

利用滤光膜和反光作用的新型农光互补方阵 原理与建模分析*

侯孟婧^{1,2}

(1. 国家能源集团绿色能源与建筑研究中心,北京市,102211; 2. 北京低碳清洁能源研究院,北京市,102211)

摘要:农光互补作为将光伏发电与农业生产有机结合的新能源应用形式,具有重要的生态效益和经济收益潜力,但因难以解决光伏组件和农作物采光分配的问题而推广不力。设计一种新型农光互补方阵,在光伏组件表面镀制由11层SiO₂膜和11层TiO₂膜组成的滤光多层膜,将农作物光合作用所需的红光和蓝光分离出来,通过方阵倾角的实时调整构成的反射光路照射到地面上,而其他波段的光则透过滤光膜,照射太阳能电池,进行光伏发电。设计该方阵的组件排布形式和阵列间距,使用PVsyst软件建模,计算方阵的发电量和阵列间地面光照,计算结果表明其发电量虽然低于常规固定倾角方阵,但阵列间地面光照增加27.26%,有助于提高农作物的产量,从而提高农光互补项目的综合效益。

关键词:农光互补;光伏阵列;滤光多层膜;PVsyst建模

中图分类号:S214 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2022)03-0127-05

侯孟婧. 利用滤光膜和反光作用的新型农光互补方阵原理与建模分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 127—131

Hou Mengjing. Principle and modeling analysis of an agro-photovoltaic system using filter film and light reflection [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 127—131

0 引言

光伏发电作为清洁、低成本的新能源形式,近年来得到了大规模的普及应用^[1-3]。在我国的中、东部地区,用电需求大,闲置土地少,光伏电站用地较为紧张。因此,光伏行业普遍希望利用农田建设光伏电站,也做出了很多探索性的尝试。例如,将光伏组件安装在玻璃温室的顶棚^[4-5],或者在拱棚之间的空地上安装离地较高的光伏方阵^[6-7],也有项目尝试在地面光伏方阵下方种植中药材等喜阴的农作物^[8]。很多农村地区也愿意尝试在农田上建设光伏电站,因为农业种植的收入微薄且不稳定,而光伏发电的收益较为稳定,能够提高农田的经济产出^[1, 9]。

农光互补电站始终面临一个技术难题,即农作物生长和光伏组件发电都需要充足的光照,二者集成在同一块农田上,相互争夺光照^[10]。若按照常规地面光伏电站的阵列间距安装方阵,则阵列之间的地面总被阵列的阴影遮挡,农作物光照不足,无法正常生长;若要保证农作物得到充足的光照,阵列间距很远,则会大大减少单位面积内的光伏装机量和发电量,降低光伏发电收益。碍于光伏发电和农作物采光难以兼顾的问

题,农光互补电站的市场应用规模至今仍较小。

为解决农光互补电站的光照分配问题,使农田同时获得较丰厚的种植和光伏发电收益,本文设计了一种新型的农光互补方阵。利用滤光材料分离不同波段的光,结合特定构造的光伏支架,并加以合理的阵列排布设计,在较少损失光伏发电量的同时,尽量改善阵列间地面的光照条件,保障农作物种植所需的环境,从而解决农光互补项目中农作物与光伏发电的争光矛盾。

1 农光互补方阵设计原理

在农光互补项目上,光伏阵列和农作物需利用同一区域的光照,但二者需要的光波段并不完全重合。农作物的光合作用主要利用红光和蓝光,对其他波段的光需求很低。太阳能电池主要利用可见光和近红外光发电,晶硅电池的光谱响应范围350~1 100 nm,铜铟镓硒电池光谱响应范围更宽,约为350~1 200 nm。因此,将不同波段的光分离,红光和蓝光用于农作物种植,其余波段的光用于光伏发电,则可实现农作物和光伏组件分享照射在同一区域的阳光^[11-12]。

1.1 滤光膜的设计原理

通过滤光膜对不同波段的光进行分离,采用SiO₂

收稿日期:2021年5月31日 修回日期:2021年12月5日

*基金项目:国家能源集团科技创新项目(GJNY—19—100)

作者简介:侯孟婧,女,1989年生,北京人,博士,工程师;研究方向为光伏农业和光伏发电系统。E-mail: 1504127340@qq.com

和 TiO_2 作为滤光膜材料,其中 SiO_2 为低折射率材料, TiO_2 为高折射率材料。不同厚度的 SiO_2 和 TiO_2 薄膜间隔排列,可使得照射在滤光膜上的不同波段的阳光分别被反射或透过^[13-16]。采用非 $1/4$ 波长厚度的膜系,设计包含 11 层 SiO_2 膜(低折射率层,即 L 层)和 11 层 TiO_2 膜(高折射率层,即 H 层)的多层滤光膜。该多层滤光膜可反射大部分红光和蓝光,而透过大部分其他波段的可见光和近红外光。该滤光膜的反射谱和透射谱如图 1 所示,其对于各波段光的反射率和透过率见表 1。

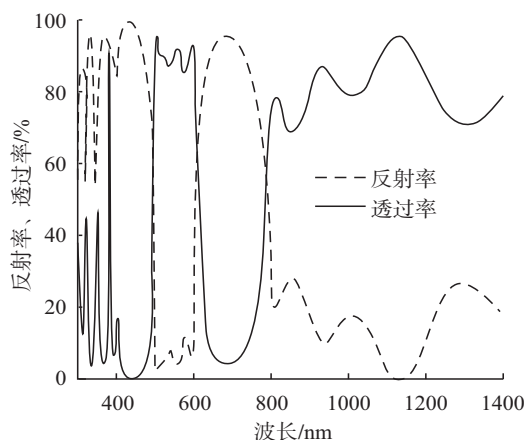


图 1 滤光膜的反射谱和透射谱

Fig. 1 Reflection spectrum and transmission spectrum of the filter film

表 1 滤光膜对于各波段光的反射率和透过率

Tab. 1 Reflectance and transmittance of the filter film for light of various wavelength

波段/nm	400~499	500~619	620~779	780~1 200	350~1 200
反射光占比/%	91.26	11.44	89.72	15.23	41.55
透射光占比/%	8.56	85.10	10.21	81.61	56.36

1.2 利用滤光膜的光伏方阵设计原理

将该滤光膜镀制在光伏组件前板玻璃上,则大部分红光、蓝光被反射,其余波段的光大多可以透过滤光膜,照射太阳能电池,进行光伏发电。根据表 1 中的数据,铜钢镓硒太阳能电池可利用的光波段中,约有 56.36% 的光能够透过滤光膜,用于光伏发电。

红光、蓝光被光伏组件表面的滤光膜反射后,要经过特定的光路控制,才能照射到地面上,被农作物利用。考虑到光伏阵列是多行平行排列的,后排光伏组件表面反射的光被前排光伏组件的背板再次反射,即可照射到地面。为确保后排光伏组件表面反射的光恰好能够照射到前排光伏组件的背板,该反射光的方向应始终保持水平。那么,光伏组件的倾角 β 与阳光入射角 α 应满足如下关系

$$\beta = 90 - \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

由式(1)可知,当入射阳光与水平面的夹角为 α 时,其与光伏组件表面的夹角为 $\alpha/2$,而经后排光伏组件表面滤光膜和前排光伏组件背板反射后的阳光与地面的夹角仍为 α ,即没有改变初始入射方向。

由于大部分光伏组件的背面不具有良好的反光性能,可以考虑在组件背板玻璃上贴高反射膜,反射率能达到 98% 以上,且价格便宜。

此种利用滤光膜和反光作用的农光互补方阵原理图如图 2 所示。太阳位置随季节、时间改变,阳光的入射角也随之变化。一般情况下,阳光与水平面的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,根据式(1),光伏组件的倾角也应随入射光角度调整,其与入射阳光的夹角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间,而与水平面的夹角应在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

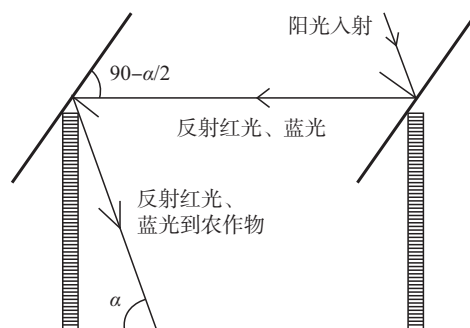


图 2 利用滤光膜和反光作用的农光互补方阵原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of agro-photovoltaic system using filter film and light reflection

当入射光角度改变,滤光膜的反射和透射作用也会发生改变。经过计算可知,当入射光角度分别为 0° 、 15° 、 30° 和 45° 时,反射光波段均有差异,如图 3 所示。

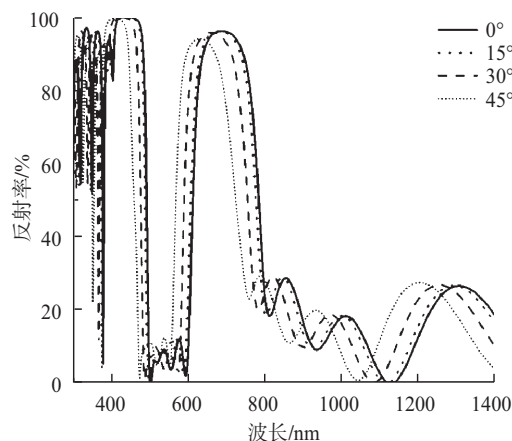


图 3 阳光入射角度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 时的滤光膜反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the filter film under the sunlight incident angle of 0° , 15° , 30° and 45°

随着入射光角度增大,反射谱逐渐蓝移,谱线形状发生微小改变。入射光角度从 0° 改变到 45° ,反射谱蓝

移约 60 nm,但主要反射波段仍基本覆盖农作物光合作用所需的红光、蓝光波段。因此,该滤光膜对这种倾角可变的农光互补方阵具有完全的适用性。

2 新型农光互补方阵设计及建模分析

2.1 农光互补方阵的倾角和间距设计

为保证光伏组件表面得到充分的光照,根据 GB 50797《光伏电站设计规范》的规定,光伏方阵的布置间距应保证冬至日 9:00~15:00 时段内互不遮挡。此处以铜铟镓硒光伏方阵为例,进行阵列间距计算。所选用的铜铟镓硒光伏组件峰值功率为 97.5 W_p,长度 1.2 m,宽 0.6 m,双排纵向安装,每排 32 块组件,考虑安装缝隙等,即每 64 块组件构成宽 20 m,高 2.5 m 的方阵面。

对于常规固定倾角的方阵,在北京地区(39.9°N,

116.3°E),最佳倾角取为 38°,则按照式(2)计算可得,方阵间距应不小于 6.55 m。而由式(1)计算可知,利用滤光膜和反光作用的新型农光互补方阵在冬至日上午 9 点和下午 3 点时的倾角是 84°,故按照式(2)计算其方阵间距应不小于 7.66 m。

$$D=L\cos\beta+L\sin\beta\frac{0.707\tan\varphi+0.4338}{0.707-0.4338\tan\varphi}$$

(2)

式中: D ——方阵间距;
 L ——方阵高度;
 β ——方阵倾角;
 φ ——当地纬度,在北京地区取为 39.9°。

在光伏仿真软件 PVsyst 中分别建立阵列间距为 6.55 m 的固定倾角方阵和阵列间距为 7.66 m 的新型农光互补方阵三维模型,如图 4 所示。表 2 为春分、夏至、秋分、冬至日间每小时的光伏阵列倾角。

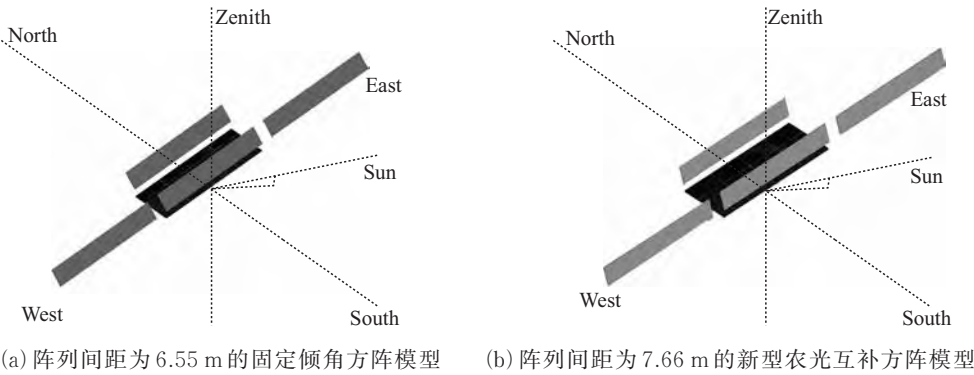


图 4 方阵模型
Fig. 4 Array model

表 2 春分、夏至、秋分、冬至日间每小时的光伏阵列倾角

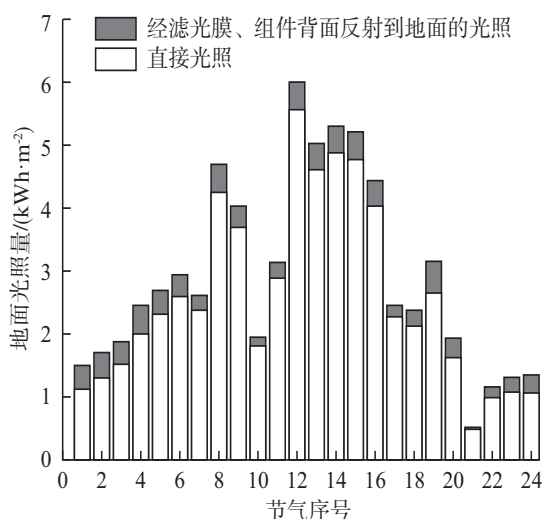
Tab. 2 Hourly inclination of PV arrays during the daytime of vernal equinox, summer solstice, autumnal equinox and winter solstice (°)

时段	春分(3月21日)		夏至(6月21日)		秋分(9月23日)		冬至(12月22日)	
	太阳高度角	阵列倾角	太阳高度角	阵列倾角	太阳高度角	阵列倾角	太阳高度角	阵列倾角
4:00~5:00	0.0	90.0	0.8	89.6	0.0	90.0	0.0	90.0
5:00~6:00	0.0	90.0	6.6	86.7	0.0	90.0	0.0	90.0
6:00~7:00	3.7	88.2	17.3	81.4	5.1	87.4	0.0	90.0
7:00~8:00	13.0	83.5	28.5	75.7	15.6	82.2	1.7	89.1
8:00~9:00	24.0	78.0	40.0	70.0	26.5	76.7	8.0	86.0
9:00~10:00	34.2	72.9	51.4	64.3	36.3	71.8	16.1	82.0
10:00~11:00	42.7	68.6	62.2	58.9	44.3	67.9	22.2	78.9
11:00~12:00	48.5	65.8	70.8	54.6	49.1	65.4	25.8	77.1
12:00~13:00	50.2	64.9	73.3	53.4	49.7	65.2	26.5	76.7
13:00~14:00	47.4	66.3	67.3	56.3	45.8	67.1	24.2	77.9
14:00~15:00	40.8	69.6	57.4	61.3	38.5	70.7	19.1	80.4
15:00~16:00	31.7	74.1	46.2	66.9	29.0	75.5	11.8	84.1
16:00~17:00	21.3	79.3	34.8	72.6	18.4	80.8	3.9	88.0
17:00~18:00	10.1	85.0	23.4	78.3	7.1	86.4	0.0	90.0
18:00~19:00	2.3	88.9	12.3	83.9	0.8	89.6	0.0	90.0
19:00~20:00	0.0	90.0	3.6	88.2	0.0	90.0	0.0	90.0

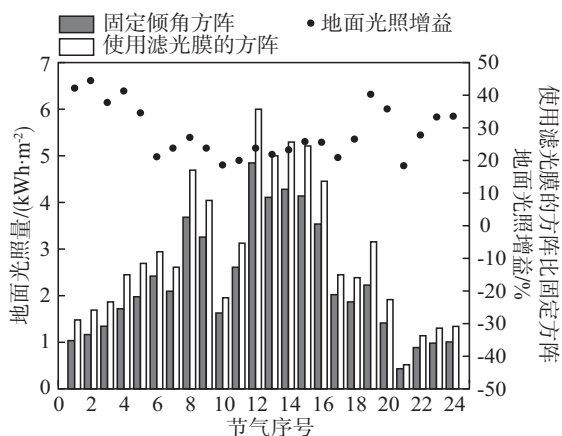
在北京地区,固定倾角方阵的倾角可取为 38° ;而利用滤光膜和反光作用的新型农光互补方阵倾角需随着太阳位置的变化而不断调整。出于减少可调支架自身用电量、降低控制难度的考虑,其倾角在日间每小时调节一次。表2列出了春分、夏至、秋分、冬至日间每小时的光伏阵列倾角。

2.2 滤光膜和反光作用对阵列间光照的影响

使用PVsyst软件计算两种方阵的阵列间地面光照强度。利用滤光膜和反光作用的新型农光互补方阵倾角随太阳高度角变化,以确保后排光伏组件表面滤光膜反射的光恰好照射到前排组件背板,并再次反射,照射到地面。这种方阵的阵列间地面接收到的光照包括直接照射的阳光和经方阵两次反射后的阳光。据表1中的数据,在 $350\sim 1\,200\text{ nm}$ 内,滤光膜的反射率为41.55%,而该波段的光照量占太阳光谱中的82.10%,若组件背面贴有高反射率(98%)的反射膜,则经后排组件滤光膜、前排组件背面反射,到达地面的光照占组件表面光照的33.43%。图5为地面光照量数据。



(a) 新型农光互补方阵的阵列间地面反射光照及直接光照



(b) 两种方阵的阵列间地面光照量对比

图5 阵列间地面光照量

Fig. 5 Illumination on the ground between the arrays

由图5(a)中24个节气日期的地面光照量数据可知,地面接收到的光照大部分来自阳光直接照射,同时,经两次反射的阳光也对地面光照有一定增益作用。与这种新型农光互补方阵不同,固定倾角方阵上的光伏组件表面没有镀制滤光膜,因而阵列间地面上的光照基本来自于阳光直接照射,包括直射光和散射光。对比一年中24个节气日期里北京地区两种方阵的阵列间地面光照量(图5(b)),利用滤光膜和反光作用的光伏阵列间地面日均光照量 2.92 kWh/m^2 ,固定倾角阵列间地面日均光照量 2.30 kWh/m^2 ,前者比后者高27.26%。

2.3 滤光膜和反光作用对农光互补项目发电的影响

农光互补项目的收益除受地面光照影响的农作物收成以外,还包括光伏发电的收益。使用PVsyst软件计算两种方阵的发电量数据,如图6所示,通过对比24个节气日期里两种方阵的单位装机量组件的发电量。冬季使用滤光膜的新型方阵发电量更高,春、夏、秋季固定倾角方阵的发电量更高,特别是夏季,固定倾角方阵的发电量比使用滤光膜的方阵高25%左右。将24个节气的日发电量求平均,以反映全年发电量的差异情况。利用滤光膜和反光作用的农光互补阵列可以日均发电 1.90 kWh/kWp ,固定倾角方阵日均发电可以达到 3.57 kWh/kWp ,前者比后者低46.68%。相比于固定倾角方阵,新型的农光互补方阵的倾角始终大于最佳发电倾角,因而发电量降低,但是其倾角设置能够增加地面光照量,有助于农作物生长。

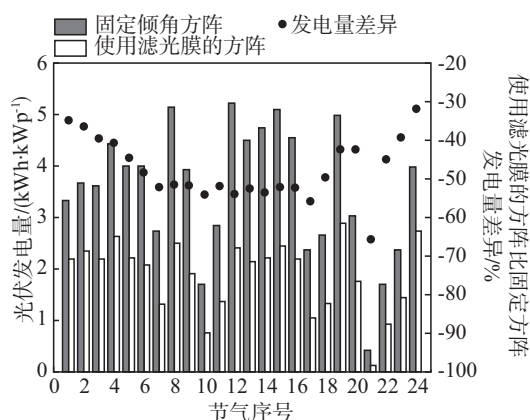


图6 两种方阵的单位装机量光伏发电量对比

Fig. 6 Comparison of PV power generation per unit installed capacity of two kinds of PV arrays

3 结论

1) 本文设计了一种新型的农光互补光伏方阵,在光伏组件表面镀制滤光多层膜,该膜系由不同厚度的11层 SiO_2 膜和11层 TiO_2 膜间隔排列构成,可反射大部分红光和蓝光,透过其他波段的光,从而将农作物光

合作用所需的光与其他光分离开。根据太阳高度角实时调整光伏阵列的倾角,该倾角与太阳光入射角的一半互为余角,从而确保后排组件表面滤光膜反射的光恰好照射到前排组件背面或贴敷在背面的高反射膜,光再次被反射,最终照射到阵列间地面上的农作物,到达地面的光照占组件表面光照的33.43%。

2) 依据冬至日 9:00~15:00 方阵间互不遮挡的原则,进行阵列设计,并使用 PVsyst 软件建模,计算得出利用了滤光膜和反光作用的农光互补方阵阵列间地面光照量比常规固定倾角方阵高 27.26%,能够显著改善农作物的采光条件,从而解决农光互补项目中普遍面临的农作物与光伏组件的采光分配矛盾问题。

参 考 文 献

[1] 何旨昇. 我国农光互补发展现状及前景分析[J]. 科技经济导刊, 2016, 5: 113.

[2] 高智丹, 任超. 我国农光互补技术的发展及前景[J]. 农家参谋, 2018, No.583(10): 13.

[3] 张小杭, 崔寿福, 刘福平. 光伏农业的发展概况[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(19): 229—231.

Zhang Xiaohang, Cui Shoufu, Liu Fuping. Development survey of photovoltaic agriculture [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(19): 229—231.

[4] 刘润宝, 周宇昊, 谢玉荣. 江苏仪征大仪 100 MWp 农光互补发电项目研究[J]. 节能, 2017(3).

[5] 赵斌, 汪树升, 张文婷. 不同结构的光伏温室经济效益对比

分析[J]. 太阳能, 2015(11):63—65.

[6] 王泽国, 王磊, 吉春明. 农业大棚光伏结构体系的优化设计研究[J]. 太阳能, 2018(12): 67—69, 76.

[7] 齐金龙. 河北某地区农光互补发电工程研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.

[8] 沈道军, 盛春, 杨松, 等. 林农光伏电站实例分析[J]. 太阳能, 2016(2): 13, 34—36.

[9] 马志强, 张振国, 张盈. 光伏农业产业发展探讨[J]. 现代农业科技, 2019(14): 238, 240.

[10] 虞建春.“农业+光伏”电站的优化设计探析[J]. 科技创新与应用, 2019(11): 89—90.

[11] 欧浪情, 何子力, 刘路青, 等. 红、蓝双通道滤光膜对植物生长的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1909—1914.

[12] 张昕昱, 张智深, 张放心, 等. 基于植物光合作用的太阳光谱分离技术进展[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4): 17—21.

[13] Enami Y, Yuan B, Tanaka M, et al. Electro-optic polymer/ TiO_2 multilayer slot waveguide modulators [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(12): 3335.

[14] 张杨, 王维, 圣桂金, 等. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 纳米多层膜光学特性研究[J]. 红外, 2007, 28(2): 12—14.

[15] 连松友, 姜国利, 余云鹏, 等. 蓝光过滤多层功能薄膜的遗传算法设计[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 170—175.

[16] 张雪. TiO_2 /金属(氧化物)多层膜光学特性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

Zhang Xue. Study on the optical properties of TiO_2 /metal (dioxide) multilayer films [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.

Principle and modeling analysis of an agro-photovoltaic system using filter film and light reflection

Hou Mengjing^{1, 2}

(1. Center for Green Energy and Architecture of China Energy Investment Corporation, Beijing, 102211, China;
2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing, 102211, China)

Abstract: As a new energy application form that organically combines photovoltaic (PV) power generation and agricultural production, agro-photovoltaic integrating system has important ecological benefits and economic potential. However, suffering for the problem of photovoltaic modules and crop lighting distribution, it is difficult to apply it widely. In this regard, a new type of agro-photovoltaic system was designed. A multilayer film filter comprising of 11 layers of SiO_2 film and 11 layers of TiO_2 film was coated on the surface of photovoltaic modules to separate the red and blue light required for crop photosynthesis from solar spectrum. Through real-time adjustment of the inclination of the PV array, the reflected light kept illuminating the ground, while other wavelengths of light passed through the filter film and illuminated the solar cell, leading to generation of photovoltaic power. The PV modules arrangement and spacing of the PV array was designed, and the power generation of the PV array and the ground illumination between the arrays were calculated with PVsyst software modelling. The calculation results showed that although its power generation was lower than the conventional fixed inclination square array, the ground illumination between the arrays had increased by 27.26%, which helped to increase the yield of crops, thereby increasing the comprehensive benefits of the agro-photovoltaic projects.

Keywords: agro-photovoltaic; PV array; multilayer film filter; PVsyst software modelling