

基于“农光互补”的自循环光伏农业系统研究

郭雷^{1,2}, 郭燕³, 胡靖^{1,2}

¹怀化学院物电与智能制造学院, 湖南 怀化

²武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室, 湖南 怀化

³怀化开放大学培训部, 湖南 怀化

收稿日期: 2023年1月12日; 录用日期: 2023年4月28日; 发布日期: 2023年5月8日

摘要

“农光互补”作为光伏与农业两种产业的深度结合, 既是对传统农业技术的传承, 又为农业可持续发展提供有力的技术支撑。本文建立了自循环补给式“农+光”综合利用平台, 将光伏发电作为农业温室电源供给, 为灌溉、照明、通风、保温、监测等提供电力, 实现能源的自循环补给。本文提出了“农业+光伏”协调发展新模式, 充分利用湘西地区丰富的光热资源建立光伏温室, 降低冬季对外蔬菜的依赖程度。本研究创建了“能源+农业”示范基地和“近零碳”示范区, 实现“清洁能源工业+农业生产+休闲农业”的三产融合, 探索了农业和新能源产业融合发展新思路。

关键词

农光互补, 自循环, 协调推进

Research on Self-Cycling Photovoltaic Agricultural System Based on “Agro-Light Complementarity”

Lei Guo^{1,2}, Yan Guo³, Jing Hu^{1,2}

¹School of Physics, Electronics and Intelligent Manufacturing, Huaihua University, Huaihua Hunan

²Key Laboratory of Intelligent Control Technology for Wuling-Mountain Ecological Agriculture in Hunan Province, Huaihua Hunan

³Training Department, Huaihua Open University, Huaihua Hunan

Received: Jan. 12th, 2023; accepted: Apr. 28th, 2023; published: May 8th, 2023

Abstract

As a deep combination of photovoltaic and agricultural industries, “agriculture-light complemen-

文章引用: 郭雷, 郭燕, 胡靖. 基于“农光互补”的自循环光伏农业系统研究[J]. 自然科学, 2023, 11(3): 324-330.

DOI: 10.12677/ojns.2023.113038

tary” not only inherits traditional agricultural technologies, but also provides strong technical support for sustainable agricultural development. In this paper, a self-cycling and replenishment “agriculture-light” comprehensive utilization platform is established. Photovoltaic power generation is used as the power supply of agricultural greenhouse to provide electricity for irrigation, lighting, ventilation, heat preservation, monitoring, etc., so as to realize self-cycling and replenishment of energy. This paper puts forward a new mode of coordinated development of “agriculture” and “photovoltaic”, and makes full use of the abundant solar and thermal resources in western Hunan to build photovoltaic greenhouses and reduce the dependence on foreign vegetables in winter. This study has established an “energy + agriculture” demonstration base and a “near zero carbon” demonstration zone, realizing the integration of “clean energy industry + agricultural production + leisure agriculture” and exploring new ideas for the integrated development of agriculture and new energy industries.

Keywords

Agriculture-Light Complementary, Self-Circulation, Coordinated Advance

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2021年10月24日,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,明确指出,要大力发展绿色低碳循环农业,推进农光互补、“光伏+设施农业”、“海上风电+海洋牧场”等低碳农业模式[1]。2022年2月11日,国务院印发“十四五”推进农业农村现代化规划的通知,提出要因地制宜推动农村地区光伏、风电发展,推进农村生物质能源多元化利用,加快构建以可再生能源为基础的农村清洁能源利用体系[2]。在国家众多利好消息的支持下,光伏农业迅速发展,“农光互补”、“光伏+设施农业”等低碳农业新模式不断涌现。

1839年,法国物理学家A.E 贝克勒尔在研究中发现某些材料被光照射后产生电流,这种现象被称之为“光伏打效应”[3]。美国国家可再生资源实验室与科罗拉多州大学合作,一同开发了混合发电系统模拟软件Hybrid2,该仿真软件功能强大,可对风光互补系统的运行进行非常精确模拟。通过输入联合发电系统结构、太阳能辐射数据等参数便可得到模拟运行结果,即太阳能电池一年能运行8760小时的结果[4]。Marion 等人在《新能源世界》杂志中发布文章,分析了光伏发电对人类环境的影响,并对光伏发电的前景进行了展望[5]。Reparaz 等技术可行性的角度,对太阳能发电的技术要求,投入与产出之间的关系进行实证分析,并对光伏发电对温室效应的改善效果进行了预测[6]; Branker 等人对能源投资的特征因素进行了归纳,然后建立了能源工业的评价体系[7]; Lee 等(2015)通过对比研究等方式,对如何降低光伏发电项目的风险,实现经济效益和社会效益的最大化提出了具体的建议[8]; 曹雪从政策扶持对光伏产业的发展影响的角度,对我国光伏产业的发展前景进行了预测,并指出国际政策的积极扶持是促进光伏产业快速发展成熟的重要力量[9]; 邱立勋等人结合当前我国的产业结构调整政策,对光伏产业的发展现状和未来发展方向进行了分析[10]; 张耀明对我国光伏发电的发展历程进行了总结,然后提出观点认为,如果将光伏发电项目集中,对就业、环保等方面都有积极作用,因此他认为光伏建筑集中化是我国光伏产业未来的一大发展趋势[11]。

总体来看, 国外的研究主要集中在技术和经济层面, 关于光伏发电项目的综合效益的相关著作比较缺乏。作为指导理论, 这些观点对推动光伏发电以及光伏产业的发展都起到了重要的铺垫作用。分析国内的相关研究可以看出, 主要集中在光伏发电与环境之间的关系, 光伏发电对解决能源问题的影响等方面。但总体来看, 关于对光伏发电项目的综合效益分析的相关著作还比较少。

2. 主要研究内容

2.1. 提出“农光互补”总体方案

光伏发电需要的光波, 与农作物生长需要的光波, 在波长有所差异。因此, 建立光伏日光温室, 可以同时满足光伏发电和农作物生长对光波的需求, 如图 1 所示。但当太阳能电池具有一定的规模, 自身可能会对大棚造成光线遮挡。因此, 要充分考虑农作物生长过程中对光线的需求, 通过科学计算确定“农光互补”方案, 做到互补, 不能互争。一是对光线需求强烈的农作物, 比如番茄等农作物。安装太阳能电池时首先要留有适当距离, 以免造成光线遮挡, 还要尽量降低太阳能电池组件的装机容量, 以保证农作物能够吸收到足够的光线。二是对于生长过程中对光线需求不是很强的农作物, 比如苦瓜等, 在安装光伏日光温室时, 尽量用晶硅太阳能电池组件, 它能够有效阻隔紫外线, 阻止昆虫的繁殖, 从而降低害虫的数量, 减少农药喷洒量, 有利于蔬菜的正常生长, 生产出来的蔬菜更加具有绿色食品的特征。

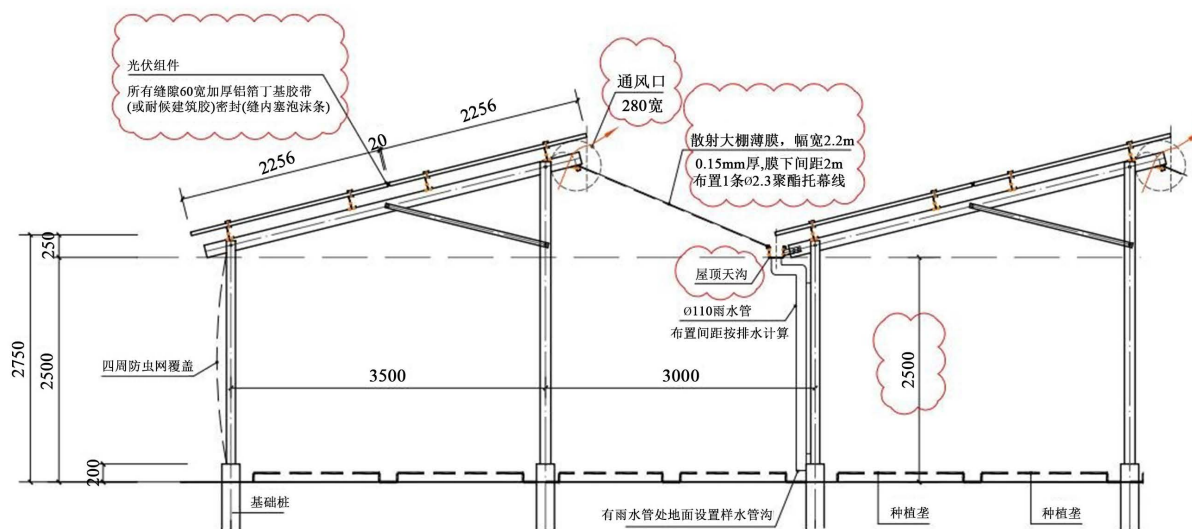


Figure 1. Schematic diagram of the design scheme of “complementing agriculture and light”

图 1. “农光互补”设计方案示意图

2.2. 匹配自循环发电与用电需求

该项目所述的“农光互补”系统, 属于自循环补给系统, 如图 2 所示。在不影响作物生长的同时, 充分利用多余的太阳能进行发电。所得的电能用于供给维持“农光互补”系统正常运行的附属设施, 包括灌溉系统、照明系统、通风系统、保温系统、监测系统等。灌溉水泵的功率由灌溉面积、灌溉频率和灌溉周期确定; 照明功率由照明面积和照明强度确定; 通风风机功率由大棚容积和换气频率确定; 保温功率由外界气温、棚内温度和大棚容积确定; 监测系统功率由监测设备功率确定。上述 5 个系统的总耗电功率要与光伏发电系统的功率相匹配, 并留有 10% 以上的功率盈余。

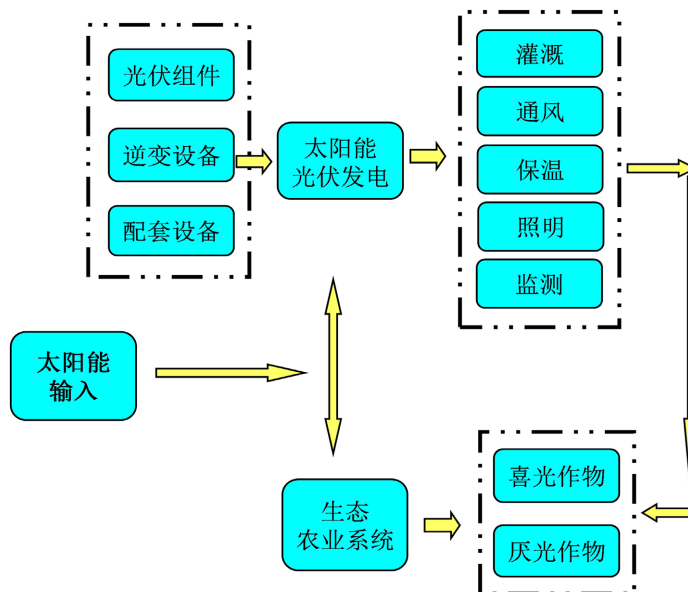


Figure 2. Self-circulation diagram of “agricultural light complementation”
图 2. “农光互补” 自循环示意图

2.3. 确定“农光互补”关键参数

一是光伏电池组件的确定。光伏电池组件是太阳能光伏发电系统的核心部件，不同类型的基体材料具有不同的光电转换效率。目前硅基材料的太阳电池占据市场的 90% 以上。综合考虑单体功率、转换效率、价格成本、技术成熟度、市场占有率，本项目拟选用规格为 550 W_p 的双面双玻单晶硅光伏组件。二是逆变器的确定。光伏逆变器对发电量、初始投资和运行成本、电能质量有至关重要的影响。逆变器主要类型有：集中式逆变器、组串式逆变器、集散式逆变器。综合考虑组件先进性、度电成本及项目投资内部收益率、现场实际情况等因素，本项目根据系统配置，拟选用 EP-3125-HC 集中式逆变器，采用 1.31 左右的容配比方案。三是光伏阵列的确定。太阳电池方阵的发电量与阳光入射强度有关，当光线与太阳电池方阵平面垂直时发电量最大，随着入射角的改变，发电量会明显下降。太阳能跟踪装置可以将太阳能板在可用的 8 小时或更长的时间内保持方阵平面与太阳入射光垂直，将太阳能最大程度的转化为电能。目前国内外一些太阳跟踪装置生产厂的产品大致可以分三种，第一种为固定可调，即根据季节调整支架倾角，使全年组件辐射量达最大；第二种为单轴跟踪，即东西方向转动跟踪太阳；第三种为双轴跟踪，即东西向跟踪的同时板倾角也随季节的不同而改变。一般来说，采用自动跟踪装置可提高发电量 20%~40% 左右，从而相对降低投资 10%~20%。

2.4. 分析“农光互补”总体效益

农光互补种植模式包括在光伏阵列间栽培经济作物和光伏阵列下保留集草带。阵列间适宜种植喜光植物，集草带适宜种植喜阴植物。既可以充分利用土地资源，又可保持原有场地的水土平衡，同时结合光伏组件阵列间种植喜光经济作物，能进一步提高光合利用率。一是经济收益。项目建成后，结合农业的生产、旅游、休闲一体化的运行模式，可产生一定的收益，同时增加税收，带来经济的增长。二是社会效益。整个项目建成后，光伏运维和农业都需要一定劳动力，可间接解决农村部分劳动力就业问题。三是生态效益。项目建成后，可减少大气污染，解决温室效应，降低碳排放，改善生态环境，有利于环境和生态资源保护。

3. 研究方法及研究过程

3.1. 理论计算法

一是“农光互补”阵列的计算。叶菜生长所需光照强度为2~3万 lux，瓜果类作物4~6万 lux，而怀化地区光照强度为7万 lux 以上。“农光互补”系统需根据蔬菜种类不同分别设置光伏方阵。布置必须考虑前后左右的阴影遮挡问题，所以必须通过计算确定阵列间各排、列距离，如图3所示。一般的确定原则是：保证全年9:00~15:00时段内前、后、左、右互不遮挡。阵列间距 D 的计算公式如下[12]：

$$d = H \frac{\cos \omega \tan \varphi - \tan \delta}{\tan \delta \tan \varphi + \cos \omega},$$

$$D = L \cos \beta + sL \sin \beta$$

式中： L 为光伏阵列斜平面高度， H 为一级光伏阵列水平高度， a 为太阳高度角， B 为安装倾角， c 为太阳方位角， r 为太阳入射线水平面上投影在后排阵列之间的长度， d 为前排阵列阴影长度， D 为阵列之间的间距， e 为阵列阴影在东西方向的影响长度， ω 为时角(与正常发电时间有关)， δ 为太阳赤纬角， φ 为纬度， s 为阴影系数， $s = d/H$ 。

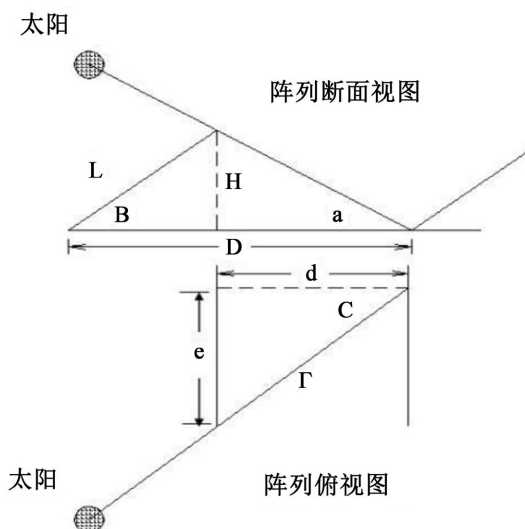


Figure 3. Schematic diagram of solar photovoltaic array spacing

图3. 太阳能光伏阵列间距示意图

二是光伏板倾角的计算。为了使光伏方阵表面接收到更多太阳能，根据日地运行规律，方阵表面最好是朝向赤道(方位角为0度)倾斜安装。对于固定式阵列的光伏发电系统，应选择光伏组件阵列最佳倾角，使倾斜面上的辐射总量达到最大，从而达到年发电量最大的目标。采用550 Wp 双面双玻单晶硅光伏组件及 EP-3125-HC 集中式逆变器方案作为研究对象，使用光伏专业设计软件 PVsyst 模拟可得最佳倾角理论仿真结果。

三是自循环系统电量供需平衡计算。本“农光互补”系统的电量需求全部来自太阳能光伏板的发电量[12]。电量供需平衡公式如下：

$$Q = Q_P + Q_V + Q_L + Q_H + Q_T$$

式中, Q 为光伏板的发电量, Q_p 为灌溉水泵的耗电量, Q_v 为通风系统的耗电量, Q_L 为照明系统的耗电量, Q_H 为保温系统的耗电量, Q_r 为监测系统的耗电量。

本项目的“农光互补”系统设计完成后, 公式右侧的五项均为已知量。据此可以估算出光伏系统的发电量。此发电量的估算值可作为光伏板选型, 光伏板数量计算和光伏阵列设计的依据。

3.2. 试验研究法

一是“农光互补”系统与纯农作物系统经济效益对比试验。为科学评估“农光互补”系统综合效益, 在相同地块中, 设置同面积的试验组和对照组。实验组为“农光互补”系统, 对照组为纯农作物系统, 从产量、产值、生长期、灌溉次数、农药用量等方面进行对比。对应本项目的农光互补方案有多种农业种植方案选择, 具体方案需要通过试验, 由专业的技术单位确定。建议结合光伏电站特点、地质条件、气候因素, 种植容易成活的经济作物, 充分发挥土地的使用价值。

本文以 1000 亩用地面积为例, 即装机容量为 20 兆瓦的“农光互补”项目进行效益分析。投入部分为: 土地租金总投入约为 80 万元, 农业大棚部分总投入费用为 9300 万元, 光伏电站建造费用总投入约为 9500 万元。收益部分为: 光伏电站每年发电效益约为 2500 万, 农业大棚年收益约为 2900 万。综合分析, 该项目大约 4.0 年收回光伏大棚投入静态成本, 回报率为 25%。这样的回报率比较稳定, 受自然环境影响较小, 并且是可持续的。

二是“农光互补”系统电能自循环试验。以上一部分中理论计算结果为依据完成“农光互补”系统的整体设计后, 需要对该系统在实际光照条件下的运行情况进行试验, 检验光伏发电系统维持灌溉、通风、照明、保温、监测等系统正常运行的能力, 如表 1 所示。本文所研究的“农光互补”系统面积为 1500 m^2 , 考虑到农作物生长所需光照条件, 本文的光伏阵列采取间隔式布置。光伏阵列日均发电量为 360 度, 系统维持自循环所需发电量总额为 255 度, 发电量余额约为 105 度, 年发电量余额约为 38,000 度, 按工业用电价 1.2 元/度计算, 发电量效益约为 5 万元。

Table 1. Electric energy self-cycle test of “agro-optical complementary” system

表 1. “农光互补”系统电能自循环试验

单块光伏板功率	单块光伏板日发电量	光伏板块数	日总发电量	年总发电量
550 Wp	1.2度	300度	360度	131400度
灌溉日用电量	通风日用电量	保温日用电量	照明日用电量	检测日用电量
45度	65度	70度	55度	20度

4. 结论

1) 解决耕地资源集约化利用的问题。怀化面临耕地资源不足和耕地退化的巨大压力, 人口增长与土地需求之间的矛盾越来越尖锐。如用传统方式建设光伏电站, 土地使用性质为工业用地, 建设成本高且审批困难。而利用“农光互补”模式建设光伏电站, 在保证农业生产的同时, 不额外占用土地资源, 提高了土地利用效率, 可以实现土地立体化增值利用。建设现代高效农业综合经济体, 符合国家倡导的绿色环保低碳发展政策。“农光互补”型光伏电站建立之后, 土地上还能继续进行经济作物种植, 实现生产清洁能源和作物栽培的有机结合。

2) 解决经济效益与环境保护协调推进的问题。“农光互补”型光伏电站发电过程不会对水、大气、土壤等产生有害影响。发电过程不消耗其他能源, 不排放有害气体和污水。组件表面采取了特殊的减反射处理, 在一定程度上减少甚至避免了光污染。光伏发电本身没有机械传动或运动部件, 没有噪声污染,

没有大气污染,可解决温室效应,降低碳排放,改善怀化生态环境,有利于环境和生态资源保护。而且,该光伏发电系统不影响农业生产,可大幅度提高项目的总体经济效益,实现经济效益与环境保护协调推进。

3) 解决农业与光伏自循环可持续发展的问题。通过光伏与农业的结合,既能使农业用地上丰富的太阳能资源得到开发,又能使生态环境得到改善,从而进一步提高利用价值。“农光互补”系统对比传统纯农业和纯商业光伏发电模式的优势显而易见。本项目的“农光互补”系统,将光伏发电用于供应自身的农业生产灌溉、照明、通风、保温、监测等设施。该系统除太阳能外,不需从外界输入能量,完全依靠自循环运行,真正实现了项目的可持续发展。

基金项目

1) 武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室 2021 年度开放基金项目“基于农光互补的自循环农业系统研究”,项目编号:ZNKZN2021-06。

2) 湖南省教育厅 2022 年度普通高等学校教学改革研究项目“基于创新能力和实践能力培养为导向《液压与气压传动》课程改革研究”,项目编号:HNJG-2022-1032。

参考文献

- [1] 国务院. 2030 年前碳达峰行动方案[Z]. 2021-10-24.
- [2] 国务院. 关于印发“十四五”推进农业农村现代化规划的通知[Z]. 2022-02-12.
- [3] Fridkin, V.M. (1979) The Anomalous Photovoltaic Effect in Ferroelectrics. In *Photoferroelectrics*, Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81351-1>
- [4] Hartley, L.E., Martinez-Lozano, J.A., Ulla, M.P., et al. (1999) The Optimization of Inclination of a Solar Collector to Maximize the Incident Solar Radiation. *Renewable Energy*, **17**, 291-309. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00763-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00763-0)
- [5] Marion, W. and Urban, K. (1995) User's Manual for Y2s. National Renewable Energy.
- [6] Shen, Y., Reparaz, J.S., Wagner, M.R., et al. (2011) Assembly of Carbon Nanotubes and Alkylated Fullerenes: Nanocarbon Hybrid towards Photovoltaic Applications. *Chemical Science*, **2**, 2243-2250. <https://doi.org/10.1039/c1sc00360g>
- [7] Branker, K., Pathak, M.J. and Pearce, J.M. (2011) A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4470-4482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>
- [8] Lee, A.H., Chen, H.H. and Kang, H.Y. (2011) A Model to Analyze Strategic Products for Photovoltaic Silicon Thin-Film Solar Cell Power Industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1271-1283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.008>
- [9] 曹雪. 中国太阳能光伏发电产业的现状问题与对策研究[J]. 中国高新技术企业, 2009(23): 76-78.
- [10] 邱立勋, 廖翠萍. 我国光伏发电产业的发展现状分析[J]. 高科技与产业化, 2017(2): 54-57.
- [11] 张耀明. 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景[J]. 能源研究与利用, 2017(1): 1-6.
- [12] 昝锦羽. 光伏温室大棚若干问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2013.