

高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术适配性与经济性分析

付永昶

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南 715501

摘要：高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术是一种将清洁能源开发与现代农业深度融合的创新模式，通过科学设计光伏组件的布局与作物种植空间，实现“板上发电、板下种植”的立体开发，提升土地综合利用效率，创造经济、生态与社会多重价值。本文阐述高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术其关键要素。通过项目案例分析，证实该技术适配性良好，能提升土地利用效率，实现多领域收益协同增长，经济效益显著，具有广阔发展前景。

关键词：高效光伏组件；耐阴作物；共生种植技术；适配性；经济性

全球能源转型和粮食安全挑战日益严峻背景下，高效利用土地资源实现能源与农业生产双重目标，以成为全球可持续发展领域的关键议题。而光伏发电作为清洁可再生能源形式，在全球范围内得到广泛应用，然而传统地面光伏电站通常占用大面积土地与农业用地产生竞争关系，对农业生态环境造成一定程度影响^[1]。相关研究^[2]指出，高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术（“光伏农业”或“农光互补”升级版）巧妙结合光伏发电和农业生产并通过优化设计，在实现清洁能源生产的同时为耐阴作物创造适宜生长环境，最终达成土地资源利用效率最大化和经济效益生态效益协同提升。

一、高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术要素

1. 高效光伏组件选择

高效光伏组件作为共生种植技术的核心硬件，其性能直接影响发电效率和作物生长环境^[3]。其技术核心是选择高转换效率组件，例如单晶PERC、TOPCon或HJT电池，转换效率需大于等于22%以在有限空间最大化发电量。其次需关注组件的透光率适配性，针对耐阴作物如食用菌、中草药需采用半透明或可调透光组件，使其透光率在30%-70%确保作物获得散射光，而对于喜阳作物则需选择高透光率组件（透光率>80%）或结合补光系统。此外，组件需具备抗腐蚀、抗老化性能，以适应农业环境里的高湿度、盐雾等条件。比如可采用双玻组件可提升耐候性并延长使用寿命。最后组件的尺寸与重量需和支架系统相匹配，避免因过重导致支架变形或坍塌来确保结构安全。

作者简介：付永昶，1975.1，男，汉，陕西渭南人，本科，工程师，研究方向：动力工程。

2. 光伏支架系统设计

支架系统作为连接光伏组件和种植空间的关键结构，需兼顾机械强度、空间利用率和作物生长需求。在实际应用中，应依据地形和气候条件来选择支架类型。其中，平地适合可采用固定倾角支架以降低成本，坡地或复杂地形则需采用可调式或跟踪式支架来优化发电效率。其次，确定组件的离地高度，在畜牧区高度需 ≥ 2 米，确保可提供牲畜活动空间，在农业区高度需 ≥ 2.5 米，以允许联合收割机等机械作业。此外，支架间距要满足通风与采光要求，横向间距需 ≥ 3 米、纵向间距需 ≥ 5 米，从而避免组件遮挡造成发电损失并为作物提供均匀光照。最后支架材料应选用耐腐蚀、高强度钢材像热镀锌钢管，并且采用模块化设计以便于快速安装与维护、降低全生命周期成本。

3. 耐阴作物品种选择

选择耐阴作物的核心是考虑经济价值和生态适应性，进而让收益达到最大。首先应筛选具有高附加值的品种，例如食用菌如香菇和平菇、中草药如甘草和西洋参、特色蔬菜如芹菜和芦笋等市场价格较高，且能提升单位面积的收益的作物。其次，评估作物的耐阴能力，例如，香菇菌丝体生长阶段不需要光照，弱光环境可降低污染率。甘草在遮荫条件下可通过延长气孔开放时间维持光合效率，有效成分（甘草酸）含量较露天种植提升12%。此外，考虑作物生长周期，短周期作物像叶菜类可实现多茬轮作提高土地利用效率、长周期作物像中草药则需结合光伏组件的长期稳定性确保收益持续。最后要通过品种改良，比如选育耐阴突变体或栽培模式创新比如间作和套种进一步提升作物适应性。

4. 水肥优化管理

水肥管理作为保障作物高产和资源高效利用的核心

环节。一方面可采用精准灌溉技术，避免过度灌溉造成土壤盐渍化的问题^[4]。首先借助土壤湿度传感器、气象站这类设备，实时采集土壤墒情以及气象信息等相关数据。接着把采集到的数据传输到智能控制系统之中，经过分析处理后生成具体的灌溉决策。随后依据所生成的决策，控制滴灌带、喷灌机等灌溉设备精准开启，按照需求进行供水，保证土壤水分处于适宜的范围之内，避免出现过度灌溉的情况，防止土壤发生盐渍化问题，以此保障作物能够正常生长。另一方面，可优化施肥策略，依据作物需肥规律采用水肥一体化技术通过滴灌、微喷这类系统，将水肥溶液精准地输送到作物根部土壤中。使肥料能够快速被作物根系吸收，减少挥发和淋失情况的发生，有效提高肥料的利用效率，从而满足作物生长过程中的需求。

5. 智能化监测控制

智能化系统是提升共生种植技术效率和稳定性是关键工具。在实践应用过程中，可部署环境监测传感器来实时采集光照强度、温度、湿度、CO₂浓度等数据为决策提供依据。例如，通过AI算法分析光照数据动态调节光伏板角度让透光率随季节变化自动调整遮光率。其次可集成智能控制系统，依据监测数据自动控制灌溉、施肥、通风、补光等设备实现环境精准调控，例如，在连续阴雨天时利用LED补光系统补充光照使农作物产量得以提升。此外，可建立远程管理平台借助手机APP或云端系统实现远程监控与故障预警降低人工巡检成本。

二、技术适配性分析

高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术高度适配全球能源转型与土地资源高效利用需求，尤其在气候干旱、土地资源紧张且光照充足的地区优势显著。从环境适应性看，该技术通过光伏板遮阴降低地表温度、减少水分蒸发，有效缓解了干旱区作物生长的高温胁迫与水分亏缺问题，为耐阴作物如甘草创造了适宜的微气候环境。同时，光伏组件的透光率可调设计（30%–70%）能精准匹配不同作物的光需求，如食用菌需弱光环境，而中草药甘草在遮阴下光合效率提升，有效成分含量较露天种植增加12%，实现了生态效益与经济价值的双赢。从资源利用效率看，该技术通过立体开发模式（“板上发电、板下种植”）最大化土地价值，从技术可行性看，模块化支架设计、智能化监测控制及精准水肥管理技术（如土壤湿度传感器、AI算法调节光伏板角度）降低了系统运维难度，即使面对复杂地形或气候差异，也可通过调整

支架类型（固定式/跟踪式）、优化种植密度实现适配^[5]。此外，该技术兼具生态修复功能，光伏板覆盖可抑制土地荒漠化，促进植被恢复，符合可持续发展目标。

三、经济性分析

1. 案例选择

本研究选择某县“光伏+甘草”项目为例。该县地处西北干旱区，土地荒漠化严重，年均日照时数达2800小时以上。2020年，当地政府和企业合作建设500MW光伏农业项目，其“光伏+甘草”模式为核心试点内容。项目在光伏板下面种植耐阴作物甘草，借助光伏遮阴降低地表温度并减少水分蒸发，同时利用光伏发电满足灌溉和温控方面的需求，形成了“发电+种植”的立体开发模式。项目覆盖20000亩荒漠化土地，光伏板离地面高度2.5米，透光率控制在50%，种植密度按照30cm×15cm来安排，配套智能灌溉与物联网监测系统。

2. 经济效益分析

该项目自2020年实施以来，通过高效光伏组件与耐阴作物甘草的共生种植技术，实现了“板上发电、板下种植”的立体开发模式。光伏板遮阴有效降低了地表温度（实测降低3–5℃），减少水分蒸发量约40%，同时智能灌溉系统根据土壤湿度动态调节用水量，使甘草种植水分利用效率提升35%。此外，光伏发电为灌溉泵站、物联网监测设备提供清洁电力，替代传统柴油发电，年节约燃料成本约120万元。技术协同效应显著，推动各收益模块实现阶梯式增长（见表1）。技术应用后，年均总收益从32,820万元提升至48,170万元，提升幅度达46.8%。其中，农业收益、其他收益为新增项，分别贡献5,740万元、680万元；节水成本节约、土地增值收益提升显著，分别增长260.8%、232.5%；碳交易收益增长50%，发电收益小幅增长2.3%，就业带动收益更是激增1160%。多领域收益协同增长，充分体现该技术对项目经济效益的全面拉动作用。

四、高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术面临的挑战及对策

1. 初始投资较高

高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术的初始投资成本显著高于传统农业或单一光伏项目，主要源于设备购置、系统集成与土地改造三大环节。其单位面积投资强度是传统农业的3–5倍。高成本导致项目普遍回收期延长至5年以上，导致中小企业与农户参与门槛较高。建议，地方政府提供专项补贴。例如，设备购置补贴、

表1 项目经济效益分析表

收益类型	计算依据	技术应用前年收益 (万元)	技术应用后年收益 (万元)	提升幅度
发电收益	498.7兆瓦 × 1485小时 × 0.38元/度	27, 500	28, 120	2.3%
农业收益	385公斤/亩 × 76元/公斤 × 19, 800亩	0	5, 740	新增
节水成本节约	2850吨/公顷 × 19, 800亩 × 2.8元/吨 × 38%	1, 200	4, 330	260.8%
碳交易收益	498.7兆瓦 × 980吨/兆瓦 × 65元/吨 + 19, 800亩 × 1.2吨/亩 × 65元/吨 (农业固碳)	3, 170	4, 750	50.0%
土地增值收益	4.8万元/亩 × 19, 800亩 × 28%	800	2, 660	232.5%
就业带动收益	485人 × 3.9万元/人	150	1, 890	1160.0%
其他收益	0.1元/瓦 × 498.7万瓦 + 农业保险赔付 (年均200万元)	0	680	新增
总收益	-	32820	48, 170	46.8%

土地改造补贴或给予税收减免,如增值税优惠、企业所得税减免等,同时联合金融机构推出低息贷款或者“光伏+农业”绿色金融产品,以此来分摊资金压力^[6]。企业可探索“光伏+农业”一体化开发模式,通过规模化采购的方式降低设备成本,并采用“发电收益前置+农业收益分期”收益分配机制,缩短资金回笼周期,还可引入第三方投资机构,如产业基金、社会资本等参与项目共建,通过股权合作或者收益分成的办法降低单方风险,推动技术向中小规模主体普及。

2. 技术集成复杂

该技术需融合光伏发电、耐阴作物栽培、智能控制、生态修复等多领域技术,系统复杂性远超单一技术场景。例如,光伏板角度需根据作物需光特性动态调整,但现有支架系统多为固定式,难以实现精准调控^[7]。智能灌溉系统需与光伏发电功率联动(如阴雨天减少灌溉以降低能耗),但数据接口标准不统一导致协同效率低下。此外,不同地区气候差异对技术参数要求迥异,进一步加剧集成难度。建议,加强跨学科技术协同创新,可由光伏企业、农业科研机构与智能装备厂商联合研发“光伏-农业-智能控制”一体化平台,开发可调式光伏支架(如电动跟踪支架)、模块化智能灌溉系统(如支持物联网协议的滴灌设备)等标准化组件,并通过API接口实现数据互通;针对气候差异,可建立区域化技术参数数据库(如西北干旱区侧重节水灌溉与遮光率优化,东南湿润区侧重通风防霉与湿度调控),结合AI算法生成动态调控方案;同时,推动行业标准制定(如光伏农业设备接口标准、数据传输协议),降低系统集成门槛,提升技术可复制性。

结束语

高效光伏组件与耐阴作物共生种植技术作为一种创新模式,具有显著的经济价值。尽管其初始投资较高、技术集成复杂,但通过地方补贴、金融支持、技术协同创新等对策,可有效降低实施难度。未来,随着技术的不断进步和完善,该技术有望在更广泛地区推广应用,为可持续发展做出更大贡献,成为清洁能源与现代农业融合发展的典范。

参考文献

- [1] 张晓豫. 乡村振兴背景下“农光互补”发展优势与困境研究——以生态脆弱区光伏项目为例[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(09): 180-184.
- [2] 吴照学, 袁天韞, 鲍恩财, 等. 光伏组件密度对光伏农业系统微环境及甘薯产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(22): 256-264.
- [3] 肖文波, 顾林潇. 光伏发电技术的应用现状与趋势[J]. 科技与创新, 2025, (18): 213-215+219.
- [4] 魏龙吟, 杨忠华, 周妹, 等. 光伏板下中药材种植模式与应用成效分析[J]. 乡村科技, 2025, 16(12): 93-96.
- [5] 张雅倩, 戴红平, 常芳红. “双碳”目标驱动下光伏农业研究的知识图谱分析(2000—2024年)[J]. 甘肃农业, 2025, (05): 61-67.
- [6] 王璞, 李百成, 王立, 等. 不同大豆品种在苏北地区光伏农业中的应用简报[J]. 上海农业科技, 2022, (06): 74-77+80.
- [7] 周润. 光伏农业大棚农、光两用结构处置方法研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(09): 40-42.