WRI CHINA

报告

中国光伏农业的现状、技术潜力与实践经验：能源与农业双赢发展的评估与建议

Agrivoltaics in China: Status, Potential and Pathways for Synergistic Energy-Agriculture Development

陈靖、徐生年、张佩璇、何继江、袁敏、苗红

作者介绍

陈靖 | 清华大学，社会科学学院博士后

徐生年 | 世界资源研究所，（美国）北京代表处，可持续转型中心能源项目研究员

邮件： shengnian.xu@wri.org

张佩璇 | 世界资源研究所，（美国）北京代表处，实习生（原）

何继江 | 清华大学，社会科学学院能源转型与社会发展研究中心副主任

袁敏 | 世界资源研究所，（美国）北京代表处，可持续转型中心能源项目研究员

邮件： min.yuan@wri.org

苗红 | 世界资源研究所，（美国）北京代表处，可持续转型中心主任

邮件： hong.miao@wri.org

版面设计

张烨

致谢

在本报告评审过程中，以下内外部专家（按姓氏拼音排序，排名不分先后）为报告提供了宝贵的专业意见与建议，在此谨致诚挚感谢：

鲍恩财	江苏省农业科学院
李长胜	青岛科技大学
廖翠萍	中国科学院广州能源研究所
刘炳材	中央财经大学
刘　嘉	中国能源研究会
Xixi Chen	世界资源研究所
马　钰	世界资源研究所
宋　婧	世界资源研究所
张连慧	世界资源研究所

我们同时感谢世界资源研究所方莉博士，刘哲博士在本报告编写过程中提供的专业意见与指导。特别感谢中国传媒大学新闻学院陈逸飞老师协助完成数据抓取工作，感谢南京林业大学陈健教授提供光伏农业相关数据。感谢各个光伏农业案例项目负责人提供宝贵信息，感谢张烨在报告设计方面的贡献。

引用建议

陈靖、徐生年、张佩璇、何继江、袁敏、苗红. 2025. "中国光伏农业的现状、技术潜力与实践经验：能源与农业双赢发展的评估与建议" 报告. 北京：世界资源研究所. https://doi.org/10.46830/wrirpt.22.00073.

版本 1

August 2025 | 2025年8月

目录

3 执行摘要

11 Executive Summary

19 第一章. 中国光伏农业项目是否遵循一地两用原则及其潜力和成功经验

23 第二章. 光伏农业一地两用原则的评估研究方法和潜力与案例分析

24 2.1 “一地两用” 视角下的光伏农业项目装机容量密度评估方法

24 2.2 光伏农业装机潜力预测方法

27 2.3 典型光伏农业项目的调研方法与分析框架

29 第三章. 中国光伏农业大部分没有很好的遵循 “一地两用” 原则

30 3.1 中国光伏农业装机量发展迅速，装机规模大及区域分布广

33 3.2 中国光伏农业的 “一地两用” 缺乏对农业产量影响的考虑

35 3.3 总结：中国光伏农业发展迅速、形式多样，需注意对农业生产的影响

37 第四章. 光伏农业装机量在遵循 “一地两用” 原则前提下仍具有很大潜力

38 4.1 光伏农业的装机量潜力估算和结果

39 4.2 光伏农业潜力分析总结：农光互补具备最高发展潜力

41 第五章. 光伏农业具体案例分析

42 5.1 山东东营渔光互补案例

44 5.2 海南光伏温室大棚案例

46 5.3 陕西靖边毛乌素沙漠光伏灌溉案例

49 5.4 内蒙古乌拉特中旗 “光牧旅” 产业园案例

51 5.5 江苏连云港农光互补案例

52 5.6 五个光伏农业案例的小结

55 第六章. 结论与讨论

56 6.1 结论：中国现有光伏农业装机量大，未来潜力同样巨大

56 6.2 讨论：中国光伏农业经验和模式在一带一路国家推广

57 6.3 未来国内和海外推广发展光伏农业建议及考虑因素

58 附录

58 附录一：中国现有光伏农业项目的数据收集与处理方法说明

60 附录二：装机容量密度——土地覆盖率指标

61 附录三：温室气体减排效应计算方法

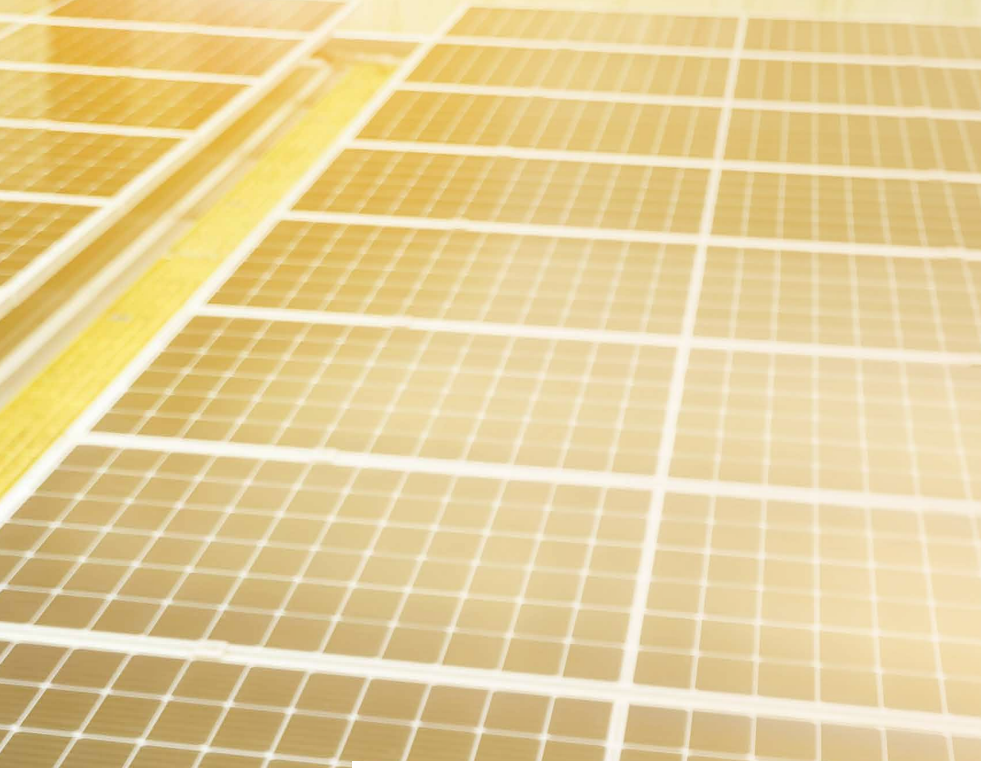
62 附录四：各省温室大棚面积及装机潜力

63 附录五：各省渔业养殖面积及装机潜力

64 附录六：国家统计局对中国的经济区域划分

65 参考文献

67 关于WRI

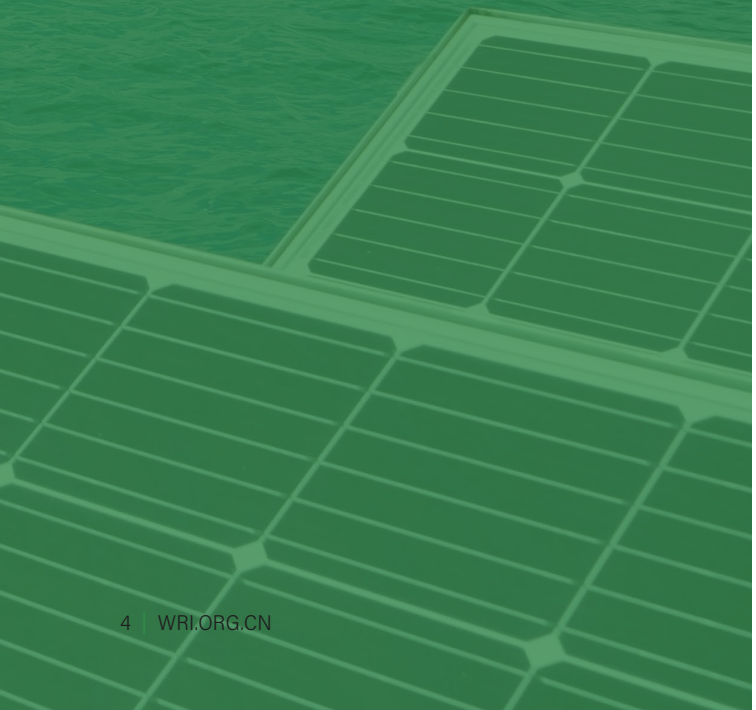


执行摘要

光伏农业（agrivoltaics）是一种将太阳能发电与农业结合的创新模式，在同一块土地上实现“双重利用”，实现能源与粮食的协同共赢。它不仅缓解土地竞争，还能为农户增加收入，并带来生态效益。目前，研究与试点不断推进，前景广阔，但仍需克服技术、成本和适用性等挑战。截至2022年底，中国公开报道的光伏农业装机规模已超过31 GW，其中“渔光一体”模式发展迅速，成为重要类型。在“一地两用”的前提下，中国光伏农业仍具较大技术潜力，已有的成功案例也为后续项目提供了宝贵经验。

亮点

- **十年光伏农业项目数据：**收集513个农光、渔光、温室等项目，至2022年底中国累计光伏农业装机量达31 GW，但多数项目土地覆盖率偏高，未充分实现“一地两用”。
- **技术潜力和区域差异：**在遵循“一地两用”前提下，中国光伏农业具备超60,000GW的技术潜力，其中农光互补潜力最高（约40,000 GW），集中于西部资源富集区；牧光、渔光与温室项目则展现出类型与区域的显著差异，具备差异化发展的条件。
- **典型案例带动实践：**山东、海南、内蒙古和陕西的案例项目在效益与机制上具代表性，具备推广复制价值，为实现清洁能源与农业生产的协同共赢提供了可借鉴的经验。



研究问题

为应对日益严峻的气候变化挑战，光伏作为关键的可再生能源技术，在全球清洁能源转型中发挥着重要作用。然而，大规模部署光伏设施也带来了土地资源竞争的问题。农光互补系统提供了一种潜在的解决方案，通过在同一土地上实现太阳能发电与农业生产的双重利用，兼顾能源与粮食安全的双重需求。在中国，这一模式通常被称为“光伏+”，广泛应用于种植、水产养殖和牧业等多种农业场景中，展现出良好的应用前景。

尽管已有研究较多关注光伏板遮光效应对作物产量的影响，但当前仍缺乏系统性研究来判断我国已实施的光伏农业项目是否切实遵循了“一地两用”原则。同时，一些典型项目在地方层面展现出良好的农业、环境和经济协同效应，为乡村振兴和农民增收提供了实践经验。因此，本文围绕以下三个核心问题展开研究：

1) 本文收集并分析中国已建光伏农业项目的土地覆盖率数据，以评估其在运行中是否符合“一地两用”的基本要求；
2) 在遵循该原则的前提下，估算我国主要类型光伏农业系统的技术装机潜力及其区域分布特征；
3) 基于典型案例，分析成功项目的模式，探讨光伏企业与农业主体如何实现利益共享与协同发展。

综上，本文围绕这三个研究问题展开研究：首先，通过对现状的评估，发现当前光伏农业项目在兼顾清洁能源供给的同时，对农业生产功能保障方面存在的主要问题与挑战；其次，通过潜力测算，明确在确保“一地两用”原则前提下，中国光伏农业未来在电力装机容量上的发展空间与可能性；最后，通过对典型成功案例的分析，总结其模式和利益分配机制，为未来光伏农业项目在中国及其他国家的发展提供可借鉴的经验与路径，从而更好地推动可再生能源发展过程中对土地利用问题的解决，实现能源与农业的协同可持续发展。这一系列研究问题不仅希望回答光伏农业能否实现能源与农业的双赢，更希望为未来光伏农业发展提出切实可行的政策建议，包括制定土地覆盖率、建立长期监测机制、完善监管体系，以及推动公平合理的收益分配，最终促进光伏农业成为支撑中国能源转型与乡村振兴的重要力量，推动能源、农业和环境治理方式的系统性改变。

研究方法

为回答上述问题，本文从三个层面展开分析：一是整理了截止2022年10月14日中国储能网与北极星网站公开发布的共计25580条和5057条记录，筛选出513个中国光伏农业项目

案例，统计其装机规模与土地利用效率，并据此分析其是否符合“一地两用”原则；二是基于文献中典型项目的光伏农业项目农业用地类型和土地覆盖率要求，估算不同类型项目的技术潜力；三是选取农光、渔光、牧光、光伏温室和灌溉系统等典型案例，分析其成本结构和效益表现等。在土地利用分析方面，本文采用公开披露的装机容量与占地面积数据，计算光伏农业项目的装机容量密度，作为衡量土地覆盖率的近似指标。该指标用于判断项目是否超过保障农业产量所需的遮光上限，从而评估其是否符合“一地两用”的核心原则。在潜力评估方面，本文基于国家农业普查数据和文献推荐的遮光比例上限，对不同农业用地上部署光伏的可行性与潜力进行测算，支持未来因地制宜的项目规划。最后，案例研究展示了光伏农业在社会、经济与环境层面的多重价值。通过分析光伏企业与农户之间的合作模式、收益分配机制及公共投资方式，为后续推广提供了可借鉴经验。

研究结论

针对研究中提出的三个核心问题的结论，本文主要结论归纳如下：

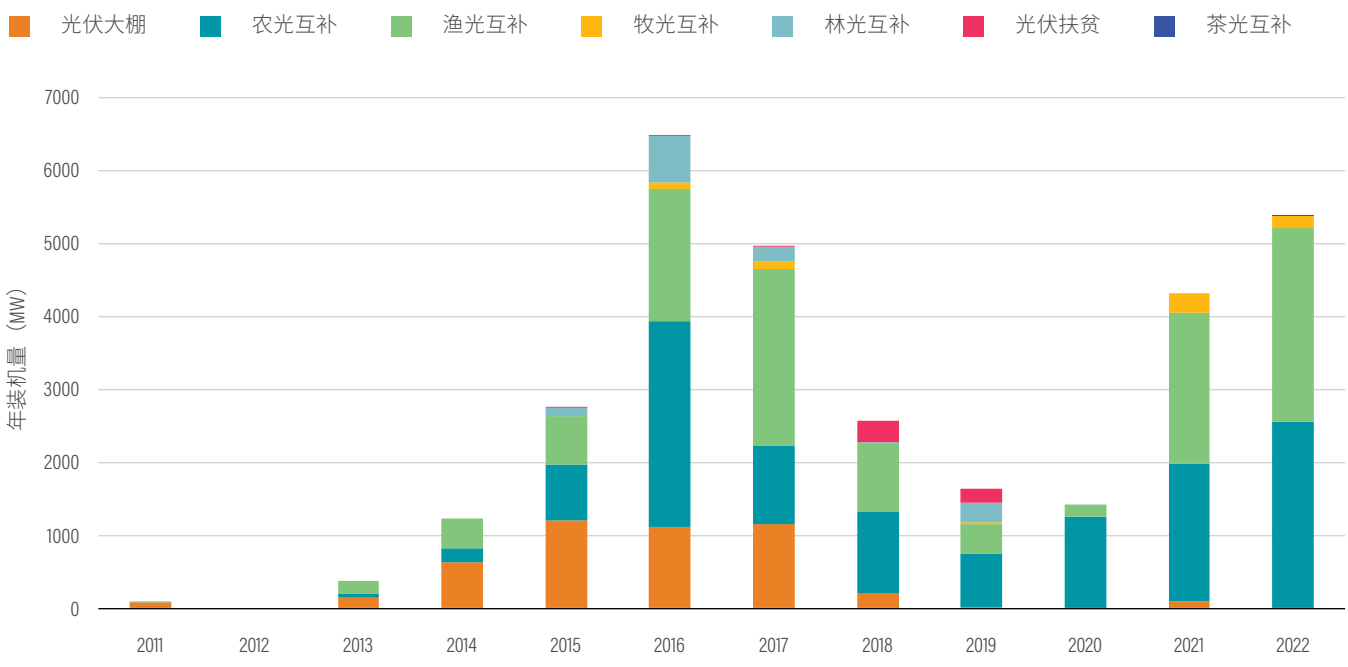
第一，通过对中国现有光伏农业项目土地覆盖率的相关数据收集与分析发现，虽然根据公开资料，至2022年全国光伏农业项目累计装机规模已达31 GW，但多数项目在实际建设过程中可能未严格遵循“一地两用”的基本原则，其土地覆盖率普遍超过50%，存在对农业产出造成影响的风险。

我们收集整理的513个光伏农业项目，累计装机容量达到31 GW，单个项目平均装机规模约为成60.8 MW。主要项目类型包括“光伏+农作物种植”、“光伏+水产养殖”以及“光伏+温室大棚”三类，具体分布情况见执行摘要图1。

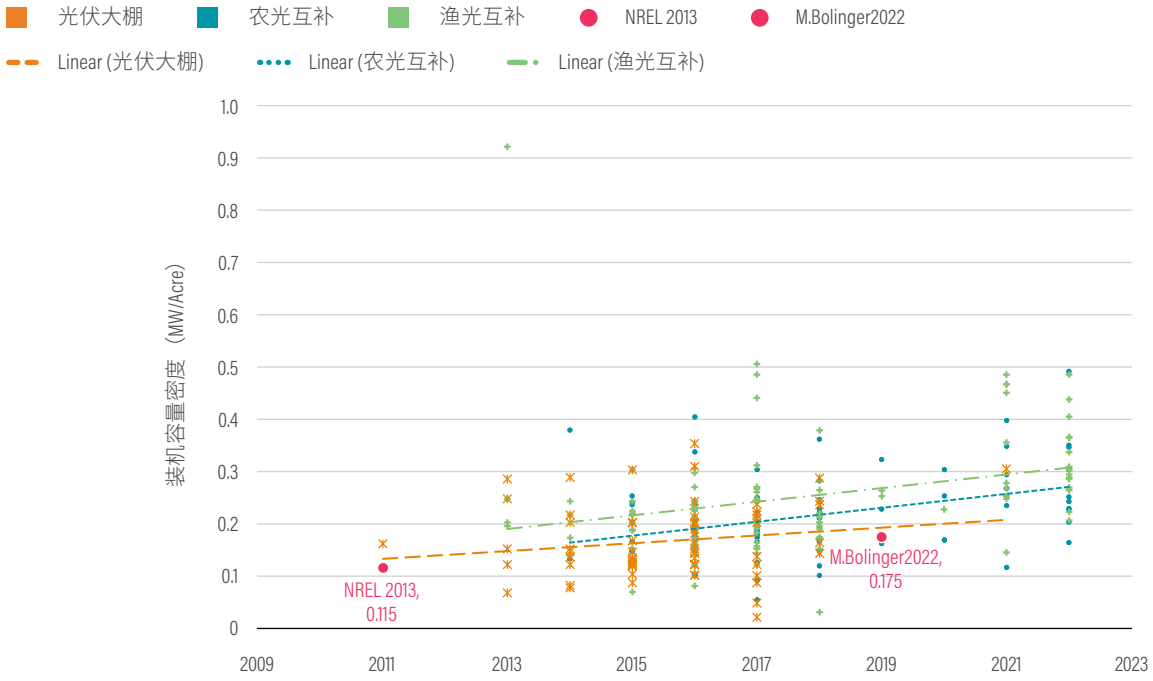
装机容量密度可作为光伏农业项目土地覆盖率的近似指标，反映单位面积上的光伏装机强度。文献研究表明，温室大棚类光伏项目的土地覆盖率受作物类型影响较大，部分耐阴蔬菜在不显著影响产量的情况下，可承受高达50%的遮光程度；但对于多数作物，尤其是露天种植类，为保障产量，通常建议土地覆盖率控制在35%、20%或更低水平。相较而言，渔光互补项目对遮光的敏感性较低，已有研究显示，即使覆盖率达到50%，渔业产量也不会受到明显影响。

执行摘要图2展示了本研究收集的国内光伏农业项目中，具备装机容量和占地面积数据的不同类型项目的装机容量密度分布趋势，揭示了农光互补、光伏大棚与渔光互补系统在土地遮光程度上的显著差异。从数据分布来看，大多数项目土地覆盖率已超过50%，这可能意味着光伏组件布设过于密集，压缩了农业活动空间，影响作物种植或水产养殖的正常生产。随着中国光伏农业项目规模不断扩大，其对粮食安全和农业产能的潜在影响不容忽视。为保障农业功能不被削弱，建议在项目设计阶段优化组件布局与遮光比例控制。同时，国家和地方应建立光伏农业项目的动态监测机制，并出台土地覆盖率的指导性标准和管理规范，确保能源开发与农业生产协调发展。

执行摘要图 1 | 中国各种农光互补项目的年度新增装机量



执行摘要图 2 | 光伏农业项目的装机容量密度分布



第二，基于国家农业普查数据和已有研究文献中针对各类光伏农业系统所建议的土地覆盖率上限值，即在充分遵循“一地两用”前提下，本文估算了全国范围内四类光伏农业项目的技术装机容量潜力，包括农光互补、牧光互补、渔光互补和温室大棚光伏项目（覆盖玻璃和塑料两类材料）。结果显示：

- 农光互补项目具有最高的技术潜力，约为40,000 GW，主要集中于太阳能资源丰富的西部地区；
- 牧光项目潜力为19,407 GW，其中西部地区占比高达98%；
- 温室大棚项目潜力相对较低，约为284 GW，其中近一半集中在东部沿海省份；
- 渔光互补项目潜力约为3,074 GW，其中淡水养殖项目的可开发潜力约为海水养殖项目的两倍。

详细的潜力估算结果参见执行摘要表1。为推动光伏农业的有序发展，建议在未来规划和政策制定中，按区域和土地类型设定差异化的土地覆盖率上限，结合项目生命周期开展环境影响监测，并制定针对不同类型项目的指导性政策和监管机制，以实现农业与光伏发展的协调并进。

执行摘要表 1 | 中国不同农业用地的开发光伏农业技术装机量潜力（GWp）

技术潜力（GWp）/地区	总计	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
农光互补	40,841	7,926	9,236	15,259	8,421
牧光互补	19,407	81	9	19,183	133
温室大棚光伏（玻璃）	72	28	9	21	15
温室大棚光伏（塑料）	212	102	40	46	23
渔光互补	3,074	1,115	867	413	679

第三，通过对五类典型光伏农业案例的调研分析，梳理了各类模式及其运行机制。山东东营的渔光互补项目与海南的光伏大棚项目均由光伏企业作为主导投资方，承担农业基础设施改造后以低价或无偿形式向养殖户/种植企业提供用地，实现农业与光伏的协同发展；陕西靖边的光伏灌溉系统显著提升了偏远地区的灌溉便利性与成本效益；内蒙古的牧光一体化项目通过公共资金撬动牧民参与投资，探索了可持续共享收益的新机制；江苏连云港的光伏农业项目则对不同遮光率的光伏组件进行了系统监测，为后续合理规划区域光伏农业提供了关键的数据支撑。

在渔光互补领域，中国发展较为迅速，项目平均规模较大。以山东省东营市通威公司建设的200 MW渔光互补项目为例，实地调研显示，在光伏系统建设过程中，当地水产养殖基础设施得到了显著改善，包括池塘堤坝加固、灌溉系统优化及其他配套设施升级。这些投入不仅推动了养殖方式的现代化转型，还有效降低了农户的生产成本。同时，光伏组件所带来的遮光效应改善了水体温度和光照条件，虾类和海参的养殖产量提升约50%。项目引入的现代化养殖技术也进一步提高了产品附加值和农民收入。

在海南，光伏蔬菜温室项目亦取得了积极成效。项目模式为光伏企业租赁土地进行太阳能开发，同时将组件下方空间无偿提供给农业企业用于蔬菜种植。该模式既降低了农业用地成本，又因温室结构增强了抵御台风、暴雨等极端天气的能力，实现全年稳定生产。目前，该项目年产蔬菜量可满足约130万人口的叶类蔬菜需求，覆盖海南省约13%的人口。

陕西靖边毛乌素沙漠地区早在十余年前便引入光伏灌溉系统，用于缓解偏远地区旱季缺电与灌溉困难问题。该系统大幅降低了单位灌溉成本，在25年运维周期内，光伏系统用水成本仅为传统柴油系统的约18%。系统与滴灌技术结合后，节水效率可进一步提升至70%。

在内蒙古巴彦高勒嘎查村，当地依托政府援助资金建设了1兆瓦牧光互补项目，并吸引牧民以个人投资形式参与。该项目通过将土地租赁给牧业公司实现收益回流，并按股权比例向牧民分红，年化收益率达20%；其余利润用于村集体基础设施建设，形成了较为成功的社区共享型模式，有效提升了牧民的参与意愿与收益水平。

在江苏，某20 MW农光互补项目则采用“光伏+粮食种植”的模式，在光伏板下种植小麦和大豆。项目对不同遮光比例与组件排布方式下的作物产量进行了持续监测，提供了重要的实证数据，为当地农光互补模式的标准化、优化与政策制定提供了有力支撑。

为进一步展示我国光伏农业发展的多样化路径与可复制经验，本文对五个具有代表性的典型案例进行了归纳整理，涵盖不同地区与系统类型。执行摘要表2“典型光伏农业项目模式与农户受益机制对比表”汇总了各案例的投资主体、土地使用方式、收益分配机制及农户参与模式等关键要素，反映出多样而成功的“光伏+农业”融合实践，为未来项目设计与政策制定提供了有益参考。

执行摘要表 2 | 典型光伏农业项目模式与农户收益机制对比表

项目地点	项目类型	投资主体	土地安排	收益机制	农户收益方式
山东东营	渔光互补	光伏企业	租赁水产养殖区，基础设施改造	改善养殖环境，产量提升50%	间接受益（养殖环境改善、增产）
海南	光伏温室蔬菜	光伏企业	租地开发，组件下土地无偿提供农业公司	光伏+蔬菜协同，全年稳定生产	无偿获得耕地，提高收益
陕西靖边	光伏灌溉	治沙村民	建设光伏泵站与灌溉系统	节能降本，成本为柴油系统18%	节约用水与灌溉成本
内蒙古巴彦高勒	牧光互补	政府+牧民投资	村集体租地给牧业公司	投资分红（牧民投资年回报20%）+村集体收益	作为股东获得收益
江苏	农光互补	光伏企业	光伏板下作物种植	遮光比例监测与优化设计	依据遮光比例调整种植结构

建议

本研究围绕光伏农业项目的实施现状、技术潜力以及典型案例中的效益与模式，提出以下政策与实践建议：

第一、建议完善光伏农业项目的空间布局管理与 “一地两用”原则控制措施，制定分区域、分类型的土地覆盖率上限标准，并引入评估机制，确保兼顾农业产量与光伏发电效益。

研究发现，当前多数光伏农业项目在实施过程中土地覆盖率已超过50%，存在偏离“一地两用”原则、影响农业产出的风险。因此，建议制定分区域、分土地类型的覆盖率上限指导标准，并在项目审批与运行阶段引入土地利用强度评估机制。鼓励通过优化组件排布、提高光伏组件效率等方式，在保障农业产量的前提下提升单位面积光伏发电能力。

第二、建议根据光伏农业潜力区域实施差异化布局，强化农业与光伏发电的协同设计。

在遵循土地与产能协调的前提下，中国具备大规模发展光伏农业的潜力，尤其是农光互补与牧光互补项目在西部地区技术潜力显著。建议依据区域资源禀赋与农业基础，推动差异化布局，制定“技术—农作物”匹配指南与项目选址指引。同时，在规划中引导项目单位充分考虑光照需求敏感度、作物耐阴性等参数，实现精准化开发。

第三、建议总结推广光伏企业与农业合作、农民参股分红等典型模式，提供政策与融资支持，推动“能源+农业”可复制可持续发展。

从案例研究看，成功项目普遍具有以下共性：光伏企业主导投资、农业基础设施改造联动、以及合理的收益共享机制设计。建议总结和推广“光伏+农业公司合作”“农民参股+集体分红”等典型模式，并提供政策支持与融资工具，引导形成可复制、可持续的“能源+农业”融合发展路径。

第四、建议建立涵盖粮食安全、土地利用、收益分配与系统安全的多维度评估监管框架，并开展全国长期监测，保障光伏农业项目的可持续发展与政策完善。

建议构建覆盖技术、农业、经济与安全维度的光伏农业评估框架，重点关注以下四方面：

- **粮食安全：**确保农作物产量稳定，防止高遮光率项目削弱农业功能；
- **复杂性管理：**评估光伏系统对土地长期利用效率、种植结构调整的影响；
- **收益共享机制：**规范项目开发中的收益分配结构，保障农民与社区公平受益；
- **系统安全性：**制定结构与电气安全标准，确保项目运行不对人员、牲畜及作物造成安全隐患。

此外，应支持在全国范围内开展长期、多区域的光伏农业项目性能监测，建立涵盖产量影响、环境效益与社会接受度的综合数据库，为政策迭代和投资决策提供数据支撑。

第五、建议发挥中国光伏农业经验在南南合作中的外溢价值，结合当地农业与能源需求，支持海外试点项目，推动发展中国家粮食安全与绿色转型。

随着中国在全球清洁能源投资与技术输出中的影响力不断增强，其光伏农业经验可为发展中国家提供低成本、可复制的路径选择。建议加强“南南合作”机制，结合当地农业结构与能源需求，支持开展海外光伏农业试点项目，在保障粮食安全的同时推动清洁能源利用与乡村可持续发展。

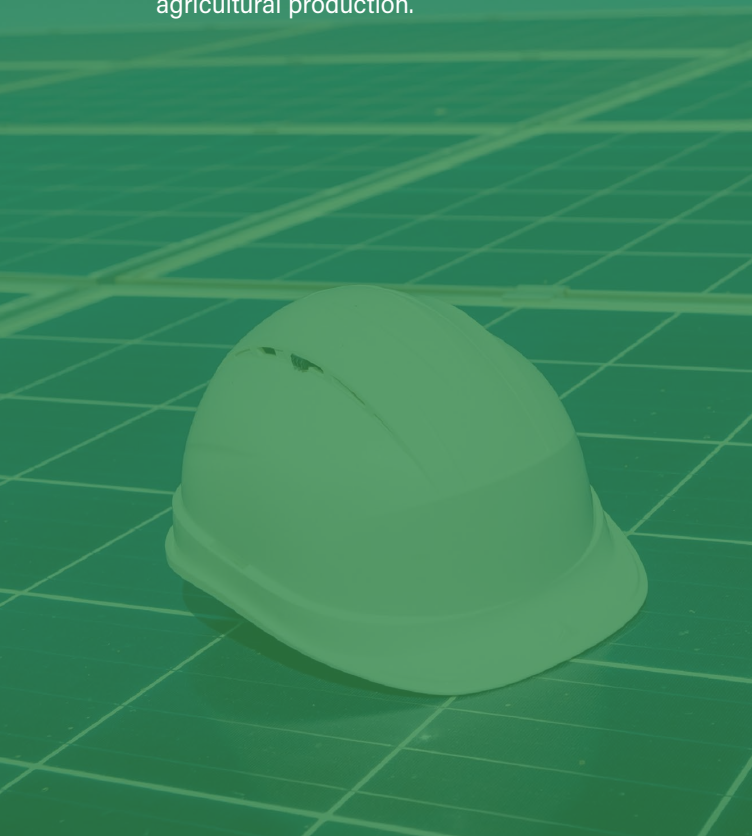
研究发现，当前多数光伏农业项目在实施过程中土地覆盖率已超过50%，存在偏离“一地两用”原则、影响农业产出的风险。

Executive summary

Agrivoltaics is an innovative model that integrates solar power with agriculture, enabling dual land use to balance energy and food production. It reduces land-use competition, increases farmers' income, and provides ecological benefits. Research and pilot projects are expanding, though challenges in technology, costs, and applicability remain. By the end of 2022, China's reported agrivoltaic capacity exceeded 31 GW, with photovoltaic–aquafarming emerging as a major type. Under the "dual use of land" principle, agrivoltaics in China still holds vast potential, and successful cases offer valuable lessons for future development.

HIGHLIGHTS

- **Decade-long project data review:** A total of 513 publicly reported agrivoltaic projects integrating solar PV with agriculture, aquaculture, and greenhouses were collected, with a combined installed capacity of 31 GW. The analysis reveals that land coverage ratios are generally high, indicating the need for improved system design and land-use management to better balance energy production with agricultural functions.
- **Technical potential and regional variation:** Under the principle of dual land use, China has a technical potential of over 60,000 GW for agrivoltaics. Photovoltaic crop-cultivation systems account for the largest share (approx. 40,000 GW), primarily concentrated in resource-rich western regions. Other system types— Photovoltaic grazing, aquavoltaics, and Photovoltaic solar greenhouse— show distinct spatial and functional characteristics, supporting differentiated development strategies.
- **Replicable success cases:** Successful projects in Shandong, Hainan, Inner Mongolia, and Shaanxi illustrate strong performance in economic, social, and environmental aspects, provide replicable models and valuable insights to advance the integration of clean energy development and agricultural production.



RESEARCH QUESTIONS

To address the urgent challenges of climate change, solar photovoltaics (PV) stands out as a prominent form of renewable energy, playing a crucial role in meeting the global demand for clean energy. The widespread deployment of solar PV, while pivotal, introduces the challenge of securing sufficient land for solar facilities. Agrivoltaics, an innovative approach involving the dual use of land for both solar PV energy production and agriculture, emerges as a solution to meet the escalating needs for both energy and food concurrently. In China, these integrated systems are commonly known as solar plus (solar+) projects. This integrated approach has demonstrated success through various practices, such as combining solar PV with plant cultivation, aquafarms, and livestock grazing.

Although existing studies have extensively explored the impact of PV shading on crop yields, there remains a lack of systematic analysis on whether agrivoltaic projects already implemented in China truly adhere to the principle of "dual land use." At the same time, some representative projects have shown positive synergies in agricultural productivity, environmental performance, and local economic benefits, contributing valuable experience to rural revitalization and farmers' income growth.

This study aims to address the following three questions:

1). By collecting and analyzing coverage rates of agrivoltaic projects in China, does the implementation of these projects adhere to the fundamental principle of dual land use?

2). Within the framework of the dual land use principle, what is the future technical potential of agrivoltaic projects in China?

3). Drawing from representative case studies, what are the successful business models, and how do they ensure benefit-sharing and coordination between solar developers and agricultural stakeholders?

In summary, this study is structured around three interrelated research questions. First, by assessing the current status of agrivoltaic projects in China, it identifies the key problems and challenges in ensuring agricultural productivity while supplying clean energy. Second, through potential estimation, it clarifies the future development space and potential capacity of agrivoltaics under the strict premise of adhering to the "dual land use" principle. Finally, by analyzing typical successful cases, it summarizes the business models and benefit-sharing mechanisms, pro-

viding valuable experiences for the future development of agrivoltaic projects in China and other countries. Together, these research questions aim not only to examine whether agrivoltaics can achieve a win–win outcome for energy production and agriculture but also to propose practical policy recommendations for its future development. These include establishing standards for land coverage rates, building long-term monitoring systems, improving regulatory frameworks, and promoting fair and reasonable benefit-sharing mechanisms. Ultimately, the study seeks to position agrivoltaics as a key driver supporting China's energy transition and rural revitalization, while also promoting systemic changes in the governance of energy, agriculture, and the environment.

METHOD

To answer these questions, the study conducts analysis at three levels:

First, we reviewed a total of 25,580 and 5,057 publicly available records from China Energy Storage and Beijixing websites as of October 14, 2022, and identified 513 agrivoltaic project cases in China. We analyzed their installed capacity and land-use efficiency to assess whether they align with the "dual land-use" principle. Second, based on the agricultural land types and land coverage requirements of typical agrivoltaic projects reported in the literature, we estimated the technical potential for different project types. Third, we analyze typical cases—such as photovoltaic crop-cultivation, photovoltaic aquafarming (hereafter aquavoltaics), photovoltaic grazing, photovoltaic solar greenhouses, and solar-powered irrigation—focusing on cost structures, economic performance, and replicability.

For land-use analysis, we use publicly disclosed data on installed capacity and land area to calculate the installed capacity density of agrivoltaic projects, which serves as a proxy for land coverage ratio. This metric allows us to evaluate whether projects exceed the shading thresholds that would adversely affect crop yields, and thus determine their compliance with the "dual land use" principle.

In the potential assessment, we draw on agricultural census data and literature-based shading limits to estimate the technical potential of agrivoltaic deployment on different types of agricultural land across China, providing guidance for future location-specific planning.

Finally, the case studies demonstrate the multiple values of agrivoltaics across social, economic, and environmental dimensions. By examining cooperative models, benefit-sharing mechanisms, and the role of public investment, the study offers replicable insights to support broader adoption and policy development.

KEY FINDINGS

Based on the three core research questions raised in this study, the main conclusions are summarized as follows:

1) Land coverage and compliance with the "dual land use" principle

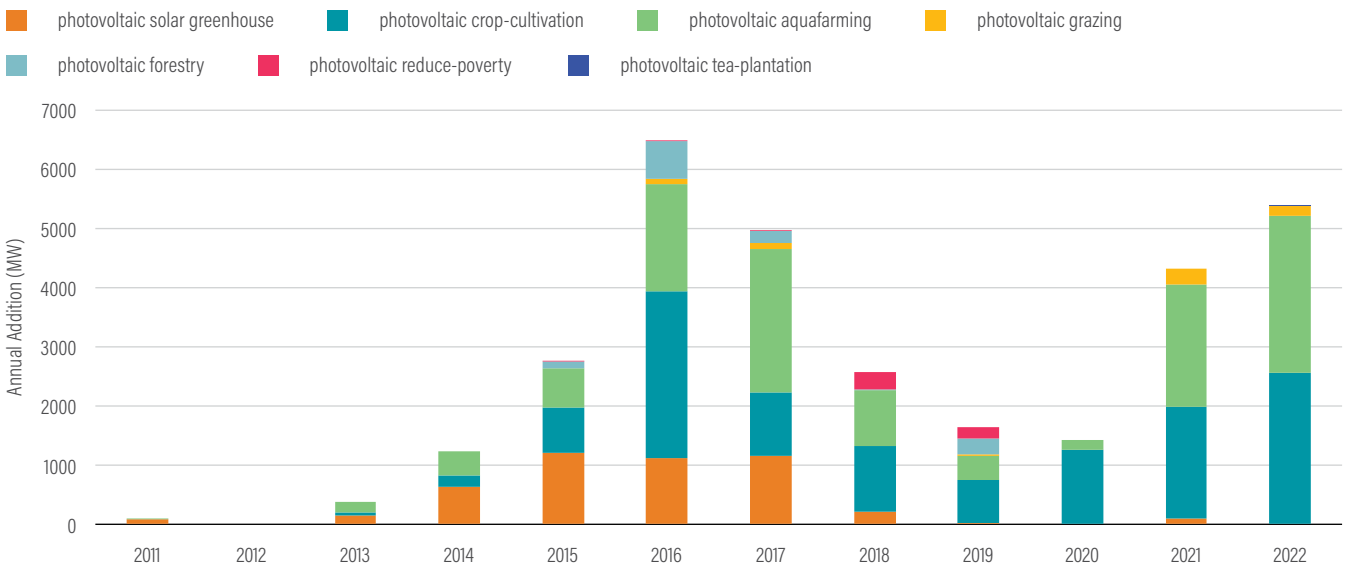
Analysis of land coverage data from existing agrivoltaic projects in China indicates that, although the total installed capacity of these systems had reached 31 GW by 2022 according to public sources, the majority of projects may not have fully adhered to the "dual land use" principle in practice. Most projects exhibit land coverage ratios exceeding 50%, posing potential risks to agricultural productivity.

We have collected and compiled a large sample of data on agrivoltaics reported in China over the past ten years. In total, we obtained data for 513 agrivoltaic projects, with a total installed capacity of 31 GW. The average size is approximately 60.8 MW. The dominant project types are photovoltaic crop-cultivation projects, photovoltaic aquafarming projects, and photovoltaic solar greenhouses. However, since 2019, there have been few new reported solar greenhouse projects, as illustrated by Figure ES-1.

The power density can be considered a proxy indicator for land coverage ratio in agrivoltaic projects, reflecting the intensity of PV installation per unit of land area. Research indicates that the land coverage ratio of photovoltaic solar greenhouse projects is highly influenced by the type of crops grown. Some shade-tolerant vegetables can tolerate up to 50% shading without significant yield loss; however, for most crops—particularly those cultivated in open fields—it is advised to maintain land coverage below 35%, 20%, or even lower to ensure stable production. In contrast, aquavoltaic projects are less sensitive to shading, with existing studies showing that even at 50% land coverage, aquaculture yield is not significantly affected.

Figure ES-2 illustrates the trends in power density across different types of agrivoltaic systems with available data on installed capacity and land area, highlighting notable differences in land coverage ratio among photovoltaic crop-cultivation, photovoltaic solar greenhouses and aquavoltaic systems. The data show that a majority of projects have land coverage ratios exceeding 50%, which may indicate overly dense

FIGURE ES-1 | Annual additions of various agrivoltaic projects in China



PV module installations that reduce the space available for agricultural activities, thereby affecting normal crop cultivation or aquaculture operations. As the scale of agrivoltaic deployment in China continues to expand, its potential impact on food security and agricultural productivity should not be overlooked. To safeguard agricultural functionality, it is recommended that system design optimize PV panel layout and shading ratios from the outset. Moreover, national and local governments should establish dynamic monitoring mechanisms for agrivoltaic projects and develop guiding standards and regulatory frameworks for acceptable land coverage ratios, ensuring the coordinated development of renewable energy and agriculture.

FIGURE ES-2 | Power density of agrivoltaic projects in China

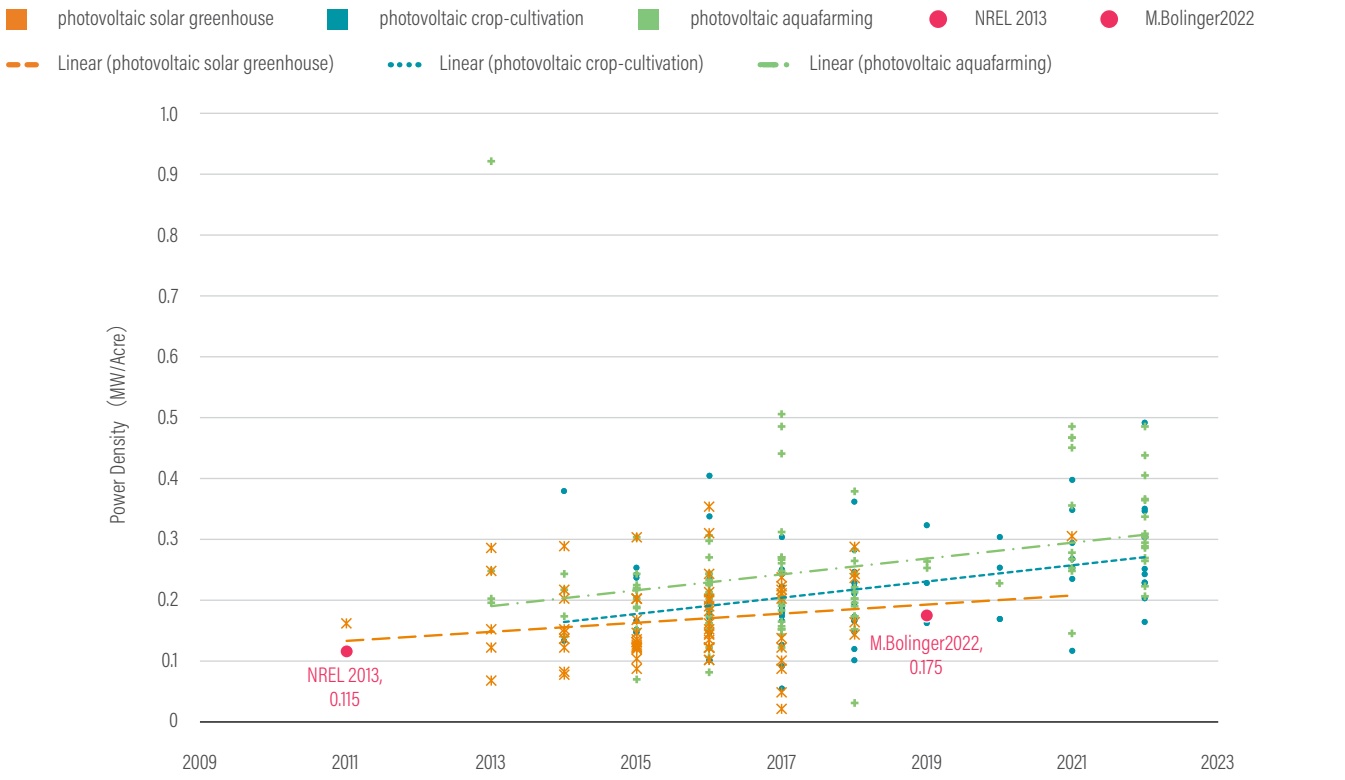


TABLE ES-1 | Technical potential of varied agricultural land uses in China (GWp)

Technical Potential (GWp), by Region	All	Eastern Region	Central Region	Western Region	Northeast Region
Crop cultivation	40,841	7,926	9,236	15,259	8,421
Grazing	19,407	81	9	19,183	133
Greenhouse (glass)	72	28	9	21	15
Greenhouse (plastic)	212	102	40	46	23
Aquavoltaics	3,074	1,115	867	413	679

2) Technical potential under the dual land use constraint

Based on National Agricultural Census data and shading threshold values for various agrivoltaic system types recommended in the literature, this study estimates the technical potential of four major categories of agrivoltaic projects across China: photovoltaic crop-cultivation systems, photovoltaic grazing systems, aquavoltaics, and photovoltaic solar greenhouses (including both glass and plastic-covered structures). The results are as follows:

- **Photovoltaic crop-cultivation systems** have the highest technical potential, estimated at approximately 40,000 GW, primarily concentrated in western regions with abundant solar resources;
- **Photovoltaic grazing systems** have a potential of 19,407 GW, with 98% of this capacity located in western provinces;
- **Photovoltaic solar greenhouse systems** show relatively limited potential at approximately 284 GW, with nearly half of the total concentrated in eastern coastal areas;
- **Aquavoltaic systems** offer an estimated potential of 3,074 GW, with freshwater aquaculture projects presenting roughly twice the potential of marine aquaculture.

For detailed estimates of technical potential by system type and region, see Table ES-1. To ensure the orderly development of agrivoltaics, it is recommended that future planning and policymaking adopt differentiated land coverage limits based on regional characteristics and land use types. These should be accompanied by environmental impact monitoring across project lifecycles and the development of targeted policy guidelines and regulatory mechanisms tailored to each system type, thereby promoting a balanced integration of solar energy and agricultural production.

3) Insights from representative case studies and business models

Analysis of five representative case studies reveals a variety of successful business models and implementation strategies across these system types. In Shandong Dongying (aquavoltaics) and Hainan (photovoltaic solar greenhouses), projects are led by solar PV companies that invest in agricultural infrastructure and subsequently lease land to aquaculture operators or vegetable producers at low or no cost, achieving mutual benefits in energy generation and agricultural production. In Shaanxi's Jingbian county, a solar-powered irrigation system has significantly improved water access and reduced costs in remote areas. Inner Mongolia's photovoltaic grazing project leverages public funds to encourage herder participation in project investment, pioneering a sustainable and inclusive benefit-sharing model. Meanwhile, the photovoltaic crop-cultivation project in Lianyungang, Jiangsu, systematically monitors crop yields under varying shading conditions, providing valuable data to inform future planning and standardization of such systems.

In the field of photovoltaic aquafarming projects, China's development has been relatively rapid, and the average project size is generally quite large. For instance, our field visits to the Tongwei 200MW photovoltaic aquafarming project in Dongying, Shandong Province, revealed significant infrastructural enhancements during solar PV project construction, including improved pond embankments, irrigation systems, and supporting facilities. These upgrades have not only facilitated the transition to modern aquafarming but also proved cost-effective

for farmers. Additionally, the photovoltaic shading has notably improved aquaculture environments, boosting shrimp and sea cucumber yields by 50%. Modern farming techniques further enhanced fishery value and income.

In Hainan, the photovoltaic vegetable greenhouse projects have been remarkably successful. Here, photovoltaic companies lease land for solar PV project development and simultaneously provide it at no cost to agricultural companies for vegetable cultivation. This approach not only conserves land leasing expenses but also ensures year-round production, unaffected by adverse weather conditions, such as typhoons and rainstorm. Current photovoltaic greenhouse projects in Hainan are capable of supplying leafy vegetables to around 1.3 million people, covering about 13% of the province's population, throughout the year.

The Jingbian Mu Us Desert in Shaanxi province witnessed the introduction of a photovoltaic irrigation system over a decade ago. This system effectively addressed the challenge of irrigation during the dry season in remote, electricity-deprived areas. Comparatively, the unit water cost of the photovoltaic system is significantly lower than traditional diesel-powered irrigation, amounting to about 18% over a 25-year period. Pairing with drip irrigation can further achieve water savings of up to 70%.

In Inner Mongolia's Chuanjing Sumu Bayan Gol Gacha Village, a photovoltaic livestock grazing project was established through government grants and private herder investments. This 1 MW solar PV power station, with land leased to a livestock company, generates revenue that contributes to the collective economy for infrastructure development, as well as dividends to herders based on ownership stakes, with an impressive annual return rate of 20%. This successful pilot project has encouraged more herder involvement in photovoltaic grazing projects.

Lastly, in Jiangsu province, the 20 MW photovoltaic crop-cultivation project involves the planting of wheat and soybeans under PV panels. Extensive monitoring of wheat yields under various shading ratios and panel coverage patterns has yielded valuable data, providing guidance for the standardized and regulated growth of photovoltaic crop-cultivation projects in the region.

To further demonstrate the diverse development pathways and replicable experiences of agrivoltaic projects in China, this study summarizes five representative cases covering different regions and system types. Table ES-2, titled "Comparison of typical agrivoltaic project business models and benefit mechanisms," consolidates key elements such as investment entities, land use arrangements, benefit-sharing mechanisms, and farmer participation models. These cases reflect a range of successful "PV + agriculture" integration practices and provide valuable references for future project design and policy formulation.

TABLE ES-2 | Comparison of typical agrivoltaic project business models and benefit mechanisms

Project location	Project type	Investor(s)	Land arrangement	Benefit mechanism	Farmer benefit model
Dongying, Shandong	Aquavoltaics	Solar company	Leasing aquaculture areas; infrastructure upgrades	Improved aquaculture environment, 50% increase in yield	Indirect benefits (improved environment and productivity)
Hainan	Photovoltaic solar greenhouse	Solar company	Land leased for PV; land beneath panels provided free to agri-business	Synergistic PV + vegetable production; year-round stability	Free land access, increased agricultural income
Jingbian, Shaanxi	Solar-powered irrigation	Local residents (desert control)	Construction of solar pumping and irrigation systems	Energy-saving and cost reduction; 18% of diesel irrigation cost	Reduced water and irrigation costs
Inner Mongolia	Photovoltaic grazing	Government + herder investment	Village collective leases land to grazing company	Investment dividends (20% annual return for herders) + village revenue	Shareholder income for herders
Jiangsu	Photovoltaic crop-cultivation	Solar company	Crop cultivation under PV panels	Shading ratio monitoring and optimization	Adjusted cropping structure based on shading conditions

SUGGESTIONS

This study offers the following policy and practice recommendations based on the implementation status, technical potential, and business models of agrivoltaic projects in China:

1) **Enhance spatial planning and management of agrivoltaic projects in line with the "dual land-use" principle by setting region- and type-specific land coverage limits and implementing evaluation mechanisms to ensure agricultural productivity and solar power generation are both optimized.**

Findings indicate that most agrivoltaic projects currently exceed a 50% land coverage ratio during implementation, posing a risk of deviating from the "dual land use" principle and negatively impacting agricultural output. It is recommended to establish land coverage ratio guidelines differentiated by region and land type, and to incorporate land-use intensity assessments into project approval and operational procedures. Project design should also promote higher PV efficiency and optimized panel layout to maximize power generation per unit area while safeguarding agricultural productivity.

2) **Implement region-specific deployment strategies based on agrivoltaic potential and strengthen the integrated design of agricultural production and solar power generation.**

Given the substantial technical potential of agrivoltaics in China—particularly in crop- and grazing-integrated systems across western regions—strategic regional planning is essential. It is recommended to guide development based on local resource endowments and agricultural foundations, supported by "technology–crop type" compatibility guidelines and site selection tools. Planning should also account for crop light sensitivity and shade tolerance to ensure context-specific system design.

3) **Promote successful business models such as partnerships between solar companies and agricultural enterprises and farmer equity participation with profit-sharing schemes, while providing policy and financial support to enable the replicable and sustainable development of integrated energy–agriculture initiatives**

Case studies reveal that successful projects commonly feature PV enterprise-led investment, coordinated upgrades to agricultural infrastructure, and well-structured benefit-sharing mechanisms. It is recommended to document and promote proven business models—such as PV company–agriculture enterprise partnerships and farmer equity participation with collective dividends—and provide enabling policies and financing instruments to support scalable, sustainable integration of energy and agriculture.

4) **Establish a multidimensional evaluation and regulatory framework encompassing food security, land use, benefit sharing, and system safety, and implement long-term nationwide monitoring to support the sustainable development of agrivoltaic projects and guide policy improvements.**

A comprehensive framework should be developed to evaluate agrivoltaic projects across technical, agricultural, economic, and safety dimensions. Key focus areas include:

- **Food security:** Ensuring stable crop yields and mitigating yield loss due to excessive shading;
- **System complexity:** Assessing impacts on long-term land productivity and crop rotation flexibility;
- **Benefit-sharing mechanisms:** Standardizing fair and transparent benefit distribution among developers, farmers, and communities;
- **System safety:** Developing structural and electrical safety standards to protect workers, livestock, and crops during project operation.

In addition, national-scale, long-term performance monitoring across multiple regions should be supported to build an integrated database covering yield impacts, environmental benefits, and social acceptance, providing a strong evidence base for policy refinement and investment decisions.

5) **Leverage China's agrivoltaic experience to generate spillover benefits through South-South cooperation by aligning with local agricultural and energy needs, supporting overseas pilot projects, and advancing food security and green transitions in developing countries.**

As China's role in global clean energy investment and technology transfer continues to grow, its experience with agrivoltaic development presents cost-effective and replicable solutions for developing countries. Enhancing South-South cooperation and supporting pilot agrivoltaic projects abroad—adapted to local agricultural conditions and energy demands—can contribute to advancing food security, accelerating clean energy deployment, and fostering sustainable rural development globally.

第一章

中国光伏农业项目是否遵循一地两用原则及其潜力和成功经验

研究问题和内容概述：光伏农业在中国已发展十余年，其在发展规模、类型以及对“一地两用”原则的落实方面积累了丰富经验，同时展现出广阔的技术潜力和典型案例的社会、经济与环境效益。这些实践为深入研究提供了宝贵样本，也有望为其他国家和地区推广应用提供有益借鉴。

发展光伏是碳中和路径实现的重要手段之一。在2022年，中国的光伏新增并网容量达到8741万千瓦。其中，集中式光伏电站新增了3630万千瓦，而分布式光伏电站的新增容量为5111万千瓦。截至2022年底，中国光伏的装机总量达到了3.92亿千瓦(国家能源局 2023)。为了实现中国的双碳目标，在未来几年内仍需要进一步开发光伏资源。

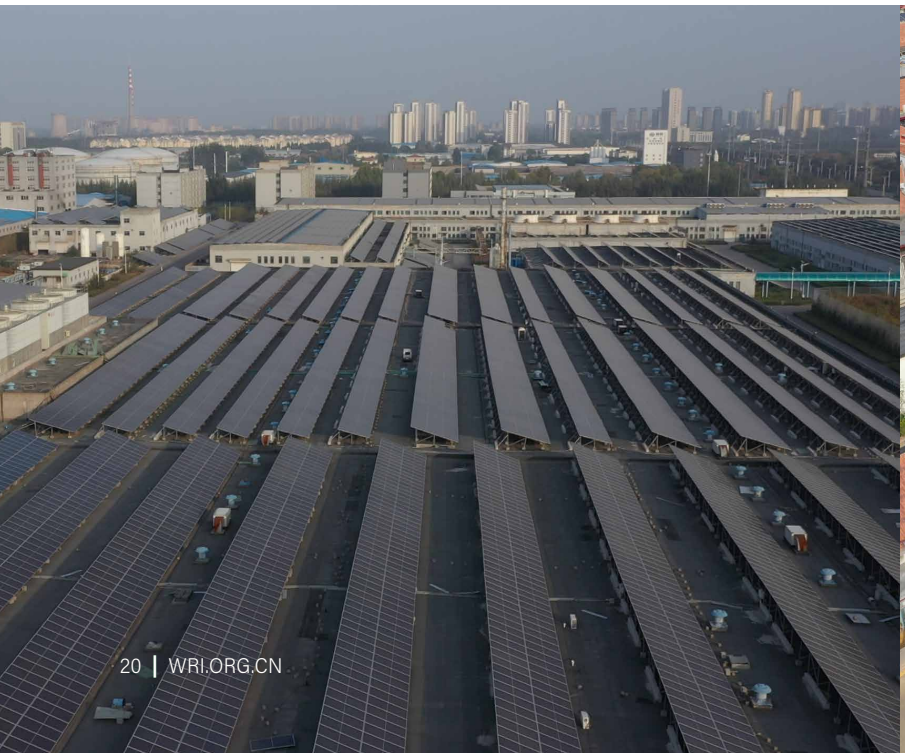
光伏发电对土地的需求量较大。根据现有技术水平的估计，平均每1 MW的光伏发电需要占用17至25亩土地(Bolinger and Bolinger 2021)。由于土地、环境和资源等因素的限制，光伏发展面临诸多挑战，这些因素对光伏的进一步发展产生了影响。自2015年起，中国开始陆续推出光伏发电用地政策。截至2022年12月5日，自然资源部发布了《光伏发电站工程项目用地控制指标》(自然资源部 2022)，强调光伏发电项目在选址和建设过程中应遵循保护耕地的原则，即在严格保护生态环境的基础上，应尽可能地利用荒地和未利用地，尽量减少或避免占用耕地和林地，并避开特殊保护区域。在国家耕地和林地保护政策的指导下，光伏用地政策分为两类：一类是鼓励在国土空间规划划定的生态保护红线、永久基本农田及法律法规禁止占用的区域外进行建设，倡导结合石漠化治理、采煤沉陷区治理，充分利用各种边坡、边沟、灰场、填埋场等土地资源；另一类是对光伏项目用地实行严格管控，明确禁止在永久基本农田、永久基本农田储备区、生态保护红线、自然保护地、重要湿地、绿色屏障一级管控区、饮用水水源一级保护区、行洪供水河道和水库的水域岸线管理范围内建设光伏项目。**关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知**(自然资办发〔2023〕12号)进一步强调新建、扩建光伏发电项目，一律不得占用永久基本农田和基本草原。占用其他农业用地的，尽量避免对生态环境和农业生产造成影响。

中国未来光伏发展的关键之一在于打破土地资源的限制。考虑到土地资源的有限性，光伏发展需避免单一模式，而应更加注重土地的多元复合利用。一方面，国家能源局正在积极推进整县范围内的分布式光伏项目(国家能源局 2021)，这些项目主要利用建筑物的屋顶空间进行光伏建设。另一方面，“光伏+农业”模式的推广则成为提升土地利用效率的重要途径。

光伏农业（agrivoltaics），即一块农业（包括农林牧渔）用地上的农业生产与光伏发电相结合的综合利用项目，涉及光伏与农作物种植、林业、温室大棚、牧业、渔业以及灌溉的综合应用。在类型上，光伏农业通常包括农光互补、渔光互补和温室大棚光伏等。

光伏农业不仅可以有助于实现能源与粮食生产的可持续发展，也能帮助农村实现乡村振兴，带动农业的收入增长。例如，Mamun et al. (2002) 对2011年至2022年的98篇英文光伏农业研究文章进行了综述，总结与分析了光伏农业系统对农业生产的影响因素。虽然结果存在一定不确定性，但有研究指出，在光伏农业系统中，周围空气温度的降低可提高光伏板的发电效率。大部分研究显示光伏板下的土壤温度明显下降，这种降温会导致莴苣和黄瓜等作物的蒸腾速率显著降低。在某些情况下，光伏系统又可以减少土壤水分的蒸发，节约灌溉用水。此外，在光伏农业项目中，农业收益通常占农场总收益的30%至35% (Mamu et al. 2022)。

然而，光伏板土地覆盖率对农业产量的影响是研究中国光伏农业是否真正实现“一地两用”的关键问题(Touil et al. 2021, MNR 2023)。本研究通过文献综述系统梳理了现有研究对土地覆盖率与产量关系的探索，发现不同农业类型对土



地覆盖率的承受范围存在显著差异。例如，对于温室大棚，土地覆盖率超过50%将导致显著减产；而在渔光互补项目中，即使土地覆盖率达到50%，渔业产量也未受到显著影响。因而，有必要通过分析土地覆盖率与产量的关系，评估中国光伏农业系统的土地覆盖率是否合理，以及对农业产量的实际影响，从而回答中国的光伏农业是否严格遵循“一地两用”原则。

此外，“一带一路”国家也在积极开发光伏。中国光伏+农业的经验，对带路国家也会有借鉴意义。目前，已有多个国家开始发布光伏农业的定义，并制定旨在促进光伏农业项目发展的政策。例如，2021年德国出台的欧洲第一项法规要求光伏农业系统的作物产量至少达到无光伏系统的参考产量的66%。法国独立认证组织AFNOR于2021年发布了“光伏农业项目标签：A类农作物项目标准”，规定要达到参考产量的80%才能获得“A类”认证。2022年，意大利发布了《光伏农业植物设计、建设和运营指南》，规定光伏农业系统内用于农业活动的土地面积至少占总太阳能装置面积的70%(Mack nick et al. 2022)。

然而，带路国家有基础，但尚未开发。越南已经有渔光互补项目实践——光伏与虾养殖结合(REccessary.com 2024)，东南亚地区的光伏农业的潜力是巨大的，即使在不占用基础作物用地的前提下，10%的潜在光伏农业项目开发理论上就可以满足东南亚地区最有雄心的可再生能源情境下的光伏装机量需求(Johnson et al. 2024)。东非光照资源丰富，光伏农业可以成为该地区实现电力可及的同时还可以增加农业产量的很好的解决方案，但是该地区政策决策者还缺乏对光伏农业潜力的认知(Randle-Boggis et al. 2021)。中国在光伏农业领域积累的实践经验，不仅对国内的能源转型和农业现代化有重要意义，也为全球能源转型提供了宝贵的案例和经验。这些经验可以助力推动可再生能源在各行业的广泛应用，并为解决光伏农业结合过程中可能遇到的问题提供实际的指导和参考。

本研究对中国光伏农业项目的近十年的发展规模、类型以及装机容量密度（直接反映光伏板土地覆盖率）进行了分析，从而回答：

本文主要分析中国光伏农业发展的现状、技术潜力及其典型案例。

- 问题一：中国的光伏农业发展现状如何？鉴于数据可获得性、时间和资源的限制，本文对发展现状的界定主要包括：农业光伏的累计装机规模、项目类型、项目数量、各省分布情况，以及项目是否遵循了“一地两用”的基本用地原则。
- 问题二：在遵循“一地两用”原则的前提下，中国光伏农业具备多大的技术潜力？
- 问题三：典型光伏农业项目具有哪些社会、经济与环境效益？目前存在哪些可行的模式？所谓模式，本文主要从投资主体、利益相关方构成、成本结构以及收益分配机制等方面展开分析

在此基础上，本文还结合中国的实践经验，对光伏农业模式在共建“一带一路”国家的应用前景进行了初步探讨。

总体而言，本文旨在对中国光伏农业项目的阶段性发展成果进行总结，为未来光伏农业项目的规划设计与政策制定提供思路和方向；同时，也希望为“一带一路”沿线国家探索本国适用的光伏农业发展路径提供参考与借鉴。

第二章

光伏农业一地两用原则的评估研究方法和潜力与案例分析

研究方法：本研究首先通过收集、筛选与分析近十年公开报道的光伏农业项目信息，统计各类项目的发展规模、区域分布及其对“一地两用”原则的遵循情况；其次，基于公开发布的各类农业用地面积，对未来发展的技术潜力进行评估；最后，从社会、经济和环境效益等方面对典型案例进行了分析与阐述。

2.1 “一地两用”视角下的光伏农业项目装机容量密度评估方法

问题一：中国光伏农业发展现状如何？本文受限于数据可得性、时间和资源限制，光伏农业发展现状主要指农业光伏装机规模、项目类型、项目数量、各省分布，以及农业光伏项目的用地是否遵循“一地两用”原则。

本文光伏农业装机规模用总装机量来替代。由于没有公开可获得光伏农业项目数据，我们采用文本数据挖掘的方法来获得数据，具体的方法参见附录一。我们分析了总装机量的10年变化趋势。此外，我们还总结了项目的类型、各省分布。

收集数据的方法主要是通过国内光伏项目网站的公开报道进行信息抓取后筛选出其中包含光伏农业的项目信息。

分析数据的方法主要通过对已经筛选出的光伏农业项目进行年份、类别和所在省份等信息进行分类，并通过大多数项目的土地覆盖率相关信息进行分析，并与50%的土地覆盖率上限进行了比较。

为了回答上述问题一，本报告首先对光伏农业（agrivoltaics）的近十年内国内外发表在期刊上文献和相关研究报告进行了综述。我们从中国储能网和北极星网收集并筛选了中国近十余年来的光伏农业项目数据，整合(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)的数据，补充了2020年、2021年和2022年的光伏农业项目数据（具体数据收集方法见附录一）。我们分析近几年光伏农业项目的发展趋势，并对各类光伏农业项目的数量、装机容量、类型以及占地面积等方面的统计和分析。

在我们收集的光伏农业项目数据库中，记录了项目报道中提到的占地面积。结合项目的装机量规模和占地面积得到装机容量密度，并绘制趋势图，与50%土地覆盖率对应的装机容量密度标准比较，分析中国光伏农业项目是否遵循“一地两用”原则。

“一地两用”的原则，指同时满足发电要求和农业生产的要求，两者要平衡。这是因为农业生产依赖阳光，光伏板的土地覆盖率太高会导致农业产量减产，影响农业生产的产量。Touil et al. (2021)综述了土地覆盖率对农业产量的影响，总体而言，为了保持上述平衡，光伏板土地覆盖率50%是上限。应用这一指标分析上述数据库中光伏农业项目的土地覆盖率，超出50%的，本文认为不符合“一地两用”原则。本文把土地覆盖率折算成装机容量密度数据，依次衡量中国3种主要类型的光伏农业项目是否符合“一地两用”原则。这三种类型包括：农光互补、渔光互补、光伏大棚。项目装机容量密度的计算方法和数据来源参见附录二。

2.2 光伏农业装机潜力预测方法

问题二：在遵循“一地两用”原则下，中国光伏农业的技术潜力还有多少？

为回答问题二， 我们使用公开发布的全国各类型农业用地面积（耕地、渔业养殖和大棚）和地理位置的数据，开展技术潜力评估，估算了在遵循“一地两用”原则的前提下开放式农业用地、温室大棚、牧光互补以及渔业养殖的农业光伏项目的开发潜力上限。

潜力计算公式：

$$\text{潜在装机容量} = \text{土地覆盖率} \times \text{直接装机容量密度} \times \text{农业土地面积}$$

- **不同光伏农业系统覆盖率设定：**

光伏农业系统可以提高土地利用率。然而，光伏板的遮荫效果可能会导致作物产量和果实品质下降。目前，许多研究都聚焦于光伏板覆盖率与作物生长之间的关系。Touil et al. (2021)回顾了之前十几年光伏农业系统的研究中光伏的存在对作物产量的影响。在这些研究中实验对象多为生长周期短的喜阴植物，如生菜和番茄。总体而言，无论是温室大棚系统还是地面开放式系统，当光伏板的土地覆盖率保持在25%或以下时，作物的产量和质量通常不会受到太严重的负面影响。然而，当覆盖率超过50%时，除草莓和菠菜外，大多数作物的产量通常会受到抑制。同时，在气候干旱地区，对于某些作物来说，光伏系统的存在有助于节水。

一般来说，光伏板对农业系统微气候的改变被认为是影响作物产量的主要原因，其中最显著的变化是辐射量。Touil et al. (2021)综述中提到，在夏季光伏板的阴影区域（遮荫率约23%）接收到的辐射量约为400 W/m^2，而与对照样地相比，光伏系统周围空气的平均温度和湿度没有显著变化，但是土壤地表的温度有所提升，光伏+农业系统和对照组的土壤最高温度分别为33.5℃和32.8℃。当温室大棚中光伏板的覆盖率达到40%时，夏季和冬季的平均辐射量分别减少了50.5%和41.0%。同时，光伏板下的水资源利用率往往更高，效率可达328% (Elnaz et al. 2018)。

相比开放式地面系统，温室大棚的相关研究更为广泛。同时目前的研究主要集中在非干旱气候下，对干旱气候条件下的报道较少。对于中国来说，太阳能资源和土地资源丰富的西北干旱地区尤为重要。因此，在这样的地区考虑一个适宜的最优覆盖率是必要的，否则可能会对结果造成影响。光伏农业土地覆盖率的适用性可能因区域的气候条件、农业种植习惯和地理特性而有所不同，结合区域差异性进行土地覆盖率设计，可优化光伏农业的土地利用效率和能源产出效益。未来研究应进一步探索区域气候、土壤条件与土地覆盖率的匹配关系，为分区域指导光伏农业发展提供科学依据。

对各种农业用地上开发光伏农业项目，需要考虑其覆盖率对产量的影响。我们在此还是以光伏大棚、农光互补（开放空间）、渔光互补以及牧光互补四种类型进行分类，表1列出了光伏覆盖率在四类光伏农业项目中对产量的影响。为了估算中国四类光伏农业项目装机潜力值，我们在光伏覆盖率的取值上选择各研究中比较保守的数值。光伏大棚光伏项目中虽然有不少研究显示30%的覆盖率对产量不会有严重影响(Jo et al. 2022)，我们还是选取更保守的25%的光伏覆盖率(Cossu et al. 2020)。农光互补（开放空间）根据现有研究显示30%的光伏遮挡率对产量没有太大的影响(Jo et al. 2022)，不过遮挡率对作物的影响还跟光伏板的布局有一定关系。渔光互补潜力估算中，我们用50%的遮挡率(Pang et al. 2022)。在牧光互补项目中，关于遮挡率的研究仍相对有限。但有研究提及，新西兰在评估光伏农业潜力时参考了德国相关标准，指出项目中不可农用地比例（land loss）不得超过10%。为此，我们在计算牧光互补项目的技术装机潜力时，也假设了最多10%的土地用于铺设光伏组件。

表1 | 光伏板土地覆盖率，具体文献参考(Touil et al. 2021)

类型	作物	覆盖率	地区	覆盖率对作物产量影响
光伏大棚	生菜	25%~100%	意大利	Cossu et al. (2020)的研究显示大部分作物在25%遮挡对产量没有严重影响，部分喜阴植物的覆盖率在60%也能生长；
		25%, 50%	日本	光伏遮挡25%不严重影响产量，超过50%遮挡减产严重(TANI et al. 2014)；
		20%	希腊，中国	20%的光伏遮挡对产量没有严重影响(Hassanien and Ming 2017),(KAVGA et al. 2017)；
	番茄	9.79%, 9.8%, 9.79%, 10%	西班牙	大部分10%左右的遮光率实验显示对作物生长没有什么影响； López-Díaz et al. (2020)研究显示超过30%的光伏遮挡对产量和质量就会有明显影响；
		20%	中国	Hassanien, Li, and Yin (2018)在20%的覆盖率下对作物生长没有明显影响；
		10%, 15%, 30%, 50%	摩洛哥	Ezzaeri et al. (2020)研究显示棋盘排列的光伏板在40%遮挡下，没有明显的减产；
		25%, 50%, 60%, 100%	意大利	Cossu et al. (2020)等人的研究显示光伏遮挡超过50%有39%的减产；
	草莓	25%, 25.9%	意大利，中国	Cossu et al. (2020)的研究显示光伏25%遮挡对产量没有严重影响，超过50%会严重减产； Tang et al. (2020)的研究显示25.9%的光伏遮挡对草莓的生长、质量和产量都更好；
	黄瓜	30%, 50%	意大利	(Cossu et al. 2020)的研究显示光伏25%遮挡对产量没有严重影响，超过50%遮挡会严重减产；
农光互补（开放空间）	黑麦/玉米	30%	韩国	30%的光伏遮挡对黑麦和玉米产量没有负面影响(Jo et al. 2022)；
	水稻	30%	韩国	30%的光伏遮挡对水稻产量两年内分别有18.7%和8.9%的减产(Jo et al. 2022)；
	土豆	50%	比利时	Wilockx, et al. (2020)的研究显示50%的光伏遮挡下叶片面积会更大； Trommsdorff et al. (2021)的结果显示光伏遮挡下的产量跟没有遮挡产量是一样的，没有遮挡率；
渔光互补	螃蟹	50%	中国	Pang et al. (2022)比较试验研究显示50%的池塘覆盖率对产量没有影响；
牧光互补	牛、羊	10%	新西兰	Vaughan et al. (2023) 考虑在新西兰的大型牧区发展光伏农业的研究中提到德国光伏农业用地中不可农用地比例不能超过10%。

通过以上文献综述可知，不同光伏农业类型对土地覆盖率的适应性差异较大。温室大棚适宜的土地覆盖率为25%-30%，超过50%时可能显著减产(Cossu et al. 2020)；农光互补系统在土地覆盖率30%以内对黑麦和玉米等作物产量无显著影响，但土地覆盖率接近50%时，大多数作物产量下降（Jo et al., 2022）；渔光互补系统则在土地覆盖率50%以下无显著产量影响（Pang et al., 2022）。这些数据为技术潜力评估和实际项目设计提供了理论依据。综上，在不影响作物生长的前提下，我们假定的不同类型光伏农业的土地覆盖率上限如表2所示。其中，渔业养殖结合光伏的覆盖率约为50%，而农光互补的覆盖率约为35%（考虑到中国整体纬度比韩国低，光照更好，结合农光互补中的作物种类的多样性，此处认为假设了35%），光伏大棚为25%，牧光互补为10%。

- **直接装机容量密度设定：**

直接装机容量密度来自文献，我们采用2019年0.865 MW/ha的数据(Bolinger and Bolinger 2021)，装机容量密度在3.3章节中有详细的叙述。

- **中国农业土地面积：**

根据国土资源部、国务院扶贫办、国家能源局联合印发的《关于支持光伏扶贫和规范光伏发电产业用地的意见》(自然资源部 2023)，光伏发电规划应遵循土地利用总体规划和相关规划要求，优先利用未利用地，且不得占用农用地；在利用劣质地时，不应占用优质土地。尽管现阶段政策明确要求光伏项目优先布局在未利用地或低效用地上，严禁占用耕地和优质农用地，本研究分析的重点仍聚焦于农业用地的光伏潜力。其核心目标并非违背政策，而是在不影响农业产量、保障“一地两用”原则的前提下，探索农业用地的可开发边界与技术路径。这一分析有助于在未来光伏发展空间趋紧、未利用地日益稀缺的背景下，为政策制定者提供潜在的解决方案与技术依据，从而实现能源转型与粮食安全的协同发展。

根据全国第三次农业普查公报数据显示(国家统计局 2017)，截至2016年末，全国温室占地面积达334千公顷，大棚占地面积为981千公顷，渔业养殖用房面积为7.6千公顷。表3的数据表明，中国潜在可利用土地主要分布在太阳能资源更为丰富的西部地区，而农业大棚主要集中在经济更发达的东部地区。根据全国温室系统网站(Sheshiyuanyi.com 2018)的数据显示，截至2018年江苏省、山东省和辽宁省的温室大棚面积位居全国前三，详细数据见附录表1。中国对经济区域的划分见附录表3。

渔光互补是一种将光伏与鱼塘结合的模式，其一般形式为上方安装光伏板，下方用于养鱼。表4为2021年全国渔业经

表 2 | 不同类型光伏农业的土地覆盖率以及光伏项目直接土地面积覆盖参数—单位面积装机量

	渔光互补	光伏大棚	农光互补	牧光互补
土地覆盖率(f)	50%	25%	35%	10%
装机容量密度-直接土地面积覆盖(P_{Direct})(MW/Acre)-2019年	0.35			
装机容量密度-直接土地面积覆盖(P_{Direct})(MW/ha)-2019年	0.865			

表 3 | 设施农业潜在可利用土地面积（单位：千公顷）

地区	中国	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
农业	134921	26184	30512	50408	27818
林业	203046	25821	33947	106908	36370
牧业	224388	942	104	221805	1537
温室大棚（玻璃）	334	130	41	95	69
温室大棚（塑料）	981	474	186	215	106

数据来源：全国第三次农业普查公报数据(国家统计局 2017)

表 4 | 渔业光伏潜在可利用面积（单位：千公顷）

地区	中国
渔业养殖面积	7009.38
2021 - 海水养殖面积	2025.51
2021 – 淡水养殖面积	4983.87
池塘	2604.63
湖泊	663.4
水库	1439.3
水沟	147.51
其他	129.03

数据来源：2021年全国渔业经济统计公报

济统计公报中公布的全国海水和淡水养殖的面积。附录表2中各省份的渔业养殖面积数据来源于2020年渔业统计年鉴(中国农业出版社 2020)。辽宁省、山东省和江苏省拥有全国最大的渔业养殖面积。在海水养殖面积方面，最大的省份为辽宁省、山东省和福建省；而在淡水养殖面积方面，最大的省份为湖北省、安徽省和湖南省。

2.3 典型光伏农业项目的调研方法与分析框架

问题三：典型光伏农业案例有哪些社会、经济和环境效益，以及目前哪些模式？本文所指模式指投资主体、利益相关方组成、成本构成、以及收益分配情况。

为探讨典型光伏农业项目在社会、经济和环境维度的综合效益，以及不同模式的构成与运行机制，本文开展了多案例调研。所述“模式”包括投资主体、利益相关方组成、成本结构及收益分配等要素。

案例筛选：

案例选择遵循便利抽样原则，结合作者以往研究经验及调研可及性，覆盖农光互补、渔光互补、牧光互补、光伏大棚和光伏灌溉五种典型项目类型。具体包括：

- 山东东营渔光互补项目
- 海南光伏温室大棚项目
- 陕西靖边毛乌素沙漠光伏扬水灌溉项目
- 内蒙古“光牧旅”一体化产业园项目
- 江苏连云港农光互补电站项目

项目分布涵盖山东、海南、陕西、内蒙古与江苏五省，具有一定代表性。

数据获取方式：

案例信息主要通过实地调研获取，调研对象包括农户、项目开发企业代表及地方政府管理人员。访谈内容围绕项目投资结构、农业与光伏的融合方式、成本变化、收益结构及其对当地社会与生态的影响等，确保与本文提出的研究问题一致。

指标与测算方法：

- **经济效益**评估涵盖光伏电站投资成本（土地成本、基础设施建设）、运维成本与发电收益，以及农业端的投入、人工成本与产量变化所带来的收益变动。
- **社会效益**包括项目对当地居民收入、就业机会和区域经济带动效应的影响。
- **环境效益**主要通过碳减排和节水效果评估。鉴于缺乏实测数据，碳减排量采用“化石能源替代发电减排效益”与“并网项目减排效益”估算方法，具体计算方式见附录三。

数据局限性：

需指出，部分案例存在数据缺失或不完整的情况。例如，海南温室光伏项目在农业端缺乏系统性监测数据，影响了对农业收益和成本变化的量化分析。此外，本研究仍存在以下局限：

1. 数据获取依赖公开渠道及有限实地访谈，覆盖范围有限；
2. 不同土地类型对光伏遮光适应性的区域差异尚未充分建模；
3. 潜力评估过程中未系统纳入极端气候对农光协调的影响，可能对结果解释存在一定偏差。

第三章

中国光伏农业大部分没有很好的遵循“一地两用”原则

研究结果：本研究基于近十年中国光伏农业项目的数据，分析了装机容量密度这一反映光伏板土地覆盖率的关键指标。结果显示，已建成的大部分项目土地覆盖率超过50%，未能完全遵循“一地两用”原则，其遮光设计仍需进一步优化，以减少对农业生产可能带来的负面影响。

3.1 中国光伏农业装机量发展迅速，装机规模大及区域分布广

（一）中国光伏农业项目的快速增长

截至2022年10月，中国已累计建设了513个光伏农业项目，总装机容量达31.19 GW，平均每个项目规模为60.8 MW。项目类型丰富，包括光伏大棚、渔光互补、农光互补等。其中农光互补和渔光互补项目占比最大，分别为37%和33%。

根据研究方法章节中对问题一的分析方法，进行了数据收集和处理。截至2022年10月，我们共整理得到513个光伏农业项目。这些项目的总装机规模达到了31.19 GW，平均每个项目的规模约为60.8 MW，项目年份跨度从2011年延续至2022年10月。收集到的项目类型及其数量分别为：光伏大棚112个、渔光互补170个、农光互补188个、牧光互补14个、林光互补15个、光伏扶贫13个，以及茶光互补1个。

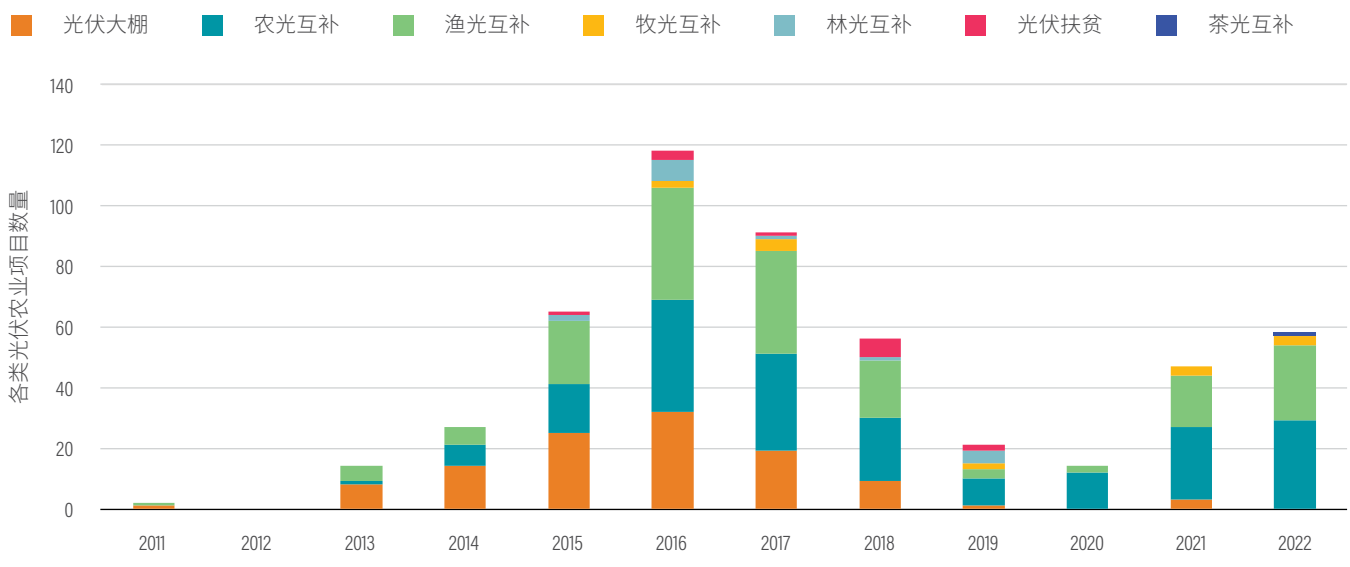
根据我们的统计，如表5所示，中国的光伏农业项目平均规模超过60 MW，项目装机量中位数为40 MW，，最大规模的光伏农业项目是宁夏的1 GW的光伏枸杞项目。值得一提的是，我们的数据库中也收录了一些规模小于或等于1兆瓦的项目，共计24个；此外，装机规模在1兆瓦到10兆瓦之间的光伏农业项目共有48个。这些小规模项目尽管单体容量不大，但在特定发展背景下可能具有更高的参考价值。

表 5 | 中国光伏农业各类型项目数和平均规模

类型	个数	平均规模(MW)
所有光伏农业项目	513	60.8
光伏大棚	112	41.4
渔光互补	170	69.2
农光互补	188	52.5
牧光互补	14	46.0
林光互补	15	82.7
光伏扶贫	13	38.0
茶光互补	1	0.1

注释：数据为作者根据以往公开数据筛选以及(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)提供数据库合并而成

图 1 | 每年中国光伏农业的项目数量，2011-2022



考虑到共建“一带一路”的大多数国家仍属发展中国家，其中不乏低收入国家和最不发达国家，其投融资能力有限、市场接受度较低，难以承载大规模能源基础设施投资。在此背景下，这类小型、低成本、易维护的光伏农业项目更具实用性，能够以较低的资金门槛推动绿色能源在农业领域的落地应用。

这也与当前中国推动“一带一路”合作的方向转变相契合——由早期以“大基建”为主，逐步过渡到更加注重“小而美”的民生项目建设。在当前阶段，小规模光伏农业项目在提升农村能源可及性、促进农业增产增收、改善民生等方面的潜力，或许更值得关注与借鉴，也为中国海外能源援助和投资提供了新的实践路径和合作模型。

（二）政策驱动发展趋势显著

2013年至2018年间，中国光伏农业在政策推动下发展迅速。2018年后，由于补贴退坡政策，光伏农业项目增长放缓。但自2020年“双碳”目标提出以来，项目数量和装机容量再次大幅提升。

中国光伏装机容量的变化趋势与农业光伏的发展趋势具有高度相似性，反映了政策驱动和市场扩展对整个行业协同发展的影响。图1显示了2011年至2022年期间光伏农业装机数量的趋势。图2展示了中国光伏农业项目装机容量的变化趋势。2019年，光伏农业项目的实际装机量有所增加，但到了2020年降至最低点。在这一时间段中，特别是2018年至2020年间，装机数量总体呈现下降趋势，这与中国整体光伏装机容量的基本保持了类似的涨落趋势。这种下降趋势主要归因于国内法规和激励政策的变化，尤其是在该时期国内光伏并网项目开始不再享受补贴。从具体光伏农业项目类型看，2021年和2022，农光互补项目数量开始逐渐恢复并呈现增长态势。虽然本报告并未深入探讨光伏农业项目装机量变化与政策的相关性，但值得指出的是，光伏大棚项目自2018年以后开发数量明显减少。而渔光互补项目在数量上一直占据重要比例。

根据国家能源局数据，中国整体光伏装机容量自2013年以来呈现持续增长的趋势，尤其在2016-2018年期间因政策推动出现快速增长，随后在2018年由于补贴退坡政策有所放缓，但自2020年起再次迎来高速增长。这一趋势与农业光伏的发展高度吻合。

- **2013-2018年：**农光互补和渔光互补等模式在这一时期快速扩展，例如山东、江苏等地的多个大型农业光伏项目相继投产。
- **2018-2020年：**政策调整使光伏装机整体增速放缓，农业光伏项目扩展步伐也有所减慢。受光伏政策的影响，中国光伏农业项目的并网数量在2018年和2019年出现了快速下降。特别是2018年5月31日，国家发改委、能源局和财政部联合发布了《2018年光伏发电有关事项的通知》(NDRC 2018)，宣布从2018年下半年起，将降低集中式光伏电站和分布式光伏电站的补贴。随后，许多光伏+农业项目退出补贴，转入平价运营模式，全国光伏装机量在此期间也受到影响，出现回落。

图 2 | 中国光伏农业每年的装机量，2011-2022

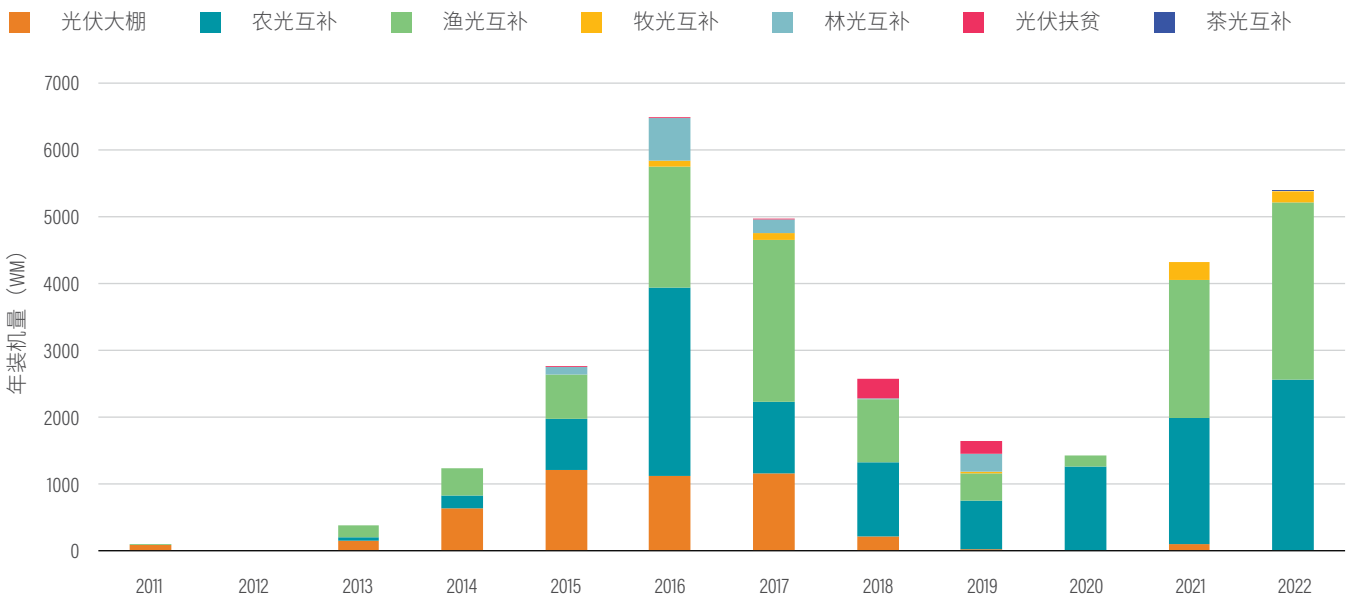
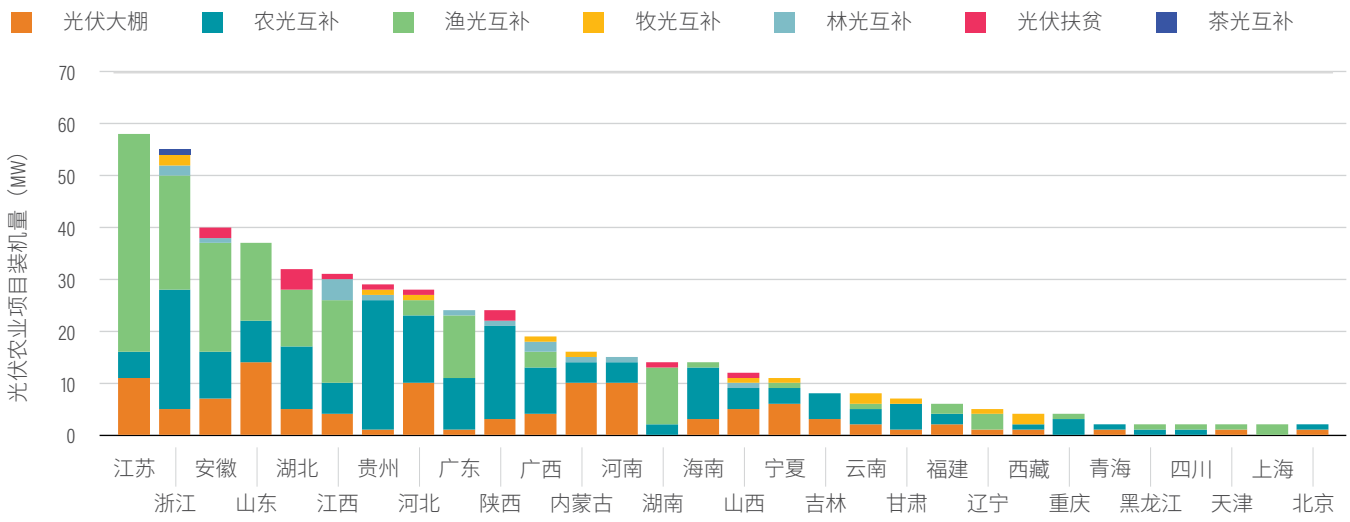


图 3 | 光伏农业项目数各省市分布



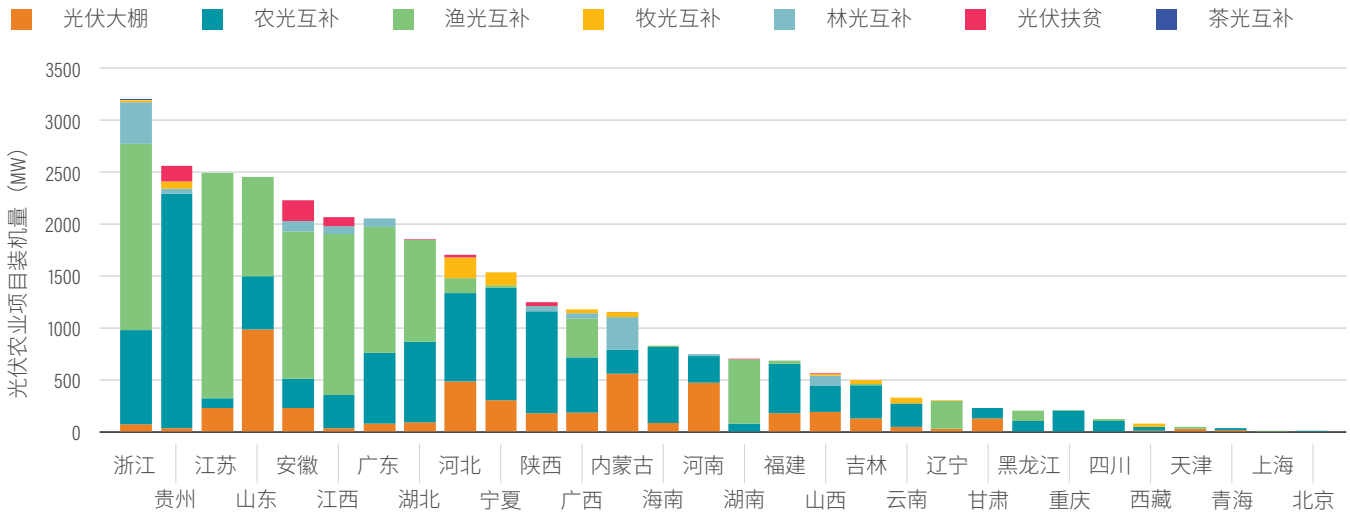
- **2020年至今：**随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，光伏装机再次提速，农业光伏项目迎来新一轮发展高潮，集中式和分布式项目均有所增加。2021年起，多部委纷纷发文，积极推动光伏产业和现代农业、乡村振兴融合发展，提高土地综合利用效率，促进农村地区经济创收，助力实现碳达峰碳中和目标。这包括2021年《国家能源局、农业农村部、国家乡村振兴局联合发布《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》的通知、2022年国家能源局经研究并商国家发展改革委、自然资源部、农业农村部、国家林草局后答复政协第十三届全国委员会第五次会议第00454号《关于支持发展农业光伏项目的提案》以及2023年国家能源局、生态环境部、农业农村部、国家乡村振兴局联合发布关于组织开展《农村能源革命试点县建设方案》的通知。

（三）项目分布呈现东强西弱特征

东部沿海省份在光伏农业项目的数量和装机容量上占据优势，但西部地区因土地资源充裕，亦有多个大型项目，如宁夏的1 GW光伏枸杞项目。

截止2021年，中国各省的农光互补项目分布情况显示，这些项目几乎遍布全国每个省份。然而，各省的光伏农业项目数量和装机量存在差异，东部沿海省份在项目数量和装机量方面均多于西部省份，这与各省光伏总装机量的分布状况相似，如图3和图4所示。同时，我们也注意到，尽管西北地区的光伏农业项目数量可能不多，但仍有大型项目存在，例如宁夏的1 GW光伏枸杞项目。

图 4 | 光伏农业装机量各省市分布



3.2 中国光伏农业的“一地两用”缺乏对农业产量影响的考虑

（一）“一地两用”的核心原则

光伏农业的初衷在于实现土地的双重利用，即兼顾光伏发电与农业生产。然而，通过项目数据分析发现，大多数光伏农业项目的土地覆盖率超过50%，高于农业生产的覆盖率上限。

光伏农业项目的开发和应用旨在解决能源项目占用过多土地的问题，并试图与农业生产相结合。因此，保证农业生产过程和产量不受光伏项目过大影响是至关重要的。农业生产依赖阳光，而光伏项目对农业生产的一个重要影响因素是土地覆盖率（直接导致光伏板遮挡自然光，其遮挡自然光线比例为遮光率，不过有些透光光伏板，同样覆盖率下透光率可以更高）。在光伏农业项目中，光伏部分负责发电，单位面积土地上希望安装尽可能多的光伏板来发电获得更多售电收益，而光伏下面的农业生产其产量大多依赖阳光，过度的遮挡会导致减产，所以在光伏农业项目中，光伏组件的土地覆盖率需要在农业生产和发电之间有一个平衡。我们将在后续内容中详细列举现有光伏农业项目研究中土地覆盖率对各种农产品（包括蔬菜、鱼类、虾类和蟹类等）的影响。

（二）装机容量密度：土地覆盖率的重要指标

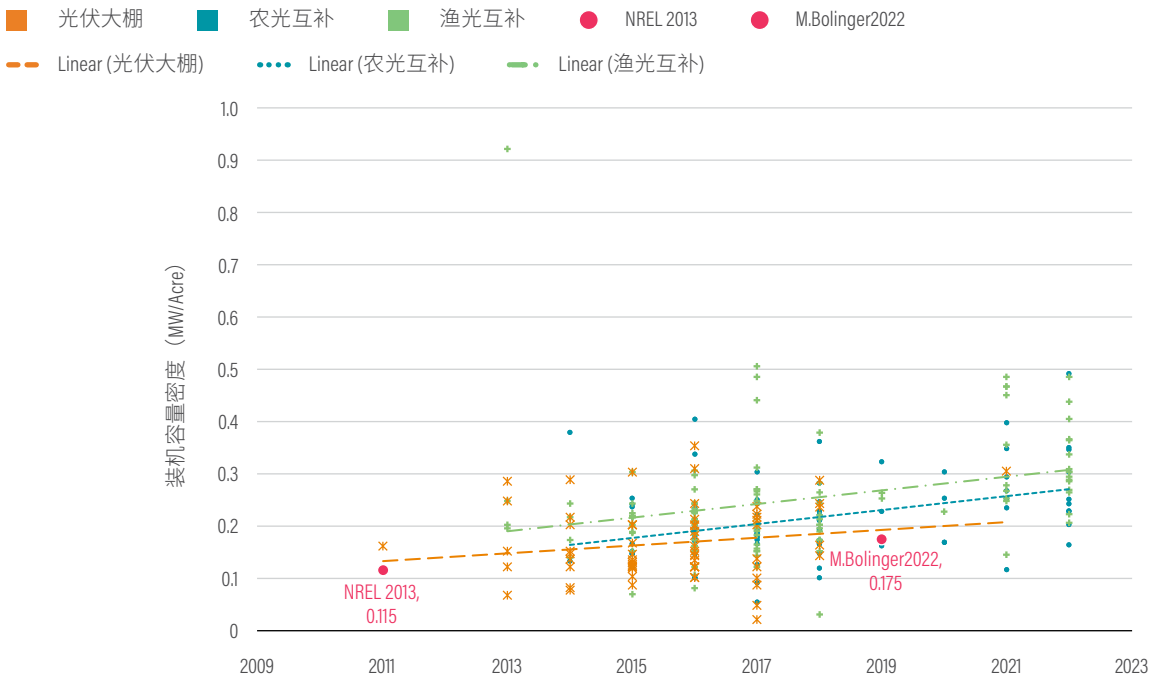
因为我们收集的光伏农业项目信息中没有光伏板的土地覆盖率信息，所以我们这里用了另外一个反应土地覆盖率的关键指标——装机容量密度。光伏农业项目的装机容量密度值可以通过项目装机量和项目占地面积计算得到，而在我们收集的光伏农业项目数据库中，记录了大部分项目报道中提到的占地面积。装机容量密度=装机量/占地面积（Bolinger and Bolinger 2021），其中有两个装机容量密度概念需要区分：一个是直接装机容量密度，指光伏项目的装机量与其所直接覆盖的土地面积之比；二是项目装机容量密度，指装机量与整个项目用地之比。装机容量密度的详细说明和计算见附录二。

这里我们假设光伏板实际土地覆盖率为 f=50%，那么 2011 年和 2019 年光伏项目实际装机容量密度分别为 $P_{Project}$(2011)和$P_{Project}$(2019)。通过比较我们收集的光伏农业项目的装机容量密度值与$P_{Project}$(2011)=0.115 MW_{DC}/Acre 和 $P_{Project}$(2019)=0.175 MW_{DC}/Acre 两个值的大小，我们可以知道光伏农业项目的土地覆盖率是否超过50%。

如图5所示，图中横坐标代表项目年份，纵坐标表示项目的装机容量密度。图中橘色“+”点为光伏渔业项目，蓝色“·”点是农光互补项目，绿色“*”是光伏大棚项目。为了跟典型的土地覆盖率为50%的光伏项目的装机容量密度进行比较，图中标出了2011年和2019年的值，为两个红色圆点“NREL2013” 和 “M.Bolinger2022”，其装机容量密度分别为$P_{Project}$ (2011)=0.115 MW_{DC}/Acre (Ong et al. 2013)和 $P_{Project}$(2019)=0.175 MW_{DC}/Acre (Bolinger and Bolinger 2021)。

土地覆盖率相同的情况下，光伏项目的平均装机容量密度提升主要归因于光伏组件转换效率的不断提高(Bolinger and Bolinger 2021)。在图中位于两个红色圆点连线以上的所有光伏农业项目，可视为其土地覆盖率已超过50%。为更系统地评估各类光伏农业项目的土地覆盖率是否整体偏高，本文对图5中的装机容量密度数据按年份进行了线性趋势拟合。图中蓝色虚线、橘色点线和绿色点线分别表示农光互补、渔光互补和光伏大棚项目的整体发展轨迹。拟合结果显示，光伏大棚项目的平均装机容量密度最低，说明其组件布设方式更趋于控制在50%的覆盖率下运行；渔光互补项目的装机密度最高，反映其土地覆盖率普遍较高；而农光互补项目则介于两者之间，呈现出一定的结构性差异。这一趋势提示在未来项目设计中，应更细化地根据类型设定土地光伏覆盖率以保障农业产出的平衡参数。

图 5 | 光伏农业项目的装机容量密度及其线性趋势与50%土地覆盖率的比较



注释：根据文献综述所知，一般认为50%土地覆盖率为各种光伏农业的上限

（三）土地覆盖率与产量之间的矛盾

我们通过文献调研得出的结论与图5所示的光伏农业项目的土地覆盖率趋势大致一致。对于光伏大棚项目，光伏板的土地覆盖率对不同种类的蔬菜和作物的影响不同。一般情况下，覆盖率不应超过50%。有些喜阴的蔬菜即使在50%的土地覆盖率下，其产量也不会受到太大影响。然而，对大多数蔬菜和作物而言，为了保证产量，其土地覆盖率最好保持在35%、20%或更低的水平。对于渔光项目，有研究表明即使在50%的土地覆盖率下，渔业产量也不会受影响(Pang et al. 2022)，各种作物上面安装光伏的研究中的土地覆盖率后面章节会做更详细的介绍。

（四）数据分析揭示的问题

基于装机容量密度的数据分析发现，中国光伏农业项目的实际土地覆盖率普遍超过50%。这一现象表明，在部分项目设计中，而忽视了农业生产需求。

图5所呈现的装机容量密度趋势，基本符合温室大棚与渔业在光照需求方面的系统性差异，同时也反映了随着光伏组件转换效率不断提升，单位面积装机容量密度逐年上升的技术演进规律。然而，从整体看，三类光伏农业项目的土地覆盖率均普遍超过50%。这意味着许多项目在实际应用中可能未充分权衡遮光对农作物或水产产量的潜在影响。随着光伏农业装机规模的持续扩大，这一倾向值得高度重视与规范干预。

在土地覆盖率分析中，我们做出如下假设与处理说明：

- 对于收集到的光伏农业项目装机量，本文假定所披露的数据为“直流侧”（DC）装机容量。根据(Bolinger and Bolinger 2021)的研究，若以“交流侧”（AC）计算，同一项目的装机容量密度将显著偏低；
- 在数据采集中，我们已对公开报道中的“规划面积”与“实际占地面积”、以及“规划装机容量”与“实际装机容量”进行了必要的甄别与校正；
- 50%的土地覆盖率被作为评估是否符合“一地两用”原则的参考上限值。该数值源于多个研究中针对农光互补、光伏大棚和渔光系统提出的遮光上限建议。相关研究普遍认为，覆盖率高于50%将对农业产量产生较大负面影响。

本研究结合光伏农业文献综述的数据与实际项目的土地覆盖率统计，发现大多数光伏农业项目的土地覆盖率超过了50%，在渔光互补项目中，这一覆盖率未显著影响水产养殖的产量。然而，在温室大棚和农光互补项目中，覆盖率的过高可能对农作物产量构成威胁。**这表明已经建成的大部分光伏农业项目尚未完全遵循“一地两用”原则，其遮光设计需进一步优化以避免对农业生产的负面影响。**

3.3 总结：中国光伏农业发展迅速、形式多样，需注意对农业生产的影响

中国不仅在全球光伏供应链和装机量方面占据领先地位(IEA 2022)，而且在“光伏+”领域也取得了显著的进展。这种模式将光伏技术与各行业结合，展现出了丰富的创新和应用可能性。以光伏加农业为例，中国已经开展了包括光伏+农业、光伏+渔业、光伏+大棚、光伏+牧业、光伏+扶贫、光伏+茶叶等多种形式的项目。本研究分析结果显示这些光伏农业项目的总装机量在中国已经达到31 GW。

中国的光伏农业主要分为三大类：农光互补（光伏+农作物）、渔光互补和光伏大棚。尽管近几年光伏大棚的开发和并网报道较少，但这三类整体在中国光伏农业的发展中仍然非常显著。

从发展的地域分布看，东部沿海省份在光伏农业项目的数量和装机量上均超过西部省份，但西部省份在某些大型项目上具有优势。通过对农光互补、渔光互补和光伏大棚这三类项目的装机容量密度进行统计分析，我们发现这些项目整体上遵循了各类农业生产对土地覆盖率的不同要求，但大多数光伏农业项目的土地覆盖率超过了研究中揭示的各类农业生产的最低要求。

优化设计的必要性：

从数据上看，中国的大部分光伏农业项目可能并没有考虑过高的土地覆盖率对农业产量的影响，或者对于大部分的光伏农业项目来说，其产量不是项目的优先考虑。这违背了光伏农业项目开发的初衷——一种土地两种用途，达到共赢。

为实现光伏农业项目的可持续发展，应优化光伏板的布局和土地覆盖率设计，确保农业产量不受显著影响。同时，需在政策层面明确土地覆盖率的规范要求，以指导未来项目建设。

专栏1 | 中国的渔光互补创新发展快速

中国的光伏农业类型种类丰富，其中规模最大之一的渔光互补—渔业养殖与光伏发电相结合在中国发展最好，也是中国光伏农业的创新，随着中国光伏影响力，东南亚和非洲也开始有渔光互补项目的开发。中国是全球最大的水产养殖国家，2020年中国水产品总产量为6549.02万吨，其中养殖产量为5224.20万吨，占全国渔业总产量的79.8%(农业农村部 2021)。渔光互补是一种结合水上发电和水下养殖的新型渔业模式。(Pang et al. 2022)首次探索了在池塘中将光伏发电与中华绒螯蟹养殖相结合的可行性。研究结果表明，光伏板下的养殖方式能够促进螃蟹的生长，并增加其可食部位的氨基酸含量。然而，光伏板对螃蟹的脂肪酸组成和组织颜色产生了一定的负面影响。多项研究表明，渔光系统可以显著增加水产养殖的产量(Li et al. 2020; Zhang et al. 2022)。渔光系统是中国光伏农业系统中的一项重要创新和应用方式。

第四章

光伏农业装机量在遵循“一地两用”原则前提下仍具有很大潜力

研究结果：基于全国农业普查数据，并结合不同系统可接受的土地覆盖率上限，对中国光伏农业的技术装机潜力进行了系统估算。结果显示：农光互补潜力最大，约40,000 GW，主要集中在西部地区；牧光互补潜力约19,407 GW，其中98%位于西部；渔光互补潜力约为3,000 GW，其中淡水养殖潜力约为海水养殖的两倍；温室大棚潜力较小，仅284 GW，但东部占比近一半。

光伏农业装机量潜力的计算公式为：光伏农业的装机量潜力=潜在可利用土地面积×土地覆盖率×装机容量密度（$Potential_{solar} = Area \times f \times P_{Direct}$）。其中耕地和大棚农业土地面积数据来源包括国家农业普查(国家统计局 2017)、渔业养殖农业土地面积来自渔业统计年鉴(中国农业出版社 2020)。土地覆盖率数据采用现有文献中不同光伏农业类型的上限值，其中如光伏大棚25%、农光互补35%和渔光互补50%、牧光互补10%(Jo et al. 2022,Cossu et al. 2020,Pang et al. 2022,Touil et al. 2021)。单位面积光伏装机量参数我们假定为0.35 MW/Acre，即0.865 MW/ha。各类土地覆盖率的设定以及装机容量密度的设定参数详见表2。全国的农业和渔业土地面积来自全国第三次农业普查公报数据和2020年渔业统计年鉴。

本报告根据以上参数的假设和公开获取的农业面积数据来计算全国光伏农业的装机潜力。

4.1 光伏农业的装机量潜力估算和结果

全国农光互补的装机潜力估算结果如表6所示。对于开放式系统的农业种植而言，太阳能资源丰富的西部地区拥有大量廉价土地资源，其装机潜力高达15259 GW，是东部地区的两倍。特别是牧光互补的潜力在西部地区更为突出，占全国牧光互补装机潜力的98%。然而，由于西部地区远离电力负荷中心，该地区的光伏农业建设基础尚未充分发展。相比之下，东部地区虽然经济发达，但土地资源稀缺，这成为限制光伏农业电站发展的主要因素。

中国的农业设施面积已持续增长三十余年，近年来增长速度有所放缓，但许多已建设的农业设施因年久失修而进入改造和翻新阶段，这为光伏农业的发展提供了巨大的市场潜力。对于温室大棚类型的光伏农业项目而言，根据全国农业普查的数据计算，玻璃大棚加上塑料大棚的光伏技术潜力为284GW。东部地区具有更高的潜力，约占全国潜力的50%。基于2018年的各省温室大棚面积数据(Sheshiyuanyi.com 2018)，我们估算了各省温室大棚的光伏技术潜力，总共408 GW，江苏省以73 GW的装机潜力领先于其他省份，其次是农业大省山东省，该省作为东部地区光照条件最佳的省份之一，其装机潜力达到63 GW，辽宁省以39 GW排在第三位，具体数据详见附录四。根据全国农业普查数据和全国温室大棚面积数据两个来源估算的潜力存在差别，我们以全国农业普查数据得到的潜力为准，全国温室大棚面积数据得到的潜力主要用于分析各省的潜力大小。在已有的光伏农业潜力研究中，Jing et al. (2020)在他们的研究中估算的光伏农业潜力值为112 GW，而我们选用的全国温室大棚面积数据(Sheshiyuanyi.com 2018)估算得到。我们的估算值408 GW与他们的差别主要是估算过程中的参数的选取上的差异：他们的装机容量密度为0.45 MW/ha，光伏遮挡率20%，然后再此基础上又引入了开发率因子，最高为60%，我们用的参数分别是装机容量密度0.865 MW/ha，土地覆盖率25%，开发率因子100%。考虑的参数的影响，两者结果是一致的。

中西部地区虽具备发展机械化大农场的条件，但农村面临就业难、收入低、基础设施不完善以及土地浪费等问题，这些问题的解决将是充分发掘光伏农业潜力的关键。

根据文献研究中渔光一体项目的50%光伏板覆盖率上限，我们估算了全国渔光互补的装机潜力，如表7，总计约为3031 GW，此数值是根据2021年全国渔业养殖面积估算得到。我们还根据2020年渔业统计年鉴发布的各省养殖面积数据进行了统计计算，估算得到的装机潜力为3074 GW，两个数值基本上是一致的。其中，淡水养殖的装机潜力约为海水养殖的两倍。淡水养殖的渔光互补项目主要在湖北省等内陆省份开展，鱼塘养殖的装机潜力约占淡水养殖总装机潜力的50%。

表 6 | 各类型光伏农业技术潜力估算值(GWp)

装机潜力（单位：GWp）	全部	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
农业	40,841	7,926	9,236	15,259	8,421
牧业	19,407	81	9	19,183	133
温室大棚（玻璃）	72	28	9	21	15
温室大棚（塑料）	212	102	40	46	23

表 7 | 渔光互补技术潜力估算结果(GWp)

装机潜力 (单位: GWp)	全国
渔业养殖	3,031.1
2021 - 海水养殖	875.9
2021 – 淡水养殖	2,155.2
池塘	1,126.3
湖泊	286.9
水库	622.4
水沟	63.8
其他	55.8

鉴于我国幅员辽阔，东西部地区在土地资源上存在明显差异，我们根据2020年渔业统计年鉴发布的各省养殖面积数据，比较了各省份的渔光互补潜力。中东部沿海地区凭借丰富的海水及淡水资源，具备发展“光伏+渔业”的潜力。未来渔光互补的潜力主要集中在东南沿海地区，其中潜力最大的省份为辽宁省、山东省和江苏省，装机潜力分别达到363 GW、328 GW和261 GW。更多具体数据和分析见附录五。

林业用地发展光伏，虽然在我们收集的项目中也有一些报道记录，但是并没有详细的林业用地上安装光伏的遮挡率的要求，而且一般林地跟保护区以及生态红线密切相关，所以我们在这里没有进行估算。

4.2 光伏农业潜力分析总结：农光互补具备最高发展潜力

中国不仅在全球光伏供应链和装机规模方面处于领先地位，也在“光伏+”融合发展领域取得了显著成就。通过将光伏技术与多个产业深度融合，“光伏+”模式展现出广阔的创新应用前景。其中，光伏农业作为典型代表，已在国内形成多种融合形式，包括光伏与农作物种植、渔业养殖、温室大棚、畜牧业、荒漠治理以及茶园等多种类型结合。截至2022年10月，全国光伏农业项目累计装机容量已达31 GW。

可再生能源的发展往往对土地资源提出较高需求，而光伏农业作为一种创新模式，提供了缓解土地资源冲突的潜在解决路径。基于全国农业普查数据，结合各类光伏农业系统可接受的土地覆盖率上限，本文系统估算了中国四类光伏农业系统的技术装机潜力。结果显示：农光互补系统潜力最大，约为40,000 GW，主要分布在资源条件优越的西部地区；牧光互补潜力约为19,407 GW，其中98%同样集中在西部；温室大棚光伏项目的技术潜力相对较小，仅为284 GW，但东部地区占据近一半比例；渔光互补系统的潜力约为3,000 GW，且淡水养殖的装机潜力约为海水养殖的两倍。

展望未来，为实现农业功能与光伏系统的协同可持续发展，亟需制定涵盖土地覆盖率、环境影响评估等方面的统一建设标准。随着中国在光伏农业领域技术与管理经验的不断积累，其成熟的模式有望向海外复制推广，为其他发展中国家提供资金、技术与项目经验支持，助力全球清洁能源转型与农业现代化的同步推进。

第五章

光伏农业具体案例分析

研究结果：通过五个具有代表性的案例，展示了我国光伏农业发展的多样化路径与可复制经验，涵盖渔光互补、温室光伏、光伏灌溉、牧光互补和农光互补等类型。案例对比表系统呈现了投资主体、土地利用方式、收益分配机制及农户参与模式等关键要素，反映出“光伏+农业”的多样化融合实践。这些案例不仅展现了不同地区因地制宜的成功经验，也为未来光伏农业项目的设计与政策制定提供了重要参考。

5.1 山东东营渔光互补案例

“渔光一体”是一种将水产养殖与太阳能发电相结合的生产模式。这种方式在进行水产养殖的同时，在水面上架高安装光伏板，从而满足水下养鱼与水上发电的双重需求。目前，渔光一体项目已形成了四种类型，分别为：在水库上、池塘上、湖泊上、海上建立光伏板。

(1) 山东东营渔光一体200 MW项目

山东东营渔光一体项目位于山东省东营市现代畜牧业示范区，地理位置介于东经118°5′、北纬38°15′之间，该地区太阳能资源丰富，被列为光伏发电建设基地。东营项目采用“渔光一体”模式开发，在鱼塘上建设光伏电站，养殖面积约4200亩，形成“上可发电，下可养殖”的双重经营模式。东营项目光伏电站建设规模为200 MW，于2021年3月建成并网，年平均上网电量约26000万kWh。

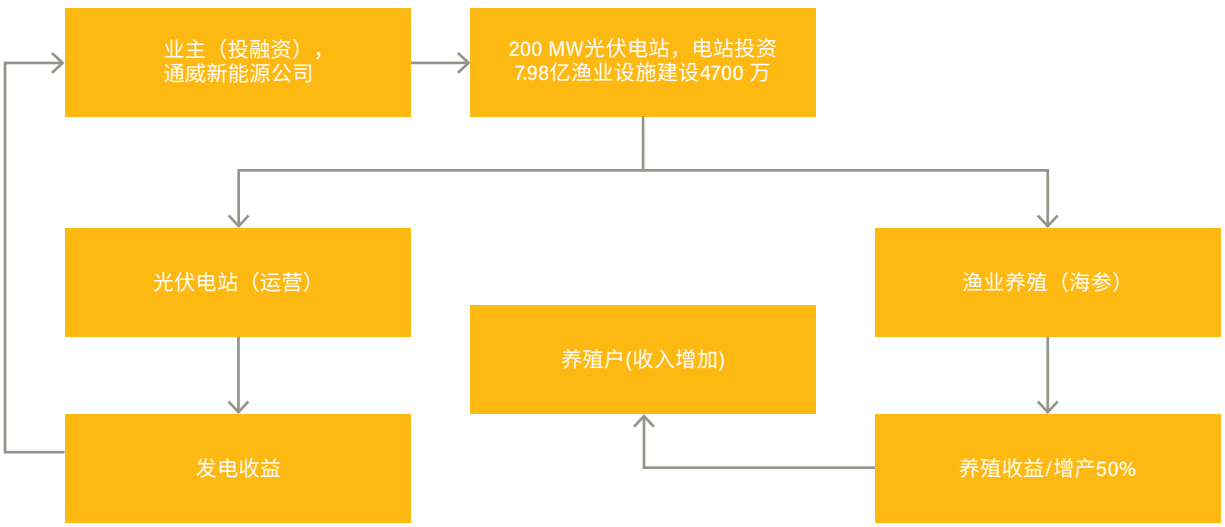
图 6 | 山东东营“渔光一体”项目

来源：作者陈靖提供

该“渔光一体”项目将每口池塘科学地划分为投饲捕捞区和光伏板安装区两个区域。光伏区运维空间更大，效率更高。投饲区不布置光伏发电系统，加深捕捞抬网区，从而很好地解决了因光伏电站建设打桩和遮阴造成的投饲、捕捞、清淤、增氧及内外源性污染等问题。借助池塘底质改良和固液分离技术，配套的排污水系统能够有效分离有机颗粒废弃物，固体沉积物可作为农作物的有机肥，而上清液则用于滴灌水生蔬菜和花卉。通过生物净化，水质可达渔业标准或三类地表水标准后再循环利用，实现养殖废物的资源节约化利用，整个项目零污染且零排放。

东营项目采用通威独创的“365科学养殖模式”，养殖海参。通过精准组合投喂、均衡增氧、藻菌调控、鱼病防控、“汽提”技术（即汽提法，是指通过让废水与水蒸气直接接触，使废水中的挥发性有毒有害物质按一定比例扩散到气相中去，从而达到从废水中分离污染物的目的）和底排污等六大关键技术，在保持饵料系数不变的基础上大幅提高养殖产量。海参生长对温度的要求较苛刻，超过20℃时海参就会进入夏眠状态，而低于5℃则停止生长。通过水面上方光伏组件板的适度遮蔽，既可以在天气寒冷时保持水温，也可以在天气炎热时遮阴以防止水温过高，还能为水中增氧机等渔业设备提供源源不断的绿色电力，保持海参池溶氧量，减少高温性疾病的爆发，对海参生长十分有利。此外，东营项目采用无线传输、传感器和软件开发技术，集成多种物联网设备，实现水质监测、环境监控、精准投喂和生物生长调控的自动化管理，从而推动养殖全过程的数字化和智能化。

图 7 | 山东东营通威渔光一体项目投资收益图



(2) 成本效益：发电的同时改善农业设施增加渔业产量

山东东营“渔光一体”项目由通威新能源公司全额投资，协同规划、设计、建设光伏电站和渔业基础设施。通威公司对塘梗、进排水、池底、道路、水电、房屋等配套设施进行修复，将原有池塘改造成了标准的池塘，其渔业设施建设的投资超过4700万。项目一期建设规模200MW，光伏电站等效发电小时数为1300小时/年，年均上网电量26000万kWh，电价为山东省的燃煤发电标杆上网电价0.3949元/kWh（不含增值税为0.35元/kWh），东营项目光伏发电年均净利润（年均净现金流）约3600万元。

该“渔光一体”光伏电站部分初期投资成本为3.99元/瓦，日常运营费用为0.03元/瓦/年，项目固定资产折旧年限25年，项目享受了所得税“三免三减半”的政策。三免：自企业取得应税所得的年度起，前三年免征企业所得税；三减：在免税期满后的三年内，企业所得税税率减半征收。项目全投资全生命周期静态度电成本（含税）0.19元/千瓦时，全投资全生命周期毛利率54%，全投资内含收益（IRR）8%，全投资静态回收期11年。

在该项目中，农民通过养殖渔业获得经济效益。农户主要养殖虾和海参，通过对池塘的改造和光伏板的遮阴作用，虾和海参的产量从以前的100斤/亩，达到现在的150斤/亩，产量增加了50%，项目海产品总产量为31.5万公斤/年，蛋白质产量6.3万公斤/年。

(3) 环境效益：200兆瓦项目年温室气体减排量可达21万吨

根据国家气候战略中心公布的最新的中国区域电网基准线排放因子(生态环境部 2019)，山东省属于华北区域电网，减排效益的计算可用可再生能源并网发电方法学CM-001-V02，其组合边际CO_2排放因子$EF_{grid,CM}=EF_{grid,OM}\times W_{OM}+EF_{grid,BM}\times W_{BM}$，其中$EF_{grid,OM}$=0.9419($tCO_2e/MWh$)，$EF_{grid,BM}$=0.4819($tCO_2e/MWh$)，对于太阳能项目权重因子分别为$W_{OM}$=0.75和$W_{BM}$=0.25，根据每年发电量为260000MWh，可以计算出其温室气体减排效益为214994吨。

山东东营渔光互补项目结合光伏发电与水产养殖，通过“上发电、下养殖”的模式，实现了经济效益与生态效益的双赢。项目占地4200亩，建设规模200MW，年发电量约260,000 MWh，每年可减少二氧化碳排放215,000吨。同时，光伏板的遮光效应优化了水温条件，提高了水产养殖效率，虾和海参的产量提升50%，展现了光伏与养殖结合的独特优势。

该项目通过区域科学规划、智能化水质监测和废弃物资源化利用，成功实现了零污染目标，为光伏农业项目的生态设计提供了典范。其经验表明，科学分区和技术优化是渔光互补模式成功的关键，特别适合于沿海或内陆渔业养殖区，为类似地区的绿色能源和现代渔业发展提供了重要参考。

(4) “渔光一体”成功经验值得在水产养殖中推广

“渔光一体”通过在池塘、滩涂、湖泊等设施农用地或未开发土地（非基本农田）上架设光伏板，实现“水上发电、水下养鱼”，高效利用土地空间资源。合理布置的光伏组件可适度遮光，调节水温、抑制藻类滋生，优化鱼类生长环境，有效减少鱼病和药物使用，提升水产品质量，实现“渔业、电力、环保”三重效益。此外，该模式还具备发展休闲渔业和科普旅游的潜力，可拓展额外经济收益。

中国是全球最大水产养殖国，2020年水产品总产量达6549万吨，其中养殖产量占比近80%，是居民优质动物蛋白的重要来源。当前养殖方式以池塘、大水面、滩涂、稻田和海水为主，总养殖面积超过7000万公顷(农业农村部 2021)。然而，传统养殖仍依赖资源消耗，存在环境负担重、能耗高、效率低等问题，制约行业可持续发展。

“渔光一体”不仅为养殖业提供稳定的清洁能源，还改善了养殖基础设施与管理条件，为推动我国水产养殖的规模化、智能化和绿色转型提供了可复制、可推广的解决路径。

表 8 | 山东东营通威200MW渔光一体项目温室气体减排量

电网温室气体排放因子 (tCO_2/MWh)	0.8269
年发电量 (MWh/year)	260,000
二氧化碳年减排量 (tCO_2/year)	214,994

5.2 海南光伏温室大棚案例

中国目前是全球温室大棚面积最大的国家，蔬菜种植是其主要用途之一。在粮食之外，中国蔬菜种植的面积和经济产值均居世界前列。然而，相较于国际先进水平，我国温室产业仍存在较大提升空间。尽管节能型日光温室已广泛应用，但现代化、自动化程度较高的设施型温室发展缓慢，普遍面临设施简陋、机械化程度低、生产效率不高、作业强度大、产品标准化程度低等问题。此外，目前温室农业仍以小规模个体经营为主，缺乏标准化和适度规模化，制约了整体效益的提升。

近年来，中国在温室蔬菜种植自动控制技术方面取得显著进展，设施逐步向大型化、智能化发展。现代连栋温室和节能型温室的引入，配合对光照、温度、水分、气候等要素的精准调控，为农作物的优质高产提供了有利条件。与此同时，大型温室对能源的依赖程度显著上升，光伏发电恰好可作为稳定清洁的能源补充，因此“光伏+温室”模式迅速推广开来，不仅提升了农业生产的能效水平，也为设施农业的绿色低碳转型提供了新路径。

光伏温室大棚通过在棚顶安装光伏组件，不占用额外土地，不改变土地性质，提升了土地资源利用效率。该模式适用于种植经济价值较高的蔬菜、食用菌和中草药，可显著提高单位面积的经济效益。棚顶光伏系统不仅可为灌溉、温控、补光等设施提供清洁电力，满足智慧温室运行需求，多余电量还可并入电网，进一步增加收益。

(1) 海南光伏+温室大棚项目

海南夏季气候高温、强日照，不利于蔬菜尤其是叶菜的生长。相比瓜果类蔬菜，叶菜类蔬菜抗光热逆环境的能力最弱。受暴雨水淹、高温、台风、人工费用过高等因素影响，海南叶菜周年自给率不足。因此，海南建设常年蔬菜温室大棚保障叶菜生产。

2020年，海南省委、省政府出台了一号文件《关于抓好“三农”领域重点工作确保如期实现全面小康的实施意见》。其中，关于做强、做优热带特色高效农业，推动15万亩常年蔬菜基地建设，提高夏秋季本地蔬菜自给率的重要意见，对推动海南设施农业发展具有重要意义。2022年2月12日，海南省发布了关于加快光伏蔬菜大棚设计方案的文件，要求建设1.34 GW的高标准光伏蔬菜大棚。

图 8 | 华宇光伏温室大棚项目已建规模

来源：作者陈靖提供

图 9 | 华宇光伏温室大棚棚内生产的上海青（左）棚内生产的小白菜（右）

来源：作者陈靖提供

海南岛全年平均日照时数2178h，西部多于东部，西、南部高达2400h。丰富的光热资源有利于光伏发电与设施农业温室结合，光伏温室的建设运营也可为永久性常年蔬菜基地提供创新发展模式。发展光伏温室对海南常年蔬菜基地的建设具有重要现实意义，一是增产提效，提高农民收入，实现周年生产；二是提高土地综合利用率，充分利用光热资源，降低蔬菜生产成本；三是保障菜篮子工程，降低夏季海南对岛外蔬菜的依赖。

以海南光伏温室为例，项目位于洋浦开发区，占地约300亩，总投资约1.5亿元，如图8所示。在建设之前，该地块土壤条件较差，不适合农业生产。项目建设前面临的主要土壤问题是沙质盐碱土，其特点是盐分和碱性物质含量高、肥力低，传统农业种植难度大。项目建设期内，通过施用复合肥和有机肥，中和土壤盐碱度，以提升肥力。种植作物方面，先小规模试种耐盐碱作物如圣女果、无架豆角等，之后引入蚯蚓分解农业废弃物，产生有机肥从而改良土壤。光伏温室建成后，经过6周的播种，各类叶菜均达到采收标准，实际采收期为45天。测定结果显示，上海青的产量为1.687 kg/m^2，按实际种植面积计算（80%），产量可达900 kg/亩，如图9所示。

该光伏温室项目由光伏企业投资，农业公司负责蔬菜种植及光伏电站运营。光伏企业作为项目业主，以租赁方式取得用地，设计方案批复后，建设光伏蔬菜大棚并签约蔬菜产能协议。运营阶段光伏企业将蔬菜大棚无偿提供给农业公司使用，农业公司承担种植过程的设备维护及水电能耗费用，并作为蔬菜产能协议的实际履约人，代光伏企业履行产量承诺。

（2）成本效益：减轻蔬菜大棚种植企业租地成本

光伏蔬菜大棚为标准型大棚结构，大棚骨架结构是光伏组件的支架结构。单座大棚以15跨（跨度7m）、10开间（开间4m）准，单座大棚面积为4200m^2，装机容量为583.2kW，大棚均摊投资成本为1.28元/W。

在海南地区，这种光伏蔬菜大棚种植各类叶菜的平均产量约 0.900-1.0吨/亩，一年按8茬计，年产量约7.2吨-8吨/亩。考虑到选址、规模化经营的不确定性，标准型光伏蔬菜大棚种植叶菜的保底年产量不小于6吨/亩。叶类菜地头收购价平均按4.0元/kg计算，种植成本约3.4元/kg，净利润约0.6元/kg。一个蔬菜大棚年种植净收益约3600元/亩。

实验结果表明，在海南地区，该光伏大棚能够实现棚顶发电并进行蔬菜生产，效果与普通大棚差别不大。光伏温室将温室与光伏组件有机结合，根据植物光饱和点不同，采用不同透光性的光伏组件或采用错位铺设，满足不同植物光合作用对光照的需求。

（3）社会效益：保障蔬菜稳定供应，减少自然灾害的影响

目前，海南地区已有多个光伏+农业项目。目前全省形成种植面积约4万亩左右、总装机容量约2 GW的光伏温室永久性常年蔬菜基地，由于可实现周年生产，而且不受台风暴雨影响，以保底产量估算，每年可产叶菜约24万吨。按每人每天平均消费0.5 kg叶菜计算，可满足约 130万居民每年的叶菜供应。

图 10 | 海南华宇光伏大棚项目投资收益图

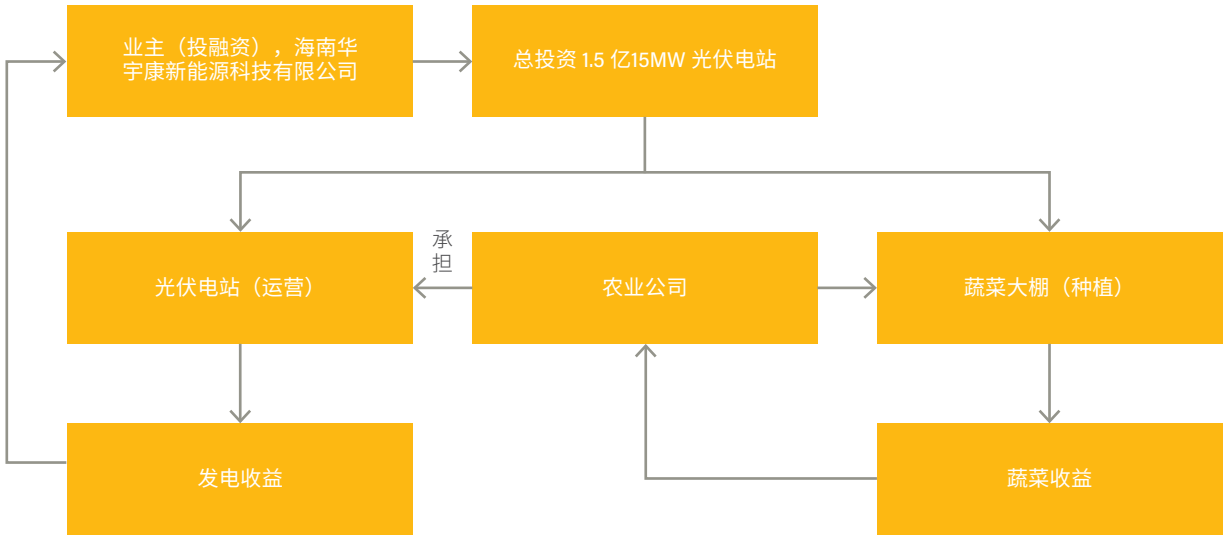


表 9 | 海南华宇光伏温室大棚15兆瓦项目温室气体减排量

电网温室气体排放因子(吨-CO_2/MWh)	0.6565
年发电量 (MWh/年)	24,000
二氧化碳年减排当量 (吨/年)	15,756

(4) 环境效益：15兆瓦项目年均温室气体减排量可达1.5万吨

根据国家气候战略中心公布的最新的中国区域电网基准线排放因子，海南省属于南方区域电网，其电量边际排放因子的加权平均值为0.6565tCO_2/MWh。项目年发电量为24000MWh，其温室气体减排效益为每年减排15756吨二氧化碳。

海南光伏温室大棚项目通过光伏组件与温室大棚的融合设计，成功实现了光伏发电与农业生产的双重效益。项目每年可产生24,000 MWh的电力，同时种植叶类蔬菜满足130万居民的日常消费需求，体现了高效土地利用和清洁能源结合的典范。温室设施有效提升了抗台风和暴雨等自然灾害的能力，确保农业生产的稳定性。

海南光伏大棚项目的经验表明，通过合理的光伏组件布局和透光率设计，可以在不显著影响农作物产量（叶菜）的情况下实现能源与农业的协同发展。此外，海南省政府出台的相关政策支持也为项目的成功实施提供了保障。该模式在光照资源丰富但易受气候影响的热带地区具有较强的推广价值，可作为设施农业与新能源结合的参考范例。

5.3 陕西靖边毛乌素沙漠光伏灌溉案例

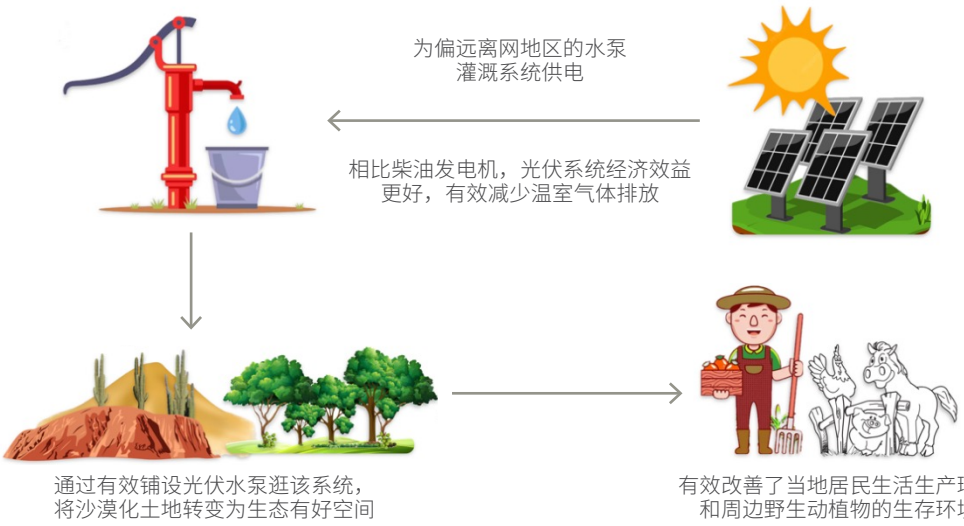
光伏水利是通过光伏扬水系统，为边远电力短缺或无电地区的农林灌溉、荒漠治理、草原畜牧、生活用水及苦咸水淡化等提供电力来源。

光伏扬水系统由太阳能电池板、太阳能扬水逆变器、水泵三部分组成。太阳电池阵列由多块太阳电池组件串并联而成，吸收日照辐射能量，将其转化为电能，为整个系统提供动力源。扬水逆变器对系统运行进行控制和调节，将太阳电池阵列产生的直流电转为交流电，用以驱动水泵，同时根据日照强度的变化即时调节输出频率，形成最大功率点跟踪（MPPT）。逆变器响应迅速，运行稳定，采用全数字控制。水泵由三相交流电机驱动，从深井或江河湖泊等水源中抽水，注入蓄水箱/ 池，或直接连接灌溉系统与喷泉系统等。

图 11 | 光伏水利实景图——陕西靖边

来源：深圳天源新能源股份有限公司提供

图 12 | 光伏+水泵灌溉系统的优势示意图



(1) 光伏扬水系统的功能

光伏扬水系统通过太阳能驱动，有效解决了农业灌溉中的缺电和缺水问题。在电力不足且电价上涨的地区，光伏系统无需储能电池或电网支持，降低了投资和运行成本，同时避免了柴油发电系统的高维护费用和噪音污染。此外，该系统在干旱地区能够高效提取地下水资源，为农林灌溉和荒漠治理提供可靠的水源，并结合滴灌技术提升水资源利用效率，减少化肥和农药使用，降低环境污染，已在全球多个国家得到广泛应用。

(2) 陕西省靖边毛乌素沙漠光伏扬水系统灌溉案例

2009年6月12日，天源新能源公司在陕西省靖边县治沙英雄牛玉琴生态农业基地布设光伏扬水系统，为在边缘沙漠地区种植农业经济作物以及树木的灌溉提供充分的供水保障。天源公司采用光伏节水重力滴灌，扬程可达35米，春秋季日供水量为70吨，夏季日供水量为95吨，可灌溉400亩的沙漠经济作物。

图 13 | 陕西省靖边毛乌素沙漠光伏扬水系统

太阳能电池板及储水管罐　　重力滴灌设备及水泵

光伏节水滴灌　　毛乌素沙漠西瓜

来源：深圳天源新能源股份有限公司提供

(3) 成本效益：25年运行期节省大量柴油的使用和人力运营成本

我们这里比较了25年运营周期内柴油机抽水系统和光伏扬水系统的用水成本。虽然初期的设备成本看起来光伏扬水系统要贵的多，但是考虑柴油机抽水系统每年需要投入可观的柴油成本和人工成本，其投入成本实际会远超光伏扬水系统。简单的计算可知，柴油机抽水系统运行一年所需的人工和柴油费用加上初期的设备费用，将比光伏扬水系统的初期建设成本还高。我们根据25年的运营期限比较两种系统的成本，根据SolarGIS的数据，靖边地区有较好的光照资源PVOUT = 1607.20kWh/kWp，5.12kWp的光伏系统，年发电量4509kWh；功率3.5kW的柴油机的发电油耗为3.0kWh/L，柴油机发同样电量的电，年耗油量为1503升，年均温室气体排放量为2.4吨。水泵系统每6年需要进行更换维护，其他主设备无需更换，柴油机系统有一定的维修费用。25年运行期内，柴油机系统设备维护和更换成本为9.9万元，而光伏扬水系统位9.48万元，所以系统总成本分别是70.25万元和12.84万元（柴油机抽水系统需要不定时清洗，柴油机和水泵都需要定期更换，柴油机一般寿命为3-5年。光伏扬水系统只需更换水泵，设备维护情况发生在逆变器故障、光伏板的意外损害等，两个系统设备维护及更换成本数据为平均估算值）。根据当地农户提供的数据，25年总出水量约为68.5吨，所以单位用水成本分别为1.026元/吨和0.187元/吨，光伏扬水系统比柴油机发电节省80%的成本。

(4) 环境效益：5.12千瓦光伏灌溉系统每年减排约2.4吨温室气体

使用光伏扬水滴灌系统施肥，可以减少肥料以及农药的使用量，从而减少对环境的污染；与地面洪灌相比，光伏扬水滴灌可节约70%的水。每年减少化石燃料（柴油）7884升（一般柴油发电机耗油量为0.9L/h），减少8.2吨二氧化碳排放量，这里柴油发电机排放因子用的是0.533吨CO_2每兆瓦时(JCM 2015)。

陕西靖边毛乌素沙漠光伏灌溉项目通过光伏扬水系统有效解决了沙漠地区的用水和缺电问题，同时显著降低了单位用水成本和二氧化碳排放。项目的经济和环境效益为边缘地区的农业灌溉提供了可持续发展的范例，也展示了光伏水利在生态修复与经济作物种植中的巨大潜力。这一模式值得在其他类似条件地区推广和应用。

表 10 | 光伏扬水系统与柴油机抽水系统建设成本对比

	柴油机抽水系统 柴油机3.5kW，水泵1.5kw	光伏扬水系统 5.12kWp，水泵3kw
初期建设成本	1.1万元	3.36万元
年均柴油成本	1.64万元	无
年人工成本	0.73万元	无
25年人工成本	18.25万元	无
25年柴油成本	41万元	无
25年设备维护及更换成本	9.9万元	9.48万元
25年总成本	70.25万元	12.84万元
设备日工作时间	12小时/天	8小时/天
25年总出水量	68.5万吨	68.5万吨
25年用水单位成本	1.026元/吨	0.187元/吨

数据来源：毛乌素光伏灌溉系统项目方提供

表 11 | 光伏灌溉项目温室气体减排量

毛乌素光伏灌溉系统	
柴油发电机额定功率	3.5kW
水泵额定功率	1.5kW
项目运行年限	25 年
柴油机单位能效	3.0 kWh/L
基线情景年均柴油发电机发电 (BAU)	4,509 kWh/年
柴油机年均油耗	1,503 L/年
柴油机温室气体排放影子	0.533tonne-CO_2/MWh
每年温室气体减排量	2.4 吨

5.4 内蒙古乌拉特中旗“光牧旅”产业园案例

光伏+养殖业是指一种将畜牧养殖业和太阳能相结合的生产方式。目前主要有两种形式，一是在光伏电站阵列间养牛羊等牲畜；二是在养殖棚上铺设光伏，可饲养多种食草动物，如羊、猪、鸡、奶牛、肉牛等。

图 14 | 巴彦高勒嘎查“光牧旅”一体化融合发展产业园

来源：作者陈靖提供

(1) 中国养殖业情况

2020年，我国畜牧业总产值达到4.03万亿元。我国养殖业产值排名前三的省份是四川、河南、湖南。其中四川省养殖业产值高达3613.81亿元。养殖行业发展十四五规划纲要要求，到2021年我国养殖行业将增加23%。为此各地方政府出台了地方政策，以提高养殖行业渗透率。但养殖业目前存在养殖结构单一化、缺少适合我国国情的养殖标准，存在研发设计能力不足等问题。

光伏与养殖业的结合，为养殖户提供了可自发自用的绿色电力，剩余电力还可送入电网，增加农户收益。此外，将光伏绿电引入可以促进养殖业的全面电气化，随之促进5G、大数据、人工智能、云计算等高新技术引入畜牧业，以优化信息管理环节，提高养殖行业效率。

(2) 内蒙古 “光牧旅”一体化融合发展产业园

内蒙古乌拉特中旗川井苏木巴彦高勒嘎查村有草场面积1.8万亩，饲草地521亩（集体257亩）。2021年12月28日，由嘎查股份经济合作社和22户牧民发起成立农牧业专业合作社，通过“合作社+企业+牧民”方式，建成1MW牧光互补电站。

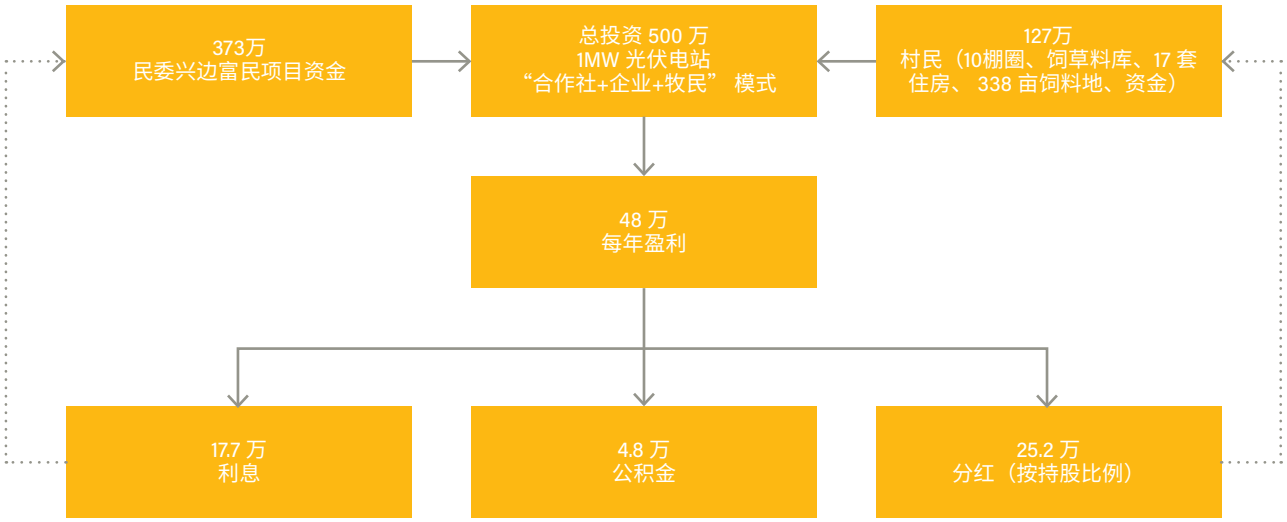
图 15 | 牧光互补电站

来源：作者陈靖提供

(3) 成本效益：援助资金的可持续使用给牧民带来长期稳定收益

2021年，川井苏木巴彦高勒嘎查村1MW牧光一体电站主要采用合作社方式募集资金。巴彦高勒嘎查村将现有10栋棚圈、饲草料库、17套住房、338亩饲料地、资金等折现127.67万元，并向政府争取民委少数民族兴边富民项目资金373万元（直接划拨），电站总投资500万元。每年约发175万度电，收益约48万元/年，其中收益10%作为合作社的公积

图 16 | 内蒙古牧光项目投资收益图(基于本报告作者陈靖博士和何继江博士在以往项目调研中收集的相关信息)



金，以4.7%的比例向嘎查集体缴纳373万元兴边富民资金的借款利息17.7万元，剩余盈余25.2万元按社员持股比例进行分红。

同时，川井苏木通过争取民委少数民族发展项目资金150万元、企业投资450万元，对10套棚圈进行智能化改造，配套网围栏智能自动门、喷灌机远程控制器、“草原电子眼”等智能化设备，建设牲畜饲喂、饮水灌药、粪污清理、降温消毒、空气净化、粪污收集等现代化智能化养殖棚圈；通过企业投资800万元，建设防疫用房、病羊隔离室、接羔棚等养殖附属配套设施。养殖业投资收益如下：2021年公司引进33只乌骨羊发展特色养殖，母乌骨羊买入价格为8000元/只，公乌骨羊买入价格为1.2万元/只。饲养周期为半年，母乌骨羊售卖价格为1.1万/只，公乌骨羊则作为种羊用来繁殖新的乌骨羊。

旅游业方面，依托光牧旅产业园，企业统一承租牧民的44套蒙古包用来接待游客。一个蒙古包租金为1500元/年，一次性租6年。旅游收入主要来自暑期研学与散客，暑期研学周期为21天，研学费用为每天70元/人。一个研学团人数40人。一次研学营业收入5.88万元，除去人工与租金成本，净利润为2万左右。暑期可接待4个研学团，每年研学净利润为8万左右，加上接待零散散客，一年净利润在10万以上。

(4) 环境效益：1 MW项目每年减排1447吨温室气体

每年减排1379.27吨二氧化碳（根据国家气候战略中心公布的最新的中国区域电网基准线排放因子，内蒙古自治区属于华北区域电网，其电量边际排放因子的加权平均值为0.8269吨-CO_2/MWh (生态环境部 2019)。

川井苏木牧光旅一体项目通过合理利用援助资金，创新收益分配机制，有效调动了牧民对可再生能源项目的投资热情。在保障牧民投资年收益率达到20%的同时，项目还设立了10%公积金和4.7%借款利息，用于嘎查集体的公共设施建设和公共事务管理，实现了个人收益与集体利益的双赢。这一模式不仅增强了牧民参与新能源项目的积极性，也显著改善了当地的公共基础设施，为乡村振兴和清洁能源发展提供了有力支持。

表 12 | 内蒙古牧光项目温室气体减排量

电网温室气体排放因子 (吨-CO_2/MWh)	0.8269
年发电量 (MWh/年)	1,750
二氧化碳年减排当量 (吨/年)	1,447

5.5 江苏连云港农光互补案例

农光互补指在农用地上建设光伏，同时种植农作物的生产模式。不同的农光互补电站高度不一致，一些农光互补电站支架高度在2-4米之间，以方便大型机械设备进入田间作业。

(1) 江苏连云港灌云县农光互补电站

2018年，大唐江苏发电有限公司新能源分公司在江苏省连云港灌云县建设20 MW的农光互补项目，占地600亩，光伏板下种植小麦与大豆。

图 17 | 连云港灌云县光伏板下种植的小麦

来源：作者陈靖提供

(2) 成本效益："一地两用"给农业种植公司节省了90%的土地租赁成本

该项目中，当地政府统一流转农户的土地，大唐江苏发电有限公司与当地政府签订土地租用合同，每年土地租金为1100元/亩，项目土地租金费共计66万元/年。大唐江苏发电有限公司负责光伏的投资、建设与运维，农业种植由专业的农业公司经营，农业种植公司缴纳10%（6.6万元/年）的土地租金费给大唐江苏发电有限公司。农业公司主要种植大宗经济作物如小麦等获取农业收入，整个项目光伏板平均遮挡比例在35%-40%，场区不同区域遮挡情况有所差异，其小麦产量见下表。

(3) 环境效益：20 MW项目每年减排约1.6万吨温室气体

根据国家气候战略中心公布的最新的中国区域电网基准线排放因子，江苏省属于华东区域电网，其电量边际排放因子的加权平均值为 0.6908tCO_2/MWh (生态环境部 2019)。项目年发电量为23800MWh，其温室气体减排效益为每年减排 16441.64吨CO_2。

连云港农光互补项目以露天种植小麦与光伏电站结合的模式为核心，通过实验不同光伏覆盖模式并监测评估了光伏板遮光对小麦产量的影响。研究结果表明，在有效利用光伏发电提高土地综合利用率的同时，需要合理控制土地覆盖率，维持小麦的正常生长，为光伏农业的技术设计提供了科学依据。

此外，该项目的监测实验为地方政策制定提供了重要参考，特别是在制定光伏板布局、土地覆盖率限制和农作物种

表 13 | 光伏板不同覆盖模式下产量情况表

不同覆盖模式不同覆盖模式	小麦产量（kg/亩）	与露天种植比，减产百分比(%)
露天种植露天种植	492.62	
单排无间隔单排无间隔	318.53	35.3%
双排左右间隔双排左右间隔	388.91	21.1%
双排上下间隔双排上下间隔	344.46	30.1%
双排上下左右均有间隔	351.87	28.6%

表 14 | 江苏光伏农业(小麦)项目温室气体减排量

电网温室气体排放因子 (吨-CO_2/MWh)	0.6908
年发电量 (MWh/年)	23800
二氧化碳年减排当量 (吨/年)	16442

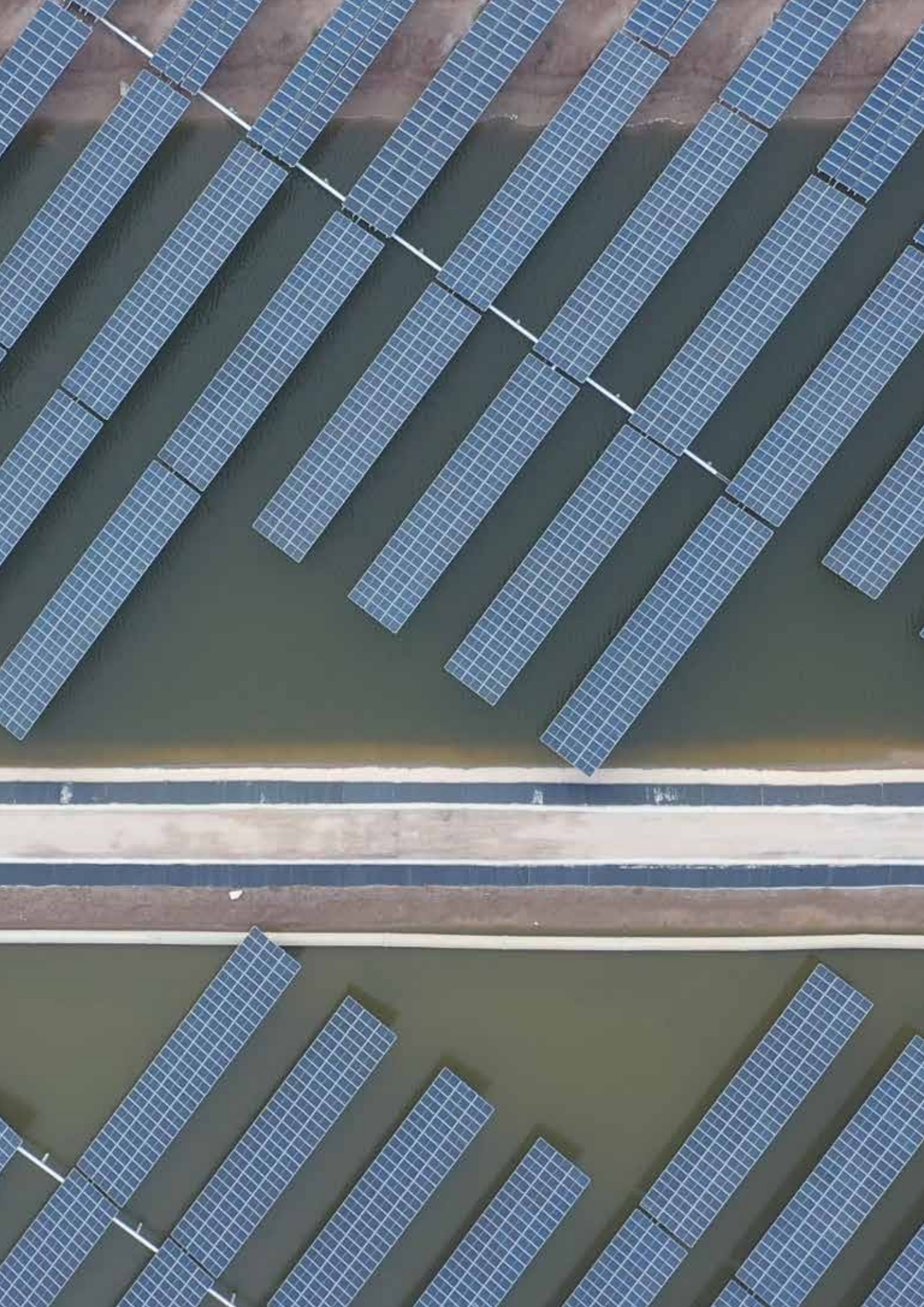
植模式优化等方面具有指导意义。这表明，光伏农业项目需要因地制宜地开展类似的实验和监测，通过数据支持提升政策的科学性与可操作性，同时为其他地区推广光伏农业提供了实践经验和理论支撑。

5.6 五个光伏农业案例的小结

为进一步展示我国光伏农业发展的多样化路径与可复制经验，对五个具有代表性的典型案例进行了归纳整理，涵盖不同地区与系统类型。表15“典型光伏农业项目模式与农户受益机制对比表”汇总了各案例的投资主体、土地使用方式、收益分配机制及农户参与模式等关键要素，反映出多样而成功的“光伏+农业”融合实践，为未来项目设计与政策制定提供了有益参考。

表 15 | 典型光伏农业项目模式与农户受益机制对比表

项目地点	项目类型	投资主体	土地安排	收益机制	农户收益方式
山东东营	渔光互补	光伏企业	租赁水产养殖区，基础设施改造	改善养殖环境，产量提升50%	间接受益（养殖环境改善、增产）
海南	光伏温室蔬菜	光伏企业	租地开发，组件下土地无偿提供农业公司	光伏+蔬菜协同，全年稳定生产	无偿获得耕地，提高收益
陕西靖边	光伏灌溉	治沙村民	建设光伏泵站与灌溉系统	节能降本，成本为柴油系统18%	节约用水与灌溉成本
内蒙古巴彦高勒	牧光互补	政府+牧民投资	村集体租地给牧业公司	投资分红（牧民投资年回报20%）+村集体收益	作为股东获得收益
江苏	农光互补	光伏企业	光伏板下作物种植	遮光比例监测与优化设计	依据遮光比例调整种植结构



第六章

结论与讨论

中国光伏农业已形成渔光、牧光、农光及温室等多种模式，装机量超31 GW，并展现出巨大未来潜力，但多数已建成项目土地覆盖率过高，偏离“一地两用”原则，对农业生产构成风险。未来需建立覆盖率上限标准和长期监测机制，优化区域布局，推广可复制的模式，并加强监管。国际上，中国经验可在其他发展中国家推广，东南亚适合发展渔光互补，非洲则可结合小型光伏水泵与农产品加工，推动清洁能源与农业协同发展。

6.1 结论：中国现有光伏农业装机量大，未来潜力同样巨大

在全球能源转型背景下，中国将太阳能与农业领域有机结合，创新探索出了光伏+温室、光伏+渔业、光伏+牧业等多种形式的光伏农业项目，实现了对土地资源的集约化应用。从公开报道的信息可知，中国的光伏农业项目的总装机量最起码已经达到了31 GW。一方面，中国的光伏农业的区域发展并不平衡，东部沿海省份在项目数目和装机量上都比西部省份更多。随着碳达峰和碳中和目标和行动的进一步推进，对可再生能源所需的装机量的增加，光伏农业在中国的能源供给中还可以发挥更大的作用；另一方面，大部分的光伏农业项目超过了农业生产对土地覆盖率的最低要求，对农产生产的产量有很大的影响。目前，中国光伏农业整体上土地复合利用不仅缺乏对农业产量影响的考量，也缺乏高质量的农业规划与设计。有专家指出，在现有的光伏农业项目中，普遍存在缺乏农作物种植和收获设备、可供农业生产操作的空间有限、缺乏农业机械作业的过渡平台等问题。目前的应用场景更类似于“光伏园区”，而非真正意义上的“农业园区”。不过各省也开始意识到农业土地的能源利用中，需要考虑不能对粮食安全造成危险。光伏农业中的光伏土地覆盖率需要确立长期监测机制、制定相应的标准和政策的角度进行规范，这方面欧洲国家已经有所规定。

光伏农业项目在中国的模式各有不同，除了由单一企业同时投资光伏与农业模式外，还涉及多元主体共同投资，包括农村合作社及农牧民参与光伏投资、专业的农业公司投资农业部分。小规模型的光伏农业系统如光伏水泵，初期投资成本较少，普通农民可触及性强，适合在干旱、半干旱地区推广，用以解决这些地区的农业灌溉问题。不同类型的光伏农业项目在不同的气候区域，对于农业生产的影响也不一样，需要因地制宜的开展更多的研究和调研，进行科学的可持续的发展。

目前，中国农光互补项目还有大约6万多GW装机潜力，其中农光互补潜力4万多GW，牧光互补将近2万GW，渔光互补为3031 GW，以及光伏大棚潜力约为280 GW。渔光互补的潜力有三分之二是来自淡水养殖的土地面积，这其中池塘面积占了一半，达到1100多GW。未来随着光伏组件价格不断下降，光伏电站建设成本逐渐降低，利润有望从上游向中下游产业链转移，将有效解决光伏+农业的成本问题，激发各方投资的积极性。

本研究发现，中国部分光伏农业项目的土地覆盖率超过文献研究推荐的上限，可能对农作物产量产生不利影响。这一问题在温室大棚和农光互补项目中尤为明显。因此，建议制定全国范围内的光伏土地覆盖率上限标准，确保光伏农业项目在设计阶段兼顾能源产出与农业生产的平衡。此外，鼓励地方政府和研究机构开展长期监测和评估，以优化光伏农业项目的土地利用效率。

6.2 讨论：中国光伏农业经验和模式在一带一路国家推广

未来光伏可以结合更多光伏新技术，并把中国好的经验和模式推广到一带一路国家。未来的光伏农业会往与农业系统更加匹配的方向发展，光伏农业技术也将打破现下的瓶颈。目前中国已研发出柔性支架系统（大跨度、大间距）和匀光、分光系统，柔性支架系统可以较好的适应大农业的需求，为大田机械化作业、渔业捕捞留出足够的空间；匀光、分光系统主要解决光伏板对农作物的遮挡问题，均匀分配光伏板下的光，尽可能减小对农作物的影响。

一带一路国家如东南亚地区在水产养殖方面有着天然的优势，光伏渔业有很大的发展空间。世界银行报告《Where Sun Meets Water》(World Bank Group 2019)提到，渔光项目已成为国际太阳能行业发展的利基性产业。东南亚拥有88座水库和7231个天然水体，可建设漂浮式光伏电站。目前中国有一些企业已在东南亚国家做了漂浮式光伏电站。东南亚存在着丰富的水产养殖资源，可以建设渔光电站。德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所已与越南最大的虾苗企业在湄公河三角洲建设了“渔光一体”项目。

非洲大部分国家以农业为主，但水资源极度匮乏，农业领域应用广泛的是小型离网型光伏水泵系统，帮助非洲地区解决农业灌溉问题。未来，光伏可以助力非洲的农产品加工产业。由于非洲用电不可靠以及加工技术落后，缺乏农产品加工产业链，以至于非洲没有高附加值的加工产品。光伏可以配套建设加工厂，与冷库冷链结合起来，光伏发的电供给农产品加工比如腰果加工、食物烘干以及冷库保鲜，提高农产品的附加值。一些小型的实验性的光伏农业项目也正在非洲一些国家开展，如肯尼亚，乌干达和塔桑尼亚的几十千瓦级别的光伏雨水收集系统(Randle-Boggis et al. 2021)。

在光伏农业模式上，一带一路国家可以有更多的创新。共建一带一路，中国可以为这些国家带去紧缺的资金、技术、经验，助力一带一路国家在光伏农业上有更大的突破。世界银行、中国的政策性银行可深入参与到一带一路国家光伏农业项目，不断丰富金融产品和服务体系，聚焦“小而美”的光伏农业项目，帮助光伏农业项目在一带一路国家落地生根。

在光伏农业的发展过程中，仍有一些关键问题值得进一步探讨。例如，电力的本地化消纳并非光伏农业项目独有的问题，而是所有分布式光伏项目普遍面临的挑战。不过，部分农业光伏项目可通过推动农业现代化和设施升级，在一定程度上提升本地用电需求，从而缓解消纳压力。这种将太阳能应用于农业生产过程的模式，更接近于“农业中的太阳能应用”，而不仅仅是“农业用地上的光伏电站”。目前WRI正在非洲开展相关项目，探索如何通过太阳能驱动农业生产与加工等方式，实现农业增值与清洁能源协同发展。

6.3 未来国内和海外推广发展光伏农业建议及考虑因素

（一）国内光伏农业发展：

国内碳达峰和碳中和目标达成的过程中，光伏农业可以发挥很大的作用，未来国内需要规范光伏农业的发展：

1） 完善“一地两用”项目的空间管理与土地覆盖率管控机制

研究发现，当前多数光伏农业项目在实施过程中土地覆盖率已超过50%，存在偏离“一地两用”原则、影响农业产出的风险。因此，建议制定分区域、分土地类型的覆盖率上限指导标准，并在项目审批与运行阶段引入土地利用强度评估机制。鼓励通过优化组件排布、提高光伏组件效率等方式，在保障农业产量的前提下提升单位面积光伏发电能力。

2） 引导潜力开发区域差异化布局，强化农业协同设计

在遵循土地与产能协调的前提下，中国具备大规模发展光伏农业的潜力，尤其是农光互补与牧光互补项目在西部地区技术潜力显著。建议依据区域资源禀赋与农业基础，推动差异化布局，制定“技术—农作物”匹配指南与项目选址指引。同时，在规划中引导项目单位充分考虑光照需求敏感度、作物耐阴性等参数，实现精准化开发。

3） 总结典型模式经验，推动可复制项目机制

从案例研究看，成功项目普遍在以下方面具备共性：光伏企业主导投资、农业基础设施联动改造、收益共享机制设计合理。建议总结和推广“光伏+农业公司合作”“农民参股+集体分红”等典型模式，并提供政策支持与融资工具，引导形成可复制、可持续的“能源+农业”融合发展路径。

4） 建立多维度评估与监管框架，保障项目长期可持续性

- 建议构建覆盖技术、农业、经济与安全维度的光伏农业评估框架，重点关注以下四方面：
- 粮食安全：确保农作物产量稳定，防止高遮光率项目削弱农业功能；
- 复杂性管理：评估光伏系统对土地长期利用效率、种植结构调整的影响；
- 收益共享机制：规范项目开发中的收益分配结构，保障农民与社区公平受益；
- 系统安全性：制定结构与电气安全标准，确保项目运行不对人员、牲畜及作物造成安全隐患。

综上，我们建议应支持在全国范围内开展长期、多区域的光伏农业项目性能监测，建立涵盖产量影响、环境效益与社会接受度的综合数据库，为政策迭代和投资决策提供数据支撑。

- 对在运行的光伏农业项目进行长期监测：包括不同区域不同作物光伏覆盖率对产量/质量、环境影响、以及相应农业生产人员的收入影响等；
- 建立光伏农业开发的相应标准与监管机制；
- 分析各省/地区的光伏农业潜力，为光伏农业的发展规划提供科学依据；
- 根据监测结果，各省/地区制定不同作物的最高光伏覆盖率上限，保障粮食生产安全；
- 对现有光伏农业模式进行经验总结，出台发展指南；
- 推动农业项目中农业与发电的融合发展；
- 鼓励光伏农业中新技术和创新模式的研究和应用。

（二）拓展中国经验的国际外溢价值，推动全球绿色转型：

随着中国在全球清洁能源投资与技术输出中的影响力不断增强，其光伏农业经验可为发展中国家提供低成本、可复制的路径选择。建议加强“南南合作”机制，结合当地农业结构与能源需求，支持开展海外光伏农业试点项目，在保障粮食安全的同时推动清洁能源利用与乡村可持续发展。

光伏农业的区域合作和交流,中国的成功经验可以与各个地区分享，特别是东南亚和非洲地区。

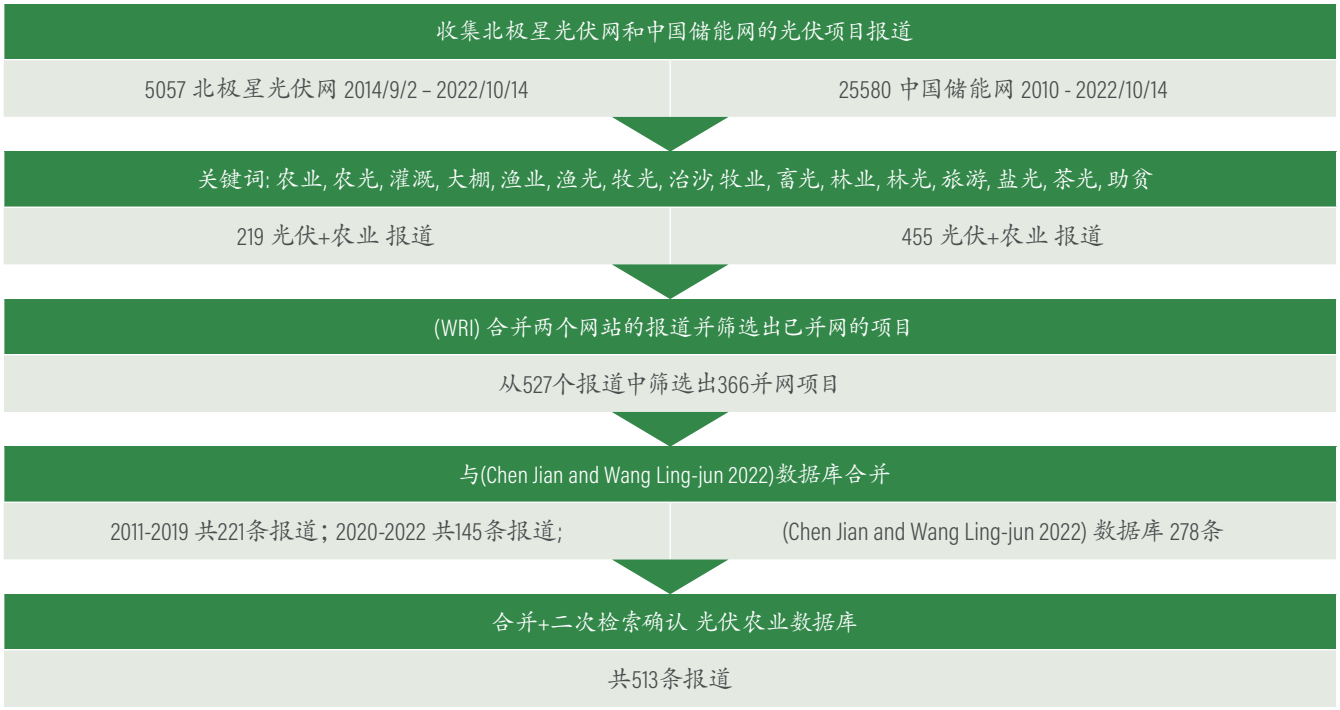
- 加强中国光伏农业与东南亚和非洲地区的经验交流和分享；
- 促进中国在东南亚和非洲地区在光伏农业项目中的投资；

附录

附录 1
中国现有光伏农业项目的数据收集与处理方法说明

基于(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)的数据和方法，我们进行了以下步骤：1) 从中国储能网（http://www.escn.com.cn）和北极星太阳能光伏网（https://guangfu.bjx.com.cn）收集光伏相关的报道信息；2) 对报道中的光伏农业相关关键词进行筛选；3) 将两个网站筛选出的光伏农业项目数据进行合并；4) 进一步筛选出已并网的项目，并提取这些项目的类型、地点、装机量、年发电量、占地面积和投资金额等信息；5) 与(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)的数据库中的项目进行合并，并对合并后的项目进行在线二次检索以确保信息的准确性。具体的操作步骤见下图1所示。

附录图 1 | 光伏农业项目数据来源和数据处理过程



(1) 数据来源

2022年底我们从中国储能网（http://www.escn.com.cn）和北极星太阳能光伏网（https://guangfu.bjx.com.cn）收集了有关光伏项目的报道信息。在中国储能网上，我们收集的信息涵盖了2010年至2022年10月14日的时间范围，共计25580条记录。而在北极星太阳能光伏网上，由于历史数据的可获取性，我们收集的数据起始于2014年，截至2022年10月14日，共有5057条记录。

(2) 数据筛选

我们将中国储能网和北极星太阳能光伏网的数据导入PyCharm，并使用Python进行数据处理。在数据库中，我们对标题进行了关键词检索，这些关键词包括“农业”、“农光”、“灌溉”、“大棚”、“渔业”、“渔光”、“牧光”、“治沙”、“牧业”、“畜光”、“林业”、“林光”、“旅游”、“盐光”、“茶光”和“助贫”。我们将标题中包含这些关键词的条目视为潜在的光伏农业项目。并剔除了重复报道的项目后。通过这种方法，我们分别从储能网和北极星太阳能光伏网中选出了455条和227条光伏农业项目——在北极星太阳能网的项目赛选中已经剔除了已包含在储能网中的项目。最后我们共获得了682个独立的光伏农业项目。

(3) 并网项目筛选

对已选出的682个光伏农业项目使用“并网”作为关键词进行进一步筛选，从中筛选出已经并网的项目共计307条。随后，我们提取了这些项目的关键信息，包括光伏农业项目的类型（如光伏大棚、渔光互补、农光互补、牧光互补、林光互补、光伏扶贫和茶光互补）、具体地点、装机容量、年发电量、占地面积以及投资金额等。一般光伏扶贫项目会和农业相结合，所以在这里把光伏扶贫项目也纳入到光伏农业项目中，比如，贵州威宁自治县光伏扶贫项目与乡村振兴下发展光伏农业有关(贵州日报 2021)。

(4) 与已有数据库合并

将我们筛选出的307个已并网的光伏农业项目与(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)的数据库进行合并。(Chen Jian and Wang Ling-jun 2022)的数据库涵盖了2011年至2019年的278个光伏农业项目。合并后，我们共得到585个独立的光伏农业项目。为了确保数据的准确性和有效性，我们对这585个项目进行了在线二次检索，最终确认网络上存在有效链接（截至2023年9月）的项目共有513个。

附录 2

装机容量密度——土地覆盖率指标

装机容量密度定义：指单位面积土地上的光伏装机容量，是衡量光伏项目单位土地面积内所部署发电能力的重要指标，通常以 千瓦/公顷 (kW/ha) 或 兆瓦/公顷 (MW/ha) 表示。

土地覆盖率定义：指光伏组件所遮挡的地表面积占整个项目用地面积的比例，是衡量光伏农业项目中光伏组件对土地实际占用强度的重要指标，通常以百分比表示。该指标可反映“农光互补”中的空间协调性与农业适应性。

因为收集的光伏农业项目信息中没有光伏板的土地覆盖率信息，所以我们这里用了另外一个反应土地覆盖率的关键指标——装机容量密度。在我们收集的光伏农业项目数据库中，记录了项目报道中提到的占地面积。结合项目的装机量规模，我们可以计算出装机量和占地面积数据都提供的项目的装机容量密度：装机容量密度=装机量/占地面积 (Bolinger and Bolinger 2021)。装机容量密度如果从项目占地面积（$Area_{project}$）和光伏板直接覆盖面积（$Area_{Direct}$）两个数据出发可以有两种装机容量密度计算方法：

- 实际项目装机容量密度，
  $P_{Project} = Capacity_{DC/AC} / Area_{project}$；
- 直接装机容量密度，
  $P_{Direct} = Capacity_{DC/AC} / Area_{Direct}$，

他们两者的关系可以通过光伏板阵列的占地面积比——土地覆盖率f联系起来：

$$P_{Project} = f \times P_{Direct}$$

从(Bolinger and Bolinger 2022)报告中我们可以知道2011年和2019年的集中式光伏项目的直接装机容量密度分别为$P_{Direct}(2011)=0.23MW_{DC}/Acre$和$P_{Direct}(2019)=0.35MW_{DC}/Acre$。基于各种光伏农业的研究显示，其项目中的光伏土地覆盖率最高不能超过50%，详细的分析会在后面章节展开。这里我们假设光伏板实际土地覆盖率为f=50%，那么2011年和2019年光伏项目实际装机容量密度分别为

$P_{Project}(2011) = f \times P_{Direct}(2011)=0.115\ MW_{DC}/Acre$ 和

$P_{Project}(2019) = f \times P_{Direct}(2019)=0.175\ MW_{DC}/Acre$。

通过比较收集的光伏农业项目的装机容量密度值与 P_Project (2011)=0.115 MW_DC/Acre 和P_Project (2019)=0.175 MW_DC/Acre ，基于这个数据，我们可以大致分析光伏农业项目的土地覆盖率是否超过50%。

附录 3

温室气体减排效应计算方法

（一）替代化石能源发电的减排效益计算方法如下：

按照以上步骤可以估算新建光伏电站的年减排量，作为环境效益的重要指标。不过对于陕西靖边毛乌素沙漠光伏扬水系统来说，刚开始是用柴油发电机作为灌溉系统的动力来源，减排量的计算用的公式为：

$$GHG_{reduction} = F_{Diesel} \times EF_{gen} - PE$$

其中F_{Diesel}为年均柴油消耗量，来自于调研，EF_{gen}为柴油发电机排放因子来自于文献（人名，年份），PE为光伏项目排放量，PE=0。

（二）直接联网的光伏发电项目的减排效益其计算方式如下：

减排效益的计算可用可再生能源并网发电方法学CM-001-V02，其组合边际CO_2排放因子$EF_{grid,CM}=EF_{grid,OM}\times W_{OM}+EF_{grid,BM}\times W_{BM}$，(中国气候变化信息网，2016)

- 其中$EF_{grid,CM}$并网发电组合边际CO_2排放因子，
- $EF_{grid,OM}$为电量边际排放因子(tCO_2/MWh)，根据项目所属地来选择区域电网电量边际排放因子，数据来自中国区域电网基准线排放因子(生态环境部 2019)，
- $EF_{grid,BM}$为容量边际排放因子(tCO_2/MWh)，根据项目所属地来选择区域电网容量边际排放因子，数据来自中国区域电网基准线排放因子(生态环境部 2019)，
- W_{OM}为电量边际排放因子权重(%)，数据来自(中国气候变化信息网，2016)
- W_{BM}为容量边际排放因子权重(%)，对于太阳能项目权重因子分别为W_{OM}=0.75和W_{BM}=0.25，数据来自(中国气候变化信息网，2016)

项目减排量计算公式为：

$$GHG_{reduction} = EG_{solar} \times EF_{grid,CM} - PE$$

- $GHG_{reduction}$表示减排量
- 案例中光伏项目的年发电量EG_{solar}数据来自于调研。
- PE为新建项目年二氧化碳排放量，对于光伏项目，PE=0。

附录 4

各省温室大棚面积及装机潜力

附录表 1 | 各省温室大棚面积及技术装机潜力

省份	面积（公顷）	技术装机潜力（GWp）
江苏省	339,403.0	73.4
山东省	290,657.0	62.8
辽宁省	180,063.0	38.9
河北省	153,550.0	33.2
陕西省	93,827.0	20.3
甘肃省	87,414.0	18.9
湖北省	83,378.0	18.0
内蒙古自治区	83,200.0	18.0
河南省	77,406.0	16.7
四川省	71,064.0	15.4
浙江省	55,667.0	12.0
安徽省	53,056.0	11.5
山西省	50,839.0	11.0
重庆市	34,666.0	7.5
宁夏回族自治区	30,817.0	6.7
云南省	29,930.0	6.5
新疆维吾尔自治区	28,276.0	6.1
天津市	25,439.0	5.5
黑龙江省	24,660.0	5.3
吉林省	24,247.0	5.2
北京市	14,376.0	3.1
广东省	14,089.0	3.0
福建省	12,734.0	2.8
湖南省	7,139.0	1.5
青海省	7,024.0	1.5
上海市	4,939.0	1.1
江西省	3,561.0	0.8
西藏自治区	3,091.0	0.7
海南省	3,085.0	0.7
贵州省	849.0	0.2
广西壮族自治区	432.0	0.1
台湾省	缺失	缺失
全国	1,889千公顷	408.4

数据来源：根据全国温室系统网站(Sheshiyuanyi.com 2018)各省温室大棚面积数据估算得到其潜力值

附录 5

各省渔业养殖面积及装机潜力

附录表 2 | 各省渔业养殖面积及技术装机潜力

省份	面积（公顷）	技术装机潜力（GWp）
辽宁省	839,645	363.1
山东省	758,895	328.2
江苏省	603,089	260.8
湖北省	531,552	229.9
安徽省	483,012	208.9
广东省	478,212	206.8
湖南省	425,678	184.1
江西省	411,531	178
黑龙江省	400,323	173.1
吉林省	330,204	142.8
浙江省	255,060	110.3
福建省	250,064	108.1
四川省	193,096	83.5
广西壮族自治区	183,193	79.2
河北省	143,014	61.8
河南省	139,903	60.5
内蒙古自治区	129,199	55.9
新疆维吾尔自治区	114,291	49.4
云南省	93,939	40.6
重庆市	82,817	35.8
贵州省	61,532	26.6
海南省	51,737	22.4
陕西省	51,156	22.1
天津市	23,900	10.3
宁夏回族自治区	23,494	10.2
青海省	17,400	7.5
山西省	12,418	5.4
上海市	11,817	5.1
甘肃省	6,131	2.7
北京市	2,192	0.9
西藏自治区	3	0
台湾省	缺失	缺失
全国	7,108.5千公顷	3,074.0

数据来源：根据2020年渔业统计年鉴发布的各省养殖面积数据估算其潜力值

附录 6

国家统计局对中国的经济区域划分

附录表 3 | 国家统计局对中国的经济区域划分

东部包括	北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南。
中部包括	山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南。
西部包括	内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。
东北包括	辽宁、吉林和黑龙江。

来源：国家统计局

参考文献

Bolinger, Mark, and Greta Bolinger. 2021. "Land Requirements for Utility-Scale PV: An Empirical Update on Power and Energy Density." IEEE Journal of Photovoltaics 12 (2): 589–94. https://doi.org/10.1109/jphotov.2021.3136805.

Chen Jian and Wang Ling-jun. 2022. "The Development Stage and Regional Distribution of Photovoltaic Agriculture in China." J. Anhui Agric. Sci. . https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2022.08.065.

Cossu, Marco, Akira Yano, Stefania Solinas, Paola A. Deligios, Maria Teresa Tiloca, Andrea Cossu, and Luigi Ledda. 2020. "Agricultural Sustainability Estimation of the European Photovoltaic Greenhouses." European Journal of Agronomy 118:126074. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126074.

Elnaz, Adeh, Hassanpour, John S. Selker, and Chad W. Higgins. 2018. "Remarkable Agrivoltaic Influence on Soil Moisture, Micrometeorology and Water-Use Efficiency." PLoS ONE 13 (11): e0203256. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256.

Ezzaeri, K., H. Fatnassi, A. Wifaya, A. Bazgaou, A. Aharoune, C. Poncet, A. Bekkaoui, and L. Bouirden. 2020. "Performance of Photovoltaic Canarian Greenhouse: A Comparison Study between Summer and Winter Seasons." Solar Energy 198:275–82. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.057.

Hassanien, Reda Hassanien Emam, Ming Li, and Fang Yin. 2018. "The Integration of Semi-Transparent Photovoltaics on Greenhouse Roof for Energy and Plant Production." Renewable Energy 121:377–88. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.044.

Hassanien, Reda Hassanien Emam, and Li Ming. 2017. "Influences of Greenhouse-Integrated Semi-Transparent Photovoltaics on Microclimate and Lettuce Growth." International Journal of Agricultural and Biological Engineering 10 (6): 11–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.3407.

IEA. 2022. "Special Report on Solar PV Global Supply Chains."

JCM. 2015. "JCM Approved Methodology Displacement of Grid and Captive Genset Electricity by a Small-Scale Solar PV System Additional Information." https://www.jcm.go.jp/pw-jp/methodologies/18.

Jing, Rui, Yang He, Jijiang He, Yang Liu, and Shoubing Yang. 2022. "Global Sensitivity Based Prioritizing the Parametric Uncertainties in Economic Analysis When Co-Locating Photovoltaic with Agriculture and Aquaculture in China." Renewable Energy 194:1048–59. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.163.

Jo, Hyun, Sovetgul Asekova, Mohammad Amin Bayat, Liakat Ali, Jong Tae Song, Yu-Shin Ha, Dong-Hyuck Hong, and Jeong-Dong Lee. 2022. "Comparison of Yield and Yield Components of Several Crops Grown under Agro-Photovoltaic System in Korea." Agriculture 12 (5): 619. https://doi.org/10.3390/agriculture12050619.

Johnson, Brian A., Yosuke Arino, Damasa B. Magcale-Macandog, Xianbing Liu, and Makino Yamanoshita. 2024. "Potential of Agrivoltaics in ASEAN Considering a Scenario Where Agroforestry Expansion Is Also Pursued." Resources, Conservation and Recycling 209:107808. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107808.

KAVGA, Angeliki, Georgios TRYPANAGNOSTOPOULOS, George ZERVOUDAKIS, and Yiannis TRIPANAGNOSTOPOULOS. 2017. "Growth and Physiological Characteristics of Lettuce (Lactuca Sativa L.) and Rocket (Eruca Sativa Mill.) Plants Cultivated under Photovoltaic Panels." Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 46 (1): 206–12. https://doi.org/10.15835/nbha46110846.

Li, Peidu, Xiaoqing Gao, Junxia Jiang, Liwei Yang, and Yujie Li. 2020. "Characteristic Analysis of Water Quality Variation and Fish Impact Study of Fish-Lighting Complementary Photovoltaic Power Station." Energies 13 (18): 4822. https://doi.org/10.3390/en13184822.

López-Díaz, Guadalupe, Angel Carreño-Ortega, Hicham Fatnassi, Christine Poncet, and Manuel Díaz-Pérez. 2020. "The Effect of Different Levels of Shading in a Photovoltaic Greenhouse with a North–South Orientation." Applied Sciences 10 (3): 882. https://doi.org/10.3390/app10030882.

Macknick, Jordan, Heidi Hartmann, Greg Barron-Gafford, Brenda Beatty, Robin Burton, Chong Seok-Choi, Matthew Davis, et al. 2022. "The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons from the InSPIRE Research Study." NREL.

Mamun, Mohammad Abdullah Al, Paul Dargusch, David Wadley, Noor Azwa Zulkarnain, and Ammar Abdul Aziz. 2022. "A Review of Research on Agrivoltaic Systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews 161:112351. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351.

Ong, Sean, Heath Campbell, Paul Denholm, Robert Margolis, and Garvin Heath. 2013. "Land-Use Requirements for Solar

Power Plants in the United States." Technical Report. NREL. www.nrel.gov/publications.

Pang, Yangyang, Chao Niu, Lifeng Wu, Yameng Song, Xiaozhe Song, Ao-ya Shi, Xingliang Shi, et al. 2022. "Comprehensive Utilization of Land Resources for Photovoltaic Power Generation to Culture Chinese Mitten Crab (Eriocheir Sinensis): Growth Performance, Nutritional Composition and Tissue Color." Fishes 7 (4): 207. https://doi.org/10.3390/fishes7040207.

Randle-Boggis, Richard J., Eileen Lara, Joel Onyango, Emmanuel J. Temu, and Sue E. Hartley. 2021. "Agrivoltaics in East Africa: Opportunities and Challenges." In , 090001. Depok, Indonesia. https://doi.org/10.1063/5.0055470.

REccessary.com. 2024. "PV Panels Help to Cut Cost by 30%: Vietnam's Shrimp Farmer." 2024. https://www.reccessary.com/en/news/vn-market/pv-panels-help-cut-cost-30-vietnam-shrimp-farmer.

Sheshiyuanyi.com. 2018. "全国温室系统网站." http://data.sheshiyuanyi.com/AreaData/.

Tang, Yilian, Xun Ma, Ming Li, and Yunfeng Wang. 2020. "The Effect of Temperature and Light on Strawberry Production in a Solar Greenhouse." Solar Energy 195 (November 2019): 318–28. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070.

TANI, Akira, Suguru SHIINA, Kazuki NAKASHIMA, and Makio HAYASHI. 2014. "Improvement in Lettuce Growth by Light Diffusion under Solar Panels." Journal of Agricultural Meteorology 70 (3): 139–49. https://doi.org/10.2480/agrmet.d-14-00005.

Touil, Sami, Amina Richa, Meriem Fizir, and Brendon Bingwa. 2021. "Shading Effect of Photovoltaic Panels on Horticulture Crops Production: A Mini Review." Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 20 (2): 281–96. https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2.

Trommsdorff, Max, Jinsuk Kang, Christian Reise, Stephan Schindele, Georg Bopp, Andrea Ehmann, Axel Weselek, Petra Högy, and Tabea Obergfell. 2021. "Combining Food and Energy Production: Design of an Agrivoltaic System Applied in Arable and Vegetable Farming in Germany." Renewable and Sustainable Energy Reviews 140:110694. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694.

Vaughan, Anna, Alan Brent, Megan Fitzgerald, and Jasper Kueppers. 2023. "Agrivoltaics: Integrating Solar Energy Generation with Livestock Farming in Canterbury." National Science Challenges. https://ourlandandwater.nz/wp-content/uploads/2023/08/Agrivoltaics_Report_OLW-RPF23.pdf.

Willockx, Brecht, Bert Herteleer, and Jan Cappelle. 2020. "Combining Photovoltaic Modules and Food Crops: First Agrivoltaic Prototype in Belgium." Renewable Energy and Power Quality Journal 18:266–71. https://doi.org/10.24084/repqj18.291.

World Bank Group. 2019. "Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report." Washington, DC: World Bank.

Zhang, Jiahua, Xingguo Liu, Zhaojun Gu, Guofeng Cheng, and Hao Zhu. 2022. "Eco-Economic Characteristics and Development Direction of the Fish-Light Complementation." Journal of Fisheries of China 46 (8): 1525–35. https://doi.org/10.11964/jfc.20210913058.

中国农业出版社. 2020. 中国渔业统计年鉴. 中国农业出版社.

中国气候变化信息网. 2016. "可再生能源并网发电方法学（第二版）." 中国气候变化信息网. https://cdm.ccchina.org.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20160303093516686376.pdf.

农业农村部. 2021. "2020年全国渔业经济统计公报." 农业农村部. http://www.yyj.moa.gov.cn/gzdt/202107/t20210728_6372958.htm.

国家统计局. 2017. "全国第三次农业普查公报." http://www.stats.gov.cn/sj/pcsj/.

国家能源局. 2021. "国家能源局综合司关于公布整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点名单的通知." http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.

———. 2023. "2022年光伏发电建设运行情况." February 17, 2023. http://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm.

生态环境部. 2019. "2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子." 中华人民共和国生态环境部. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.

自然资源部. 2022. "《光伏发电站工程项目用地控制指标》." http://gi.mnr.gov.cn/202212/t20221205_2769519.html.

———. 2023. "关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知." https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/03/content_5749824.htm.

贵州日报. 2021. "'农光互补'：贵州威宁光伏发电助力乡村振兴." 贵州日报, 2021. https://news.solarbe.com/202108/17/342937.html.

关于世界资源研究所

世界资源研究所（WRI）是一家独立的国际研究机构，致力于增进人类福祉，守护自然环境，应对气候变化。

我们的挑战

世界正面临多重危机。日益加剧的不平等影响着社会；不可持续的生产与消费模式侵蚀着森林和清洁水源，人类的生命根基受到威胁；从极端高温到毁灭性洪灾，气候变化的冲击愈演愈烈。危机环环相扣，破解之道亦需系统相承。科学的气候行动与自然保护，能从根本上为全人类创造普惠价值。

我们的愿景

我们致力于构建一个可持续的未来：生态系统繁荣，气候系统稳定，人人都可以享受洁净空气、宜居城市、健康土地、优质就业、营养膳食，以及可负担的能源。

我们的工作方法

量化

我们的工作基于及时而独立的研究。WRI 的专家团队科学分析数据，精准定位问题，评估解决方案，衡量实际结果。我们的研究均经过严格的同行评审，以确保其公信力与可行性。

变革

我们将研究成果转化为在地实践。我们深入地方，携手社区、企业和政府机构，试点具有推广潜力的创新性解决方案，扫清实施障碍，监测项目进展，沉淀经验教训。

推广

试点成功后，我们将成功经验推广至国家、区域乃至全球。通过与地方社区、国家政府等多元主体协作，因地制宜地调整方案，调动资源。我们将实践经验通过合作伙伴、出版物及工具平台开放共享，为各方提供借鉴。

图片说明

Pg. 1, Quang Nguyen Vinh/Unsplash; Pg. 2, Siwawut Phoophinyo/Unsplash; Pg. 4, Maximus Beaumont/Unsplash; Pg. 9, Mariana Proenca/Unsplash; Pg. 12, Evgeniy Alyoshin/Wikimedia Commons; Pg. 40, Markus Spiske/Unsplash; Pg. 53, tian dayong/Unsplash.

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。

地图仅供说明之用，并不代表 WRI 对任何国家或地区的领土的法律地位、边界或边界划分发表任何意见。

世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所（美国）北京代表处
北京市东城区东中街 9 号
东环广场写字楼 A 座 7 层 K-M 室
WRI.org.cn

Copyright 2025 World Resources Institute. 版权所有。本产品由创用（Creative Commons）4.0许可授权。
许可副本参见http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/