

王医,周伟绩,赵易,等.基于综合经济效益最优的光伏温室太阳辐射分配方法[J].华中农业大学学报,2023,42(5):262-268.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.029

基于综合经济效益最优的光伏温室太阳辐射分配方法

王医^{1,2},周伟绩³,赵易¹,吴晓¹

1.石河子大学水利建筑工程学院,石河子 832000; 2.重庆大学建筑城规学院,重庆 400045;
3.石河子大学兵团能源发展研究院,石河子 832000

摘要 针对光伏温室光伏发电和农业生产光照分配不合理导致整体收益较低的问题,提出了基于综合效益最优的光伏温室光伏发电与农业生产太阳辐射分配方法。首先,建立光伏温室的光伏发电收益、农作物收益、运行维护成本模型,其中,以农作物直角双曲线修正响应模型作为光伏温室农作物产量计算方法,将光照与农作物产量和收益紧密结合;其次,以光伏温室综合效益最优为目标,以光伏发电光照强度、温室农作物生长光照条件为约束条件,建立光伏温室整体收益数学模型。以新疆地区某光伏温室实际运行数据为基础,对比分析多场景下光伏温室收益,结果显示,选择光伏温室农作物最小日光有效光照辐射值光照分配占比,光伏温室整体收益最大;考虑光伏温室改造与运行维护花费,在不改变原有结构的情况下,农作物光照饱和点对应的光照分配比例可作为光伏温室整体收益最大点。

关键词 太阳辐射分配;光伏温室;光伏发电;光伏温室农业生产;综合效益最优

中图分类号 S625.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0262-07

光伏温室(photovoltaic greenhouse, PVG)是近几年设施农业领域的研究热点之一。光伏温室的光伏组件与农业温室大棚复用土地和建筑框架,既节约了建设成本,也为农业生产提供安全可靠绿色电能。目前有关光伏温室的研究,主要集中于光伏温室有利于农作物生长的环境控制方法^[1-3]、适合于不同地区和外部环境光伏温室种植的农作物类型^[4-7]以及使用 ANSYS^[8]和 Ecotect^[9]等软件及 CFD^[10-12]等分析方法建立光伏温室内环境模型,以达到最佳生长环境要求,使光伏温室内环境更适宜农作物生长等方面。

光伏发电与温室农业生产的能量均来源于光照,并且 PVG 中光伏温室光伏发电(photovoltaic power generation in photovoltaic greenhouse, PVPG-PVG)和光伏温室农业生产(agricultural production in photovoltaic greenhouse, AP-PVG)共用土地的关系,导致单位面积内太阳能辐射既要供给光伏用于发电又要供给温室用于农业生产。由于太阳辐射在 PVPG-PVG 与 AP-PVG 中产生的经济效益不同,在不影响农作物正常生长的情况下,合理分配 PVPG-

PVG 与 AP-PVG 光照比例对提升 PVG 整体经济效益非常重要。基于此,Li 等^[13]研究了我国 PVG 中光伏发电“全额上网”方式及其利弊,指出该方法并不适用于 PVG;Cossu 等^[14]以欧洲典型商用 PVG 为例,分析了 PVG 光伏覆盖率对农作物生长的影响;Marucci 等^[15]研究表明,PVG 不同倾斜角对内部小气候的影响不同;Bambara 等^[16]研究了半透明光伏组件在温室中的使用可能性,结果表明在成本降低 23% 的情况下,能够替代温室敷层;Yano 等^[17]研究表明,PVG 中光伏发电对农作物有遮阴效益,提出可利用光伏组件间距调节对农作物的遮阴效果;Perez-alonso 等^[18]提出采用棋盘布局方法来布置 PVG 中光伏组件位置,能够使 PVG 农作物获得更多光照;Ez-zaeri 等^[19]研究了地中海南部地区 PVG 冬季和夏季小气候与番茄产量之间的关系,结果表明 40% 光伏组件覆盖情况下,光伏组件对番茄产量影响很小;王彪^[20]研究了 PVG 中光伏组件以直线排布、交错排布和棋盘排布的方式排列,在发电量、温室内环境方面的优缺点,结果表明直线排布更适合 PVG 光伏组件,但没有给出 PVG 采用直线排布时光伏组件面积占

收稿日期:2022-10-25

基金项目:石河子大学自主支持科研项目(ZZZC201742B)

王医,E-mail:276540366@qq.com

通信作者:周伟绩,E-mail:305329953@qq.com

比。上述相关研究表明,光照辐射对PVG整体效益影响主要聚焦于光伏组件的排布方法、覆盖率及类型等方面,鲜见考虑PVPG-PVG与AP-PVG光照分配问题的研究。

本研究以PVG整体经济效益最大为目标,以农作物生长内环境要求以及光伏发电光照要求等为约束,建立基于PVG整体经济收益最优的太阳辐射分配优化数学模型,以期为光伏温室设计提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 PVPG-PVG年收益模型

为了计算简便,本研究做了以下假设:(1)暂不考虑地域、温度、海拔等气象和地理条件和损耗等因素对光伏组件发电量的限制和影响;(2)暂不考虑弃光限电,假设电网能够无限接纳PVG发电上网。基于此,综合考虑基于安装容量的PVG中光伏发电量计算方法和基于安装面积的PVG中光伏发电量计算方法的特点,采用年太阳光辐射度代替每天太阳光辐射度。PVPG-PVG年发电量可表示为:

$$E(x) = K_1 K_2 P(1-x)S \quad (1)$$

其中, $E(x)$ 为PVPG-PVG年发电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; K_1 为PVG中光伏组件的转换率; K_2 为PVG中光伏逆变器的转化效率; P 为PVG所在地区的年太阳辐射量, MJ/m^2 ,由单位换算 $3.6 \text{ MJ}=1 (\text{kW}\cdot\text{h})$; x 为PVG中农业生产太阳辐射分配比例; S 为PVG南向屋顶面积总和, m^2 。

基于“自发自用,余电上网”的运行方式,PVG电价在PVG建设之初已经与国家能源局和国家电网签订了《PVG并网收购电价协议》,明确规定了PVG中光伏发电“自发自用”电价和上网电价。假设PVPG-PVG“自发自用”部分年电量为 $E_1(x)$,上网部分的电量为 $E_2(x)$,PVPG-PVG产生经济效益的电能为上网部分,而“自发自用”部分的电能减小从电网下电电量,在电网下电部分一并核算。因此,若上网部分电价为 Q_2 ,则:

$$E(x) = E_1(x) + E_2(x) \quad (2)$$

$$M_{\text{ph}}(x) = E_2(x)Q_2 \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $M_{\text{ph}}(x)$ 为PVPG-PVG年收益,万元; Q_2 单位为元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

1.2 PVG内环境调控电能费用模型

考虑到PVG农业生产需以电能为基础的内环境调控,电网为PVG的稳定运行起支撑作用,当

PVPG-PVG功率大于光伏温室环境调节负荷需求时,接纳剩余电能;当PVPG-PVG不足时,为PVG提供内环境调节电能。根据实地调研,PVG在并网处有计量装置,能够准确计量上网和下网电量。PVG年耗电量为 $E_3(x)$,PVPG-PVG年供给AP-PVG电能为 $E_1(x)$,暂不考虑电网为PVG做备用电源而产生的附加费用,则PVG农业生产内环境调节费用模型为:

$$M_{\text{grid}} = (E_3(x) - E_1(x))Q_3 \quad (4)$$

其中: M_{grid} 为PVG内环境调控费用; Q_3 为下网电价,元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

1.3 AP-PVG年收益模型

AP-PVG年收益与年产量密切相关,需要先计算年产量,而AP-PVG中光照辐射能量与农作物产量之间的关系非常复杂,因此,目前还没有确切的数学表达式能够表征二者之间的关系。光照辐射能量为农作物生长提供了基础条件,而农作物的产量是生长累计的结果,因此,可以采用农作物光响应模型近似模拟农作物光照与产量之间的关系。基于此,本研究提出了基于农作物直角双曲线修正光响应模型的AP-PVG年产量数学模型。采用农作物直角双曲线修正光响应模型表征PVG农作物光照与干物质累积的关系,进而得到AP-PVG年产量。直角双曲线修正光响应模型^[21]如式(5)所示。

$$P_n(I) = \frac{\alpha I P_{\text{max}}}{\alpha I + P_{\text{max}}} - R_d \quad (5)$$

$$I = K_3 \frac{\lambda \times 10^6 P_x}{t} \quad (6)$$

式(5)~(6)中, $P_n(I)$ 为农作物净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; α 为光响应系数; I 为农作物光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; P_{max} 为最大净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; R_d 为农作物呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; λ 取0.53,为光合辐射单位 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 转化为 W/m^2 的系数; K_3 为转化系数; t 为年平均有效时间, h 。

PVG中,温室农作物生长获得太阳辐射分配为 P_x , W/m^2 ,将农作物呼吸速率进行单位转化之后,PVG农作物光照-产量模型如(7)式:

$$f(x) = 44\eta P_n(I) K_{\text{prod}} t_{\text{resp}} 10^{-6} \quad (7)$$

式(7)中, $f(x)$ 为农作物产量, t ; η 为光合辐射有效占比,晴天取0.47,阴天取0.5; K_{prod} 为产量累计系数,取5; t_{resp} 为响应时间,取3 600 s。

则AP-PVG年收益模型为:

$$M_{\text{agri}} = f(x)Q_4 \quad (8)$$

式(8)中: M_{agri} 为AP-PVG年收益,万元; Q_4 为农

业生产产品单价,取该产品年平均价格,万元/t。

1.4 PVG 年收益模型

以 PVG 整体年收益最大为目标,建立基于太阳辐射分配的 PVG 整体收益数学模型,如式(9)所示。

$$M = M_{ph} + M_{agri} - M_{grid} - M_{cost} \quad (9)$$

其中: M_{cost} 为 PVG 年平均成本,包括 PVG 的年建造成本、年运行和维护成本,元。

为了描述随着 AP-PVG 占比降低需要使用电能补光,将所需的成本折合为 M_{cost} ,表达式为:

$$M_{cost} = K_{cost} S [1 + (x - x_0)^2] \quad (10)$$

其中, K_{cost} 为基数维护费用,取 0.002 万元/ m^2 ; S 为 PVG 面积, m^2 ; x_0 为农作物光饱和点时 AP-PVG 占比。

1.5 约束条件

PVG 年收益模型中包含光伏发电和农作物生长两方面。因此,约束条件中包含光伏发电约束和农业生产约束。

1) 光伏发电约束条件。PVG 的获得的总辐射 P 应该满足光伏发电的基本条件即:

$$P_{min} \leq P \quad (11)$$

其中, P_{min} 表示光伏电站能够并网的最低辐射功率, W/m^2 。

2) 农业生产约束条件。PVG 农业生产需要满足农作物生长的光照、温度及湿度要求。温湿度能量要求是由下网电量转换而来,光照是由太阳光照提供。则 PVG 需满足农作物日光有效光照辐射(photosynthetically active radiation, PAR)条件为:

$$PAR_{min} \leq P_x \leq PAR_{max} \quad (12)$$

其中: PAR_{min} 和 PAR_{max} 是种植农作物的最小及最大日光光照辐射值, $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。

1.6 计算流程

基于综合效益最优的光伏温室太阳辐射分配方法计算流程如图 1 所示。将公式(1)~(8)和式(10)带入式(9),得到基于综合效益最优的光伏温室太阳辐射分配数学模型,将算例参数带入公式进行计算,并分析结果是否满足边界条件,并再次对模型进行调整,最终得到计算结果。

1.7 试验条件

以中国新疆某多晶硅连栋光伏温室为试验对象,其主要运行参数如表 1 所示。光伏日光温室的具体参数:连栋光伏温室长为 68 m,跨度为 7 m,脊高 3.1 m。采用的多晶硅光伏组件长度为 1.65 m,宽 0.992 m,额定功率为 250 W,正南方位,安装倾斜角

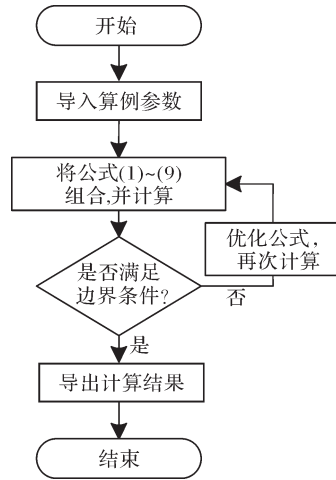


图 1 辐射分配方法计算流程

Fig.1 Calculation flow of radiation distribution method

表 1 光伏温室主要参数

Table 1 Main parameters of PVG

参数 Parameters	数值 Value
K_1	0.17
K_2	0.98
$P/(MJ/m^2)$	18.93
t/h	800
$E_2/(kW \cdot h)$	8 432.4
$E_3/(kW \cdot h)$	3 434.6
$Q_1/[元/(kW \cdot h)]$	0.42
$Q_2/[元/(kW \cdot h)]$	0.78
$Q_3/[元/(kW \cdot h)]$	0.39
$Q_4/(万元/t)$	0.2
PAR_{max}	1 200
PAR_{min}	650

为 38° 。AP-PVG 种植的农作物为芹菜 (*Apium graveolens* L.), 其 PAR 转化为光照约束条件,光照占比为 $[0.2, 0.8]$,光饱和点时 $x=0.6$ 。

2 结果与分析

2.1 AP-PVG 年收益模型求解

采用数学计算工具 Matlab 编写计算程序,考虑约束条件,对 AP-PVG 年收益模型进行求解,计算结果如图 2 所示。由图 2 可知:PVG 综合效益与 AP-PVG 光照分配占比成反比关系,随着农业生产光照分配占比增加,收益逐渐降低。造成此种趋势的主要原因是农作物价格太低,导致农业生产效益较低,在最大日光有效光照辐射时达到最低。这与目前“光伏温室废弃农业生产,仅用于发电”的现状密切吻合。相比于农业生产,当 PVPG-PVG 光照占比达 0.8 时, PVG 整体效益达 4.46 万元,相比于 AP-PVG

占比0.8时整体收益(3.06万元)约高出50%。从整体收益方面来看,选择PVG农作物最小日光有效光照辐射值 PAR_{min} 时,光照分配占比作为PVPG-PVG和AP-PVG光照分配比例,PVG整体收益最大。

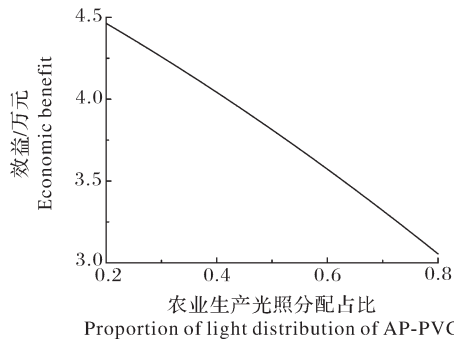


图2 AP-PVG光照分配占比对PVG综合效益的影响

Fig.2 Relationship between the economic benefits of PVG and the proportion light distribution of AP-PVG

2.2 不同农作物对PVG整体收益的影响

实际生产中需要考虑PVG农作物最小日光有效光照辐射时的补光花费以及补光相关设施费用投入。图3为6种(分别编号为A、B、C、D、E和F)不同作物的收益与农业生产光照分配占比的关系图,其中已经考虑补光对其整体收入的影响,农作物价格按照2000元/t计算。由图3可知:AP-PVG种植不同农作物时,在光照占比趋于两端时,整体价格差别较大,越趋于中间,整体价格基本相等。造成这种现象的主要原因是:农作物光照分配比例在光饱和点附近时,PVG整体能耗最小,运行维护费用最小。而且,农作物生产光照分配占比越趋近于最小日光有效光照辐射值,单位收益增幅越是缓慢,表明在趋近最小日光有效光照辐射值,PVG投资越大,虽然整体收益仍呈现增长趋势,但增幅下降较大。考虑实际光照分配的可操作性,以及“双碳”目标下节能减排

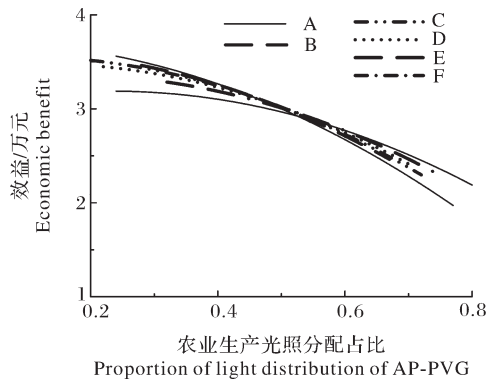


图3 不同农作物对整体收益的影响

Fig.3 Impact of different crops on overall economic benefits

的重要地位,PVG整体收益最优点选择农作物光饱和和点对应的农业生产光照分配比例最为合适。

2.3 农作物价格对PVG整体收益的影响

农作物价格对PVG整体收益的影响如图4所示。由图4可知,在生产和管理维护成本基本不变的情况下,农作物价格上涨,PVG整体收益呈现上涨趋势,且增幅几乎相等。随着农作物价格增长,PVG整体收益由光照分配占比在最小日光有效光照辐射值比光饱和点的27.5%缩减至14.2%,表明光照分配比例选择光饱和点时,农作物价格越高,PVG整体效益有显著提升。

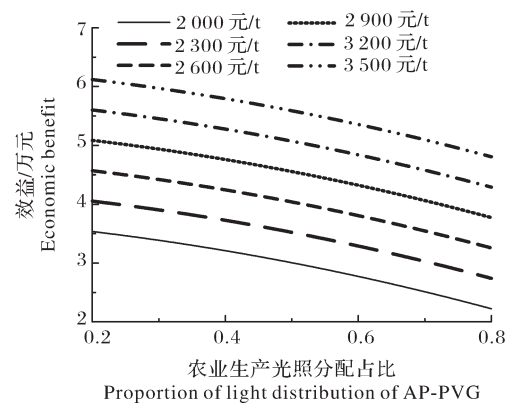


图4 农作物价格对PVG整体收益的影响

Fig.4 Impact of crop prices on overall economic benefits of PVG

2.4 农作物混种对PVG整体收益的影响

目前,超大型温室PVG农作物混种依然存在。通过分析PVG综合经济最优模型可知,农作物混种仅影响了农作物光照-产量模型和能量流动模型,约束条件及计算方法均与原模型一致。农作物混种PVG第*i*种农作物光照-产量模型如式(13)所示:

$$f_i(x) = 44\eta P_{n,i}(I)K_{prod}t_{resp}10^{-6} \quad (13)$$

农作物混种PVG农业生产年收益模型如式(14)所示:

$$M'_{agri} = \sum_{i=1}^n f_i(x)Q_i \quad (14)$$

M'_{agri} 为农作物混种PVG农业生产年收益,万元; Q_i 为农作物混种PVG中各种农业生产产品单价,万元/t,取该产品年平均价格。由分析可得:光伏发电价格波动及电网下电价格波动对PVG经济收益影响与种植单一农作物相同,而农作物价格波动对经济收益影响较大。图5以2种农作物混种为例,分析农作物价格波动对农作物混种PVG经济收益影响。由图5可知,种植单一农作物,PVG整体经济效益会随着农作物价格增加而增加;相比于种植单一

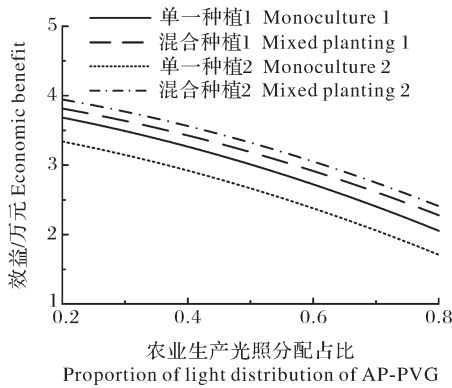


图5 农作物混种对PVG整体收益的影响
Fig.5 Impact of mixed planting of crops on overall economic benefits of PVG

农作物,农作物混种整体经济收益与各农作物价格密切相关;相比于单一种植,混合种植对农作物价格波动的抗风险能力有所提升;农作物混种更能够匹配其饱和光照点,降低建造和维护费用,增加整体收益。需要注意的是,混种的农作物需要光照饱和点匹配,以便PVG整体光照分配协调。

3 讨论

目前,光伏温室设计时光伏组件铺设面积基于经验值,而未经过科学论证,可能导致光伏温室农作物光照不够充分,严重影响其产量和质量,亦可能导致光伏组件面积铺设较少,严重影响光伏发电效益。光伏温室中PVPG-PVG与AP-PVG复用土地,共同分享太阳辐射,而太阳辐射量直接影响PVPG-PVG发电量,进而影响收益。对于AP-PVG,太阳辐射影响其农作物产量,假设农作物价格不变,则太阳辐射对收益影响较大。PVPG-PVG与AP-PVG收益主要决定因素为太阳辐射,因此,合理分配太阳光照是提高PVG整体经济效益的关键。“自发自用,余电上网”PVG运行模式中,光伏发电量可应用于农业生产,增加农作物产值,从而增加农业生产收益。针对上述问题,本研究提出了基于综合效益最优的光伏温室光伏发电与光伏温室农业生产太阳辐射分配方法。

PVG年产出收益包括:PVPG-PVG年收益、PVG并网年收益(关口计量为正,表明PVG上网电量大于下网电量,收益为正;反之,PVG上网电量小于下网电量,收益为负)、AP-PVG年收益及年投资分摊成本。本研究以PVG年产出收益最大为目标,建立PVG太阳辐射分配模型,优化PVPG-PVG与AP-PVG太阳光辐射占比,并基于直角双曲线修正

光响应模型得到的农作物产量计算方法,为光伏温室收益计算提供了基础条件,多场景计算结果表明,农作物最小日光有效光照辐射值 PAR_{min} 时的光照分配占比为PVG整体收益最大值,但是考虑光伏温室改造与运行维护花费,在不改变原有结构的情况下,农作物光照饱和点对应的光照分配比例可作为PVG整体收益最大点。

由于本研究在模型建立过程中忽略了PVG的部分参数影响,如产量模型未考虑光伏温室内部环境可控的特点,导致计算结果可能有部分偏差,下一步将优化农作物产量模型,提高农作物产量预估精度,考察PVG光照最优分配比例,基于光伏最优分配比例,以光伏温室整体收益为目标,优化光伏组件排列形状,可作为光伏温室设计的研究方向之一。

参考文献 References

- [1] 陈旭根,陈颖,房新月,等. 基于光伏发电的温室滴灌系统设计[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 52-55. CHEN X G, CHEN Y, FANG X Y, et al. Design of greenhouse drip irrigation system based on photovoltaic power generation[J]. Journal of Jishou University (natural sciences edition), 2019, 40(4): 52-55 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张旭. 太阳能供电的连栋温室环境监测装置的设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. ZHANG X. Design of environmental monitoring device for multi-span greenhouse based on solar energy supply [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [3] 单天禹,梁春英. 光伏幕布日光温室大棚测控系统设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(1): 84-89. SHAN T Y, LIANG C Y. Design of measurement and control system for solar greenhouse with photovoltaic curtain[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019, 31(1): 84-89 (in Chinese with English abstract).
- [4] 叶林,李建设,张光弟,等. 宁夏不同光伏材料连栋温室冬季室内环境变化规律[J]. 北方园艺, 2017(17): 92-98. YE L, LI J S, ZHANG G D, et al. Change of winter indoor environment of greenhouse of different photovoltaic materials in Ningxia[J]. Northern horticulture, 2017(17): 92-98 (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴艳红,马文舒,胡永生,等. 沙漠多晶硅光伏连栋温室适宜栽培的瓜类作物筛选研究[J]. 山东农业科学, 2017, 49(3): 73-77. WU Y H, MA W S, HU Y S, et al. Study on screening of melon crops suitable for cultivation in desert polycrystalline silicon photovoltaic multispan greenhouse [J]. Shandong agricultural sciences, 2017, 49(3): 73-77 (in Chinese with English abstract).
- [6] 祁娟霞,曹丽华,李建设,等. 宁夏不同光伏温室和大棚冬季

- 内环境比较研究[J].浙江农业学报,2017,29(3):414-420.
- QI J X, CAO L H, LI J S, et al. Comparative study on the environment of different photovoltaic greenhouses and greenhouse in winter in Ningxia[J]. *Acta agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(3):414-420(in Chinese with English abstract).
- [7] 胡永生,王荣,吴艳红,等.沙漠多晶硅光伏连栋温室茄果类作物适宜栽培的位置筛选[J].黑龙江农业科学,2016(11):82-87.HU Y S, WANG R, WU Y H, et al. Screening the solanaceous vegetable crops suitable for cultivation position in desert polycrystalline silicon photovoltaic greenhouse [J]. *Heilongjiang agricultural sciences*, 2016 (11) : 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周莹,王双喜,刘中华,等.基于ANSYS的日光温室复合相变保温墙体的模拟研究[J].太阳能学报,2020,41(4):113-122.ZHOU Y, WANG S X, LIU Z H, et al. Simulation study on composite phase change thermal insulation walls in solar greenhouse based on ANSYS[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020,41(4):113-122(in Chinese with English abstract).
- [9] 王彪,陈教科,应建阳.基于Ecotect的光伏温室室内光环境分析[J].江苏农业科学,2018,46(8):221-224.WANG B, CHEN J L, YING J Y. Analysis of luminous environment of photovoltaic greenhouse using Ecotect models[J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2018,46(8):221-224.
- [10] 郭腾腾,涂洁磊,盛钰清,等.基于CFD稳态模拟的光伏玻璃温室温度分布模拟计算[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(2):11-15.GUO T T, TU J L, SHENG Y Q, et al. Simulation calculation of photovoltaic glass greenhouse temperature distribution based on CFD steady state simulation[J]. *Journal of Yunnan Normal University (natural sciences edition)*, 2018,38(2):11-15(in Chinese with English abstract).
- [11] 成珂,马晓瑶,孙琦琦.光伏温室大棚组件布置CFD模拟研究[J].太阳能学报,2021,42(8):159-165.CHENG K, MA X Y, SUN Q Q. CFD simulation study on module layout of photovoltaic greenhouse[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42 (8):159-165(in Chinese with English abstract).
- [12] 蔡彦文.基于CFD光热流场耦合分析的光伏温室研究与设计[D].杭州:浙江工业大学,2015.CAI Y W. Study and design of photovoltaic greenhouse based on the analysis of optothermal coupling flow field using CFD technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [13] LI C S, WANG H Y, MIAO H, et al. The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: case study in China[J]. *Applied energy*, 2017, 190:204-212.
- [14] COSSU M, COSSU A, DELIGIOS P A, et al. Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018,94:822-834.
- [15] MARUCCI A, CAPPUCINI A. Dynamic photovoltaic greenhouse: energy efficiency in clear sky conditions[J]. *Applied energy*, 2016,170:362-376.
- [16] BAMBARA J, ATHIENITIS A K. Energy and economic analysis for the design of greenhouses with semi-transparent photovoltaic cladding[J]. *Renewable energy*, 2019, 131:1274-1287.
- [17] YANO A, COSSU M. Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019,109:116-137.
- [18] PÉREZ-ALONSO J, PÉREZ-GARCÍA M, PASAMONTES-ROMERA M, et al. Performance analysis and neural modelling of a greenhouse integrated photovoltaic system[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012,16(7):4675-4685.
- [19] EZZAERI K, FATNASSI H, WIFAYA A, et al. Performance of photovoltaic Canarian greenhouse: a comparison study between summer and winter seasons [J]. *Solar energy*, 2020,198:275-282.
- [20] 王彪.光伏温室光热环境数值建模及性能分析[D].杭州:浙江工业大学,2017.WANG B. Study of solar thermal numerical model and performance analysis for the photovoltaic greenhouse[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [21] 叶子飘,李进省.光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J].井冈山大学学报(自然科学版),2010,31(3):38-44.YE Z P, LI J S. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola[J]. *Journal of Jinggangshan University (natural sciences edition)*, 2010, 31 (3) : 38-44 (in Chinese with English abstract).

A solar radiation allocation method for photovoltaic greenhouses based on optimal comprehensive economic benefits

WANG Yi^{1,2}, ZHOU Weiji³, ZHAO Yi¹, WU Xiao¹

1. *College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;*
2. *School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China;*
3. *Xinjiang Production & Construction Group Institute of Energy Development, Shihezi University, Shihezi 832000, China*

Abstract A solar radiation allocation method based on the optimal comprehensive benefits of photovoltaic power and agricultural production in photovoltaic greenhouse was proposed to solve the problem that the unreasonable solar radiation allocation between the photovoltaic power and agricultural production in photovoltaic greenhouse, resulting in low overall benefits. First of all, a model for the profit of photovoltaic power, the profit of crop, and the costs of operating and maintaining photovoltaic greenhouses was established. Among them, the modified light response model of crop right angle hyperbola was used as the calculation method for crop yield in photovoltaic greenhouses to closely combine the solar radiation with the yield and income of crop. Secondly, a mathematical model for the overall benefits of photovoltaic greenhouses with the goal of optimizing the comprehensive benefits of photovoltaic greenhouses and the constraints of light intensity in photovoltaic power and light conditions for the growth of crop in greenhouse was established. Finally, the benefits of photovoltaic greenhouses under multiple scenarios based on the actual operating data of a photovoltaic greenhouse in Xinjiang were compared and analyzed. The results showed that the overall benefit of the photovoltaic greenhouse was the highest when the minimum proportion of effective solar radiation value and the solar radiation allocation of crops in a photovoltaic greenhouse was selected. It is indicated that the proportion of solar radiation corresponding to the light saturation point of crop can be used as the maximum overall benefit point for PVG when the cost of renovating and operating and maintaining the photovoltaic greenhouse is considered and the original structure is not changed. It will provide the theoretical support for the design of photovoltaic greenhouse.

Keywords solar radiation allocation; photovoltaic greenhouse; photovoltaic power generation; agricultural production in photovoltaic greenhouse; optimal comprehensive benefits

(责任编辑:陆文昌)