

石墨烯发热片不同加温方式对玻璃温室 樱桃番茄生长结果的影响

刘叶琼, 李 刚, 赵 彬, 董兴远, 汤伟华, 孙朋朋, 颜志明

(江苏农林职业技术学院 江苏句容 212400)

摘 要:以爱索 301 串收型樱桃番茄为试材, 采用悬挂、铺设等 6 种不同组合加温方式, 以不加温为对照, 研究了石墨烯聚合纳米能量发热片不同加温方式对玻璃温室无土栽培樱桃番茄生长结果的影响。结果表明, 石墨烯发热片加温对番茄植株生长、开花结实和果实产量、品质存在一定的促进作用, 安装石墨烯发热片后番茄株高(总株高 236.21~260.73 cm)、单株坐果串数(9.41~9.90 串)和单果质量(10.02~11.30 g)均有了明显的增长, 对单株总质量(734.13~871.47 g)提高有显著效果。其中, T1 组合悬挂 2 条的处理在总叶片数、总坐果数、开花串数、坐果串数方面表现较好, 但用电量最大(9 963.36 kW·h), 成本(10 606.68 元)也最高; 而石墨烯发热片铺设在椰糠条下(T6)的加温方式耗电最低, 且与对照相比对产量提高有显著效果, 单果质量提高 13.23%, 单株总质量提高 18.73%, 表现出了果实成熟速度快、增产效果好、5~8 年的使用寿命长且用电成本低(489.14 元)的优势, 性价比高, 大大节约能源。综上所述, 发热片铺设在椰糠条下适合作为樱桃番茄温室无土栽培的石墨烯加温方式推广与应用。

关键词:番茄; 石墨烯; 加温; 坐果数; 产量

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)11-151-06

Effects of different heating methods of graphene heating element on the growth and fruiting of cherry tomato in glass greenhouse

LIU Yeqiong, LI Gang, ZHAO Bin, DONG Xingyuan, TANG Weihua, SUN Pengpeng, YAN Zhiming

(Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, Jiangsu, China)

Abstract: Using Aisuo 301 series cherry tomato as the test material, six different heating methods including hanging and laying were applied, with no heating as the control, to study the effects of different heating methods using graphene polymer nano energy heating sheet on the growth and fruiting of soilless cultivated cherry tomato in glass greenhouse. The results showed that heating with graphene heating sheets had a certain promoting effect on tomato plant growth, flowering, fruiting, and fruit yield and quality. After installing graphene heating sheets, the tomato plant height (total plant height 236.21-260.73 cm), number of fruit clusters per plant (9.41-9.90 clusters), and single fruit mass (10.02-11.30 g) all increased significantly, and the yield (734.13-871.47 g) was significantly improved. Among them, the T1 combination suspension with two strips performed better in terms of total leaf number, total fruits, number of flowering clusters, and number of fruit clusters, but it had the highest electricity consumption (9 963.36 kW·h) and cost (10 606.68 yuan). The heating method of laying graphene heating sheets under coconut coir strips (T6) consumed the lowest power and had a significant effect on increasing yield, with a 13.23% increase in single fruit mass and a 18.73% increase in total mass. This method demonstrated the advantages such as fast fruit ripening, good yield increasing effect, 5-8 years of long service life, and low electricity cost (489.14 yuan), high cost-effectiveness, and significant energy savings. In summary, the heating element laid under coconut coir strips is suitable for promoting and applying graphene heating methods for soilless cultivation of cherry tomato in greenhouse.

Key words: Tomato; Graphene; Heating up; Fruit setting number; Yield

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-05-14

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2021345); 江苏省高职院校教师企业实践培训项目(2025QYSJ134); 江苏农林职业技术学院基金培育重点项目(2024kj21)

作者简介: 刘叶琼, 女, 农艺师, 主要从事蔬菜栽培技术研究。E-mail: ahlyq617@126.com

通信作者: 李 刚, 男, 副研究员, 主要从事生态农业研究。E-mail: lgofrc@126.com

温度是影响作物冬季栽培生产的关键因素,在没有加温设备的温室大棚只能依靠积蓄太阳能来提高室内温度,受天气影响很大^[1],冬春季节的连续阴雨、气温持续降低,使得喜温作物生长迟缓,甚至出现冷害,严重影响品质和产量^[2]。传统的燃煤锅炉+散热管道、热风炉、空气源/水源/地源热泵^[3]、地下蓄热系统等加温设备应用时期早,应用技术比较成熟,但在生产过程中仍存在成本较高、能耗高且污染环境等各种不足^[4-5]。设施生产中加温方式的选择至关重要,应该以最节约的成本、最有效的方式为植物提供最适宜的温度^[6]。

石墨烯是一种从石墨材料中分离出来的单层碳原子结构,是由碳原子以 sp^2 杂化方式紧密结合构成的二维六方单层结构^[7],具有超强的导热性和优异的电学性能,在很多领域都有较好的应用前景。有研究表明,石墨烯对植物生长的影响与石墨烯添加量有关,适宜浓度的添加量会促进植物的生长,在提高产量的同时还可改善作物的品质。适量浓度石墨烯可促进西瓜根系生长、叶面积和叶片数增加,并促进果径和含糖量增加^[8];促进树莓植株的生长及根系发育,促进根系生物量的积累,提高根系活性^[9]。在萝卜叶片生长旺盛期,施加 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 石墨烯可显著提高叶片叶绿素含量,促进植株增高,提高品质^[10];在朝天椒定植后淋施 0.35% 的石墨烯溶液可显著提高朝天椒维生素 C 和辣椒素含量,增加产量^[11];在芸豆始花期叶面喷施 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 石墨烯可增加光合色素含量,提高植株光合碳、氮代谢水平,进而促进干物质积累^[12]等,此外石墨烯可促进番茄种子发芽,可加速种子发芽过程,缩短发芽时间^[13]。

石墨烯电加热作为一种全新采暖方式,不仅可以用于房屋供暖,也可以广泛应用在蔬菜大棚^[4]、花卉栽培、农林育苗、粮食烘干^[14]、畜禽养殖^[15]等产业上。而石墨烯对于蔬菜生产上的加温作用报道较少,仅在辣椒^[6]、草莓^[17]、西瓜^[18]上略有报道,对于玻璃温室中樱桃番茄椰糠无土栽培的报道更少。元然石墨烯聚合纳米能量发热片,是一种含有单层石墨烯,并由多种非金属矿物质聚合而成的新型电发热纳米材料,具有能耗低、使用寿命长、安全无辐射等优良性能,可快速升温、持续加热,为植株生长提供合适的温度环境,能够解决冬季温室大棚供暖所造成的环境污染问题。本试验以爱索 301 串收型樱桃番茄为试材,结合元然石墨烯聚合纳米能量发热片的不同安装方式,以期筛选出最适合樱桃番茄

温室无土栽培的加温方式及设定的温度,为石墨烯在蔬菜种植加温上的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2023 年 11 月 21 日至 2024 年 4 月 25 日在江苏绿港现代农业研究院玻璃温室内进行,供试番茄品种爱索 301 由江苏绿港公司提供,元然石墨烯聚合纳米能量发热片特制材料供应单位为元然(苏州)新材料研发有限公司。

2023 年 9 月 21 日采用岩棉块播种育苗,10 月 18 日定植,在离地 55 cm 高的栽培架上采用 1 m 长的椰糠栽培条作为栽培基质,在顶部正上方按照 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 规格开种植孔,孔距 30 cm,每个椰糠条开 3 孔,按株行距 $30\text{ cm}\times 150\text{ cm}$ 将幼苗连同岩棉块放入孔中,插入滴箭,使用无土栽培营养液改良配方进行水分与养分供给。玻璃温室内使用天然气进行整棚加温,石墨烯发热膜片辅助加温,玻璃温室的环境温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。11 月 21 日启用石墨烯发热片,采用 DTS 6611 型三相四线电子式电能表记录悬挂式电表值,采用 DTS 844 型三相四线电子式有功电能表记录铺设式电表值,二者都是额定电压为 380 V,额定频率为 50 Hz,额定电流为 30 (100) A。

1.2 方法

试验采用悬挂和铺设 2 种方式安装石墨烯发热片,石墨烯膜悬挂式规格为 $0.75\text{ m}\times 25\text{ m}$,面积 18.75 m^2 ,功率为 2100 W,温度设定为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$;铺设式规格为 $0.25\text{ m}\times 25\text{ m}$,面积 6.25 m^2 ,功率为 700 W,温度设定为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验共设 6 组处理:植株中部与顶部的组合悬挂(T1)、植株根茎部及以上悬挂(T2)、植株中部悬挂(T3)、植株顶部悬挂(T4)、椰糠条底部铺设与植株中部悬挂组合(T5)和椰糠条底部铺设(T6),以不加温作为对照(CK)。每个处理 25 株番茄,共 4 m^2 ,3 次重复,共 12 m^2 (图 1)。悬挂式石墨烯发热片安装于植株单侧 60 cm 处,位置随吊蔓栽培番茄生长可调节高度,铺设式放置于椰糠条底部,下设保温隔热材料。

1.3 项目测定

于 11 月 21 日(定植后 35 d)开始,每处理选择 45 株进行挂牌记录,每隔 7 d 测 1 次,连续测 10 次。于 1 月 30 日采用计数法统计每株番茄的叶片数、总坐果数(坐果数统计以果实直径约 0.5 cm 且果实光泽度较好为标准)、开花串数(开花数统计以

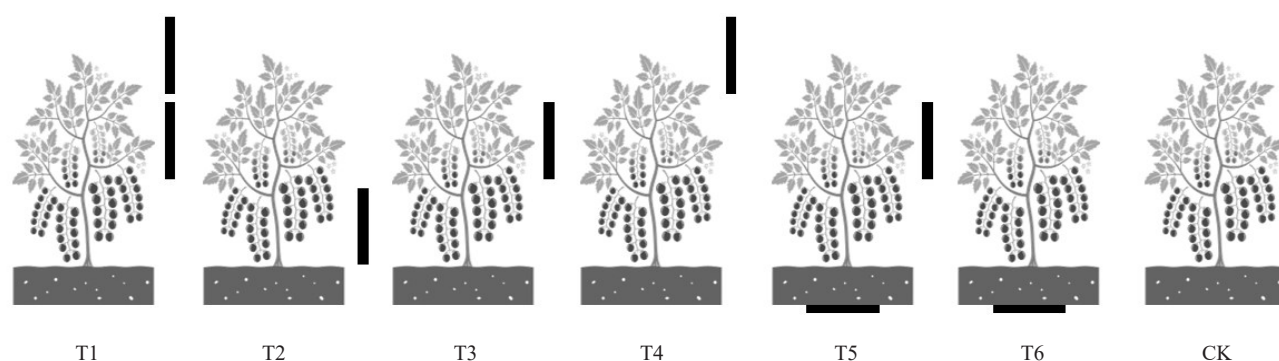


图 1 不同石墨烯发热片放置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of placement of different graphene heating elements

花瓣展开 45° 角为标准)、坐果串数, 计算平均值^[19]。使用卷尺测量周株高和总株高, 自 11 月 28 日开始每周测定 1 次, 末次 1 月 30 日测定的为总株高, 游标卡尺测量顶部茎粗(顶端生长点附近主茎的粗度)等。翌年 1 月 23 日开始, 在采收期采收成熟正常果, 使用电子称称量单果质量、单株总质量, 采用游标卡尺测量果径, 采用艾拓 PAL-1 手持式糖度计测定可溶性固形物含量, 参照 GB 12456—2021 测定总酸含量(以柠檬酸计)^[20], 参照 GB 5009.86—2016 测定维生素 C 含量^[21], 于 4 月 25 日统计采摘串数(成熟期中的整串番茄, 仅剩 2 个单果为绿色即可采收)等。分别记录铺设式和悬挂式电表的初值和终值, 并计算每个处理每天的用电量。

1.4 数据处理

数据统计分析在 Microsoft Excel 和 SPSS 25.0 中完成。利用单因素方差分析法(ANOVA)进行方差分析, 用 Dunc's 法检验处理间的差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同石墨烯发热片加热处理用电量情况比较

石墨烯发热片在 148 d 的使用时间内, 每组处理悬挂方式下的总用电量为 29 890.08 kW·h, 平均每条/每天的用电量为 33.66 kW·h; 铺设方式下的总用电量为 1 956.56 kW·h, 平均每条每天的用电量为 6.61 kW·h。从图 2 可以看出, T1 处理悬挂 2 条石墨烯发热片加温, 总用电量为 9 963.36 kW·h, 用电量最大; T6 处理在椰糠条底部铺设 1 条石墨烯发热片加温, 总用电量为 978.28 kW·h, 用电量最少; 其他处理总用电量在 4 981.68~5 959.96 kW·h, 用电量变化幅度较小。

2.2 不同石墨烯发热片加热处理植株性状比较

由表 1 可知, 所有处理的番茄植株都表现出良

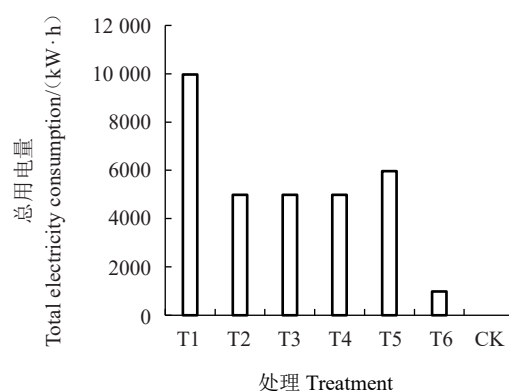


图 2 不同石墨烯发热片加热处理用电量情况比较

Fig. 2 Comparison of electricity consumption for heating treatment of different graphene heating elements

好的生长势, 但不同的处理方式之间存在一定的差异。在单株总叶片数方面, T1 最高, 为 35.63 片, CK 最低, 为 31.25 片, 其他处理在 32.19~34.53 片之间; 在总株高方面, T3 最高, T4 次之, 分别为 260.73、257.87 cm, 显著高于其他处理, T6 (236.21 cm) 和 CK (230.46 cm) 显著低于其他处理, 其他 3 个处理之间不存在显著差异; 在周株高方面, T3 最高, 为 26.07 cm, 其次为 T4 (25.79 cm), 各处理之间不存在显著差异; 在顶部茎粗方面, T5 最高, 为 10.15 mm, T6 次之, CK 最低, 为 9.51 mm, 各处理之间不存在显著差异。

2.3 不同石墨烯发热片加热处理开花结实比较

由表 2 可知, 在单株总坐果数方面, T1 最高, 为 94.04 个, T6 最低, 为 86.36 个, CK 为 86.84 个, 其他处理在 88.67~91.37 个; 在开花串数方面, T1 最高, 为 10.58 串, CK 最低, 为 9.86 串, 其他处理在 10.01~10.42 串; 在坐果串数方面, T1 和 T3 显著高于其他处理, T1 (9.90 串) 最高, 其次为 T3 (9.81 串), 而 CK (9.24 串) 最低; 在采摘串数方面, T6 (11.71 串) 最高, CK 最低, 为 11.07 串, T6 处理较

表 1 不同石墨烯发热片加热处理单株性状比较

Table 1 Comparison of single plant characteristics after heating treatment with different graphene heaters				
处理 Treatment	总叶片数 Total leaf number	总株高 Total plant height/cm	周株高 Week plant height/cm	顶部茎粗 Top stem diameter/mm
T1	35.63±0.64 a	244.30±0.69 b	24.43±3.30 a	9.79±0.92 a
T2	34.53±0.62 ab	247.29±2.47 b	24.73±3.67 a	9.87±0.84 a
T3	33.79±0.77 abc	260.73±3.82 a	26.07±3.73 a	9.85±1.07 a
T4	32.74±0.21 bcd	257.87±2.64 a	25.79±3.70 a	9.89±0.99 a
T5	33.24±0.23 bcd	248.23±3.83 b	24.82±3.35 a	10.15±0.91 a
T6	32.19±2.45 cd	236.21±1.33 c	23.62±3.97 a	10.06±0.88 a
CK	31.25±1.21 d	230.46±6.06 c	23.05±3.84 a	9.51±0.90 a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

表 2 不同石墨烯发热片加热处理单株开花结实比较

Table 2 Comparison of single plant flowering and fruiting of different graphene heating elements after heating treatment				
处理 Treatment	总坐果数 Total fruit bearing number	开花串数 Blossom string number	坐果串数 Bear fruit string number	采摘串数 Pick string number
T1	94.04±1.62 a	10.58±0.56 a	9.90±0.55 a	11.60±0.58 ab
T2	88.67±2.72 bc	10.12±0.41 cd	9.49±0.45 b	11.18±0.65 cd
T3	90.67±1.08 ab	10.42±0.61 ab	9.81±0.55 a	11.62±0.53 ab
T4	91.37±1.01 ab	10.29±0.40 bc	9.59±0.42 b	11.40±0.65 bc
T5	90.55±1.61 ab	10.12±0.46 cd	9.45±0.58 bc	11.51±0.51 ab
T6	86.36±2.20 c	10.01±0.43 de	9.41±0.46 bc	11.71±0.73 a
CK	86.84±2.56 c	9.86±0.55 e	9.24±0.46 c	11.07±0.58 d

CK 显著高 0.64 串。

2.4 不同石墨烯发热片加热处理果实产量品质比较

由表 3 可知,在果径方面,T6 最大,为 26.74 mm,其次为 T5(26.60 mm),各处理之间不存在显著差异;在单果质量方面,T6 最高,为 11.30 g,较 CK 提高 13.23%,其次为 T5(10.99 g),较 CK 提高 10.12%,二者均显著高于其他处理,其他处理间不存在显著差异;在单株总质量方面,T6 最高,为 871.47 g,较 CK 提高 18.73%,显著高于其他处理,

其次是 T5(791.07 g),CK(734.00 g)最低;在可溶性固形物含量方面,T2 最高,为 8.78%,其次是 T6(8.68%),各处理之间不存在显著差异;T5 维生素 C 含量和柠檬酸含量最高,CK 最低,T5 处理与 CK 间存在显著差异。

2.5 成本与收入的性价比分析

试验期间的总成本由石墨烯发热片材料费及其加温期间产生的电费、天然气加温费等组成。石墨烯发热片材料成本包括电热膜、智能温控仪及安装调试费等,折计成发热膜片价格约 150 元·m²;天

表 3 不同石墨烯发热片加热处理果实产量品质比较

Table 3 Comparison of fruit yield and quality after heating treatment with different graphene heaters						
处理 Treatment	果径 Fruit diameter/mm	单果质量 Single fruit mass/g	单株总质量 Total fruit mass of single plant/g	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)	w(柠檬酸) Citric acid content/(g·100 g ⁻¹)
T1	26.05±1.25 a	10.02±0.71 b	761.93±13.27 bc	8.56±0.24 a	36.18±0.27 bcd	0.40±0.01 ab
T2	26.30±0.97 a	10.02±0.69 b	734.13±1.19 c	8.78±0.42 a	36.36±0.15 abc	0.38±0.01 bc
T3	26.06±1.11 a	10.12±0.55 b	752.93±34.01 bc	8.52±0.34 a	35.94±0.26 cd	0.40±0.00 ab
T4	26.33±1.14 a	10.08±0.75 b	789.33±8.24 bc	8.66±0.34 a	35.91±0.44 d	0.39±0.02 abc
T5	26.60±1.70 a	10.99±1.06 a	791.07±29.15 b	8.46±0.39 a	36.73±0.16 a	0.41±0.00 a
T6	26.74±1.74 a	11.30±1.14 a	871.47±55.39 a	8.68±0.56 a	36.45±0.05 ab	0.38±0.01 bc
CK	26.59±1.81 a	9.98±0.98 b	734.00±25.40 c	8.37±0.39 a	35.82±0.12 d	0.37±0.03 c

然气加温费为 $60 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$, 试验区因石墨烯辅助加温, 对玻璃温室内天然气供暖的需求会减少, 该部分也是不能忽略的净能源增量成本。此外, 玻璃温室天然气加温管理需 $1 \text{ 人} \cdot \text{d}^{-1}$ 完成设备维护、维修等, 试验期间 148 d 每组处理人工成本需要 1250 元, 而石墨烯加温全程无需工作人员看管, 且叶片表面干燥、病虫害发生情况明显减少。

由表 4 可知, T6 投入的总成本最低, 为 2 240.60 元, 按照采收樱桃番茄市场零售价格 $80 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算, T6 的总收入和最终盈利均为最高, 盈利 2 988.20 元, 投资回报率达 133.37%, 回报率较高, 且元然石墨烯聚合纳米能量发热片的使用年限为 5~8 年, 折旧成本也需考虑进去, 首次投入材料购买后, 越往后成本越低, 盈利越高。

表 4 不同处理成本与收入的性价比分析

Table 4 Cost performance analysis of costs and revenue of different treatments

处理 Treatment	膜总电费 Total membrane electricity cost/Yuan	膜折旧成本 Depreciation cost of membrane/Yuan	天然气加温费 Natural gas heating fee/Yuan	人工成本 Labor cost/Yuan	总成本 Total cost/Yuan	总收入 Total income/Yuan	最终盈利 Final profit/Yuan	回报率 Return rate/%
T1	4 981.68	803.63	1 367.52	250.00	7 402.83	4 572.00	-2 830.83	-38.24
T2	2 490.84	401.81	1 367.52	250.00	4 510.17	4 404.80	-105.37	-2.34
T3	2 490.84	401.81	1 367.52	250.00	4 510.17	4 517.60	7.43	0.16
T4	2 490.84	401.81	1 367.52	250.00	4 510.17	4 736.00	225.83	5.01
T5	2 979.98	535.75	1 367.52	250.00	5 133.25	4 746.40	-386.85	-7.54
T6	489.14	133.94	1 367.52	250.00	2 240.60	5 228.80	2 988.20	133.37
CK	0.00	0.00	1 823.36	1 250.00	3 073.36	4 404.26	1 330.90	43.30

3 讨论与结论

温度和植物生长的关系密切, 是植物生长过程中一项非常重要的环境因子, 适宜的环境温度是作物高效光合与健康生长的重要保障^[22]。前人研究认为, 在较高的适宜温度下, 植株前期生长发育速率比较快、叶面积增加、植株生长加快^[23]。但是, 设施环境温度过高, 植物的呼吸作用增强, 不利于干物质向果实的运转, 而向叶片运输多, 植株积累的干物质少, 导致植株营养物质减少, 造成落果, 产量降低。在本试验中, 通过在玻璃温室内不同位置安装石墨烯聚合纳米能量发热片来进行辅助加温, 与不加温对照相比, 加温处理除了对果径影响较小外, 对植株性状、开花结实能力和产量、品质均有不同程度地改善和提高。

从植株性状上看, 发热片分别悬挂于中部(T3)和顶部(T4)的处理在总株高方面表现出明显优势, 显著高于其他处理, 组合悬挂 2 条的处理(T1)在总叶片数方面表现较好。株高和叶片数这 2 个指标可以比较直观地反映番茄的生长势, 本试验结果表明, 悬挂发热片更能促进植株的地上部生长; 从开花结实能力看, 组合悬挂 2 条的处理(T1)在总坐果数、开花串数、坐果串数方面表现较好, 表明悬挂 2 条发热片加大地上部植株受热面积, 更能促进开花结实。番茄采摘时成串采摘, 可有效缩短采摘时间, 裂果较少, 减少不必要的消耗, 同时带有果梗的

番茄保鲜时间更长, 可以一定程度地避免长距离运输导致的果实腐烂问题^[24]。本试验中在椰糠条底部铺设发热片的处理(T6)在采摘串数方面表现较好。

从果实产量、品质看, 在椰糠条底部铺设发热片处理的总质量优势明显, 显著高于其他处理, 与不加温处理相比, 单株总质量提高 18.73%, 表明番茄根部加温更能提高产量; 结合投入产出性价比, T1 组合悬挂 2 条的处理总用电量最大, 成本也最高, T6 椰糠条底部铺设的处理总用电量最小, 性价比最高, 且对产量提高有显著效果, 表现出了果实成熟速度快、增产效果好且用电成本低的优势, 可以大大节约能源。此外, 玻璃温室因受结构和材料的限制, 内部空间及外界接触的面积均很大, 室内气温随外界波动快, 控温均衡难度大、成本高; 根际环境则相反, 空间小使得其调控温度时所需的能耗远低于玻璃温室。也进一步论证了陈祎^[25]的观点, 植物对根际温度比地上部温度更加敏感, 对植物根区进行加热更有利于温室内植株生长。此外椰糠条底部铺设石墨烯发热片时加装了保温板, 起到隔热作用, 棚内温度较高时, 根系内温度上升速度较慢, 上升幅度变小, 使根系温度环境更稳定, 这样面对极端天气时可保证根系温度、维持根系活力, 这可能是其增产的原因之一。建议可以适量降低整棚加温的控制温度, 采用石墨烯发热片补偿加温, 或利用峰谷电价辅助加温, 辐射热直达作物, 能量利用率更高。而悬挂式条带存在遮光和影响果穗伸展的现象, 悬

挂式加温条带如何应用还需进一步探讨。

综上所述,石墨烯发热片铺设在椰糠条底部的根际加温方式耗电量更少,总成本也最低,提高樱桃番茄产量的效果明显,同时发热片材料本身的使用寿命也长,节能、精准、防病,适合作为冬春季节设施无土栽培种植番茄时加温的方式推广与应用。

参考文献

- [1] 何芬,丁小明,司长青.温室作物根区温度调控技术现状和发展趋势[J].农业工程技术,2022,42(31):12-16.
- [2] 张娟娟,徐晓晓,何勇.生物质石墨烯电热膜在农业大棚中的应用[J].新农业,2023(5):39-42.
- [3] 魏斌,毕研飞,唐政辉,等.基质加温系统对设施架式草莓生长结果的影响[J].上海农业学报,2020,36(2):139-145.
- [4] 王建军,代晋,沈维元,等.石墨烯远红外电暖在蔬菜集约化育苗中的应用初探与前景分析[J].中国蔬菜,2019(1):13-15.
- [5] 买静,买莉,单薄宇.温室大棚内石墨烯材料对作物生长周期与产量的影响研究[J].智慧农业导刊,2024,4(6):38-41.
- [6] 周金平,卜崇兴,黄丹枫,等.可调节根际温 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的无土栽培系统在冬季番茄生产中的应用分析[J].中国蔬菜,2020(8):41-47.
- [7] 何新民,张婷,陈飞,等.石墨烯在复合热电材料中的应用[J].化学进展,2018,30(4):439-447.
- [8] PARK S, CHOI K S, KIM S, et al. Graphene oxide-assisted promotion of plant growth and stability[J]. Nanomaterials, 2020, 10(4):758.
- [9] 薛斌龙,李丕全,张闰璇,等.石墨烯溶胶对树莓组培苗苗期生理生化的影响[J].河南林业科技,2020,40(4):11-15.
- [10] 李紫薇,乔俊,支彩艳,等.石墨烯浸种处理对萝卜生长和品质的影响[J].工程农业学报,2022,38(19):87-93.
- [11] 蒋月喜,蒋哲,王晓国,等.碳化石墨烯对朝天椒产量及其根区土壤养分和微生物群落结构的影响[J].南方农业学报,2022,53(5):1337-1347.
- [12] 于洋,孙旭冉,王诗雅,等.氧化石墨烯对芸豆花期碳氮代谢及生长的影响[J].应用生态学报,2024,35(7):1843-1849.
- [13] KHODAKOVSKAYA M, VAŇKOVÁ R, MALBECK J, et al. Enhancement of flowering and branching phenotype in chrysanthemum by expression of *ipt* under the control of a 0.821 kb fragment of the *LEACOI* gene promoter[J]. Plant Cell Reports, 2009, 28(9):1351-1362.
- [14] 黄盛杰,吴煜,沈健民.粮食干燥设备发展趋势:从热风干燥到石墨烯远红外辐射[J].江苏农机化,2021(1):33-36.
- [15] 朱晓明,周昕,徐杏,等.石墨烯加热板/膜作为仔猪保温供热体的节能特性研究[J].安徽农业科学,2020,48(24):216-217.
- [16] 李鹏.石墨烯处理对辣椒生长、产量及果实品质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2023.
- [17] 孙朋朋,王全智,李刚,等.石墨烯膜不同加温方式对设施高架基质草莓生长结果的影响[J].中国南方果树,2023,52(2):130-134.
- [18] 李刚,徐明喜,刘叶琼.石墨烯电热线在西瓜嫁接苗上的增温效果研究[J].现代园艺,2025,48(3):26-27.
- [19] 朱丽云,杨再强,李军,等.花期低温寡照对番茄开花坐果特性及果实品质的影响[J].中国农业气象,2017,38(7):456-465.
- [20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.食品安全国家标准 食品中总酸的测定:GB 12456—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定:GB 5009.86—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [22] 李邵,苏炜宣,宋少恒,等.光温耦合对日光温室番茄生长、产量与品质的影响[J].中国农学通报,2019,35(6):122-128.
- [23] 刘保才.蔬菜高产栽培技术大全[M].北京:中国林业出版社,1998.
- [24] 孙碧玉.基于深度学习的番茄果实目标检测和番茄串采摘点定位技术研究[D].天津:天津理工大学,2021.
- [25] 陈祎.植物根区加热降低温室能源消耗[J].农业工程技术:温室园艺,2008(3):20.