

中国光伏农业的区域分布与集聚分析

王玲俊^{1,2}, 陈健³

- (1. 南京工程学院经济与管理学院, 江苏 南京, 211167;
2. 南京工程学院产业经济与创新管理研究院, 江苏 南京, 211167;
3. 南京林业大学经济管理学院, 江苏 南京, 210037)

摘要:本研究搜集并整理了我国光伏农业的公开披露信息,在此基础上运用农业可持续发展和太阳能资源的综合分区对光伏农业进行了区域分布分析,进而运用集中度指数和区位熵对其进行了集聚分析。主要结论如下:(1)现阶段我国光伏农业多分布于农业资源丰富、农业生产条件好的地区。(2)全国的光伏农业多集中于华东三省,从具体的农光模式来看,渔光互补的地域性最强。从华东三省内部来看,江苏渔光互补的专业化水平是全国最高的,浙江的农光互补专业化水平位于全国前列,安徽相较于其他两省在光伏农业大棚的专业化水平上具有一定优势。(3)现阶段我国光伏农业多集中于农业可持续发展的优化发展区域,且较为固定,但随着农业资源的开发,集中区域会发生一定改变。以上结论可为光伏农业的管理和相关政策制定提供参考。

关键词:光伏农业;区域分布;集聚;综合分区

中图分类号:F426.61;F327;S214

光伏农业,国外称“agrivoltaic”^[1]或“agrophotovoltaic”^[2],是一种新型的土地资源利用方式,指在同一土地上既进行农业生产又进行光伏发电,也即一地两用。2011年,光伏农业开始了全球范围内的项目实践^[2],现如今,全世界的农光项目数已超过2 200个^[3]。与此同时,2017年以来,日本、法国、美国马萨诸塞州、韩国和中国政府在光伏农业的应用和推广方面引入了相关政策,这些国家的光伏农业市场已经领先于其他地区,其中以中国的规模为最大。据本研究统计,截至2019年底,中国并网发电的农光项目装机容量在光伏装机容量中的比例为7%左右^①。这意味着我国有7%左右的光伏电站是建设在农用地上的,如何通过对光伏农业技术(以下简称“农光技术”)的不断改进,提升这部分土地的利用效率,进而增加社会福利,是目前该领域的研究重点^[4-9]。

由于光伏农业涉及农业和光伏两大领域,其研究也主要来自这两个方面。农业方面,比较著名的科研机构是法国国家农业科学研究所(INRA),代

表学者有 Dupraz 和 Marrou。他们创新性地提出了“agrivoltaic”的概念^[1],并对光伏农业系统(以下简称“农光系统”)中作物的生长进行了全面研究^[10-12],为后续研究和农光系统的应用提供了理论基础。光伏方面,较著名的机构是德国 Fraunhofer 太阳能系统研究所(ISE),代表学者有 Goetzberger、Trommsdorff 和 Schindele。其中,Goetzberger 在1982年就提出了太阳能转化和作物种植的共存的概论^[13],上述的“agrivoltaic”概念便是在这一想法的基础上提炼出的。Trommsdorff 首次对光伏农业进行了全面的技术经济分析,将光伏农业的研究延伸至经济领域^②。Schindele 则在技术经济分析的基础上提出了相关政策启示,推进了光伏农业在社会经济方面的研究^[3]。此外,光伏农业在环境和生态方面的影响也一直是学者较为关注的^[9,14]。但目前的研究多停留在案例分析的微观层面^[15-17],缺少对一国或某一地区光伏农业的总体情况的宏观研究。由于缺乏光伏农业总体规模的官方统计信息,政府对光伏农业的具体实施情况缺乏了解,导致无法制

收稿日期:2022-10-07;修回日期:2022-12-14

基金项目:江苏省社会科学基金项目(22GLD005);南京工程学院高层次人才科研启动基金项目(YKJ202024);南京工程学院产业经济与创新管理研究院开放基金项目(JGKB202208)

作者简介:王玲俊,博士,副教授,研究方向为产业组织与产业政策、光伏农业。

通讯作者:陈健,博士,讲师,研究方向为产业经济与管理、光伏农业。

E-mail: c.jl125@163.com

引文格式:王玲俊,陈健. 中国光伏农业的区域分布与集聚分析[J]. 南京工程学院学报(社会科学版), 2023, 23(1): 59-66.

定适当的管理计划,无法大规模提高其农业可持续性,无法评估土地消耗以及对该地区产生的环境、经济和社会影响^[18]。

鉴于此,文章在现有研究的基础上,通过对公开披露的我国光伏农业信息的搜集与整理,运用本研究设计的农业可持续发展和太阳能资源综合分区分析了我国光伏农业的区域分布,并进一步运用集中度指数和区位熵进行了集聚分析,以期对光伏农业的管理和相关政策制定提供参考。

一、研究方法 with 数据来源

为掌握我国光伏农业的规模信息,明确其地域分布和集聚情况,以便提出相关建议,文章设计了专门的区域划分方法,并选择集聚分析方法,基于手工搜集的农光项目数据进行光伏农业的区域分布分析和集聚分析。

(一) 区域划分方法

1. 农业可持续发展分区

本部分参考农业农村部等部委于 2015 年 5 月联合发布的《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》中对我国农业可持续发展的分区,该分区综合考虑各地农业资源承载力、环境容量、生态类型和发展基础等因素,将全国划分为优化发展区、适度发展区和保护发展区,具体如表 1 所示。

表 1 我国农业可持续发展分区		
分区		区域范围
优化发展区	东北区	黑龙江,吉林,辽宁,内蒙古东部
	黄淮海区	北京,天津,河北中南部,河南,山东,安徽、江苏北部
	长江中下游区	江西,浙江,上海,江苏、安徽中南部,湖北、湖南大部
	华南区	福建,广东,海南
适度发展区	西北及长城沿线区	新疆,宁夏,甘肃大部,山西,陕西中北部,内蒙古中西部,河北北部
	西南区	广西,贵州,重庆,陕西南部,四川东部,云南大部,湖北、湖南西部
保护发展区	青藏区	西藏,青海,甘肃藏区,四川西部,云南西北部
	海洋渔业区	我国管辖海域

2. 太阳能资源分区

本部分参考国家发展改革委发布的《2018 年

全国光伏发电上网电价表》对我国太阳能资源的分区,该分区将全国划分为Ⅰ类资源区、Ⅱ类资源区和Ⅲ类资源区 3 个区域,具体如表 2 所示。

表 2 我国太阳能资源分区	
资源区	各资源区所包括地区
Ⅰ类资源区	宁夏,青海海西,甘肃嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌,新疆哈密、塔城、阿勒泰、克拉玛依,内蒙古除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔以外地区
Ⅱ类资源区	北京,天津,黑龙江,吉林,辽宁,四川,云南,内蒙古赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔,河北承德、张家口、唐山、秦皇岛,山西大同、朔州、忻州、阳泉,陕西榆林、延安,青海、甘肃、新疆除Ⅰ类外其他地区
Ⅲ类资源区	除Ⅰ类、Ⅱ类资源区以外的其他地区

3. 农业可持续发展和太阳能资源的综合分区

针对本文的研究内容,本部分将农业可持续发展和太阳能资源这两个因素进行综合考虑,即将上述表 1 和表 2 中的两项分区进行合并,合并后的分区见表 3。

表 3 综合分区 ^③	
分区	区域范围
Ⅰ适区	内蒙古中西部,甘肃北部(除天祝外),宁夏,新疆东北部
Ⅰ保区	甘肃天祝,青海西北部
Ⅱ优区	北京,天津,内蒙古东部,辽宁,吉林,黑龙江
Ⅱ适区	河北北部,山西北部,四川东部,云南大部,陕西中北部,甘肃南部(除甘南外),新疆大部
Ⅱ保区	四川西部,云南西北部,甘肃甘南,青海大部
Ⅲ优区	河北中南部,上海,江苏,浙江,安徽,福建,江西,山东,河南,湖北大部,湖南大部,广东,海南
Ⅲ适区	山西中南部,湖北西部,湖南西部,广西,重庆,贵州,陕西南部
Ⅲ保区	西藏

如表 3 所示,我国农业可持续发展和太阳能资源的综合分区共有 8 个区域,分别为Ⅰ适区、Ⅰ保区、Ⅱ优区、Ⅱ适区、Ⅱ保区、Ⅲ优区、Ⅲ适区和Ⅲ保区,未出现Ⅰ优区,说明光照资源过分充足并不利于农业发展。就上述 8 个区域而言,Ⅲ优区涉及省份达到了 13 个,是所有区域中最多的。位列第二的则是Ⅲ适区和Ⅱ适区,均涉及 7 个省份。紧随其后的是Ⅱ优区,涉及省份 6 个。接下来是Ⅰ适区和Ⅱ保区,均涉及 4 个省份。最后则是Ⅰ保区(2 个)

和Ⅲ保区(1 个)。可以看出,我国农业条件好、潜力大的优化发展区大多位于Ⅲ类太阳能资源区,部分位于Ⅱ类资源区,说明最适合农业发展的是我国的Ⅲ类太阳能资源区。而农业基础设施相对薄弱的适度发展区则较为均匀地分布在 3 类太阳能资源区。生态十分脆弱的保护发展区在 3 类太阳能资源区均有分布。

(二) 集聚分析方法

1. 集中度指数(Concentration Ration Index)

在行业集聚分析指标中,集中度指数最为常用,它表示行业规模排名的前几位地区的产值在总产值中所占的份额。利用上述各综合分区农业光伏电站的装机容量可计算出光伏农业的集中度指数^④。计算公式为:

$$CR_n = \sum_{i=1}^n S_i^j \tag{1}$$

式中: S_i^j 表示 i 综合分区 j 类农光项目装机容量所占该类项目装机总容量的份额; CR_n 表示类别 j 中规模最大的前 n 位综合分区所占总装机容量的比重之和; n 一般取 1、4、8 等值。

集中度指数可形象地反映光伏农业的集聚水平, CR_n 取值越大代表行业越集中。

2. 区位熵(Location Quotient)

区位熵可用于测定特定区域某一产业的专业化水平,并能反映该区域就相关产业在更高层次区域中的地位及作用。对于区域产业聚集度的度量而言,该指标具有较好的测度效果。其计算公式为:

$$LQ_{ij} = \frac{e_{ij}/e_i}{e_j/e} \tag{2}$$

式中: LQ_{ij} 表示 i 综合分区 j 类农光项目的区位熵;

e_{ij} 表示 i 综合分区 j 类农光项目的装机容量; e_i 表示 i 综合分区所有类别农光项目的装机容量, $e_i = \sum_j e_{ij}$; e_j 表示所有地区 j 类农光项目的总装机容量, $e_j = \sum_i e_{ij}$; e 表示所有地区农光项目的总装机容量, $e = \sum_j \sum_i e_{ij}$ 。

$LQ_{ij} > 1$, 代表某综合分区就某一类别农光项目的装机容量在该区域项目装机容量的比例高于所有区域该类别农光项目装机容量在所有类别农光项目装机容量的比例。 $LQ_{ij} = 1$ 和 $LQ_{ij} < 1$ 分别代表专业化达到平均水平以及处于劣势状态。

(三) 数据搜集与整理

数据搜集于中国储能网 (<http://www.escn.com.cn/>), 该网站设有专门的“光伏农业”版块, 用以披露备案、招标、中标、签约、开工、竣工、验收和并网的农光项目情况。截止到 2019 年 12 月 31 日, 中国储能网的“光伏农业”版块共有 776 条关于农光项目情况的相关信息。为了获取更全面的信息, 本文就具体项目, 进一步通过北极星太阳能光伏网 (<https://guangfu.bjx.com.cn/>)、索比光伏网 (<https://www.solarbe.com/>)、光伏企业网站、各地政府发改委及能源局网站进行信息补充。

对于上述中国储能网中披露的 776 条农光项目信息, 本文剔除重复披露信息, 进而考虑到项目可能存在的不确定性, 剔除了尚在备案、招标、中标、签约、开工、竣工、验收过程中的项目, 最终选择了 278 个已并网发电的项目为研究样本, 各年不同光伏农业模式(以下简称农光模式)的项目数量如表 4 所示。

表 4 2011—2019 年各种农光模式的项目数量

模式	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	合计
光伏农业大棚	1	0	7	8	16	23	14	3	0	72
农光互补	0	0	1	0	7	22	32	12	7	81
林光互补	0	0	0	0	1	6	0	1	3	11
牧光互补	0	0	0	0	0	1	4	0	2	7
渔光互补	1	0	5	5	11	26	42	11	2	103
光伏治沙	0	0	0	1	0	1	0	1	1	4
合计	2	0	13	14	35	79	92	28	15	278

二、结果与分析

(一) 区域分布

首先, 本文对 278 个农光项目进行了所在省份统计。截止到 2019 年 12 月 31 日, 除港、澳、台地区外, 全

国 31 个省、自治区和直辖市中有 26 个地区有农光项目并网发电, 未有农光项目并网发电的地区有北京市、黑龙江省、上海市、重庆市和新疆维吾尔自治区。排在前 3 位的分别是江苏省、浙江省和安徽省, 尤其是江苏省, 项目数量达到了 44 个, 占全国总数量的 16%。排名倒数三位的分别是四川、天津和青海, 其中, 四川省

仅有一个渔光互补项目并网发电。

区,并将每个综合分区农光项目数量的每年新增情

本研究将省域数据进行进一步整理至综合分

况列出,具体见表 5。

表 5 各综合分区 2011—2019 年新增农光项目数量

分区	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	合计
I 适区	0	0	1	3	3	6	1	1	1	16
II 优区	0	0	0	0	2	4	7	2	0	15
II 适区	0	0	0	1	4	4	3	1	0	13
II 保区	0	0	0	0	0	1	2	0	0	3
III 优区	2	0	12	9	19	60	67	18	6	193
III 适区	0	0	0	1	7	4	12	6	5	35
III 保区	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
合计	2	0	13	13	35	78	92	27	14	278

由表 5 可知,除 I 保区外,其他 7 个区域均有农光项目并网发电。从各综合分区的项目数量来看,III 优区最多,有 193 个;其次为 III 适区,为 35 个。第三、四、五分别是 I 适区(16 个)、II 优区(15 个)和 II 适区(13 个);最后则是 III 保区和 II 保区,各有 3 个项目。

总体来看,农业可持续发展为保护发展区的农光项目数最少,除此之外,项目数量随光照资源的变化而变化。具体而言,III 类资源区的项目最多,其次是 II 类资源区,最后是 I 类资源区。这一点较为特殊,因为从原理上讲,光照资源充足的地区更

有利于光伏发电。而在同一太阳能资源区,农光项目数量的排序为:优化发展区>适度发展区>保护发展区。可见农业资源丰富、农业生产条件好的地区拥有更多的农光项目。由此可以看出,目前的农光项目大多建立在农业发展较好的地区,这些地区农业的发展方向为:实现生产稳定发展、资源永续利用和生态环境友好,与光伏农业所能达到的效果相一致。

(二)集中度

首先,我们对 2011—2019 年全国光伏农业的集中度进行了测量,测量结果如表 6 所示。

表 6 2011—2019 年我国光伏农业的集中度

年份	CR_1	CR_4	CR_8	集中地区
2011	1	1	1	江苏
2012	1	1	1	江苏
2013	0.562 8	0.973 3	1	江苏、宁夏、海南、江西、湖北、山东、安徽
2014	0.398 6	0.839 8	0.958 8	江苏、内蒙古、安徽、宁夏、海南、河北、湖北、河南
2015	0.245 7	0.560 8	0.788 7	江苏、浙江、内蒙古、山东、陕西、宁夏、安徽、河南
2016	0.164 0	0.512 1	0.807 9	浙江、江苏、内蒙古、江西、山东、安徽、河南、宁夏
2017	0.157 0	0.479 8	0.745 0	浙江、安徽、江苏、宁夏、山东、江西、内蒙古、河南
2018	0.140 2	0.469 0	0.728 6	浙江、江苏、安徽、山东、宁夏、内蒙古、江西、河南
2019	0.127 8	0.445 9	0.697 3	浙江、江苏、安徽、山东、宁夏、内蒙古、江西、贵州

从表 6 的集中度指数来看,2011—2012 年,江苏是全国唯一建有农光项目的地区,所建项目分别是由协鑫集团投资的位于徐州丰县的食用菌光伏大棚和由中电投投资的位于盐城建湖的渔光互补项目,据我们所知,这两个项目也是全国最早的农光项目。这说明在我国对光伏农业的早期探索中,江苏起到了重要带头作用。在接下来的 3 年(2013—2015 年)中,江苏继续保持了全国光伏农业的龙头地位,但这一期间,全国其他地区也开始了对光伏农业的探索实践,如宁夏、内蒙古、安徽、

浙江、山东等。其中,宁夏于 2013 年投入运营了西部首个光伏农业科技大棚项目,该项目位于石嘴山市,由中节能投资,装机容量达到了 100 MV,是当时国内装机容量最大的农光项目。内蒙古则紧随宁夏之后,在 2014 年并网了 2 个光伏农业大棚项目,其中 1 个是由协鑫投资的香岛 161 MV 光伏温室大棚项目,占地 12 700 亩(约 8.47 km²),规模在当时为全国之最。江苏近邻安徽也开始崭露头角,其在 2014 年于金寨并网了信义光伏生态园项目,装机容量 150 MV,其规模在当时排在上述内蒙古

香岛项目之后。值得一提的是,该项目还是一个扶贫项目,也是我们统计到的全国最早并网发电的光伏扶贫项目。江苏的另一近邻浙江则于 2015 年迅速崛起,当年竣工投运项目的装机容量达到了 431.25 MV,位居全国第二。农业大省山东于 2013 年投运了位于寿光的全国首个光伏蔬菜大棚,并在 2015 年运营了位于即墨的 200 MV 的光伏农业示范基地项目,成了当时光伏农业大棚项目规模最大的省份。到了 2016 年,浙江一举超越江苏,成为我国光伏农业的第一大省。同年,江西的农光项目规模进入了全国前四,并在 2017—2019 年保持在全

国前八。也是从这一年开始,全国前八的地区几乎没有改变,仅仅在最后一年,贵州取代了河南成为全国第八。并且,2017—2019 年,排在前三名的省份为江苏、浙江和安徽,其中,浙江牢牢占据了第一的位置。此外,内蒙古、江西、山东和宁夏分列第四到七位。

进而,我们分别对 3 大主要农光模式进行了集中度测量。不论从项目数还是装机容量,这 3 大类别占到了总量的 90% 以上。其中,项目数占比为 93%,装机容量占比为 92%。结果如表 7 所示。

表 7 2011—2019 年我国三大主要农光模式的集中度

模式	集中度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
光伏农业大棚	CR_1	1	1	0.606 4	0.354 3	0.160 7	0.166 7	0.258 1	0.252	0.252
	CR_4	1	1	0.993 6	0.799	0.517 1	0.571 4	0.639 4	0.624 4	0.624 4
	CR_8	1	1	1	0.982 8	0.817 3	0.821	0.832 9	0.813 6	0.813 6
农光互补	CR_1	—	—	1	1	0.438 6	0.392 7	0.304 7	0.269 5	0.237 5
	CR_4	—	—	1	1	0.956 1	0.664 9	0.634 3	0.598 6	0.587 1
	CR_8	—	—	1	1	1	0.856 1	0.803 1	0.786 8	0.787 2
渔光互补	CR_1	1	1	1	0.92	0.687 2	0.408 1	0.241 1	0.292 5	0.273 3
	CR_4	1	1	1	1	1	0.892	0.735 2	0.739 5	0.738 3
	CR_8	1	1	1	1	1	1	0.935	0.933 4	0.937 8

由表 7 可知,2011—2019 年,集中度最强的是渔光互补模式,其次是光伏农业大棚模式,最后是农光互补模式。事实上, CR_4 和 CR_8 也一直是渔光互补模式最高,尤其是该模式的 CR_8 , 仅从 2011 年的 1 下降至 2019 年的 0.94,充分说明了该模式相对其他两种模式具有较强的地域性。光伏农业大棚模式的集中度也较强,从 2017—2019 年 CR_4 的计算过程来看,主要集中于山东、河南、内蒙古和安徽等地。农光互补模式的集中度稍差一些,从 2019 年的情况来看, CR_4 未到 60%, CR_8

小于 80%。

(三) 区位熵

由式(2)可知,相较于集中度指数的计算,区位熵的计算更有可能出现分母为零的情况。又由于很多地区出现农光项目的时间较晚,有些地区甚至在研究期间并未出现某些模式的项目,导致在计算区位熵时经常出现分母为零的情况。因此,文章在进一步考虑了区域之间的可比性以后,最终选择了 2015—2019 年华东三省——江苏、浙江、安徽的光伏农业进行了区位熵的测算,结果如表 8 所示。

表 8 2015—2019 年华东三省三种主要农光模式的区位熵

模式	省份	2015	2016	2017	2018	2019
光伏农业大棚	江苏	0.139	0.144	0.307	0.284	0.311
	浙江	0.141	0.098	0.070	0.076	0.084
	安徽	1.784	1.867	1.061	1.090	1.001
农光互补	江苏	0.178	0.173	0.156	0.114	0.111
	浙江	2.932	2.394	1.392	1.378	1.332
	安徽	0.000	0.000	0.545	0.507	0.410
渔光互补	江苏	2.797	2.600	2.247	2.259	2.315
	浙江	1.445	1.307	1.486	1.452	1.488
	安徽	0.364	0.929	1.419	1.455	1.670

由表8可知,就光伏农业大棚而言,江苏和浙江的区位熵一直不高,说明两省在光伏农业大棚模式的发展方面并未达到全国平均水平。相比较而言,安徽在这方面是三省中发展最好的,但其区位熵从2015年的1.784降至2019年的1.001,优势在逐渐减弱。而就农光互补模式而言,浙江则最为突出,其次是安徽,再者是江苏。事实上,浙江从2015年开始,其农光互补项目的规模就一直是全国第一。安徽的区位熵虽然未达到1,但其农光互补的规模也在全国前列,只是相对于该省光伏农业大棚和渔光互补的规模要小得多。最后是渔光互补模式,江苏是三省中最好的,其区位熵从2015年开始一直未小于2,足见其在我国渔光互补领域的统治力。相较于浙江在农光互补方面的地位,江苏在渔光互补方面的地位要更胜一筹。上述情况一方面,可以从区位熵数值的差异体现出来;另一方面,江苏的渔光互补从2011年开始就一直居于全国首位,时间更为长久。

三、结论与讨论

通过所提出的综合分区以及集中度指数和区位熵,本研究对我国光伏农业的区域分布和集聚情况进行分析,得出以下结论。

(1)2011—2019年,我国除港澳台以外的31个省区中的26个省有农光项目并网发电。其中,农业资源丰富、农业生产条件好的地区拥有更多的农光项目,而各类太阳能资源区农光项目数量所呈现出的关系为:Ⅲ类资源区>Ⅱ类资源区>Ⅰ类资源区,说明光伏农业的发展主要以农业资源为基础。

(2)2011—2012年,我国的农光项目仅出现于江苏。2013—2014年,宁夏、海南、湖北、江西、山东、安徽、内蒙古、河北和河南相继出现了农光项目,我国的光伏农业集中于这些地区。2015年以后,光伏农业继续在全国的其他省份推广应用,除上述提到的地区外,浙江和陕西在2015年进入了全国前八,分别位列第二和第五;贵州则在2019年首次进入全国前八,位列第八。从3种主要的农光模式来看,渔光互补的集中度最强,其次是光伏农业大棚,最后是农光互补。由上可知,现阶段我国的光伏农业多集中于农业可持续发展的优化区域,且较为固定,但随着农业资源的开发,集中区域会发生一定改变。此外,各种农光模式的集中度不尽相同。

(3)相应地,各地具有相对优势的农光模式。以全国光伏农业发展最好的华东三省为例,江苏渔光互补的发展水平为全国最好,浙江的优势模式为

农光互补,安徽相较于其他两省在光伏农业大棚的专业化水平上具有一定优势。

光伏农业是在农用地上进行光伏发电,体现出光伏发电对土地资源的需求,本质上是光伏产业发展对农地的“入侵”。受光伏产业的国际环境和国内政策影响,我国的光伏农业于2011年开始发展,现已形成了世界范围内最大且类别最丰富^⑤的光伏农业市场,并已推广至我国绝大部分地区。虽然光伏农业的发展受到光伏产业的较大影响,但其仍然要以农业资源为基础。毕竟,光伏发电与农业生产“共生”之所是农用地,农业在此贡献了最重要的生产要素——土地。因此,虽然引进光伏农业的主要是用于发展光伏产业,但农业的基础地位应予以明确,并加以保护。日本就是一个很好的例子,该国的农林水产省于2013年通过了一项法律,要求光伏农业的作物产量不得低于原产量的80%^[17]。此外,从经济角度来看,农业和光伏是光伏农业不可或缺的两大组成部分^[19]。甚至,农业的经济性要更为重要。Li等通过研究表明,在包括上网电价的众多因素中,光伏农业大棚的经济效益对作物价格最为敏感^[20]。Schindele等的研究表明,如果在农光系统中种植有机土豆,该系统的价格绩效比率(price-performance ratio, ppr[®])将小于1^[3],显示出较好的经济性。但事实上,现实中有些项目打着光伏农业的幌子,骗取政府补贴,很少甚至不进行农业生产,从而造成“轻农”,甚至“弃农”现象^[21],影响了光伏农业的推广和可持续发展。当然,光伏农业既然以农业资源为基础,同样也会受限於它,各地应结合自身的农业资源来发展光伏农业。而对于整个国家而言,必然存在对光伏农业进行统筹规划的问题,这一问题又与光伏农业生态位的优化有关^[22]。虽然近几年光伏农业的集中区域较为固定,某些地区也已在某些农光模式的发展水平方面取得了领先,但随着一些未被利用农业资源的开发和技术进步,光伏农业的生态位会发生相应的改变。如贵州省2020年国家补贴光伏发电项目竞价计划共有63个项目,总装机容量为5.68 GW,其中62个项目为农光项目(包括5个林光互补项目),装机容量为5.63 GW,占总装机容量的99%^[23]。而据本文的不完全统计,2011—2019年,全国累计的农业光伏电站装机容量为14.15 GW(包括光伏治沙)。可以推断,如果这些项目顺利并网,贵州将很有可能一跃成为全国光伏农业第一大省。值得一提的是,并非所有的光伏农业都会占用农业资源,比如光伏治沙模式,该模式的应用防止了水土流失,使原本不可耕种的沙地重

新长出了绿植,吸引了牛羊群的“回归”,相当于“创造”了农业。

四、对策与建议

一直以来,人类对太阳能的利用方式都较为单一,即利用其种植可以食用的作物。而随着光伏的出现,太阳能的利用方式变得多样。另外,世界人口的持续增长和环保问题的日益突出使得人类对食物和清洁能源的需求不断增加。农业生产与光伏发电的“共生”——光伏农业可以实现一地两用,提高了资源利用效率,是一种较好的解决方式。关于如何推进和实施这一方式,我们提出如下建议。

(1)明确发展目的,做好国家层面的总体规划。应根据当地的农业资源禀赋和光伏发电市场情况,从全国层面明确光伏农业发展目标定位,确立不同地区光伏农业发展的优先序和覆盖面。鼓励各地探索适合当地发展的光伏农业发展模式,并在此基础上合理选择作物品种或养殖品种,科学制定整体设计方案,实现光伏发电和农业生产的良好协作。

(2)总结运营经验,推进新型示范项目建设。随着项目实践工作的不断推进,中国已形成全球最大的光伏农业市场,拥有最丰富的光伏农业发展模式,应及时总结项目运营经验,为后续项目运营提供指导。此外,应进一步探索光伏与种植业、畜牧业和生态旅游三产融合的光伏农业项目,打造示范引领工程,推进示范项目建设。

(3)提高社会认可,完善光伏农业商业模式。应向公众提供有关实施光伏农业项目所能产生积极作用的信息,包括能源安全、环境保护和提供就业等,提高光伏农业的社会认可度,特别是调动农民的积极性。在此基础上,还应进一步去丰富和拓展其商业模式。比如,以光伏科技农业展示为主题,引入科普、观光、旅游、休闲等元素,设置观光体验区,将光伏农业和旅游业相结合,实现商业模式的拓展。

注释:

- ① 通过对下文样本数据的搜集与汇总,得出2019年我国并网发电的农光互补累计装机容量约为13.5GW(不包含光伏治沙),而据国家能源局网站(<http://www.nea.gov.cn/>)披露,2019年我国光伏电站累计总装机容量为204.3GW,占比为6.61%。因为是不完全统计,所以此处表达为7%左右。
- ② 该文为工作论文,文题为:“An economic analysis of agrophotovoltaics: Opportunities, risks and strategies towards a more efficient land use”,网址:<http://hdl.handle.net/10419/150976>。

- ③ 表中内蒙古自治区内部的区域划分参照表1中的分法,分为东部和中西部,东部地区对应表2中的赤峰、通辽、兴安盟和呼伦贝尔。甘肃省内部划分为北部(除天祝外)、天祝、南部(除甘南外)和甘南,其中,北部地区对应表2中的嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌和金昌。新疆维吾尔自治区内部划分为东北部和大部,其中,东北部地区对应表2中的哈密、塔城、阿勒泰和克拉玛依。青海省内部划分为西北部和大部,其中,西北部地区对应表2中的海西。河北省内部的区域划分参照表1中的分法,分为北部和中南部,其中,北部地区对应表2中的承德、张家口、唐山和秦皇岛。山西省内部划分为北部和中南部,其中,北部地区对应表2中的大同、朔州、忻州和阳泉。四川省内部的区域划分参照表1中的分法,分为东部和西部。云南省内部的区域划分参照表1中的分法,分为西北部和大部。陕西省内部的区域划分参照表1中的分法,分为中北部和南,其中,北部地区对应表2中的榆林和延安。湖北省内部的区域划分参照表1中的分法,分为西部和大部。湖南省内部的区域划分参照表1中的分法,分为西部和大部。
- ④ 考虑到数据的可获得性,此处用农业光伏电站的装机容量来代替相关产值。光伏农业的产值主要分为光伏发电产值和农业产值两块,一般前者占较大比重,而前者直接和电站装机容量相关。此外,农业产值的影响因素为产量和价格,产量主要受耕地面积影响,而农业光伏电站的装机容量和所占农地面积成正比。综合以上两点,用农业光伏电站的装机容量代替光伏农业的产值具有一定的合理性。
- ⑤ 从我们搜集的文献来看,国外的农光模式仅限于光伏温室、农光互补、渔光互补和牧光互补,未涉及林光互补和光伏治沙。
- ⑥ $ppr = \frac{p}{pb}$,其中 p 是农光系统的价格, pb 是系统的绩效。该比率大于1表明系统的技术经济协同性不够高,是不尽合理的。而当该比率小于等于1时,说明农光系统具有经济合理性。

参考文献:

- [1] Dupraz C, Marrou H, Talbot G, et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36 (10): 2725 - 2732.
- [2] Weselek A, Ehmann A, Zikeli S, et al. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities [J]. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(4): 1 - 20.
- [3] Schindele S, Trommsdorff M, Schlaak A, et al. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications [J]. *Applied Energy*, 2020, 265: 114737.
- [4] Valle B, Simonneau T, Sourd F, et al. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1495 - 1507.
- [5] 陈凤,郭明明,樊继伟,等.不同小麦品种生长发育及产量对光伏板遮荫的响应[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12): 1581 - 1588.

- [6] Amaducci S, Yin X, Colauzzi, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production[J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 545–561.
- [7] 魏来, 余明艳, 覃楠楠, 等. 农光耦合系统对田间光照条件和甘薯生长的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(3): 288–295.
- [8] 王加真, 张昕昱, 金星, 等. 可用于光伏农业的反射滤光膜对贵州茶叶品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(10): 2319–2323.
- [9] Agostini A, Colauzzi M, Amaducci S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment[J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116102.
- [10] Marrou H, Dufour L, Wery J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 38–51.
- [11] Marrou H, Guilioni L, Dufour L, et al. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 117–132.
- [12] Marrou H, Wery J, Dufour L, et al. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 44: 54–66.
- [13] Goetzberger A, Zastrow A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation[J]. *International Journal of Solar Energy*, 1982, 1(1): 55–69.
- [14] Gorjian S, Sharon H, Ebadi H, et al. Recent Technical Advancements, Economics and Environmental Impacts of Floating Photovoltaic Solar Energy Conversion Systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124285.
- [15] 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.
- [16] Li C, Wang H, 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.
- [17] Irie N, Kawahara N, Esteves A M. Sector-wide social impact scoping of agrivoltaic systems: A case study in Japan[J]. *Renewable energy*, 2019, 139: 1463–1476.
- [18] 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 & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 822–834.
- [19] Poncet C, Muller M M, Brun R, et al. Photovoltaic Greenhouses, Non-Sense or a Real Opportunity for the Greenhouse Systems? [J]. *Acta horticulturae*, 2012, 927(927): 75–79.
- [20] Li C, Wang H, 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.
- [21] 郭建宇, 白婷. 产业扶贫的可持续性探讨——以光伏扶贫为例[J]. *经济纵横*, 2018(7): 109–116.
- [22] Wang L, Wang Y, Chen J. Assessment of the Ecological Niche of Photovoltaic Agriculture in China [J]. *Sustainability*, 2019, 11: 2268.
- [23] 贵州省能源局. 关于下达贵州省 2020 年国家补贴光伏发电项目竞价计划的通知[EB/OL]. (2020–05–11) [2021–02–19]. http://nyj.guizhou.gov.cn/zwgk/xgkml/zcwj_2/jnwj/pt-wj_2/202005/t20200511_60389523.html.

Analysis of Regional Distribution and Agglomeration of Photovoltaic Agriculture in China

WANG Ling-jun^{1,2}, CHEN Jian³

(1. School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Institute of Industrial Economy and Innovation Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: This study collected and sorted out the publicly disclosed information of China's photovoltaic agriculture. On this basis, the regional distribution analysis of photovoltaic agriculture was carried out using the comprehensive zoning of sustainable agricultural development and solar energy resources. Furthermore, the concentration ration index and location quotient were used to analyze the agglomeration. We have found that China's photovoltaic agriculture is mostly distributed in areas with abundant agricultural resources and good agricultural production conditions. The main conclusions are as follows: (1) China's photovoltaic agriculture is mostly concentrated in the three provinces of East China. (2) From the perspective of specific modes, the agglomeration of fishery-photovoltaic complementary is the strongest. Jiangsu has the best level of specialization in fishery-photovoltaic complementary. Zhejiang's level of specialization in agricultural-photovoltaic complementary is in the forefront of the country. Compared with the other two provinces, Anhui has certain advantages in the level of specialization of photovoltaic greenhouse. (3) At this stage, China's photovoltaic agriculture is mostly concentrated in the optimized development areas of sustainable agricultural development and is relatively fixed. However, with the development of agricultural resources, the concentrated areas will undergo certain changes. The above conclusions can provide reference for the management of photovoltaic agriculture and the formulation of relevant policies.

Key words: photovoltaic agriculture; regional distribution; agglomeration; comprehensive partition