

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0283

新型碲化镉光伏日光温室对夏季生菜生长、 光合特性及品质的影响

马豪豪¹, 黄笑², 刘勇鹏³, 尚文凯¹, 骆恒斌¹, 齐鹏飞⁴, 梅芳⁴, 王大鹏⁴,
李西平⁴, 周鹏华⁴, 徐明明⁴, 张亚⁵, 张涛¹

(1. 河南农业大学园艺学院 郑州 450046; 2. 河南农业大学后勤处 郑州 450046;
3. 漯河市农业科学院 河南漯河 462000; 4. 宸亚(兰考县)科技有限公司 河南兰考 475300;
5. 商城县农业农村局 河南商城 465350)

摘要: 为推动光伏技术在我国农业高质量发展中的转型应用, 以 60% 遮阴的普通日光温室为对照, 研究 60% 遮光率的新型碲化镉光伏日光温室内夏季空气温度、空气湿度和光照强度的变化, 以及对生菜生长、光合特性和品质的影响。结果表明, 与 60% 遮阴的普通日光温室相比, 新型碲化镉光伏日光温室能显著降低进入温室的太阳辐射能量和太阳光线的透过率, 温室内光照强度降低 46% 以上, 空气温度降低 3 °C 以上, 空气湿度增加 30% 以上, 同时也能显著提高生菜的叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度并显著降低胞间 CO₂ 浓度。与 60% 遮阴的普通日光温室相比, 新型碲化镉光伏日光温室定植后第 28 天的生菜各生长指标均显著提高, 株高提高了 31% 以上, 叶片数增加了 19% 以上, 鲜质量和干质量分别提高了 15% 和 32% 以上; 各营养品质指标也显著提高, 可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量分别提高了 0.43 百分点、0.04 百分点、25% 和 72%。此外, 2024 年 6—9 月期间的月平均发电量为 2 076.08 kWh。综上可知, 新型碲化镉光伏日光温室在夏季生菜种植的应用中展现出了显著的经济效益, 为光伏日光温室农光互补模式应用提供了重要的理论依据。

关键词: 碲化镉光伏日光温室; 生菜; 光合特性; 品质

中图分类号: S636.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)08-136-10

Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the growth, photosynthetic characteristics and quality of summer lettuce

MA Haohao¹, HUANG Xiaoxiao², LIU Yongpeng³, SHANG Wenkai¹, LUO Hengbin¹, QI Pengfei⁴, MEI Fangfang⁴, WANG Dapeng⁴, LI Xiping⁴, ZHOU Penghua⁴, XU Mingming⁴, ZHANG Ya⁵, ZHANG Tao¹

(1. College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. Logistics Department, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; 3. Luohe Academy of Agricultural Sciences, Luohe 462000, Henan, China; 4. Chenya(Lankao County)Technology Limited Company, Lankao 475300, Henan, China; 5. Shangcheng County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Shangcheng 465350, Henan, China)

Abstract: To promote the transformative application of photovoltaic technology in the high-quality development of agriculture in China, this study compared a conventional solar greenhouse with 60% shading as a control group with a novel CdTe photovoltaic solar greenhouse with 60% shading. The study investigated changes in summer air temperature, air humidity, and light intensity, as well as their impacts on lettuce growth, photosynthetic characteristics, and quality. The results indicate that compared to the conventional solar greenhouse with 60% shading, the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse significantly reduced the amount of solar radiation entering the greenhouse and the transmittance of sunlight. The light intensity inside the greenhouse decreased by over 46%, the air temperature dropped by more than 3 °C, and the air humidity increased by over 30%. The photovoltaic solar greenhouse also significantly enhanced the chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of lettuce, while significantly reducing the inter-

收稿日期: 2025-04-09; 修回日期: 2025-04-26

基金项目: 河南省重大科技专项(241100110200); 碲化镉光伏玻璃温室研究与应用项目(30803458)

作者简介: 马豪豪, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为设施结构与环境调控。E-mail: 563328538@qq.com

通信作者: 张涛, 男, 副教授, 主要从事设施蔬菜环境调控及土壤微生态研究。E-mail: zhangtao3375@163.com

cellular CO₂ concentration. Compared to the conventional solar greenhouse with 60% shading, the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse showed significantly improved all growth indicators of lettuce for 28 days after planting. The plant height increased by over 31%, the number of leaves rose by more than 19%, and the fresh and dry mass increased by 15% and 32%, respectively; all nutritional quality indicators also showed significant improvement, with soluble solids, soluble sugars, soluble proteins, and vitamin C content increasing by 0.43 percentage points, 0.04 percentage points, 25%, and 72%, respectively. Additionally, the average monthly power generation from June to September 2024 was 2,076.08 kWh. In conclusion, the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse demonstrates significant economic benefits in summer lettuce cultivation, providing crucial theoretical support for the application of the agricultural-photovoltaic complementary model in photovoltaic solar greenhouses.

Key words: CdTe photovoltaic solar greenhouse; Lettuce; Photosynthetic characteristics; Quality

光伏作为一种清洁、可再生能源,在应对全球气候变化和推进能源转型方面都有重要作用。近年来,随着国家对新能源的重视和扶持,光伏应用市场逐渐扩大^[1-2]。日光温室主要以太阳辐射为能源,能够充分利用光热资源并提供稳定的光温条件,是节能、高效温室结构形式的代表^[3]。目前,除东北等极寒地区外,江苏、安徽、河南、山东等大部分地区的日光温室冬季保温需求较低,夏季温室内部热蓄积严重,季节性闲置现象非常普遍,导致土地资源浪费严重^[4-5]。因此,为了提高日光温室的利用效率,满足夏季温室内高温时段的降温需求,光伏日光温室的研究已成为当前的热点^[6]。光伏日光温室是光伏发电与日光温室生产的结合,不仅可为电网提供电力,还可以将储存的电能用于温室内的增温、通风、光照等辅助设施,增强对温室内环境的调控能力,提高温室性能,推动设施农业的发展^[7]。目前在光伏日光温室领域,李安喆等^[8]研究发现,铺设光伏组件能有效降低室内辐照量和温度。李娜娜^[9]设计了一种智慧光伏日光温室系统,其性能表现优异,能够满足温室90.7%的用电需求。徐明磊等^[10]研究发现,冬季光伏日光温室内的光照强度和温度均低于普通温室,但其中种植的辣椒在株高和维生素C含量等指标上却表现更优。徐明磊等^[11]研究也发现,光伏日光温室在早春气温较低时展现出良好的调控能力,有利于实现辣椒的早熟栽培。尽管国内已有一些关于光伏日光温室的研究,但其应用仍面临诸多局限性。目前,大多数的光伏日光温室采用嵌入式结构,即将光伏板镶嵌于日光温室采光屋面上,该构筑方式影响室内采光,有利于温室夏季降温,但可能会导致冬季室内光照严重不足,有必要加强对更适合光伏日光温室的透光覆盖材料的研究^[12]。

碲化镉是一种新型高效、稳定且成本相对较低的薄膜光伏材料,其透过的太阳光谱能量曲线等同于太阳穿透3 mm超白/0.5 EVA/2.2 mm普白玻璃

的曲线,可以加工出多种10%~50%透光率的光伏组件,但目前在光伏日光温室上尚未大面积使用^[13-14]。本研究以60%遮阴的普通日光温室为对照,系统研究新型碲化镉光伏日光温室(遮光率60%)的夏季室内空气温度、湿度及光照强度变化,以及对生菜生长、光合特性、品质的影响,从而为新型碲化镉光伏日光温室蔬菜优质高效种植和农光效益分析提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为河南豫艺种业科技发展有限公司提供的意大利耐抽薹生菜。

1.2 温室概况

供试的新型碲化镉光伏日光温室(简称:光伏日光温室)与对照的普通日光温室均位于河南省开封市顺河回族区的开封新材料储能产业园。光伏日光温室的尺寸为:总长40.0 m,10开间,每开间4.0 m,柱高4.0 m,脊高5.3 m,设有3个东西向屋脊,单跨度为12 m,属于地面单层建筑。温室东墙采用100 mm厚彩钢聚苯材料复合保温板;其余3面墙体为明框铝合金中空玻璃幕墙,其结构为5 mm钢化白玻+9 A+5 mm钢化白玻。屋面透明覆盖材料选用多片1200 mm×600 mm×6.8 mm的碲化镉薄膜光伏玻璃(透光率为40%),屋面开启扇采用PC阳光板。普通日光温室长60 m,宽10 m,脊高4.5 m;后墙采用37 cm厚砖墙外贴10 cm聚苯板的复合结构,高3.1 m;南墙为37 cm厚砖墙,高0.5 m。温室外覆盖5 cm厚的新型防水牛筋布保温被,通过卷帘机械实现卷放操作。

本研究中的离网式光伏日光温室发电系统由40%透光率的碲化镉薄膜光伏玻璃组件、控制器蓄电池组、逆变器、负载等部分构成。整套光伏发电系统于2023年4月安装完成,采用建筑一体化(BIPV)设计。系统共安装752块规格为1200 mm×

600 mm×6.8 mm、40%透光率的碲化镉薄膜光伏玻璃,总装机容量为41 kWp,该系统采用与市电互补运行的形式。光伏日光温室的负载主要包括卷帘机、电动开窗系统、照明系统、水肥一体化机、环境监控系统等。

1.3 设计

本试验根据温室类型和茬次的不同,共设置了4个处理,采用标准的育苗规程进行育苗,具体分为:第1茬次(2024年6月20日移栽定植,2024年7月18日收获),包含A1(普通日光温室第1茬次)和S1(新型碲化镉光伏日光温室第1茬次)处理;第2茬次(2024年8月4日移栽定植,2024年9月3日收获),包含A2(普通日光温室第2茬次)和S2(新型碲化镉光伏日光温室第2茬次)处理。所有处理的栽培管理均采用常规方式。试验采用完全随机区组设计,每个小区面积为11.5 m²,每处理重复3次,在温室两头墙边各留出1个空白小区,以减少试验误差。从定植日开始,每日观察植株病虫害情况,并及时采取相应防治措施。

1.4 温室测试项目与仪器

本研究采用GSP-8G温湿光记录仪(江苏省精创电气股份有限公司,中国),对2024年6月20日至7月18日和2024年8月4日至9月3日两个种植期间的新型碲化镉光伏日光温室和普通日光温室室内外空气温度、湿度及光照强度进行全天监测,测试高度距离地面1.5 m,每10 min记录1次数据。

1.5 生菜测定指标与方法

1.5.1 生长指标测定 每小区选取长势均匀一致、具有代表性的生菜3株,定植后每7 d记录1次株高和叶片(真叶)数;每14 d用电子秤称量1次地上和地下部的干、鲜质量。

1.5.2 叶绿素和光合指标测定 每小区选取长势均匀一致、具有代表性的生菜3株,从定植后第2周开始,用分光光度计法每7 d测定1次叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量;定植后每14 d上午09:00—11:00用LCi T/LCpro T全自动便携式光合仪(ADC Bioscientific Ltd,英国)测定1次净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂浓度。

1.5.3 品质指标测定 采收后,参照李合生^[15]的方法,用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素C含量;用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;用考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白含量;使用WZB 45便携式折光仪(上海仪电物理光学仪器有限公司,中国)测定可溶性固形物含量。

1.6 数据分析

使用Microsoft Excel 2016软件处理基本数据和作图,运用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析,采用Duncan法进行差异显著性分析。

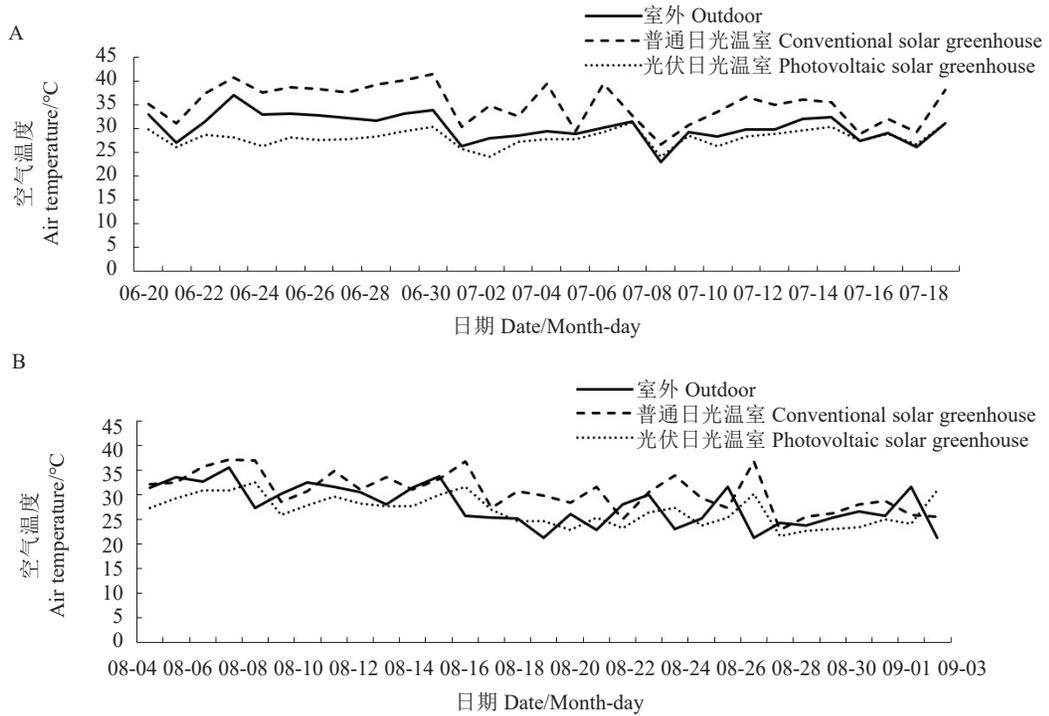
2 结果与分析

2.1 不同日光温室夏季种植期室内外环境分析

2.1.1 不同日光温室夏季种植期内06:00—19:00室内外空气温度分析 由图1可知,在夏季生菜第1茬次种植期内,普通日光温室内06:00—19:00的平均气温最高,可达35.12℃;室外次之,为30.33℃;而光伏日光温室最低,为28.07℃,比普通日光温室低7.05℃。在第2茬次种植期内,情况与第1茬次相似,普通日光温室的平均气温最高,可达30.59℃;室外为27.87℃;光伏日光温室最低,为26.83℃,比普通日光温室低3.76℃。综合分析可知,夏季种植期内06:00—19:00普通日光温室的平均气温比光伏日光温室高5.41℃,说明新型碲化镉光伏日光温室能有效降低进入温室的太阳辐射能量,从而降低夏季温室内的空气温度。

2.1.2 不同日光温室夏季种植期内06:00—9:00室内外光照强度分析 图2统计了2024年两茬次生菜种植期内每天06:00—19:00的光照强度,在第1茬次种植期内,室外平均光照强度为27 839.89 lx,普通日光温室为17 933.07 lx,而光伏日光温室内为9 576.33 lx,比普通日光温室降低46.60%。在第2茬次种植期内,室外平均光照强度为23 333.39 lx,普通日光温室为16 512.38 lx,而光伏日光温室为6 112.18 lx,比普通日光温室降低了62.98%。综合分析可知,在夏季种植期内06:00—19:00的平均光照强度排序为:室外>普通日光温室>光伏日光温室,说明新型碲化镉光伏日光温室能有效降低太阳光线的透过率,从而减少夏季温室内的光照强度。

2.1.3 不同日光温室夏季种植期内06:00—19:00室内外空气湿度分析 由图3可知,在第1茬次种植期内,室外平均空气湿度为68.45%,普通日光温室为58.37%,而光伏日光温室为81.62%,比普通日光温室高了39.83%。在第2茬次种植期内,室外平均空气湿度为69.29%,普通日光温室为60.92%,而光伏日光温室为79.75%,比普通日光温室高了30.91%。综合分析可知,在夏季种植期内06:00—19:00的平均空气湿度排序为:光伏日光温室>室外>普通日光温室,说明新型碲化镉光伏日光温室能有效提升夏季温室内的空气湿度。



注: 图 A 表示第 1 茬次, 图 B 表示第 2 茬次。下同。

Note: Figure A represent the first crop batch, figure B represent the second crop batch. The same below.

图 1 不同日光温室夏季种植期内 06:00—19:00 室内外平均空气温度

Fig. 1 Average indoor and outdoor air temperatures between 06:00 to 19:00 during the summer growing period in different solar greenhouses

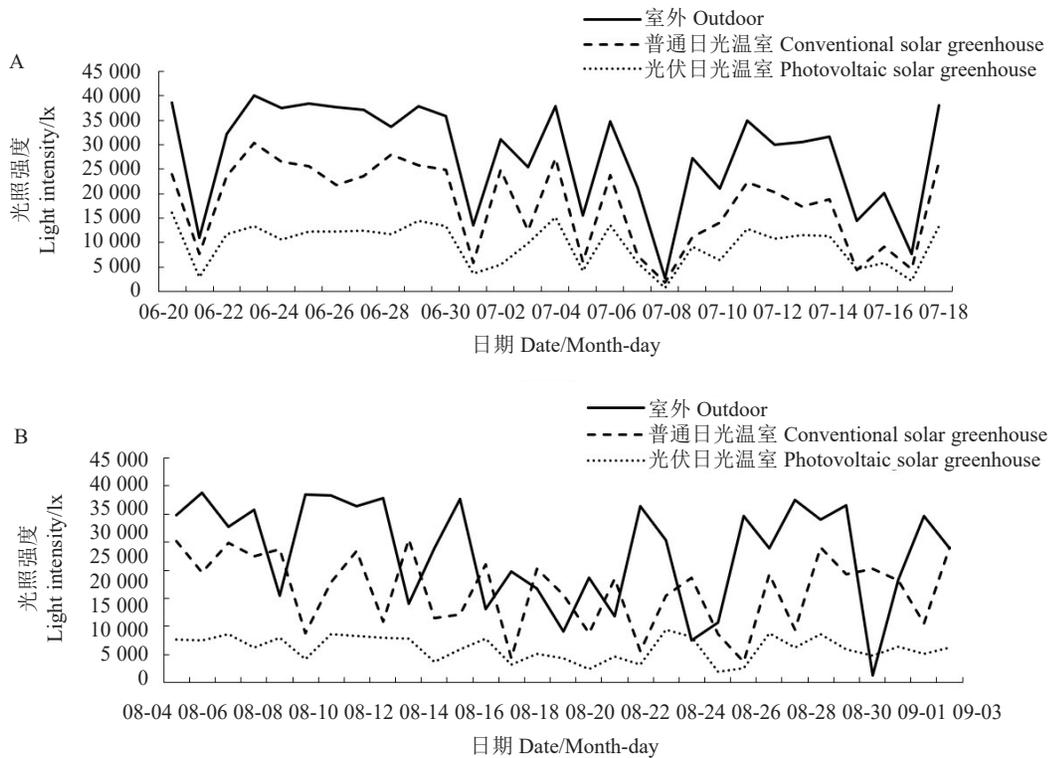


图 2 不同日光温室夏季种植期内 06:00—19:00 室内外平均光照强度

Fig. 2 Average indoor and outdoor light intensity between 06:00 to 19:00 during the summer growing period in different solar greenhouses

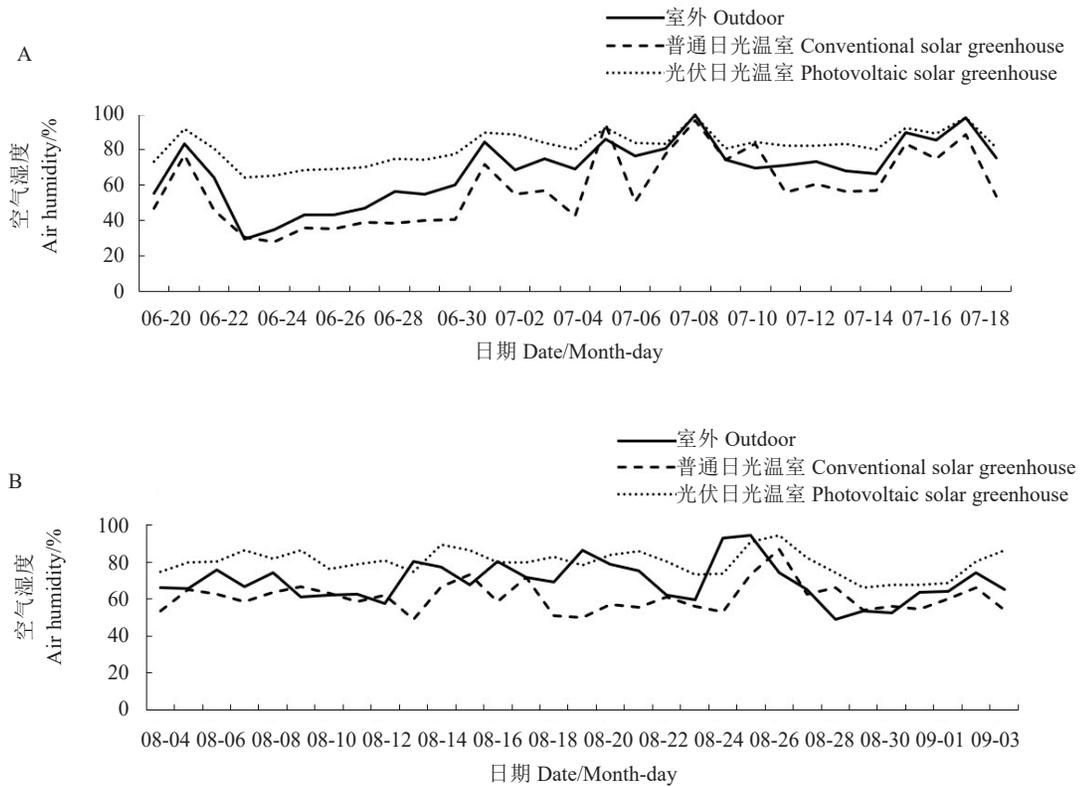


图3 不同日光温室夏季种植期内 06:00—19:00 室内外平均空气湿度

Fig. 3 Average indoor and outdoor air humidity between 06:00 to 19:00 during the summer growing period in different solar greenhouses

2.2 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜生长的影响

2.2.1 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜株高的影响 由表1可知,光伏日光温室对夏季不同茬次和不同生长时期的生菜株高均有一定影响。第1茬次生菜的4次株高,S1处理均显著高于A1,在定植后第28天,A1处理株高为15.38 cm,S1处理为24.01 cm,S1处理较A1显著提高了56.11%。第2茬次的情况与第1茬次相似,S2处理生菜的4次株高均显著高于A2。在第28天,S2处理生菜株高为25.33 cm,A2处理为19.33 cm,S2处

理较A2显著提高了31.04%。综上所述,在相同茬次下,新型碲化镉光伏日光温室的生菜株高均显著高于日光温室,有利于生菜的生长。

2.2.2 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶片数的影响 由表2可知,光伏日光温室对夏季不同茬次和不同生长时期的生菜叶片数均有一定影响。第1茬次生菜的4次叶片数S1处理均显著高于A1,在定植后第28天,S1处理生菜叶片数为18.44片,而A1为15.44片,S1处理较A1提高了19.43%。第2茬次情况与第1茬次相似,S2处理的生菜叶片数均显著高于A2。在第28天,S2

表1 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜株高的影响

Table 1 Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the height of lettuce plants in different cropping seasons during summer

处理 Treatment	定植后 7 d 7 days after planting	定植后 14 d 14 days after planting	定植后 21 d 21 days after planting	定植后 28 d 28 days after planting
A1	8.37±0.22 c	9.64±0.27 c	11.90±0.15 d	15.38±0.27 d
S1	11.93±0.22 a	14.89±0.21 a	17.82±0.29 b	24.01±0.54 b
A2	10.33±0.42 b	12.27±0.13 b	15.64±0.18 c	19.33±0.42 c
S2	12.57±0.43 a	15.01±0.25 a	19.38±0.66 a	25.33±0.36 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

表2 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶片数的影响

Table 2 Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the number of lettuce leaves in different cropping seasons during summer

处理 Treatment	定植后 7 d 7 days after planting	定植后 14 d 14 days after planting	定植后 21 d 21 days after planting	定植后 28 d 28 days after planting
A1	5.67±0.17 c	8.56±0.18 c	11.00±0.17 d	15.44±0.29 c
S1	7.44±0.18 a	9.56±0.18 b	12.78±0.22 b	18.44±0.38 b
A2	6.33±0.24 b	9.33±0.17 b	11.78±0.28 c	16.11±0.26 c
S2	7.67±0.17 a	10.33±0.17 a	14.11±0.26 a	21.89±0.26 a

处理生菜叶片数为 21.89 片, A2 处理叶片数为 16.11 片, S2 处理较 A2 提高了 35.88%。综上所述, 在相同茬次下, 新型碲化镉光伏日光温室的生菜叶

片数均显著高于普通日光温室。

2.2.3 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜地上和地下部干、鲜质量的影响 由表 3 可知, 定植后第 14 天和 28 天, 在相同茬次下, 光伏日光温室中生菜地上部鲜质量、干质量, 地下部干质量、鲜质量均显著高于普通日光温室。定植后第 28 天, S1 处理的地上部鲜质量、地上部干质量、地下部鲜质量、地下部干质量分别比 A1 显著提高了 17.42%、32.24%、30.89%、58.54%; S2 处理的地上部鲜质量、地上部干质量、地下部鲜质量、地下部干质量分别比 A2 显著提高了 15.71%、41.27%、33.77%、61.90%。综上所述, 在相同茬次下, 新型碲化镉光伏日光温室的生菜地上和地下部的干、鲜质量均较普通日光温室显著增加, 最有利于夏季生菜干鲜物质的积累。

表3 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜地上和地下部干鲜质量的影响

Table 3 Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the dry and fresh mass of the parts of lettuce in different cropping seasons during summer

定植后时间 Time after transplant/d	处理 Treatment	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g	地下部鲜质量 Underground fresh mass/g	地上部干质量 Aboveground dry mass/g	地下部干质量 Underground dry mass/g
14	A1	10.86±0.51 c	1.65±0.04 c	0.72±0.02 b	0.07±0.01 b
	S1	18.81±0.11 a	2.28±0.10 a	0.98±0.02 a	0.12±0.01 a
	A2	11.34±0.37 c	1.42±0.08 d	0.73±0.02 b	0.07±0.01 b
	S2	17.24±0.69 b	2.04±0.04 b	1.04±0.06 a	0.13±0.02 a
28	A1	66.93±3.51 b	6.15±0.13 b	10.05±0.06 b	0.41±0.03 b
	S1	78.59±2.31 a	8.05±0.16 a	13.29±0.09 a	0.65±0.02 a
	A2	68.29±1.30 b	6.13±0.41 b	9.11±0.14 c	0.42±0.02 b
	S2	79.02±2.72 a	8.20±0.34 a	12.87±0.21 a	0.68±0.02 a

注: 同列不同小写字母表示同一时期的不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$) among different treatments in the same period. The same below.

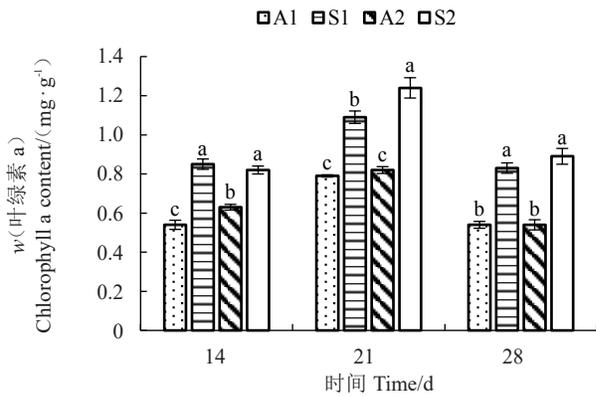
2.3 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶绿素含量的影响

2.3.1 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶绿素 a 含量的影响 由图 4 可知, 定植后第 14、21、28 天 S1 处理生菜的叶绿素 a 含量较 A1 分别显著提高了 57.41%、37.97%、53.70%, S2 处理的叶绿素 a 含量较 A2 分别显著提高了 30.16%、51.22%、64.81%。综上所述, 在定植后第 14、21、28 天, 相同茬次下, 光伏日光温室生菜的叶绿素 a 含量均显著高于普通日光温室, 说明新型碲化镉光伏日光温室能有效缓解夏季高温强光对生菜叶绿素 a 合成的抑制作用, 从而有利于夏季生菜的光合作用和有机物质积累。

2.3.2 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶绿素 b 含量的影响 由图 5 可知, 定植后

第 14、21、28 天, S1 处理的生菜叶绿素 b 含量较 A1 分别显著提高了 70.21%、78.95%、18.18%, S2 处理的叶绿素 b 含量较 A2 分别显著提高了 64.58%、95.24%、23.91%。综上所述, 在定植后第 14、21、28 天, 相同茬次下, 光伏日光温室生菜叶绿素 b 含量均显著高于普通日光温室, 说明新型碲化镉光伏日光温室能有效缓解夏季高温强光对生菜叶绿素 b 合成的抑制作用, 从而促进夏季生菜的光合作用。

2.3.3 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜总叶绿素含量的影响 由图 6 可知, 定植后第 14、21、28 天, S1 处理生菜的总叶绿素含量较 A1 分别显著提高了 64.46%、51.71%、38.70%, S2 处理生菜的总叶绿素含量较 A2 分别显著提高了 45.93%、65.95%、46.81%。综上所述, 在定植后第 14、21、28 天



注:不同小写字母表示同一时期不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same period indicate significant difference among different treatments at the 0.05 level. The same below.

图 4 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶绿素 a 含量的影响

Fig. 4 Effects of a novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the chlorophyll a content of lettuce in different cropping seasons during summer

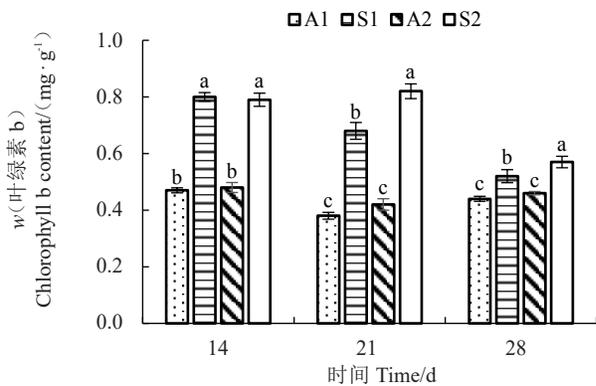


图 5 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜叶绿素 b 含量的影响

Fig. 5 Effects of a novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the chlorophyll b content of lettuce in different cropping seasons during summer

天,相同茬次下,光伏日光温室生菜总叶绿素含量均显著高于普通日光温室,说明新型碲化镉光伏日光温室能有效缓解夏季高温强光对生菜叶绿素合成的抑制作用,从而有利于夏季生菜的光合作用和有机物质积累。

2.4 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜光合特性的影响

由表 4 可知,定植后第 14 天,S1 处理净光合速率较 A1 显著提高了 22.13%,S2 处理净光合速率较 A2 显著提高了 17.57%。定植后第 28 天,S1 处理净光合速率较 A1 显著提高了 56.69%,S2 处理净光

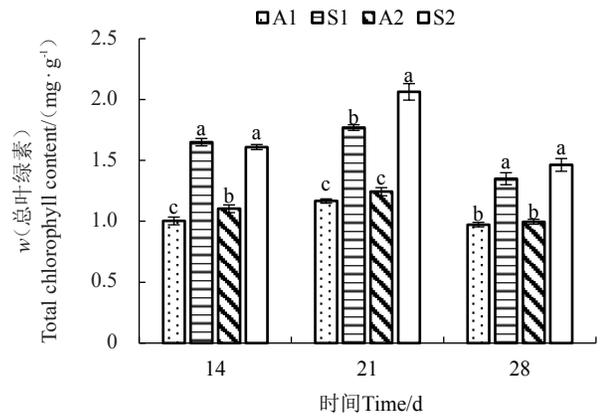


图 6 新型碲化镉光伏日光温室夏季对不同茬次生菜总叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effects of a novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the total chlorophyll content of lettuce in different cropping seasons during summer

合速率较 A2 显著提高了 56.46%。定植后第 14 天,S1 处理蒸腾速率较 A1 显著提高了 35.57%,S2 处理蒸腾速率较 A2 显著提高了 67.48%。定植后第 28 天,S1 处理蒸腾速率较 A1 显著提高了 53.77%,S2 处理蒸腾速率较 A2 显著提高了 48.83%。定植后第 14 天和第 28 天,S1 处理生菜的胞间 CO₂ 浓度均显著低于 A1;S2 处理生菜的胞间 CO₂ 浓度均显著低于 A2。气孔导度与净光合速率指标相似,定植后第 14 天和第 28 天,S1 处理均显著高于 A1;S2 处理均显著高于 A2。综上所述,在定植后的第 14 天和 28 天,相同茬次下,光伏日光温室生菜的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均显著高于普通日光温室,而胞间 CO₂ 浓度却显著低于普通日光温室,说明光伏日光温室更有利于夏季生菜的光合作用。

2.5 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜营养品质的影响

由表 5 可知,S1 处理生菜的可溶性固形物含量显著高于 A1,A1 处理可溶性固形物含量为 2.40%,而 S1 处理为 2.83%,S1 比 A1 高 0.43 百分点;S2 处理生菜的可溶性固形物含量也显著高于 A2,S2 处理可溶性固形物含量为 2.83%,而 A2 处理为 2.37%,S2 比 A2 高 0.46 百分点。S1 处理生菜维生素 C 含量显著高于 A1,增幅为 72.05%;S2 处理维生素 C 含量也显著高于 A2,增幅为 80.23%。S1 处理可溶性糖含量为 0.32%,A1 处理为 0.28%,S1 比 A1 高 0.04 百分点;S2 处理可溶性糖含量为 0.35%,A2 处理为 0.28%,S2 较 A2 高 0.07 百分点。S1 处理生菜的可溶性蛋白含量显著

表4 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜光合特性的影响

Table 4 Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the photosynthetic characteristics of lettuce in different cropping seasons during summer

定植后时间 Time after transplant/d	处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
14	A1	7.59±0.20 b	1.94±0.11 c	375.20±9.01 a	0.18±0.02 b
	S1	9.27±0.34 a	2.63±0.19 b	296.20±13.19 b	0.26±0.01 a
	A2	7.97±0.16 b	2.06±0.10 c	352.60±18.55 a	0.18±0.01 b
	S2	9.37±0.41 a	3.45±0.17 a	279.40±13.02 b	0.27±0.02 a
28	A1	14.73±0.46 b	4.11±0.24 b	530.40±11.08 a	0.16±0.02 b
	S1	23.08±0.37 a	6.32±0.22 a	375.20±10.92 b	0.26±0.01 a
	A2	14.86±0.36 b	4.28±0.22 b	550.60±13.16 a	0.17±0.01 b
	S2	23.25±0.59 a	6.37±0.42 a	390.40±12.04 b	0.26±0.01 a

表5 新型碲化镉光伏日光温室对夏季不同茬次生菜营养品质的影响

Table 5 Effects of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouse on the nutritional quality of lettuce in different cropping seasons during summer

处理 Treatment	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/($\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
A1	2.40±0.06 b	6.94±0.26 b	0.28±0.01 c	1.39±0.05 b
S1	2.83±0.15 a	11.94±0.25 a	0.32±0.01 b	1.74±0.03 a
A2	2.37±0.09 b	6.93±0.27 b	0.28±0.01 c	1.41±0.01 b
S2	2.83±0.09 a	12.49±0.34 a	0.35±0.01 a	1.79±0.10 a

高于 A1,增幅为 25.18%;S2 处理可溶性蛋白含量也显著高于 A2,增幅为 26.95%。综上所述,光伏日光温室能显著提高夏季生菜的营养品质。

2.6 新型碲化镉光伏日光温室发电量

由表 6 可知,2024 年 6—9 月,新型碲化镉光伏日光温室的月平均发电量为 2 076.08 kWh。

表6 新型碲化镉光伏日光温室发电量

Table 6 Power generation of the novel CdTe photovoltaic solar greenhouses

月份 Month	碲化镉薄膜光伏玻璃面积 CdTe thin-film photovoltaic glass area/ m^2	发电量 Power generation/ kWh
6 月 June	541.44	1 237.50
7 月 July	541.44	2 468.10
8 月 August	541.44	2 775.90
9 月 September	541.44	1 822.80
均值 Average	541.44	2 076.08

3 讨论与结论

光伏农业是未来农业发展的一种趋势,不仅能够有效利用太阳能生产出清洁的绿色能源,还有利于农业生产过程中的环境保护,从而实现高效种植并提升农业效益^[16-17]。在日光温室中,太阳能是热

量增益的主要来源。近年来受全球气候变暖的影响,我国北方地区夏季炎热期可持续 4 个多月,导致日光温室内部光照过强且温度过高,遮阴成为急需解决的问题^[18-20]。本研究使用的新型碲化镉光伏日光温室,采用 60%遮光率光伏芯片,有效解决了日光温室夏季遮阳的紧迫问题,同时该温室还具备一定的发电能力,可直接为室内设施供电。

光照对植物的萌发与生长具有重要影响。在日光温室的采光面安装光伏组件可以减少太阳辐射的摄入和热量的积累,从而降低温室内的空气温度,同时安装适当面积的光伏组件也有助于提升作物的产量^[21-23]。Fankhauser 等^[24]研究表明,大多数叶类蔬菜的光合有效辐射饱和量为全光照的 40%~50%。本试验研究表明,与覆盖 60%遮阳网的普通日光温室相比,遮光度为 60%的新型碲化镉光伏日光温室,在 6 至 9 月 06:00—19:00 室内的平均空气温度比普通日光温室低 3℃以上,光照强度降低 46%以上,室内空气湿度增加 30%以上,说明新型碲化镉光伏日光温室能有效削减进入温室的太阳辐射能量和太阳光线的透过率,降低夏季日光温室内部光照强度和空气温度,增加室内空气湿度。

光伏日光温室由于有光伏材料的遮挡,会对温

室内环境控制和作物的产量、外观、营养物质等指标造成影响^[25]。叶绿素是高等植物和其他所有能进行光合作用的生物体内含有的一类绿色色素,适度的光照能够促进植物光合作用合成有机物,光照过强或过弱均对植物生长不利,尤其是在夏季高温强光条件下,植物叶片气孔关闭,蒸腾作用和光合作用减弱,同时呼吸作用增强^[26-28]。本研究对2024年6—9月夏季的两茬生菜研究表明,与普通日光温室相比,新型碲化镉光伏日光温室能显著提高叶绿素a、叶绿素b以及总叶绿素的含量,显著提高叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度并显著降低胞间CO₂浓度,从而促进了夏季生菜的光合作用和有机物质的积累。此外,新型碲化镉光伏日光温室的生菜相比普通日光温室在定植后第28天株高提高了31%以上、叶片数增加19%以上,鲜质量和干质量分别提高了15%和32%以上;可溶性固形物含量提高了0.43个百分点,维生素C含量提高了72%,可溶性糖含量提高了0.04个百分点,可溶性蛋白含量提高了25%,表现出更高的营养品质和更好的生长状况,这与赵群法^[29]研究光伏板和生菜结合生产模式可以提高生菜品质的结论一致,与Trypanagnostopoulos等^[30]研究的光伏温室内的莴苣比普通温室更高、叶片更大且鲜质量更大的结论一致,与Ureña-sánchez等^[31]研究的使用光伏板有助于增加温室的经济效益等结论一致。

综上所述,新型碲化镉光伏日光温室能有效降低进入温室的太阳辐射能量、太阳光线的透过率、光照强度和空气温度,还能增加室内空气湿度。此外,新型碲化镉光伏日光温室对夏季生菜的生长发育具有促进作用,显著提高叶绿素含量,进而显著提高了叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度并显著降低胞间CO₂浓度,且营养品质更高。2024年6—9月,新型碲化镉光伏日光温室的月平均发电量为2 076.08 kWh,可用于温室电动开窗系统、照明系统、水肥一体化机、环境监控系统等,有效节约生产成本。

光伏集成造成的遮阴,对农作物和温室内部环境的影响也是多方面的,目前我国农业领域中光伏系统的应用尚处于探索与科研阶段,科研水平较低且理论数据支撑匮乏^[32-34]。本试验仅针对新型碲化镉光伏日光温室开展了夏季一个季度的生菜种植研究,后续还需开展春、秋、冬季以及全季度生产效益的研究,从而对新型碲化镉光伏日光温室的应用作出综合性评价。

参考文献

- [1] LA NOTTE L, GIORDANO L, CALABRO E, et al. Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications[J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115582.
- [2] 魏晓明. 光伏温室技术的发展现状与未来方向[J]. *农业工程技术*, 2015(31): 25-28.
- [3] 张惠楠, 李明, 祝鹏. 北方日光温室构造的研究进展[J]. *智慧农业导刊*, 2024, 4(6): 64-68.
- [4] 董佳瑞, 董立国, 汪城, 等. 风光互补设施温室的设计及能耗分析[J]. *农学学报*, 2023, 13(9): 74-80.
- [5] 张纪涛, 史向远, 李永平, 等. 优化日光温室热环境与建构的工程技术研究进展[J]. *农学学报*, 2021, 11(9): 72-78.
- [6] 陈健, 王玲俊. 农光互补的研究综述及展望[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(5): 1-9.
- [7] 蒋宁, 侯立娟, 李辉平, 等. 光伏温室大棚中猴头菇高产栽培技术[J]. *长江蔬菜*, 2022(3): 29-31.
- [8] 李安喆, 侯宏娟, 王锡, 等. 光伏组件布置方式对光伏温室温光环境的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(9): 285-294.
- [9] 李娜. 广西地区智慧光伏温室系统研究与设计[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [10] 徐明磊, 孙亚楠. 河南地区光伏温室冬季内环境的动态变化[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(3): 137-143.
- [11] 徐明磊, 孙亚楠. 河南地区光伏温室辣椒早熟栽培与效果[J]. *长江蔬菜*, 2023(16): 60-61.
- [12] 马云立, 傅干华, 官敏, 等. 碲化镉薄膜太阳能电池研究和产业化进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2305-2312.
- [13] 姜红旭. 新型碲化镉薄膜太阳能电池的制备与研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- [14] 王光伟. 碲化镉太阳能电池及关键薄膜材料的制备研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] 陈永亮. “光伏+”助力农业绿色化[J]. *江苏农村经济*, 2024(6): 46.
- [17] 文小华. 光伏农业产业发展探讨[J]. *黑龙江粮食*, 2021(6): 45-46.
- [18] GHANI S, BAKOCHRISTOU F, ELBIALY E M A A, et al. Design challenges of agriculture greenhouses in hot and arid environment: A review[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2018, 12(1): 48-70.
- [19] ABDEL-GHANY A M, AL-HELAL I M. Characterization of solar radiation transmission through plastic shading nets[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(8): 1371-1378.
- [20] HOLCMAN E, SENTELHAS P C. Microclimate under different shading screens in greenhouses cultivated with bromeliads[J]. *Revista Brasileira De Engenharia Agricola E Ambiental*, 2012, 16(8): 858-863.
- [21] 彭也. 光伏温室光温环境对草莓生长影响及能量管理研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [22] WOLFF X Y, COLTMAN R R. Productivity under shade in Hawaii of five crops grown as vegetables in the tropics[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science American So-*

(下转第153页)