

陈 健,王玲俊. 农光互补的研究综述及展望[J]. 江苏农业科学,2022,50(5):1-9.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.05.001

农光互补的研究综述及展望

陈 健^{1,2}, 王玲俊³

(1. 南京林业大学经济管理学院, 江苏南京 210037; 2. 南京林业大学中国特色生态文明建设与林业发展研究院, 江苏南京 210037;

3. 南京工程学院经济与管理学院, 江苏南京 211167)

摘要:搜集 2011 年以来国内外有关农光互补的文献,将其梳理为光伏种植、光伏温室和光伏养殖 3 个部分,通过对比发现,光伏种植的研究开始较早,且受到较多关注,其次是光伏温室,再次是光伏养殖;光伏种植与光伏温室的研究内容较相似,主要涉及作物生产和光伏发电的平衡、两者之间的协同以及农光系统的优化;目前在光伏养殖方面的项目实践并不少,但这方面的研究较缺乏。未来应从以下几个方面加以完善:加强各学科之间的协作,进行跨学科研究;从全局视角对一个国家或地区的农光互补进行统筹安排,并作出相应的经济、社会、环境效应评价;增加光伏养殖方面的研究,重点关注光照减少对所养殖生物的生长及生态环境的影响。

关键词:农光互补;光伏种植;光伏温室;光伏养殖

中图分类号:S214.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)05-0001-09

大力发展可再生能源,有效应对气候变化,促进能源清洁低碳转型已成为全球广泛共识^[1]。在此背景下,光伏系统的应用被认为潜力巨大,其在光捕获方面的效率甚至超过了光合作用^[2]。将光伏系统安装在露天区域可使成本降至最低,这也导致一些光伏电站建在农用地上,从而引发能源生产和粮食生产之间的“争地”矛盾。因此,发展农光互补成为一种解决方式。农光互补也被称为农光一体化,它是指在同一块土地上既进行光伏发电又进行农业生产,实现一地两用,并强调光伏发电与农业生产的相互影响、竞合关系以及耦合共生。农光互补源于 Goetzberger 等在 1982 年提出的太阳能转化和作物种植共存(coexistence)的想法^[3],直到 2011 年才开始在全球范围内陆续开展项目实践^[4],发展至今已具有一定规模。Schindele 等指出,2017 年以来日本、法国、美国马萨诸塞州、韩国和中国政府在农光互补的应用和推广方面引入了相关政策^[5],这些国家的农光互补市场已经领先于其他地区,其中中国的规模最大,同时其他国家也正在跟进中。德国 Fraunhofer 光伏系统部门开展了多个农光项目,其中位于 Heggelbach 农场的项目表明,在

农地上方 5 m 高处安装太阳能电池板后,土地利用效率能提高近 2 倍。印度新能源和可再生能源部申明,到 2022 年在农业领域建立近 26 GW 太阳能发电能力,这对于印度这样的农业大国而言意义非凡^[6]。Schindele 等认为,目前全世界的农光项目数已超过 2 200 个^[5],这些项目的装机容量在整个光伏装机容量中占有一定比例。据统计,截至 2019 年年底,中国并网发电的农光项目装机容量在光伏装机容量中的占比约为 7% (数据搜集于中国储能网 <http://www.escn.com.cn/>,并进行了整理)。鉴于农光互补在全球范围内的发展现状和潜力,灵位结合近 10 年来学者对该领域进行的初步研究,因此有必要对这些研究进行梳理和总结,以便为今后的研究指明方向,从而促进农光互补在全球范围内更好地发展。本文对光伏种植、光伏温室和光伏养殖 3 个方面的研究进行全面综述,将这 3 个方面的研究成果进行对比,分析相互之间的联系、区别,揭示现有研究的不足,指出未来的研究应从哪些方面进行完善。

1 光伏种植

1.1 作物种植与光伏发电的平衡

1982 年,德国 Fraunhofer 太阳能系统研究所(ISE)的 Goetzberger 等提出太阳能转化和作物种植共存(coexistence)的想法,而在此之前,用于太阳能转化的土地被认为无法作为他用。这里的共存特

收稿日期:2021-07-02

基金项目:江苏省社会科学基金(编号:20GLD010);南京工程学院高层次人才引进人才科研启动基金(编号:YKJ202024)。

作者简介:陈 健(1985—),男,江苏江阴人,博士研究生,讲师,从事产业经济与管理、光伏农业等研究。E-mail:c.j1125@163.com。

指对太阳能发电装置进行改造,使土地能同时用于作物种植。具体做法是将太阳能集热器提高到地面上方 2 m,并增加它们之间的间距,以避免对作物造成过度遮挡。其认为这些光伏系统仅占用了 1/3 的土地和光照资源,且进一步改进技术可以提高其在作物生产中的适用性^[3]。

1.1.1 光伏设施对作物种植的影响 大约过了 30 年,法国国家农业科学研究院 (INRA) 的 Dupraz 等结合上述想法首次提出“agrivoltaic”的概念。该研究团队在法国蒙彼利埃附近建立了第 1 个光伏农场,并在农场中的 4 个相邻地块种植同一种作物,其中 2 个在全日照(作为对照)下,另外 2 个分别在标准密度和半密度的光伏阵列下。研究结果表明,虽然光伏板的架设遮挡了作物生产所需的阳光,从而降低了作物产量,但光伏板遮阴减少了蒸腾作用,并可能提高水利用效率(water use efficiency, WUE),关键是要在光伏电力生产和作物生产之间找到平衡。此外,他们提出用土地当量比(land equivalent ratio, LER)测量农光系统的效率, $LER = Y_{cropinAV}/Y_{monocrop} + Y_{electricityAV}/Y_{electricityPV}$ 。其中: $Y_{cropinAV}$ 表示农光系统中作物的产出; $Y_{monocrop}$ 表示单独将土地用于耕种作物的产出; $Y_{electricityAV}$ 表示农光系统中光伏的产出; $Y_{electricityPV}$ 表示单独将土地用于光伏发电的产出。结果显示,该系统的应用可使土地产出增加 35% ~ 73%,即 LER 位于 1.35 ~ 1.73,进而体现出该系统的高效^[7]。之后,同为法国国家农科院的 Marrou 沿着 Dupraz 的思路在该领域进行更加深入细致的研究。他们首先以生菜为对象探讨其在光伏板局部遮阴(50% 和 70% 的入射辐射量)下的产量和辐射利用效率(radiation use efficiency, RUE),结果发现单位可用辐射量的生菜产量并未减少,甚至有所提高。主要由于类似生菜这类植物可以适应农光系统的环境,它会以更强的光捕获能力来部分或全部弥补可用光照的减少。生菜主要通过扩大叶片总面积的方式来增强光捕获的能力,同时总叶片数量有所下降,说明生菜叶片在该过程中发生了形态上的改变,导致叶片分布与原来不同。可见,农光系统可以通过选择合适的作物品种和光伏板的特别布置进行优化,从而找到食品生产和电力生产的最佳协作方式^[8]。随后,Marrou 等扩大了试验对象,继续以生菜、黄瓜和硬质小麦为对象,探究农光系统下的小气候环境,并评估作物生长率(crop growth rate)是否受光伏板遮阴的影响。

结果表明,遮阴下的日均作物温度和作物生长率并没有显著变化;由于土地温度的变化,作物的叶片排放率(leaf emission rate)有显著改变,但仅仅发生在生菜和黄瓜生长的幼年期。结果显示,小型农光系统与封闭的温室系统不同,应将其作为露天生产系统来看待。因为在农光系统中,除了作物的日均可用光照有所减少,其他作物冠层的小气候参数与露天生产系统并没有显著差异。所以,应更多关注农光系统中作物的光照减少问题,而不是从露天生产系统到农光系统的转换问题^[9]。Marrou 等进一步对太阳能电池板的遮阴如何影响土壤-作物系统中的水流进行分析,通过计算农光系统中生菜和黄瓜生长过程中水分的实际蒸散(actual evapotranspiration, AET),发现光伏板遮盖下作物的水分蒸散量减少了 14% ~ 29%,具体程度要视遮阴程度和作物生长情况而定。原因主要在于光伏板遮阴下作物生长气候需求(climate demand)的减少,而水利用效率并未有所提高。该研究结果表明,通过选择土壤覆盖迅速的作物品种,可以提高农光系统的水利用效率,这有助于增强光捕获能力,并减少土壤中水分的蒸发,从而为植物蒸腾和生物生长留下更多的水^[10]。

1.1.2 作物种植与光伏发电的平衡方法 Dupraz 等的研究是开创性的,他们提出农光互补的概念,并对农光系统中作物的生长进行全面研究,得出了很多结论,为后续研究和农光系统的应用提供了理论基础。从他们的研究结论可以得知,农业种植与光伏发电的耦合可以是有效率的,但需要对其进行优化,即在农业生产和光伏发电之间进行平衡,形成两者之间较好的协作关系。该关系的形成可以从 2 个方面着手,一是作物选择,二是光伏设施的调整。对于前者而言,Beck 等认为,在光伏板下种植的作物必须为耐阴作物^[11];对于后者而言,Harinarayana 等通过模型研究发现,光伏板距离耕地 5 m 高,并保持光伏阵列的间距为 7.6 m 或 11.4 m,且将光伏板按棋盘样式排列,这种情况下耕地的光照减少较小,从而不影响作物生长。且由于阳光中含有有害的紫外线 A 和 B,预计中午时分阳光的减少可以帮助植物生长,进而提高产量^[12]。Hassanpour 等对位于俄勒冈州立大学校园内 1 个约为 2.42 hm² 光伏农场 2015 年 5—8 月的微气候和土壤湿度进行测量,发现光伏板下各区域生物量生产和土壤水分含量具有极大差异,造成该结果的原

因是光伏阵列产生的阴影具有异质性。他们建议未来的农光系统设计应通过优化光伏电池板的摆放来消除这一异质性^[13]。此外,Valle 等提出应用移动光伏板来提高土地总产量^[14],即太阳跟踪系统^[15]。类似地,Elamri 等建议使用动态的农光装置,他们认为该装置易于增加生产的空间均匀性,并认为该装置应从组件尺寸、控制策略和灌溉优化方面进行多重改进^[16]。Liu 等则提出半透明光伏板,该光伏板只透射作物生长所需要的光,以此来提高农光系统的效率^[17]。

近年来,我国学者也对农业种植与光伏发电的耦合模式进行相关研究。魏来等将上述模式称为农光耦合系统^[18],将其定义为在光伏电站建设过程中,利用所架设光伏板下方的空间进行农作物种植所形成的一种复合系统^[19]。与国外相似,我国也在一些地区开展了田间试验,研究光伏板遮阴对作物生长的影响。基于 2015—2016 年在江苏省连云港市生态光伏区进行的试验,陈凤等研究了光伏板遮阴对连麦 2 号、连麦 6 号、连麦 7 号、连麦 8 号、淮麦 33、淮麦 39、徐麦 30、徐麦 33、徐麦 35、保麦 2 号、保麦 5 号、保麦 6 号等 12 个小麦生长发育及产量的影响,发现连麦 7 号、连麦 8 号和徐麦 33 的产量高于其他品种,更能适应弱光条件^[20]。单成钢等分析光伏发电与丹参种植耦合模式下的光照变化及丹参生长情况,试验地点为山东沂南,丹参种植时间为 2017 年 3 月。结果表明,当日照时数能达到 720 h (无遮阴下的 70%) 以上时,对丹参生长不具有显著影响^[21]。王加真等通过在光伏发电过程中引入滤光膜技术,对茶叶种植和光伏发电的耦合模式进行改进,并于 2018 年 4—8 月在贵州省遵义市的茶园内进行试验。结果显示,滤光膜可将入射茶园的阳光进行光谱分离,在阻挡紫外线和红外线的同时将茶叶生长需要的红蓝光透过,可以提高茶叶品质^[22]。基于浙江大学紫金港校区为期 1 年多的田间试验,魏来等对农光耦合系统中甘薯的生长发育情况进行分析,发现光伏板的架设对甘薯生长有一定的影响,但该不利影响可通过农作技术加以改进,此外,其认为农光耦合系统的应用可以提高单位土地面积的经济效益,该系统有较好的推广前景^[18]。张加强等分析农光耦合系统中油用牡丹产量的性状影响因素,发现该系统中对产量有显著正效应的 3 个因素为冠幅、结实率和单株种子,该结论为农光耦合模式下油用牡丹的选育和栽培提供了

理论依据^[23]。综上可知,我国学者所得出的结论基本与国外研究结果一致,即农光耦合系统对作物生长有一定影响,但可以通过作物选择和技术改进加以优化。

1.2 光伏种植的相关效应

同时,学者对农光系统的应用前景作出乐观预估。Harinarayana 等认为,农光互补可在印度乃至全世界得以顺利实施^[12]。在德国,由于这种对土地双重利用的方式不会减少作物种植面积,人们会乐于接受它^[24]。而在美国的凤凰城都市统计区,上述想法的实施既可以满足社会对清洁电力的需求,同时也可以起到保护周围农业生产用地的作用,因此可考虑在该地区引进此类项目^[25]。Dinesh 等开发了光伏生产和农业生产的耦合模型,用以评估农光互补的技术潜力。结果表明,只需将美国生菜种植转换为农光互补方式,就可增加 40 ~ 70 GW 的光伏发电能力,说明农光系统有巨大的应用潜力^[26]。

1.2.1 经济效益

随着农光技术的不断发展,关系到其能否大规模推广的经济因素逐渐受到学者的关注。事实上,上述农光系统的优化就是在给定经济背景下,进行食品生产和能源生产的权衡^[8]。Dinesh 等将生菜种植和光伏发电的耦合模式(分为半密度光伏板和全密度光伏板)与单一模式(单独的生菜种植)的经济价值进行对比,发现全密度光伏板农光模式的年总经济价值最高,为 272 138 美元/hm²;而单一模式为 209 000 美元/hm²,前者比后者高 30%^[26]。Malu 等通过测算发现,印度葡萄农场在应用农光技术后,其每年额外的发电收入为 51 362 美元/hm²,约为葡萄销售收入(3 511 美元/hm²)的 15 倍。进而从光伏系统支出成本视角对农光项目的投资回收期和投资回报率进行敏感性分析,发现当光伏系统的支出成本从 2 美元/W 降至 0.25 美元/W 时,项目投资回收期会从 15.2 年降至 1.9 年,其投资回报率会从 4% 提高至 50%^[27]。即随着技术进步和成本下降,农光系统将会体现出更好的经济性。Valle 等对比阳光定期跟踪(regular tracking)和受控跟踪(controlled tracking)2 种光伏面板移动模式下农光项目的总产量,发现如果种植高附加值农作物,受控模式可以体现出真正的经济收益^[14]。Schindele 等对农光互补的应用进行技术经济分析,不同于以往的研究,他们以价格绩效比率(price - performance ratio, ppr)来衡量农光系统的经济性。
$$ppr = \frac{P}{P_b}$$
其

中: P 表示农光系统的价格; b 表示农光系统的绩效。该比率大于 1, 表明农光系统的技术经济协同性不够高, 是不尽合理的; 而当该比率 ≤ 1 时, 说明农光系统具有经济合理性。具体而言, 该研究对德国境内的一个农光项目进行案例分析, 并测算在农光系统中耕种有机土豆和冬小麦 2 种情况下的 ppr, 结果分别为 0.85、4.62。总体而言, Schindele 等不建议在作物轮作系统中采用农光互补方式, 该技术应与永久性有机种植的经济作物结合使用, 如浆果、水果、草药、坚果、药用植物、啤酒花和酿酒葡萄等^[6]。Agostini 等对农光系统进行经济评价, 发现具有拉伸结构的单轴太阳跟踪、双轴太阳跟踪农光系统的度电成本 (levelized cost of electricity, LCOE) 分别为 89.5、88.9 欧元/(MW·h), 略高于地面光伏系统、屋顶光伏系统的度电成本, 分别为 84.7、75.4 欧元/(MW·h)。进而他们测算双轴太阳跟踪农光系统、地面光伏系统和屋顶光伏系统的净现值、内含报酬率和投资回收期。净现值结果显示 3 类项目都是经济可行的, 内含报酬率分别为 13%、14%、17%, 投资回收期分别为 9、8、6 年^[28]。总的而言, 农光系统的应用会增加单位面积农地的产出, 给农民带来更多的经济价值。但如果与地面光伏系统和屋顶光伏系统相比, 由于农光系统的发电成本更高, 其经济性要略差。

1.2.2 环境影响 除了经济方面, 农光系统的环境影响也是学者颇为关注的。相较于传统的光伏发电, 农光系统的全球变暖潜能值 (global warming potential, GWP) 略高, 但对比该系统在土地利用方面的优势, 该差距并不明显。Agostini 等对农光系统进行更加全面的环境评价, 内容涉及气候变化 (温室气体排放)、酸化、富营养化、呼吸性无机物产生、光化学臭氧形成和资源利用等。通过与其他同样功能的技术 (屋顶光伏、地面光伏、风能、煤电、天然气、玉米沼气、高粱沼气等) 相比较, 发现除风能发电外, 农光系统的温室气体排放量最少。而在资源利用方面, 农光系统对矿物和金属的消耗少于屋顶光伏和地面光伏, 但多于其他各种发电形式。除上述 2 个方面外, 其他方面的对比情况与温室气体排放基本一致, 即高于风能, 低于其他形式^[28]。说明农光系统具有较好的环境效应。

1.2.3 社会影响 此外, 社会影响也逐渐受到学者的重视。众所周知, 农光技术的应用可以保障食品和能源安全^[10], 但其社会接受程度仍有待进一步提

高。从目前的研究结果来看, 农光技术在各地有着不同的社会影响。在欧洲, 民众认为农光项目的建设会破坏环境景观^[29]。Irie 等对农光系统进行全行业社会影响范围 (sector-wide social impact scoping, SSIS) 调查, 对象包括光伏农场经营者、农场员工和附近居民。结果显示, 虽然很多农场经营者预计农光系统的安装总体上会产生一些负面影响, 但在考虑对全球和后代的影响后, 农光系统通常能被人们接受, 且是广泛接受^[30]。由此可以预见, 农光系统未来将会有较好的社会认可度。

2 光伏温室

Poncet 等指出, 光伏板可以集成至受控环境农业 (controlled environment agriculture, CEA) 中, 并认为农业温室与光伏发电的结合具有协同效应: 光伏发电满足了农业温室的能源需求, 从而缩短了温室项目的投资回收期。同时, 应从整体上去评估光伏温室 (photovoltaic greenhouse, PVG) 这类创新系统的社会经济和环境可接受性, 并关注光伏发电和农业温室生产之间的平衡, 以及从经济上意识到两者是光伏温室的基本组成部分。此外, 光伏温室的发展需要进行跨学科的研究开发, 包括温室设计的优化、光伏系统对作物有用波长的透射以及选择适应光伏发电环境的作物等^[31]。

2.1 温室农业生产与光伏发电的平衡

Kadowaki 等分析 2 种类型光伏阵列 [光伏覆盖率 (PV cover ratio, 指光伏板覆盖温室大棚面积的百分比) 为 12.9%] 的几何排列对温室中大葱生长的影响, 发现选择最佳倾斜角度的直线排列对光伏发电最有利。但是, 直线排列光伏阵列遮挡了温室中某些位置 50% 以上的光量子通量密度 (PPFD), 阻碍了植物生长。而当光伏阵列样式为棋盘时, 植物生长可得到改善。可见, 光伏阵列的几何排列极大地影响了光伏板下植物的生长^[32]。Cossu 等对朝南光伏温室内的太阳辐射分布及其对作物产量的影响进行试验, 发现温室效应由于有限的太阳辐射而减弱, 导致在 1 年中最冷月份的平均温度低于最低阈值, 限制了果实的生长和成熟。说明当 50% 的温室棚顶面积受到光伏板遮挡时, 温室内太阳能辐射年均减少量为 64%, 而在光伏板覆盖区域为 82%, 其他区域为 46%。所以, 应避免对温室栽培进行高度且持续的光照遮挡^[33]。正是由于上述问题的存在, 很多学者提出在温室农业生产和光伏发电之间

进行平衡的方案,即对光伏温室进行优化。欧浪情等设计了一种由聚光光伏发电系统和农业大棚两部分组成的光伏农业系统,通过将滤光膜贴在系统聚光器上,并与无滤光膜的情况进行对比,分析滤光膜对植物生长的影响,发现有滤光膜情况下植物生长的绝大多数形态指标优于无滤光膜情况下的植物生长,将滤光膜应用到光伏温室可实现作物增收和作物品质改善^[34]。为了确定光伏温室的主要设计参数(光伏覆盖率、温室高度和方向、光伏阵列样式)与温室内可用太阳辐射之间的一般关系,以便为设计具有农业可持续性的新一代光伏温室系统提供参考,Cossu 等对比分析欧洲较具代表性的 4 种商业光伏温室的总辐射量,发现光伏覆盖率每提高 1%,年总辐射量减少 0.8%;与东西向温室相比,南北向温室的平均累积总辐射量增加 24%;光伏板的棋盘样式排列和南北向平行排列都能提高温室内光分布的均匀性,这 2 种排列方式可作为下一代光伏温室的设计标准^[35]。Cossu 等估算上述 4 种光伏温室中 14 种作物的产量,用以确定适合作物种植的光伏温室类型。基于日累积光量(daily light integral, DLI),该研究对比光伏温室内部的光照情景与作物的光照需求,并估算作物的潜在产量,发现光伏覆盖率为 25% 的温室适用于包括高光照需求作物(西红柿、黄瓜、甜椒)在内的所有品种(该研究考虑的 14 种作物),该类温室中作物的减产程度有限(低于 25%),甚至可以忽略不计。而诸如芦笋一类最佳 DLI 低于 $17 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的中光照需求作物和低光照需求作物可在光伏温室中种植,其光伏覆盖率高达 60%。只有 DLI 低于 $10 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的低光照需求花艺品种如一品红、长寿菜和龙血树,才能在光伏覆盖率为 100% 的温室中种植^[36]。祁娟霞等对比光伏日光温室、光伏双膜双网大棚和光伏阴阳棚(分为阳棚和阴棚 2 种)内部的环境差异,发现光伏日光温室和光伏阴阳棚阳棚适宜果菜越冬生产,光伏双膜双网大棚冬季温度较低,不适宜种植食用菌,而光伏阴阳棚阴棚则可用于食用菌种植^[37]。此外,Allardyce 等针对传统不透明光伏板提出半透明光伏板,将其应用至光伏温室系统中可提高作物产量^[38]。Gao 等提出采用动态光伏温室将可持续的能源生产与植物栽培融为一体,通过调节太阳跟踪角度,可提供更多的能源生产和微气候控制的可能性^[39-40]。

2.2 光伏温室的经济社会效益

中国是发展光伏温室较早的国家之一,其总装

机容量在 2014 年年底就已达到 612 MW ^[41]。据统计,2019 年年底我国已并网发电光伏温室项目的累计装机容量已达 $3\,984 \text{ MW}$ [数据搜集于中国储能网 <http://www.es.cn.com.cn/>,并进行整理]。Wang 等在回顾中国现代温室和太阳能产业发展概况的基础上,提出温室系统与光伏发电的整合方案,进而介绍中国各地已实施的光伏温室工程项目,并以新疆维吾尔自治区的光伏温室项目为例,对其进行经济效益分析,发现项目的投资回收期为 8.7 年,如果考虑光伏系统的价格下降,投资回收期可进一步缩短。此外,该研究揭示了中国光伏温室系统中存在的问题,主要包括缺少产业标准、补贴困境和技术障碍。最后指出发展先进的光伏技术可以更好地蓄热,并实现光伏发电和光利用的平衡,从而促进现代光伏温室系统的进一步发展^[42]。同样是基于国内情况,Li 等对 5 种不同类型的光伏农业温室系统进行经济效益和社会效益分析,发现它们的年投资回报率为 9% ~ 20%,投资回收期为 4 ~ 8 年,且这些系统的应用能带来巨大的社会效益,如提供就业、增加税收、减排二氧化碳。此外,通过进一步的敏感性分析发现,在包括上网电价的众多因素中,光伏温室系统的经济效益对作物价格最敏感。光伏农业公司应重点关注作物种植,而政策制定者应将激励从光伏电力生产转向作物生产^[43]。

3 光伏养殖

3.1 渔光互补及其相关效应

除农业种植和农业温室外,农业养殖(渔业养殖、畜牧养殖)也可与光伏发电进行耦合。Pringle 等指出,漂浮光伏(floating photovoltaic, FV)系统一旦与渔业养殖结合,就可形成农光系统,他们将这一特殊的农光系统称为“aquavoltaic”^[44]。通过使用合适的技术使光伏板漂浮在水体上,该类安装技术被称为漂浮光伏^[45]。世界上首座漂浮光伏电站出现于 2007 年的日本爱知县,其装机容量仅为 20 kW 。随后很多国家加入到建造漂浮光伏电站的行列,截至 2018 年,全球漂浮光伏项目超过 300 个,电站装机容量达到 $1\,314 \text{ MW}$ 。其中,中国是漂浮光伏市场最大的国家,占总装机容量的 75%。漂浮光伏与渔业养殖的结合具有潜在的协同效应,如节水、可控的水生环境和生态系统恢复。但是两者之间也存在一些潜在的不利因素,如生态影响和生物污染。由于该领域仍处于起步阶段,光伏组件对鱼

类生长及其产量的影响仍有待进一步研究^[44]。我国渔业养殖与光伏发电的耦合被称为“渔光互补”，但并不局限于漂浮光伏与渔业养殖的结合。赵轶洁等认为，渔光互补是在养殖水面上架设光伏板，从而形成“上可发电、下可养鱼”的创新模式，渔光互补是新兴产业与现代农业的完美结合，再加上休闲农业的开发，可形成一、二、三产业的叠加，充分提高土地的利用效率^[46]。由于渔光互补模式下的光伏组件所处的是一个水上环境，与地面光伏和屋顶光伏等模式所处的环境不同，有学者对渔光互补电站发电性能的相关影响因素如放置方式^[47]、太阳辐射^[48]等进行研究。如果仅从光伏发电单方面来考虑，渔光互补发电的度电成本高于地面光伏^[45]。但渔光互补还包括水产养殖部分，尤其是养殖一些附加值较高的喜阴鱼类，可大大提高项目的经济效益^[33]。渔光互补还具有较好的环境效应，如在富营养化的情况下减少藻类生长，产生无 CO₂ 排放的清洁电能，通过防止蒸发来节省水资源。且由于在水体上安装了光伏板，减少了清洁光伏模块用水^[49]，也为农业、采矿、旅游和其他活动节省了宝贵的土地。此外，与地面安装的光伏系统相比，减少了鸟类与板的碰撞^[50]，并可改善水库水质^[51]。而其社会方面的效应跟农业种植与光伏发电耦合模式相似，包括节能环保、加快能源电力结构调整、带动就业以及促进经济发展^[52]。

3.2 牧光互补及其相关效应

畜牧养殖与光伏发电的耦合在我国被称为“牧光互补”^[53]，该模式可以通过在养殖棚顶铺设光伏板来实现，也可以通过直接将光伏设施作为养殖动物的围挡来实现。Lytle 等认为兔子养殖和光伏发电耦合共生模式具有多种协同作用：第一，减少太阳能农场的运维成本，约占太阳能收入的 1.4% ~ 7.9%；第二，源于兔子销售或土地租金的经济收益增加，约占太阳能收入的 1.0% ~ 17.1%；第三，通过将现有的光伏设施（光伏板和支架）作为围栏，为兔子养殖节省成本（高强度兔子养殖的最大成本），并保护兔子免受空中掠食者的侵害以及过多的阳光照射。此外，此类项目的开发会增加农光互补的社会支持，并扩大美国对兔肉的市场需求^[54]。

4 总结与展望

4.1 研究总结

综上所述，农光互补有两方面的含义，即狭义

的农光互补特指光伏种植，广义的农光互补则包括光伏温室和光伏养殖。国外所提的“agrivoltaic”也有狭义和广义之分，狭义的“agrivoltaic”是指光伏种植，就广义而言，photovoltaic greenhouse 和“aquavoltaic”都是其特殊形式。由此看来，我国的农光互补和国外的“agrivoltaic”具有相同的内涵。现有研究表明，农光互补的真正价值在于它可以同时生产食物和能源，为农民带来经济利益，并具有潜在的协同效应。这对人口稠密的工业国家是具有吸引力的，因为这些国家的可再生能源扩张变得越来越重要，但同时需要保护生产性农田。农光互补不可避免地会导致小气候条件的改变，特别是太阳辐射的减少以及水平衡的变化。由于辐射是影响作物生长的最重要因素之一，因此在光伏阵列下进行耕作极有可能导致农业产量下降。但在干旱年份，光伏板下的小气候变化有助于产量稳定，可以补偿季节性气候和作物产量的波动。且随着气候条件的预期变化，这一点在将来可能变得更加重要。此外，对于一些耐阴作物，农光互补的应用可能是有益的；在炎热、干旱的气候条件下，农光互补可以增加节水量并保护作物免受高温和过度辐射的不利影响。

正如 Weselek 等所指出的那样，农光互补仍处于早期发展阶段，其技术进步和应用领域的拓展具有很大空间^[4]。相应地，农光互补自 2011 年提出以来，对其进行研究的时间仅 10 年，同样处于早期阶段，未来需要更多的研究结合不同气候条件和作物品种，评估其在现代农业系统中的适用性。尽管如此，通过对这些研究进行梳理仍有以下几点收获：第一，从研究开始的时间来看，就本研究所搜集的文献，光伏种植方面的研究开始较早（2011 年），其次是光伏温室的研究（2012 年），较晚的是光伏养殖的研究（2015 年）。值得一提的是，法国国家农业科学研究院的研究团队在光伏种植、光伏温室这 2 个方面率先进行了研究，最先提出了农光互补的概念，并最早发表了相关研究成果，为该领域作出了突出贡献。而我国则是进行光伏养殖（渔光互补）研究较早的国家，这跟我国在这方面的项目实践有关（表 1）。第二，从研究数量来看，本研究所搜集的文献中光伏种植方面的研究最多（27 篇），其次是光伏温室（13 篇），最后是光伏养殖（10 篇），这与研究开始的时间有一定的关系。此外，对本研究所搜集的文献中第一作者单位所在国统计可知，发文数量

较多的国家有中国、美国、法国、日本、德国和意大利,这些基本都是农光互补应用较多的国家。而就科研机构的发文数量来看,法国国家农业科学院和德国 Fraunhofer 太阳能系统研究所最多。这两大机构分别从农业和能源角度对农光互补进行研究,也充分说明了该领域的跨学科性^[31]。第三,从研究类型来看,由于尚处于早期阶段,3 个方面的研究多为试验研究和项目案例研究,尤以前者居多。如法国学者 Dupraz 等的研究^[7,8-10]、我国学者魏来等的研究^[18-23]以及意大利学者 Cossu 对光伏温室的研究^[33,35-36]都为试验研究。而项目案例研究多涉及农光互补的经济社会效应,如我国学者 Li 等对光伏温室经济社会效应的分析^[43],以及日本学者对农光系统社会影响的分析^[30]。第四,从研究内容来看,由于涉及农业生产和光伏发电的耦合,所以两者之间的平衡以及协同是 3 个方面研究的共同话题,此外,农光系统的经济、社会、环境效应也是共性话题。而从更具体的研究内容来看,光伏种植和光伏温室更加相似。由于两者都涉及作物生产,前述耦合就演变为光合作用与光伏效应的平衡,所以这 2 个方面最初的研究都针对太阳辐射^[7,32],进而包括光伏板遮阴下的小气候环境等^[11,37]。而两者进行系统优化的方式也颇为相似,都包括作物选择^[8,31]、动态的农光系统^[16,39-40]以及半透明光伏板^[17,38]的应用。此外,就研究内容的趋势而言,随着农光项目实践的增加,其经济、社会和环境效应越来越受到学者的关注。如 Schindele 等农光互补进行技术经济分析,并提出相关政策建议^[6],以及 Agostini 等对农光系统进行经济和环境评价^[28],未来的研究将更多地围绕这些方面展开。

4.2 研究展望

农光互补的研究虽然才进行了短短 10 年,但其已经经历了从实验室到试点项目,再到商业项目的过程。2014 年以来全球已建成超过 2 200 个农光项目,累计装机容量在 2020 年 1 月达到了 2.8 GW^[5]。但据统计,我国农光项目的装机容量早已超过这一数字(表 1)。根据在中国储能网光伏农业板块搜集的信息,我国 2011—2019 并网发电的农光项目共 274 个(表 1),总装机容量约为 13.5 GW[数据搜集于中国储能网 <http://www.escn.com.cn/>,并进行了整理],远远超出 Schindele 等的估计^[5],且这仅是不完全统计。可见由于缺乏农光互补规模的官方统计信息,学界对农光互补的具体实施情况缺乏了

解,而这会导致无法制定适当的管理计划,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^[35]。总体而言,目前尚缺乏对一个国家或一个地区农光互补的总体情况研究。而对一国而言,农光互补在光伏发电中的占比及其在农业中的占比需要进行合理规划^[6]。因为农光互补本质上是一种土地利用的新型方式,如何实现社会福利最大化是这方面研究值得关注的事。

表 1 中国 2011—2019 并网发电的农光项目数量

年份	农光项目数量(个)			
	光伏种植	光伏温室	光伏养殖	合计
2011	0	1	1	2
2012	0	0	0	0
2013	1	7	5	13
2014	0	8	5	13
2015	8	16	11	35
2016	28	23	27	78
2017	32	17	43	92
2018	13	3	11	27
2019	10	0	4	14
合计	92	75	107	274

综上分析,对于该领域未来的研究提出以下几点建议:第一,要进一步加强各学科之间的协作,进行跨学科研究。2015 年德国联邦教育与研究部(BMBF)设立了一个农光互补的研究项目,该项目包括技术开发、环境与生物多样性、社会、农业、政治和经济分析等 5 个重点内容^[6]。孙耀杰也在一项名为“现代农业与光伏发电互补耦合机理研究与工程优化关键技术”的科技成果简介中有相关论述,即农光互补涉及农业园艺学、产业经济学、新一代信息技术和绿色节能建筑等多个科学领域^[55]。可见,除了农业和光伏技术,农光互补的实施还需要考虑经济社会和环境方面的影响。第二,除了进行具体的试验研究和项目案例研究,要从更大、更全局的视角,且是分区域、不同气候条件去研究如何在一个国家或地区对农光互补进行统筹安排,并对这些安排在经济、社会、环境方面的效应作出评价,进而提出相关的政策建议。第三,目前的研究在光伏种植和光伏温室方面已经取得了初步进展,但在光伏养殖方面较欠缺。而事实上,光伏养殖的项目实践并不少见,尤其是在我国(表 1),以本研究搜集的数据来看,光伏养殖(主要是渔光互补)项目

最多。但太阳辐射的减少对鱼类生长、水下环境甚至是整个生态系统有何影响,目前的研究并未有太多涉及。

农光互补可能是未来农业系统的重要组成部分,它能应对当前和未来的一些重大社会和环境挑战,如气候变化、全球能源需求、粮食安全和土地使用等。因此,应加强农光互补所涉及的各个学科之间的协作,对每一具体类型的农光互补模式进行试验和项目案例研究,并以此为基础对农光互补的实施做出统筹安排,让其发挥最佳的经济、社会和环境效应,进而实现可持续发展。

参考文献:

- [1] Fernandes L, Ferreira P. Renewable energy scenarios in the Portuguese electricity system[J]. *Energy*, 2014, 69: 51 – 57.
- [2] Blankenship R E, Tiede D M, Barber J, et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement[J]. *Science*, 2011, 332 (6031): 805 – 809.
- [3] 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.
- [4] Weselek A, Ehmann A, Zikeli S, et al. Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities; a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(4): 1 – 20.
- [5] 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.
- [6] 中国储能网新闻中心. 农光互补: 相得益彰还是两败俱伤? [EB/OL]. (2020 – 9 – 14) [2021 – 07 – 02]. <http://www.escn.com.cn/news/show-1096924.html>.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Beck M, Bopp G, Goetzberger A, et al. Combining PV and food crops to agrophotovoltaic? Optimization of orientation and harvest [C] // 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Frankfurt, 2012: 4096 – 4100.
- [12] Harinarayana T, Vasavi K S V. Solar energy generation using agriculture cultivated lands[J]. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, 5(2): 31 – 42.
- [13] Hassanpour A E, Selker J S, Higgins C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water – use efficiency[J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0203256.
- [14] 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.
- [15] Amaducci S, Yin X Y, Colauzzi M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production[J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 545 – 561.
- [16] Elamri Y, Cheviron B, Lopez J M, et al. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 440 – 453.
- [17] Liu W, Liu L Q, Guan C G, et al. A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation[J]. *Solar Energy*, 2018, 162: 84 – 94.
- [18] 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.
- [19] 魏 来. 农光互补系统中甘薯生长发育特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [20] 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.
- [21] 单成钢, 王宪昌, 张教洪, 等. 光伏 – 丹参生产模式下的光照变化及其对丹参生长的影响[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(10): 73 – 79.
- [22] 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.
- [23] 张加强, 朱开元, 谭 晨, 等. “农光互补”下油用牡丹单株产量性状的相关性及回归分析[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(5): 982 – 985.
- [24] Rösch C. Agrophotovoltaik – die energiewende in der landwirtschaft [J]. *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society*, 2016, 25(4): 242 – 246.
- [25] Majumdar D, Pasqualetti M J. Dual use of agricultural land: Introducing ‘agrivoltaics’ in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 170: 150 – 168.
- [26] Dinesh H, Pearce J M. The potential of agrivoltaic systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 299 – 308.
- [27] Malu P R, Sharma U S, Pearce J M. Agrivoltaic potential on grape farms in India[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2017, 23: 104 – 110.
- [28] Agostini A, Colauzzi M, Amaducci S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment[J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116102.
- [29] Ketzner D, Schlyter P, Weinberger N, et al. Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system

- technology—A system dynamics analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110864.
- [30] 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.
- [31] 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): 75 – 79.
- [32] Kadowaki M, Yano A, Ishizu F, et al. Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth [J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 290 – 297.
- [33] Cossu M, Murgia L, Ledda L, et al. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south – oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity [J]. Applied Energy, 2014, 133: 89 – 100.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Cossu M, Yano A, Solinas S, et al. Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses [J]. European Journal of Agronomy, 2020, 118: 126074.
- [37] 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.
- [38] Allardyce C S, Fankhauser C, Zakeeruddin S M, et al. The influence of greenhouse – integrated photovoltaics on crop production [J]. Solar Energy, 2017, 155: 517 – 522.
- [39] Gao Y A, Dong J F, Isabella O, et al. Modeling and analyses of energy performances of photovoltaic greenhouses with Sun – tracking functionality [J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 424 – 442.
- [40] Moretti S, Marucci A. A photovoltaic greenhouse with variable shading for the optimization of agricultural and energy production [J]. Energies, 2019, 12(13): 2589.
- [41] Xue J L. Photovoltaic agriculture – new opportunity for photovoltaic applications in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1 – 9.
- [42] Wang T Y, Wu G X, Chen J W, et al. Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 1178 – 1188.
- [43] 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.
- [44] Pringle A M, Handler R M, Pearce J M. Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 572 – 584.
- [45] 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.
- [46] 赵轶洁, 孟宪学, 王聚博. 探索“渔光互补”发展光伏农业——以鄂州 20MWp 农业光伏科技示范园为例 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(22): 360 – 362.
- [47] 赖旺富, 涂洁磊, 朱永平, 等. 晴朗天气时放置方式对水上光伏组件输出性能的影响分析 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 6 – 9.
- [48] 雷震, 郝雨辰, 孔伯骏. 太阳辐射对大型渔光互补光伏电站发电效益影响分析 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(3): 377 – 382.
- [49] Cazzaniga R, Cicu M, Rosa – Clot M, et al. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1730 – 1741.
- [50] Pimentel da Silva G D, Branco D A C. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts [J]. Impact Assessment and Project Appraisal, 2018, 36(5): 390 – 400.
- [51] Baradei S E, Sadeq M A. Effect of solar canals on evaporation, water quality, and power production; An optimization study [J]. Water, 2020, 12(8): 2103.
- [52] 江富平. 光伏发电项目综合效益评价研究: 以“渔光互补型”光伏电站为例 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [53] 徐昱. 浙江慈溪: 浙东最大“牧光互补”牛棚电站项目正式投入使用 [EB/OL]. (2018 – 1 – 30) [2021 – 07 – 02]. <http://www.es.cn.com.cn/news/show-494455.html>.
- [54] Lytle W, Meyer T K, Tanikella N G, et al. Conceptual design and rationale for a new agrivoltaics concept: Pasture – raised rabbits and solar farming [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124476.
- [55] 孙耀杰. 现代农业与光伏发电互补耦合机理研究与工程优化关键技术 [EB/OL]. (2018 – 12 – 01) [2021 – 07 – 02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SNAD&dbname=SNAD&filename=SNAD000001808069&v=TjRX%25mm%25d2F0fSS4uZRu29P2XnOtQLArUbeXgBHF41vmjSJnydZYAR7J9M0FqjXeuEIf6nl0WaFtJgIYE%3d>.