

任佳楠,张亚红,付玉芳,等. 相变蓄热墙体对日光温室热环境及乳瓜生长发育的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(4):164-169.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.04.031

相变蓄热墙体对日光温室热环境及乳瓜生长发育的影响

任佳楠^{1,2}, 张亚红¹, 付玉芳¹, 俞 婷³

(1. 宁夏大学, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏贺兰县金贵镇农业服务中心, 宁夏贺兰 750200;

3. 宁夏贺兰县习岗镇农业服务中心, 宁夏贺兰 750200)

摘要:为了研究复合相变墙体对日光温室热环境及乳瓜生长发育的影响,以北墙为土捣墙的日光温室为对照,对温室内环境参数(热通量、北墙内表面温度、气温、土壤温度)及乳瓜生长参数(叶片、茎、果实的生长状况)进行比较。结果表明:温室北墙涂抹 40 mm 相变材料可提升墙体吸放热的性能,且白天蓄热和夜间放热通量均高于对照温室。墙体内外表面温度呈现出相变涂层温室好于对照温室,最高增加 0.4 ℃。试验期间,相变涂层温室的旬平均气温总是高于对照温室,最高增加 0.3 ℃,且温室内最高温度呈现出相变涂层温室小于对照温室,所以相变材料放热使得室内温度略高于对照温室,室内温度波动幅度大大减少。相变涂层温室的日均土壤温度高于对照温室,最高增加 5.7 ℃。2 个温室乳瓜的株高均与日均气温、日均土壤温度呈极显著正相关,且相变涂层温室处理的相关系数大于对照处理。在整个生育期,相变涂层温室内的乳瓜株高较对照温室增加 12.7%,茎粗增加 1.5%,叶面积增加 2.9%。与对照温室相比,相变涂层温室内乳瓜维生素 C 含量、总糖含量、横宽分别增加 41.9%、27.9%、9.8%。该试验结果对宁夏日光温室后墙墙体材料和相变温室种植作物选择提供理论依据。

关键词:复合相变蓄热墙体;日光温室;热环境;乳瓜;生长发育

中图分类号: S626;S642.204 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)04-0164-06

蔬菜的生长发育受很多因素的影响,其中温度、湿度、光照、CO₂ 浓度是最重要的因素,适宜的温度对蔬菜生长发育各个阶段尤为重要。日光温室利用温室效应,可以使蔬菜在寒冷的冬季不受冻、不发生寒害,生长发育良好^[1]。日光温室北墙作为吸收和储存太阳能并为温室增温的载体,对调控和改善温室蔬菜生长的热环境尤为重要。

目前,关于日光温室墙体增温的研究主要是使

用复合相变材料。按照相变材料的储/释能理论,将日光温室后墙墙体改造为相变墙体,使它兼有保温及蓄热的功能,白天室内温度较高时,材料吸收并贮存热量;夜间室内温度较低时,释放热量,使得日光温室太阳辐射能源的利用率大幅度提高,室内昼夜温差减小,最低温度提高并减少热量损失,通过热量调节功能对现有热环境进行优化调控^[2-4]。现在大多数科研工作者把研究重点放在相变墙体温室的材料、结构等方面来提升温室热环境^[5-8],而对基于此类材料墙体下植物生长发育的研究较少。因而,本试验以温室北墙为土捣墙为对照,探究温室北墙涂抹 40 mm 复合相变材料对乳瓜蒸腾及生长发育的影响,为科学评价复合相变材料的适用性提供参考。

收稿日期:2020-06-08

基金项目:宁夏回族自治区科技支撑计划(编号:2015BN04)。

作者简介:任佳楠(1991—),女,陕西靖边人,硕士研究生,主要从事设施园艺环境调控研究。E-mail:214858364@qq.com。

通信作者:张亚红,博士,教授,博士生导师,主要从事设施园艺环境等科学与科研工作。E-mail:zyhcau@sina.com。

[13]王 振,张善文,王献锋. 基于改进全卷积神经网络的黄瓜叶部病斑分割方法[J]. 江苏农业学报,2019,35(5):1054-1060.

[14]Abdullahi H S, Sherif R E, Mahieddine F. Convolution neural network in precision agriculture for plant image recognition and classification [C]//2017 Seventh International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH), 2017:1-3.

[15]Ren S Q, He K M, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6):1137-1149.

[16]Hammad I, El-Sankary K. Impact of approximate multipliers on VGG deep learning network [J]. IEEE Access, 2018, 6:60438-60444.

[17]He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016:770-778.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在宁夏园艺产业园科研温室进行,为了便于比较研究,将温室中部用双层透明阳光板(间隔 500 mm)隔开(即由东向西约 40 m 处),等分成 2 个

温室区域,即相变涂层温室(T)和对照温室(CK)。相变涂层温室北墙采用喷浆工艺将相变材料即石蜡类固-液相变材料(主要成分石蜡、石墨、高密度聚乙烯)、炭黑粉、水泥砂浆按一定比例用混凝土喷涂机混匀喷涂 40 mm,然后人工夯实抹平(图 1)。

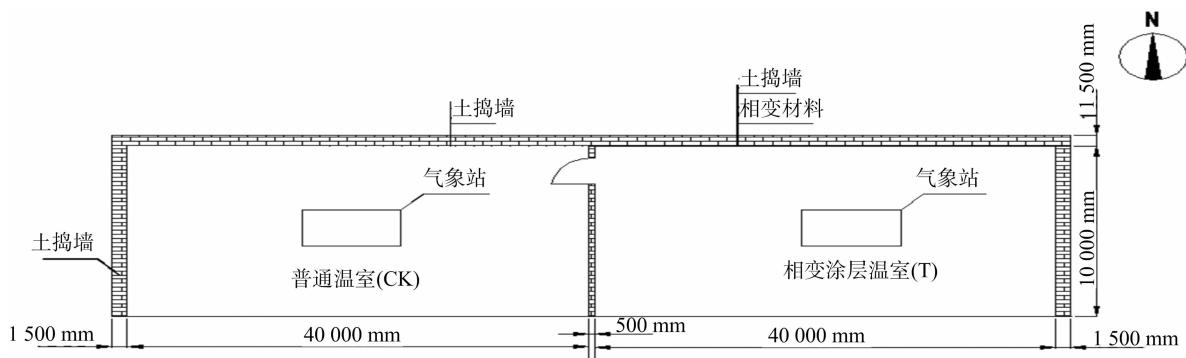


图1 试验温室平面示意

1.2 试验材料

试验在宁夏园艺产业园科研开发区(106°33'E、38°58'N)进行,温室坐北朝南,东西延长,长度 80 m,跨度 10.0 m,脊高 4.3 m,后墙高 3.7 m,底座宽 2.5 m,收口 0.5 m,东西山墙及北墙中部为 1.5 m 厚土梯形捣墙。温室棚膜使用 EVA-I 型长寿无滴膜。试验采用宁夏天缘种苗有限公司育成的乳瓜品种迷你 3 号,于 2019 年 4 月 25 日定植,试验时间为 2019 年 5 月 1 日至 7 月 31 日。

1.3 测定方法

1.3.1 温室内环境的测定 试验测点位于 2 个温室中央墙面、棚室中心,安装墙体表面温度传感器、热通量传感器、空气温湿度传感器、土壤温度传感器等。墙体传感器位于墙体内部表面,距地面垂直高度 1.85 m 处(即墙体中部),空气温湿度传感器位于棚室中心,高 1.5 m,土壤传感器位于棚室中心,深 10 cm 处。试验数据采用 CR10X、CR800 数据采集器和相关传感器(美国 Campbellsci 公司生产),每 10 min 采集 1 次数据。

1.3.2 黄瓜生长指标的测定 每处理随机选择 12 株进行挂牌标记,自黄瓜定植(缓苗 15 d)后,每隔 14 d 测量其株高、茎粗、叶面积。株高用卷尺测量,量取植株茎基部到主茎顶端生长点的自然长度;茎粗用电子游标卡尺量取茎基部 2 cm 处;叶面积测量选择已标记的植株 3 张叶,用卷尺测量叶长、叶宽,计算叶面积。

1.3.3 乳瓜品质的测定 盛果期各处理随机采 10

个样测定乳瓜果实的品质。可溶性固形物含量用手持式数显糖度计测定(TD-45);可溶性总糖含量用 H_2SO_4 -蒽酮比色法测定;有机酸含量用酸碱滴定法测定;维生素 C 含量用钼蓝比色法测定;硝酸盐含量用硫酸-水杨酸法^[9]测定。

1.3.4 乳瓜产量的测定 记载每次的采收日期,各处理的乳瓜产量按小区田间实测计。记录各小区每次采收果实的质量及数量,计算平均单果质量和平均单株产量,最后折合成单位面积产量。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2007 及 Origin 7.5 软件处理,用 SPSS 17.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同温室热通量对比

热通量可以反映温室后墙的吸放热能力。由表 1 可知,相变涂层温室后墙累计蓄热通量较普通温室多 76 175.5 W/m^2 ,累计放热通量相变涂层温室较普通温室提高 61 338.9 W/m^2 。由此可知,温室北墙添加相变材料提高了墙体吸放热的能力。

由图 2 可知,白天对照温室后墙热通量为 138.1 W/m^2 ,相变涂层温室蓄热通量为 338.1 W/m^2 ,较普通温室提高 1.4 倍。白天普通温室北墙内表面热流量峰值出现在 14:30,为 41.6 W/m^2 ;相变涂层温室北墙内表面热流量峰值出现在 11:30,为 64.1 W/m^2 ,比普通温室高 22.5 W/m^2 ,且峰值出现时间提前 3 h。夜间普通温室和相变涂层温室墙体内表面放热热

表 1 不同温室蓄放热通量对比

处理	5 月		6 月		7 月		合计	
	蓄热通量 (W/m ²)	放热通量 (W/m ²)	蓄热通量 (W/m ²)	放热通量 (W/m ²)	蓄热通量 (W/m ²)	放热通量 (W/m ²)	蓄热通量 (W/m ²)	放热通量 (W/m ²)
CK	64 579.2	67 914.7	59 605.5	64 406.7	54 697.5	69 162.7	178 882.2	201 484.1
T	119 185.1	116 949.6	63 495.7	65 236.1	72 376.9	80 637.3	255 057.7	262 823.0

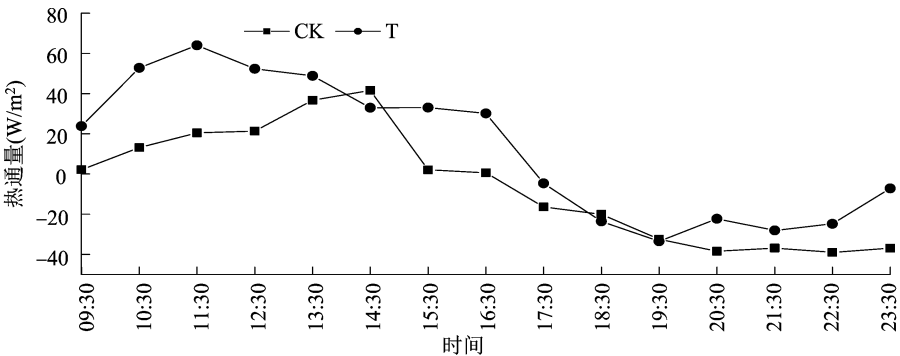


图2 不同温室热通量日变化(2019 年 6 月 22 日, 晴天)

通量平均为 20.6、31.5 W/m², 相变涂层温室比普通温室高出 10.9 W/m², 表明日光温室北墙经相变材料喷涂后, 白天蓄热通量和夜间放热通量均高于普通温室。

2.2 不同温室墙体温度比较

如图 3 所示, 普通温室和相变涂层温室墙体内

表面和墙内 0.3 m 的温度均表现为相变涂层温室优于普通温室。相变涂层温室和普通温室墙体内表面的月平均温度分别为 25.5、25.3℃, 相差 0.2℃; 相变涂层温室和普通温室墙内 0.3 m 处的月平均温度分别为 24.8、24.4℃, 相差 0.4℃。

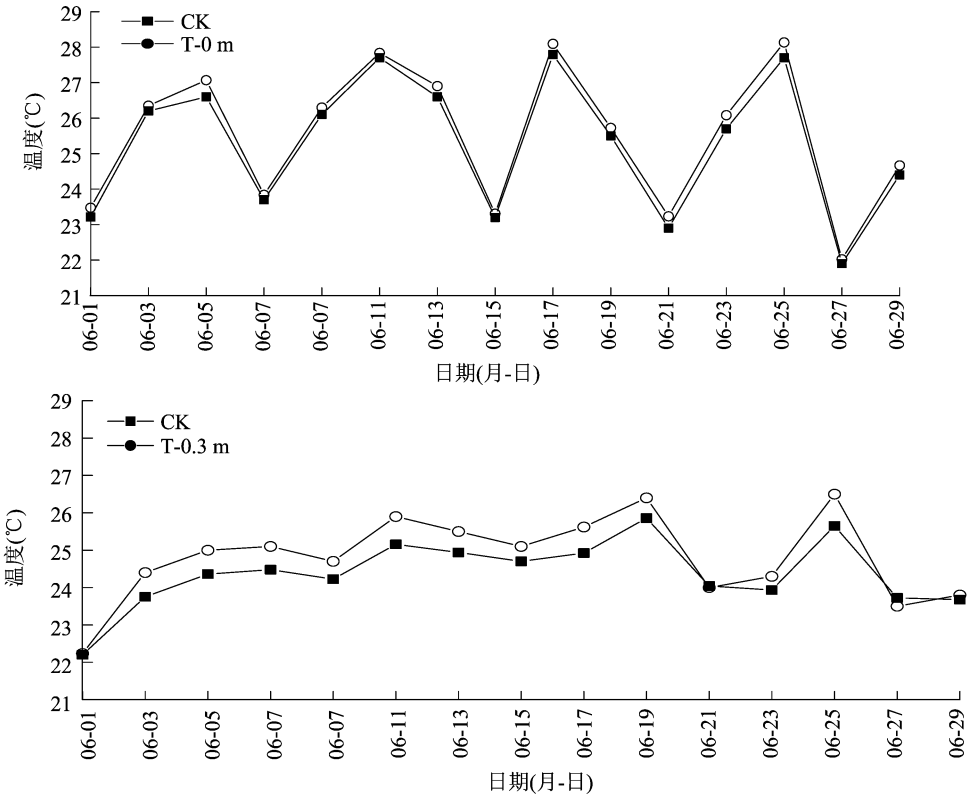


图3 不同温室墙体内表面及 0.3 m 处温度月变化

2.3 不同温室空气温度变化

由于试验期处于夏季,室外气温较高,夜间温度已基本满足乳瓜生长所要求。传统日光温室白天温度较高,需要降温。从表 2 中可以看出,普通

温室最高气温比相变涂层温室平均高出 1.2 ℃。在整个试验期,相变涂层温室的旬平均气温总是高于普通温室,最高可提高 0.3 ℃。由此可见,相变材料对温室气温具有消峰填谷作用,可促进植株健康生长。

表 2 室内平均气温、最低气温和最高气温旬变化

温室	月份	旬别	室内平均气温 (℃)	室内最高气温 (℃)	室内最低气温 (℃)	波幅 (℃)	夜间平均气温 (℃)
CK	5	上旬	22.5	40.3	12.1	28.2	19.4
		中旬	23.9	40.7	11.4	29.3	20.1
		下旬	22.7	42.8	10.8	32.0	17.1
	6	上旬	24.8	43.4	9.1	34.3	18.4
		中旬	24.8	42.4	13.5	28.9	20.4
		下旬	23.8	42.1	13.9	28.2	13.9
T	5	上旬	22.7	39.0	12.2	26.8	19.0
		中旬	24.1	40.5	12.2	28.3	20.1
		下旬	22.9	41.7	10.6	31.1	17.1
	6	上旬	25.0	42.1	9.3	32.8	18.4
		中旬	25.1	41.4	13.4	28.0	20.3
		下旬	23.9	39.9	14.0	25.9	19.9

2.4 不同温室土壤温度变化

由图 4 可知,相变涂层温室与普通温室平均土壤温度差异明显。5 月时,普通温室的平均土壤温度为 19.8 ℃,相变涂层温室的为 24.8 ℃,比普通温室高 5.0 ℃;6 月时,普通温室的平均土壤温度为 19.9 ℃,相变涂层温室的为 25.6 ℃,比普通温室高 5.7 ℃。与普通温室相比,5 月相变涂层温室土壤深 10 cm 温度累计高 80.2 ℃,6 月累计高 91.3 ℃。

2.5 不同墙体对乳瓜生长指标的影响

2.5.1 对乳瓜株高的影响 由图 5 可知,在乳瓜幼苗期,不同处理对乳瓜株高无显著影响,由于相变温室地温累计比对照温室高,在乳瓜开花结果期,相变温室的乳瓜株高显著高于对照温室的乳瓜。在 6 月 30 日,相变涂层温室乳瓜株高为 251.0 cm,普通温室乳瓜株高为 222.8 cm,较相变温室乳瓜株高矮 28.2 cm,且相变温室乳瓜生长速度为 0.044 m/d,普通温室乳瓜生长速度为 0.038 m/d。说明温室后墙涂抹相变材料有助于提升地温和减少气温扰动,因而提高植物的生长速率。

2.5.2 对乳瓜茎粗的影响 植株的茎不仅起到支撑植株地上部分的作用,而且还起到输送营养的作用^[10]。由图 6 可知,不同处理的乳瓜茎粗在生长初期差异显著,且相变涂层温室乳瓜茎粗高于普通温室,但随着时间的推移,茎粗增加得不明显。总体

来看,相变涂层温室的乳瓜茎粗与普通温室差异不显著。

2.5.3 对乳瓜叶面积的影响 由图 7 可知,整个试验期不同的处理对乳瓜叶面积影响不显著。普通温室乳瓜叶面积的增长速度为 5.97 cm²/d,而相变温室乳瓜叶面积增长速度为 6.49 cm²/d,较普通温室多增长 0.52 cm²/d。

2.6 温室乳瓜生长指标与环境因子的相关性分析

从表 3 可以看出,不同处理乳瓜的株高、茎粗、叶面积均与环境因子呈正相关。2 个处理乳瓜株高均与日均气温、日均土壤温度呈极显著相关,且 T 处理的相关系数大于 CK 处理。对于茎粗,CK 与日均土壤温度、夜间放热通量呈显著相关,而 T 处理与其呈极显著相关。对于叶面积,CK 与日均气温、日均蓄热通量呈显著相关,T 处理仅与日均气温呈显著相关。

2.7 不同温室乳瓜品质及产量比较

由表 4 可知,不同试验条件下,乳瓜果实品质在可溶性固形物含量、总酸含量、纵长指标上差异不显著,但在维生素 C 含量、总糖含量及横宽指标上差异显著。T 温室乳瓜维生素 C、总糖含量、横宽指标显著高于 CK,较 CK 分别增加 41.9%、27.9%、9.8%。对于产量,T 温室略高于 CK 温室,但差异不显著。总体而言,相变涂层温室所得果实品质优

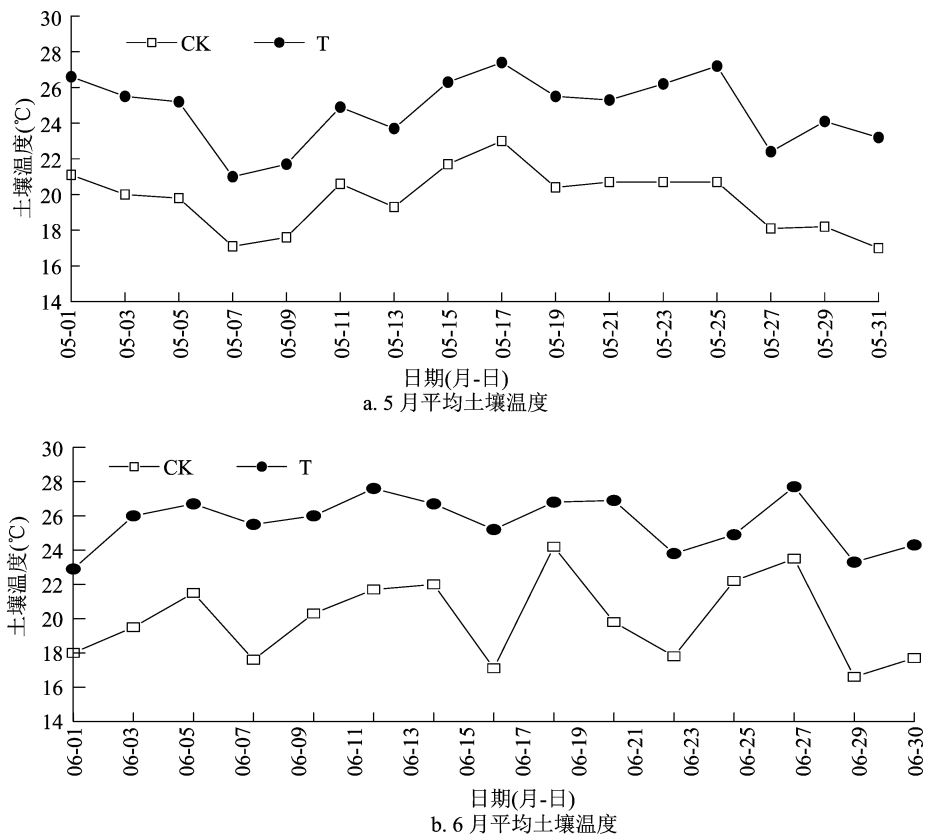


图4 不同温室室内 10 cm 处平均土壤温度日变化

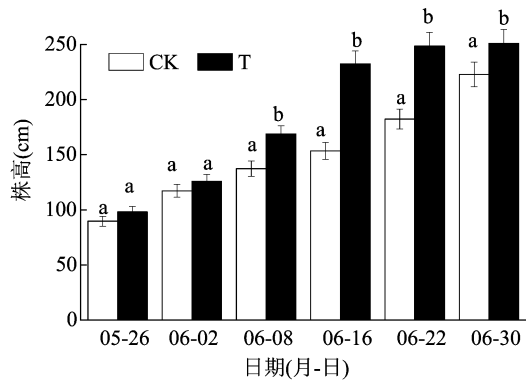


图5 不同墙体材料对乳瓜株高的影响

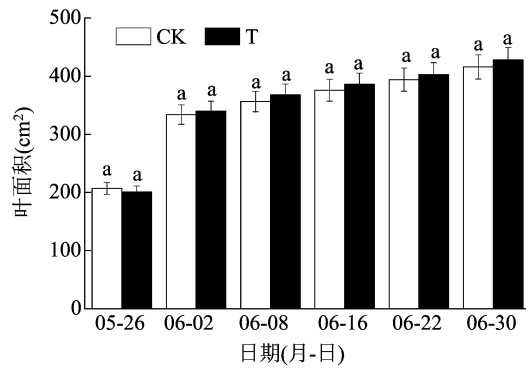


图7 不同墙体材料对乳瓜叶面积的影响

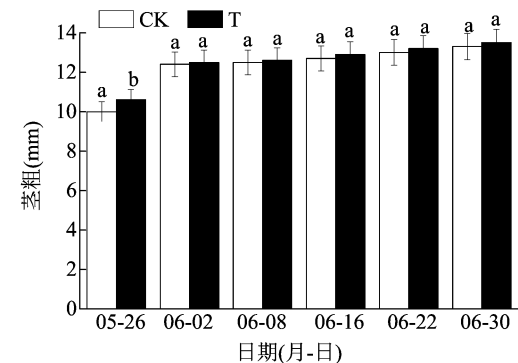


图6 不同墙体材料对乳瓜茎粗的影响

于普通温室,这与相变材料增加温室内部光照和温度有关。

3 讨论与结论

本研究统计了5—7月3个月普通温室与相变涂层温室的蓄放热通量,结果显示,温室北墙涂抹40 mm 相变材料可以提高墙体吸放热的能力,而且白天蓄热和夜间放热通量均高于普通温室。不同温室墙体内部至墙内0.3 m 厚的温度均表现为相变涂层温室优于普通温室,最高可高0.4℃。在整个试验期间,相变涂层温室的旬平均气温总是高

表 3 不同温室乳瓜生长指标与环境因子相关性分析

处理	生长指标	与环境因子的相关系数				
		日均气温	日均土壤温度	日均墙体温度	日均蓄热通量	夜间放热通量
CK	株高	0.504 **	0.608 **	0.201	0.108	0.114
	茎粗	0.364	0.347 *	0.182	0.163	0.104 *
	叶面积	0.221 *	0.189	0.158	0.124 *	0.087
T	株高	0.525 **	0.691 **	0.168	0.023	0.124
	茎粗	0.342	0.381 **	0.193	0.075	0.932 **
	叶面积	0.302 *	0.163	0.232	0.189	0.075

注：*、** 分别表示显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)相关。

表 4 不同处理对乳瓜品质和产量的影响

处理	维生素 C 含量 (mg/g)	总糖含量 (%)	可溶性固形物含量 (%)	总酸含量 (%)	纵长 (cm)	横宽 (cm)	总产量 (kg/667 m ²)
CK	0.043 ±0.02a	2.04 ±0.09a	4.87 ±0.15a	0.086 ±0.02a	26.2 ±1.35a	6.1 ±0.58a	1 607a
T	0.061 ±0.06b	2.61 ±0.05b	5.03 ±0.06a	0.088 ±0.12a	26.8 ±1.25a	6.7 ±0.25b	1 654a

注:同列数据后不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

于普通温室,最高可增加 0.3℃,且温室内最高温度表现出相变涂层温室小于普通温室,由此可见相变材料放热使其室内温度略高于普通温室,室内温度波动幅度大大减少,舒适度提高。相变涂层温室的日均土壤温度大于普通温室,最高可高 5.7℃。这与前人的研究结果^[11]基本一致。

通过对乳瓜整个生育周期的观察和测定,相变涂层温室处理对乳瓜的株高有显著影响,而对茎粗、叶面积影响不显著。这与前人研究结果^[12]一致,即应用复合相变蓄热材料的温室,可明显提高蔬菜生长的环境。相变涂层温室处理的乳瓜维生素 C 含量、总糖含量、横宽指标显著高于对照,较对照分别增加 41.9%、27.9%、9.8%。对于产量,相变涂层温室处理略高于对照,差异不显著。这与封美琦等的研究结果^[13]一致。综上所述,与普通温室相比,相变涂层温室能够对温室的热环境进行改善,从而影响蔬菜的生长和产量。根据本试验结果,建议对普通温室后墙进行改造,改善温室热环境,提高蔬菜的品质和产量,增加农民收入。

参考文献:

[1]陈超,果海风,周玮.相变墙体材料在温室大棚中的实验研究[J].太阳能学报,2009,30(3):287-293.
[2]李明,周长吉,丁小明,等.日光温室聚苯乙烯型砖复合墙保温

蓄热性能[J].农业工程学报,2016,32(1):200-205.
[3]张寅平.相变贮能:理论和应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996:125-130.
[4]管勇,陈超,李琢,等.相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J].农业工程学报,2012,28(10):194-201.
[5]孙心心,邹志荣,王宏丽,等.新型复合相变墙日光温室性能实测分析[J].农机化研究,2010,32(3):168-170.
[6]Kumari N,Tiwari G N,Sodha M S. Effect of phase change material passive thermal heating of a greenhouse[J]. International Journal of Energy Research,2006,30(4):221-236.
[7]Najjar A,Hasan A. Modeling of greenhouse with PCM energy storage [J]. Energy Conversion and Management,2008,49(11):3338-3342.
[8]Berroug F,Lakhal E K,El Omari M,et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall[J]. Energy and Buildings,2011,43(11):3027-3035.
[9]张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版,2003:128-131.
[10]姜在民,贺学礼.植物学[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2009:119.
[11]李鹏,张亚红,白青,等.基于日光温室相变材料的梯形墙体热特性分析[J].中国农业气象,2019,40(10):620-629.
[12]韩云全,陈超,管勇,等.复合相变蓄热墙体材料对日光温室热环境及番茄生长发育的影响[J].中国蔬菜,2012(18):99-105.
[13]封美琦,张亚红.日光温室后墙张挂不同材料对室内乳瓜生长特性及品质的影响[J].安徽农业科学,2012(27):13300-13303.