



受控环境农业中的光子管理技术研究进展

倪子晖, 沈礼华*

西安交通大学物理学院, 物质非平衡合成与调控教育部重点实验室, 西安 710049

*联系人, Email: lihua.shen@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-10-16; 接受日期: 2026-01-06; 网络出版日期: 2026-03-16

国家自然科学基金(编号: 12574474)、陕西省自然科学基金(编号: 2025JC-YBMS-013)和陕西数理基础科学研究基金(编号: 22JSZ001)资助项目

摘要 在全球人口持续增长与气候变化影响日趋严峻的背景下, 粮食安全与能源可持续性正面临巨大挑战. 农业光子学作为一门新兴的交叉学科, 致力于通过精准调控光质(即光子分布)、光强与光周期, 为受控环境农业(Controlled Environment Agriculture, CEA)提供了一条核心的技术创新途径, 成为应对上述挑战的关键解决方案之一. 本文综述了CEA系统中光子管理技术的最新研究进展, 重点探讨了三大方向: 主动光谱调控策略, 通过可编程光源精准匹配作物光合需求; 被动光子管理方法, 利用波长转换材料优化太阳光利用并实现光能利用效率的提升; 光子管理与辐射制冷技术的集成应用, 协同管理光热环境以缓解高温胁迫. 研究表明, 农业光子学技术能显著提升作物光能利用效率、产量与品质, 同时降低系统能耗, 为实现农业可持续发展提供了切实可行的路径.

关键词 农业光子学, 光合作用, 光谱调控, 热管理, 辐射制冷

PACS: 92.20.ch, 42.70.-a, 91.62.Bf

1 引言

在全球气候变化日益加剧、人口持续增长、耕地和水资源日益紧张的背景下, 传统农业的发展模式正面临前所未有的挑战^[1,2]. 以高度依赖自然气候和资源为特征的露地种植方式, 在稳定性、资源利用效率和环境可持续性方面存在显著局限. 极端天气频发、病虫害传播加剧以及土壤退化等问题, 持续威胁农业生产的稳定性和全球粮食安全. 在此形势下, 探索更加高效、可控且可持续的农业发展路径显得尤为迫切. 受控环境农业(Controlled Environment Agriculture,

CEA)作为一种高度集约化的现代农业生产系统, 正日益获得广泛关注^[3,4]. 该系统通过对光照、温度、湿度、二氧化碳浓度等关键环境因子的调控, 显著降低对自然条件的依赖, 实现作物全年连续、高效和可控的生产. CEA不仅大幅提升了水、肥、能源等资源的利用效率, 也为推动绿色低碳农业提供了可行的技术方案.

光作为驱动植物光合作用的主要能量来源, 是CEA系统中最为关键且复杂的环境因子之一, 其调控精度直接影响作物的产量和品质^[5]. 光在植物生长中的核心作用体现在驱动光合作用, 即将光能转化为化

引用格式: 倪子晖, 沈礼华. 受控环境农业中的光子管理技术研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 240004

Ni Z, Shen L. Research advances in photon management for controlled environment agriculture (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 240004, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0456](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0456)

学能, 合成有机物质, 并为整个食物链和生态系统提供能量基础. 尽管地球表面太阳辐射资源丰富, 但作物的光能利用效率(Light Use Efficiency, LUE)普遍处于较低水平. LUE通常指植物将接收到的太阳光能转化为生物质化学能的效率. 目前, C3与C4类作物的最高LUE分别约为2.4%和3.7%, 而大田作物的平均LUE仅约0.5%. 相比之下, 水稻、小麦等C3作物和玉米、高粱等C4作物的理论光能利用效率上限分别为4.6%和6.0%^[6-8]. 因此, 在CEA系统中实现光环境的精准调控, 突破LUE低效的瓶颈, 已成为农业光子学与光生物学研究的重点方向. 提高LUE不仅包括对光质的优化, 例如借助波长转换材料与发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)人工光源实现特定光质的调控, 还涵盖光强与光周期的科学设计, 以更好地匹配植物的光合与代谢需求. 利用合成生物学手段提高LUE的研究已在既往综述中多有报道^[9], 本文不再赘述.

本文以光合生物光需求为理论基础, 系统探讨通过光子管理提升LUE的潜在策略. 本团队长期致力于光谱调控及其在CEA光子管理中的应用研究, 在光质优化与光合能效提升方面积累了一定的实验数据和理论基础. 基于此, 本文拟从以下三个方向展开综述. 第一, 主动光谱调控策略: 重点阐述基于LED等人工光源的光环境精准调控技术, 结合植物光合色素对不同波段光的吸收特性及光信号响应机制, 实现光质的高精度可编程管理, 从而最大化匹配作物光合代谢过程, 提高LUE. 第二, 被动光子管理方法: 介绍利用波长转换薄膜、光子晶体等光学材料与结构, 在无额外能耗条件下对太阳光进行光谱与空间分布的调控, 优化冠层内光分布均匀性与透射特性, 增强光能捕获与利用效率, 同时兼顾光环境管理的节能性与环境可持续性. 第三, 光子管理与辐射制冷技术的集成应用: 针对CEA系统中夏季高温引起的温室过热与土壤水分蒸发加剧等问题, 探讨将辐射制冷技术与光子管理策略协同整合, 通过降低冠层温度、缓解光抑制与热胁迫的耦合效应, 为作物光合作用创造光-温协调的最佳环境, 从而在系统层面协同提升LUE与整体生产性能.

2 光合生物光需求

光是植物进行光合作用的能量来源. 植物通常利用波长介于400–700 nm范围内的可见光光子——该波

段被称为光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)——以驱动光合碳同化过程^[10]. 然而, 植物对太阳辐射的利用效率有限, 仅能捕获到达地表总辐射中不足50%的能量.

在高等植物中, 光合作用主要依赖于三类光捕获色素: 叶绿素、类胡萝卜素和花青素. 从吸收特性看, 叶绿素a在430和665 nm处呈现明显吸收峰, 叶绿素b的吸收峰则位于453和642 nm; 类胡萝卜素主要吸收蓝光区域(400–500 nm), 其最大吸收峰值出现在448和452 nm附近(图1); 花青素作为一类辅助色素, 能够吸收过量光辐射, 有效减轻光抑制和光氧化损伤, 从而保护叶绿体中的光合色素免受过强光照的破坏.

由于这些色素的吸收特性, 植物叶片对红光和蓝光具有较高的吸收能力, 因此这两个波段的光线表现出高吸收率和低反射率. 相反, 在自然光照条件下, 植物叶片对绿光吸收最弱、反射较多, 因而呈现绿色. McCree^[11]的研究指出, 在400–700 nm的PAR范围内, 光量子产率高低依次为红光 > 蓝光 > 绿光. 需要说明的是, 该结论是基于光合光子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) $\leq 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 条件下得出的. 在低PPFD下, 绿光因吸收率较低而量子产率不如红、蓝光; 但在高PPFD条件下, 由于红光和蓝光易在表层细胞发生光饱和甚至光抑制, 其量子产率反而低于绿光, 说明绿光在强光环境下仍能有效促进深层光合.

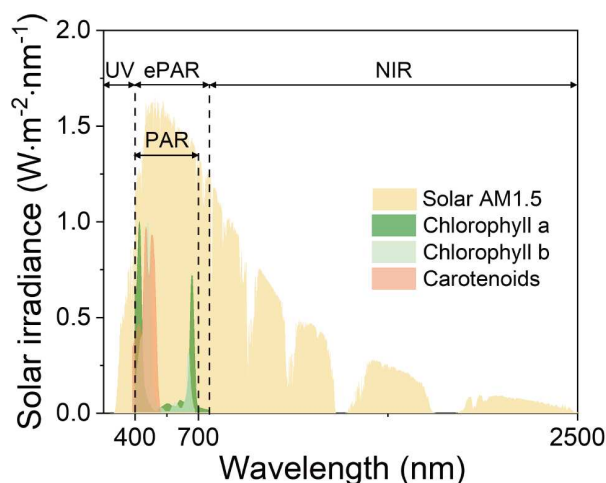


图1 太阳辐照度光谱与主要光合色素(叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素)的吸收光谱

Figure 1 Solar irradiance spectrum and absorption spectra of major photosynthetic pigments (Chlorophyll a, Chlorophyll b, and Carotenoids).

红光作为驱动光合作用的核心能量来源, 在植物形态建成和生长发育过程中发挥着关键作用^[12]. 在适当搭配蓝光的情况下, 红光可达到最高的光合效率. 此外, 红光还通过光周期途径参与调控植物的开花时间与生物节律, 并促进植株高度增加和叶片扩展. 红光处理可显著提高株高、茎粗和叶片数量等生长指标, 同时有助于提升叶片中的叶绿素含量.

蓝光在植物幼苗期和营养生长阶段具有重要作用, 尤其利于根系发育和植株健壮生长^[13]. 尽管蓝光单独照射时的光合效率较低, 但它能有效抑制茎叶的过度伸长, 增强茎秆机械强度. 叶绿素a和叶绿素b在蓝光波段表现出较强吸收峰, 蓝光还参与调控蛋白质与氨基酸的合成代谢. 适宜比例的蓝光有助于植株实现形态均衡发育, 并提高其抗逆性和农产品品质.

绿光虽被叶绿素吸收的比例较低, 但对光合系统仍具有积极贡献^[14]. 它能够驱动植物长期发育与短期光适应响应, 其作用尺度涵盖从叶绿体微观结构到整体植株水平. 绿光可深入穿透叶片叶肉组织, 到达冠层中下层和内部遮蔽区域, 既能激活深层叶绿体的光合活性, 改善受光不足叶片的光合性能, 又可作为环境信号调控植物的生理响应, 最终提高作物整体生产力与经济产量^[14-16]. 此外, 绿光可在人工光环境中平衡红蓝光谱组成, 缓解长期作业人员的视觉疲劳, 为温室和植物工厂创造更适宜的人工作业条件.

远红光(Far Red, FR, 700–750 nm)在单独作用时对光合作用的贡献较弱, 因此长期以来被排除在PAR的范围之外. 光合效率在较长波长(约685 nm以上)区域的显著下降, 最早由Emerson和Lewis^[17]在绿藻实验中发现, 被称为“红降现象”. 十余年后, 该研究组进一步发现, 当波长超过680 nm的光子与较短波长的光子共同照射时, 光合速率高于两者单独照射时的速率之和, 这一现象被命名为“Emerson增强效应”^[18,19]. 在植物生理调控方面, 远红光不仅能够促进长日照植物开花, 还通过调控光比值参与调节茎的伸长、分枝形成以及叶片扩展等发育过程. 冠层中远红光比例的增加可诱导植物扩大叶面积、调整叶倾角与叶绿体排列, 从而增强对光能的捕获能力, 同时提高光反应能量利用效率并减少非光化学耗散, 最终提升整体光化学效率^[20]. 为更准确评估远红光的光合贡献, 学术界提出了将PAR范围扩展至400–750 nm的“扩展光合有效辐射(ePAR)”概念^[21,22]. 因此, 利用远红光拓宽作物光能

吸收光谱, 已成为提高农作物产量的一项重要策略, 展现出广阔的应用前景^[23].

紫外线根据波长范围可分为UV-C (100–280 nm), UV-B (280–315 nm)和UV-A (315–400 nm). 绝大部分UV-C和UV-B被大气层吸收, 到达地表的紫外辐射以UV-A为主(占比超过95%). 在生物学效应上, 植物通过特异性光受体感知不同波段紫外线: UV-B可被UVR8 (UV Resistance Locus 8)受体感知, 进而启动光保护机制; 但过量UV-B会直接损伤DNA、蛋白质及细胞膜^[24,25]. UV-A则主要由向光素和隐花色素等受体感知, 参与调控植物的生物量积累与光形态建成^[26].

3 主动光谱调控

人工照明是CEA系统中广泛采用的光源与补光手段, 能够支持作物的周年连续生产, 并在多种气候与地理条件下显著提升作物品质^[27]. 然而, 该环节同时也是系统能耗的主要来源之一, 其能效优化已成为当前CEA研究与应用中的关键课题. 传统照明系统, 如白炽灯、荧光灯和高压钠灯, 普遍存在发光效率低、光谱与植物光合色素的吸收谱严重失配等问题. 例如, 高压钠灯的光谱输出主要集中在橙红光区域(550–650 nm), 而在光合色素吸收较强的蓝光波段(400–500 nm)则明显不足. 此外, 该类光源约有25%的电能转化为红外辐射, 产生大量热能, 不仅加剧系统冷却负荷, 还可能引起植株热胁迫.

近年来, LED技术凭借光效高、寿命长和光谱可调等优势, 已成为CEA系统中的主流光源^[4,28](图2(a)). 为克服季节、气候和空间对农业生产的限制, 蓝光-红光组合型LED已在多个国家得到广泛应用^[29]. 然而, 此类光源仍存在电路设计复杂、成本较高以及发射谱带过窄等问题(图2(b)), 导致其光谱难以完全契合植物的光质需求. 荧光粉转换LED (Phosphor-Converted Light-Emitting Diode, pc-LED)为应对上述挑战提供了一种可行路径^[30]. 该技术兼具LED的节能、长寿命和环保特性, 并能通过调控荧光粉配比实现光谱的精准定制(图2(c)和(d)), 因而被视为现代农业照明中极具发展前景的光源.

3.1 作物补光

根据光受体色素的吸收光谱, 用于植物人工补光

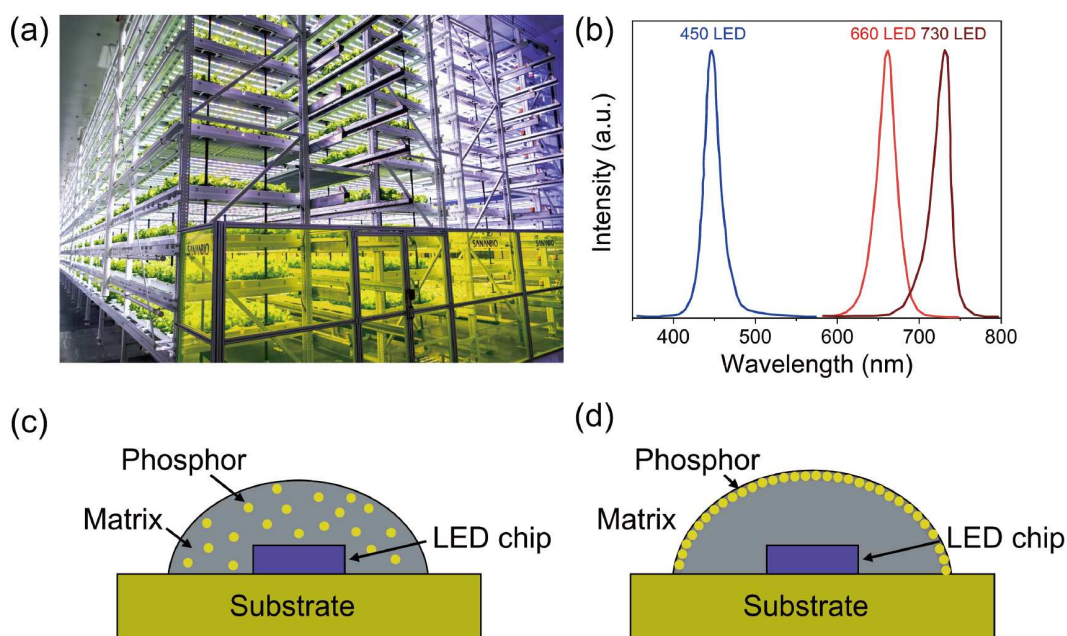


图 2 (a) LED照明的植物工厂. (b) 常用LED芯片的输出光谱. LED封装示意图: (c) 分散的荧光粉, (d) 远端荧光层
Figure 2 (a) LED lighting in a plant factory. (b) Output spectra of commonly used LED chips. Schematic diagrams of LED packaging with (c) dispersing phosphor and (d) remote phosphor.

的pc-LED主要集中于红光/远红光及近红外荧光粉的研究^[31–33]. 迄今为止, 关于蓝光荧光粉在植物人工补光LED中的应用研究相对较少, 这主要是因为自然阳光通常能为植物生长提供充足的蓝光资源. 商用GaN基蓝光LED芯片虽能直接提供蓝光, 但其窄带发射(FWHM < 5 nm)难以完全覆盖植物光受体对350–480 nm宽带光谱(中心波长430 nm)的需求. 目前, 基于Eu²⁺, Ce³⁺和Bi³⁺等激活离子的蓝光荧光粉因发光可调性强成为研究热点^[34,35]. 另一方面, 红光/远红光成分被公认为对光合作用最为关键. 红色荧光粉需具备600–680 nm的宽谱发射(中心波长660 nm), 以匹配叶绿素(Chl)和红光吸收型光敏色素(Pr)的吸收需求; 远红光荧光粉则需覆盖680–800 nm (峰值730 nm), 以响应远红光型光敏色素(Pfr). 当前可用于红光及远红光荧光粉的激活离子仍以Eu³⁺, Ce³⁺, Cr³⁺, Mn⁴⁺/Mn²⁺, Bi³⁺/Bi²⁺, Sm³⁺, Ho³⁺和Pr³⁺为主^[36–39], 它们能够提供所需的红色线性或宽带发射.

3.2 人工照明

在完全依赖人工照明的室内农业系统中, 光源需

满足植物全周期生长需求. 鉴于光受体色素的光谱响应差异及植物对绿光需求较低的特性, 全光谱或类太阳光谱光源成为理想选择. 此外, 还需兼顾人眼舒适性, 因此高显色指数(Color Render Index, CRI)、低相关色温(Correlated Color Temperature, CCT)的白光光源更适用于人工作业频繁的生产场景. 目前, 实现超宽带发射主要有单基质多色荧光粉与多色荧光粉混合两种技术路径. 后者在实际应用中常因荧光粉之间的重吸收效应, 导致发光效率下降和发射光谱色漂移等问题. 相比之下, 单基质多色荧光粉通过能量传递或多格位占据等物理机制, 能够从源头上有效规避重吸收问题, 因而被视为一种更具发展潜力的技术方案^[40,41]. 该类材料的发光特性(如Eu²⁺和Bi³⁺等激活离子的发射)对其所处的晶格场环境极为敏感, 这为精准调控发光性能提供了可能. 通过固溶体工程或缺陷工程等手段主动设计与调控其格位微环境, 已成为实现高效、可控超宽带发光的关键策略^[42–44]. 一方面, LED本身虽比传统光源(如高压钠灯)节能, 但在大型植物工厂中进行全人工光或大幅补光时, 所需的灯板数量庞大, 运行时间长, 导致总电力消耗极其惊人, 可能存在成本

上的困扰. 另一方面, 利用LED光谱灵活可调的特性, 研究单一波段以及不同波长之间的协同与拮抗作用, 进而完善“光配方”数据库.

4 被动式光子管理

与基于LED等人工光源的主动式光调控技术不同, 被动式光子管理技术主要针对自然光照条件, 对太阳光的光照强度与光质进行调节与管理^[45,46]. 地球表面接收到的太阳光谱大致由5%的紫外线辐射(UV, 波长范围250–400 nm), 45%的可见光辐射(Vis, 400–700 nm, 该波段与PAR匹配), 以及约50%的近红外辐射(NIR, 700–2500 nm)组成. 基于太阳光谱的组成特性, 被动式光谱管理目前主要采用两种技术路径: 一是通过反射、散射或吸收等手段, 选择性透过特定波段并阻挡其他部分; 二是将光合效率较低或不利于植物生长的波长(如部分绿光、紫外光或近红外光)转换为对光合作用、植物形态建成、生长发育或温室微环境调控更为有效的波长(如蓝光或红光).

4.1 光谱选择性阻隔材料

紫外线阻隔型覆盖材料可有效阻挡紫外波段, 是目前常见的阻隔性材料之一. 当前温室中广泛使用的塑料覆膜和玻璃覆盖材料对紫外线具有高度不透性, 不仅有助于延长材料自身使用寿命, 还能优化温室内的光环境, 促进作物生长. 为实现这一特性, 生产中通常会在塑料覆盖材料中添加多种紫外线稳定剂, 如氧化锌纳米粒子^[47,48], 其凭借特殊的电子带隙结构可实现对紫外辐射的选择性吸收. 近红外辐射虽较少被植物吸收, 却易被温室结构部件(如金属骨架、覆盖材料等)吸收, 导致室内温度升高. 通过在覆盖层中引入近红外阻隔功能, 可调控进入温室的光谱组成与辐射总量, 从而有效降低夏季高温条件下温室内部的温度积累, 减轻热负荷, 减少制冷需求, 进一步提升温室的环境调控能力和生产节能效果. Lanfranchi等人^[49]研发了一种聚合物分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflectors, DBRs) (图3(a)). 该器件在近红外光谱区具有高反射率的光子带隙结构, 同时在可见光区保持高度透明, 能够选择性反射热辐射(图3(b)). 实验结果表

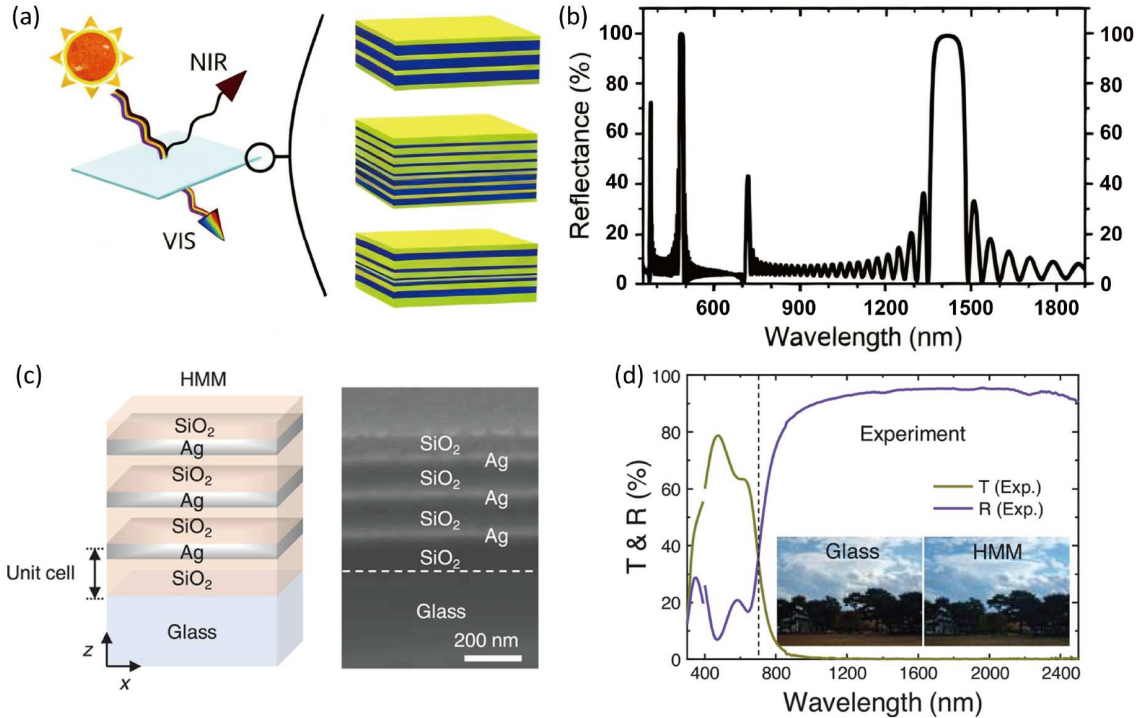


图 3 (a) DBRs示意图. (b) 典型聚合物DBRs的反射率计算光谱^[49]. (c) HMMs的结构示意图和SEM图像. (d) 实验测量的HMMs的透过率和反射率光谱^[54]

Figure 3 (a) Schematic diagram of DBRs. (b) Calculated reflectance spectra of typical polymeric DBRs [49]. (c) Structural schematic and SEM image of HMMs. (d) Experimentally measured transmittance and reflectance spectra of the HMMs [54].

明,相较于无屏蔽的参照组,该DBRs结构可实现高达52%的辐射屏蔽效率,为温室热管理提供了有效解决方案.此外,通过构建介电层/金属层/介电层(D/M/D)叠层结构,能实现材料在可见光部分的高透过和近红外的高反射^[50].研究显示,通过在D/M/D结构中引入薄金属层(厚度<30 nm),并利用上下介电层调控光学导纳以满足零反射条件,可在可见光区域实现较高的透射率(>60%),同时在1410–2500 nm波长范围内表现出优异的光谱选择性,反射率可超过80%.此类结构已在多个材料体系中得到验证,如ZnO/Ag/ZnO^[51], WO₃/Ag/WO₃^[52]和WO₃/Au/WO₃^[53]等.然而,受金属薄膜自身反射特性的限制,该类结构在810–1350 nm波段内的反射性能普遍较弱,反射率通常低于60%,这一缺陷在一定程度上制约了其在近红外区域的整体屏蔽效果.

为解决上述问题, Kim等人^[50]提出在TiO₂/Ag/TiO₂基础结构上引入额外的TiO₂层与SiO₂间隔层,从而在810–1350 nm波段内有效增强反射.该设计通过插入高折射率的TiO₂层,在不降低可见光透射率的前提下,显著提升了该波段的菲涅耳反射,最终实现了在810–2500 nm整个近红外范围内的高反射性能.经优化后的多层膜结构TiO₂ (32 nm)/Ag(22 nm)/TiO₂ (30 nm)/SiO₂ (100 nm)/TiO₂ (110 nm)/玻璃,在近红外区域的太阳能阻隔率达到89.2% (其中反射贡献86.5%,吸收占2.7%),同时可见光透射率仍保持在69.9%的高水平.近期, Jin等人^[54]利用一维平面双曲超材料(Hyperbolic Metamaterials, HMMs),其近零介电常数(Epsilon-Near-Zero, ENZ)波长可通过结构参数进行人工系统调控.该结构以银(Ag)和二氧化硅(SiO₂)的垂直交替多层堆叠为单元,通过调节二者的填充比例(厚度比)即可精确设计ENZ波长.图3(c)展示了制备的HMMs结构示意图及扫描电子显微镜(SEM)图像(三组SiO₂ 115 nm/Ag 12 nm堆叠层,顶部另覆盖60 nm厚的SiO₂保护层).该HMMs在800–2500 nm波段实现了>89%的平均反射率,同时保持>60%的可见光透过率(图3(d)).尽管此类反射型NIR阻隔材料具备优异的光谱选择透过性能,但其在规模化应用中仍面临诸多限制.其制造通常依赖物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)、化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)和磁控溅射等工艺,这些方法不仅成本高昂,而且技术复杂度显著,制约了其大规模推广与应用.

相比之下,吸收型NIR阻隔材料在成本控制与制

备工艺方面具有显著优势.该类材料以金属氧化物基材料为代表,主要包括锡掺杂氧化铟(ITO)、铟掺杂氧化锡(ATO)及氧化铯钨(Cs₂WO₄)等,因其可见光高透过率和近红外高光学吸收性能而备受关注. Wang等人^[55]近期的研究表明,通过引入近红外吸收材料Cs_{0.33}WO₃,成功制备出一种聚甲基丙烯酸甲酯(Poly Methyl Methacrylate, PMMA)基柔性纳米复合薄膜.该薄膜在保持可见光区高透射率(>75%)的同时,展现出优异的近红外光吸收能力(吸收率>90%).值得注意的是,由于该薄膜具备较强的近红外吸收性能,其在光照下自身温度显著上升.这一特性能够有效提升其覆盖区域的温度,在冬季低温环境中表现出积极应用价值.例如,实验结果表明,在太阳辐照度为650 W m⁻²、环境温度为10°C的条件下,覆盖该薄膜的光生物反应器内部温度较未覆盖组可提高达5°C.然而,在夏季高温环境下,尽管薄膜能够阻隔大部分近红外辐射,但其自身吸热可能导致覆盖区域内部温度进一步上升,从而增加制冷负荷与能耗.

4.2 光谱选择性转换材料

通过反射、散射或吸收等方式选择性调控太阳光谱中的特定波段,在阻挡其他光组分的同时,也一定程度上制约了CEA系统的能源利用效率.若能将太阳辐射中光合效率较低或不利于植物生长的波长(如部分绿光、紫外光或近红外光)转化为对光合作用、植物形态建成、生长发育或CEA微环境调控更为有效的波长(如蓝光或红光),这类被动式光管理技术不仅能降低生产系统的能耗,也为提升农业生产的可持续性提供了重要路径.

基于波长转换的光子管理技术,主要通过优化到达生物体的入射光与其光捕获色素吸收之间的光谱匹配度,从而增强光合作用效率^[56–59].典型的波长转换材料通常以光学性能优良的聚合物或玻璃为基体,通过在其内部掺杂或表面涂覆荧光物质(如稀土掺杂荧光粉、有机染料、量子点等)实现光谱调控功能^[60–64].这些荧光材料能够选择性地吸收太阳光谱中的特定波段,并将其转换为波长较长(能量较低)或较短(能量较高)的光子重新发射,从而实现光谱的有效调控.由于聚合物材料具备良好的柔性与可加工性,目前常见的波长转换材料多采用聚合物薄膜形式,主要可分为反射型与透过型两类.

4.2.1 反射型光转换材料

反射型光转换薄膜通常是将掺有荧光材料的聚合物涂层制备于反光基板(如白色板材或金属板)表面,经波长转换后产生的光子与入射光一同被反射至植物冠层. 由于该结构不依赖薄膜本身透光,因此对材料的透射率要求较低,允许使用稀土掺杂荧光粉等粒径较大、散射能力强的荧光材料来实现高效的光谱转换. 例如, Li等人^[65]将 $\text{Ca}_{0.8}\text{Na}_{0.6}\text{Gd}_{0.6}\text{MgWO}_6:\text{Mn}^{4+}$ 荧光粉掺入聚丙烯聚合物中,制备出反射型波长转换薄膜. 该薄膜能够吸收太阳光中的紫外和蓝光成分,并将其转换为深红色光,再经反射传至作物表面,从而改善冠层光微环境. 此外, Wondraczek等人^[66]设计了一种平板式的反射型光生物反应器(Photobioreactors, PBRs),采用掺有 $\text{Ca}_{0.59}\text{Sr}_{0.40}\text{Eu}_{0.01}\text{S}$ 荧光粉的聚对苯二甲酸乙二醇酯作为波长转换层,能够将入射光中的绿光有效地转换为红光. 转换后的红光经由背部的铝箔反射回PBRs内部,显著优化了微藻的光利用效率.

4.2.2 透射型光转换材料

透射型光转换薄膜是当前CEA系统中广泛采用的一种光调控手段,常直接用作采光覆盖材料^[35,67-69]. 与反射型薄膜不同,透射型薄膜能够在光线穿过材料的过程中主动调节其光谱组成,将光合效率较低的光(如绿光)或对植物有潜在危害的波段(如紫外光)转换为PAR范围内的有益波长,如图4所示. 这种原位光谱转换机制使得光线在穿透薄膜的同时即可被作物冠层高效利用,从而实现对光环境的直接优化. 为维持薄膜的高透光性,所使用的荧光材料(如有机染料、量子点等)通常具备较小的粒径,以最大限度地减少光散射引起的光学损失.

以Müller等人^[70]报道的一种含铕(Eu^{3+})多氧钛酸盐发光材料为例,该材料作为下转换型光子管理功能的代表,通过系统化的分子设计优化,成功将UV转化为PAR波段,量子产率可达68%. 尽管该材料在转换过程中导致透射的PAR波段能量总量下降约8%,但其在增强冠层漫射光比例、降低系统内部温度以及提升作物实际光合效率方面展现出综合优势,对作物生长具有积极的调控作用.

然而,受聚合物材料折射率的影响,荧光材料发射的光子中有相当一部分会因全反射效应被束缚在材料内部^[71,72],无法有效逸出至植物冠层,这一现象限制了

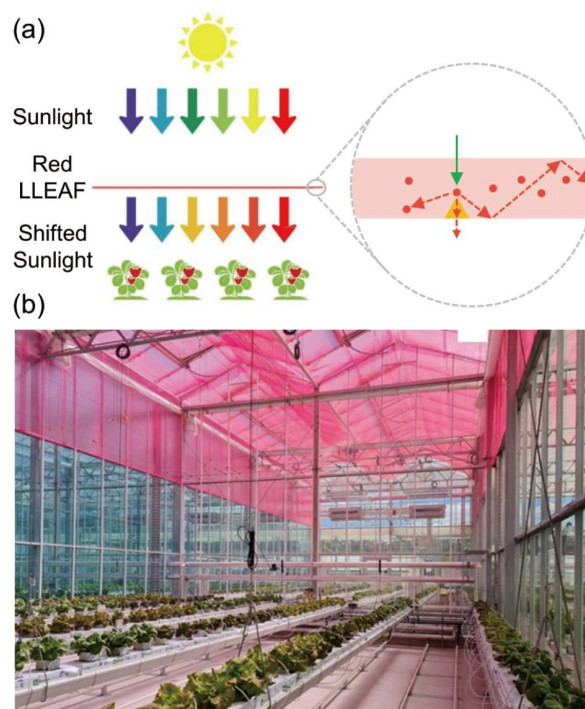


图 4 (a) 波长转换薄膜促进温室植物生长的示意图; (b) 覆盖红色LLEAF (LED Lighting for Enclosed Plant Production) 薄膜的温室用于绿叶蔬菜种植

Figure 4 (a) Schematic illustration of spectral conversion materials in a greenhouse setting for enhancing plant growth. (b) Greenhouse covered with the commercially available red LLEAF films for the growth of leafy greens. Republished with permission from LLEAF (<http://www.lleaf.com.au/>).

其实际的光合增强效率. 根据斯涅耳定律, 所有以大于临界角(θ_c)的角度射向材料与空气交界面的光子都将被反射.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right),$$

其中, n 为材料的折射率. 对于具有平整表面的波长转换材料, 这些内部反射的光子会被俘获在材料内部. 光子俘获效率(η_{trap})指的是在发光材料中通过全内反射被俘获的再发射光子所占的比例, 其值仅由临界角决定:

$$\eta_{\text{trap}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}.$$

另外, 以小于临界角发射的光子将从材料中逸出, 可供外部利用. 表面发射能力可通过外部量子效率(η_{EQE})进行量化, 其定义为从材料表面逸出的光子数与所有被吸收光子数之比:

$$\eta_{\text{EQE}} = \eta_{\text{extraction}} \times \eta_{\text{QE}} \times (1 - \eta_{\text{Self-absorption}}).$$

显然, η_{EQE} 取决于光提取效率($\eta_{\text{extraction}}$)、内部量子效率(η_{QE})以及发光试剂的自吸收效率($\eta_{\text{Self-absorption}}$), 其中, $\eta_{\text{extraction}}$ 定义为表面发射光子数与所有内部发射光子数之比, 而 η_{QE} 和 $\eta_{\text{Self-absorption}}$ 则主要由荧光材料本身的光学特性决定.

假设某一波长转换材料光学均匀、各向同性, 折射率 $n = 1.5$. 在不考虑自吸收的理想情况下, $\eta_{\text{extraction}}$ 最大约为 25%. 这意味着在波长转换后产生的光线中, 仅有不到 13% 可从平面薄膜两侧均匀射出, 近 75% 被俘获在薄膜内部. 利用发光材料的光俘获特性, 研究人员开发了荧光太阳能集中器 (Luminescent Solar Concentrator, LSC) [73–75]. 该器件通过在波长转换材料的边缘贴合太阳能电池, 收集被引导至边缘的光子, 并将其转换为电能. 将 LSC 用作温室覆盖材料时, 不仅能选择性透过对植物光合作用有益的光谱成分, 还能将难以被植物直接利用的光转化为可观的电能. 研究表明, 与在全光谱太阳光下生长相比, 采用 LSC 覆盖的温室在藻类、番茄、罗勒等光合生物的生长速率并未降低的同时, 实现了有效的发电功能 [76–79].

为提升发光材料的 η_{EQE} , Shen 等人 [68] 提出了一种基于微光子结构的单向光提取策略. 如图 5 所示, 该结构由精心设计的微穹顶单元构成, 这些单元以四方阵列紧密排布于有机荧光小分子掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯薄膜上表面. 定量分析表明, 该微光子薄膜的 $\eta_{\text{extraction}}$ 高达约 89%, 且外部出射光中有 73% 被重新导向植物方向. 因此, 经微光子结构图案化处理的波长转换薄膜的 η_{EQE} 提升至约 44%, 显著高于对照组薄膜的 18%. 此外, 在荧光基质中嵌入 TiO_2 [80] 和 ZnO [81] 等纳米或微米级散射颗粒, 也被证明具有提升 $\eta_{\text{extraction}}$ 的潜力, 为增强波长转换材料的实际性能提供了另一可行路径. 通过光谱吸收和光谱转换材料的引入, 以及微纳光学结构的设计可以对光谱进行“光谱筛选”和“废光利用”, 实现有效的按需调控. 当前, 被动式光学薄膜的功能集成度较低, 难以在同一材料体系中协同实现光谱转换、近红外阻隔与环境响应等多重目标. 另一方面, 基于微纳结构的功能薄膜虽在性能调控上潜力显著, 但其制备工艺复杂, 成本高昂, 且大面积制备时结构的均一性难以保证, 因而在规模化应用与推广方面面临严峻挑战.

5 光子管理与辐射制冷技术的集成应用

辐射制冷技术是一种利用热辐射这一被动零能耗过程, 从外太空这一“冷源”中获取冷量的创新方法 [82]. 净冷却功率 (P_{net}) 受太阳辐射、环境温度、大气辐射等因素的影响, 具体公式为

$$P_{\text{net}} = P_{\text{rad}} - P_{\text{sun}} - P_{\text{atm}} - P_{\text{env}} - P_{\text{conv+cond}},$$

其中, P_{rad} 为辐射冷却材料散发的热辐射功率, P_{sun} 为吸收的太阳辐射功率, P_{atm} 为大气辐射功率, P_{env} 为周围物体辐射功率, $P_{\text{conv+cond}}$ 为对流和传导引起的热流. 因此, 在进行辐射冷却材料及结构设计时, 应尽可能通过优化辐射谱以提高其辐射功率 P_{rad} , 同时, 还要尽量降低后 4 种环境因素带来的影响, 如对于阳光较为强烈的天气或地区来说, 太阳的辐射功率可高达 1000 W m^{-2} , 1/10 的吸收率即可轻易抵消透过大气窗口辐射的冷却效果. 近年来, 辐射制冷技术已广泛研究, 并在不同应用场景 (如太阳能电池、降温织物、智能窗等) 中实现了选择性光谱设计 [83–85]. 然而, 应用于植物光合作用的降温薄膜对光谱要求更加严格. 针对 CEA 系统, 为实现有效的日间辐射制冷, 材料需同时满足三个关键光学特性: (1) 在大气窗口波段 (8–13 μm) 具备高热发射率; (2) 在 ePAR 波段 (0.4–0.75 μm) 具备高的透射率; (3) 在其余太阳光谱波段 (0.3–0.4 和 0.75–2.5 μm) 保持超高反射率 (最低阈值 >90%, 理想情况下 >95%).

5.1 基于一维光子晶体的辐射制冷薄膜

Zou 等人 [86] 开发了一种新型透明辐射制冷 (T-RC) 薄膜, 能够在炎热气候条件下有效降低温室热应激, 同时维持作物光合作用效率, 为高温地区的可持续农业提供了可行路径 (图 6). 该薄膜总厚度为 115 μm , 采用三层复合结构: 底层为 50 μm 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 保护层, 其上涂覆两层厚度为数十纳米的银层构成选择性反射层, 可针对紫外和近红外波段实现高效反射; 外层则由约 65 μm 厚的含 C–F 键透明聚合物构成选择性发射层. 得益于其多层光学设计, T-RC 薄膜在可见光范围内具有高透光性 (PAR 波段透射率达 68.92%), 可充分支持植物光合作用, 而在紫外和近红外波段透射率分别仅为 14.47% 和 20.85%, 有效阻隔热量输入. 此外, 薄膜在大气窗口 (8–13 μm) 表现出高发射率, 可将热量以辐射形式直接散发至外太空, 进一步增强降温效果. 实验结果表明, 相较于传统

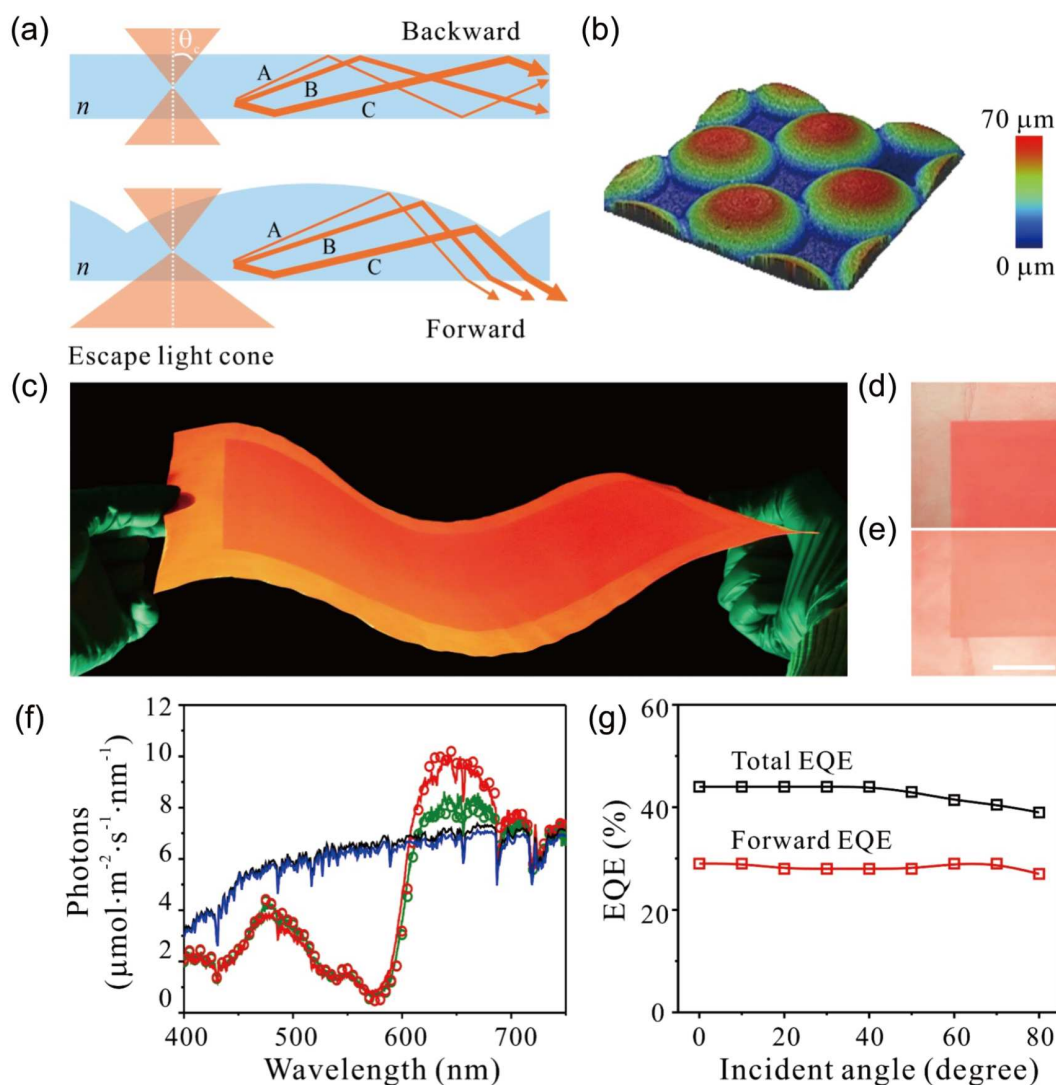


图 5 (a) 平面薄膜与具有表面微穹顶结构的单向光提取薄膜的侧面示意图. (b) 微穹顶结构的表面形貌图. (c) 单向光提取薄膜在绿光下的照片, 其中微结构区域尺寸为 $150 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$. 单向光提取薄膜的(d)前视与(e)后视效果. (f) 模拟太阳光照下的前向光谱辐照度对比. (g) 单向光提取薄膜在不同入射角下的总外量子效率与前向外量子效率^[68]

Figure 5 (a) Schematic side views of a planar film and a unidirectional light extraction film with a surface micro-dome structure, respectively. (b) Surface morphology of micro-dome structure. (c) Photograph of a representative unidirectional light extraction film under green light illumination, where the structured area measures $150 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$. (d) Front and (e) back views of the unidirectional light extraction film. (f) Comparison of forward spectral irradiance under simulated solar irradiation. (g) Total external quantum efficiency (EQE) and forward EQE of the unidirectional light extraction film at different incident angles ^[68].

聚烯烃(Polyolefin, PO)薄膜, T-RC薄膜在通风与密闭条件下分别可使温室内温度降低 6°C 和 18.6°C , 土壤温度也相应下降 7°C 和 10°C , 从而将温室温度稳定控制在 35°C 以下, 有效避免高温对作物的损害.

值得注意的是, 尽管T-RC薄膜在PAR波段具备较高透射率, 但其对该波段并不具备光谱选择性. 考虑到植物光合作用对不同波长光的利用效率存在差异,

若能选择性阻隔PAR中贡献较低的绿光波段, 将有助于进一步减少太阳热负荷. 基于这一思路, Li等人^[87]研制出一种专为植物光合作用优化的辐射制冷薄膜(PRCF). 该薄膜采用三明治结构, 依次包括在太阳光波段高透、中红外高发射的聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)辐射层, 具备光谱选择性的一维光子晶体层($80 \text{ nm SiO}_2/110 \text{ nm TiO}_2/140 \text{ nm SiO}_2/$

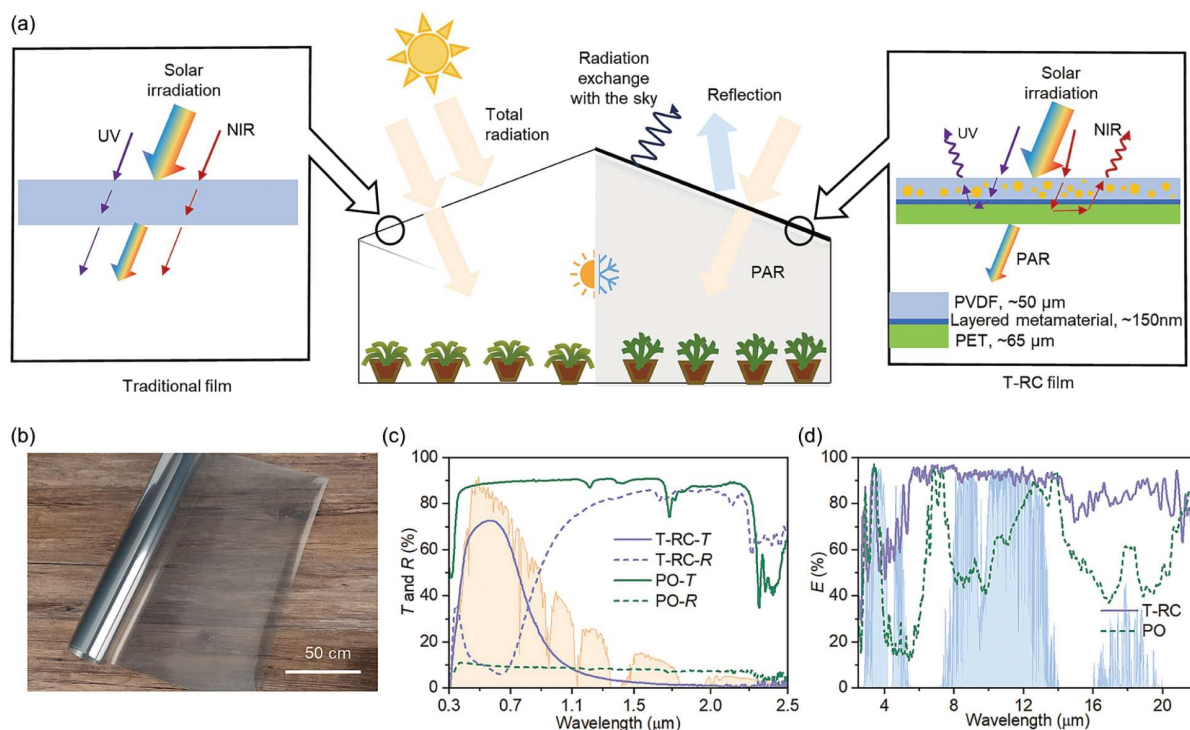


图 6 (a) T-RC 薄膜与传统薄膜在太阳辐射下的温室热平衡模型. (b) T-RC 薄膜的实物图片. T-RC 薄膜与聚烯烃薄膜在(c)太阳辐射波段及(d)红外波段的光谱性能实测结果^[86]

Figure 6 (a) Schematic diagram comparing the greenhouse heat balance using T-RC film versus a conventional film under solar irradiation. (b) Physical image of the T-RC film. Measured spectral thermal radiation performance of T-RC film and polyolefin (PO) film in the (c) solar and (d) infrared wavelength ranges ^[86].

8 nm Al_2O_3 /17 nm Ag /8 nm Al_2O_3 /188 nm TiO_2 /65 nm SiO_2 /85 nm TiO_2), 以及具有防雾功能的聚丙烯酰胺水凝胶层, 实现了宽波段、高选择性的光谱调控. 在该研究中, 一维光子晶体结构的设计与优化是决定其光学性能的核心环节. 近期, 该团队进一步提出了一种结合遗传算法与机器学习(串联神经网络)的协同优化方法, 旨在加速具有理想光谱特性、易于制备且弱角度依赖性的光子结构设计过程, 从而提升设计效率与可行性^[88]. 该策略克服了传统方法在处理离散材料选择与连续厚度参数时的局限性, 从数百种潜在设计中高效筛选出最优的六层结构($\text{TiO}_2/\text{MgF}_2/\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$). 如图7所示, 薄膜对太阳光谱具备选择性透射与反射能力: 在400–500和600–700 nm波段具有高透射率, 以满足光合作用所需的光谱需求; 而在其余波段(特别是近红外)则实现高反射, 从而有效降低热负荷与水分蒸发. 实验表明, 该冷室薄膜在南京亚热带地区和内蒙古乌兰布和沙漠环境中均表现出优异的被动降温与节水性能: 空气温度降低 5°C – 17°C ; 土壤水分

蒸发减少一半以上, 植物生物量产量和存活率显著提升. 该研究展示了机器学习辅助的光子结构设计在可持续农业光热管理中的强大潜力, 为未来定制化、智能化的农业覆盖材料提供了新路径.

5.2 基于多层聚合物的辐射制冷薄膜

然而, 尽管一维光子晶体结构可实现高效的光谱选择性调控, 但其制备通常依赖真空镀膜等技术, 存在工艺复杂、成本较高的问题, 限制了其大规模应用潜力. 为此, Jiang等人^[89]开发了一种基于聚合物多层膜干涉效应的光谱选择性辐射冷却薄膜(PMF-RC膜). 该薄膜由两个功能各异的聚合物多层堆叠层和一层高透明、高中红外发射率的聚合物发射层组成, 如图8所示. 其中, 多层堆叠结构用于反射植物光合利用率较低的绿光及易引起热负荷的近红外光, 从而有效抑制热量输入; 发射层则通过大气窗口波段实现高效辐射散热. 在具体构造上, 每个多层堆叠由高折射率材料聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)与低折射率材料PMMA交替

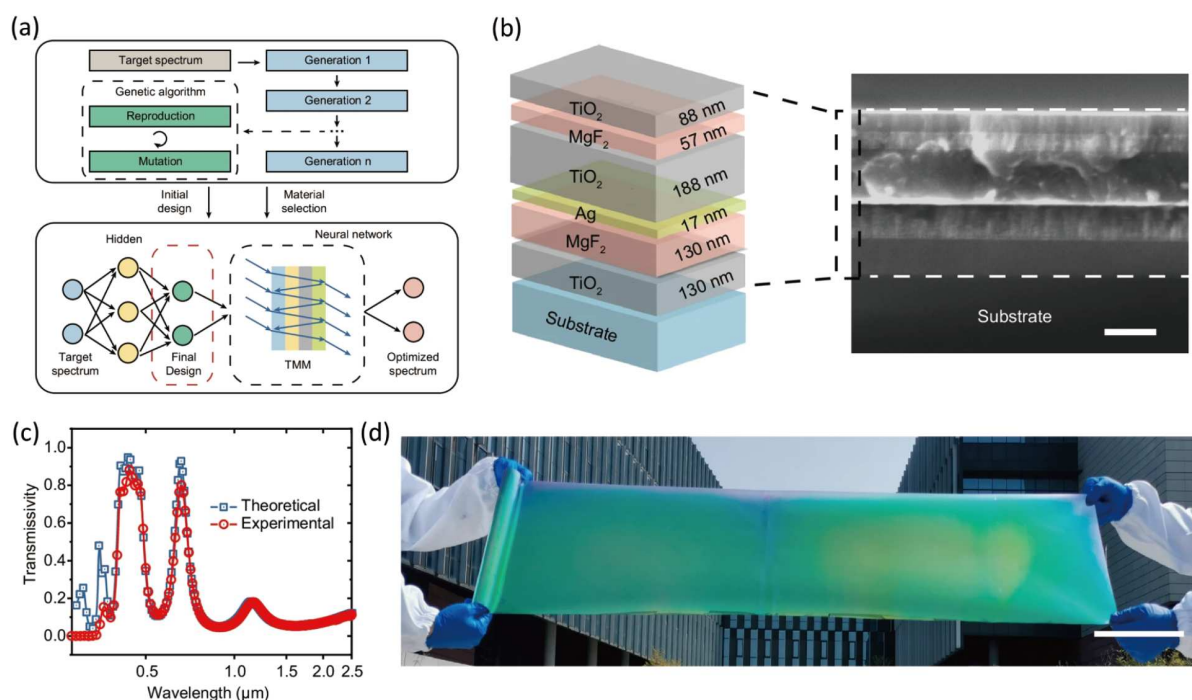


图 7 (a) 通过协同遗传和深度学习算法设计冷室薄膜的过程. (b) 冷室薄膜的结构示意图和截面SEM图像. (c) 冷室薄膜的理论设计光谱和实验光谱. (d) 米级冷室薄膜的实物照片^[87]

Figure 7 (a) Design process of the coolhouse film via the synergetic genetic and deep learning algorithms. (b) Schematic and a cross-section SEM image of the coolhouse film. (c) Theoretical design spectrum and experimental spectrum of the coolhouse film. (d) Photograph of the meter-scale coolhouse film ^[87].

排列,共128层,通过多层共挤工艺制备,并与兼具基底和发射层功能的PET复合.该结构在实现对PAR选择性透射的同时,依托PET的高红外发射特性,实现了显著的辐射冷却效果.

尽管PMF-RC薄膜在缓解植物热胁迫方面展现出良好的应用前景,但目前仍存在若干亟待深入研究的问题.首要局限在于其近红外反射性能仍有不足,可通过增加堆叠层数或引入近红外反射功能层进行优化.其次,薄膜制备主要采用传统聚酯类聚合物,其对环境的潜在影响尚需系统评估,建议通过优化农膜使用方式、加强回收再利用等措施降低生态负担.

6 结论和展望

在全球气候变化与资源约束持续加剧的背景下,受控环境农业(CEA)凭借其高度可控、资源高效和环境友好等优势,已成为应对粮食安全挑战的重要路径^[3,4].光作为CEA系统中驱动光合作用的核心环境因

子,其精准调控能力直接决定光能利用效率(LUE)与作物生产力的提升潜力.未来,农业光子学与光环境管理技术将围绕以下方向实现突破与集成.

6.1 主动光调控技术的智能化与光谱定制化发展

基于LED的光源系统正朝着高效、全光谱可调 and 低成本方向持续发展.借助荧光粉转换LED (pc-LED)和微纳光子结构,可实现输出光谱与植物光受体吸收特性的精准匹配.结合光合生理模型与人工智能算法,未来CEA系统有望依据作物生长阶段、实时环境参数动态调节光强、光周期与光谱组成,实现光环境的闭环优化,最大程度提升LUE.此外,LED光源设计也需兼顾人眼舒适性与作业需求,提升人工光工厂的人因工程水平.值得注意的是,LED灯具的初始投资成本显著高于传统高压钠灯,为其大规模推广的主要障碍^[90].此外,现有光配方研究多集中于少数经济作物,缺乏对多样物种的光质响应数据库,光调控模型的普适性与实用性仍有待加强.

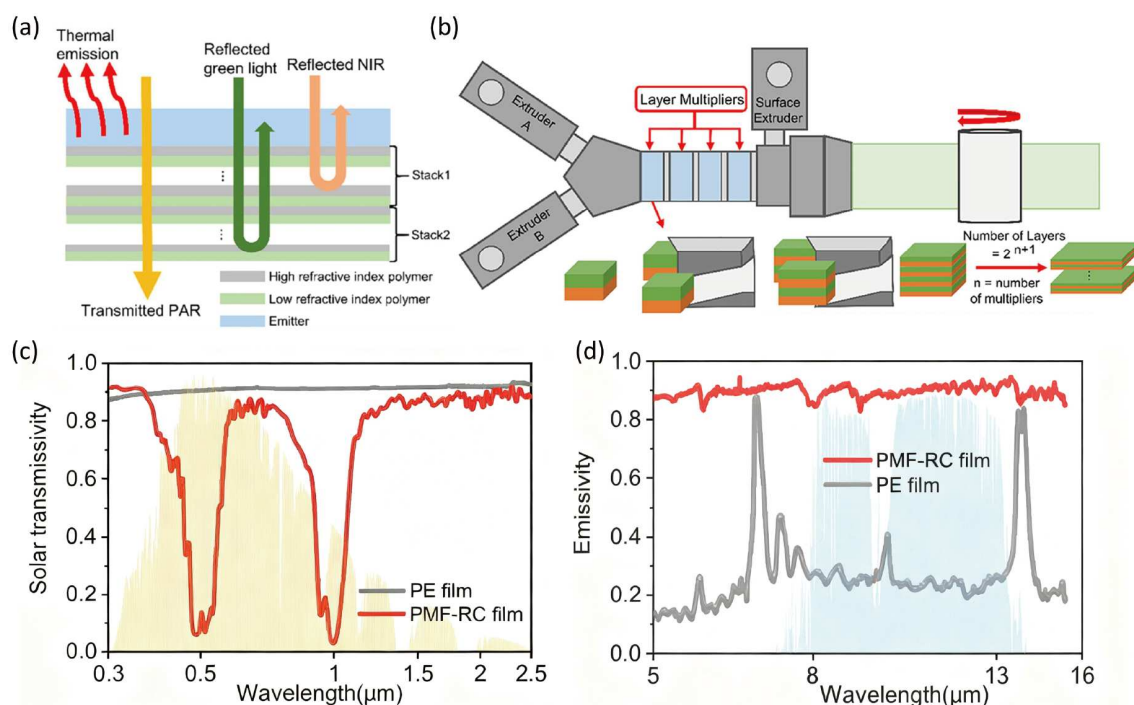


图 8 (a) PMF-RC薄膜的结构组成示意图。(b) PMF的制备流程,展示了所使用的聚合物多层共挤技术。PMF-RC与PE薄膜测量的(c)太阳辐射透射率和(d)中红外发射率光谱^[89]

Figure 8 (a) Schematic diagram of the layered structure of the PMF-RC film. (b) Illustration of the PMF fabrication process, showcasing the polymer multilayer co-extrusion technique employed. Measured (c) transmissivity spectra and (d) mid-infrared emissivity spectra of the PMF-RC and PE films [89].

6.2 被动光管理材料的创新与多功能集成趋势

被动式光管理技术通过光学材料与结构对太阳光进行“按需调控”,是提升CEA系统能效与光质的重要路径。目前主要技术方向包括两方面:一是“废光利用”,借助荧光膜、量子点等光谱转换材料,将紫外光、绿光等低效波段转化为红光等作物高效吸收的波段,从而提升冠层光分布均匀性;二是“光谱筛选”,利用光子晶体、多层膜等结构选择性透射光合有效辐射(PAR),同时高反射近红外光(NIR),从源头降低热负荷,实现光热协同管理。然而,多数光谱转换材料存在自吸收严重、光稳定性差、与高分子基体相容性不佳等问题,制约了其实际效率与使用寿命。现有被动光学薄膜功能相对单一,难以同时实现光谱转换、NIR阻隔与环境响应等多重目标。微纳光学结构的制备成本高、大面积均匀制备难度大,也限制了其推广应用。未来应重点研发具有高量子产率、低自吸收、优异耐候性的新型荧光材料(如钙钛矿量子点、稀土掺杂玻璃等);发展低成本、卷对卷制备的微结构光学薄膜工艺;推动多功能集成化设计,

开发兼具光谱转换、NIR管理、自清洁等特性的智能覆盖材料;并探索刺激响应材料(如 VO_2 ^[91]、 WO_3 ^[92]、温敏水凝胶^[93])在环境自适应光学薄膜中的应用,以实现透光与隔热属性的动态调节。

6.3 光-温协同系统的优化路径与节能增效潜力

辐射制冷技术与光谱调控策略的集成,为零能耗或低能耗降温提供了新路径,有助于CEA系统应对高温胁迫。理想材料应在光合有效波段(400–750 nm)保持高透射率,在太阳光谱其余波段(特别是NIR)实现高反射率,并在大气窗口波段(8–13 μm)具备高发射率,从而在强光条件下有效降低冠层温度,缓解光抑制与水分蒸散,构建光温协调的生长微环境。然而,现有辐射制冷薄膜或涂层为实现理想的光谱选择性,多依赖复杂的光子晶体或多层膜结构,制备工艺复杂,成本高昂,难以在农业场景中大规模应用。此外,材料在长期户外环境下的耐久性、抗污性以及与其他温室功能(如防滴露、抗老化)的兼容性尚未得到充分验证。未

来应着力开发基于常见聚合物材料(如聚乙烯(PE)和PET)的低成本、易加工的辐射制冷复合薄膜; 结合机器学习与高通量计算, 加速具有宽角度特性、弱制备敏感性的光学结构设计; 并推动辐射制冷系统与主动降温设备、储能单元的协同运行策略研究, 以实现CEA系统整体能耗的优化。

6.4 “被动为基、主动为精、智能协同”的集成系统构建展望

为实现农业光热环境的高效精准调控, 应推动主动与被动技术的有机融合。系统以具备光谱选择性与辐射制冷功能的被动式光子管理材料为基础覆盖层, 能够在零能耗条件下高效透射光合作用所需的蓝光与红光, 同时反射致热的近红外光, 并借助大气窗口向外辐射热量,

从而为作物生长营造稳定的光温基础环境。在此基础上, 引入以LED为核心的主动调控系统作为精准干预手段, 并通过荧光太阳能集中器技术将捕获的光子转化为电能存储, 为LED供能, 以克服高能耗瓶颈。借助智能监测系统, 在阴雨天、冬季或作物特定生长期, 可根据实际需求动态实施补光或施加特定光谱, 以弥补被动材料在动态调节方面的局限, 最终形成“被动为基、主动为精、智能协同”的一体化光热调控体系。

综上所述, 农业光子学通过从光源、光质到光温联控的多尺度精准调控, 正不断突破传统农业的光能利用瓶颈。未来, 随着智能材料、光子结构设计与人工智能算法的深度融合, CEA系统将朝着更高效、更稳健、更智慧的方向持续演进, 为构建资源集约、气候韧性的现代农业体系提供核心科技支撑。

参考文献

- Janni M, Maestri E, Gulli M, et al. Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: A critical review. *Front Plant Sci*, 2024, 14: 1297569
- Zhu P, Burney J, Chang J, et al. Warming reduces global agricultural production by decreasing cropping frequency and yields. *Nat Clim Chang*, 2022, 12: 1016–1023
- Engler N, Krarti M. Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 141: 110786
- Neo D C J, Ong M M X, Lee Y Y, et al. Shaping and tuning lighting conditions in controlled environment agriculture: A review. *ACS Agric Sci Technol*, 2022, 2: 3–16
- Paponov I A, Paponov M. Supplemental lighting in controlled environment agriculture: Enhancing photosynthesis, growth, and sink activity. *CABI Rev*, 2025, 20: 0008
- Liu F S, Song Q F, Yu G C, et al. Photosynthetic system model and improvement of crop photosynthetic efficiency (in Chinese). *Chin Bull Life Sci*, 2024, 36: 1123–1140 [刘扶桑, 宋青峰, 于桂朝, 等. 光合作用系统模型与作物高光效改良. *生命科学*, 2024, 36: 1123–1140]
- Zhu X G, Long S P, Ort D R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Curr Opin Biotechnol*, 2008, 19: 153–159
- Ort D R, Merchant S S, Alric J, et al. Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 8529–8536
- Zhang L X, Lu C M, Peng L W, et al. Progress in improving photosynthetic efficiency by synthetic biology (in Chinese). *Chin J Biotechnol*, 2017, 33: 486–493 [张立新, 卢从明, 彭连伟, 等. 利用合成生物学原理提高光合作用效率的研究进展. *生物工程学报*, 2017, 33: 486–493]
- Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: Measurements and modelling. *Agric For Meteorol*, 1996, 78: 121–131
- McCree K J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol*, 1971, 9: 191–216
- Liu J, van Iersel M W. Photosynthetic physiology of blue, green, and red light: Light intensity effects and underlying mechanisms. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 619987
- Hogewoning S W, Trouwborst G, Maljaars H, et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot*, 2010, 61: 3107–3117
- Terashima I, Fujita T, Inoue T, et al. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol*, 2009, 50: 684–697
- Smith H L, McAusland L, Murchie E H. Don't ignore the green light: Exploring diverse roles in plant processes. *J Exp Bot*, 2017, 68: 2099–2110

- 16 Griffin-Nolan R J, Zelehowsky A, Hamilton J G, et al. Green light drives photosynthesis in mosses. *J Bryol*, 2018, 40: 342–349
- 17 Emerson R, Lewis C M. The dependence of the quantum yield of *Chlorella* photosynthesis on wave length of light. *Botany*, 1943, 30: 165–178
- 18 Shomali A, Kamrani Y Y, Zivcak M, et al. Beyond photosynthetic active radiation: The role of far-red energy and signalling in the improvement of photosynthesis. *Plant Cell Environ*, 2025, 48: 5009–5018
- 19 Zhen S, van Iersel M W, Bugbee B. Photosynthesis in sun and shade: The surprising importance of far-red photons. *New Phytol*, 2022, 236: 538–546
- 20 Tan T, Li S, Fan Y, et al. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity. *Crop J*, 2022, 10: 300–309
- 21 Pazuki A, Aflaki F, Pessarakli M, et al. Plant responses to extended photosynthetically active radiation (EPAR). *Adv Plants Agric Res*, 2017, 7: 313–318
- 22 Zhen S, Bugbee B. Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining photosynthetically active radiation. *Plant Cell Environ*, 2020, 43: 1259–1272
- 23 Zhen S, van Iersel M W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J Plant Physiol*, 2017, 209: 115–122
- 24 Chen Z, Dong Y, Huang X. Plant responses to UV-B radiation: Signaling, acclimation and stress tolerance. *Stress Biol*, 2022, 2: 51
- 25 Yadav A, Singh D, Lingwan M, et al. Light signaling and UV-B-mediated plant growth regulation. *J Integr Plant Biol*, 2020, 62: 1270–1292
- 26 Verdaguer D, Jansen M A K, Llorens L, et al. UV-A radiation effects on higher plants: Exploring the known unknown. *Plant Sci*, 2017, 255: 72–81
- 27 Ouzounis T, Rosenqvist E, Ottosen C O. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review. *HortScience*, 2015, 50: 1128–1135
- 28 Massa G D, Kim H H, Wheeler R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 2008, 43: 1951–1956
- 29 Hayashi E. Current status of commercial plant factories with LED lighting market in Asia, Europe, and other regions. In: *LED Lighting for Urban Agriculture*. Singapore: Springer, 2016, 295–308
- 30 Nair G B, Swart H C, Dhoble S J. A review on the advancements in phosphor-converted light emitting diodes (pc-LEDs): Phosphor synthesis, device fabrication and characterization. *Prog Mater Sci*, 2020, 109: 100622
- 31 Huang W T, Su T Y, Chuang J H, et al. Plant growth modeling and response from broadband phosphor-converted lighting for indoor agriculture. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 32589–32596
- 32 Xiang J, Chang J, Chen C, et al. Recent progress of inorganic phosphors in artificial plant cultivation LEDs. *J Mater Chem C*, 2025, 13: 1538–1556
- 33 Deng K, Jin Y, Yuan L, et al. A thermal-stable Mn^{4+} -doped far-red-emitting phosphor-converted LED for indoor plant cultivation. *Mater Today Chem*, 2022, 26: 101010
- 34 Chen J, Guo C, Yang Z, et al. $\text{Li}_2\text{SrSiO}_4: \text{Ce}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$ phosphor with blue, red, and near-infrared emissions used for plant growth LED. *J Am Ceram Soc*, 2016, 99: 218–225
- 35 Fan Y, Zhou Y, Qiu Z, et al. Photoluminescent materials for solar spectral conversion greenhouse films. *J Mater Chem C*, 2025, 13: 5462–5482
- 36 Gu S, Xia M, Zhou C, et al. Red shift properties, crystal field theory and nephelauxetic effect on Mn^{4+} -doped $\text{SrMgAl}_{10-y}\text{Ga}_y\text{O}_{17}$ red phosphor for plant growth LED light. *Chem Eng J*, 2020, 396: 125208
- 37 Zhou C, Peng L, Kong Z, et al. A high thermal stability Cr^{3+} -doped gallate far red phosphor for plant lighting: Structure, luminescence enhancement and application prospect. *J Mater Chem C*, 2022, 10: 5829–5839
- 38 Zhou Z, Feng S, Gai S, et al. Affordable phosphor-converted LEDs with specific light quality facilitate the tobacco seedling growth with low energy consumption in Industrial Seedling Raising. *J PhotoChem PhotoBiol B-Biol*, 2022, 235: 112564
- 39 Gong W, Luo J, Zhou W, et al. Thermal-stable blue-red dual-emitting $\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_6\text{O}_{15}: \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor for plant growth lighting. *J Lumin*, 2021, 239: 118372
- 40 Chen C, Gao R, Chang J, et al. Achieving single-phased full visible spectrum broadband white emission in $\text{Ag}^+, \text{Bi}^{3+}$, and Sb^{3+} tri-doped $\text{Cs}_2\text{NaLuCl}_6$ double perovskite phosphor. *Laser Photon Rev*, 2025, 19: e00728
- 41 Qin Y, Pan Y, Wang H, et al. Broadband and warm white emission in $\text{Cs}_2\text{In}_{1-x}\text{Cl}_5 \cdot \text{H}_2\text{O} : x\text{Ag}^+$ phosphors enabled by H_3PO_2 -mediated stabilization. *J Mater Chem C*, 2025, 13: 4658–4664
- 42 Liu S, Li L, Qin X, et al. Achieving ultra-broadband sunlight-like emission in single-phase phosphors: The interplay of structure and luminescence. *Adv Mater*, 2024, 36: 2406164

- 43 Jing X, Xu Y, Yang J, et al. Crystallographic site engineering of a single Bi^{3+} -doped single-component $\text{Ca}_5\text{Ga}_6\text{O}_{14}:\text{Bi}^{3+}$ phosphor for full-spectrum white light emission and highly sensitive optical thermometry. *Inorg Chem Front*, 2025, 12: 8547–8559
- 44 Liu X, Zhang X, Wu L, et al. Well-designed sunlight-like Bi^{3+} -activated white-light phosphor for general lighting. *J Mater Chem C*, 2025, 13: 14856–14863
- 45 Ooms M D, Dinh C T, Sargent E H, et al. Photon management for augmented photosynthesis. *Nat Commun*, 2016, 7: 12699
- 46 Shen L, Yin X. Solar spectral management for natural photosynthesis: From photonics designs to potential applications. *Nano Converge*, 2022, 9: 36
- 47 Olson E, Li Y, Lin F Y, et al. Thin biobased transparent UV-blocking coating enabled by nanoparticle self-assembly. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 24552–24559
- 48 Huang X J, Zeng X F, Wang J X, et al. Transparent dispersions of monodispersed ZnO nanoparticles with ultrahigh content and stability for polymer nanocomposite film with excellent optical properties. *Ind Eng Chem Res*, 2018, 57: 4253–4260
- 49 Lanfranchi A, Megahd H, Lova P, et al. Multilayer polymer photonic aegises against near-infrared solar irradiation heating. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 14550–14560
- 50 Kim J, Baek S, Park J Y, et al. Photonic multilayer structure induced high near-infrared (NIR) blockage as energy-saving window. *Small*, 2021, 17: 2100654
- 51 Nezhad E H, Haratizadeh H, Kari B M. Influence of Ag mid-layer in the optical and thermal properties of $\text{ZnO}/\text{Ag}/\text{ZnO}$ thin films on the glass used in Buildings as insulating glass unit (IGU). *Ceram Int*, 2019, 45: 9950–9954
- 52 Al-Kuhaili M F. Transparent-conductive and infrared-shielding $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ multilayer heterostructures. *Sol Energy*, 2023, 250: 209–219
- 53 Al-Kuhaili M F, Al-Aswad A H, Durrani S M A, et al. Energy-saving transparent heat mirrors based on tungsten oxide-gold $\text{WO}_3/\text{Au}/\text{WO}_3$ multilayer structures. *Sol Energy*, 2012, 86: 3183–3189
- 54 Jin Y, Jeong Y, Yu K. Infrared-reflective transparent hyperbolic metamaterials for use in radiative cooling windows. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2207940
- 55 Wang Y, Chen C, Ni Z, et al. Boosting biomass production of microalgae at low environmental temperatures using sunlight-driven photothermal photobioreactors. *ACS Appl Opt Mater*, 2025, 3: 689–697
- 56 Li W, Wu S, Zhang H, et al. Enhanced biological photosynthetic efficiency using light-harvesting engineering with dual-emissive carbon dots. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1804004
- 57 Nwoba E G, Parlevliet D A, Laird D W, et al. Light management technologies for increasing algal photobioreactor efficiency. *Algal Res*, 2019, 39: 101433
- 58 Huang Y, Huang B, Shen Y, et al. Nature-inspired artificial aggregation-induced emission antenna for assembling with algae to promote photosynthesis. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 16: 66706–66717
- 59 Xu Z, Michalska M, Papakonstantinou I. Optimizing horticulture luminescent solar concentrators via enhanced diffuse emission enabled by micro-cone arrays. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 16: 27587–27595
- 60 Lin X, Han H, Yang M, et al. Multicolor rare-earth film with ultra-long afterglow for diverse energy-saving applications. *Adv Mater*, 2025, 37: 2417420
- 61 Ge M, Yuan Y, Liu S, et al. Enhancing plant photosynthesis with dual light conversion films incorporating biomass-derived carbon dots. *Carbon Capture Sci Tech*, 2024, 13: 100253
- 62 Parrish Ii C H, Hebert D, Jackson A, et al. Optimizing spectral quality with quantum dots to enhance crop yield in controlled environments. *Commun Biol*, 2021, 4: 124
- 63 Shen L, Lou R, Aili A, et al. Microstructure engineered photon-managing films for solar energy to biomass conversion. *Adv Energy Mater*, 2023, 13: 2204393
- 64 Thakur A K, Akter N, Ahamed M S, et al. Spectrally selective quantum dot laminated glass for photonic modulation and climate regulation in greenhouses. *Mater Today Sustain*, 2025, 32: 101221
- 65 Li C, Kang R, Ma X, et al. Enhanced quantum efficiency in $\text{Ca}_{2-2x}\text{Na}_x\text{Gd}_x\text{MgWO}_6:\text{Mn}^{4+}$ phosphors: Allosteric substitution to disrupt local symmetry for plant cultivation application. *Small*, 2025, 21: 2500640
- 66 Wondraczek L, Batentschuk M, Schmidt M A, et al. Solar spectral conversion for improving the photosynthetic activity in algae reactors. *Nat Commun*, 2013, 4: 2047

- 67 Mishra K, Stanghellini C, Hemming S. Technology and materials for passive manipulation of the solar spectrum in greenhouses. *Adv Sustain Syst*, 2023, 7: 2200503
- 68 Shen L, Lou R, Park Y, et al. Increasing greenhouse production by spectral-shifting and unidirectional light-extracting photonics. *Nat Food*, 2021, 2: 434–441
- 69 Shi H, Xia R, Zhang G, et al. Spectral engineering of semitransparent polymer solar cells for greenhouse applications. *Adv Energy Mater*, 2019, 9: 1803438
- 70 Müller R, Okokhere-Edeghoghon B, Janowicz N J, et al. Transparent, sprayable plastic films for luminescent down-shifted-assisted plant growth. *Adv Mater Technol*, 2025, 10: 2400977
- 71 Debije M G, Verbunt P P C. Thirty years of luminescent solar concentrator research: Solar energy for the built environment. *Adv Energy Mater*, 2012, 2: 12–35
- 72 Yang C, Lunt R R. Limits of visibly transparent luminescent solar concentrators. *Adv Opt Mater*, 2017, 5: 1600851
- 73 van der Burgt J S, Needell D R, Veeken T, et al. Unlocking higher power efficiencies in luminescent solar concentrators through anisotropic luminophore emission. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 40742–40753
- 74 Erickson C S, Bradshaw L R, McDowall S, et al. Zero-reabsorption doped-nanocrystal luminescent solar concentrators. *ACS Nano*, 2014, 8: 3461–3467
- 75 Meinardi F, Bruni F, Brovelli S. Luminescent solar concentrators for building-integrated photovoltaics. *Nat Rev Mater*, 2017, 2: 1–9
- 76 Corrado C, Leow S W, Osborn M, et al. Power generation study of luminescent solar concentrator greenhouse. *J Renew Sustain Energy*, 2016, 8: 043502
- 77 Essahili O, Ouafi M, Moudam O. Recent progress in organic luminescent solar concentrators for agrivoltaics: Opportunities for rare-earth complexes. *Sol Energy*, 2022, 245: 58–66
- 78 Liu Y, Keil J, Ferry V E, et al. Energy and thermal performance analysis of quantum dot luminescent solar concentrators in greenhouses. *Adv Sustain Syst*, 2023, 7: 2300107
- 79 Hosseinpanahi K, Abbaspour-Fard M H, Golzarian M R, et al. Luminescent solar concentrators for greenhouse applications based on highly luminescent carbon quantum dots. *Sol RRL*, 2024, 8: 2400442
- 80 She C, Zhang Y, Dong M, et al. Scattering-enhanced light extraction for radiative thermal load mitigation in fluorescent films. *Adv Sci*, 2025, 12: e10643
- 81 Sajeev A K, Agarwal N, Soman A, et al. Enhanced light extraction from organic light emitting diodes using a flexible polymer-nanoparticle scattering layer. *Org Electron*, 2022, 100: 106386
- 82 Fan S, Li W. Photonics and thermodynamics concepts in radiative cooling. *Nat Photon*, 2022, 16: 182–190
- 83 Zhao X, Chen Q, Fan F, et al. Dual-band electrochromic smart window for dynamic switching between radiative cooling and solar heating. *Adv Sci*, 2025, 12: e04483
- 84 Gu B, Li G, Zhang Q, et al. A novel method for increasing phase-change microcapsules in nanofiber textile through electrospinning. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2412089
- 85 Zhao X, Aili A, Zhao D, et al. Dynamic glazing with switchable solar reflectance for radiative cooling and solar heating. *Cell Rep Phys Sci*, 2022, 3: 100853
- 86 Zou H, Wang C, Yu J, et al. Eliminating greenhouse heat stress with transparent radiative cooling film. *Cell Rep Phys Sci*, 2023, 4: 101539
- 87 Li J, Jiang Y, Liu J, et al. A photosynthetically active radiative cooling film. *Nat Sustain*, 2024, 7: 786–795
- 88 Li J, Jiang Y, Li B, et al. Accelerated photonic design of coolhouse film for photosynthesis via machine learning. *Nat Commun*, 2025, 16: 1396
- 89 Jiang S, Li M, Hu Z, et al. A low-cost and large-scale producible polymer multilayer radiative cooling film for reducing plant heat stress. *ACS Photon*, 2024, 12: 528–536
- 90 Das N, Pal N, Pradip S K. Economic cost analysis of LED over HPS flood lights for an efficient exterior lighting design using solar PV. *Build Environ*, 2015, 89: 380–392
- 91 Cui Y, Ke Y, Liu C, et al. Thermochromic VO₂ for energy-efficient smart windows. *Joule*, 2018, 2: 1707–1746
- 92 Yang C, Chen J F, Zeng X, et al. Design of the alkali-metal-doped WO₃ as a near-infrared shielding material for smart window. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 17981–17988
- 93 Zhou Y, Dong X, Mi Y, et al. Hydrogel smart windows. *J Mater Chem A*, 2020, 8: 10007–10025

Research advances in photon management for controlled environment agriculture

NI Zihui & SHEN Lihua*

MOE Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Corresponding author (email: lihua.shen@xjtu.edu.cn)*

Global food security and energy sustainability are under increasing pressure due to continuous population growth and the escalating effects of climate change. Agriphotonics, an emerging interdisciplinary field, offers a promising technological pathway for advancing Controlled Environment Agriculture (CEA) by enabling precise regulation of light quality (spectral distribution), intensity, and photoperiod. This review consolidates recent advancements in photon management technologies for CEA systems, focusing on three key areas of research: (1) active spectral modulation strategies using programmable lighting to precisely match the photosynthetic needs of crops; (2) passive photon management through wavelength-conversion materials to optimize solar spectrum utilization and enhance light-use efficiency; and (3) the integrated application of photon management with radiative cooling technologies to jointly regulate the light-thermal environment, alleviating heat stress in crops. Evidence suggests that these photonics-based approaches can significantly improve crop light-use efficiency, yield, and quality, while also reducing the energy consumption of CEA systems, thus contributing to a more sustainable agricultural future.

agri-photonics, photosynthesis, spectral control, thermal management, radiative cooling

PACS: 92.20.ch, 42.70.-a, 91.62.Bf

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0456](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0456)