要的形式之一^[2]。

在日光温室生产过程中,土壤起垄覆膜栽培是较为普遍的栽培方式。土壤起垄栽培具有节水、增产等优点,且起垄后增加了田间通风透光程度,改善了田间小气候,有利于提高作物光合速率^[3-4]。此外,起垄还能够有效提高地温,有利于作物根系抵御低温危害^[5]。而覆膜能够减少水分蒸发,提高根区温度,调节根区水热条件,有利于作物高产^[6-8]。此外,覆膜还能够防治杂草、虫害以及提高水肥利用率^[9-10]。随着农业的长期发展,在土壤栽培中常会出现低温危害及其他环境问题。传统的土壤栽培方式在抵御冬季根区低温方面犹有不足,对蔬菜作物生长产生不利影响。日光温室相对封闭的环境以及不合理的水肥管理措施也容易导致土壤连作障碍、次生盐渍化和地下水污染等问题^[11-13],造成土壤水热条件失衡、资源浪费和生态环境污染^[14-15]。近年来,无土栽培技术得以推广应用,成为解决土壤栽培过程中一系列问题的有效途径之一^[16]。无土栽培包括基质培、水培和雾培等,由于日光温室中环境条件和操作的限制,基质培应用较多。基质培结合滴灌的无土栽培模式在解决了土壤质量恶化等环境问题的同时,发挥了其高产高效的优势^[17-18]。基质栽培解决了土壤栽培过程中的部分问题,同时也带来了其他问题。由于基质疏松,其保水保墒能力差,根区环境远不如土壤稳定,对温度的缓冲能力较差^[19],在冬春季和夏秋季生产过程中容易出现根区低温和高温危害^[20]。此外,传统的基质栽培基质用

量较大,造价较高,实际生产应用中受到限制,不利于推广。

为解决上述问题,本研究提出了一种新的无土栽培方式—起垄内嵌式基质栽培方法(Soil ridge substrate-embedded cultivation, SSC)^[19]。前期研究表明,在低温环境下,相对基质栽培和土壤栽培,SSC垄能够有效提高根区环境的稳定性^[19,21],提高低温环境下的根区温度的缓冲能力,并能够有效促进甜椒幼苗的生长^[22]。此外,这种方法基质用量少,操作简单,降低了生产成本。

有研究表明,改变栽培垄的宽度、坡度等指标会影响其蓄热保温效果^[4]。本研究旨在已有研究的基础上,设置并比较不同宽度及嵌入深度和土壤包被的SSC垄的根区温热变化规律和甜椒苗的生长情况。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验在北京市顺义区大孙各庄镇的日光温室中进行,温室长60 m,跨度8 m,脊高3.8 m。小区长15 m,宽3.5 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”,穴盘(50孔穴盘)育苗,三叶一心时定植,株距30 cm,行距90 cm,定植时间为2015年11月20日。

试验以起垄内嵌式基质栽培(Soil ridged substrate-embedded cultivation, SSC)为基础,探究不同起垄方式的甜椒根区温热变化特征以及其对甜椒幼苗生长的影响。SSC是一种新型的无土栽培方式,即将特别设计的基质栽培槽(铁丝网槽,长×宽×高=180 cm×10 cm×15 cm,铁丝粗度1 mm,方形网孔边长2.5 cm)嵌在一定规格的土垄中,槽

内装入按体积比例混合均匀的栽培基质,栽培基质由草炭、蛭石和珍珠岩混合而成(草炭:蛭石:珍珠岩=1:1:1),外侧土壤培垄完成后,垄表覆盖地

膜。SSC 垄为梯形垄,规格为长 1.8 m,上底宽 20 cm,下底宽 40 cm,垄高 15 cm(图 1)。SSC 方法采用全营养液滴灌的方法进行生产。

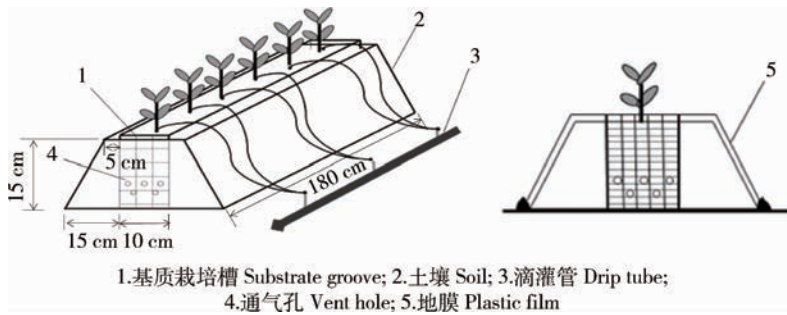


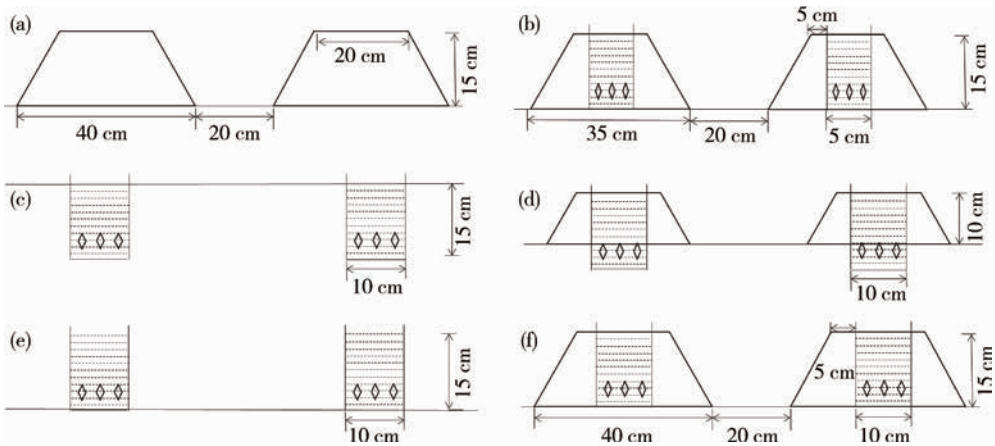
图 1 SSC 垄示意图

Fig. 1 Sketch map of soil ridged substrate-embedded cultivation ridge

1.2 设计

试验共设置 6 个处理。设置处理 1 为梯形土垄 (T1),底宽 40 cm,高 15 cm;处理 2 为栽培槽(基质)宽度减小一半 SSC 垄(T2),底宽为 35 cm,高 15 cm;处理 3 为槽体全嵌入(15 cm)地平表面 SSC 垄(T3),高度为 0 cm;处理 4 为半嵌入(5 cm)地平

表面 SSC 垄(T4),高度为 10 cm;处理 5 为外侧无土包被的单一裸槽垄(T5),宽度为 10 cm;处理 6 为 SSC 垄(T6),规格与土垄一致。各处理栽培垄如图 2 所示。试验分为两部分,分别探究宽度差异及嵌入深度和土壤包被差异的栽培垄的温热变化特征及其甜椒苗的生长状况。



(a)~(f)分别是处理 1~处理 6。(a)to (f)Were treatment 1 to treatment 6, respectively.

图 2 各处理栽培垄截面示意图(未覆膜)

Fig. 2 Sketch map of different treatments of cultivation ridges without film

试验 1 以 T1 为对照,探究 T1、T2、T5 和 T6 的垄宽度差异对其温热变化特征及其甜椒苗生长状况的影响;试验 2 以 T5 为对照,探究 T3、T4、T5 和 T6 的嵌入深度和土壤包被差异对其温热变化特征及其甜椒苗生长状况的影响。每个处理设置 3 次重复,即每个处理 3 个栽培行,行距 60 cm。每行栽培 6 株甜椒苗。各处理设置时,保持各栽培垄处理条

件一致,即土壤、基质组成、含水量和基础养分含量等都是是一致的。各处理自东向西依次排列,水肥管理保持一致,采用全营养液滴灌。

1.3 测定方法

试验数据采集时间为 2015 年 12 月 1 日—2016 年 1 月 15 日,分别对试验 1 和 2 进行数据采集。试验开始后,采用国产 YM-CJ 型智能土壤温度记录

仪(记录仪精度 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$)采集垄中心位置10 cm深处(此处比较具有代表性,能够反映根区温度状况)甜椒根区的温度及室内试验小区中心上方1.5 m高处和室外1.5 m高处的室内、外空气温度。测定温度数据采集时间间隔为10 min。采用国产YM-TF型智能土壤热通量记录仪(记录仪精度 $\pm 0.1\text{ W/m}^2$)采集土壤与基质界面的热量传递过程和垄中心10 cm深垂直方向的热量的传递过程。测定2015年12月14—18日的日光温室内、外及各栽培垄的平均温度;测定T1、T2、T5和T6在2015年12月14—18日的根区温度、2015年12月3—5日根区侧面热通量及2016年1月4—6日根区垂直方向热通量;测定T3、T4、T5和T6在2015年12月3—7日的根区温度、2016年1月9—11日根区侧面热通量及2015年12月29—31日根区垂直方向热通量。此外,2015年12月30日测定甜椒幼苗的生长指标,每个处理测定5株甜椒的生长指标。采用游标卡尺测定茎粗;采用直尺测定甜椒株高;采用

SPAD叶绿素仪测定甜椒成熟叶片叶绿素含量;采用计数法统计甜椒叶片数。

1.4 数据分析

数据采用Excel 2013软件处理及作图,并采用SAS 8.2软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 栽培垄根区及日光温室内、外温度的变化规律

由图3可知,日光温室内部温度随着室外温度的变化而变化。冬季试验过程中,日光温室外部环境温度较低,造成了日光温室内部的环境温度较低,尤其是夜间的室内气温。日光温室内根区温度也随着环境温度的变化而变化,且具有一定的滞后性。根区温度在冬季试验过程中较低,栽培垄根区温度约为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,根区平均温度为 $15.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间最低温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,且低温持续时间长,严重影响作物根系发育和养分吸收。因此,提高根区温度成为日光温室冬季生产的重要内容。

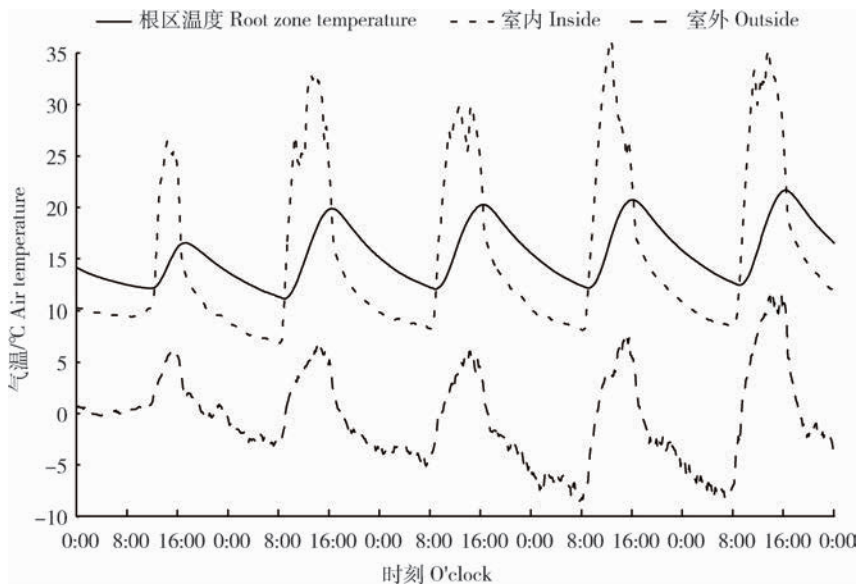


图3 栽培垄根区平均温度与日光温室内、外温度变化规律

Fig. 3 Temperature changes of cultivation ridge root zone and inside and outside Chinese solar greenhouse

2.2 不同类型栽培垄根区温热变化特征

2.2.1 宽度差异栽培垄的根区温度和热量变化特征

1) 宽度差异栽培垄的根区温度变化特征。由图4可知,各栽培垄根区温度随时间变化而改变,T5的根区温度变化明显先于T1,且先于T2和T6,说明外侧的土壤对温度变化有缓冲作用。T1、T2、T5和T6的最低温度分别是 12.06 、 11.34 、 11.28

和 $12.61\text{ }^{\circ}\text{C}$,可知抵御极低温能力 $T6 > T1 > T2 > T5$,其中T2和T5抵御低温能力显著低于T1,而T6根区最低温度显著高于T1,分别比T1、T2和T5高 0.55 、 1.27 和 $1.33\text{ }^{\circ}\text{C}$;各处理的最高温度分别是 18.44 、 21.19 、 21.45 和 $20.55\text{ }^{\circ}\text{C}$,T6的最高温度和T1差异不显著,而T2和T5的根区温度显著高于T1,说明在高温环境下T6的根区温度具有较

强的稳定性。白天平均温度分别是 14.44、15.84、16.01 和 15.87 °C, 夜间平均温度分别是 15.18、15.37、15.66 和 16.37 °C, 平均温度分别是 14.92、15.52、15.80 和 16.19 °C, 可知 T2、T5 和 T6 的昼

夜及平均根区温度均显著高于 T1, 其中在冻害较为严重的夜间, T6 的根区温度最高, 与 T1 相比提高了 1.19 °C。T1 的昼夜温度和平均温度都较低。

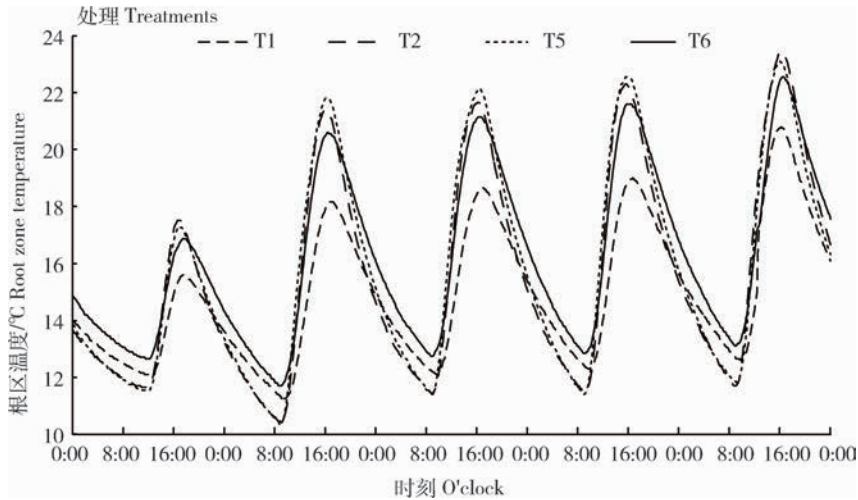


图 4 宽度差异栽培垄根区温度变化规律

Fig. 4 Root zone temperature changes of cultivation ridges with different width

2) 宽度差异栽培垄的根区热量变化特征。由图 5(a)可知, T1、T2、T5 和 T6 的侧面吸热时间分别为 15.07、5.83、6.03 和 7.93 h, 对照 T1 吸热时间较长, 说明土垄向内传热较慢。最大热通量及时间分别是 22.4(11:10)、26.8(11:30)、98.1(9:50) 和 35.3 W/m²(12:00), T5 热量传递剧烈, T6 最大热通量高于 T1, 时间最晚; 最小热通量及时间分别为 -5.7(16:20)、-9.4(16:40)、-28.1(16:30) 和 -5.6 W/m²(18:20), T5 热量传递剧烈, T6 出现时间较晚, 外侧土壤起到了缓冲和保温作用。由图 5(b)可知, 垂直吸热时间分别为 10.30、8.57、9.73 和 11.97 h, T5 吸热时间相对小于 T1 和 T6, 这和其外侧有无土壤缓冲有关。最大热通量及时间分别是 41.4(13:40)、26.1(13:40)、43.5(13:30) 和 34.0 W/m²(14:20), T5 热量传递较为剧烈, T6 最大热通量出现时间较晚, 可以吸收更多热量。最小热通量及时间分别为 -7.1(6:50)、-5.2(6:30)、-9.5(6:40) 和 -3.6 W/m²(6:30), T1 和 T5 根区与外界的热量差异较大, 而 T2 和 T6 根区与外界热量传递缓慢。

2.2.2 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄根区温度和热量变化特征

1) 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄根区温度变

化特征。由图 6 可知, 各栽培垄根区温度随时间变化而改变, T3、T4 和 T6 的根区温度变化明显滞后于 T5, 说明外侧土壤能够缓冲根区温度变化。同时, T3 根区温度变化幅度最小, 温度稳定。T3、T4、T5 和 T6 的最低温度分别是 13.1、12.7、11.99 和 13.54 °C, 可知抵御极低温的能力 T6 > T3 > T4 > T5, 对照 T5 根区最低温度显著低于其他处理, 其中 T3 和 T6 抵御极低温能力较强, T6 根区最低温度显著高于其他处理, 分别比 T3、T4 和 T5 高 0.44、0.84 和 1.55 °C; 最高温度分别是 19.62、21.05、23.54 和 22.08 °C, T5 根区最高温度显著高于其他处理, 说明其在高温环境下的根区温度稳定性较差。T3 显著低于 T5, 其根区温度稳定性较强。白天平均温度分别 16.03、16.38、17.92 和 17.20 °C, 夜间平均温度分别是 16.03、16.32、16.57 和 17.41 °C, 平均温度分别是 16.03、16.33、17.01 和 17.33 °C, 可知对照 T5 温度昼高夜低, 其昼夜温差大, 根区温度稳定性差, T3 昼间平均温度、夜间平均温度和平均温度显著低于对照 T5, T6 的夜间平均温度显著高于其他处理, 其蓄热保温性能较优。

2) 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄根区热量变化特征。由图 7(a)可知, T3、T4、T5 和 T6 侧面吸热时间分别是 14.23、6.70、6.53 和 8.00 h, T3 吸热

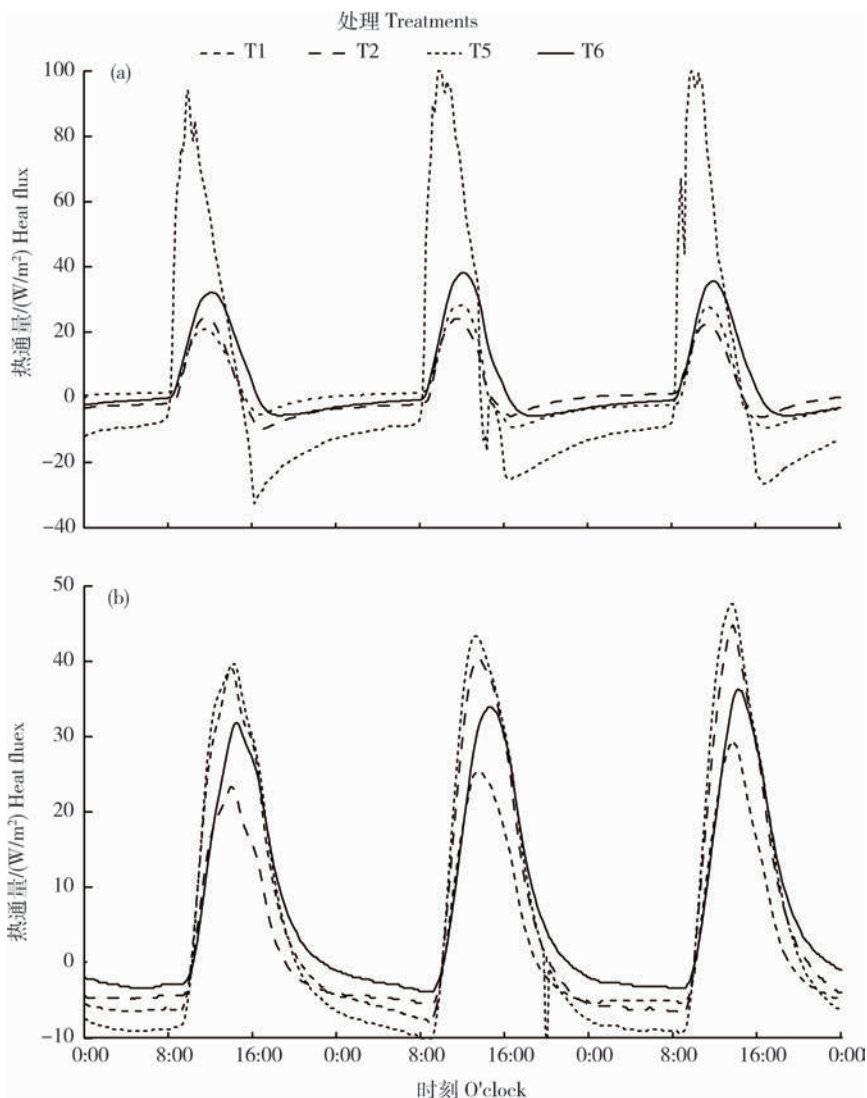


图5 宽度差异栽培垄基质-土壤界面热通量(a)与根区垂直方向热通量(b)变化规律

Fig. 5 Heat fluxes of soil-substrate (a) and root zone (b) of cultivation ridges with different width

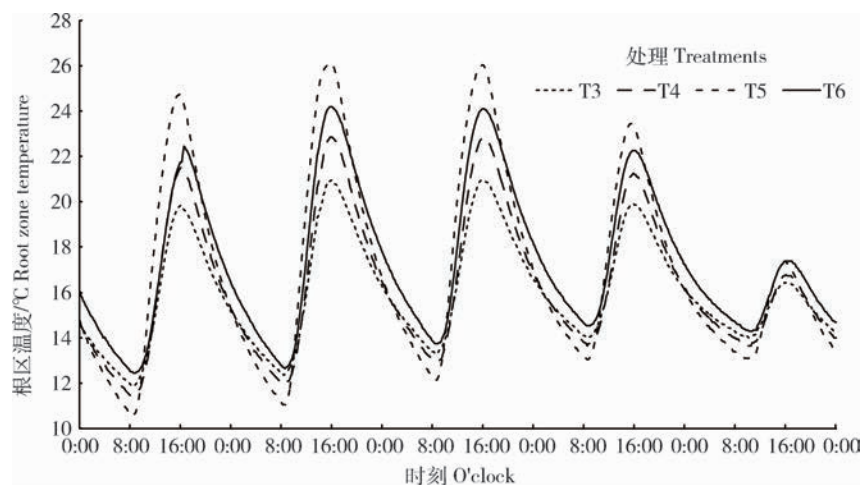


图6 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄根区温度变化规律

Fig. 6 Root zone temperature changes of cultivation ridges with different embedded depth and lateral soil forms

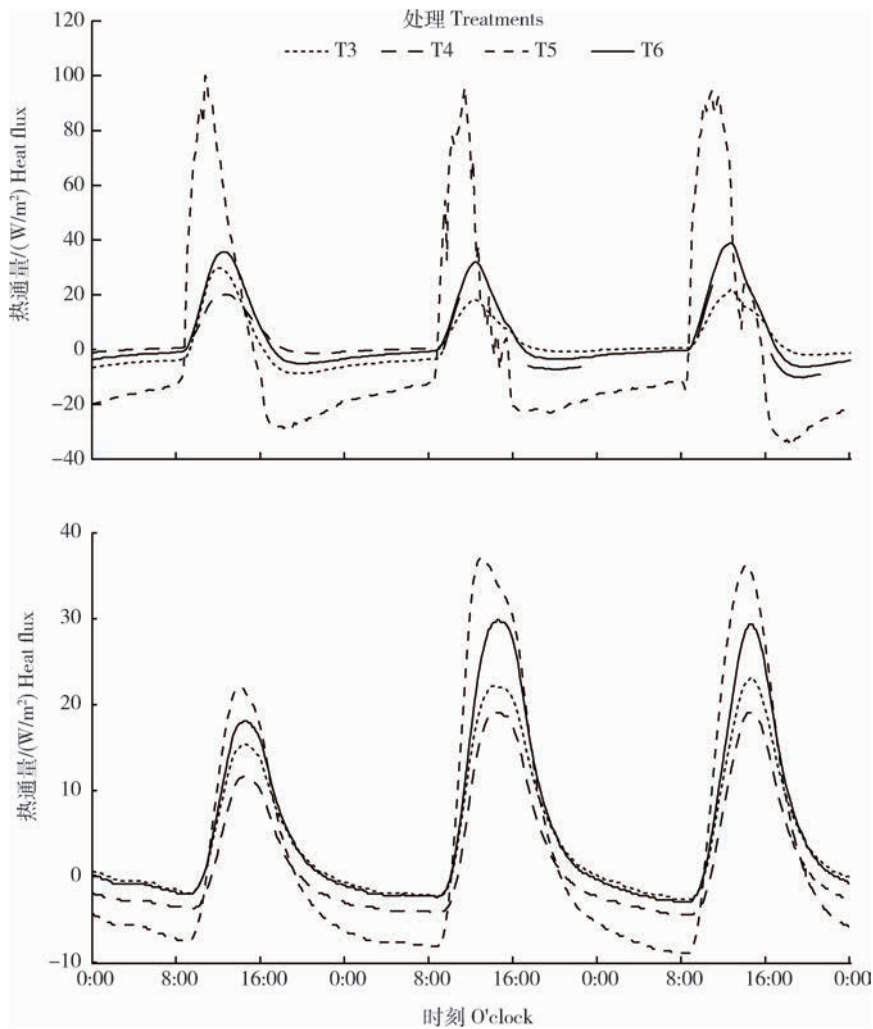


图 7 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄基质-土壤界面热通量(a)与根区垂直方向热通量(b)变化规律

Fig. 7 Heat fluxes of soil-substrate (a) and root zone (b) of cultivation ridges with different embedded depth and lateral soil forms

时间最长,其全嵌入方式影响了热量通过侧面向根区传导,T4和T5吸热时间较短。最大热通量及时间分别是20.1(12:30)、29.3(12:00)、96.1(11:20)和35.5 W/m²(12:30),T5侧面热量传递较为剧烈,且较早的达到热量平衡。最小热通量及时间分别是-1.3(20:00)、-8.7(19:20)、-28.5(18:40)和-4.9 W/m²(19:10),T5与外界热量交换剧烈放热较多,T6根区与外界热量交换并不剧烈,这是由于外侧土壤的缓冲作用。由图7(b)可知,垂直吸热时间分别是12.27、9.17、9.37和12.20 h,T3和T6根区垂直方向吸热时间较长。最大热通量及时间20.3(14:20)、16.7(14:20)、31.7(13:30)和25.8 W/m²(14:30),T5根区与外界热量交换较为剧烈,且较早的达到热量平衡。最小热通量及时间-2.3

(8:00)、-4.1(7:50)、-8.1(7:40)和-2.4 W/m²(8:00),T5根区与外界热量交换剧烈,T6热量交换缓慢,保温性较强。

2.3 不同形式栽培垄对甜椒苗生长的影响

2.3.1 宽度差异栽培垄对甜椒幼苗生长的影响

由表1可知,相对于对照T1,其他3种栽培方式下的甜椒幼苗的茎粗、叶绿素含量和株高都高于T1栽培下的甜椒幼苗。T6的甜椒幼苗生长优于其他类型栽培垄,其茎粗、株高、叶绿素含量及叶片数等指标最优,说明T6的生产性能较为优越。T6与T1相比,其甜椒幼苗的茎粗、株高和叶绿素含量都显著高于T1,差异较大;T2的株高显著高于T1,但是叶绿素含量、叶片数和茎粗差异并不显著;T5与对照T1相比,其甜椒幼苗各项生长指标差异都不显著。

表1 宽度差异栽培垄对甜椒苗生长的影响

Table 1 Effects of ridges with different width on the growth of sweet pepper seedlings

处理 Treatments	茎粗/mm Stem diameter	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶片数 Leaves number	株高/cm Plant height
T1	2.94 b	38.4 b	10.8 ab	8.92 c
T2	2.97 b	40.2 ab	10.7 b	9.60 ab
T5	2.96 b	39.3 b	10.7 b	9.08 bc
T6	3.18 a	40.8 a	11.2 a	10.02 a

注:数值后同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。(Mean±SD)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at the 5% level, the same as below.

2.3.2 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄对甜椒幼苗生长的影响

由表2可知,对照T5栽培的甜椒幼苗生长指标比其他处理差,说明外侧无土壤包被的T5栽培垄生产性能较差。T3的甜椒幼苗茎粗、叶绿素含量、叶片

数和株高等指标与T6差异不显著;T4甜椒幼苗的茎粗、株高、叶片数和叶绿素含量等指标较T3和T6差,但是优于T5,由于水肥条件一致,说明外侧土壤覆盖或嵌入土壤对调节作物根区环境是有利的。T6栽培的甜椒幼苗各项指标相对最优,其生产性能最优。

表2 嵌入深度和土壤包被差异栽培垄对甜椒苗生长的影响

Table 2 Effects of ridges with different embedded depth and lateral soil forms on the growth of sweet pepper seedlings

处理 Treatments	茎粗/mm Stem diameter	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶片数 Leaves number	株高/cm Plant height
T3	3.10 ab	42.1 a	11.2 a	9.93 a
T4	3.01 ab	41.8 a	11.0 ab	9.15 b
T5	2.96 b	39.3 b	10.7 b	9.08 b
T6	3.18 a	40.8 a	11.2 a	10.02 a

3 结论与讨论

研究表明,日光温室中作物根区温度随着室内外气温的变化而变化,且滞后于环境温度的变化,说明根区具有一定的温度缓冲性,能够缓冲高低温胁迫。但是,冬季低温环境条件下,日光温室中根区温度较低,影响作物的生长发育,因此提高根区温度成为冬季日光温室作物生产的重要内容。

研究表明,T1的根区温度变化滞后于其他处理,说明土壤具有较强的稳定性,这与李建设等^[23]的研究结果一致。T6栽培垄根区具有较好的抵御低温的能力,这与之前的研究结果一致^[19],而其原因是由于其具有良好的蓄热保温性能。T2减小了SSC垄宽度,从而在整体上减小了栽培垄的体

积,栽培垄体积的大小直接影响栽培垄的蓄热性^[4],体积较小导致其蓄热量有限,这可以解释为何其根区抵御低温的能力较差。而T5为裸露的基质栽培槽,外侧没有土壤的缓冲作用,宽度较小,其根区温度变化较为剧烈,且抵御低温的能力较差。根区温度的差异是由其根区热量的传递决定的。T1由土壤构成,虽然土壤具有良好的蓄热保温性能,但是其热量传导速率较慢^[24],热量到达根区受到阻滞。T5的外侧没有土壤的缓冲,虽然基质能够在白天迅速吸收较多热量,但是其也较容易散失掉,不能维持较为稳定的根区温度。而T6既能够在白天良好的蓄热,一定的宽度能够使其保持较高的根区温度。

研究表明,不同深度的土壤温度不同^[25]。栽培槽嵌入深度和土壤包被会影响根区温度的稳定

性。T5 由于根区基质直接暴露在空气中,根区温度稳定性最差,抵御低温和高温的能力最差;完全嵌入地表的 T3 栽培垄根区温度变化幅度较小,虽然白天温度较低,但是晚上其能够减缓热量散失,维持相对根区较高温度,而与 SSC 相比,其平均温度较低且温度较为稳定的原因可能是由于其位于地面以下,能够吸收利用地下土壤储存的热量^[26]。T6 的侧面能够吸收更多的热量,白天保持相对较高的根区温度对缓解低温胁迫是有益的^[27-28],因此地上起垄的 SSC 白天较高的根区温度是有益的。同样的,根区的热量传递直接影响了根区温度的变化。T3 的全嵌入地面的栽培方式虽然保持了热量传递的稳定性,但是也阻滞了太阳辐射热量向根区的传递,其吸热时间较长,但是其蓄积的热量并不是最大的。T5 的热量传递剧烈,说明不利于根区温度的稳定。其中根区热效应表现较为优异的是 T6。所有处理的最小热通量出现在早晨,原因是此时空气温度最低,根区热量向外部传热最大。

研究表明,根区温度对作物幼苗的生长影响作用明显^[29]。根区温度的差异影响了甜椒幼苗的生长,研究结果表明,宽度差异的栽培垄中,单纯的土壤栽培的甜椒生长滞后于基质栽培,这是由于基质栽培能够促进作物的生长^[17]。其中,T6 的甜椒幼苗生长状况最优,与其较优的根区温热效应对应,其表现出更好的生产性能。在嵌入深度和土壤包被差异的栽培垄中,外侧无土壤包被的栽培垄生产性能最差,而 T6 表现出较优的生产性能;T3 为全部嵌入地下的栽培方式,这种栽培方式与 T6 相比,甜椒生长无明显差异,但是由于其嵌入地下,不能发挥起垄栽培的一系列优势^[3-5]。

综合上述试验结果及相关论述,在宽度差异及嵌入深度和土壤包被差异的栽培垄中,T6 栽培垄的温热特性及其生产性能较优,能够有效的解决作物苗期面临的冬季根区低温问题,对促进冬季日光温室作物的生长起着重要作用。

参考文献 References

[1] 李天来. 中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 greenhouse industry development in China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2): 131-138 (in Chinese)

[2] 陈青云. 日光温室的实践与理论[J]. 上海交通大学学报: 农业

科学版, 2008, 26(5): 343-350

Chen Q Y. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2008, 26(5): 343-350 (in Chinese)

- [3] 孙向辉, 邵运辉, 任中信, 郑飞. 起垄栽培对不同基因型冬小麦生理特性及子粒蛋白质含量的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(3): 70-73
Sun X H, Shao Y H, Ren Z X, Zheng F. Effects of bed-planting on physiological characters and grain protein content in different genotypes of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(3): 70-73 (in Chinese)
- [4] 傅国海, 杨其长, 刘文科. 日光温室土垄蓄热保温性能提升的构建参数研究[J]. 山东农业科学, 2015(9): 42-45
Fu G H, Yang Q C, Liu W K. Study on structure parameters of soil ridge to improve heat storage and release performance in Chinese solar greenhouse [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015(9): 42-45 (in Chinese)
- [5] 孙玉莲, 边学军, 黄成秀, 杨文凯, 陈思宇, 韦伯龙. 全膜双垄沟播对旱区玉米田土壤水分和温度的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 511-515
Sun Y L, Bian X J, Huang C X, Yang W K, Chen S Y, Wei B L. Effects of full plastic film mulching on double ridges with furrow on soil moisture and temperature in dry farming maize area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(5): 511-515 (in Chinese)
- [6] 蔡绍珍, 陈建美, 朱培生. 地膜覆盖栽培对黄瓜干物质积累与养分吸收分配的影响[J]. 园艺学报, 1993, 20(1): 45-50
Cai S Z, Chen J M, Zhu P S. Effect of plastic mulching on dry matter accumulation and the uptake and partition of nutrient cucumber[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1993, 20(1): 45-50 (in Chinese)
- [7] 翟胜, 王巨媛, 梁银丽. 地面覆盖对温室黄瓜生产及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 129-133
Zhai S, Wang J Y, Liang Y L. Effects of soil surface mulching on cucumber production and water use efficiency in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(10): 129-133 (in Chinese)
- [8] Zhou L M, Li F M, Jin S L, Song Y. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41-47
- [9] Lament W J. Plastic mulches for the production of vegetable crops[J]. *Hort technology*, 1993, 3: 35-39
- [10] Romić D, Romić M, Borosic J, Poljak M. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 60(2): 87-97
- [11] 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, characters and trends of protected horticulture in foreign countries [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(5): 43-52 (in Chinese)

- [12] Yong H E, Jing Y, 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
- [13] 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(增刊): 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(add): 81-84 (in Chinese)
- [14] 殷永娴, 刘鸿雁. 设施栽培下土壤中硝化、反硝化作用的研究[J]. *生态学报*, 1996, 16(3): 246-250
Yin Y X, Liu H Y. Investigation on nitrification and denitrification of soil under installing cultivation conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 246-250 (in Chinese)
- [15] 李东坡, 王志杰, 梁成华. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 192-197
Li D P, Wu Z J, Liang C H. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 192-197 (in Chinese)
- [16] 张英, 徐建华, 李万良. 无土栽培的现状与发展趋势[J]. *农业科技展望*, 2008, 4(5): 40-42
Zhang Y, Xu J H, Li W L. The present situation and development trend of soilless culture [J]. *Agricultural Outlook*, 2008, 4(5): 40-42 (in Chinese)
- [17] 刘景霞, 刘志敏, 朱亦赤, 缪武. 无土栽培基质对辣椒产量及品质的影响[J]. *南方园艺*, 2010, 21(2): 3-6
Liu J X, Liu Z M, Zhu Y C, Liao W. The effect of soilless culture medium on yield and quality of pepper[J]. *Southern Horticulture*, 2010, 21(2): 3-6 (in Chinese)
- [18] 张旺锋, 王振林. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 632-637
Zhang W F, Wang Z L. Effect of Under-mulch-drip Irrigation on Canopy Apparent Photosynthesis, Canopy Structure and Yield Formation in High-yield Cotton of Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 632-637 (in Chinese)
- [19] 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 root zone temperature changes of a novel ridge substrate-embedded cultivation method for sweet pepper in Chinese solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 47-55 (in Chinese)
- [20] Malcolm P J, Holford P, Barchia I, Mcglasson W M. High and low root zone temperatures at bud-break reduce growth and influence dry matter partitioning in peach rootstoT6s [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 171(3): 83-90
- [21] 傅国海, 刘文科. 土垄内嵌基质栽培方式对日光温室春甜椒的降温增产效应[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(2): 199-205
Fu G H, Liu W K. Effects on cooling down and increasing yield of sweet pepper of a novel cultivation method: Soil ridge substrate-embedded in Chinese solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2): 199-205 (in Chinese)
- [22] 傅国海, 刘文科. 日光温室4种起垄覆膜方式对甜椒幼苗生长的影响[J]. *农业工程*, 2015(4): 67-70
Fu G H, Liu W K. Effects of four kinds of film-covering cultivation ridges on the growth of sweet pepper seedlings in Chinese solar greenhouse[J]. *Agriculture Engineering*, 2015, 5(4): 67-70 (in Chinese)
- [23] 李建设, 白青, 张亚红. 日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 231-236
Li J S, Bai Q, Zhang Y H. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 231-236 (in Chinese)
- [24] 赵建华, 张强, 王胜, 刘宏谊. 半干旱区土壤热量传递的慢过程对地表能量平衡的影响[J]. *土壤通报*, 2013(6): 1321-1331
Zhao J H, Zhang Q, Wang S, Liu H Y. Effect of soil heat slow transmission process on surface energy balance in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1321-1331 (in Chinese)
- [25] 王双喜, 马春生, 张静, 赵聪慧, 秦刚. 节能温室太阳能土壤蓄热加温系统的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 197-203
Wang S X, Ma C S, Zhang J, Zhao C H, Qin G. Substrate heating system with solar energy for greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(5): 197-203 (in Chinese)
- [26] 李明, 周长吉, 周涛, 尹义蕾, 富建鲁, 王志强. 日光温室土墙传热特性及轻简化路径的理论分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 175-181
Li M, Zhou C J, Zhou T, Yin Y L, Fu J L, Wang Z Q. Heat transfer process of soil wall in Chinese solar greenhouse and its theoretical simplification methods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 175-181 (in Chinese)
- [27] Gosselin A, Trudel M J. Root-zone temperature effects on pepper[J]. *Veterinary Practitioner*, 2011: 18-19
- [28] Kurets V K, Drozdov S N, Popov E G, Talanov A V, Obshatko L A. Effect of thermos period on net photosynthesis and night respiration of cucumber plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 1999, 46: 163-167
- [29] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2258-2264
Song M L, Wen X Z, Li Y L. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2258-2264 (in Chinese)