



United
Nations

Department of Economic and Social Affairs

光伏加

南南合作机遇：
太阳能利用促进可持续发展



“光伏加”

南南合作机遇：
太阳能利用促进
可持续发展



**United
Nations**

Department of Economic and Social Affairs



目录

序言	V	第三章“光伏加”技术发展：从间歇性可再生能源到可靠、可持续、可负担的电力供应	13
核心观点与结论	VII	3.1 全球光伏产业：从萌芽期到技术成熟	15
缩写	XII	3.2 新技术成为促进光伏加应用的新引擎	20
第一章 引言：南南合作，实现共赢	1	3.3 储能电池和光伏组件回收产业日益成熟	23
1.1 “光伏加”定义与特点	3	3.4 全球主要太阳能光伏市场情况	26
1.2 “光伏加”报告目标	5	第四章“光伏加”：发展中国家实际应用中的经验与案例研究	29
第二章 应对挑战：提升太阳能对于全球能源供给和应对气候变化的贡献	7	4.1 “光伏加”在发展中国家不同场景的成效	31
2.1 加快向可持续能源系统转型前景： 实施2030年议程和实现巴黎协定1.5℃目标	9	4.2 “光伏加”应用推广的必要条件	41
2.2 全球太阳能利用雄心	10		
2.3 南南合作展望：促进全球南方能源 跨越式发展，“光伏加”是最高效的清洁能源方案之一	11		



第五章 全球南方地区“光伏加”系统应用的协同效益	附录	73
案例分析	45	
5.1 东非地区光伏加农业系统分析	47	附录 I 案例集 73
5.2 东南亚光伏加渔业项目分析	50	附录 II 不同供电方案的成本估算 84
第六章 弥补发展差距：加强发展中国家“光伏加”应用	53	参考文献 86
6.1 推动“光伏加”发展的优先政策举措	55	尾注 92
6.2 能源部门公共投资	59	
6.3 鼓励社会资本参与“光伏加”投资，推动金融创新	63	
第七章 砥砺前行：推进“光伏加”发展，加速能源转型	67	
7.1 将“光伏加”纳入能源发展规划和新一轮NDC目标	69	
7.2 加强现有国际伙伴关系在“光伏加”领域的合作	69	
7.3 发展中国伙伴关系下“光伏加”合作相关建议	71	



序言

近年来,光伏与电池储能技术迅猛发展,其应用领域日益广泛、能效持续提升、成本不断下降,正惠及发展中国家的众多产业、社区和家庭。联合国经济和社会事务部荣幸发布这份综合性的全球“光伏加”报告。本报告展示了太阳能技术在农业、工业、城乡供电等领域的实践案例,这些经验可在全球南方众多发展中国家广泛推广复制。这些“光伏加”案例展现了在不牺牲自然资源、环境与气候的情况下,也能推动当地经济社会进步、实现可持续发展目标的可行性和发展路径。报告分析了“光伏加”在南南合作中蕴含的多重机遇与效益,为创新合作模式与协作机制提供了重要启迪。



朱巨望

联合国经济和社会事务部
可持续发展司司长

太阳能是一种普惠型的能源,通过全球共同的努力,我们看到太阳能光伏发电技术应用从太空走到了每一个人的身边。与其说这是一个研究报告,我更愿意说它是一个太阳能光伏应用的场景化展示,它让我们看到太阳能光伏技术在生产和生活中已经开始应用的多种场景,例如“光伏加”,也可以启发创造者发现出更多的可能性。中国在过去20年间通过技术创新和规模化生产推动了光伏效率的提升和成本的下降,让全球广泛应用光伏发电成为可能,作为中国的可再生能源行业组织,中国能源研究会可再生能源专委会为此感到非常的荣幸。未来我们愿意与所有有意愿推动全球可持续发展的朋友们一道,共同见证太阳能改变能源,创造更美好的生活。



李丹

中国能源研究会
可再生能源专业
委员会秘书长

本报告阐述了太阳能与储能如何成为推动全球各地可持续发展的催化剂。太阳能可助力实现几乎所有可持续发展目标,更堪称南南合作的典范。当太阳能、储能与光伏+生产性应用(如农业、冷链或小微企业离网太阳能系统)相结合时,其经济乘数效应将更为显著。全球太阳能理事会期待与各国政府携手,通过推动政策微调来加速太阳能普及,确保每位公民都能通过“光伏加”解决方案满足日常能源需求。



Sonia Dunlop

全球太阳能理事会
首席执行官



+



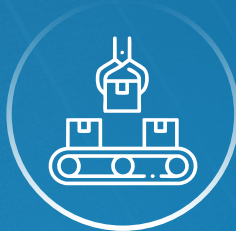
+



+



+



+



+



+

核心观点与结论

本报告中的“光伏加”¹⁾

本报告中的“光伏加”是指太阳能光伏系统(独立运行或者配合储能),与各种用能场景结合,为其提供电能的能源解决方案。“光伏加”装机规模灵活,可就近开发、就近消纳,便于离网运行,易于运维,空间利用效率更高,有利于实现一地多用。与普通的分布式光伏类似,“光伏加”也符合分散发电、就近利用的特点,但加强了对负荷侧用电需求的匹配,结合不同的技术和应用场景可以促进能源与农业、渔业、工业、建筑、交通和社区等行业和领域的同步发展,实现能源转型的经济、社会、环境效益最大化。

核心观点：

-  “光伏加”是一种成本低、用途广的能源解决方案，尤其适宜于解决能源可及问题，也适宜结合农业、工业、医疗等各种行业的用能场景进行应用。
-  “光伏加”可助力联合国17项可持续发展目标中12项目标的实现，可以成为推动发展和减贫的重要支撑。
-  南南合作在清洁能源发展和经济增长方面，有着促进互利共赢的巨大潜力。

本报告将展现“光伏加”系统，无论配备储能与否，当其应用于实体经济场景时，都可以成为推动发展和助力脱贫的一条经济高效、低门槛的捷径。

太阳能光伏如今已成为人类文明有史以来最便宜的发电形式，可以满足全球日益增长的电力需求提供大量的清洁能源，并通过能源替代降低新兴市场国家陷入能源基础设施高碳锁定的风险。“光伏加”作为支持各行业经济活动的能源解决方案，是确保可再生能源成为助力实现可持续发展目标的一种战略手段。扩大一国的太阳能光伏市场，不仅在一定程度上有利于该国跨越高度依赖化石能源的发展阶段，还有助于该国建立适应本国的相关产业，创造大量的就业机会。本报告将为国际社会提供一系列有效开发太阳能的模式。这本报告介绍的很多“光伏加”发展经验来自中国，但在以后的“光伏加”报告中我们会展现更多中国以外的发展中国家案例。

 应对21世纪的全球发展与环境挑战

可再生能源是能够同时满足增加能源获取、降低长期成本、提高能源自给率和保护全球环境与应对气候变化多重要求的唯一可行方案。太阳能光伏是可再生能源中技术与性能进步显著、成本快速下降、发展非常迅猛，且资源潜力巨大的一个能源品种，对全球实现可持续发展与可持续能源未来起着至关重要的作用。

发展中国家有条件战略性地转向利用光伏、储能及其他可再生能源来满足其并网或离网型的能源需求。太阳能在全球范围内正经历指数级增长，宣告开启太阳能时代⁴。光伏装机容量实现了每年20%的同比增长，预计2025年全球新增装机将达到近7亿千瓦²。推动光伏增长的主要地区包括中国、欧盟、美国、澳大利亚、印度和巴西等国家和地区。

 光伏已成为低成本的成熟技术

自2010年以来，得益于规模效益提升、研发力度加大、制造技术创新，包括从多晶硅到光伏组件、逆变器及其他配件在内的各环节成本均快速下降，这推动了全球光伏发电成本迅速降低。2023年，全球投产光伏项目的装机成本降至约758美元/千瓦，较2010年下降86%，装机成本持续下探；全球新建集中式并网光伏发电的加权平均平准化度电成本已降至0.044美元/千瓦时，显著低于新建燃煤与

 全球光伏实现指数级增长：人人享有可持续能源

截至2024年底，全球光伏累计装机容量突破20亿千瓦²的里程碑，在当年新增电源装机占比高达71%³，巩固了光伏作为全球电力新增容量的主力地位。得益于技术成熟、创纪录的低成本以及创新的融资模式，越来越多的发

燃气电厂³。使光伏比以往任何时候都更加经济实惠、可负担、易获取。而且，近年来光伏组件及相关设备制造商仍在持续提升产品质量、效率，使发电效率和稳定性不断提高。



灵活接入与就近消纳的分布式发展

太阳能是用途最广的能源形式之一。光伏安装可以根据实际需求进行规模调整，既可以为家庭、商业和工业提供独立的屋顶光伏解决方案；也可以为社区微电网供电提供灵活的电源开发方案；或建设大型电站满足工业及更大的电力系统供电需求。

由于光伏具备系统安装灵活、小规模应用成本优势明显以及电网依赖度低等特点，能更好的适配偏远地区及电网无法覆盖或供电不稳定区域的供电需求。结合负荷侧需求的“光伏加”在改善欠发达国家、地区（包括许多存在显著基础设施缺口的小岛屿发展中国家）的能源可及性方面可以发挥尤其关键的作用。



储能价格的下降提高了太阳能光伏应用的稳定性和效率，为其扩大了应用空间

低成本的电池储能系统如今能够促进间歇性可再生能源的更广泛应用。白天发出的富余电能现在可以更经济、便捷地储存起来供夜间使用。过去十年间，全球储能技术取得了飞速进步，成本大幅下降了85%⁵。借助此技术，可以大幅提高光伏系统电力供应的持续性和可靠性，拓展“光伏加”的并网或离网应用场景，满足多样化的负荷需求。



“光伏加”助力可持续发展目标（SDGs）的实现

“光伏加”在助力实现联合国可持续发展目标方面可以发挥重要作用，特别是提供经济适用的清洁能源（SDG7），以及通过扩大太阳能光伏这一清洁能源的利用，降低各国对化石燃料的依赖，减少碳排放，主动应对及缓解气候变化（SDG13）。需要特别强调的是，“光伏加”不仅具备减排效益，更适宜构建分布式、用户侧的能源系统，借此增加减缓气候影响的能力、降低由于

争夺能源资源引发的冲突、及提高欠发达地区的气候韧性。除此以外，“光伏加”还展现出显著的跨领域可持续发展目标协同效应和贡献：它可以创造就业机会（对应SDG8体面工作），全球已创造700万个就业岗位（集中于安装环节，制造业占比极低）⁴，并为工业、农业等行业提供电力，促进经济发展（对应SDG8经济增长），通过分布式能源普及助力创收（对应SDG1消除贫困）；为女性提供本地清洁能源相关的就业机会，降低多由妇女承担的拾柴及污染炉灶使用的劳作（对应SDG5性别平等）；通过离网系统为无电/缺电人口提供清洁电力，提升能源公平性，促进能源公正转型（落实SDG10减少不平等）。此外，通过为学校、医院、净水系统等公共设施提供电力，改善卫生和照明条件，延长学习时间，改善教育条件（协同实现SDG 6清洁饮水与SDG4优质教育）。



“光伏加”利于实现多维协同效益

“光伏加”是一种复合型能源解决方案，可同步促进五大政策目标的实现：能源生产、经济增长、生态保护、能源可及以及气候韧性。“光伏加”能够帮助很多家庭和企业摆脱无电/缺电困境，获得电力供应，还能降低能源开支；与此同时，也能为重工业、大型商业建筑、电动或传统交通系统、农业等各行各业创造效益。例如，创新的农业光伏和水产光伏使得粮食/渔业生产和能源生产得以同时进行。光伏组件还可为农作物与牲畜提供一定程度的极端天气防护。这些创新的应用模式可以在不占用农业或其他宝贵土地资源的情况下，扩大低碳清洁的电力生产。



“光伏加”是农村通电与发展的最优解

中国、印度、孟加拉等发展中国家已实施或规划了旨在改善农村和偏远地区生活条件的、使用光伏发电实现通电的国家项目/计划。其中，中国光伏扶贫工程（SEPAP）（2014-2020年）通过在农村地区安装光伏系统，不仅解决了通电问题、创造了经济机遇，还帮助超400万人口⁶摆脱了贫困。类似的项目已在其他发展中国家规划和推广，为更多国家和人民获得可持续能源提供低成本的有力帮助。



日均生活费低于2.15美元的人群用电:成为绝对贫困人口获得电力的有效解决方案

创新的融资方案,如即用即付系统与小额信贷,结合发展援助及微型太阳能手持设备⁸,使贫困家庭也能参与并受益于光伏项目。社区型的光伏项目、阳台光伏系统(即插即用型),以及类似德国“租户共享光伏电力”的公寓楼电力分配方案,可以使中低收入家庭(包括没有独立自有屋顶的家庭)参与并受益于光伏项目。以卢旺达为例,其光伏加社区系统,不仅为当地人提供了价格可承受的清洁电力供应,还在建设期创造了75个岗位,在投产后单个光伏集市提供7-8个稳定运维岗位(详情请见附录I光伏加案例集)。



光伏能为每个乡村和城市创造就业

与其他电力形式相比,光伏行业能在每个地方提供新增就业。全球光伏从业者达700万人,且年装机量还在以15-20%的速度增长,每年新增大量的安装、运维和研发岗位⁴;“光伏加”在发展中国家的推广需要依赖大量本地工程设计、安装、运维人才,因此积极开展能力建设培养本土人才非常重要。职业培训项目/计划也可以确保该行业就业增长具有包容性和公平性。尽管当前新兴市场的光伏就业主要集中于安装环节,但随着市场发展,也会诞生很多本土的设计与制造业岗位。



“光伏加”循环经济:光伏组件与电池的再利用、修复与回收

离网小型光伏系统通常伴随铅酸电池或锂离子电池的使用,以实现电力就地存储随时备用。目前,光伏组件的经济使用寿命可达20至25年,电池受使用习惯、外界环境等影响较大,使用年限通常不超过10年。现阶段,大多数发展中国家仍然缺乏相关回收和循环利用体系。非正规的电子废弃物处理(包括铅酸电池的拆解翻新)常导致严重水土污染,对人类健康造成严重影响。目前,多家光伏和电池领军企业及专业回收公司正研发测试多种新型回收技术。根据生产者责任延伸(ERP)原则,“光伏加”系统的设备制造商和经销商应支持政府推行的光伏组件与电池押金制度等举措,以改善废弃物管理、材料再生和循环利用体系

建设。电池梯级利用实践正在展开:例如偏远地区通信基站(BTS)已采用电动汽车退役动力电池组供电。将电动汽车退役的动力电池用于光伏系统的储能,可以延长电池的使用周期,提高资源利用效率,减少废弃物的产生并降低对关键矿产的依赖。



“光伏加”融资即发展融资

近年来,面向发展中国家的国际发展和气候融资(含光伏融资)呈现显著变化。在阿塞拜疆巴库举办的COP29会议上,《联合国气候变化框架公约》的缔约方同意将向发展中国家提供的公共融资增至每年3000亿美元(2035年前实现),较此前设定的每年1000亿美元目标增长两倍⁹。未来,私营部门在光伏投资融资领域的作用预计将持续增强。



私营部门基于经济回报支持“光伏加”

全球的光伏年装机增长预计在2025年可达7亿千瓦²,储能达2.28亿千瓦(9.65亿千瓦时)¹⁰,正日益转向经济效益驱动和私营资本主导。对独立发电商、工业企业、中小微企业及家庭而言,开发和安装光伏系统兼具创收与降本双重价值,由私营部门参与光伏制造和发电投资的自发市场行为,有助于提升经济竞争力,值得支持与鼓励。



持续完善光伏投资政策法规与监管支持体系

政府需要持续实施相关的支持性政策,如建筑规范修订、税收优惠、电力市场机制改革、许可审批流程优化、投资担保机制等,以加速光伏的开发利用。定期评估国家的可再生能源和光伏政策与战略,并根据《联合国气候变化框架公约》制定国家自主贡献目标,可以消除不必要的监管障碍,改善光伏发电的市场准入状况。



“光伏加”:南南合作的典范实践

南南合作助力各国共享技术专长,培养本土人才掌握在太阳能光伏设计、安装调试、运营维护和管理方面的核心技能。通过专题研讨、合资项目和知识交流等方式,发展中国家可构建适应当地条件的设计、实施和融资专业能力。

融资仍然是许多发展中国家广泛推广光伏发电的主要障碍。南南合作可以创建联合金融平台、创新融资模式或共享风险机制，从而降低光伏项目融资成本与门槛。亚洲基础设施投资银行、伊斯兰发展银行、新开发银行及中国国家开发银行等机构，正为包括光伏合作在内的南南合作提供了新型融资机制支撑。



能源可持续未来触手可及

太阳能光伏领域的南南合作是加速全球南方向可持续清洁能源转型、实现可持续发展目标的有力工具。通过共享资源、专业知识和创新融资模式，各国可以共同努力克服光伏开发利用的障碍，深化区域能源合作，并为全球应对气候变化行动贡献力量。

通过持续的投资与合作，“光伏加”以及其他形式的光伏应用可以在推动全球南方的经济增长、改善民生福祉和促进环境可持续性方面发挥关键作用。



缩写

ASEAN	Association of Southeast Asian Nations	东南亚国家联盟
ABSOLAR	Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy	巴西光伏太阳能协会
ACF	African Climate Foundation	非洲气候基金会
AEFI	African Energy Future Initiative	非洲能源未来倡议
AfDB	African Development Bank	非洲开发银行
AIIB	Asian Infrastructure Investment Bank	亚洲基础设施投资银行
CAGR	compound annual growth rate	复合年增长率
CdTe	Cadmium Telluride Cells	碲化镉电池
C&I	Commercial and Industrial	工商业
CIGS	Cu(In,Ga)Se ₂ Cells	铜铟镓硒电池
COP29	the 29th United Nations Climate Change Conference	第29届联合国气候变化大会
CREEI	China Renewable Energy Engineering Institute	中国可再生能源工程学会 / 水电水利规划设计总院
CREIA	Chinese Renewable Energy Industries Association	中国能源研究会可再生能源专委会
CZTS	Copper zinc tin sulfide thin-film solar cells	铜锌锡硫化物电池
DC	direct current	直流电
DFIs	Development Finance Institutions	发展金融机构
EPC	Energy Performance Contracting	节能服务合同
Eskom	Electricity Supply Commission (South Africa)	电力供应委员会 (南非)
EV	electric vehicles	电动汽车
EWM	Entropy Weight Method	熵权法
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	联合国粮食及农业组织
FiT	Feed-in Tariff	上网电价补贴
FPV	floating photovoltaic	漂浮式光伏
GaAs	Gallium Arsenide Cells	砷化镓电池
GCF	Green Climate Fund	绿色气候基金
GEF	Global Environment Facility	全球环境基金
GET FiT	Global Energy Transfer Feed-in Tariff	全球能源援助 上网电价补贴
GHI	Global Horizontal Irradiance	全球水平辐照度
GOGLA	Global Off-Grid Lighting Association	全球离网照明协会
GSC	Global Solar Council	全球太阳能理事会
GW	Gigawatt	吉瓦
GWh	Gigawatt-hour	吉瓦时
HJT	Heterojunction with Intrinsic Thin-film	本征薄膜异质结
ICON, Tsinghua	Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University (China)	清华大学碳中和研究院 (中国)
IESR	Institute for Essential Services Reform (Indonesia)	基础服务改革研究所 (印度尼西亚)
IEA	International Energy Agency	国际能源署
IFC	International Finance Corporation	国际金融公司
IoT	Internet of things	物联网
IMF	International Monetary Fund	国际货币基金组织
IRENA	International Renewable Energy Agency	国际可再生能源机构



IRA	Inflation Reduction Act (the United States of America)	《通胀削减法案》(美国)
IRP	Integrated Resource Plan (South Africa)	综合资源计划(南非)
IRR	Investment Return Rate	投资回报率
kW	Kilowatt	千瓦
kWh	Kilowatt-hour	千瓦时
LCOE	levelized cost of electricity	平准化度电成本
MDB	Multilateral Development Bank	多边开发银行
MW	Megawatts	兆瓦
MWh	Megawatt-hour	兆瓦时
NDC	Nationally Determined Contributions	国家自主贡献
NREL	National Renewable Energy Laboratory (the United States of America)	国家可再生能源实验室(美国)
O&M	Operation and Maintenance	运行维护
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	经合组织
OSC	Organic Solar Cells	有机太阳能电池
PAYG	Pay as you go	即用即付
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell	钝化发射极和背面电池技术
PLN	Perusahaan Listrik Negara (Indonesia)	印度尼西亚国家电力公司
PPAS	PV Plus Agriculture/Aquaculture System	光伏加农业/渔业系统
PPP	Public-Private Partnership	公私合作伙伴关系
PSC	Perovskite Solar Cells	钙钛矿太阳能电池
PV +	PV Plus	光伏加
R&D	Research and Development	研发
RE	Renewable Energy	可再生能源
SBP	State Bank of Pakistan	巴基斯坦国民银行
SDG2	Zero Hunger	零饥饿
SDG3	Good Health and Well-being	良好健康与福祉
SDG7	Affordable and Clean Energy	可负担的清洁能源
SDG8	Decent Work and Economic Growth	体面工作和经济增长
SDG9	Industry, Innovation, and Infrastructure	产业、创新和基础设施
SDG11	Sustainable Cities and Communities	可持续城市和社区
SDG13	Climate Action	气候行动
SDG15	Life on Land	陆地生物
SDGs	Sustainable Development Goals	可持续发展目标
SMEs	Small and Medium-sized Enterprises	中小型企业
SOEs	State-Owned Enterprises	国有企业
SPE	Solar Power Europe	欧洲太阳能协会
TOPCon	Tunnel Oxide Passivated Contact	隧道氧化物钝化触点
TW	Terawatt	太瓦
TWh	Terawatt-hour	太瓦时
UN	United Nations	联合国
UN DESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs	联合国经济和社会事务部
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	联合国气候变化框架公约
XBC	Back Contact Cells	背接触电池



第一章

引言： 南南合作，实现共赢

本章要点：

- 光伏发电成本低廉、系统灵活、清洁高效，在发展中国家前景广阔。
- 南方国家发展光伏存在电网、资金、技术、人才、项目经验等挑战。
- “光伏加”具备装机规模灵活、可独立于电网运行、便于运行维护、占地少等特点，适合在南方国家广泛推广，助力其可再生能源三倍目标的实现。

近年来,可再生能源作为应对气候变化的有效措施,在全球蓬勃发展。COP28提出的可再生能源装机容量三倍目标将进一步推动全球的可再生能源快速发展。在各种可再生能源技术中,光伏发电技术凭借其成本低廉、系统灵活、清洁高效的特点,正成为南方国家解决能源短缺和应对气候变化的重要措施。但必须承认,发展中国家在光伏发电领域仍面临电网、资金、技术、专业人才、项目经验等方面的挑战。

太阳能光伏,或者太阳能光伏配合储能等技术,与各种用能场景、设备结合(统称为“光伏加”模式),具备装机规模灵活、可独立于电网运行、便于运行维护、占地少等特点,可大大拓展光伏在南方国家的应用场景,使得光伏发电能够在农业、渔业、建筑、交通、照明、制冷、工业生产中得以应用,为南方国家提供清洁能源,助力其可再生能源三倍目标的实现。此外,“光伏加”还能促进南方国家之间互通有无,分享“光伏加”的案例和经验有助于发展中国家逐步实现经济发展与化石能源消费的脱钩,避免重走发达国家高碳发展的老路,实现经济发展、保护环境与应对气候变化的多目标共赢。



太阳能光伏,或者太阳能光伏配合储能等技术,与各种用能场景、设备结合(统称为“光伏加”模式),具备装机规模灵活、可独立于电网运行、便于运行维护、占地少等特点,可大大拓展光伏在南方国家的应用场景……

1.1 “光伏加”定义与特点

(1) “光伏加”定义:

目前国际上对于“光伏加”尚无统一定义,本报告中的“光伏加”是指太阳能光伏系统(独立运行或者配合储能),与各种用能场景或用能设备结合,为其提供电能的能源解决方案,实现成本低廉、环境友好、清洁高效的能源供给。

与场景结合的“光伏加”属于分布式光伏的范畴,而分布式光伏是一种分散式、规模灵活的光伏发电系统,通常安装在用户所在地或附近,直接为当地用户供电。与普通分布式光伏相比,“光伏加”更注重与用电负荷侧的有效结合,既符合分散发电就近开发、就近利用的特点,也加强了对负荷侧用电需求的匹配,并且结合了不同的技术和应用场景,促进了能源与农业、渔业、工业、建筑、交通和社区等领域同步发展,实现能源转型的经济、社会、环境效益最大化。

(2) “光伏加”特点:

太阳能光伏发电成本日益具有竞争性,2024年全球集中式并网光伏的加权平均度电成本已经降至0.044美元/千瓦时⁵;在储能等技术支持下,光伏发电的间歇性、随机性和波动性问题也得以解决,能够提供清洁、稳定的电力供应,并且在电网基础设施薄弱的地区也可以应用。与光伏相比,“光伏加”还具备如下特点:

- 装机规模灵活,可以分布式发展,建设周期短,初始投资低,易于运维;
- 灵活接入,适宜就近消纳;
- 节约土地资源,提升土地价值,实现一地多用;
- 更适用于为无电地区人口实现电力可及。

典型场景：



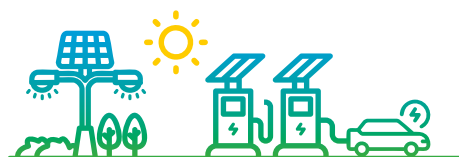
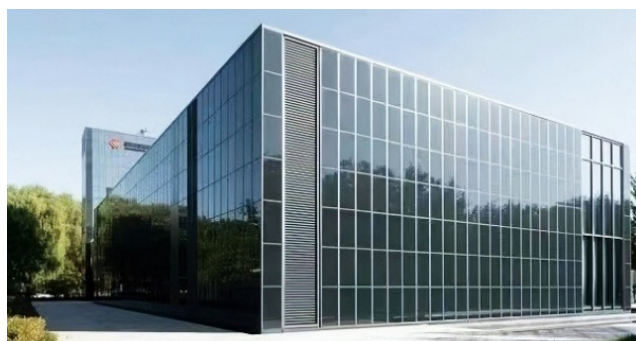
- **光伏加社区**将光伏发电技术与社区生产生活用电需求相结合，通过光伏系统为整个社区提供必要的、可负担的清洁电力，配合储能技术，可以延长电力供给的时间，摆脱大电网建设周期长、投资规模大的障碍，以最短周期解决满足农机具、手机、交通工具等生产生活用电问题，进而助力减贫增收，减轻能源贫困。



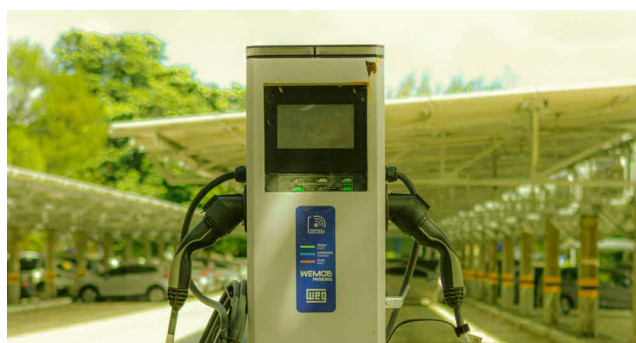
- **光伏加工业应用**将光伏发电技术与工业生产活动相结合，通过光伏系统为工业设施（工业设备、厂房、园区等）提供清洁电力，配合储能和智能控制系统，将光伏发电与工业生产用电需求精准匹配，降低能耗的同时，减少工业领域对化石能源的依赖。



- **光伏加建筑应用**将光伏发电与建筑设计、材料、运营相结合，通过光伏组件或光伏建筑材料为建筑提供清洁电力，提升建筑能效与降低碳排放。这种模式不仅是光伏系统与建筑的简单结合，更是光伏与城市规划、建筑结构、建筑材料和功能的深度融合。

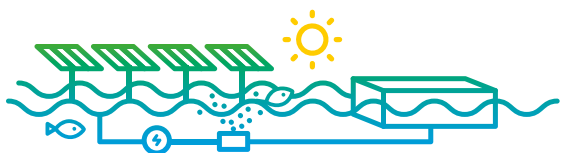


- **光伏加交通应用**将光伏发电系统与交通基础设施相结合，通过光伏系统为各类交通基础设施（例如信号灯、照明系统、停车场充电桩等等）提供清洁电力，减少交通领域，尤其是机动车对于化石能源电力的依赖。

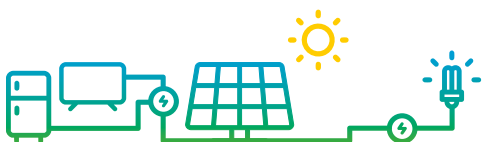




- **光伏加农业应用** 将光伏发电系统与农业生产活动相结合,通过光伏系统为农业设施(例如灌溉系统、温室、养殖场)提供清洁电力,降低农业生产对于化石能源的依赖。除电力供应外,光伏加农业还可以提高土地利用效率,将光伏组件架设在土地上方还可以减少干旱地带水分蒸发,改善部分农作物生长环境。



- **光伏加渔业应用** 将光伏发电系统与渔业生产相结合,通过光伏系统为渔业设施(例如制氧机、冷藏设备、监测系统)提供清洁电力,在无电地区解决现代化渔业设施能源供给问题,提高相关设施的使用率,提高渔业产值。



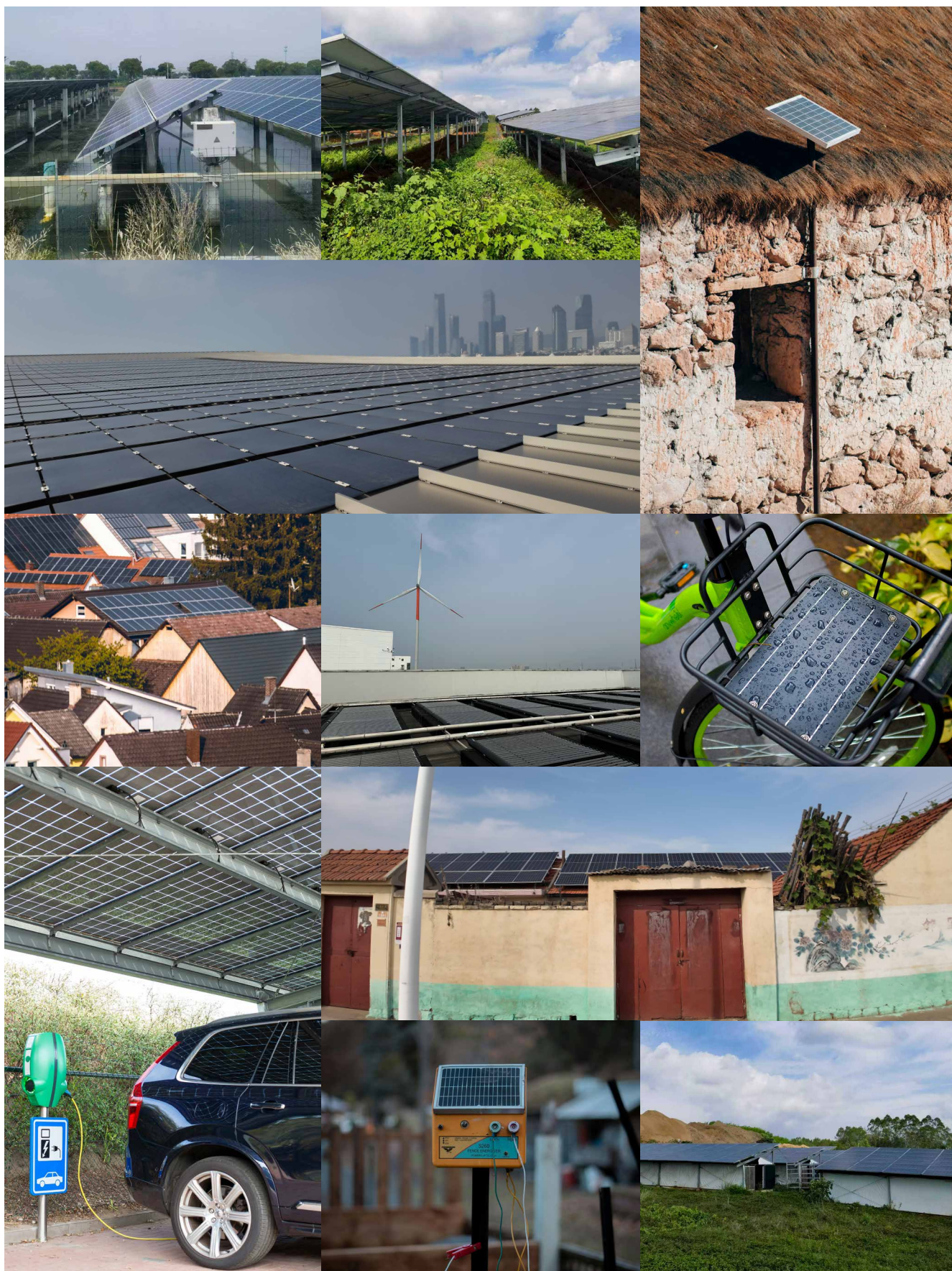
- **光伏加直流终端设备**:冰箱、空调、照明等电器可直接使用光伏发电提供的直流电源,用能效率较高;且这些设备可在民用、建筑等多种领域使用,实现跨场景应用。

1.2 “光伏加”报告目标

本报告的近期目标,是帮助全球南方国家了解“光伏加”这一低成本、易获取且清洁的能源利用模式,促进“光伏加”应用的有效推广和合理部署,进而在南方国家培育和扩大太阳能光伏市场。规模化的市场也会成为全球南方国家太阳能光伏设备制造和回收的产业发展基础和推动力。这可以帮助全球南方国家在一定程度上跨越大量使用化石燃料的能源发展阶段,直接建设和使用更具经济性的、以光伏为代表的可再生能源,降低这些国家能源基础设施的高碳锁定风险,这也正是本项目的最终目标。

本报告希望实现的具体目标如下:

- 为南方国家提供清洁能源方案,培育南方国家光伏市场;
- 根据南方国家实际情况,识别可行的光伏加应用模式,利用光伏加与生产、生活的结合提高综合协同效益;
- 研究和确定南方国家发展光伏加必需的发展条件和政策机制(比如将光伏发展纳入NDC目标),鼓励全球南方国家对“光伏加”项目进行公共和私人投资;
- 加强南方国家间合作,支持南方国家向低碳经济和可持续发展转型,逐步实现清洁能源设备的本地化生产,促进太阳能光伏设备和电池的回收利用。





02

应对挑战： 提升太阳能对于全球能源供给 和应对气候变化的贡献

本章要点：

- 南方国家面临能源供给和气候变化双重压力,光伏可以提供清洁能源,帮助南方国家实现可持续发展。
- 太阳能清洁可持续,资源分布广泛,包含南方国家在内的很多国家都将光伏纳入了国家规划,并提出了明确的发展目标,对光伏进行了布局,但这与1.5°C要求相比,仍需要加强。
- “光伏加”具备装机规模灵活、可独立于电网运行、便于运行维护、可实现一地多用、商业模式多元化等特点,同时可以实现减少贫困,促进性别平等,提供清洁饮水等多重效益。结合适应性和包容性强的特点,“光伏加”适合在南方国家广泛推广,助力其可再生能源三倍目标的实现。

2.1 加快向可持续能源系统转型前景：实施2030年议程和实现巴黎协定1.5°C目标

南方国家能源供应不足，制约了经济可持续发展也加剧了应对气候变化的压力。太阳能光伏技术具有成本低廉、系统灵活、清洁低碳等优势，其大规模应用，可以提升南方国家能源供给能力，减少由于化石能源应用带来的气候变化、气候灾害，对于南方国家甚至是全球实施2030年议程和巴黎协定1.5°C目标，具有重要意义。

2.1.1 南方国家面临能源供给和应对气候变化双重压力

南方国家投资能力制约能源可及问题的解决。尽管全球能源转型的投资额于2023年创下历史新高，超过2万亿美元，但120个发展中国家只获得了全球清洁能源投资的15%，撒哈拉以南非洲只吸引到约1.5%投资¹²。区域内部还存在严重的资金流向失衡情况，2010-2020年，南非、埃及、摩洛哥和肯尼亚总共获得460亿美元的清洁能源投资，占非洲所有清洁能源投资的近3/4，而其他非洲国家在此期间只获得了160亿美元的相关资金¹³。此外，发展中国家电网基础薄弱，覆盖率低、输送能力弱，这也制约了其能源可及和清洁能源发展。以非洲为例，目前，非洲仅有约1/6的国家电网覆盖率超过30%，许多国家低于10%¹⁴。各国电网普遍存在覆盖范围小、输送能力弱、电能损耗率高、供电可靠性低的问题，一些国家甚至没有高压输电线¹⁵。非洲电网建设的周期因项目类型、规模和地区而异，但通常需要数年时间。大型输电项目的建设可能需要5-10年甚至更久。因此依靠电网实现能源可及难度较大。

气候变化所带来的影响在发展中国家往往更具破坏性。与发达国家相比，发展中国家因基础设施建设滞后、适应技术储备不足、气候应对资金缺乏等因素，往往在面临气候变化影响时要承受更严重的破坏。同时，这些国家由于某些地理因素，如一些小岛国更容易受到极端天气的影响，例如海平面上升，干旱以及其他气候灾难，因此被迫成为气候灾难的承受者，进入气候适应能力衰退与发展动能减损的恶性循环。

低碳能源缺乏将制约发展中国家经济发展的更多可行性。

全球对于低碳发展要求不断提高，目前全球有20多个国家开始征收碳税，通过碳税进行收入调配更好地鼓励环境和气候友好型的产业发展；欧洲开始推行边境调节税，出口产品的竞争力在质量、价格等因素影响以外又多了一项碳排放指标，如果南方国家未能充分重视低碳产业布局，在未来的国际竞争中可能会受到更多掣肘，降低本国产品国际竞争力。

2.1.2 可再生能源促进能源与气候变化的协同发展

有利于南方国家解决21世纪全球发展与环境的挑战。发展太阳能光伏等可再生能源可以帮助南方国家进一步提升发展潜力，以达到目前两个最为重要的目标，即消除贫困与环境可持续发展。一方面，可再生能源可以起到提升可持续生活及经济韧性，支持消除贫困、促进可持续农业、可持续城市、防止荒漠化等作用；另一方面，还可以起到节约土地，生态修复的作用。

为南方国家提供清洁能源，降低化石能源消耗和实现能源可及。可再生能源，尤其是光伏，在帮助南方国家实现能源供给和能源可及方面表现突出。IRENA的报告显示，2022年，全球共有4.9亿人在使用独立离网太阳能光伏系统，包括太阳能灯和太阳能家用系统（Solar Home System）¹⁶。UN也预测，对于分布式可再生能源，尤其是离网光伏和微网的投入，配以电力服务（Electricity-as-a-service）的模式，可以极大促进能源可及率¹⁷。

光伏应用可以帮助南方国家长期处于低碳优势地位。南方国家太阳能资源丰富，可以充分利用太阳能光伏发电减少碳排放。以东非地区为例，该地区全球水平辐照度（Global Horizontal Irradiance, GHI）通常介于1800至2200千瓦时/平方米/年，每一百万千瓦光伏发电装机年发电量约为15亿度，可减少54-58万吨天然气发电碳排放，或者115到120万吨¹⁸煤电排放。南方国家在减排问题上历史包袱轻，以非洲国家为例，历史碳排放仅占全球碳排放总量的不足3%，如果发展中国家能够跨越化石能源阶段，即可以以绝对的低碳优势提高国际竞争力。

2.2 全球太阳能利用雄心

2.2.1 太阳能是最为清洁、丰富和可持续的能源之一

光伏发电清洁低碳。光伏发电不排放二氧化碳和污染物,但从全生命周期的角度测算,其排放约为20-50克二氧化碳当量/千瓦时¹⁹,远低于火电。2022年全球光伏的总发电量为1.3万亿千瓦时²⁰,最低减排4.7亿吨,若按替代高碳的煤电计算则可高达10亿吨。

南方国家太阳能资源丰富且分布范围广泛。根据IEA的报告,东南亚地区地处热带,有着丰富的光照资源供光伏发电²¹,拉丁美洲的巴西、墨西哥、智利和阿根廷有着高质量的光伏资源²²,东非地区太阳辐射资源极为丰富,全球水平辐照度(GHI)通常介于1800至2200千瓦时/平方米/年,位列全球光照最充足区域之一。

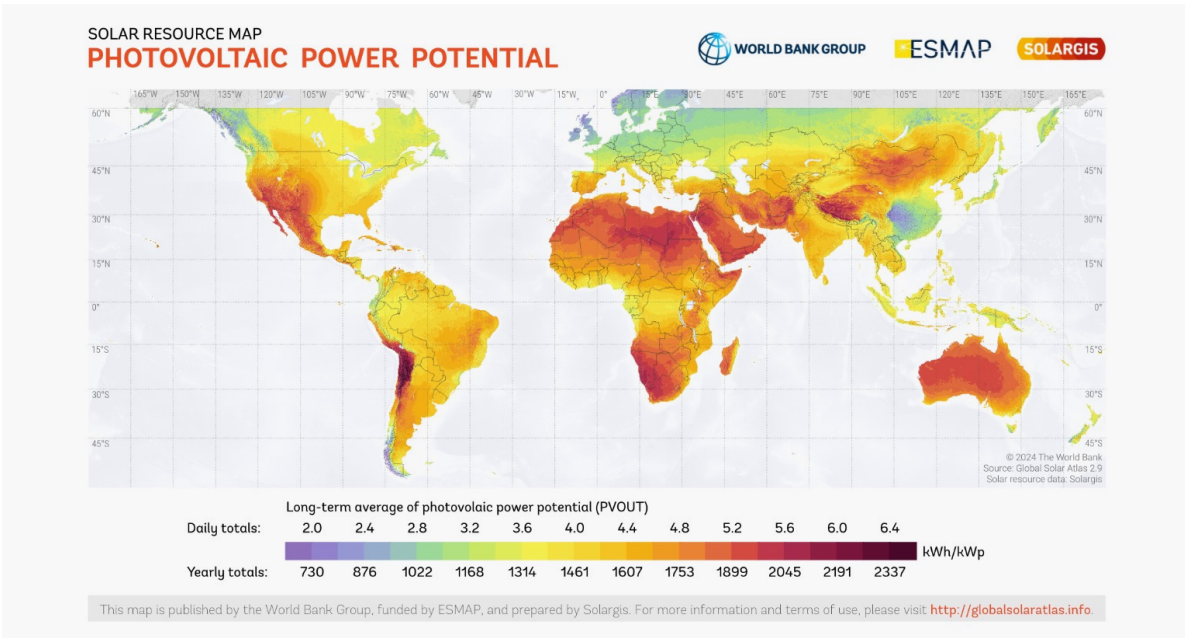
2.2.2 世界多国对太阳能开发利用的雄心日益增强

多国加速推进太阳能光伏发展部署。根据联合国气候变化框架公约(UNFCCC)2023年的国家自主贡献(NDC)综合报告,超过50%的国家在其更新的气候行动计划中明确提出扩大太阳能利用,并通过技术创新、政策激励和产业投资,推动太阳能成为能源转型的核心支柱⁹。

多国/地区制定可再生能源发展规划,太阳能目标全面升级。欧盟通过其“RE Power EU”计划提出到2030年将太阳能装机容量从2022年的2亿千瓦提升两倍至6亿千瓦。美国的《通胀削减法案》(IRA)计划投入3690亿美元用于清洁能源补贴助力实现2035年100%零碳电力目标,而太阳能将在其中发挥非常重要的作用。中国计划在“十四五”期间(2021-2025年)新增光伏装机容量约4至4.5亿

图 2-1

全球太阳能资源分布图 (发电潜力)



来源: Global Solar Atlas, The World Bank and Solargis.

千瓦，并计划到2030年将风光总装机容量提升至12亿千瓦以上²³。巴西在2021年制定的《十年能源发展计划2031》中提出计划到2030年实现分布式光伏装机容量达到3000万千瓦（30GW）。南非计划在2030年前新增800万千瓦光伏装机。根据新发布的印度尼西亚电力发展规划2025-2034，印度尼西亚2034年前要新增光伏装机1710万千瓦²⁴。印度计划到2030年实现5亿千瓦的可再生能源装机目标，其中太阳能占比超60%（约3亿千瓦）。

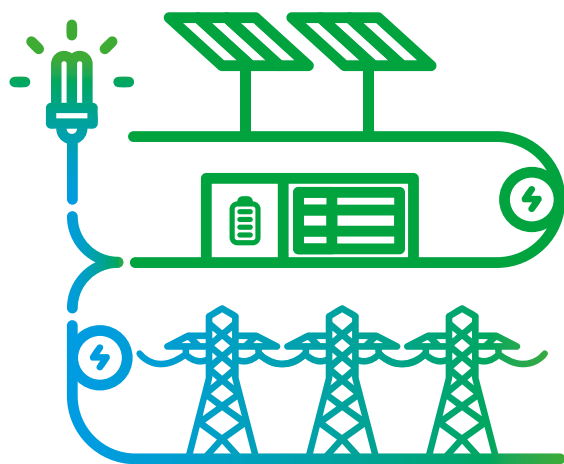
支撑1.5℃温控目标仍需各国大幅提升包括光伏内在的可再生能源目标。UNFCCC的《2023年国家自主贡献综合报告》还指出，若当前NDC目标全面落实则2030年的全球太阳能发电量将较2020年实现三倍的增长，但各国仍需进一步提高目标才能有效支撑1.5℃温控目标的实现⁹。IEA的预测表明到2030年全球光伏年新增装机需突破6.3亿千瓦²⁵才能支撑净零排放目标的实现。

2.3 南南合作展望：促进全球南方能源跨越式发展，“光伏加”是最高效的清洁能源方案之一

2.3.1 “光伏加”是南方国家实现能源跨越最有效方式之一

“光伏加”所具备的诸多特点可以帮助南方国家在能源转型过程中降低高碳锁定风险，实现能源跨越式发展，完成“2030年可再生能源装机三倍目标”。

“光伏加”靠近负荷，便于消纳，不受电网条件约束。大规模集中式发电往往需要通过电网把电力输送到用户。全球南方国家现阶段电网建设水平参差不齐，普遍存在电网覆盖率低²⁶，输送容量有限且稳定性较弱等问题，难以为可再生能源电力输送提供保障。东南亚地区岛屿众多，受到自然地理条件限制，主要骨干网架薄弱，岛屿间电力供应失衡，电力输送难度大。非洲电网整体发展相对滞后，仅有约1/6的国家电网覆盖率超过30%，许多国家低于10%。“光伏加”具备并网和离网两种模式，离网模式下的“光伏加”可以独立为用户提供清洁能源，配以储能就可以为消费端提供持续、稳定的电力供给。南方国家普遍太阳能资源充足，光伏发电小时数高，因此可以通过光伏与储能的组合使用，摆脱地理条件、网架结构的限制，根据负荷分布灵活调整布局。



“光伏加”靠近负荷，
便于消纳，
不受电网条件约束。



“光伏加”装机规模灵活，
从家用照明（5千瓦以下），
到为工厂提供电力的兆瓦级光
伏加工业模式，可以根据用户
侧需求调节装机规模大小。

装机规模灵活,资金需求量压力较小。“光伏加”装机规模灵活,从家用照明(5千瓦以下),到为工厂提供电力的兆瓦级光伏加工业模式,可以根据用户侧需求调节装机规模大小。因此对于初投资和运维费用灵活,同时还有即用即付系统或屋顶租赁等多种融资模式,可以显著减少资金负担。

安装运维简单。现阶段光伏系统采用预制化设计,降低了安装复杂程度。同时运维流程已经十分成熟,对于技术工人工程、电力等相关专业知识要求相对较低,短期培训即可开展工作。对于偏远地区可以采取本地工人负责日常维护,专业技术人员远程支持的模式。

一地多用,实现多重收益。“光伏加”与农业和渔业的结合,可以提升单位土地效益,为农场和鱼塘提供清洁电力的同时,还可以起到减少水体蒸发,改善土壤条件,种草畜牧的作用。通过售电(或节约电费),碳交易、产品销售等渠道叠加收入,提高投资回报率,同时还可以解决能源贫困和就业问题。

2.3.2 “光伏加”具有多重效益

“光伏加”除了提供清洁能源之外,还具有增加就业、消除贫困、促进经济增长及社会公平等效益,对于南方国家可持续发展具有重要意义。

表 2-1
“光伏加”效益一览表

序号	“光伏加”效益	原因
1	 经济适用的清洁能源	通过“光伏加”助力可再生能源三倍目标的实现,为南方国家提供经济适用的清洁能源:克服光伏对电网的依赖,拓宽应用场景;实现一地多用,增加项目的收益,提高其经济性;规模灵活,可充分适应无电地区对电力的需求;商业模式更加多元化,吸引更多相关方投资项目。
2	 气候行动	光伏发电替代化石能源发电,减少碳排放。2022年全球光伏的总发电量为1.3万亿千瓦时 ²⁰ ,最低减排4.7亿吨,若按替代高碳的煤电计算则可达10亿吨 ¹⁸ 。
3	 体面工作和经济增长	“光伏加”将创造就业机会,并为工业、农业、服务业等提供电力,促进经济发展。
4	 性别平等	一是“光伏加”为女性提供就业机会。国际可再生能源署(IRENA)的调查显示,可再生能源领域的女性从业者比例为32%。二是通过电力的使用,减少妇女的劳动强度,或者让其有时间从事其他行业。
5	 减少不平等	“光伏加”为无电人口提供清洁电力,实现能源公平和能源公正转型。
6	 清洁饮水和卫生设施	光伏加海水淡化,可提供清洁饮水。
7	 消除贫困	光伏加农业,光伏加渔业项目为农民,渔民增加收入。此外,针对印度农村的一项调查表明,为无电人群提供每天16小时的电力供应可带来约18%的收入增长 ²⁷ 。
8	 优质教育	“光伏加”为无电地区人口提供电力,为孩子提供照明,改善孩子教育条件。



03

“光伏加”技术发展： 从间歇性可再生能源到可靠、 可持续、可负担的电力供应

本章要点：

- 全球光伏实现了跨越式发展。截至2024年底，全球光伏累计装机容量突破20亿千瓦的里程碑²⁸，在当年新增装机占比高达71%，成为全球电力新增容量的主力。
- 技术进步和成本大幅下降拓展了光伏应用的边界。2023年，全球新建集中式并网太阳能的加权平均LCOE已降至0.044美元/千瓦时，比化石燃料的加权平均发电成本低56%⁵。技术与成本的优势使得太阳能发电几乎在全球任何角落成为可能。
- 全球储能技术快速发展、成本实现大幅下降。借助此技术，可以大幅提高光伏系统电力供应的持续性和可靠性，拓展“光伏加”项目的应用场景，满足多样化的负荷需求。
- 储能电池和光伏组件的回收产业日益成熟，随着政策体系的不断完善和相关技术的持续进步，相关的废弃物管理、材料回收和循环利用水平得以改善。
- 此外，直流终端设备应用的推广，以及数字化和智能化技术的引入，也成为了促进“光伏加”应用的新引擎。
- 随着太阳能光伏在全球布局的实现，越来越多的国家，特别是发展中国家，正在优先考虑将其用于解决面临的能源可及、民生改善、社会经济发展等关键问题。
- 以“光伏加”为代表的分布式光伏对实现能源公平具有巨大推动潜力：根据世界银行电气化平台的研究，全球约有9.69亿人口亟需在2030年之前解决通电问题，截至2024年，离网光伏已帮助其中41%的人口享受到了相对成本最低的能源解决方案²⁹。

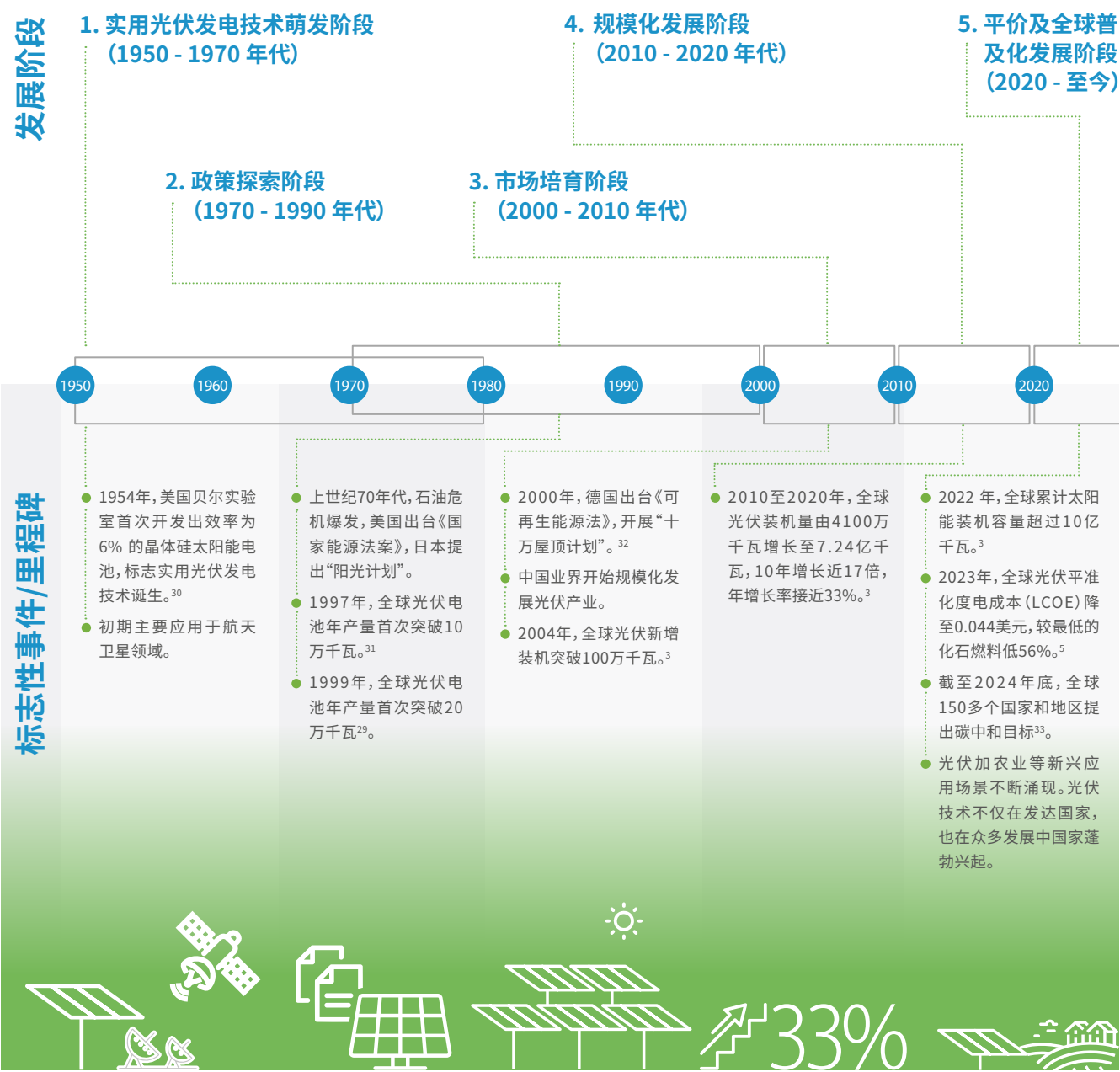
3.1 全球光伏产业：从萌芽期到技术成熟

3.1.1 全球光伏进化历程：从太空到千家万户

现代光伏实用化起步于1954年，初期主要应用于航空航天领域。20世纪70年代石油危机推动了光伏转向民用，受各国激励政策影响，光伏技术应用的商业化得以加速。在过去的近半个世纪的时间内，全球光伏应用场景实

现了离网系统、并网系统，以及分布式户用系统等多场景的覆盖，光伏从“太空科技”蜕变为全球清洁能源利用的大众化解决方案。

图 3-1
全球光伏发展关键历程



3.1.2 太阳能光伏不断实现技术迭代

伴随光伏市场需求不断扩大，全球光伏技术也正以惊人的速度实现迭代推进。从应用材料方面，光伏电池经历了从单晶硅到多晶硅再回归单晶硅的演变。近年来，单晶技术一直保持光伏市场主流技术的地位，薄膜电池受技术扩展性限制市场占有率较小，以钙钛矿为

代表的新结构电池步入产业化早期，具备较强的应用潜力。从技术类型方面，早期的铝背场电池 (BSF, Back Surface Field) 受效率天花板制约已逐步被淘汰，单晶 PERC 电池成为当前应用最为广泛的主流技术。随着电池技术的迭代，以 TOPCon、HJT、XBC 为代表的高效 N 型电池技术凭借更高的转换效率和性能优势，有望成为未来主流电池技术之一。

表 3-1
各种太阳能光伏技术对比情况

分类	电池名称			平均转换效率 ^{*,34}	成本	使用寿命	技术优势	主要限制因素
晶硅太阳能电池	单晶硅	P型电池	PERC	23.5%	低	25年以上	转换效率高、工艺相对简单、成本较低	转换效率进一步提升空间有限、存在光衰现象
		N型电池	TopCon	25.8%	较高		有效率高、低衰减性能、高量产性价比	生产能耗高
			HJT	26%	较高		转换效率高	成本高、技术难度大
			XBC	26.0%	较高		转换效率高、兼容性强	成本高、技术难度大
	多晶硅			~20%	较低	15-25年	成本较低、性能稳定	效率较低、寿命相对较短
薄膜电池	铜铟镓硒 (CIGS)			17.9%		25年以上	生产成本低、污染小、不衰退、弱光性能好	工艺和制备条件苛刻、关键原料储量有限
	碲化镉 (CdTe)			19.9%	较高	30年	组件稳定性好、温度系数低、光谱响应好、发电量高	生产效率低
	砷化镓 (GaAs)			37% ^{35, 36}	较高	20年以上	转换效率高、稳定性好	成本高
新结构电池	钙钛矿太阳能电池 (PSC)			34% ^{37, 38}	低	20-30年 ^{***}	高光转换效率、带隙可调、降本空间大	大尺寸组件效率提升、光衰问题
	铜锌锡硫化物电池 (CZTS)			~10% ³⁹	低	20年 ^{***}	无毒、矿源丰富、成本低	电荷传输性能低限制电池效率提升
	有机太阳能电池 (OSC)			~21% ^{**, 37}	高	/	具备柔性、质量轻、颜色可调、可大面积印刷制备	效率低
	量子点太阳能电池			~18% ^{**, 37}	/	/	吸光效率高、价格低	尚处于理论和基础研究阶段

* 量产平均效率
** 实验室效率
*** 理想条件下，根据已有运行数据推算

3.1.3 全球光伏装机容量突破20亿千瓦²⁸里程碑

从2000年到2023年，全球太阳能光伏装机容量从100万千瓦跃升至14.1亿千瓦，实现了惊人的1182倍增长³，标志着全球光伏行业实现了难以想象的快速发展。根据全球太阳能理事会和欧洲光伏产业协会统计数据显 示，截至2024年底，全球太阳能光伏累计装机容量达到了20亿千瓦的新里程碑，相当于印度、美国和英国的总电力装机容量，或足以为10亿户家庭提供电量。

太阳能光伏成为全球电力新增容量的主力。2024年全球所有电力总装机容量达到约96亿千瓦，其中太阳能占比约为19%，而2000年此比例仅为0.8%³。2024年全球电力新增装机为6.3亿千瓦，其中光伏装机4.5亿千瓦，在当年新增装机占比高达71%³。太阳能光伏的高速增长使全球电力装机结构得到了极大地优化。

2022年，全球光伏发电量达到约1.29万亿千瓦时，占全球年总发电量的4.5%和可再生能源发电量的15%，相较于2000年发电量13亿千瓦时的水平，实现了近乎千倍（987倍）的显著增长²⁰。

图 3-2
2003-2024年全球光伏新增和累计装机容量

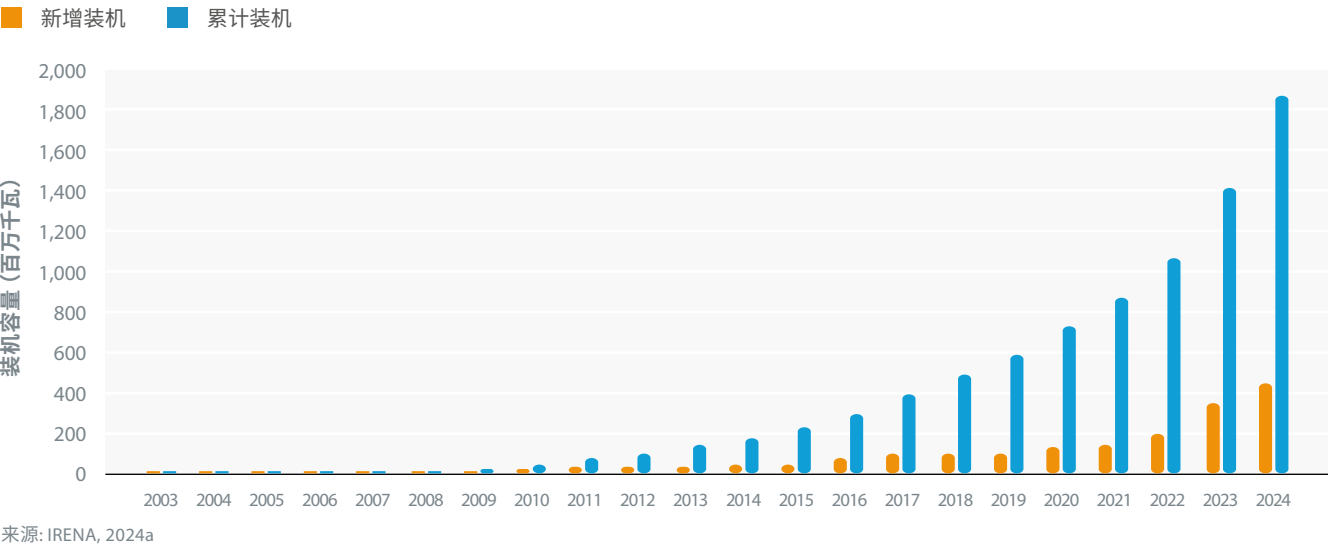


图 3-3
2024年全球各类能源发电装机容量份额(总装机96亿千瓦)

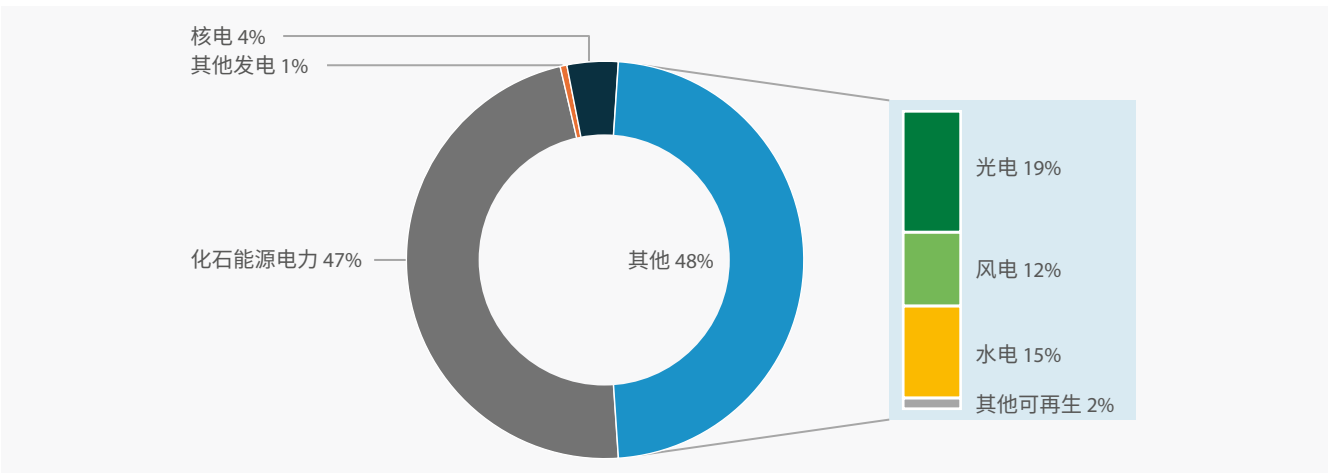
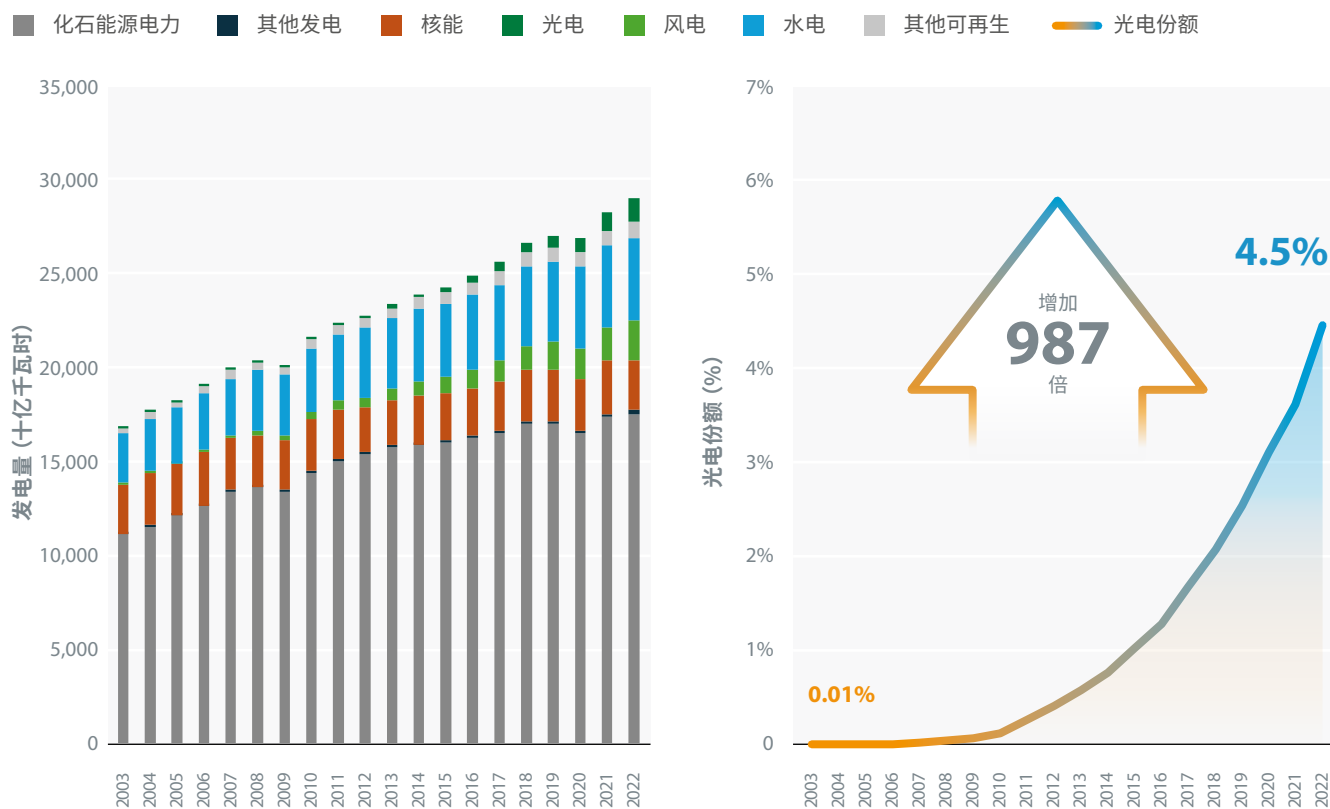


图 3-4

2003-2022年全球各类能源发电量



来源: IRENA, 2024a

在大规模的发展过程中，除集中式并网太阳能光伏系统外，也包括了各种光伏加系统，如与建筑物/屋顶/农业/水利用/储能技术集成的光伏系统，通常用于电力需求侧的不同能源消费场景（具体情况，请参阅第4章中的案例研究）。

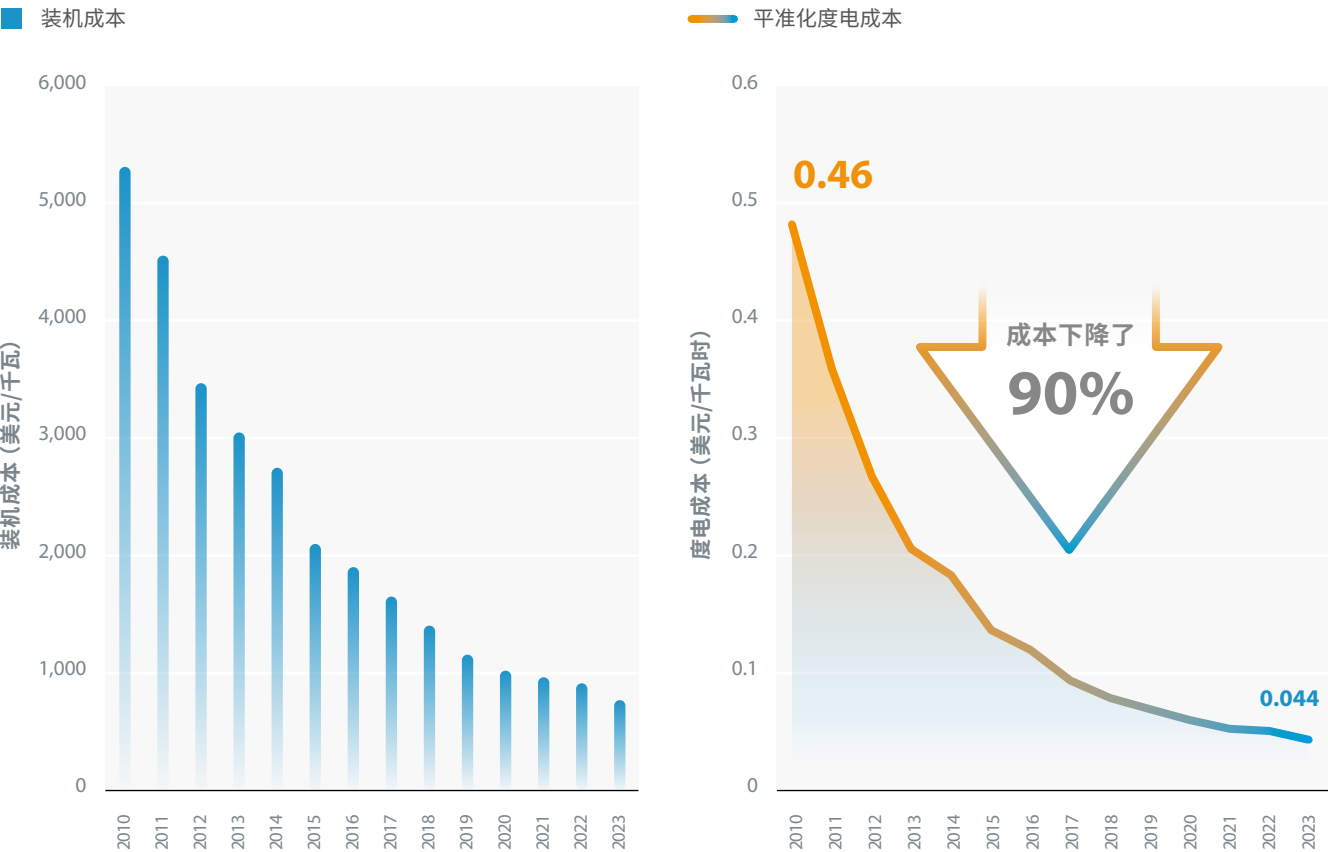
分布式光伏以及“光伏加”的应用具备巨大潜力，特别是在实现能源可及方面。根据国际能源署的研究，2022年全球约40%的光伏装机来自分布式光伏（户用为主）。根据其2050年净零排放情景预测，到2030年，依赖太阳能光伏系统的家庭数量将从2022年的2500万户激增至1亿户以上，到2050年，这一数字更将实现翻倍，达到2.4亿⁴⁰。另据世界银行电气化平台研究显示，2030年前全球需要解决通电问题的人口数量约为9.69亿，2024年离网光伏已为其中41%，即3.98亿人提供了最具成本效益的电力供应³⁰。

3.1.4 光伏发电成本已低于化石燃料发电，竞争力大幅提升

当前，全球几乎所有市场中新建的太阳能和风能发电成本已显著低于新建燃煤与燃气电厂。集中式并网光伏发电的平准化度电成本（LCOE）由2010年的0.46美元/千瓦时降至2023年的0.044美元/千瓦时，累计降幅达90%，比最低成本火电低56%⁵，经济竞争力得到了极大提高。

2023年，全球投产光伏项目的安装成本降至约758美元/千瓦，较2010年下降86%，装机成本持续下探。同期光伏设备价格降幅介于76%至93%⁵。此外，光伏项目运维成本也得到了持续优化。2023年全球大型并网光伏电站年平均运维成本为10.3美元/千瓦，较2010年减少了62%，其中，亚洲成本最低，约为3.8美元/千瓦⁵。安装与运维成本的下降，大大减轻了用户应用光伏设备的负担，进一步提高了光伏项目的市场吸引力。

图 3-5
2010-2023年全球加权平均集中式并网光伏装机成本和平准化度电成本



来源: IRENA, 2024b

3.1.5 光伏技术进步快,发电效率取得显著提升

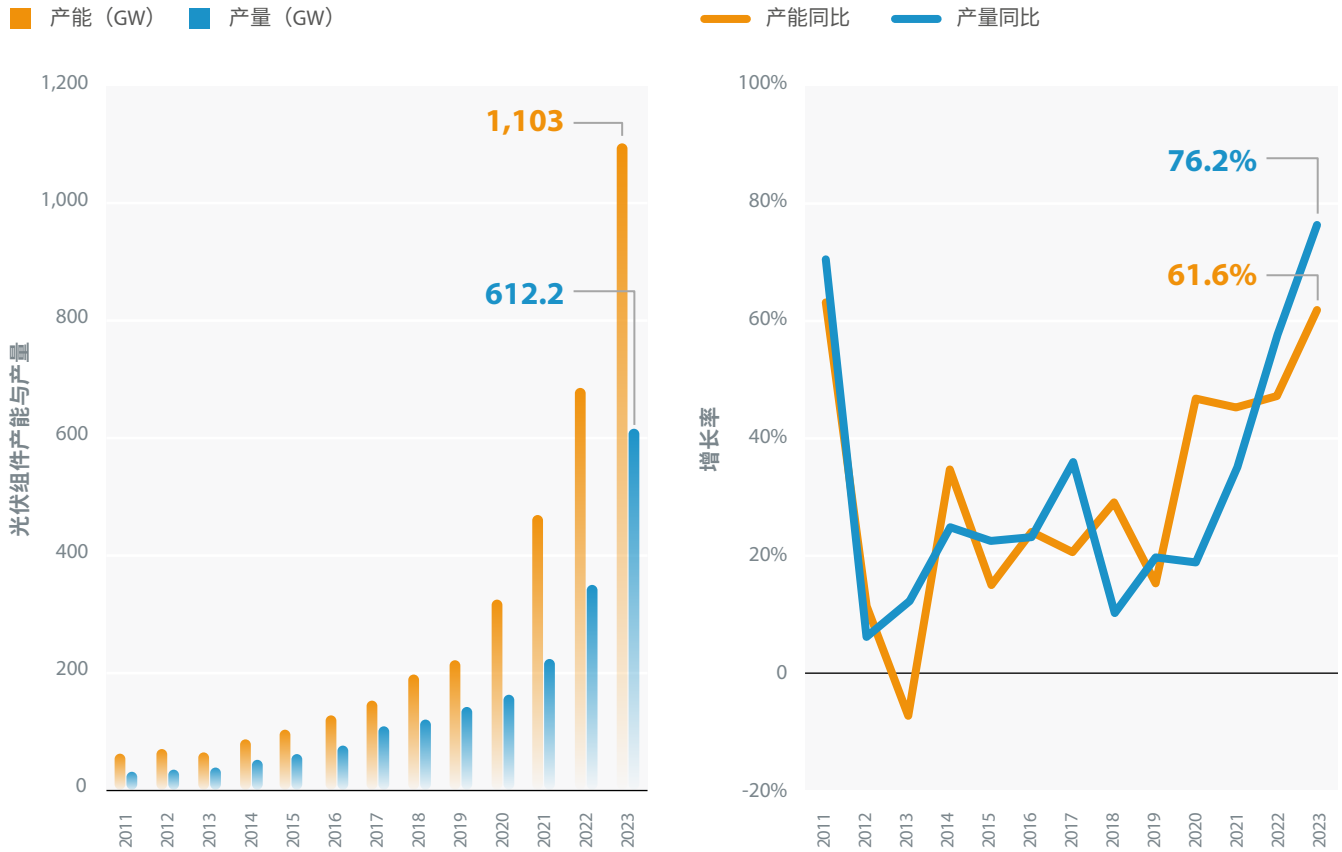
光伏产业制造能力提升。在全球应用市场需求的拉动下,光伏生产规模持续扩大。2024年全球多晶硅、硅片、电池片、组件的产量分别达到195.7万吨、8.03亿千瓦、7.53亿千瓦、7.25亿千瓦,产能分别达到339.4万吨、13.95亿千瓦、14.27亿千瓦、13.89亿千瓦。其中,组件的产能达到需求量近两倍³⁵。

随着光伏技术不断进步和效率持续提升,光伏行业逐步走向成熟。同时,在设计和制造工艺创新的推动下,光伏电池转换效率持续突破,助力成本的进一步降低。目前, PERC电池平均效率达到23.5%,TOPCon电池量产效率达到25.8%,HJT实验室效率达到26%,钙钛矿叠层电池实验室效率已超过33%³⁵,并逐步实现产业化。电池与组件技术的持续迭代,不断刷新效率上限,同时优化材料利用率并降低发电成本。

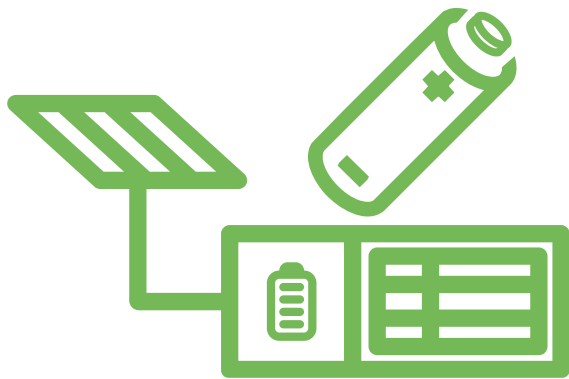
技术进步、效率提升和成本下降正为太阳能光伏开启全新机遇——不仅大幅拓展了光伏应用的边界,出现了光伏农业(Agri-PV)、建筑一体化光伏(BiPV)、漂浮式光伏等新的应用形式,更使光伏发电的应用在全球几乎任何角落成为可能。光伏技术的普适性突破,正推动其从区域性能源向全球普惠型清洁能源解决方案迈进。

图 3-6

2011-2023年全球光伏组件产能产量增长情况



来源: CPIA, 2024



3.2 新技术成为促进光伏加应用的新引擎

技术、设备的创新在降低应用成本、提高系统效率等方面发挥着重要作用,使得光伏在更多地域和场景中得以应用。

3.2.1 储能使得光伏更好地匹配多样化的负荷需求

储能可以平衡电力供需,提升光伏发电的稳定性和利用率,因此和光伏发电结合日益紧密。在跨季节、跨年长时储能领域,主要应用的储能技术有抽水蓄能、压缩空气储能,此类储能多用于大型项目。电化学电池凭借较高的能量密度和功率密度,以及较快的响应时间,在短时储能和电网调节方面表现出色。超级电容储能、飞轮储能和超导储能则因响应速度快、功率密度高、循环次数极高,在短时高功率调频领域具有显著的应用优势。各种储能技术特性对比见表。

表 3-2
不同储能技术的特点⁴¹

技术类型	寿命	效率	成本	维修频率	安全性	应用场景
抽水蓄能	40-60年	70-80%	低	低	安全	集中式电站
压缩空气储能	30-40年	45-75%	低	低	安全	集中式电站
飞轮储能	20-30年	85-95%	高	低	安全	集中式电站
超导储能	10-20年	高于95%	高	低	安全	集中式电站
超级电容储能	10-15年	高于90%	高	低	安全	集中式电站
铅酸电池	3-5年	70-80%	低	高	低	离网
锂离子电池	10-15年	90-95%	高	低	有一定风险	户用, 商业用
液流电池	10-20年	70-85%	高	低	很安全	集中式电站
钠硫电池	5-10年	80-90%	较低	较低	安全	示范阶段

目前, 根据能量储存方式的不同, 储能可划分为物理储能、电化学储能和电磁储能三大类。其中, 电化学储能是主要类别, 包括铅酸电池、锂离子电池等。凭借较高的能量密度和功率密度、较快的响应时间和度电成本下降优势, 电化学储能具备显著的应用优势, 使其成为大规模能源存储部署的颇具竞争力的解决方案。

从2010年到2023年, 全球电化学储能新增装机容量年复合增长率达到71.5%, 发展规模持续攀升, 装机成本下降了80%以上⁵, 为储能的规模化应用奠定了良好基础。

储能技术结合独立光伏系统或通过组建微型电网的形式, 可以促进电力的获得, 在越来越多的发展中国家得以应用。一方面, 借助储能技术, 可以在无电网覆盖地区(如偏远地区、海岛等), 通过将光伏系统所发电量进行存储, 并在夜间或阴雨天释放的方式, 解决光伏发电的间歇性和波动性, 保障电力供应的持续性和可靠性。另一方面, 结合储能的光伏系统可以实现更高比例的电力自发自用, 减少对电网的依赖甚至作为电网备用电源, 进一步提高供电的可靠性。此外, 利用不同储能技术的合理组合(如电池、抽水、储热), 还可以进一步拓展光伏加储能技术在民用、商业和工业领域的应用范围。

值得注意的是, 光伏加储能在印度已具备与新建燃煤电厂竞争的性价比优势。预计到2030年规模化电池储能项目总前期成本将下降40%以上, 而光伏联合储能有望成为最具竞争力的新型电力来源之一⁴²。

图 3-7

2010-2023全球电池储能年增容量与电力储能装机成本

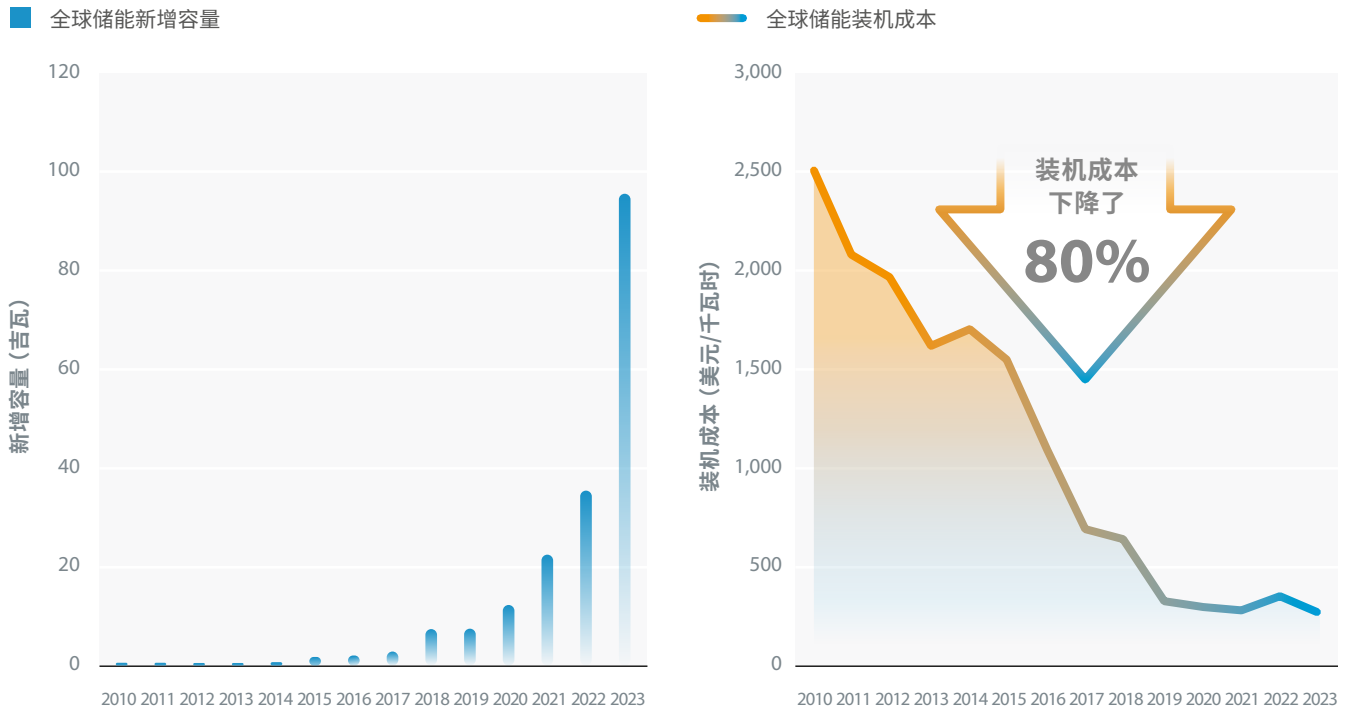
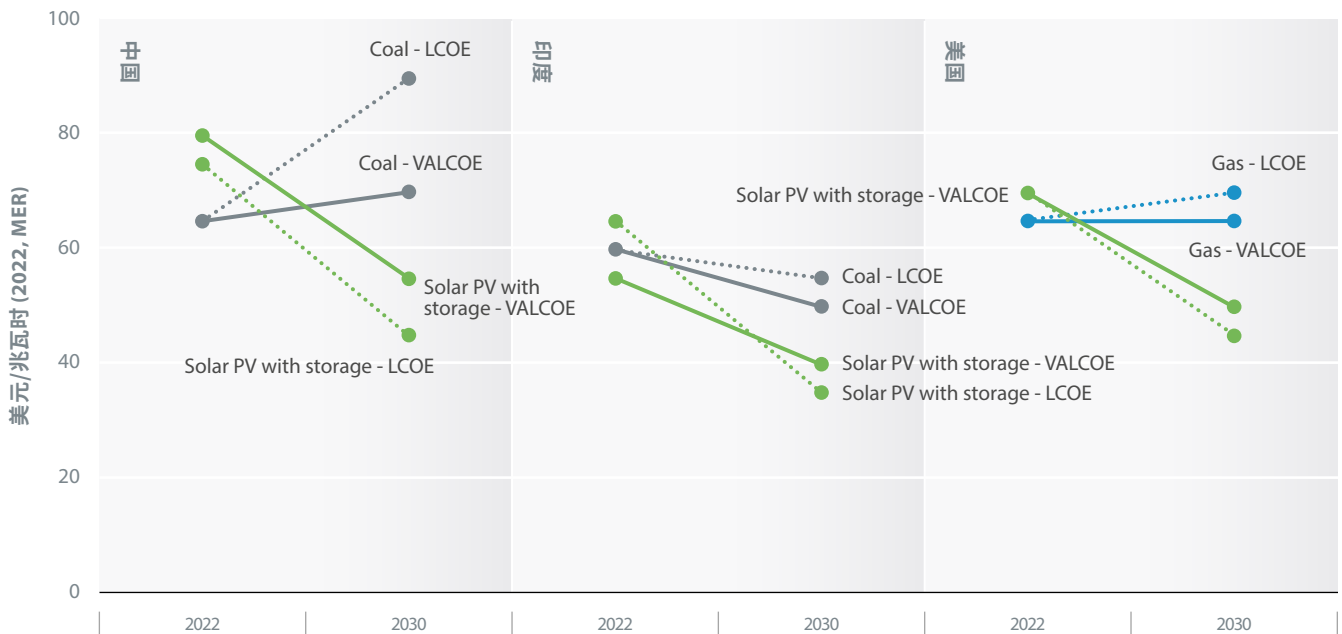


图 3-8

既定政策情景下部分区域光伏+储能、燃煤及天然气的平准化度电成本 (LCOE) 与经价值调整的平准化度电成本 (VALCOE) (2022-2030年)



3.2.2 直流终端设备应用提升光伏应用场景

由于光伏系统以直流形式发电,直流终端设备(包括连接器、合路器、隔离开关和保护装置)的效率、可靠性和创新性对太阳能设备的性能和可扩展性具有重要影响。

系统的稳定性和安全性是用户的关注重点,由于直流电器省去了中间的能源转换环节,减少了能源在转换过程中的损失,提高了设备运行状态的稳定性和能源利用效率。同时,直流终端设备的应用,可以避免光伏发电连接逆变器转换设备,降低系统的复杂性,减少因电流波动导致的元器件老化问题,延长设备使用寿命,降低更换与维修成本。

随着直流技术的发展和直流终端设备的不断普及,如直流空调、直流冰箱、直流电视等,促进了光伏等直流电源的应用范围。电动交通工具是另一个直流应用的重点领域,通过直流耦合将光伏发电与储能系统结合,为电动车提供充电服务,提高用户的生产生活水平、促进当地经济发展。

随着数字化、智能化技术的快速发展,物联网、大数据、AI等在光伏电站智能运维的应用,可以提高光伏发电系统的效率和可靠性,降低运营成本。

3.2.3 数字化和智能化技术降低运维成本

随着数字化、智能化技术的快速发展,物联网、大数据、AI等在光伏电站智能运维的应用,可以提高光伏发电系统的效率和可靠性,降低运营成本。

实现实时监控与故障预警。通过部署物联网传感器、智能组件和数字化平台,光伏电站能够实时采集设备运行参数(如电流、电压、温度)和气象数据,实现故障的早期预警与精准定位。

减少人力成本。传统光伏项目运维依赖人工巡检,而智能化技术通过无人机、机器人等设备替代部分人力。例如,无人机智能巡检方案可将综合效率提升80%,集中式电站的运维人员配置降至20万千瓦仅需5人⁴³。

实现数据驱动的预防性维护。通过积累历史运行数据构建大数据仓库,系统分析设备性能衰减规律并制定预防性维护计划,及时更换或修复,避免发电量损失。

全生命周期成本优化。规划设计阶段优化项目设备布局,减少设计变更次数并缩短工期;建设阶段通过物联网传感器监控施工质量;运营阶段,智能决策系统应用于少数高科技试点市场(如中国),以制定和调整发电策略,从而增加参与市场交易的收益。长期来看,有望在新兴市场得以扩大应用范围。

3.3 储能电池和光伏组件回收产业日益成熟

3.3.1 政策体系不断完善

针对退役电池、退役风电机组和光伏组件的回收利用、处置,很多国家和地区都出台了相应的政策,其中欧盟和中国具有较强的代表性。

除国家政策指导外,很多行业组织也不断提出有建设性的行业倡导:如全生命周期国际行动倡议,推动风电、光伏设备回收利用体系建设。

专栏 3-1

《欧盟电池和废电池法规》

该法规于2024年2月18日起生效，在各成员国启动了分阶段实施进程。这项法规适用于包括废旧便携式电池、电动汽车电池、工业电池等在内的所有电池。法规设定了动力电池最低回收率及材料回收目标，规

定企业要对生产或使用的电池进行回收利用，并规定了具体的比例及时间节点等，涉及企业要对材料回收技术及生产技术进行改进等，特别是要回收利用钴、锂和镍等关键原材料。

专栏 3-2

关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见

2023年7月21日，中国国家发展改革委等部门发布《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》。文件提出，集中式风电和光伏发电企业依法承担退役新能源设备（含零部件）处理责任，不得擅自以填

埋、丢弃等方式非法处置退役设备，不得向生活垃圾收集设施中投放工业固体废弃物。文件明确了责任主体是可再生能源项目的建设单位。

专栏 3-3

关于加快构建废弃物循环利用体系的意见

2024年02月09日，中国国务院办公厅发布《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》。文件提出，加强废旧动力电池循环利用，加强新能源汽车动力电池溯源管理。组织开展生产者回收目标责任制行动。大

力推动动力电池梯次利用产品质量认证，研究制定废旧动力电池回收拆解企业技术规范。

文件还提出促进退役风电、光伏设备循环利用，建立健全风电和光伏发电企业退役设备处理责任机制。

专栏 3-4

“生命周期思维（LCT）国际行动倡议”⁴⁴

中国标准化协会、中华环保联合会和瑞典环境科学研究院（IVL）于2023年11月发起了“生命周期思维（LCT）国际行动倡议”，呼吁各利益相关方协同合作，从全生命周期角度支持可持续高效低碳发展，助力标准体系建立，推动实现标

准一致性，实现行业能力提升，并促进国内外的合作与交流。

“倡议”下设可再生能源工作组，从标准化体系建设、环境核算与报告、能力提升、传播角度促进风电、光伏设备回收利用体系建设。

3.3.2 技术取得进展

对于退役电池、退役风电机组和光伏组件的回收、利用、处置等问题，有关企业和科研机构进行了技术研发，不断取得进展。

锂电池回收技术主要分为两大类：再生利用和梯次利用。再生利用技术涉及对废旧锂电池的预处理、彻底放电，然后通过物理、化学或生物方法，将电池中的镍、钴、锂、锰等有价值金属，以及其它锂电池成分中的有用材料进行分离，最终制成金属化合物或锂电池原料。而

梯次利用技术则是对废旧锂电池中的电芯或电池包进行拆解、检测、分选，再重组成新的健康电池包，以适应不同应用领域的需求。这种技术实质上是对锂电池进行结构化分层的高效利用。

目前，晶硅光伏组件回收处理流程依次为边框和接线盒拆解、层压件拆解、组分分离。回收流程可以看作晶硅光伏组件组装的逆过程。通过对光伏组件的拆解和回收，可以获取玻璃、铝边框、晶硅电池，以及电池中的银栅线、铜焊带等材料。

表 3-3
光伏组件关键材料的回收利用技术

回收材料	材料来源	回收工艺
铝	存在于晶硅电池片的背表面，包括银铝栅线、铝电极、铝硅合金层、铝背场层	湿法冶金:碱性溶液处理获得氢氧化铝，进一步热解后得到氧化铝;酸性溶液处理获得氯化铝，讲步生成聚合氯化铝。
硅	存在于电池片	湿法冶金:用特定的溶液去除电池片前后的电池结构，并通过半导体清洗工艺将硅料清洗干净。
铜	存在于焊带和汇流条	火法冶金:在高温环境中获得焊带和汇流条的高纯铜
铅/锡	存在于电池片的银栅线和铜焊带以及汇流条	湿法冶金:使用特定的溶液将铅、锡转化为可溶性离子，之后再加入碱或者硫，得到特定的物质
银	存在于电池片的栅线中	电解:将硝酸银溶液作为电解质进行电解获得银单质，该方法获得的材料纯度高，但是耗电量巨大且成本较高; 置换:采用活性比银大的金属发生氧化还原反应，置换出银单质，若想获得更高精度的银，则需要进栅线中一步处理; 沉淀:往硝酸银溶液中加入含有氯离子和硫离子的盐，得到相应的沉淀，之后可以通过碱性溶液将沉淀转化为氧化银，再采用其他试剂获取银单质。

专栏 3-5

光伏组件回收案例⁴⁵

中国国家电力投资集团于2017年开始进行组件回收技术研发，2020年完成原理设备及工艺开发，2021年建成全国首条30MW组件回收中试线，并持续开展产业化能力提升及批量运行工作，目前具备批量处理能力。

项目采用综合回收法，即综合物理法和热解法取长补短，采用新型物理法分层去除各层材料，高效热

解法可完全去除EVA胶膜，得到纯净的回收产品，回收过程绿色环保，回收效率更高。

生产线可回收多种类型组件，兼容不同技术类型（单玻、双玻等）、不同尺寸（60片、72片等）、不同状态组件（玻璃完整、破碎）的回收，更适合退役组件的实际状况。

3.4 全球主要太阳能光伏市场情况

3.4.1 太阳能光伏已实现全球布局

太阳能光伏全球布局广泛，已遍布亚洲、非洲、欧洲、美洲、大洋洲、中东等国家和地区。其中亚洲引领全球太阳能光伏装机容量，主要由中国和印度推动⁴⁶；欧洲位居第二位，截至2023年，该地区总装机容量达到3.22亿千瓦，主要国家包括德国、西班牙、意大利和法国。美洲（北美、中美和南美洲）装机容量达到2.58亿千瓦，是全球第三大市场，其中美国、巴西、智利和墨西哥贡献最大⁴⁶。截至2023年，太阳能资源极其丰富的东非十国⁴⁷共有62万千瓦光伏装

机，东盟十国⁴⁸共有2600万千瓦光伏装机容量²⁰，均有巨大的发展潜力有待开发。

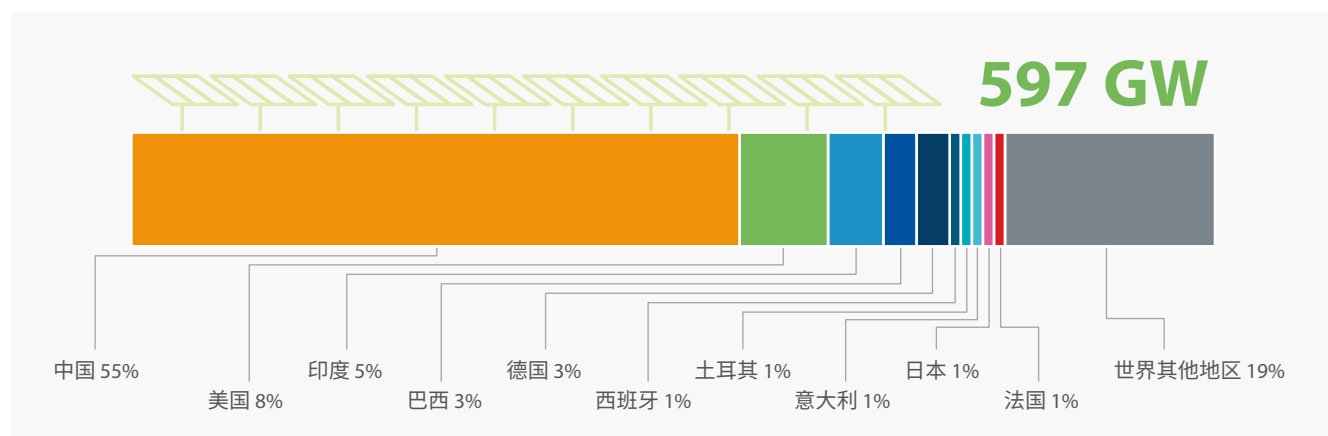
3.4.2 重点国家的启示

巴西：减少水电依赖，发展光伏增强电力供应稳定性

巴西可再生能源发电装机总量位居南美国家首位，其中水电占全国可再生能源发电装机总量的70%以上。然而，近年来巴西干旱频发导致水电出力不稳定，威胁能源和电力供给安全⁴⁹。依赖丰富的光照资源，光伏发电在巴西得到重点推广。

图 3-9

2024 年太阳能光伏总装机容量的市场份额



来源: Global Market Outlook for Solar Power 2025-2029

根据巴西太阳能光伏能源协会 (ABSOLAR) 统计, 2024 年巴西光伏新增装机约 1552 万千瓦⁵⁰, 成为全球第三大新增容量市场。分布式光伏在巴西光伏市场占据主导地位, 截至 2025 年 2 月, 分布式光伏装机容量达到了 3725 万千瓦, 为集中式光伏装机容量的两倍。其中, 住宅用户占比 49.45%, 商业用户占比 28.54%, 农业用户占 13.63%⁵⁰。

根据 2025 年 4 月启动的巴西《2034 年能源扩展计划》⁵¹, 预计该国将继续主要依赖可再生电力, 其清洁能源份额将保持在 85% 以上。该计划的一个关键点是扩大太阳能和风力发电, 包括发展允许用户自发电的分布式发电系统, 如安装在屋顶上的太阳能电池板。

印度: 光伏拯救缺电大国的能源危局

印度是全球增长最快的光伏市场之一。得益于得天独厚的日照资源和地形优势, 使得太阳能成为印度能源转型的最佳选择, 既帮助印度减少对煤炭的依赖, 还有助于解决长期困扰该国的电力供应不稳的问题。

截至 2025 年 1 月, 印度太阳能光伏装机容量达 1 亿千瓦, 成为继德国、中国和美国之后全球第四个实现这一里程碑的国家⁵²。光伏本土制造业快速发展, 截至 2024 年底, 印度拥有 7400 万千瓦的光伏组件产能, 2400 万千瓦的电池产能⁵³。

近年来, 印度从需求和供给侧均有多项政策叠加发力, 实施了“专项生产挂钩激励计划 (PLI)”, 发布了太阳能园区计划、农地光伏计划、并网光伏、总理光伏装机计划等政策。

在 COP26 期间, 印度承诺到 2030 年达到 5 亿千瓦的非化石燃料能源。凭借政府的大力支持、雄心勃勃的目标和太阳能制造业的扩张, 印度正在实现其可再生能源目标, 并进一步提高其在全球太阳能行业的地位。

印度尼西亚: 万岛之国的光伏发展之路

印度尼西亚地太阳能潜力高达 77.15 亿千瓦⁵⁴, 但目前发展速度相对缓慢。该国不断增长的能源需求仍严重依赖煤炭等化石燃料满足。截至 2024 年底, 印尼的并网和离网光伏累计装机容量达到 81.5 万千瓦, 但仅占该国总装机容量的 0.8%³。

由于印尼岛屿众多, 许多偏远地区和岛屿的电力供应不稳定或无法接入电网。光伏+储能系统在这些地区有着广泛的应用前景, 特别是用于家庭供电、社区微电网建设等⁵⁵。

目前, 印度尼西亚正通过两项关键政策改革向更加可持续的能源体系过渡, 包括取消屋顶光伏安装限制, 以及将太阳能电厂设备的本地化率要求从 40% 放宽至 20%, 以吸引外国投资。

根据最新的十年电力供应计划, 印度尼西亚计划新增 6950 万千瓦电力装机, 其中 69.2% 将来自可再生能源 (包括抽水蓄能)。关键目标包括: (a) 到 2034 年实现 1700 万千瓦的太阳能光伏产能, 并辅以电池储能系统; (b) 在 2024 年至 2028 年间新增 159 万千瓦的屋顶太阳能光伏系统, 并在 2029 年至 2033 年间再增加 191 万千瓦⁵⁶。

南非: 限电危机中的光伏突围

近年来, 因发电设施老旧等问题, 南非正面临电力危机, 长时间的大规模限电对该国经济造成严重损失, 在此背景下, 南非将目光转向含光伏在内的可再生能源。根据综合资源计划 (IRP) 2019, 到 2030 年南非光伏装机容量将达到 830 万千瓦, 并侧重于 2031-2050 年的长期发电规划, 以及到 2050 年实现电力行业净零排放的途径⁵⁷。

根据南非光伏行业协会的数据, 截至 2024 年底, 南非累计光伏装机容量达到约 897 万千瓦, 提前完成该国 2030 年光伏装机目标, 占非洲大陆太阳能装机容量的近 50%, 成为非洲光伏装机容量最大的国家, 目前南非光伏市场已经成熟。

在过去几年中, 南非政府出台多项政策并进行监管改革, 提高太阳能装机容量, 分布式及储能成为重点推动的领域。其中, 屋顶光伏被列为《能源行动计划》的核心举措, 通过新一代太阳能技术支持家庭脱离电网运行, 减轻并网压力以及由煤电推高的电价负担。同时, 南非重视储能与分布式光伏系统的重要性, 以保障夜晚和阴天时的电力供应稳定性。

肯尼亚: 部署“光伏加”的新兴市场⁵⁸

肯尼亚的太阳能装机容量为 17.3 万千瓦, 仅占电网总装机容量的不足 5%。基本上, 可再生能源被应用于以下领域: 1) 农业; 灌溉、水泵操作以及叉车类车辆; 2) 卫生; 太阳能微型电网用于为全国各地的农村医院冷却疫苗和驱动设备; 3) 教育; 农村学校通过太阳能微型电网实现照明、互联网连接以及学校设备的供电。这些领域尤其适合采用“光伏加”系统。

由于拥有丰富的可再生能源资源, 肯尼亚的可再生能源供应占比达约 92%, 其余部分则由未接入国家电网的

各地区的热能供应提供。根据《肯尼亚能源投资计划2024》，该国计划到2030年实现100%的可再生能源供应。

随着可再生能源的发展，肯尼亚还建立了政策框架，包括《2025-2035年国家能源政策》(正在审议)；《2022年净计量方案》(正在审议)；《肯尼亚国家电气化战略》(正在审议，2024年)；可再生能源竞拍；以及《电动车政策与战略》(草案阶段)。

埃塞俄比亚:太阳能光伏潜力巨大

埃塞俄比亚与位于热带的其他国家一样，太阳辐照资源丰富，拥有较高的太阳能潜力，平均日太阳辐射量潜力约为5.2 千瓦时/平方米/天。近几年来，电信中继站的用电需求多由光伏发电满足，成为改国新增光伏装机的主要来源。。目前，已投入使用的太阳能光伏装机容量约1万千瓦(不包括水泵)。

在埃塞俄比亚，太阳能家庭系统主要用于为农村家庭、医疗中心和学校照明，以满足照明和小功率需求，如抽水和取暖。目前，该国大多数农村社区无法获得电力，随着人口增长，该国电力需求还在持续提高，尤其是用于灌溉和家居等方面的用能需求。因此，光伏加在提高该国通电率，满足农业生产和居民生活用能方面可以发挥重要作用，成为其太阳能资源开发利用的主要抓手。

中国:从制造强国到应用大国探索者

中国光伏产业起步于上世纪80年代初，经历了从无到有、从小到大、从弱到强的发展过程。尤其是自2006年可再生能源法实施以来，产业发展成效显著，技术路线不断迭代，综合制造实力全球领先。

中国光伏产业的发展初期以出口为主，彼时光伏度电成本还远远高于中国商业化电力水平，2010年开始，中国政府为了促进光伏产业健康发展，大力支持国内市场开发，使中国市场的潜力得以释放。此后中国政府又通过“领跑者计划”推动光伏技术创新和成本下降，在十多年的时间里不断提升产品效率和光伏发电性价比，使其成为全球能源转型和低碳发展的重要支柱。

2024年，中国光伏发电新增容量2.78亿千瓦，其中集中式光伏1.59亿千瓦，分布式光伏1.18亿千瓦。截止2024年年底累计装机容量8.86亿千瓦，占全国电源总装机容量的26.5%，成为全国第二大电源。2024年，太阳能发电量达8341亿千瓦时，占总发电量的8.4%，占全部新增发电量的41%⁵⁹。

为了更好地发挥光伏项目的社会经济效益，光伏的应用场景在中国也得到了不断创新。从户用屋顶光伏和工商业分布式光伏的传统应用模式，到包括了光伏加农业、光伏加渔业等提高生产效率和经济效益的场景模式，再到与交通、建筑以及工业相结合的促进更多领域能源消费转型的新模式，光伏的应用场景得到了极大拓展。以“光伏扶贫工程”为例，自2016年到2020年的六年间，该工程累计共建成2636万千瓦光伏扶贫电站，惠及近6万个贫困村、415万户贫困户，每年产生发电收益180亿元⁶⁰。

随着“双碳”目标的推进和能源转型的加速，中国光伏市场需求将持续增长，应用场景得到持续优化，也将为其他发展中国家可持续发展贡献力量。





04



第四章

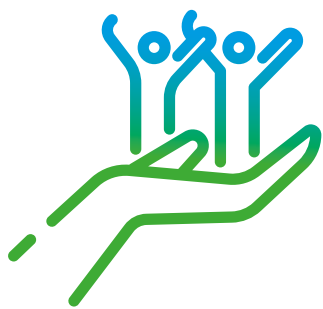
“光伏加”： 发展中国家实际应用中的经验 与案例研究

本章要点：

- 作为一种复合型能源解决方案，“光伏加”通过整合光伏发电与其他产业功能，提供了兼顾能源生产、经济增益与生态保护的新路径。突破了传统光伏应用的单一性，将可再生能源与工业、建筑、交通、农业等领域深度融合，形成多维度协同效应。
- “光伏加”在提升能源可及性方面可发挥关键作用，尤其适用于基础设施存在显著缺口的地区，从而提升当地的生产生活水平。
- “光伏加”的应用推广复制所需要的条件包括：商业模式合理，以支持应用开发；开展能力建设，增加专业人才供给；加强跨部门协作，提高政策协同性；加强国际合作，实现优势互补。

4.1 “光伏加”在发展中国家不同场景的成效

在全球气候危机和能源公正转型迫切需求的背景下,发展中国家正面临着能源贫困、气候融资渠道有限、气候相关风险加剧以及经济社会发展失衡持续加剧等一系列问题。尽管这些国家历史累计排放量较低,但许多国家正面临能源需求增长、基础设施薄弱和制度缺口等制约,这些问题阻碍了低碳发展路径的实现。应对这些挑战需要因地制宜的解决方案,以增强韧性、促进包容性并推动可持续的经济转型。“光伏加”作为一种复合型能源解决方案,通过整合光伏发电与其他产业功能,为发展中国家提供了兼顾能源生产、经济增益与生态保护的新路径。其核心价值在于突破传统光伏应用的单一性,将可再生能源与工业、建筑、交通、农业等领域深度融合,形成多维度协同效应。本节基于发展中国家案例,总结了光伏加技术在不同场景下的实际作用及其对气候变化减缓与联合国可持续发展目标(SDGs)的贡献。



“光伏加”作为一种复合型能源解决方案,通过整合光伏发电与其他产业功能,为发展中国家提供了兼顾能源生产、经济增益与生态保护的新路径。

4.1.1 光伏加工业:助推制造业绿色能源自给与零碳转型

制造业的发展是经济增长的关键驱动力,也是全球能源需求增长的主要因素。光伏加工业应用模式尤其适用于用电需求大且稳定,具备大面积屋顶资源的工业厂房以及集中连片的工业园区,尤其在电力短缺或电价较高的区域更具推广价值和多重优势:

能源方面,光伏加工业有助于提高工业企业实现能源自给能力,有效减少对传统电网的依赖,缓解区域性/季节性电力短缺问题;通过优化工业用能结构,以清洁电力替代燃煤发电,显著降低工业生产流程中的碳排放,推动工业领域低碳转型。

土地利用方面,充分利用工业厂区屋顶、闲置土地等空间资源建设光伏发电项目,节约了土地资源,实现土地资源的多元化开发利用。

经济方面,很多发展中国家电力成本居高,通过自发自用减少从电网购买的电量,可以节约企业用电成本;同时减少因断电、限电导致的生产中断及设备损耗等生产损失。

对于发展中国家的工业领域而言,光伏加工业有助于突破弱电网地区的基础设施限制,利用可再生能源建立长期成本优势,降低能源进口依赖,在碳边境调节机制下提升全球竞争力。

光伏加工业案例研究：

广州智联新能源汽车产业园近零碳示范光储项目⁶¹

项目位于中国广东省广州市番禺区，是国家级新能源整车及核心零部件生产制造示范园区。项目通过在园区内投运大规模光伏电站，配备储能装置和建设园区智能微电网运营系统，助力工业园区实现零碳排放。

能源：项目自2019年初投入使用以来至2023年底，光伏发电系统累计发电超8400万千瓦时，年发电量近2000万千瓦时，其中超过95%的电量被园区企业消纳使用，成为园区主要的自备清洁电源。

土地：项目充分利用园区冲压车间、焊装车间、总装车间及中试线车间的屋顶及南北片区的停车场空地，铺设分布式光伏发电系统并配套电化学储能，实现土地资源高效利用。

社会经济：项目实现了绿色低碳、节能减排的综合效益。据广汽埃安新能源⁶²动力科工程师叶华彬介绍，项目实施后，园区每年可节约电费超过300万元，减少约15%外购电量，实现园区碳排放总量较国际基准值下降超18%，单位产值二氧化碳排放较基准期降低20%以上⁶³。

图 4-1

广州智联新能源汽车产业园



图片来源：广汽埃安

注：该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I：光伏加案例集”。

4.1.2 光伏加建筑：实现从“能源消费者”到“能源产销者”的转变

光伏建筑一体化 (BIPV) 是将光伏组件与建筑紧密结合, 使光伏系统融入建筑整体或使光伏组件与建筑构件相结合。光伏+建筑应用模式适用于工业厂房、商业综合体、公共设施及住宅等场景, 其具备如下优势:

能源方面, 光伏+建筑可显著提升建筑能源自给率, 优先满足建筑自身用电需求; 建筑表面光伏组件的多功能特性同时满足了建筑和能源需求, 从而提高整体可持续性; 清洁电力替代化石能源发电, 可有效减少建筑碳排放。

土地利用方面, BIPV可大大降低额外土地资源占用, 直接将光伏产品与屋顶、屋面、建筑立面、窗户、遮雨棚等既有空间融合, 在保持建筑美学功能的同时实现发电效能, 开创“建筑即电站”的新型空间利用模式。

经济方面, BIPV系统在运营期持续产生发电收益, 降低购电成本, 余电上网还可获得额外收益。

对于建筑而言, 光伏加建筑将建筑从“能源消费者”转变为“能源产销者”, 既能降低建筑能耗, 又能提供清洁电力, 可缓解电网压力并提升能源自己能力。尽管初期可能面临投资高、标准不统一等挑战, 但随着技术本地化与产业链成熟, 光伏加建筑对发展中国家实现绿色转型、推动能源结构升级意义重大。

光伏加建筑案例研究：
巴西圣卡塔琳娜联邦大学
太阳能研究实验室BIPV项目

圣卡塔琳娜联邦大学 (Fotovoltaica/UFSC实验室) 率先安装了巴西首个并网光伏系统, 成为了巴西集太阳能研究、教育和创新的国家标杆。该实验室在太阳能应用领域开展了广泛探索, 其研究范围涵盖光伏建筑一体化技术研发, 同时推进具有显著社会效益的示范项目。

能源: 项目由三座主要建筑构成, 光伏装机容量峰值功率分别为66.15千瓦 (A座)、13.5千瓦 (B座)、64千瓦 (C座)。A座自2016年8月投入运行以来, 累计发电量已达65万千瓦时; B座同期投运, 累计发电12.3万千瓦时; C座于2023年8月建成投运, 短期内已实现19.6万千瓦时。三座建筑总发电量达96.9万千瓦时, 有效降低了园区对电网的依赖程度。

土地: 在项目规划设计初期, 建筑光伏一体化就被纳入核心设计元素, 考量重点包括如何确保建筑美学的同时提升能源利用效率。为此, 建筑设计与工程技术团队展开深度协作, 通过多轮方案优化, 实现了技术性能与视觉美学的和谐统一。

社会经济: 在A座和B座建筑中, 光伏组件安装在夹芯板上, 能够提供隔热功能, 有效降低建筑制冷需求, 并提高建筑的整体能源效率。C座建筑则运用光伏幕墙与智能遮阳系统, 增强了室内热舒适度和视觉舒适度, 降低了对空调和照明的需求, 使暖通空调系统的运行更加经济高效。光伏建筑一体化是可持续建筑的典范之作, 在获得持续节能收益的同时, 未来还可能获得减排激励。此外, 这三座光伏建筑作为示范教学平台和科研基地, 能够直观展示可再生能源的应用成效, 为在校学生、行业从业人员和社会公众提供了宝贵的学习与实践机会。

注: 该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I: 光伏加案例集”。

图 4-2

巴西圣卡塔琳娜联邦大学的BIPV安装布局



A座



B座



C座

来源: Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil

4.1.3 光伏加农业：土地复合利用与农村发展

发展中国家农业用地紧张与农村能源匮乏问题交织，光伏加农业通过空间分层利用，实现“板上发电、板下种植/养殖”的协同模式，适用于光照资源丰富、具备规模化种植条件的电力短缺或电价成本高地地区。其主要优势如下：

能源方面，利用太阳能发电为农业生产提供稳定电力，满足灌溉、照明、温控、自动化设备运行等需求，降低农业生产对电网的依赖，提高农业生产的能源自给自足和稳定性。

土地利用方面，光伏加农业可实现土地复合利用。上层光伏组件既能发电，又可有效避免农作物遭受过度雨淋，同时阻隔部分紫外线，抑制害虫生长繁殖。光伏遮阳还能显著减少土壤水分蒸发，保持土壤湿度稳定，改善农田微生态环境。

经济方面，光伏加农业通过电力自给自足能够降低生产成本，增强农产品的价格竞争力。余电并网销售亦有机会为农户创造额外收入。

对于农业领域，光伏加农业有利于通过电力覆盖提升农业生产的自动化程度和精细化管理水平，推动传统农业向智能化、现代化转型。光伏加农业能够提升农业生产效率，推动农村经济发展的可持续性，同时可以减轻对环境的影响，实现可持续能源生产与农业活动共存。

光伏加农业案例研究：
菲律宾宿务省托莱多市SOLARIS农牧场项目

该项目位于菲律宾宿务省托莱多市，开创性地展示了"光伏+农业"如何协同解决能源安全、粮食安全、气候适应力和经济发展等关键挑战。该项目将113.79公顷牧场改造为"光伏发电+畜牧养殖"一体化复合用地模式。

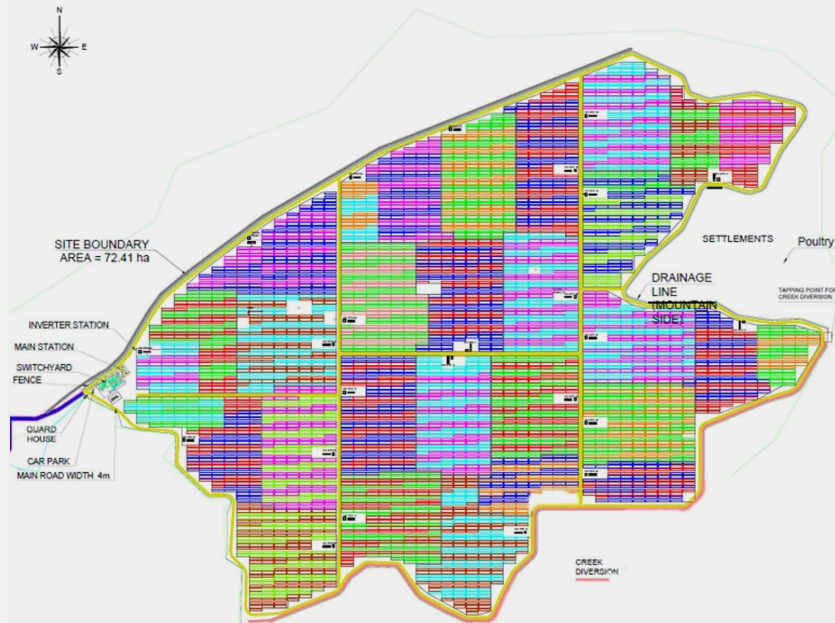
能源：项目太阳能光伏装机容量达59.96兆瓦，年发电量约7,315万千瓦时，可满足3万户家庭用电需求。

土地：通过光伏系统板上发电，板下放牧，实现了牧场的多元化利用，提高了牧场的利用价值，并节约了光伏电站建设所用土地。设计高度确保放牧干扰最小化，同时维持牧场质量，实现可持续能源生产与农业活动共存。

社会经济：项目通过"绿色能源拍卖计划"(GEAP)向电网销售清洁电力，年收入达1299万美元，同时结合畜牧业运营形成多元化收入来源。项目在光伏领域提供安装、运维等技术岗位，在畜牧业保留放牧、养殖等传统工种，可创造双重就业机会，保障当地居民生计，促进绿色技能培养。项目通过全程纳入农民、牧民及社区管理者等利益相关方参与决策，确保与地区需求一致并获得社会认可，培养社区归属感，保障项目长期可持续性。

注：该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录一：光伏加案例集”。

图 4-3
菲律宾SOLARIS农业光伏农场布局



来源: SunAsia Energy Inc.

4.1.4 光伏加交通：无电地区路网的可持续解决方案

交通运输具有点多、线长、面广的特点，光伏加交通应用模式特别适用于电网覆盖薄弱但光照资源丰富的偏远地区公路网络、高速公路服务区及交通枢纽。光伏加交通具备多方面优势：

能源方面，通过为交通系统用电设施提供稳定绿色电力，缓解广大无电网、弱电网地区的供电压力，解决在特殊环境条件下交通基础设施的电力供给瓶颈。通过将光伏融入交通系统，可降低对化石燃料和传统电网依赖，确保偏远地区交通信号灯、监控系统和电动汽车充电站等关键基础设施的可靠能源供应。

土地利用方面，有效利用公路系统中公路占地、路肩、匝道、隔离带、道路边坡等自有空间及服务区建筑屋顶、停车棚等基础设施空间，激活交通附属设施资源价值。

经济方面，减少交通系统运维电费支出，节约偏远地区电网延伸投资成本；提升服务区充电桩覆盖率与供电可靠性，拓展新能源车充电服务收入。

对于交通领域，光伏加交通在发展中国家中能够破解电网延伸建设成本高、周期长的基建困境，保障交通基础设施的安全稳定运营，为交通沿线区域经济社会发展和跨区域互联互通注入可持续动力。

光伏加交通案例研究：

新疆高速公路智能分布式光伏微网自治系统与示范项目⁶⁰

项目位于中国西北部新疆维吾尔自治区，当地公路沿线多为干旱荒漠区，自然环境恶劣，交通配套设施呈现“点多线长”特征，电网支撑能力不足，传统供电方式面临电网架设成本高、传输损耗大、运营维护费用高等困境。为解决这一能源供需问题，在新疆S21高速公路克拉美丽服务区和G3012吐和高速公路羊塔克库都克服务区开展了智能分布式光伏微网自治系统示范项目，探索光伏与交通基础设施耦合的“交能融合”模式，为特殊环境条件下高速公路能源需求场景提供应用示范。

能源：克拉美丽服务区年均发电量71万千瓦时，高速公路设施运行用能自治率 $\geq 30\%$ ，其中交通运行安全相关设施绿色能源自治保障率达到100%，风雨灾害或电网断电情况下，储能系统可保障交通运营用能6小时以上，确保服务区消防等重要设施不断电。羊塔克库都克服务区运行9个多月以来，累计发电量52万千瓦时，解决了服务区供电功率不足和冬季供暖问题。

土地：项目利用高速公路服务区、路侧边坡等基础设施安装光伏，在不占用额外用地的情况下，有效利用公路空闲土地。

社会经济：项目有效缓解“孤岛供电”问题，保障交通设施的持续运行，可显著增强高速公路网络的抗风险能力。据新疆交投阿乌高速公路有限责任公司养护及安全管理部副部长张家郡介绍，该项目成功验证了离网供电模式，未来可为沙漠、边远地区新建服务区提供稳定电力支持，缓解电网覆盖不足难题⁶⁴。

注：该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I：光伏加案例集”。

光伏加交通案例研究：

新疆高速公路智能分布式光伏微网自治系统与示范项目⁶⁰ (续)

图 4-4a

克拉美丽服务区



来源: 新疆交投集团

图 4-4b

羊塔克库都服务区



4.1.5 光伏加社区：点亮社区可持续发展的绿色引擎

在全球可持续发展浪潮下，光伏加社区应用模式适用于日照丰富但电力基建薄弱、能源短缺的农村地区，为发展中国家农村供能带来新选择和新机遇。光伏加社区具备多方面优势：

能源方面，光伏发电是清洁零碳电力，以其替代火电降低对化石燃料的依赖，优化能源结构，光伏加社区能满足教育、医疗、农业、商业及生活等多种用电需求，供需供电，保障能源供应稳定安全。

土地利用方面，实现“一地两用”，提高土地利用率。

经济方面，光伏发电可带来稳定收益，满足教育、医疗等机构稳定的电力供应，为农机具等生产工具用电，升级生产方式，带动产业发展、创造就业。虽初期需要一定投资，但其成本显著低于化石燃料发电系统。此外，由于节省了燃料成本，加之简单经济的运维模式，可确保提供更经济实惠的日常电力供应。

对农村社区而言，光伏加社区能够减轻能源贫困，助力减贫增收，完善基础设施，推动产业升级，实现经济可持续发展，还有助于达成低碳目标，意义重大。光伏加社区在发展中国家应用前景广阔，能够为可持续发展注入强大动力，并促进农村地区在经济、社会、环境等方面实现全面进步。

光伏加社区案例研究：

卢旺达Solar Market Hubs农村社区项目

截至2022年，卢旺达城市化率仅为17%，约60%的农村人口尚未实现电力覆盖。针对这一现状，Kinvest基金会与当地农村社区开展合作，创新性地打造了太阳能市场枢纽模式。该模式通过建设配备太阳能基础设施的综合性商业空间，为农村社区提供商业服务、能力建设、能源供应等支持，促进农村地区经济多元化发展。

能源：五年间，Kinvest通过太阳能枢纽、钻孔泵及电动车的清洁能源系统，累计产生69.18万千瓦时清洁电力。按每千瓦时电力减少0.285千克CO₂放计算，相当于抵消了197,168千克碳排放。当前电动车辆车队已减少7,200升化石燃料的使用量。

土地：在社区遴选方面，Kinvest通过与地方政府合作开展，优先布局无电网覆盖且缺乏稳定供水系统的偏远地区。同时，通过市场调研选择至少500户规模以上的社区，确保项目既能挖掘经济潜力，又能平衡本地居民的实际需求。

社会经济：每个枢纽可容纳50+商户，在建设阶段创造75个临时就业岗位，运营期提供7至8个长期运维岗位。入驻小微商户平均至少雇佣1名全职员工，进一步扩大就业规模。配套能源设施方面，建成7个太阳能钻孔泵站，3个电动车充电站，间接带动焊接加工、木制品生产、机械维修等本地配套产业链发展。

注：该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I：光伏加案例集”。

图 4-5a

太阳能供电车辆



来源: Kinvest Foundation

图 4-5b

太阳能供电培训区



图 4-5c

卢旺达太阳能供电水井



4.1.6 光伏加直流电器:推动农村经济提质增效

农村地区能源可及性不足制约经济发展,光伏加直流电器通过离网解决方案赋能小型化生产。光伏加直流电器具备多方面优势:

能源方面,无需依赖柴油或电网,解决农村电网不稳定问题,能源自主性大幅增强。直流电器比交流电器省去整流等环节,系统简单且能效更高。

土地利用方面,可采用模块化、移动式设计,灵活调整位置,适用于偏远地区快速部署。

经济方面,光伏加制冷/干燥电器帮助农户延长农产品储存期,通过错峰销售或深加工增值,减少农产品的损失。

光伏加直流电器案例研究:
印度移动式太阳能冷藏库助力农民增收

印度是全球最大的水果、蔬菜及易腐农产品生产国之一,但由于储存设施不足导致30%-40%的产量损失。针对农村地区小农户面临的冷藏设施匮乏、被迫低价抛售问题,TERI机构与印度石油公司NRL合作,在阿萨姆邦农村社区推广便携式太阳能冷藏库(SCS),为农户提供可持续的冷链解决方案。

能源:该冷藏库配备峰值功率5千瓦光伏发电系统,能够实现全天候稳定运行,即使在阴雨天气条件下也可维持30小时的备用电力供应。系统采用混合供电设计,可根据实际需要自动切换至电网或备用发电机,充分保障冷藏服务的连续性和可靠性。

土地:冷藏库采用模块化设计,直接部署于村落空地,不占大面积土地。

社会经济:该项目通过太阳能冷藏库为农户提供可持续的储存解决方案,有效减少农产品产后损失,帮助农民摆脱低价抛售困境,实现择时销售增收。同时,可靠的储存设施增强了小农户、女性创业者及农业合作社的经济自主权,促进了社会与性别平等效益。

注:该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I:光伏加案例集”。

图 4-6
印度阿萨姆邦便携式太阳能冷藏设施



来源: The Energy and Resources Institute

4.1.7 光伏加海水淡化：实现能源转型与资源开发的双赢

“光伏+海水淡化”模式，不仅解决了水资源短缺的紧迫问题，还实现了能源转型、环境保护与经济发展的多重目标，为全球干旱地区提供了可复制可持续发展范例。

能源方面，光伏发电可为海水淡化提供清洁电力，减少对化石燃料的依赖。

土地利用方面，最大化土地资源价值，尤其适用于沙漠、滨海等边际土地。

经济方面，海水淡化的能耗和温室气体排放相对较高，光伏发电的低成本特性降低了海水淡化厂的电力消耗费用。

光伏加海水淡化案例研究： 沙特阿拉伯朱拜勒3A光伏海水淡化项目

沙特阿拉伯地处阿拉伯半岛，沙漠广布，70%的饮用水来自海水淡化，是世界最大的海水淡化国，淡化海水对常规水资源的补充和替代作用十分明显。该项目位于沙特东部朱拜勒市，采用海水反渗透技术，利用光伏发电作为补充电源，缓解沙特东部省沿岸日益增长的用水需求。

能源：项目光伏装机容量峰值功率为45,560千瓦，光伏发电用于水厂侧产水，独立于沙特电网。光伏发电可满足水厂每日10%-20%的能耗需求，每年可减少6万吨碳排放。

土地：沙漠地表贫瘠、无农业或居住功能，光伏电站无需占用耕地或生态敏感区，化解土地资源冲突。

社会经济：项目采用“光伏+海水淡化”模式，契合沙特“2030愿景”中发展清洁能源的战略方向，助力沙特国家能源结构向低碳化转型。项目日产水量达60万吨，可为300万人提供饮用水，是达曼和利雅得重要的水源之一，对于缓解水资源短缺，保障民生需求具有重要意义。项目长期运营直接降低海水淡化厂的电力消耗费用，缓解沙特因能源需求增长导致的石油出口压力，间接提升经济收益。

注：该案例项目的更多信息和联系方式详见“附录I：光伏加案例集”。

图 4-7

沙特朱拜勒3A光伏海水淡化项目



来源：山东电建三公司

4.2 “光伏加”应用推广的必要条件

本文前述介绍了各类“光伏加”应用场景所具备的特点与社会经济效益,但是如果要突破障碍,在全球能源转型与可持续发展中发挥更大的作用,就必须实现更加广泛的复制与推广。“光伏加”若要实现规模化效应,需必要的支撑条件,例如多样化的商业模式使其可以实现商业化运行;行之有效的跨部门政策协同提供政策支持;广泛的认知度使其得到应有的重视与关注;以及国际合作实现优势互补等。

4.2.1 合理的商业模式支撑“光伏加”应用发展

“光伏加”模式的特点是用光伏提供电力支持,与消费端各类应用场景相结合后,可以突破电力基础设施、资金和地域限制,实现更高的社会经济价值。因此,“光伏加”项目必须符合市场实际需求,通过恰当的商业模式来实现“创造——传递——获取”的完整闭环,支撑应用发展。

投资主体:投资主体的多元化,鼓励能源转型的社会化参与

“光伏加”项目中,工业、农业、交通、建筑等行业的生产经营者掌握着屋顶、土地或水域、交通枢纽、建筑外立面等可安装光伏的空间资源,具备资源禀赋上的先天优势。他们基于自身用电需求投资建设光伏加项目更利于节约成本,例如农业园区自建光伏有望减少土地租赁费用,工业厂房加装光伏可节省部分建筑改造成本等。此外,在大多数地区尤其是发展中国家,农业(含种植业、渔业等)生产收入远低于能源生产收入,“光伏加”这种兼具发电收益和农作物种植/渔业收益的复合型收益模式,既能增加农渔业经营者的整体收入也有望改善投资回报。

光伏加建筑模式可有效降低用电成本并提升能源自给率。在中国的山西省太原市,由山西建投投资运营的智能办公楼项目,完美实现了光伏材料与建筑结构的一体化整合,并采用了“光储直柔”(PEDF,即光伏发电、储能系统、直流配电和柔性用电)技术。项目每年产生清洁能源超10万千瓦时,实现了建筑照明用电自给率100%。从项目的总收益来看,除了节省电费外,还节约了10%的电网设备投资,降低了屋顶的维护成本,减少了化石能源发电产生的温室气体排和污染物排放。

“光伏加”若要实现规模化效应,需必要的支撑条件,例如多样化的商业模式使其可以实现商业化运行;行之有效的跨部门政策协同提供政策支持;广泛的认知度使其得到应有的重视与关注;以及国际合作实现优势互补等。

投资主体既是电力的消费者也可以是生产者,“光伏加”项目通过自发自用,为光伏发电消纳提供保障,同时也能降低自身用电成本。因此,“光伏加”项目投资主体多元化这一特点,让房地产开发商、农场主、道路建设与管理方、社区服务提供方都得以参与电力设施的投资。“光伏加”项目所创造的价值,也从仅提供电力供给扩大到提供农业产品、电器设备、交通建筑设施以及社区公共服务等。

收入与盈利模式:市场机制允许“光伏加”项目获得多元化收入

在部分无电地区,光伏加农业和光伏加社区可以成为经济便捷的通电方案,但限于当地居民的支付能力,建设“光伏加”项目的初始投资仍然需要外界支持。一方面,需要创新融资模式。允许投资者以未来电费收益为抵押取得贷款,并为光伏加农业、光伏加渔业和光伏加社区等小规模光伏加项目的投资者提供小额低息贷款。另一方面,适当引入应对气候变化、环境保护、能源



转型和扶贫方面的国际援助资金，建设和推广一批光伏加项目，为当地带来可负担、清洁、便利的电力供应，并以“即用即付”之类的模式实现投资回收，发挥先导示范的作用，让更多地区了解和利用“光伏加”模式，实现能源可及。

由Kinvest基金会与地方政府合作的卢旺达太阳能市场枢纽项目，为农村社区解决了通电问题，满足了市场摊位、农产品加工设施（如农机具、冷藏、碾磨、焊接、木工等）、供水、交通工具等各种用电需求。项目单体规模小，初始投资和运行费用低，受当地欢迎。2020年启动首个枢纽以来，已在尼亚加塔雷区陆续建设了5座枢纽，总容量为103千瓦。项目采用即用即付机制，运营18个月后实现自给自足，年收入从2023年2500万卢旺达法郎（1.75万美元）翻倍至2024年5000万卢旺达法郎（3.5万美元）。

4.2.2 开展能力建设，增加专业人才供给

从本文提供的案例不难看出，目前“光伏加”多种应用模式在南方国家已具备应用基础，我们希望这些应用案例发挥先导示范的作用，让更多国家和地区了解和利用“光伏加”模式，进一步因地制宜地开发“光伏加”应用模式，从而解决能源可及、农业和工业生产、就业、产业可持续发展等问题。

同时，“光伏加”模式需要实现光伏技术与多产业深度融合，要实现这一目标，还需要通过实践和试点项目进行“做中学”，推动国家或地区间的经验交流，并通过技术培训与国际合作培养“能源-产业”领域的跨学科复合型人才，从而建立本土化的技术服务体系。通过与经验丰富的国家合作，引入成熟技术，如农光互补支架设计、水上光伏防腐技术等关键技术，并在合作的过程中让本地人员学习并掌握这些经验和技能；建立区域性光伏加技术共

享平台,促进经验交流;为当地工作人员安排光伏加多场景应用的项目实地考察并举办综合培训。

中非共和国首座光伏电站——萨卡伊光伏电站⁶⁵,位于中非共和国首都班吉往西约9公里处的宾博市,由中国公司承建,装机容量为15兆瓦。其落成极大缓解了班吉的用电难问题,促进了当地社会经济发展。除了清洁电力供给外,还为当地提供了学习和就业机会。刚入职6个月的当地员工班加拉边学边干,在光伏电站工作的经历帮助他树立了职业目标,他说:“中国兄弟和我一起工作、培训我。我希望今后能成为一名专业电工。”

4.2.3 加强跨部门协作,破除监管壁垒

“光伏加”通常涉及跨领域协作,在实际执行中往往存在需要跨部门协调或政策不一致的情况。一些光伏加农业/渔业项目,项目仍面临审批程序复杂的挑战。因此,建议建立协同机制,通过部门协作加速审批进程,以此激励电力基础设施投资,同时允许农户和水产经营者参与电力项目投资。

因此,需要通过制定统一的“光伏加”多场景综合政策,多规合一,明确用地兼容规则,明确土地、能源、农业、



工业、交通、建筑等部门职责，构建允许“光伏加”项目建设的政策机制，构建从产业到项目建设的各类标准体系，确保技术兼容性、安全性、促进跨领域合作，降低风险，加速项目落地，实现光伏与相关产业的协同发展。

4.2.4 加强国际合作，实现优势互补

目前，对很多国家和地区而言，“光伏加”仍属于一种较新的发展理念和模式，处于起步阶段。但如中国和印度等国家结合多种场景，已经开展了一批“光伏加”项目（详见附录I：光伏加案例集），在政策制定和执行、项目选址、

设计、施工、运行维护、商业模式等方面，积累了丰富的经验。通过南南合作、一带一路等多边合作机制，中国、印度等国家可为广大南方国家提供发展“光伏加”必需的经验、技术和装备，为广大的南方国家找到适合国情的清洁、可负担的能源解决方案。

2023年，中国代表在首届非洲气候峰会上宣布开发实施应对气候变化南南合作“非洲光带”项目。该项目聚焦非洲清洁能源发展的合作需求，采取“物资援助+交流对话+联合研究+能力建设”的方式，帮助非洲相关国家解决用电困难问题，助力非洲国家实现绿色低碳发展。





05

全球南方地区“光伏加”系统应用的协同效益案例分析

本章要点:

- 东非地区太阳能资源丰富且土壤肥沃,拥有发展光伏加农业系统(PPAS)的适宜条件,PPAS的开发可帮助解决东非地区的能源可及和粮食安全问题;
- 东非各国政府可考虑在土地产权划分、政策制定等方面加强自身能力建设,以促进光伏加农业发展。
- 东南亚地区太阳辐射较强,水产养殖业发达,同时拥有较为全面的工业体系和供应链,拥有发展光伏加渔业的良好基础;
- 自然灾害,技术障碍,资金不足等问题仍是制约东南亚地区光伏加渔业系统发展的重要因素。

如前述章节所述，“光伏加”投资有潜力通过促进社会与经济发展，从而推动实现多项可持续发展目标。然而，鉴于全球南方国家不同地区的发展重点与挑战存在显著差异，特定类型“光伏加”解决方案的设计与应用必须与当地发展情境相适配，不存在放之四海而皆准的统一模式。

本章将选取“光伏加”项目中的光伏加农业系统 (PV Plus Agriculture System, PPAS) 与光伏加渔业系统 (PV Plus Aquaculture System, PPAS) 作为代表进行讨论。与只在光伏组件下进行种植或养殖活动的“农光互补”与“渔光互补”相比，PPAS的概念更为宽泛，涵盖灌溉、冷链储存、碾磨等多种农业和渔业生产场景与光伏发电的结合。本章将通过PPAS在东非和东南亚的潜在应用场景展开比较分析。

尽管“光伏加”在解决南方国家能源问题上可发挥重要作用，但针对其不同地区的适应性评估和协同效益分析仍然不可或缺。在项目规划期间，对适应性的评估有助于识别和理解不同地区的地理、气候、资源及社会条件，从而确保光伏项目与农渔等产业的兼容性和可持续性，有助于避免资源错配和浪费。

在此基础之上，对协同效益的分析有助于加深决策者对光伏与其他产业融合带来的多重效益的理解，如能源安全、环境保护、经济增长和社会福祉等⁶⁶，从而为决策者提供综合决策依据，推动项目成功实施。

5.1 东非地区光伏加农业系统分析

根据世界银行标准，除塞舌尔和毛里求斯两个小型岛国外，东非各国目前均属低收入或中低收入经济体。同时，世界银行数据显示，2023年该地区只有两个国家能源可及率达到90%以上，在东非18个国家中，六个国家总体能源可及率不及50%，12个国家乡村地区能源可及率不及50%，四个国家乡村能源可及率甚至不足10%，能源贫困严重制约经济发展与民生改善。

尽管东非并不是非洲人口密度最低的区域，但向农村及偏远地区扩展电网的成本仍然过高，使得分布式能源系统（离网和微电网）成为大多数农村社区最为经济可行的供电方案⁶⁷。表5-2显示了各种供电方案在东非肯尼亚为偏远村庄供电的预估建设和运营成本⁶⁸，可以看到，无论是全天候还是间断性供电，离网光伏电站的平均供电成本相比电网延伸和使用柴油发电机均有很大优势。

根据国际能源署的预测，到2040年，撒哈拉以南非洲的电力需求将增长三倍⁷⁰。东非地区在未来几十年内也将面对大规模电力增长需求，但若想改善该地区电力可及性问题，大幅增加电力投资、区域合作和电网互联互通、提升能源管理效率将是主要措施。

与此同时，东非地区正面临严峻的粮食与水资源安全挑战。该区域大量人口依赖雨养农业，粮食供应不足风险居高不下。气候变化导致干旱频发，致使农作物减产，进

表 5-1
东非地区各种乡村供电模式成本估算⁶⁹

指标	电网延伸	光伏离网(全天候)	光伏离网(仅白天)	柴油发电
初始建设成本	约100万美元	约25万美元	约10万美元	约3万美元
20年总成本(含运维等)	175万美元	40万美元	13万美元	130万美元
平均供电成本 (LCOE)	~\$0.85/ kWh	~\$0.20/ kWh	~\$0.07/ kWh	~\$0.65/ kWh

一步加剧了农业生产危机。东非地区同时面临厄尔尼诺现象引发的洪涝灾害,使得粮食不安全状况持续恶化。非洲粮食不安全程度最高的十个国家中,东非占据五席(肯尼亚、南苏丹、索马里、赞比亚和津巴布韦)。

值得注意的是,能源普及、清洁炉灶推广、粮食安全保障与水资源压力缓解等发展挑战,在东非农村地区呈现显著空间重叠性。在此背景下,光伏加农业系统展现出多重协同效益:可为当地提供清洁能源,降低对生物质燃料的依赖,提升能源安全水平;创造就业岗位并提升技能,提高居民收入水平;通过推广农业技术和优化光伏组件布局,增强农作物抵抗恶劣气候条件的能力并提高产量。

在东非欠发达国家和地区,光伏加农业的推广不宜照搬中国以大规模集中式电站为主的模式,而应充分发挥光伏组件轻量、灵活、成本低的优势,将小型离网或微网系统嵌入灌溉、制冷、农产品加工等多元场景。通过这种“分散供能+农业增值”的路径,既能以最小的前期投资覆盖更多农村用户,又能在提升农业产出和减轻能源负担的同时,实现能源普惠共享,最大程度惠及当地居民。

实证研究表明,科学设计的光伏加农业系统可直接贡献于多项可持续发展目标⁷¹。表5-3显示了东非地区光伏加农业系统建设对各项SDG目标的潜在影响。

表 5-2
光伏加农业项目对东非地区SDG影响

SDG	影响	解释
 1. 无贫困	++	通过在农田部署光伏系统,农户可获得额外电力收入,提高家庭经济水平。光伏加农业项目还能带来更多就业机会,帮助贫困社区增收。
 2. 零饥饿	++	东非乡村地区可借助光伏加农业系统建设开垦土地进行农业生产,光伏组件遮荫特性也可降低旱季灌溉压力提高产量
 3. 良好健康与福祉	+	清洁电力的使用有助于减少对传统生物质燃料的依赖,进而降低室内空气污染。
 4. 优质教育	~	光伏加农业项目通常不会直接影响教育资源与入学机会。项目收益可能间接改善当地教育基础设施,但总体影响有限。
 5. 性别平等	~	光伏加农业项目本身对促进女性赋权没有显著直接效应。但若配套项目设计中注重女性培训与参与,或可带来一定程度的经济与社会地位提升。
 6. 清洁饮水和卫生设施	+	光伏电力可用于抽水 and 净水系统,改善农村地区的饮水供应。
 7. 经济适用的清洁能源	++	光伏发电本身即为低碳、可再生能源,对于缺电或电网不稳定的农村区域,光伏加农业系统能够提供经济且可持续的电力来源。
 8. 体面工作和经济增长	++	项目建设与运维将创造大量本地就业机会,比如设备安装、系统维护等。
 9. 产业、创新和基础设施	++	光伏加农业系统结合清洁能源与现代农业技术,鼓励本土创新并加强基础设施建设(如灌溉系统、电力接入等)。对区域可再生能源产业的发展也起到示范带动作用。
 10. 减少不平等	+	通过分布式光伏和小规模光伏农业项目,偏远或贫困地区也能获得电力与农业增收机会。
 11. 可持续城市和社区	+	农村离网光伏电站的建造可带动更均衡的区域发展。
 12. 负责任的消费和生产	~	项目主要聚焦于能源与农业产出,不直接对消费模式产生强烈影响。
 13. 气候行动	++	光伏发电可替代化石能源,减少温室气体排放,助力低碳转型。
 14. 水下生物	~	光伏加农业系统主要集中在陆地农业生产与光伏设施,对水域生态影响有限。
 15. 陆地生物	+	提升土地利用效率有助于减轻对自然栖息地的进一步占用;部分遮荫还能改善土壤水分保持,促进农田生态恢复。
 16. 和平、正义与强大机构	+	在土地权属相对复杂的东非,光伏加农业项目若设计合理,能减少土地纠纷、稳定社区关系。
 17. 促进目标实现的伙伴关系	+	光伏加农业系统建设往往需要政府、企业、国际组织和社区多方合作,利于形成跨部门、跨领域的合作网络。成功示范亦能为后续国际援助与多边合作提供参考案例。

注: ++:光伏加农业系统可对该目标产生较强积极影响
+:光伏加农业系统对该目标产生有限积极影响
~:光伏加农业系统对该目标可能不会产生明显影响

光伏加农业系统模式的显著特征在于能源投资与农业生产共享同一地理空间，这意味着光伏设施的部署必须深度融入区域土地管理系统。理论上，通过一地两用，该模式能提升土地综合利用率，缓解土地资源压力。因此清晰的土地确权和合理的租赁机制是光伏农业项目成功的基础。

东非国家土地治理体系高度复杂，土地产权制度复杂多样，包括私有地、社区土地和国家公有制土地等，传统地权制度⁷²与法定地权登记制度长期并存⁷³。尽管多数国家存在提供法定地权的正规法律框架，但其覆盖范围往往难以惠及所有农村社区。强制推行土地正规化易引发权属纠纷⁷⁴。因此，**建立高效的土地纠纷调解机制，将成为项目顺利实施的重要保障。**

东非已有的可再生能源项目经验表明，妥善的土地租赁方案有助于实现各方共赢。肯尼亚10万千瓦Kipeto风电项目案例的成功经验值得借鉴：该项目最初具备依法强制征地的权限，但开发商最终选择与当地社区协商租赁土地。通过签订长期租约，项目占用了社区部分放牧用地，但社区成员保留了土地所有权并获得租金和收益分成。这种“租赁+收益分享”模式确保了社区获得持续收益，土地权利受到尊重，投资方也避免了强征带来的社会阻力，实现了政府、电力企业和社区的三方共赢。

对于光伏加农业项目，类似的土地合作模式同样关键。许多光伏加农业项目位于农村地区，涉及小农或社区土地。通过与土地所有者或使用者签订租赁协议，使其在不失去土地的情况下分享发电收益或获得租金补偿，可以提高农民参与意愿。这一经验表明，如果项目选址利用现有农田或牧场，并通过租赁/合作形式取得土地使用许可，可减少用地纠纷并加快实施。

目前东非各国针对光伏加农业项目的专项激励政策仍处于起步阶段，但一些可再生能源普惠政策可为其提供借鉴支持。多数东非国家已出台促进可再生能源发展的举措，如上网电价补贴（Feed-in Tariff, FiT）、可再生能源特许权招标、税费减免等。

例如，乌干达早在2007年引入可再生能源上网电价，2013年启动“全球能源援助（GET FiT）”计划，在德国等捐助方支持下，为小型可再生能源项目提供奖励性付费。截至2022年，GET FiT促成了乌干达境内17个中小项目落地，其中包括总计2万千瓦的太阳能电站和10万千瓦

+的小水电项目，有效提升了乌干达的能源可及度。这一政策实践的成功，**证明通过合理的财政激励和保障机制，能够撬动私人资本投资可再生能源项目。**

在东非规模化推广光伏加农业项目，需构建灵活、创新且协同的监管和激励框架。例如，出台针对传统农业自留地的光伏农业开发指南，明确“一地两用”的权责边界；建立由能源、农业、土地等部门协作的审批绿色通道；出台专门针对光伏农业项目的指导意见和激励措施，提供专项补贴或创新融资工具，降低农户建设农光系统的前期成本等。

同时，光伏加农业方案的实施需在土地分配、作物选育、光伏设备运维及灌溉仓储设施配套等环节实现本土化适配。可借助国际组织力量开展技术培训，设立专项研究基金，并通过示范项目提升农户认知度。此外，将光伏农业推广与清洁炉灶改造、农村灌溉系统升级等现有工程捆绑实施，亦可产生协同效应。

值得注意的是，多家机构已开展的农村电气化项目（包括离网与微电网建设）为光伏农业推广奠定了基础。此外，肯尼亚、乌干达、坦桑尼亚的试点项目正在不同农业生态区进行测试，其产生的实证数据如果能够实施有效研究，可以有效帮助项目获得更多政策支持、商业投资与社区认可。

图 5-1

位于肯尼亚KAJIADO县的实验性农光互补项目



来源：Cholride Exide Ltd⁷⁵

5.2 东南亚光伏加渔业项目分析

东南亚地区因兼具大规模水产养殖与可再生能源发展需求，成为光伏加渔业项目投资的理想试验场。东南亚水产养殖业发展迅猛，全球影响力显著。数据显示，1990-2020年间，东南亚水产养殖面积从5200平方公里激增至超2万平方公里⁷⁶。2010年代中期，区域年产量约2250万吨，至2020年，产量已增至3000万吨。印度尼西亚贡献区域总产量的一半，越南、菲律宾、泰国为主要生产国。随着资本持续投入推动技术升级，叠加居民收入增长刺激消费需求，预计该产业规模将持续扩张。

东南亚太阳辐射强度居于全球高位，太阳能开发潜力巨大。该地区作为经济快速增长的新兴经济体，其能源需求预计将在2050年超过欧盟⁷⁷。当前东南亚能源供给77%依赖化石燃料⁷⁸，存在较大转型空间。区域11国中，菲律宾（94.8%）和柬埔寨（92.3%）接近完成目标；缅甸（73.7%）仍存在较多无电人口⁷⁹，其余国家均已实现全民用覆盖。这种能源格局意味着光伏加渔业系统在离网、微电网及并网场景均具开发空间。

除常规地面光伏项目外，东南亚国家在大型水库、天然水体开发漂浮式光伏（FPV）的潜力尤为突出⁸⁰。马来西亚、印尼、泰国、越南、新加坡、柬埔寨等国已投运试点项目，其余国家也有项目处于在建或规划阶段。区域漂浮式光伏项目的推进，为光伏渔业系统技术推广提供了重要技术储备与社会经济基础。

图 5-2
位于印度尼西亚的奇拉塔（CIRATA）漂浮式光伏电站



来源：中国电建⁸¹

表 5-3
1990-2020年主要东南亚国家水产养殖面积部分

国家	1990	2000	2010	2015	2020
柬埔寨	16.54	21.33	32.49	56.2	216.04
印度尼西亚	2,352.58	4,054.67	5,933.82	6,151.09	6,819.64
马来西亚	3.44	14.63	37.49	52.55	73.48
缅甸	23.84	93.05	336.01	550.94	1,012.45
菲律宾	1,145.82	1,338.96	1,602.34	1,625.63	1,653.26
泰国	1,152.21	1,726.82	1,794.1	1,832.48	2,042.41
越南	499.72	2,218.95	6,359.61	7,576.46	8,389.38
合计	5 194.15	9 468.42	16 095.85	17 845.34	20 206.66

来源：Zhang et al (2023)

表 5-4
光伏加渔业系统对东南亚SDG的潜在影响

SDG	影响	解释
 1. 无贫困	+	建设光伏加渔业系统能让养殖户通过并网售电或节省能源成本获得一定收益,增加家庭收入。
 2. 零饥饿	+	光伏发电为养殖提供稳定电力支持,有助于提高水产养殖产量与效率。
 3. 良好健康与福祉	+	由清洁电力驱动的水产养殖可降低对柴油等污染能源的依赖,改善局部空气质量。
 4. 优质教育	~	光伏加渔业项目通常不会直接影响教育资源与入学机会。项目收益可能间接改善当地教育基础设施,但总体影响有限。
 5. 性别平等	~	光伏加渔业项目本身对促进女性赋权没有显著直接效应。但若配套项目设计中注重女性培训与参与,或可带来一定程度的经济与社会地位提升。
 6. 清洁饮水和卫生设施	+	稳定光伏电力可为淡水养殖或海水养殖中的抽水与净化设施提供动力,间接改善周边地区的供水条件。
 7. 经济适用的清洁能源	+	光伏加渔业系统为沿海或内陆水域提供分布式太阳能发电,减轻对化石燃料的依赖。
 8. 体面工作和经济增长	+	光伏电站建设与运维会带来一些新就业岗位,例如光伏设备安装、运维技术人员等。
 9. 产业、创新和基础设施	+	光伏加渔业项目的扩张可以促进相关技术研发和产业链完善。
 10. 减少不平等	+	光伏加渔业系统可通过余电上网为当地居民提供增收渠道,有助于缩小城乡发展差距。
 11. 可持续城市和社区	+	对于依赖渔业的社区来说,光伏加渔业系统可提升当地清洁能源供应与基础设施现代化水平。
 12. 负责任的消费和生产	+	用清洁电力驱动水产养殖,是更环保的生产方式,相比化石燃料发电可减少碳排放。
 13. 气候行动	++	光伏发电可替代化石能源,减少温室气体排放,助力低碳转型。
 14. 水下生物	+	在科学布局下,光伏组件遮阳可降低水体升温、抑制藻类过度繁殖;对部分养殖品种有利。
 15. 陆地生物	~	光伏加渔业主要在水域范围内进行,对陆地生态系统的影响有限。
 16. 和平、正义与强大机构	+	项目涉及跨部门协作和社区参与机制,可促进地方政府、渔民与企业合作,增强政策执行力与社会治理能力。
 17. 促进目标实现的伙伴关系	+	光伏加渔业项目往往需要政府、企业、国际组织和社区多方合作,利于形成跨部门、跨领域的合作网络。成功示范亦能为后续国际援助与多边合作提供参考案例。

注: ++: 光伏加渔业系统可对该目标产生较强积极影响
+: 光伏加渔业系统对该目标产生有限积极影响
~: 光伏加渔业系统对该目标可能不会产生明显影响

东南亚推广光伏加渔业系统的另一优势在于快速扩张的光伏制造产能。柬埔寨、印尼、马来西亚等国家已形成区域性光伏制造集群,这主要得益于许多中国光伏龙头企业在东南亚设立生产基地。

相较于其他地区,东南亚具备工业基础设施完善、技术工人充足、市场环境稳定等综合优势。这些因素使该地

区成为光伏组件的重要生产基地,也为光伏加渔业项目的设备供应与成本控制提供了有利条件。同时,光伏加渔业系统等创新光伏应用模式也有望加速区域产业链升级进程。表5-4显示了光伏加渔业系统对东南亚其他各项SDG的潜在影响。

图 5-3

多种海上光伏技术路线



国家电投山东半岛南3号海上风电场20兆瓦深远海漂浮式光伏500千瓦项目，为全球首个投用的深远海风光同场漂浮式光伏实证项目
来源：国际电力网⁸²



山东文登HG32海上光伏实证科研项目，该项目为全国首个固定式长桩基海上光伏实证科研项目
来源：威海市文登区人民政府⁸³



SolarDuck在东京湾建设的海上漂浮式光伏组件，为日本首个海上漂浮式光伏装置
来源：solarduck.tech



于2018年并网发电的三峡集团安徽淮南150MW水面漂浮光伏项目，为彼时全球最大的水面漂浮电站
来源：澎湃新闻⁸⁴

尽管光伏加渔业系统在东南亚潜力显著，其技术、资金与监管障碍也不容忽视。

东南亚尤其湄公河流域属热带湿润气候，台风、暴雨、洪水等自然灾害对光伏渔业项目的工程设计提出了较高要求。在沿海地区，盐度和腐蚀性环境也是一大挑战，高温高湿的气候条件可能加速光伏设备老化。因此，为适应沿海地区的复杂环境因素，**光伏加渔业系统的材料选择、结构加固和热管理都需针对性优化。项目建设者需要因地制宜，在多种技术路线中做出最优选择。**图5-3展示了海上光伏的多种技术路线案例。

东南亚养殖业既有供应国内外市场的大型企业，也有大量家庭式经营养殖户。资金障碍对小规模养殖户的影响尤为突出：满足饲料生产、水泵运行、加工储运等全流程能源需求的离网方案成本高昂，但光伏加渔业系统的前期投入较高，这为无法接入电网的经营者带来更为严峻的挑战。**如何获取可负担的融资渠道与政府补贴，成为推动该模式在小微经营者中普及的关键。**

多样化融资策略或可解决部分问题。区域龙头企业可将光伏加渔业项目纳入ESG战略，推动可持续转型；政府则可通过补贴政策撬动私营投资；部分欠发达国家则更依赖外部资金支持。针对小微经营者抵押物不足、融资利率高等痛点，需创新金融工具，探索小微金融与社区互助信贷机制，与传统发展融资形成互补。

除资金激励外，政府需着力破除监管壁垒。多数光伏加渔业项目需分别满足能源和水产两个行业的监管要求，这种跨领域的属性导致了审批流程的复杂化。鉴于光伏加渔业系统涵盖集中式与分布式类型，需制定差异化的审批流程，例如制定专门的水上光伏开发指南，明确不同水体类型下项目选址、环评、工程安全的要求，使审批标准透明化。

此外，部分国家正推动光伏加农业的政策框架，其中也涵盖了渔业。例如越南将光伏加农渔业系统视为实现“双重收益”的创新措施，在政策对话中被列为优先扶持方向⁸⁵。然而，缺少先例的光伏加渔业项目极有可能要经历漫长的许可核准。因此在政策完善之前，寻求试点项目的特殊审批绿色通道也是可行路径，通过试点先行来为后续法规制定积累经验。



弥补发展差距： 加强发展中国家“光伏加”应用

本章要点：

- 优先选择符合本国需求和禀赋的光伏加模式、为优先模式提供充足的激励措施、采取针对性政策消除项目落地障碍、引导用能领域生产经营者参与积极性、将有利于光伏加规模化、可持续发展。
- 多边、双边与国内公共投资形成“顶层设计—跨界衔接—本土落地”的协同网络，通过财政资金联结，实现战略统筹与精准施策，系统性推动南方国家能源转型。
- 鼓励社会资本参与“光伏加”投资，通过构建“慈善基金催化—私人资本主导—影响力投资联动”的分层融资体系，实现从公益资助到市场收益的全链条资金流动，促进金融工具和商业模式创新，提高项目的可融资性。

大量实践表明，在合理的政策引导和市场机制下，“光伏加”模式能够实现快速部署，并产生显著的经济和社会效益。然而，当前发展中国家的光伏部署仍存在明显滞后。截止2023年，新兴市场国家（不包含中国）⁸⁶光伏累计总装机容量30.3亿千瓦，约为发达国家的一半，同时，新兴市场国家的光伏投资显著集中在少数国家，2014至2023年，光伏投资排名前15的新兴市场国家（不包含中国）吸引到的投资额占有新兴市场国家的80%以上⁸⁶。绝大部分发展中国家的光伏部署与投资仍处于待开发阶段。

发展中国家对发展可再生能源表现出强烈意愿，然而实际进展与目标差距悬殊。根据彭博新能源2024年的调研统计，几乎所有发展中国家都设定了可再生能源发展目标；然而，仅有7%新兴市场国家达成了既定目标，另有9%新兴市场国家距离实现可再生能源目标有小幅差距，超过四分之三的国家与既定目标存在中等到较大差距⁸⁶。

鉴于“光伏加”模式在发展中国家具备高度适用性，可作为其实现可再生能源目标的优先路径。本节基于发展中国家在推动可再生能源部署过程中面临的主要挑战，结合发展中国家已有成功实践，从政策支持、投融资促进和能力建设三个维度提出优先举措，为希望加速“光伏加”发展的国家提供参考。

6.1 推动“光伏加”发展的优先政策举措

公共政策承诺是推动“光伏加”发展的核心要素。从政策引导与激励、准入门槛设定、市场机制构建，到项目风险与收益的约束条件，政策为“光伏加”提供了系统性发展框架，直接影响其发展模式与规模。同时，优先发展模式的选择与政策引导方向，是决定“光伏加”能否有效协同促进多重可持续发展目标的关键因素。

6.1.1 优先选择符合本国需求、禀赋和发展条件的“光伏加”模式

如第五章的量化研究结果所展示，由于不同国家和地区资源禀赋、技术和产业情况、能源供需状况和经济社会条件多样性，不同光伏加模式表现出不同的适宜性和协同效果。在政策制定之初应结合本国情况对不同“光伏加”模式适宜性进行综合研究和评估，优先选择发展符合本国需求、禀赋和发展条件的光伏加模式。如由于光资源丰富区域与农业用地重叠问题，越南将光伏农业视为应对土地竞争的战略选择，作为下一步扩展光伏部署的重要途径⁸⁵。针对农业领域高用电量、柴油泵高排放和高成本问题，印度为光伏水泵提供高额激励，推动农业生产减轻对柴油和电网依赖，提高农民收入，并通过减少女性劳作负担、为女性创造就业机会方式促进性别包容性增长⁸⁷。

鉴于“光伏加”模式在发展中国家具备高度适用性，可作为其实现可再生能源目标的优先路径。



通过试点和示范项目探索合适的模式并予以大规模推广也是有效的途径。如中国光伏扶贫项目在试点阶段实践了三种不同的电站模式，包括户用光伏、村级光伏扶贫电站、集中式光伏扶贫电站；经过前期项目执行实践，发现村级光伏扶贫电站最能兼顾“精准到户”与“规模效益”的平衡问题，且适合地方政府的财力组织能力；此外，村集体经济的发展有利于“造血式扶贫”，更符合扶贫长远目标。因此，在后期选择村级电站扶贫模式予以大规模推广，在建设效率和扶贫长远效果方面实现了更好成效。

6.1.2 为适宜的“光伏加”模式提供充分的激励措施

公共政策支持可以作为开启光伏加投资机会的关键因素。可再生能源目标、上网电价、净计量、招标/竞价机制是最主要的几类激励措施。可再生能源发展目标可以

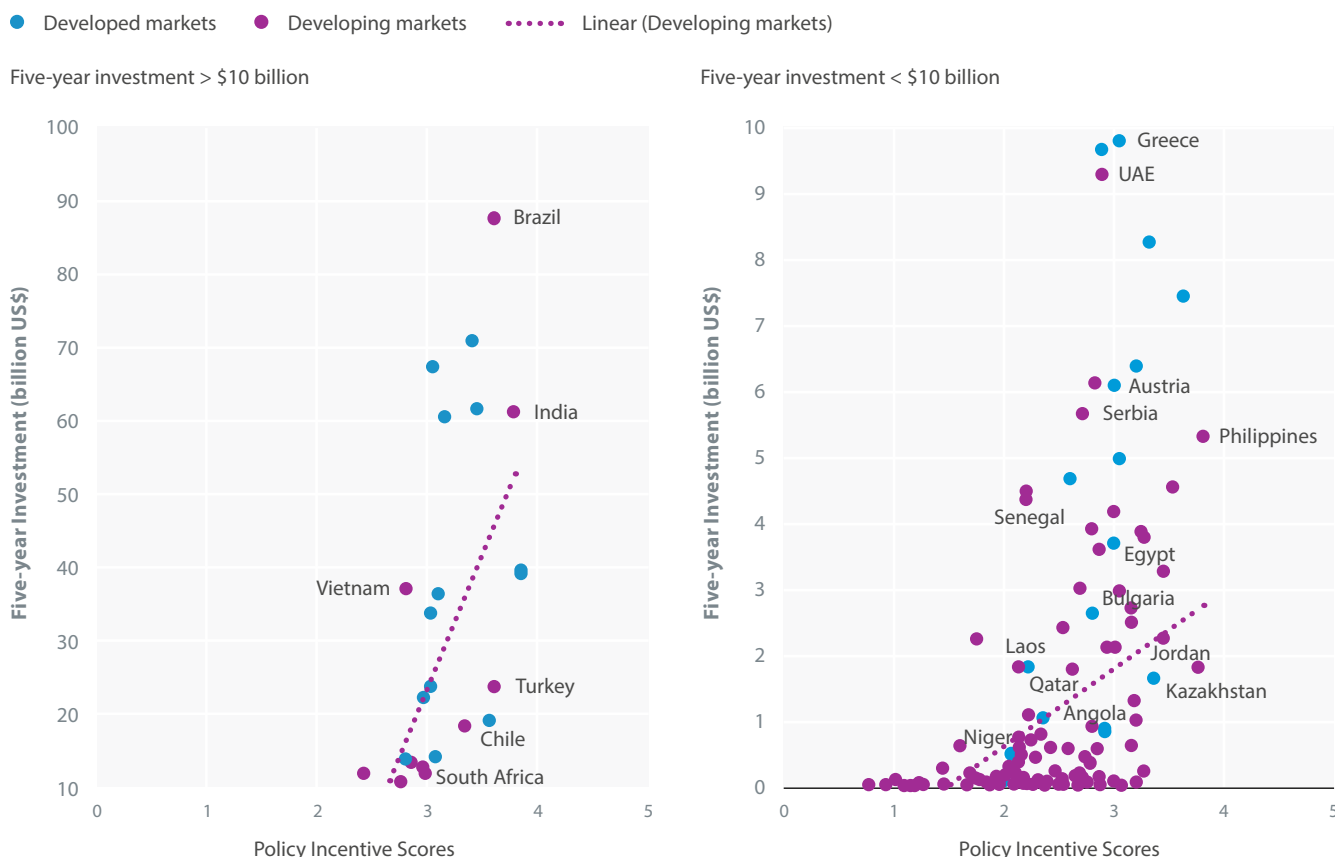
为光伏加项目提供长期规划和市场预期。对市场发展仍处于初期阶段的国家，采用上网电价补贴，可以快速吸引投资，建立市场信心，促进规模化发展。净计量计划则可以鼓励居民和小企业参与，促进居民屋顶光伏等分布式应用的推广。采用招标/竞价机制分配可再生能源装机容量有助于降低成本、提高效率。相关数据显示，政策激励与可再生能源发展规模之间存在显著的正向促进关系。参考图6-1。

其他被发展中国家采用较多的激励性政策还包括：

可行性缺口补助 (VGF)：对商业可行性不足的项目提供一次性补贴。该政策适用于前期投资高、回报周期长且商业可行性不足的项目，例如偏远地区项目或农业光伏项目。实践中，通常由政府或多边开发机构提供一次性资金补贴，以弥合项目投资回报与市场预期之间的差距，从而降低初期资金风险。

图 6-1

不同国家政策激励与5年期可再生能源投资规模⁸⁸



图片和数据来源：彭博新能源财经，《气候观察2024：新兴市场电力概况》

创新金融机制：包括发展性金融机构贷款、碳信用投资等（更多相关内容详见6.3.4）。

税收优惠：该政策适用于资本支出占比高、对进口设备依赖度大的“光伏加”项目，具体措施包括：增值税减免或退税、进口关税豁免、资本性投资的加速折旧或税收抵免，以及企业所得税优惠等。这些税收优惠可直接降低项目成本，有助于提升“光伏加”项目的经济可行性。

生产性用途电力支持：实践中，该政策包括对农产品加工、冷链物流等生产性能源消费提供补贴或优惠电价，并建立用能优先机制或绿电消纳方案。此类措施能强化光伏与生产活动的联动，有助于提升综合效益。

性别包容性政策：在政策规划阶段，可考虑采取前瞻性措施——例如设立女性专属贷款/担保机制、开展针对女性的技能培训计划、对女性持股合作社/联合体给予激励，以及在评估标准中纳入性别权重指标等——以促进女性参与“光伏加”项目的投资、运营和收益分配，从而提升发展公平性。

以上政策工具的组合使用和相互协同，更有利于形成良性激励。如可再生能源目标和竞价机制拉高光伏部署规模，净计量和上网电价等市场激励鼓励分布式应用，财政补贴（VGF）、税收优惠、创新金融等工具解决商业可行性问题，生产性用电支持和性别包容政策则确保社会效益。实践表明，在政策规划和实施过程中，多管齐下的激励政策组合有利于显著提升“光伏加”项目的投资吸引力和运行效率。参考案例：印度“总理农民能源安全与发展计划”（PM KUSUM）。

6.1.3 制定有利于消除政策实施和项目落地衔接障碍的针对性政策

在优先发展目标与充足激励的基础上，对化石能源补贴逐步调减、跨部门审批和监管、土地政策改革等采取针对性的措施，不仅有利于光伏加政策执行效果和目标实现，还有利于减少项目实施的不确定因素，创造稳定和可预测的投资环境，从而促进投资意愿乃至降低资本成本。

化石燃料补贴通过人为压低能源价格，扭曲市场机制，削弱了光伏等可再生能源竞争力。发展中国家对化石燃料的补贴在短期内有助于稳定能源价格和支持低收入群体，但长期来看，这些补贴可能导致财政赤字、资源浪费和环境污染。随着光伏和储能的技术成熟和成本下降以及各类光伏加模式的创新应用，改革化石燃料补贴，转向激励更具成本优势和经济社会效益的光伏加模式成为具有现实前景的替代路径，在有助于实现能源绿色转型的同时，从长远看更有利于减轻财政负担。摩洛哥2014年取消汽油等燃料补贴，将节省的数十亿美元预算转向可再生能源开发。改革后，摩洛哥于2019年实现可再生能源装机269.6万千瓦，占电力总装机的34%，并预计到2024年可创造数十万绿色就业。改革虽伴随部分民众用能成本上升，但通过定向资助贫困地区和继续补贴贫困家庭烹饪燃料，避免了社会负担过重⁸⁹。这一经验表明，减除化石补贴可为光伏等清洁能源腾出预算和市场空间。

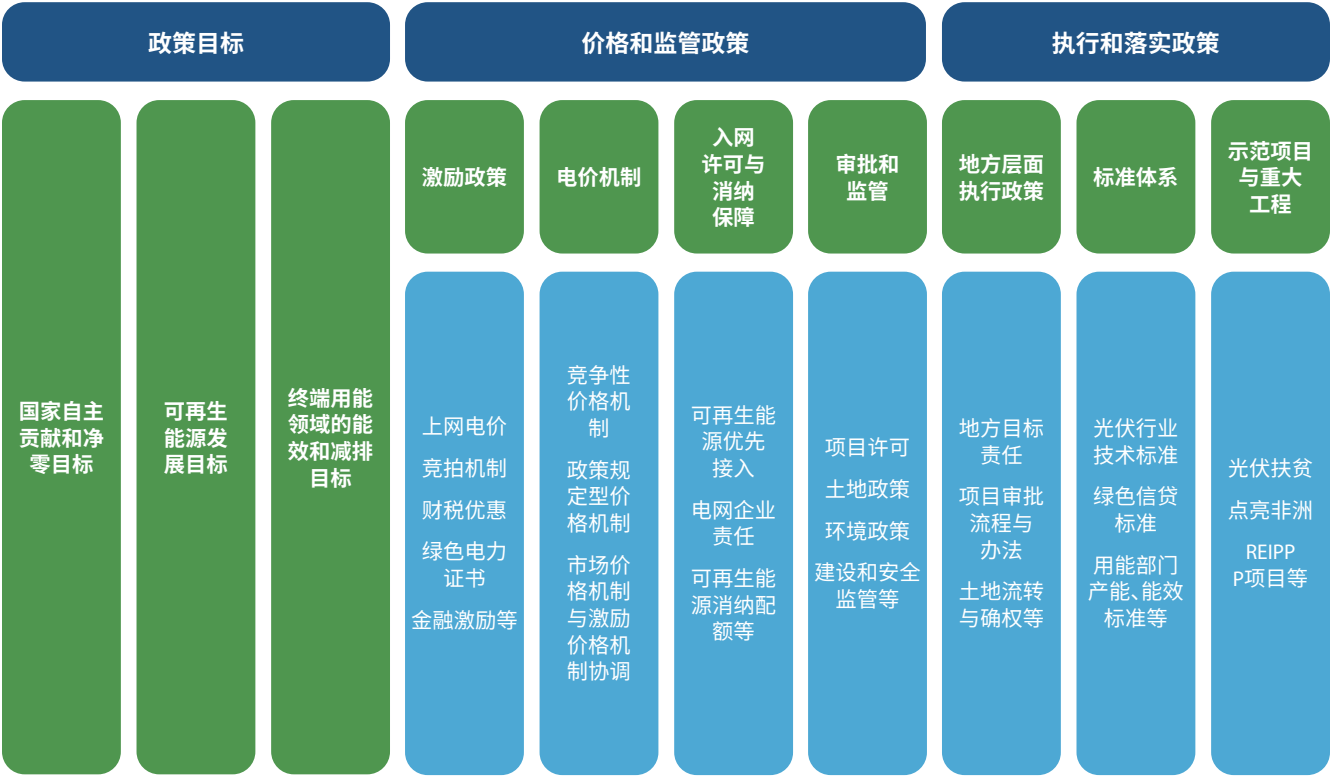
增强跨领域和跨部门的协调也是推动光伏加项目加速落地的关键举措。由于光伏加往往更注重与用能部门的结合和协同效应，因此涉及跨领域和跨部门协调的问题通常多于传统光伏项目，加强不同层级、不同领域和不同部门协调性的政策举措对推进光伏加发展目标达成影响重大。例如，中国光伏扶贫项目实行“中央统筹、省负总责、市（县）抓落实”的管理体制，为保障光伏扶贫目标与扶贫效果奠定了重要基础。参考表6-1。

如第五章所述，土地政策往往是影响光伏加农业和光伏加渔业的重要因素。为此，一些发展中国家已经在政策层面开展积极举措。如越南在2024年颁布了新的《土地法》，允许在不改变农业或水产养殖用地性质的前提下，开展太阳能等可再生能源项目。这一政策突破了以往农业用地与能源用地严格区分的限制，有利于推动光伏农业发展⁹⁰。

表 6-1
中国光伏扶贫项目各部门分工协同机制

机构名称	主要职责
国务院扶贫办	牵头建立协调推进机制,负责建立、管理全国光伏扶贫信息管理系统、全国光伏扶贫信息监测系统,审核甄别帮扶对象、明确建设资金来源、指导收益分配等。
国家能源局	主要做好电站计划管理、明确实施要求、提供政策保障。
财政部	负责财政补贴资金优先发放。
国家发展改革委	负责提供价格政策支持。
电网公司	负责保障扶贫电站的并网和消纳。
地方政府	组织实施具体资金筹措、组织建设、运营管理、利益分配等。

图 6-2
可再生能源发展政策框架图



6.1.4 制定促进用能领域主体参与意愿和跨领域融合发展的政策

用能领域主体参与的意愿和参与程度对推动光伏加应用快速和大规模发展至关重要。首先，工业、农业、交通、建筑等用能领域的企业或个人是光伏加应用场景的所有权者或经营者，其同意和参与意愿直接影响光伏加模式能否在用能领域推广应用。其次，用能领域的企业或个人可以成为光伏加应用的投资者。最后用能领域的企业或个人作为生产经营者，其对光伏加应用的参与能直接影响光伏加的复合收益或协同效果，如农业公司参与光伏加农业的投资和经营能促进光伏加农业模式中农业端产出和收益。

用能领域的减排或能效目标可以成为推动用能领域生产经营者积极参与的政策工具。如中国在《2024—2025年节能降碳行动方案》要求高耗能项目的非化石能源消费比例不低于20%，并推动绿证核发全覆盖，鼓励企业通过建设光伏项目实现绿色电力消费⁹¹。

从产业到项目建设的各类标准体系可以确保技术兼容性、安全性，促进跨领域合作，降低风险，加速项目落地。参考案例：印度“总理农民能源安全与发展计划”（PM KUSUM）。

案例 6-1：
印度“总理农民能源安全与发展计划”（PM KUSUM）⁹²

PM KUSUM计划通过“技术标准+财政激励”双轮驱动，投入34,422亿卢比（约42亿美元），计划至2026年新增34,800兆瓦分布式光伏装机，构建“离网供电+农泵升级”复合能源体系：技术标准明确光伏（500kW-2MW）与农泵容量匹配规则（光伏≤2倍泵功率）及遮光率≤30%等农业适配要求；风险管控采用阶梯补贴（中央30%-50%+地方30%+农户≤10%）+DISCOM电价回购，东北等地区中央补贴提升至50%；跨域协作引入UNIDO国际认证、分阶段CAPEX资金拨付及本土运维培训，联动政府、金融机构与农户形成“政策-资金-技术”闭环。该模式通过标准化流程将分散需求转化为规模化投资，为发展中国家提供“农业-能源”协同转型的可复制政策模板。

6.2 能源部门公共投资

在全球能源转型与可持续发展的背景下，多边公共投资、双边投资（双边政府合作机制）、国内公共投资三类主体形成“顶层设计—跨界衔接—本土落地”的立体化协同网络。三者以公共财政资金为纽带，通过目标嵌套、资源传导与政策共振构建有机整体，共同破解全球南方国家能源转型的系统性难题：第一类为多边公共投资，以世界银行、亚洲开发银行、亚洲基础设施投资银行等为代表，通过成员国注资形成资金池，重点支持跨境电网互联、区域清洁能源走廊等跨国基础设施项目；第二类属双边政府合作机制，以国家间能源合作协议为框架，通过政府优惠贷款、技术转移、产能合作等定向支持伙伴国能源体系建设；第三类是国内公共投资，由各国政府通过财政预算、专项基金等方式直接投入，聚焦本国能源基础设施升级、可再生能源开发等本土能源转型目标。这种嵌套式协作机制，使得公共资本在跨国战略统筹、国别精准施策与本土韧性培育间形成动态平衡，系统性降低南方国家能源转型的边际成本。

6.2.1 多边公共投资

多边公共投资已形成以多边开发银行（MDBs）为核心，国际金融组织（如国际金融公司IFC、非洲金融公司AFC）、专项基金（如绿色气候基金GCF）、区域合作机制（如等多元主体协同发力的新局面。各主体凭借差异化定位与创新工具，共同推动可再生能源项目落地。

在全球能源转型加速的背景下，多边开发银行扮演核心引领与模式创新的角色，正通过创新融资工具与战略性投资，显著加大对光伏等可再生能源的布局。以2025年1月召开的“使命300”非洲能源峰会为例，非洲开发银行（AfDB）与世界银行联合发起了一项总额达900亿美元的非洲电气化计划，旨在通过太阳能微电网、智能电网与政策改革，到2030年为3亿非洲人口提供可持续电力。该计划明确要求50%的新增电力来自太阳能等可再生能源，标志着多边机构将光伏技术作为破解非洲能源赤字的核心方案。表6-2展示了亚洲基础设施投资银行（AIIB）近五年来的光伏项目投资，可以看出，AIIB针对光伏项目的投资逐年增加，地域覆盖也更加多元（近年来AIIB也开始加大在非洲和拉美地区光伏投资的布局）。

表 6-2
亚洲基础设施投资银行 (AIIB) 2019-2024年光伏项目投资⁹³

年份	国家	金额 (百万美元)	装机 (万千瓦)
2024	印度	67	30
	阿塞拜疆	170	76
	土耳其	32.5	10
	泰国	170	64.9
	印度	88.5	40
2023	乌兹别克斯坦	145	89.7
	中国	50	50
2022	印度	50	/
2021	印度	50	30
	马尔代夫	20	3.6
2020	印度	35	25
	阿曼	60	50
2019	印度	65	25

来源:亚洲基础设施投资银行

多边公共投资主体正从资金提供者向“生态系统构建者”转型,在全球新能源转型中拓展出三大核心角色:一是作为多捐助方基金的东道机构或托管人(如非洲开发银行管理的非洲可持续能源基金 SEFA),通过汇聚多国捐资形成催化资金池,以优惠融资、技术援助及风险分层设计撬动私营资本,同时推动跨机构协同与本地化能力建设;二是作为私营资本的战略协同者,以有限合伙人(LP)身份定向投资气候能源主题的私募股权与风险投资基金,或通过直属投资部门直接介入气候友好型企业培育 — 例如 ADB旗下 ADB Ventures 直接参与投资区域内光伏储能技术初创企业,或IFC注资气候主题风险投资基金Equator Africa,深度参与被投企业的技术路线规划;三是作为全球治理规则的多维构建者,在推动统一技术认证、规范金融工具、创新跨境交易机制,以及降低制度性壁垒的基础上,提升区域能源互联效率;将合规体系建设、反腐败机制嵌入与机构能力培育作为核心议程,系统性提升项目执行

的规范性与抗风险能力。这种“资金注入 + 资本引导 + 制度赋能”的复合模式,使多边公共投资成为发展中国家能源转型中兼具资金效率与治理效能的“双轮驱动”引擎。

6.2.2 双边投资

双边投资的融资模式通常指两个国家或政府间的合作,通过直接协议或政府间协议进行资金的注入和项目的支持。双边投资通常包括贷款、赠款、技术转让、合作协议等形式,由投资国或援助国为受援国提供支持。

双边投资的资金流动通常通过发展援助机构、出口信用机构或国际合作项目进行。**与多边投资相比,双边投资更具针对性,能够根据合作国家的具体需求进行定制化支持。**例如,某国可以向另一国提供低息贷款,支持其建设可再生能源基础设施,或者提供技术援助,帮助受援国提升绿色能源项目的实施能力。

图 6-3
坦桑尼亚工人正在安装光伏微电网设备



来源:Climate Home News

案例 6-2：
坦桑尼亚KEYMAKER小型电网项目

坦桑尼亚的Keymaker项目旨在通过建设小型电网，促进农村地区的生产性用电，从而推动当地经济发展。该项目由英国政府通过“转型能源获取平台”提供的援助资金以及宜家基金会进行支持。受助方是坦桑尼亚的私营企业JUMEME Rural Power Supply Ltd, 该企业与坦桑尼亚性别与可持续能源网络 (TANGSEN) 合作推动项目。

项目内容包括建设60千瓦的太阳能-柴油混合小型电网，并通过提供渔业加工、电动设备支持和培训来推动电力的生产性使用，促进当地社区特别是女性的经济赋权。调研显示，当地电力需求明显增加，商业活动规模显著增长。当居民和商业用电需求增长到一定程度，微电网甚至难以完全满足当地用电需求。该项目也增加了当地女性创业机会，为性别平权做出重要贡献。

近年来双边投资呈现两大显著趋势：一方面，以美国国际开发署 (USAID) 为代表的传统援助方缩减能源领域资金规模；另一方面，新兴经济体与发展中国家间通过“产能合作+技术输出”模式的合作显著增强，成为双边可

再生能源投资的重要力量。这种结构性变化要求受援国建立更灵活的多源融资体系，既要把握新兴经济体提供的EPC+F (工程总承包+融资) 模式机遇，也需防范因地缘政治变动导致的资金撤离风险。

6.2.3 国内公共投资

国内公共投资是由各国政府通过财政预算、专项基金及国有企业投资等方式直接投入，聚焦本国能源基础设施升级、可再生能源开发及能效提升等本土能源转型目标。这类投资不仅体现了一国对气候行动的自主贡献，也构成了后续吸引私人资本的基础条件。然而近年来部分南方国家正面临光伏投资紧缩的严峻危机：经济下行导致财政收入锐减、国际援助资金缩减，叠加债务危机高企与绿色融资成本倒挂，以及能源转型所需大规模前期投入与技术锁定效应（如化石能源进口逆增）。这一困境已促使部分国家被迫延缓多个计划中的可再生能源项目。

针对全球南方国家光伏投资财政空间断裂的困境，通过国内公共投资推动光伏产业发展需要权衡“财政可持续性—可再生能源转型目标—社会公平”三者的矛盾。一方面，过度依赖财政补贴可能加重债务负担，另一方面，激进的转型措施又可能损害弱势群体的用电权益，导致社会不公。政策制定者需在短期财政压力与长期转型收益之间寻求平衡。具体可通过多元化融资渠道（如绿色债券、公私合营模式）引入更多私人资本，强化南南合作促进资源共享（与传统南北合作不同，南南合作基于相似的发展阶段和面临的共同挑战，提供了更为适应性强的融资方案），推动光伏产业本土化和经济结构升级以增强财政韧性，同时运用政治风险保险、汇率对冲等工具缓释投资风险，吸引外资。进一步优化政策环境与提升透明度，加快能源效率提升和需求侧管理，减少对化石能源依赖，结合技术创新与本地化应用，形成多层次、多维度的综合方案，推动实现可持续且公平的光伏能源转型。

6.2.4 公共投资助力南方国家“光伏加”发展

在推动南方国家“光伏加”投资的进程中，**多边、双边及国内三类公共投资以财政资金为纽带，通过多层协同形成能源转型合力：**

资金与政策联动：多边投资机构以跨国资金池和政策框架支撑超大型跨国项目（如跨境电网），吸引双边投资机构以优惠贷款、技术合作定向补充，再由各国政府通过财政预算落地本土能源基建，形成“跨国大额融资 — 双边专项支持 — 国内精准实施”的梯度互补。

项目、知识与风险协同：跨国项目依赖双边机制解决跨境协调，依托国内投资完善末端配套；多边技术经验经

案例 6-3：

越南漂浮光伏项目的多层协同模式

越南 Da Mi 水库 47.5 万千瓦漂浮光伏项目展现的多边 - 双边 - 本国政府合作机制，呈现了“多边架构支撑 — 双边要素补充 — 本土生态适配”的三维协同模式：亚洲开发银行（ADB）作为多边投资机构承担“顶层架构师”角色，主导 1760 万美元主融资（占比 47%），依托跨国资金池与主权担保破解超大型项目初始融资壁垒，同步输出国际技术标准与环境评估框架；双边机制（加拿大气候基金、JICA）作为“要素赋能者”，注入气候专项资金、国别适配技术或产业经验，填补多边框架下的个性化需求；越南本国主体（政府 + 企业）扮演“生态适配者”，通过政策资源（土地、电价、审批）与本土网络（电力系统、运维能力）将国际方案转化为本土可行项目，确保“引进来 — 落得下 — 可持续”。这种模式的核心价值在于，将单一资金支持升级为“融资 + 技术 + 制度”的系统性解决方案，尤其适用于技术复杂、投资周期长、具有区域示范效应的能源转型项目。

图 6-4

位于越南的DA MI 175MW漂浮式光伏电站



来源：ADB³⁴

双边平台扩散为本土实施能力;同时,多边风险担保降低投资门槛,带动双边低成本资金与国内基建配套,破解南方国家融资难题。

系统性支撑效应:三类投资以“跨国统筹—双边精准—国内落地”构建协同网络,覆盖能源转型全链条,通过资金、政策、技术的跨境流动,避免资源错配,增强全球南方国家自主转型能力,为可持续发展目标提供立体化支撑。

6.3 鼓励社会资本参与“光伏加”投资,推动金融创新

社会资本的多元化协同是破解“光伏加”项目资金瓶颈、释放综合价值的核心动能,需构建“慈善基金催化—私人资本主导—影响力投资联动”的分层融资体系,打通从公益属性到市场收益的全链条资金通道。

6.3.1 慈善资金

慈善资金以纯公益属性聚焦市场失灵领域,通过无偿资助、低息赠款、技术转移等方式,为高社会价值场景提供初始动能,区别于盈利逻辑,慈善基金重点支持传统金融难以覆盖的弱势群体赋能与商业回报率较低的环境保护、教育和健康等社会发展领域。例如,盖茨基金会于2022年在COP27上承诺未来4年投资14亿美元,支持非洲和南亚的小农推广气候智慧型农业技术。这些资金重点支持本地研发创新、小农能力建设以及数字和新能源技术在农业中的应用⁹⁵。在这一框架下,与“光伏加”应用相关的项目例如光伏灌溉、光伏冷链储存、农光互补试验示范等都有机会获得慈善基金的资助。

6.3.2 私营资本

与传统的政府援助模式不同,私人资本更注重市场机制与商业可行性,展现出灵活、高效、风险导向强的投资特征。在南南合作背景下,私人资本正日益成为推动发展中国家光伏转型的关键力量。私人资本不再局限于传统的大型项目投资,而是通过多种灵活模式介入,如项目融资、企业自建、特殊目的载体 (SPVs)、能源服务合同 (ESCOs)、以及绿色债券等。这些机制使得不同风险偏好与资金规模的投资者都能在光伏项目中找到契合的切入点,极大地扩展了私人资本进入光伏领域的通道。

越来越多来自发展中国家的企业,特别是中国、印度、巴西、南非、沙特、阿联酋等新兴市场的光伏制造商和能源企业,通过直接投资、合资企业、EPC承包、融资租赁等多种方式,积极参与其他发展中国家的光伏发电项目。这种合作不仅涉及电站建设,还包括本地化组件制造、人才培养、运维管理等全产业链环节,有效提升了受援国的清洁能源自主发展能力。除了企业参与之外,过去五年光伏技术的持续进步与成本的显著下降,使得光伏项目的投资回报周期大幅缩短,显著增强了专业投资机构的参与意愿。机构投资者如养老基金和保险公司,逐渐将光伏项目视为具有稳定现金流和低波动性的长期收益型资产,而私募股权基金与风险投资则更加关注光伏领域中的技术创新和商业模式变革,从而推动了资本的可流动性。

在私营资本成为光伏投资主力的背景下,本地商业银行作为连接私营资本与终端市场的关键纽带,正发挥越来越重要的作用。凭借其深入本地市场、贴近用户的优势,本地银行能够为中小企业、农村家庭等分散化、多样

案例 6-4: 洛克菲勒基金会资助非洲清洁能源解决方案

在2024年于阿塞拜疆巴库举行的第29届联合国气候变化大会 (COP29) 期间,洛克菲勒基金会宣布投入1090万美元,以推进由非洲主导的清洁能源解决方案。这笔资金将用于包括协助非洲气候基金会 (ACF) 建立非洲能源未来倡议 (AEFI)、支持建立非洲监管学

院、在肯尼亚推广清洁烹饪单元、支持全球离网照明组织 (GOGLA) 推广离网太阳能解决方案等多个关键项目。这些举措体现了洛克菲勒基金会对非洲主导的清洁能源解决方案的坚定支持,反映了基金会促进非洲大陆的可持续发展和能源独立的美好愿望。

化的“光伏加”需求提供更具适配性的金融服务,成为推动项目落地的重要推动者。通过灵活的信贷安排和金融产品创新,商业银行不仅能打通融资“最后一公里”,还可结合国际金融机构提供的风险缓释机制,进一步提升私营资本的风险可控性与投资意愿。如中国重庆市“百万千瓦屋顶分布式光伏”建设行动中,重庆农村商业银行推出“阳光贷”、“渝快助农贷”、“碳收益质押”、“绿色信贷+技改贷”等针对工商企业、农村居民的不同额度范围的多种类型产品,有效助推了当地光伏+项目部署⁹⁶。

然而,在许多发展中国家,本地银行仍面临缺乏光伏项目评估能力、贷款结构与项目周期错配等现实制约。为激发其潜力,需要在能力建设和政策支持层面协同发力:一方面提供标准化信贷模板、评估工具和专业培训,提升其服务“光伏加”项目的专业能力;另一方面通过利率补贴、风险缓释基金和资本金权重优惠等措施,引导其将更多资源配置到绿色项目中。通过强化本地银行体系,私营资本在本地市场的流动性和渗透力将进一步增强,从而与南南合作背景下多元化的私人投资模式形成良性互补,共同加速“光伏加”在发展中国家的广泛部署。

6.3.3 影响力投资

近年来越来越多的慈善基金会(如比尔·盖茨基金会、洛克菲勒基金会、LGT公益创投)正在将传统的捐赠模式与可持续投资相结合;同时,部分投资机构(包括风险投资、私募股权或家族办公室)将系统性的影响力评估纳入投资决策体系,使投资既注重社会效益,也兼顾财务回报,这两股力量共同推动了“影响力投资”这一新兴范式的兴起。影响力投资并非慈善与商业的简单折中,而是一种以明确的底线约束和可量化的社会与环境绩效为核心的投资理念,重点聚焦市场往往忽视的高风险、高潜力领域,如碳捕捉技术、离网光伏系统等。这种模式正在重塑光伏产业价值链:一方面避免了慈善资本对长期捐赠的依赖,实现资金的可持续循环;另一方面也弥补了传统私人资本对边缘人群和弱势地区需求的忽视,成为推动全球能源公平转型的重要“第三条道路”。

6.3.4 创新金融工具助力“光伏+”融资渠道扩展与规模增长

融资渠道受限与融资成本高企是制约许多发展中国家“光伏加”项目推广的关键瓶颈。近年来,部分国家在金

融机制上的探索与实践表明,创新金融工具不仅能有效突破资金来源受限的问题,还能通过风险分担与资本结构优化,加速项目落地并提升整体发展规模。当前在光伏行业具有代表性的创新金融工具包括:

- ◆ **绿色债券与碳中和金融产品:**如专项绿色债券、碳中和资产支持证券(ABS),可将项目未来收益权证券化,吸引对可持续投资感兴趣的长期机构资金。2023年,发展中经济体绿色债券发行量达1350亿美元,同比增长34%;其中,除中国外的新兴市场达1110亿美元,同比大幅增长65%。⁹⁷
- ◆ **光伏房地产投资信托基金(PV REITs):**通过将成熟分布式光伏资产证券化,为中小投资者提供参与清洁能源投资的通道,并建立“投—融—管—退”闭环。如菲律宾的Citicore Energy REIT Corp. (CREIT)年化股息收益率达6.4%~7.8%,显示出强劲的资本吸引力。⁹⁸
- ◆ **碳金融与生态价值转化工具:**包括碳配额质押、绿证收益权融资等,将碳减排效益与绿色电力的市场价值金融化,形成可量化的收益项。
- ◆ **供应链金融与产业链协同机制:**如“融资租赁+收益分成”、核心企业信用支持的产业链ABS等,能降低中小开发商与本地运营商的融资门槛,提升整条价值链的资本流动性。
- ◆ **混合融资模式(Blended Finance):**通过整合公共资金(赠款、技术援助、低息贷款、担保等)与私营资本或慈善资本,在项目初期承担部分高风险环节,从而吸引更多社会资本参与项目中后期的扩大投资,最终实现风险收益平衡与资本倍增效应。
- ◆ **成果导向融资(RBF, Results-Based Financing):**将资金支付与实际成果挂钩,常见形式包括成果导向援助(RBA)、成果导向拨款(OBA)、影响力债券(如DIB)、以及可持续挂钩贷款(SLL)等。该机制通过“先出成果、后付款”提升资金使用效率,引导项目开发方聚焦实际效果(如装机量、覆盖人群、减排指标),强化项目执行问责,特别适用于光伏+等需精准量化成效的领域,有助于吸引社会资本、推动普惠能源转型。
- ◆ **债务置换融资机制(Debt-for-Climate/Energy Swaps):**尤其在债务负担沉重的发展中国家,通过与债权方协商减免部分对外债务,并将节省下来的

财政空间定向投入可再生能源项目，是兼顾财政可持续与能源转型的新型机制。多个中美洲和非洲国家正在与多边机构合作推进相关试点。

与此同时，全球南方国家正加快推动本地货币融资工具的创新，如发行本币债券和提供本币贷款，旨在降低外币融资带来的汇率风险。此外，借助多边开发银行和国际机构构建的信用增强机制（包括联合担保和风险准备金池）以及风险共担安排（如主权违约互换），创新担保框架和保险模式得以建立，从而系统性地化解政治动荡和市场波动所带来的光伏融资风险。

需要注意的是，对创新金融工具的使用需要在政策和制度方面提供相应支撑，如建立与国际标准接轨的绿色项目定义、认证和信息披露体系，为绿色债券和可再生能源资产证券化提供明确的指导和信任基础。

6.3.5 通过多元化收益与商业模式创新推动“光伏加”融资可行性

提升光伏项目融资可行性 (bankability) 的关键之一，在于构建多元化且长期稳定的收益体系。通过签订长期购电协议 (PPA) 锁定基准电价，结合辅助服务（如电网调频）、储能增值（峰谷套利和灵活性服务）、碳资产开发（碳交易和绿证收益）等多重收入来源，项目现金流更加稳健且可预测。与此同时，创新商业模式如“即用即付”（PAYG）和融资租赁，通过优化支付结构、降低准入门槛和转移技术风险，激活居民、工商及农业等多元市场需求，确保收益的持续流入，进一步强化项目的财务稳定性。这种多元化、长期且稳定的收益设计，不仅提升了项目的融资吸引力，也为私营资本参与提供了坚实保障，推动光伏+项目的规模化和可持续发展。

案例 6-5：

Citicore REITs 案例⁹⁹

菲律宾企业Citicore将一座2.2万千瓦的光伏电站以及一系列分布式光伏电站所在的土地从企业拆分重新组成菲律宾首个太阳能房地产投资信托——Citicore Energy REIT Corp (CREIT)。CREIT的收入主要来自于太阳能运营商支付的租赁租金，这些租金以基础租金和可变租金的形式结构化。租户为Citicore及其关联公司。保证的年基础租金率是基于租赁土地上太阳能电站的三年历史平均发电量，再乘以实现的电价。可变租金率相当于电站运营商在基础收入之上所获得的增量总收入的50%。CREIT及其证券持有者或投资者至少能获得过去三年太阳能销售所产生的平均收入，从而消除了所持资产短期的下行风险，同时通过CREIT在任何超出基础收入的增量收入中占有50%的份额，享受收入的增长，无论是通过发电量增加还是电价上涨。

Citicore通过提供差异化的投资途径，动员更多不同类型的投资者和资金的同时，释放了自身的资产负债表，这让其有更多空间投入新的太阳能项目。Citicore已经规划了一个强大的可再生能源项目管道，预计未来五年将达到150万千瓦（其中100万千瓦归属于Citicore）。最大的一项是位于Pampanga的太阳能农场。Citicore预计，一旦投入使用，这将成为菲律宾最大的单一太阳能农场。

以“先用后付”模式为例,通过灵活支付和信用体系结合,可以有效帮助低收入家庭克服购买太阳能系统资产的前期资金门槛问题,在太阳能家用系统、光伏水泵、光伏+冷链设备等领域已有较为广泛的应用。根据《2024年离网太阳能市场趋势报告》,2023年全球离网太阳能产品中,有39%是通过“先用后付”模式销售。⁴⁰

商业模式创新驱动的解决方案通常能创造显著的经济效益,其可观的商业回报率和可复制的盈利模式对私营资本具有较强的投资吸引力。发展中国家光伏项目中“先用后付”模式的内部收益率通常在15%至25%之间,如尼日利亚的小型光伏系统项目中,平均内部收益率为22%,投资回收期为3.7-5.2年¹⁰⁰。印度小型光伏系统项目中,融资租赁模式的内部收益率一般超过10%,在享受加速折旧(Accelerated Depreciation, AD)政策激励情况下¹⁰¹,内部收益率可以高达53.26%。这两种模式吸引了风险投资基金、私募股权基金、影响力投资者、商业银行、大型能源公司等多种类型的私营资本参与。

案例 6-6: 非洲M-KOPA“即用即付”模式¹⁰²

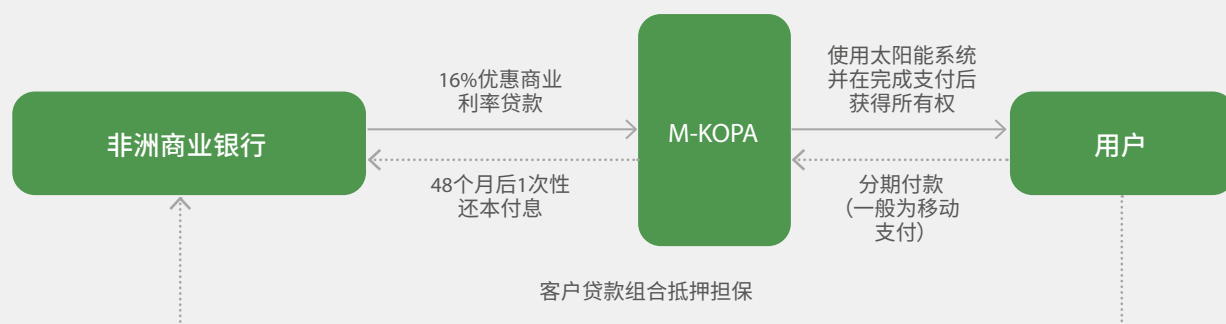
M-KOPA¹⁰³通过移动支付分期付款方式为非洲无电或电力供应不稳定地区低收入家庭提供太阳能家用系统。M-KOPA的核心优势在于通过灵活的支付结构和基于移动支付的信用体系,帮助用户克服了太阳能系统前期高额投入的资金门槛,并延伸到家庭照明、手机充电、太阳能水泵等多样化应用场景。用户可以按日或按周分期付款,降低了初期成本压力,极大地扩展了太阳能家用系统及小型光伏设备在农村及偏远地区的普及率。该模式不仅激活了居民市场,也延伸至农业用光伏水泵和小型工商用电场景,实现了收入来源的多元化。根据M-KOPA的客户调查,太阳能家用系统平均

每周为用户家庭节省4.5美元能源支出;46%的家庭将太阳能家用系统用于创收或支持创收活动,家庭月均增收65美元。结合其他辅助措施, M-KOPA将客户违约率维持在略高于10%,低于地区平均水平。¹⁰⁴

M-KOPA的盈利能力和可持续性为其获得了商业银行青睐。2013年, M-KOPA以30000名客户的移动支付贷款组合作为担保,获得非洲商业银行(Commercial Bank of Africa, CBA)牵头的1000万美元债务融资,该笔投资帮助M-KOPA客户规模从3万户跃升至15万户,成为离网用户即用即付服务的市场领导者。¹⁰⁵

图 B1

M-KOPA“PAY AS YOU GO”案例商业模式及非洲商业银行融资模式图





07

砥砺前行： 推进“光伏加”发展，加速能源转型

本章要点：

- 南方国家可以确定“光伏加”优先发展的战略定位，在“光伏加”的基础上建立光伏产业发展的长期战略。
- 现有国际太阳能合作伙伴关系为“光伏加”推广创造了有利条件，但对“光伏加”的支持力度不足，南方国家可在现有伙伴关系下，互通有无，加强合作，推动“光伏加”的发展。
- “光伏加”的发展需要从多方面开展工作，南方国家可从政策对话与经验分享、“光伏加”项目开发与合作、投融资、人才培养等方面开展合作。

“光伏加”适合南方国家的实际国情，为南方国家提供清洁能源，促进经济发展，应用前景广阔。但是“光伏加”在南方国家目前仍处于萌芽阶段，需要从各方面给予支持。因此南方国家可以考虑给予“光伏加”高度重视，依托现有的国际合作伙伴关系，广泛开展国际合作，推动“光伏加”的发展，并以此为基础，建立自己的光伏产业。

7.1 将“光伏加”纳入能源发展规划和新一轮NDC目标

7.1.1 确定“光伏加”优先发展的战略定位

“光伏加”具有多种优势，与南方国家的经济发展阶段、电网基础设施、居民经济承受能力、用能需求和用能特点相匹配，是目前最适合南方国家的供能方式。因此南方国家可以考虑优先发展光伏加，将其列入国家能源发展规划和新一轮NDC目标中，制定发展目标、识别应用场景、给予支持政策，吸引各利益相关方加入“光伏加”行业，通过公共资金引导私人资本支持“光伏加”的发展，推动“光伏加”的良性发展。

此外，光伏产业的全链条管理至关重要，在能源规划中必须做好光伏组件退役回收利用处置准备，一方面要考虑寿命延长的方式，另一方面要考虑通过循环利用延长光伏产品的价值链，减少光伏设备生产对资源的消耗，实现光伏行业的全生命周期环境友好。

7.1.2 以“光伏加”为基础建立光伏行业发展长期机制

启动“光伏加”工程，在全国范围内选择不同的应用场景，实施一批“光伏加”重点项目，通过这些项目，一是为当地居民提供清洁能源，二是提升社会各界对“光伏加”和可再生能源的认识，三是培养一批光伏行业人才，四是积累一些“光伏加”项目建设运营经验，为发展中国家光伏行业长期发展奠定基础。光伏行业可以提供清洁能源，同时促进经济增长。南方国家可以按照本国的资源禀赋和实际需求，布局光伏产业链，帮助当地经济实现发展。另一方面，太阳能资源几乎遍布全球，南方国家通过太阳能的高比例大规模应用，实现能源安全。

7.1.3 建立“光伏加”的国际政策对话与经验分享机制

在NDC目标下，一是定期举办高级别对话，建立部长级平台，使“光伏加”战略与国家发展议程和全球承诺（如可持续发展目标SDG7、《巴黎协定》）保持一致，促进就关键合作领域达成政治共识。二是建立技术和政策工作组，组建专家团队，制定政策、技术标准和项目规划，包括根据当地情况调整成功的商业模式（如光伏灌溉融资），并制定共享的政策工具包。三是共享路线图和案例传播，参与国可以考虑共同制定一个具有明确目标的全球南方“光伏加”发展路线图（例如，2030年农业光伏的规模目标），建立“光伏加”全球最佳实践库，共同总结和推广“光伏加”成功经验和最佳实践，深化各方在“光伏加”领域的合作。

7.1.4 以“光伏加”为基础建立可再生能源人才培养体系

可再生能源的发展离不开优秀的人才。可以以“光伏加”为基础，加强可再生能源人才培养合作，包括政策制定者、企业家、技术工人、新闻媒体等，为“光伏加”提供足够多的人才支撑。针对政策制定者，目标是帮助其构建政策设计与治理能力，可以设立专项资金，量身定做课程，对其进行光伏产业政策、发展规划、标准规范、环境保护等内容的培训。对于技术工人，目标是打造本地化技能供给体系，在南方国家职业技术学校设立光伏专业，课程涵盖组件安装、运维诊断、微型逆变器维修等实操技能，并进行实地实习。对于企业家，目标是孵化本土光伏产业生态，可设立孵化器，提供“技术包+供应链+融资”三位一体支持，逐步构建区域供应链。

7.2 加强现有国际伙伴关系在“光伏加”领域的合作

7.2.1 现有国际太阳能合作伙伴关系为“光伏加”推广创造了条件

随着光伏在全球的快速发展，一些国际合作伙伴关系开始推动太阳能的发展。国际可再生能源机构（IRENA）在非洲开展“非洲清洁能源走廊”计划，促进跨国可再生能源互联。国际能源署光伏电力系统项目（IEA PVPS），发布《光伏系统性能与可靠性指南》，为发展中国家提供技术参考。联合国开发计划署（UNDP）与绿色气候基金（GCF）

在孟加拉国推广户用太阳能系统。世界银行通过“点亮非洲”计划提供光伏融资。国际太阳能联盟 (ISA) 通过“全球太阳能银行”，提供低成本融资，推动光伏农业、太阳能水泵等应用。清洁能源部长会议 (CEM) 发起“超高效光伏设备挑战计划” (Super-efficient PV Challenge)，推动技术突破。能源部门管理援助计划 (ESMAP) 旨在帮助中低收入国家通过可持续能源解决方案减少贫困并促进经济增长。全球太阳能理事会 (GSC) 致力于通过政策倡导、市场研究、技术合作和信息共享，促进太阳能在全球范围内的应用和普及。全球离网照明协会 (GOGLA) 通过提供重要的市场数据、倡导支持性政策、促进投资并为成员提供增值服务，推动行业的持续发展，目标是到2030年改善10亿人的生活。

7.2.2 强化现有合作伙伴关系，推动“光伏加”发展

尽管现有伙伴关系围绕光伏行业开展了大量工作，但南方国家光伏行业发展仍面临着较大挑战。一是资金缺口大，发展中国家融资成本较高，且融资程序复杂。二是技术适配性不足，缺乏适合农村的小型模块化系统设计，高温高湿环境下面临光伏组件效率下降问题。三是本地化生产和运维能力弱，导致项目效率偏低，甚至废弃不用。四是缺少量身定做的光伏应用场景，不能实现光伏与其他行业的融合发展。“光伏加”能有效的解决上述挑战，借助于现有的国际太阳能合作伙伴关系促进“光伏加”的发展，对于南方国家清洁能源供应和应对气候变化具有重要意义。在现有国际合作伙伴关系中，各国可加强在光伏组件制造、系统集成、运维管理等方面合作，取长补短，为“光伏加”项目的实施提供坚实的产业支撑。此外，可制定统一的技术标准和规范，降低“光伏加”项目在不同国家和地区实施的技术壁垒，促进相关产品和服务的互认互通，加速“光伏加”模式在全球范围内的推广应用。最后，通过国际合作，为“光伏加”项目引入多元化的融资渠道和投资主体，缓解资金短缺问题，推动更多创新型“光伏加”项目落地实施，助力全球能源转型和可持续发展目标的实现。

案例 7-1： 通过新型伙伴关系促进发展中国家可再生能源合作

1. 公正能源转型伙伴关系 (JETP)

JETP是由七国集团 (G7) 和欧盟等发达国家主导建立的政府间多边合作机制，旨在帮助高碳排放的发展中国家实现向清洁能源的公正过渡。该伙伴关系通过提供资金、技术支持和政策协助，促进这些国家逐步淘汰化石燃料，特别是煤炭，转向可再生能源。首个JETP于2021年在《联合国气候变化框架公

约》第26次缔约方大会 (COP26) 期间与南非达成，承诺提供约85亿美元的资金支持，助力南非加速脱碳进程。此后，JETP模式相继在印度尼西亚、越南和塞内加尔等国推广，旨在通过国际合作，加速全球能源转型，实现可持续发展目标¹⁰⁶。

案例 7-1:**通过新型伙伴关系促进发展中国家可再生能源合作****2. “一带一路”倡议下的绿色能源投资计划**

“一带一路”倡议自提出以来，中国积极与沿线国家开展绿色能源合作，助力其实现可持续发展目标。在非洲地区，中国企业在加纳北部投资建设了200兆瓦的光伏发电项目，并计划开发100兆瓦的风力发电场，为当地提供多样化的清洁能源选择，推动

绿色能源转型。此外，在南非，中国企业投资建设的德阿风电项目已并网发电，总装机容量达24.45万千瓦，每年提供7.6亿千瓦时的清洁电力，相当于节约20多万吨标准煤，助力南非实现到2030年将太阳能和风能在能源结构中的占比从7%提升到40%的目标¹⁰⁷。

3. 中国国际发展合作署(CIDCA)推动的可再生能源合作

中国国际发展合作署(CIDCA)在全球发展倡议和“一带一路”倡议框架下，大力支持发展中国家能源绿色低碳发展。例如，在巴基斯坦，中国企业建设了卡洛特水电站项目，有效解决了当地用电难、用电贵的问题¹⁰⁸。2025年2月，CIDCA与巴基斯坦有关部门签

署合作文件，强调两国将加强光伏能源领域合作。在中非共和国，中国援建该国的首座光伏电站——萨卡伊光伏电站，不仅为当地居民提供稳定电力，同时提供了700多个就业岗位，培养了当地的技术工人，为当地经济和生活水平提高注入了新动力¹⁰⁹。

7.3 发展中国家伙伴关系下“光伏加”合作相关建议

目前，国际社会对于全球南方的发展均给予了高度的关注，很多双边机制都支持光伏等新能源的应用。但是我们也看到很多南方国家在利用这些国际机制的过程由于对于行业发展经验不足，在应用这些国际机制创造发展机会的过程中模式较为单一，建议可以通过以下模式帮助南方国家探索更好的双多边合作。

7.3.1 建立“光伏加”生态网络和专家网络

推动面临相似机遇与挑战的邻近发展中国家把“光伏加”纳入次区域级对话合作机制，如东盟、南部非洲发展共同体、加勒比地区合作机制。通过金砖国家合作机制、相关区域培训中心等扩大全球南方国家之间关于光伏加的培训、能力建设和交流合作。

依托联合国在全球的网络，成立发展中国家“光伏加”三倍增长南南合作联盟，总部优先考虑设在光伏产业链完善、政策支持度高的新兴经济体，并在非洲、拉美、亚洲等设立区域中心。联盟设立专家组，依托GSC、联合国、世界银行、当地行业协会等组织，在全球范围内征集专家，成立南南“光伏加”解决方案专家网络。工作组成员来自发展中国家、国际组织、光伏企业、金融机构、研究机构、高等院校、行业协会等。秘书处作为执行团队约20-30人，负责日常运营。

联盟每年举办年度峰会，发布《南南合作“光伏加”发展白皮书》。不定期按照专题举办“光伏加”技术研讨会。将“光伏加”纳入金砖国家及扩容后的伙伴国合作网络，在金砖峰会上举办“光伏加”研讨会。

联盟经费来自于气候变化的南南合作基金“气候资金新集体量化目标”(New Collective Quantified Goal on Climate Finance, NCQG)、企业赞助、基金会捐赠等。

7.3.2 “光伏加”项目开发与合作

“光伏加”项目的落地是突破障碍最有效的方式。目前，发展中国伙伴关系下，南方国家存在合作的需求，但是对于产业层面的合作落地性还有待深入探索，这里包括关于技术、市场管理、项目投资等各个方面管理措施明确规范导向，因此发展中国家可以全方位加强“光伏加”项目层面的合作。一是促进跨阶段合作，在开发前共同评估太阳能资源，确定应用场景（如太阳能灌溉、电动汽车充电），共同设计融资（混合融资、社区股权），并在实施过程中标准化气候适应技术解决方案，在实施后建立区域运维培训中心和光伏组件回收协议，以提高当地能力和可持续性。二是建设一批可推广的试点项目，发起南南先驱倡议，试验可复制的解决方案（如离网微电网、农业光伏）。通过风险分担和透明的影响指标（就业、减排）吸引私人投资，并收集关于协同利益的本地化数据，为项目评估提供信息。三是透明治理和多方利益相关方合作，为跨境项目建立涉及政府、企业和社区的明确问责框架。整合申诉机制，确保当地参与，并制定与可持续发展目标相衔接的监测机制，用于跟踪监测取得的公平、环境和社会经济成果。

7.3.3 建立宣传网络 and 平台

建立“光伏加”专题网站发布本报告，未来持续更新修订，并创建电子版案例集及汇编目录。与各国可再生能源、光伏行业组织合作，组建南南“光伏加”解决方案专家网络。在阿联酋第28届联合国气候变化框架公约目标的背景下，成立“南南合作特别工作组，将发展中国家的“光伏加”能力提高两倍。在金砖国家¹¹⁰和其他国家之间建立关于“光伏加”南南合作的协商网络。

将“光伏加”案例作为多种语言的宣传手册以及视频，通过网络平台扩大“光伏加”最佳实践案例的整理与传播。开展项目数据库、技术问答社区、在线培训课程等，宣传推广光伏、储能、“光伏加”等知识，让更多的人能够从事“光伏加”行业。

7.3.4 加强投融资合作

资金是南方国家发展“光伏加”项目推动最大的制约因素，需加强投融资合作。发挥绿色发展投融资合作伙伴（GIFP）的积极作用，调动可再生能源企业、多边开发银



“光伏加”项目的落地是突破障碍最有效的方式。目前，发展中国伙伴关系下，南方国家存在合作的需求，但是对于产业层面的合作落地性还有待深入探索。

行、国际非政府组织等多方力量，共同承担风险，积极撬动资金，通过多种渠道为南方国家“光伏加”项目提供支持，为南方国家“光伏加”项目开发提供多样化的务实融资方案。尤其是要通过公共资金，撬动更多私人资本进入光伏加领域，为家庭甚至是个人提供普惠金融服务，解决他们发展“光伏加”项目的资金问题。

发挥金砖国家新开发银行（New Development Bank BRICS）等新兴金融机构对“光伏加”发展的潜在作用，根据“光伏加”的应用场景和商业模式，创新融资模式，可由公共资金和私人资本共同成立“可再生能源产业基金”，为“光伏加”提供多元化的融资渠道。

附录

附录 I 案例集

广汽智联新能源汽车产业园近零碳示范光储项目¹¹¹

一、背景

项目背景:工业能源消费量占中国全社会能源消费总量的65%¹¹²左右,是节能减排的重点领域。为推进工业绿色低碳转型,工业园区积极推动“光伏+工业”模式,推进光伏发电多元布局。这种模式有助于工业园区实现能源自给自足,提高能源利用效率,减少碳排放。广汽智联新能源汽车产业园位于中国广东省广州市番禺区,是国家级新能源整车及核心零部件生产制造示范园区。



参与单位:南方电网综合能源股份有限公司(以下简称“南网能源”)与广汽埃安新能源汽车股份有限公司(以下简称“广汽埃安”)采用“合同能源管理”的模式,在园区内投运了大规模“光伏+储能”,并建成了园区的智能微电网系统。

二、实施方案

项目选址:项目充分利用园区冲压车间、焊装车间、总装车间及中试线车间的屋顶及南北片区的停车场空地,铺设分布式光伏发电系统并配套电化学储能,实现土地资源高效利用。



技术方案:项目总装机19兆瓦,光伏系统采用“分块发电、组串逆变、就近升压并网”的设计方案,将每个

光伏并网发电单元的电池组件采用串并联的方式组成多个太阳能电池阵列,再将太阳能电池阵列接入光伏组串式逆变器转换为低压交流电,最后经过箱式变压器就地升压为10千伏电压后并入工厂配电网,同时合理规划各区域装机容量的接入方案,确保整个系统所发电量最大程度被园区就地消纳。储能系统以磷酸铁电池为储能单元,由两个500千瓦时/1000千瓦功率型储能站构成,总容量达1000千瓦时,充放电功率为2000千瓦,具备快充快放特性。电化学储能系统有效减缓园区峰谷时段用电需求矛盾,提升了园区需求侧响应能力的同时,每年可削减最高用电负荷约1兆瓦。

项目的光伏系统建设大数据智能监控平台,一方面能够实时监控和管理分布式光伏发电系统的运行情况,及时发现并处理设备故障和异常,提前预警潜在问题,同时还能够对设备进行自动诊断和分析,提供准确的故障诊断结果,帮助快速定位和解决问题,提高运维效率;项目同时配套有标准光伏组串,通过引入标准光伏组串,实现了光伏组件清洁程度的自动化判断,将管理模式由粗放分散转变为精细集中,进一步确保了整个光伏系统的发电量。

商业模式:项目采用合同能源管理(EMC)的商业模式,由南网能源负责投资建设及运维,向广汽埃安提供8折光伏电价,并共享储能峰谷套利产生的10%收益,形成长期共赢合作机制。



三、综合效益

该项目自2019年初投运至2023年底，累计发电量已超8400万千瓦时，年均发电量近2000万千瓦时。其中95%以上的电力由园区企业就地消纳，使光伏成为园区主要的自给型清洁能源。

该项目实现了节能减排的综合效益。据广汽埃安新能源动力科工程师叶华彬介绍，园区每年可实现节约电费超过300万元，同时减少园区外购电量约15%，实现园区碳排放总量较国标基准值下降超18%，单位产值二氧化碳排放较基期降低20%以上。

四、经验与亮点

该项目有效解决了工业领域用电成本高和减排压力大的痛点，为工业园区提供了可复制的解决方案，对推动工业领域能源结构转型具有重要的示范意义。

更多信息

网址: <http://ny.csg.cn/>

联系方式: 南方电网 86-20-3812-2715

图 A1-1

广州智联新能源汽车产业园



图片来源: 广汽埃安

巴西圣卡塔琳娜联邦大学太阳能研究实验室BIPV项目

一、背景



项目背景：巴西圣卡塔琳娜联邦大学太阳能研究实验室由Ricardo Rüther教授于1997年创立，是巴西首个并网光伏系统，成为该国集光伏研究、教育和创新的国家级标杆机构。实验室致力于探索广泛的光伏应用，从建筑光伏一体化到具有实际社会影响力的项目开发。

参与单位：

业主/运营方：圣卡塔琳娜联邦大学

资金合作伙伴：巴西科技创新部、德国国际合作机构(GIZ)、比亚迪能源(BYD Energy)、巴西ENGIE能源公司(ENGIE Brasil Energia)、壳牌巴西公司(SHELL Brasil)

二、实施方案

项目选址：作为大学扩建计划的一部分，太阳能实验室总部的建设从一开始就将光伏能源作为核心设计元素。项目面临的挑战在于光伏解决方案需与建筑形态和功能融合，在提升能效的同时不影响原有建筑特色。实现这一平衡需要设计与工程团队的紧密协作，确保最终成果既能实现技术性能，又能保持视觉美感。

技术方案：实验室由三座主要建筑组成：A座和B座于2015年启用，最新建成的C座于2023年投入使用。三座建筑均配备多功能光伏屋顶。C座更进一步，采用两种光伏立面：包括作为垂直外墙的光伏组件和遮阳构件安装的光伏组件。除一体化光伏设施外，C座还设有专门的绿氢实验室。

A座的屋顶安装了270个多晶硅(p-Si)光伏组件，每个组件的峰值功率为245瓦，总峰值功率为66.15千瓦。这些组件固定在景观位置，与大楼的弧形屋顶融为一体，共15排，每排的倾斜度略有不同，以配合结构的形状。系统的三分之二朝北，其余三分之一水平安装或略微向南倾斜，倾斜度从北纬20度到南纬7度不等。该系统由三台20千瓦多串逆变器供电。

B座的屋顶安装了95个微晶(a-Si/ μ c-Si)光伏组件，每个峰值功率142瓦，峰值功率总计13.5千瓦。组件纵向安装，倾斜6°，朝北。该系统使用一个12千瓦的多串逆变器。

图 A1-2

巴西圣卡塔琳娜联邦大学建筑光伏一体化(BIPV)安装布局

A座



B座



C座



来源：Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil

C座有两个光伏屋顶，都使用了单晶硅组件。首套系统由120块模块组成，其中15块额定功率530峰瓦，15块额定功率535峰瓦，总装机容量达64千峰瓦。第二套屋顶系统由

135块模块组成,包括18块额定功率为525峰瓦的模块、18块额定功率为530峰瓦的模块和6个额定功率为535峰瓦的模块,总功率为70千峰瓦。两套系统均倾斜10°,朝向西经40°,每套系统均与一个75千瓦的三相逆变器相连。除了屋顶,C座还包括两个垂直的光伏外墙。第一个立面使用20个单晶硅(m-Si)模块,功率为455峰瓦,总功率为9千峰瓦,垂直安装(倾斜90°),朝向西130°。第二个立面有28块455峰瓦的模块,总功率为13千峰瓦,同样倾斜90°,但朝向为东经50°。每个立面都与两个6千瓦的三相逆变器相连。

商业模式:该光伏实验室的三座主要建筑共同构成了一个净正值能源综合体——其总发电量超过自身消耗量。通过净计量系统,剩余电力被送回电网,并转换成信用额度,帮助大学其他建筑供电。这种设置不仅降低了运营成本,还减少了碳足迹,彰显了大学对可持续发展的承诺。

三、综合效益

经济效益:建筑中集成光伏系统产生的电量超过了自身消耗量,剩余的电量通过净计量系统计入其他大学设施,从而降低了运营成本。在A座和B座,安装在夹芯板上的光伏组件可起到隔热作用,减少制冷需求,提高建筑物的整体能效。C座建筑采用光伏幕墙与遮阳装置,既优化了室内热舒适度与采光舒适度,又减少空调和人工照明的使用需求,使暖通空调系统更具性价比。此外,整个建筑群对太阳能技术的创新整合不仅创造了长期资产价值,更使其成为可持续设计的典范,从而实现持续的成本节约,并有望在未来获得与减碳相关的激励措施。

能源和环境效益:A、B两座建筑自2016年8月投入运行以来,已分别累计产生650兆瓦时和123兆瓦时的电量。C座于2023年8月开始运行,目前已发电196兆瓦时。三座建筑总发电总量达969兆瓦时,减少了对电网的依赖。其环境效益同样显著,若等量电力来自当地主要能源水力发电,系统运行减少了约125,970吨的二氧化碳排放,若与燃煤发电相比,预计减少872,100吨二氧化碳排放。

社会效益:作为光伏技术的示范项目,该太阳能实验室的三座光伏建筑既是开放式教室,又是实践型实验室,有助于向学生、专业人士和广大公众宣传可再生能源的实际效益。实验室的设计展示了如何将清洁能源和谐地融入建筑,为巴西和其他国家的可持续建筑实践提供了灵感。实验室通过国内外学术会议、行业展会及导览参观积极分享经验,为光伏传播做出了贡献。仅在2023年和2024年,这些建筑就接待了1500多名

参观者,其中包括研究人员、政策制定者、学生和行业专业人士。这种积极参与有助于提高人们对能源转型战略的认识,加强社区联系,并鼓励不同行业采用可再生能源解决方案。

四、经验与亮点

BIPV 设计

建筑A和建筑B的屋顶风格迥异,一个是弧形设计,另一个是平坦、略微倾斜的表面,但都面向正北方向,以获得最佳的太阳能捕获效果。这些屋顶由白色金属夹芯板制成,内填岩棉隔热材料,顶部安装光伏组件。这种组合不仅能产生清洁能源,还能隔热,降低制冷需求,提高能源效率。这些独特的屋顶设计还考虑到了美学因素,表明太阳能既可以是时尚的,也可以是实用的。

而建筑C则将这一理念发挥得更淋漓尽致。在这里,光伏组件本身就是屋顶,无需使用传统的屋顶材料。这些集成的光伏组件还为下面的混凝土结构起到了遮阳的作用,最大限度地减少了热量的吸收,进一步提高了节能效果。此外,C座的光伏屋顶是防水的,并配备了先进的排水系统,可以收集雨水。雨水从太阳能电池板表面流入排水沟,再由排水沟导入蓄水池。收集到的水有两个主要用途:冲洗厕所和生产绿色氢气。对于后者,水要经过过滤和反渗透,以达到电解所需的纯度,然后利用太阳能转化为氢气。C座的光伏外墙不仅能发电,垂直面板将一个半开放的礼堂围了起来,保护用户不受天气条件的影响,并创造了一个温度和光线都很舒适的空间。光伏遮阳设备安装在玻璃幕墙上,减少室内的太阳直接辐射。这种智能设计降低了对空调和人工照明的需求,在提高舒适度的同时节约了能源。

更多信息

网站: www.fotovoltaica.ufsc.br

联系人: Clarissa Debiazi Zomer

+55 48 991124416

clarissa.zomer@outlook.com

BIPV中心

网站: Website: www.solarchitecture.ch

联系人: Pierluigi Bonomo 博士,瑞士南部应用科学与艺术大学(SUPSI) BIPV创新建筑团队负责人
pierluigi.bonomo@supsi.ch

菲律宾宿务托莱多市Solaris农牧场项目

一、背景

项目背景：托莱多市位于菲律宾宿务省西部，是一个融合了农业、工业和沿海活动的地区。该市人均GDP相对较高，约为150,000菲律宾比索(2,800美元)，显示出经济增长的势头，为可再生能源和可持续农业等领域的进一步投资奠定了坚实基础。该地区属于热带气候，平均太阳辐照度为5.0-5.5千瓦时/平方米/天，非常适合太阳能光伏装置。托莱多市凭借得天独厚的太阳能资源禀赋，加之畜牧业(牛、山羊和水牛为主)为代表的农业优势，成为光伏加农业协同发展的理想示范区。

参与单位：该项目在规划和实施阶段整合了当地利益相关者，包括农民、牧民和社区领袖，确保其与该地区的需求保持一致并得到社会接受。社区的融入培养了主人翁意识，并确保了项目的长期可持续性。

二、实施方案

项目选址：该项目将113.79公顷牧场改造为光伏放牧一体化用地。太阳能与畜牧业的创新结合使牛、山羊和水牛能够在高架太阳能电池板下吃草，这些光伏组件最大限度减少对牧草生长的干扰，又保持草场生态品质。这种“一地两用”模式实现土地资源高效利用，使可持续能源生产和农业活动能够共存。

技术方案：项目光伏装机容量为59.96兆峰瓦，年发电量约7315万千瓦时，可满足约3万户家庭用电需求。在运营期间，太阳能光伏系统将电力直接输送至国家电网，为菲律宾的可再生能源装机容量做出贡献。与此同时，畜牧业仍可正常运作，保留了传统的农业实践以及太阳能发电的现代基础设施。高架太阳能电池阵列还增强了项目的抗灾韧性，抵御当地常见的台风等极端天气，为系统提供额外保护。

商业模式：该项目的总投资为8490万美元，采用70%债务融资与30%股本融资结构。土地租赁成本定为每兆瓦1,700美元，租金每五年上调12%。



三、综合效益

经济效益：该项目通过绿色能源拍卖计划(GEAP)向电网出售清洁能源，每年获得1299万美元收入，形成稳定长效收益。项目内部收益率达19.5%，投资回收期为9.9年，显示出强劲的财务可行性，为投资者及利益相关方提供可靠保障。同时，持续运营的畜牧业虽具体收益数据待定，但已构成额外收入来源。这种多元化收益模式能够有效降低农场对单一收入流的依赖，提升项目财务韧性。

能源和环境效益：光伏与畜牧业的结合每年可减少约5万吨二氧化碳排放，有效降低对化石燃料发电的依赖。这种“光伏加牧业”模式通过土地集约化利用，既防止土壤退化又保护自然资源，在缓解土地压力的同时促进农业可持续发展。项目设计充分考量生态影响，在维持当地生态系统与生物多样性的基础上，实现农业生产效率的最大化。

社会效益：该项目通过提升电网中可再生能源占比，有效改善了农村社区的能源可及性。光伏组件下持续进行的畜牧活动不仅提升了本地食物产量，更助力可持续农耕方式。农光互补模式在光伏系统安装、运维及牲畜放牧管理、照料等环节创造多元就业岗位，既保障民生，又为绿色经济培育所需技能人才。

四、经验与亮点

Solaris农牧场项目通过“一地多用”模式同步推动多项联合国可持续发展目标(SDGs)的实现，重点关注可负担清洁能源、体面工作与经济增长、零饥饿等领域。Solaris 农牧场项目是一个开创性的例子，展示了光伏和农业如何共生合作，以应对能源安全、气候适应力和经济发展等关键挑战。其财务表现、对可持续粮食生产的贡献以及积极的环境效益，成为菲律宾乃至全球未来“光伏+农业”项目的标杆典范。

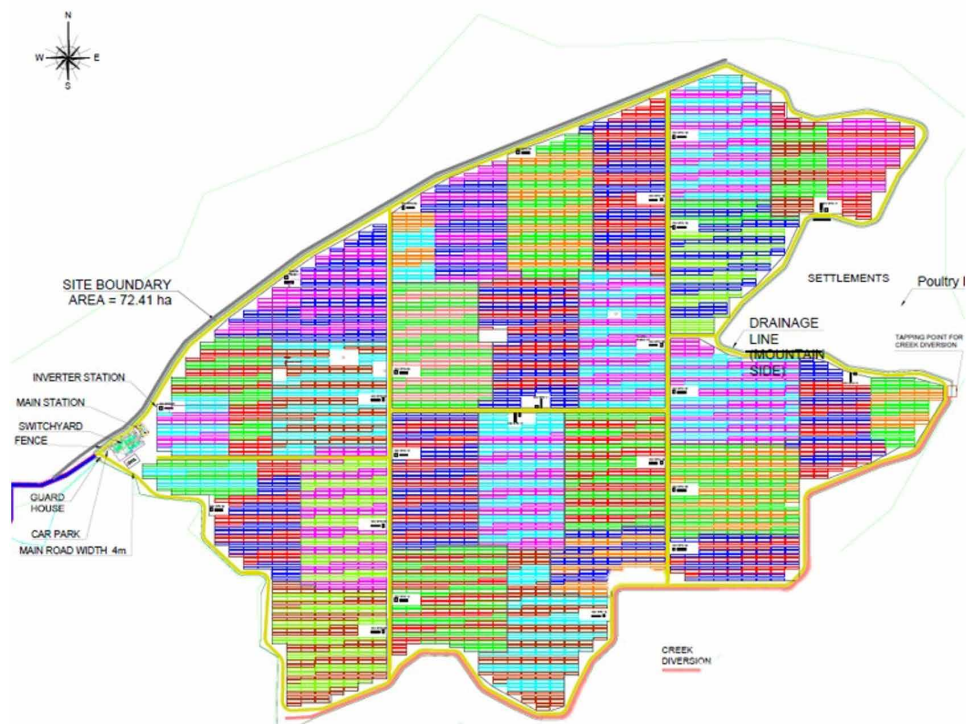
更多信息

网址: <https://www.sunasiaenergy.com/>

联系方式: Tetchi Capellan, CEO of SunAsia Energy

tccapellan@sunasiaenergy.com

图 A1-3
菲律宾SOLARIS农业光伏农场布局



来源: SunAsia Energy Inc.

新疆高速公路智能分布式光伏微网自治系统应用与示范项目¹¹¹

一、背景

项目背景:新疆当地沿线多为干旱荒漠区, 自然环境恶劣, 交通配套设施呈现"点多线长"特征, 加之电网支撑能力薄弱, 导致传统供电方式面临架设成本高、传输损耗大、运营维护费用高昂三重困境。为解决这一能源供需矛盾, 新疆交投集团在S21高速公路克拉美丽服务区和G3012吐和高速公路羊塔库都克服务区开展智能分布式光伏微网自治系统示范项目, 探索光伏与与交通基础设施耦合的"交能融合" 模式, 不仅解决了偏远服务区的供能难题, 更为交通行业低碳转型提供可复制的路径。



参与单位:新疆交通投资集团是新疆维吾尔自治区交通运输体系投资建设主力军, 依托其在公路网布局的固有优势, 结合管辖高速公路沿线薄弱电网条件, 积极探索"交通+能源"融合发展的创新模式。通过项目实施, 该集团验证了分布式光伏发电在交通场景应用的可行性, 彰显了其在绿色交通转型中的示范引领作用。

二、实施方案

项目选址:项目利用高速公路服务区、路侧边坡等基础设施, 采用智能分布式光伏微网技术, 分别在克拉美丽和羊塔库都克两个服务区进行建设。

技术方案:克拉美丽服务区自治能源系统主要由分布式光伏发电系统、储能系统、能量管理系统等组成, 采用直流母线系统, 建设分布式光伏600.6千峰瓦, 配置储能

图 A1-4a

克拉美丽服务区



来源:新疆交通投资集团

1200 千瓦时,使用550 峰瓦单晶硅组件,通过EMS(能量管理系统)实时跟踪服务区用电负荷,调节DC/DC变流器和PCS(储能变流器)输出功率,实现高效自发自用,避免余电倒送电网。羊塔克库都克服务区分布式光伏项目采用交流母线系统方案,建设分布式光伏554.4千峰瓦,配置储能1200千瓦时,系统具备并离网切换功能,优先满足服务区用电需求,余电为储能充电。

此外,项目打造了交能融合一体化智慧管理平台,可以实现能源网、交通网和数字网进行信息融合和智慧调控。其中分布式光伏微网系统一体化调控功能,可以对集团公司所属服务区全域的光伏、储能、用电负荷和电网进行统一协调控制,实现清洁能源灵活调度。

商业模式:项目采用"自发自用、余电不倒送"的用户侧并网模式。

三、综合效益

经测算,克拉美丽服务区绿色能源自治系统达到年均发电量71万千瓦时,相当于每年节省标准燃煤285吨,减排二氧化碳633吨。高速公路设施运行用能自治率 $\geq 30\%$,交通运行安全相关设施绿色能源自治保障率达到100%,风雨灾害或电网失效情况下,交通运营用能自治保障时间大于6小时。羊塔克库都克服务区分布式光伏系统运行9个多月以来,累计发电量为52万千瓦时,收益率达6.62%,解决了服务区供电功率和暖气供热不足等问题,每年可节省标准燃煤约291.8吨,减排二氧化碳约727.3吨。

图 A1-4b

羊塔克库都克服务区



四、经验与亮点

本项目针对广大无电网、弱电网区域的高速公路能源需求场景,实现了高速公路自治能源系统成套技术和装备的规模化应用,为沙漠腹地、戈壁荒滩、电网末梢、高温高寒等特殊环境条件下的高速公路智能化建设和服务多样化发展提供了可定制、可集成的示范案例,有效解决了特殊环境条件下的能源供给瓶颈问题。

更多信息

网址: <http://www.xjttztjt.com.cn:8001/home?menuId=16>

联系方式: 新疆交投xjtxmt@163.com

卢旺达Solar Market Hubs农村社区项目

一、背景

项目背景:根据2022年统计数据显示,卢旺达仅有17%的人口居住在城市地区,约60%的国民目前仍无法获得电力供应和主电网覆盖。农村地区面临严重的能源短缺,制约了经济发展和社区生活水平的提升。



参与单位:Kinvest基金会是一家社会企业,通过与农村社区领导者合作建立"太阳能市场中心",为商户提供配备光伏基础设施的专属经营场所。首个太阳能中心于2020年投入运营,目前已在尼亚加塔雷区建成5座总容量103千瓦峰值的枢纽,并计划于2025年新增两座。

二、实施方案

项目选址:通过与当地政府合作选择社区,优先考虑缺乏可靠供水的离网地区。通过市场调查,筛选出户数不少于500户的社区,并对现有企业进行评估,以确保经济效益与当地需求之间的平衡。

商业模式:这些太阳能中心配备市场摊位、培训区域及农产品加工设施,同时为冷藏仓储、碾米加工、焊接作业、木器制造等生产活动提供能源支持。该设施还通过太阳能钻井驱动管道供水网络,并设有电动汽车充电站以优化乡村物流体系。项目采用能源即服务模式,实行即用即付的计价机制,2024年度运营成本约2400万卢旺达法郎(RWF)。作为全额资助建设的100%太阳能微电网系统,中心在投入运营18个月内即可实现自给自足,后续通过持续发电收益不仅能永久覆盖运维成本,还可为新建项目提供资金支持。

技术方案:太阳能市场中心通过光伏屋顶为经社区评估选定的商户提供定制化计量供电服务。电力系统配备30千瓦时储能电池及8-20千瓦逆变器,既支持夜间运营,也能满足高能耗设备(如冷藏柜、制冷机、碾磨设备)的用电需求。此外,中心还配备了电线、断路器、电表、保安人员和能源供需预测远程监控系统,可实时预测能源供需情况,确保满足社区商户日益增长的用电需求。每个中心另设电动汽车专用充电站,配备大容量储能电池实现稳定电力输出。

图 A1-5a

太阳能供电车辆



图 A1-5b

太阳能供电培训区



图 A1-5c

卢旺达太阳能供电水井



来源:Kinvest Foundation

三、综合效益

经济效益:截至目前,项目营收已实现年度翻倍增长。从2023年的2500万卢旺达法郎(约合1.75万美元)跃升至2024年的5000万卢旺达法郎(约合3.5万美元),预计2025年将再次实现收入翻番。此外,通过太阳能冷藏和碾磨,农产品损失率降低50%。该公司正在进一步开发创收机会,通过利用储能容量与剩余发电量为外围种植户和灌溉网络供电。

能源和环境效益:五年来,Kinvest的发电量达到69.18万千瓦时,按照每千瓦时电力减排0.285千克二氧化碳计算,相当于减少197,168千克碳排放。此外,当前电动车队已实现7,200升化石燃料的替代使用。

社会效益:每个太阳能中心可容纳50余家商户,建设阶段创造75个就业岗位,并形成7-8个永久性运维岗位;中心内小微企业主平均雇佣至少1名全职员工。此外,还有7套光伏装置为井眼供电,3套为电动汽车供电,促进了焊接、木工和机械维修等新兴产业的发展。

四、经验与亮点

此类项目有助于卢旺达实现能源安全、电力普及、创造就业、农村供水和碳中和(2050年愿景)等国家战略目标。Kinvest与尼亚加塔雷大区签订了合作备忘录,以进一步推广这种模式,并得到当地政府的大力支持,同时还与 MeshPower 等本土合作伙伴密切合作,安装光伏设备及车队电动化改造工作。该模式可在面临类似挑战的其他区域复制推广,为离网社区通过光伏实现能源和经济转型提供了蓝图。

更多信息

网址:<https://kinvestimpact.com/>

联系人:Richard Loat,基金会顾问
richard@kinvestimpact.com

印度移动式太阳能冷藏库助力农民增收

一、背景

项目背景:印度是水果、蔬菜和易腐农产品的最大生产国之一,但由于储存基础设施不足,总产量的30%至40%遭到损失。农村地区的个体农户缺乏可负担得起的冷藏设施,这迫使他们不得不以低廉的市场价格出售农产品。



参与单位:为了应对这些挑战,能源和资源研究所(TERI)在努马利加尔炼油厂有限公司(NRL)的支持下,在印度阿萨姆邦的农村农业社区实施了便携式光伏冷库(SCS)装置。

二、实施方案

项目选址:光伏冷库设施采用模块化设计,可直接部署在村庄的空地上,无需占用大片土地。

商业模式:冷库通过合作社模式运营,农民只需支付象征性的租金,确保长期可持续性。

技术方案:光伏冷藏设备提供了一种经济实惠、可持续的制冷解决方案,使农户能够储存易腐农产品,并以更好的市场价格出售。

技术:采用5千峰瓦太阳能光伏系统,确保全天候运行,阴天时可提供30小时的备用时间。

存储容量:单机储存量5吨,适合存储蔬菜、水果和鲜花。

混合运行:可在需要时切换到电网或备用发电机,确保可靠性。

温度控制和监测:配备基于移动应用程序的控制系统,允许农民远程管理储存条件。

可持续设计:结合地下水回灌系统,确保全流程生态化运营。

三、综合效益

经济效益:该系统通过农产品储存消除被动抛售现象,使农民能够在市场价格达到峰值时进行销售,从而实现最佳价格变现,实现收益最大化。

能源和环境效益:无需依赖柴油或电网,降低了运营成本和碳排放量。

社会效益:通过提供可靠仓储设施赋能小型农户、女性创业者及农业合作社,构建包容性农业发展生态。

四、经验与亮点

此类太阳能冷藏设备已在印度阿萨姆邦农村地区成功落地,通过及农业群体持续释放长效经济与社会效益。

更多信息

网址:<https://www.teriin.org/>

联系人: Alekhya Dutta, TERI电力和燃料部,
alekhya.datta@teri.res.in

图 A1-6

印度阿萨姆邦的便携式太阳能冷藏设施



来源:The Energy and Resources Institute

沙特阿拉伯朱拜勒3A光伏海水淡化项目

一、背景

项目背景:作为著名的“沙漠奇迹之国”,沙特阿拉伯70%的饮用水都来自海水淡化,由此产生的巨大能耗与绿色发展相悖,发展清洁能源成为当务之急。朱拜勒3A海水淡化项目采用光伏+海水淡化模式,不仅解决了水资源短缺的紧迫问题,还实现了能源转型、环境保护与经济的多重目标,为全球干旱地区提供了可复制可持续发展范例。

参与单位:沙特国际电力和水务公司 (ACWA Power) 负责该海水淡化厂的设计、建造、调试、运营和维护,以及配套饮用水储罐及电气专用设施。项目设计-采购-施工 (EPC) 由中国电建集团山东电



力建设第三工程有限公司 (SEPCOIII) 和西班牙Abengoa公司联合完成。该项目是沙特首个将太阳能作为补充能源的大型综合海水淡化项目。

二、实施方案

项目选址:项目位于沙特阿拉伯东部地区朱拜勒市工业园区内,毗邻阿拉伯海湾,项目所在地点距离朱拜勒市区约15公里、距离达曼市法德国王机场约65公里,占地58公顷。

技术方案:该项目是沙特首个采用光伏发电作为补充电源的大型项目。PV装机总容量为45.56兆峰瓦, PV系统组成为光伏组件68002块,组串式逆变器142台,箱变7台,并配有SCADA系统一套,气象站3组并配套自动清扫机器人。逆变器交流侧输出为800伏,通过就地箱变升压至

33千伏接入水厂33千伏开关柜。该项目属于完全独立水厂，光伏发电用于水厂侧产水，不并于沙特公共电网。在主电网故障的情况下可以确保海水淡化保护设备的稳定运行，避免主设备损坏，保证了水厂设备的安全。

商业模式：项目由ACWA Power牵头，联合海湾投资公司（GIC）及阿尔巴瓦尼水电公司（AWP），与沙特水务合作公司（SWPC）签署了为期25年的购水协议。

三、综合效益

经济效益：光伏发电的低成本特性直接降低海水淡化厂的电力消耗费用。同时，缓解沙特因能源需求增长导致的石油出口压力，间接提升经济收益。

能源与环境效益：项目采用“光伏+海水淡化”模式，契合沙特“2030愿景”中发展清洁能源的战略方向，助力沙特国家能源结构向低碳化转型。光伏发电可满足水厂每日10%-20%的能耗需求，替代传统化石能源供电，每年可减少6万吨碳排放，有效支持沙特碳中和目标。

社会效益：项目日产水量达60万吨，可为300万人提供饮用水，是达曼和利雅得重要的水源之一。沙特水务合作公司首席执行官哈立德·阿尔·库雷希表示，“项目对沙特水务行业具有重大战略意义——它不仅配备储水设施和厂内自备光伏电站以减轻国家电网负担，还将通过向利雅得、卡西姆及东部三省供应急需的饮用水，成为缓解区域用水需求增长的关键基础设施。”

四、经验与亮点

项目是沙特首个采用反渗透技术结合光伏发电的综合海水淡化项目，成为全球同类项目的标杆，推动了光伏技术与海水淡化工艺的深度融合。

更多信息

网址: <https://www.acwapower.com>

<http://sepco3.powerchina.cn/>

联系方式: 山东电建3A项目经理刘成威,
office@sepco3.com

图 A1-7

沙特阿拉伯朱拜勒3A光伏海水淡化项目



来源: 山东电建三公司

附录II 不同供电方案的成本估算

我们对肯尼亚农村地区三种供电方案在为100户家庭（年用电量约10万千瓦时）提供电力服务下的建设与长期用电成本进行了估算。三种情景包括：

1. 建设一条100公里的输电线路接入国家电网。
2. 建设太阳能发电站，包括两种子方案：
 - ◆ 具备储能的连续可靠供电方案；
 - ◆ 不具备完整储能能力的可中断供电方案。
3. 使用柴油发电机提供全天候电力，涵盖燃油与维护成本。

本分析假设使用寿命超过20年，柴油价格为每升1.3美元，年通胀率为3%。

方案1：延伸国家电网 (建设100公里高压输电线路)

若需从主干电网向距离约100公里的偏远村庄供电，需铺设约100公里的高压输电线路，并在村内安装配电变压器及低压配电网络，以实现100户家庭的供电连接。高压输电线路的建设成本较高，平均每公里约为8,000至10,000美元，若地形复杂，最高可达每公里22,000美元。据此估算，仅输电线路的投资成本介于80万至100万美元之间。加上村内配电网络与用户接入（每户数百美元），¹¹⁴总初始建设成本预计在100万至120万美元之间。

建成后，电力由国家电网提供。100户家庭年用电总量约为10万千瓦时，按肯尼亚农村电价0.18美元/千瓦时计算，第一年电费约为18,000美元。尽管输电系统运维成本相对较低，但仍需考虑巡检、线路损耗及维修等费用，按年均投资额的1%估算，年运维费用约为10,000美元，并随通胀每年增长约3%。

在20年期内，按3%年通胀调整后，累计电费支出约为48万美元；运维支出累计约为27万美元。连同初始投资，20年总成本约为175万美元。

假设20年总供电量为200万千瓦时，则该方案的平准化度电成本(LCOE)约为每千瓦时0.80至0.90美元。

方案2A：离网太阳能发电站 + 储能系统 (全天候供电)

为实现连续稳定的供电，需要建设具备足够发电能力的太阳能系统，并配备大规模电池储能，以满足夜间及阴雨天气的用电需求。根据年用电量10万千瓦时的设定，估算所需太阳能装机容量为60–80千瓦（留有冗余）。以肯尼亚良好的太阳能资源（每日约5小时等效日照）为基础，70千瓦的太阳能阵列可在晴天发电约350千瓦，足以覆盖日均274千瓦时的用电量并为电池充电。

在储能方面，预计需配备200–300千瓦时的电池容量，以支撑夜间用电及1–2天的阴天需求。锂电池的典型寿命为10年，项目周期内至少需要更换一次。

初始建设成本：

目前太阳能组件与逆变器的价格约为1,000美元/千瓦，建设70千瓦系统约需70,000美元。电池储能成本约为300美元/千瓦时，250千瓦时储能系统约需75,000美元。加上逆变器及控制系统（数千美元）以及配电线路、安装、集成等费用，初始总投资预计为20万至30万美元。本分析以中值25万美元为基准估算。

运维与设备更换成本：

太阳能组件寿命超过20年，性能衰减较小，日常维护（清洁和巡检）成本较低，约为初始投资的1%（约2,000美元/年），并随通胀逐年增长。电池预计在第10年更换一次，更换费用约为10万美元（考虑3%年通胀）。逆变器等电力电子设备也可能需在10年左右进行大修或更换。

20年累计运维成本估算约为5万美元，加上电池更换及其他费用，20年总成本为约35万至45万美元。

假设20年累计发电量为200万千瓦时，则该“太阳能+储能”方案的LCOE约为每千瓦时0.15–0.25美元。

方案2B:离网太阳能发电站(仅白天供电)

若用户可接受夜间或阴天时段的断电,则无需配置电池储能,系统可完全依赖白天所产生的太阳能供电。为满足年用电量10万千瓦时(主要集中在白天),预计需安装50-60千瓦的太阳能装机容量。晴天条件下,此系统每日可发电约274千瓦时,恰好匹配日均用电需求。

初始建设成本:

总投资预计约为10万美元,其中约6万美元用于建设60千瓦的太阳能阵列,约4万美元用于逆变器和配电设备。由于不需储能系统,前期投资明显低于全天候供电方案。

运维与设备更换成本:

太阳能组件的日常维护需求低,每年成本约为总投资的1%(即1,000美元)。逆变器预计在第10年需更换一次,更换费用约为1万美元。20年期内运维与设备更换总成本约为3万美元。

20年总成本:

将初始建设费用与长期运维支出相加,20年总成本约为13万美元。

假设20年累计发电量为200万千瓦时,则该“仅白天供电”的太阳能方案的LCOE预计为每千瓦时0.06-0.08美元。

方案3:柴油发电系统(全天候供电)

为满足100户家庭的用电需求,需建设具备足够总装机容量的柴油发电系统。为应对峰值负荷并具备冗余保障,可配置两台柴油发电机(例如每台功率50千瓦),实现轮换或备用运行。柴油发电机的初始投资相对较低,约为每千瓦300-500美元。以总装机容量50千瓦计算,初始投资预计为2万至3万美元,涵盖发电机组、配电系统和安装费用。

燃料成本:

燃料是柴油发电的主要成本。小型柴油机通常每发1千瓦时电约消耗0.4升柴油¹¹⁵。年发电量为10万千瓦时,需柴油约4万升。按每升1.3美元计算,首年燃料成本约为52,000美元。考虑到通胀和国际油价波动,按每年增长3%估算,20年累计燃料成本将达到约120万至140万美元(名义值)。

运维与设备更换成本:

系统需定期维护,包括更换机油和滤芯,年均维护费用约为5,000美元。在长期运行中,发电机通常每5至10年需大修或更换一次。预计在20年期内需更换一次主要设备,费用约为20,000美元。

20年总成本:

包括燃料、运维和设备更换,柴油发电系统20年总成本约为130万至150万美元,其中燃料支出占据主导。

假设20年累计发电量为200万千瓦时,则柴油发电方案的LCOE约为每千瓦时0.60-0.80美元。

参考文献

巴西光伏太阳能协会 (2025),《巴西太阳能光伏能源》信息图,巴西太阳能光伏能源协会, <https://www.absolar.org.br/en/market/infographic/>

Adam, A. G., Cikara, A. M., Kayuza, H., Wabineno, L. M., & Potel, J. (2020),《东非的土地治理安排:描述与比较》,载于《非洲土地政策与地理空间科学期刊》

Ballagh, A., & Weatherby, C. (2024年5月20日),《越南的农光互补发展》,斯廷森中心, <https://www.stimson.org/2024/agrivoltaics-in-vietnam>

“一带一路”国际绿色发展联盟. (2024). “一带一路”框架下非洲主要国家可再生能源投资合作的机遇与挑战. <https://www.greenbr.org.cn/cmsfiles/1/titlepic/26be17cc-5f37-4f5d-9804-2626f385ab4c.pdf>

彭博新能源财经. (2022年11月9日). 非洲清洁能源投资未见疫情后的复苏. 彭博新能源财经. <https://about.bnef.com/blog/africa-clean-energy-investment-sees-no-post-pandemic-rebound>

彭博新能源财经 (Bloomberg NEF) (2024),《Climatescope 2024: 新兴市场能源现状年鉴》, <https://www.global-climatescope.org/downloads/climatescope-emerging-markets-power-factbook-2024.pdf>

蔡思浩. (2024年1月11日). 通往零碳之路: 中国南方电网近零碳示范区探访. 中国碳交易网. <http://www.tanjiaoyi.com/article-61733-1.html>

中国新闻网 (2021年1月25日),《2020年光伏新增装机48.2GW》, <https://www.chinanews.com/sh/2021/01-25/9395839.shtml>

中国光伏行业协会 & 赛迪智库集成电路研究所 (2024),《2023-2024年度光伏融合应用项目典型案例汇编》

Cinderby, S., Parkhill, K. A., Langford, S., & Muhoza, C. (2024),《在农业中利用太阳能: 东非农光互补系统成功推广路径》,载于《能源研究与社会科学》,第116卷, 103657.

Citicore Energy REIT Corp. (CREIT). (2025). CREIT 宣布每股派发 0.055 菲律宾比索现金股息. <https://www.creit.com.ph/press-room/press-releases/creit-declares-php-0-055-cash-dividend-per-share>

中国光伏行业协会 (CPIA) (2023),《中国光伏产业发展路线图 (2022-2023)》, https://www.chinapv.org.cn/Industry/resource_1380.html

中国光伏行业协会 (CPIA) (2024a),《2023-2024年度中国光伏产业年度报告》,北京

中国光伏行业协会 (CPIA) (2024b),《2023-2024“光储融合”项目应用典型案例集》,北京

中国光伏行业协会 (CPIA) (2025),《2024-2025年度中国光伏产业年度报告》,北京

中国光伏行业协会 (CPIA) (2025),《中国光伏产业发展路线图 (2025)》,北京, https://www.chinapv.org.cn/industry/resource_1405.html

中国可再生能源学会光伏专业委员会 (CPVS) (2025), 《2025年度中国光伏技术发展报告》, https://www.cres.org.cn/xwzx/xhdt/art/2025/art_1070191816.html

Darrow, H. (2023年7月5日). 漂浮式光伏成为东南亚清洁能源未来的有前景解决方案. 美国国家可再生能源实验室 (NREL). <https://www.nrel.gov/news/detail/program/2023/floating-photovoltaics-emerge-as-a-promising-solution-for-southeast-asias-clean-energy-future>

南非矿产资源与能源部(2023年12月).《综合资源规划》, 南非矿产资源与能源部, https://www.dmre.gov.za/Portals/0/Energy_Website/IRP/2023/IRP-2023-for-Public-Comments-User-friendly.pdf

《Energetica India》(2024年10月23日).《PM-KUSUM项目完成42%的太阳能水泵安装目标》. <https://www.energetica-india.net/news/-pm-kusum-achieves-42-percent-solar-pump-installation-target>

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025). 2034 年能源扩展十年规划. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>

世界银行能源部门管理援助计划 (ESMAP); 全球电气化平台; Dalberg分析 (2024).《2024年离网太阳能市场趋势报告》, <https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/2024-Off-Grid-Solar-Market-Trends-Report.pdf>

Ganesh, S. (2016年1月27日).《印度IT办公楼的太阳能电力: 成本效益与附加优势评估》.Academia.edu, https://www.academia.edu/22755928/Solar_power_for_IT_office_buildings_in_India_Evaluating_cost_benefits_and_ancillary_advantages

比尔及梅琳达·盖茨基金会 (2022年11月)《帮助非洲与亚洲农民应对气候变化》.

<https://www.gatesfoundation.org/ideas/media-center/press-releases/2022/11/helping-african-and-asian-farmers-with-climate-change-adaptation>

全球环境研究院、山西协同能源与环境创新研究院 (2022), 《中国“光伏+”案例分析报告》.

全球太阳能理事会 (Global Solar Council [GSC]) 与欧洲太阳能协会 (Solar Power Europe [SPE]) (2024年5月), 《2024年全球太阳能光伏市场展望》. <https://static.poder360.com.br/2024/06/relatorio-perspectiva-global-potencia-solar-2024-2028.pdf>

全球太阳能理事会 (GSC)、欧洲太阳能协会 (SPE). (2025年5月6日).《2025–2029年全球太阳能市场展望》. <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2025-2029/detail>

全球太阳能理事会 (GSC). (2024年11月8日).《全球太阳能理事会宣布光伏装机容量突破2太瓦里程碑》. <https://www.globalsolarcouncil.org/news/global-solar-council-announces-2-terawatt-milestone-achieved-for-solar/>

顾佰和; 于东晖; 李樱 (2023).《东南亚电力行业低碳转型的国际合作现状与建议》.载于《环境保护》, 第51卷第13期, 第52–57页. <https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2023.13.009>

黄赋斌、李文静、帅传敏 (2022).《光伏扶贫政策对乡村振兴的影响》. 载于《资源科学》, 第44卷第1期, 2022年1月.

Hunt, J. D., Stilpen, D., & de Freitas, M. A. V. (2018).《巴西电力供应危机的成因、影响与解决方案综述》.可再生与可持续能源评论 <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15163/1/A%20Review%20of%20the%20Causes%2C%20Impacts%20and%20Solutions%20for%20Electricity%20Supply%20Crisis%20in%20Brazil%20%28Final%29.pdf>

清华大学碳中和研究院 (ICON) (2024).《2024年全球碳中和年度进展报告》. https://www.icon.tsinghua.edu.cn/_local/5/AC/99/278BC9259FBD3D1A9A59AE1ADB7_1F00B863_178308D.pdf

国际能源署 (IEA)、国际可再生能源署 (IRENA)、联合国统计司 (UNSD)、世界银行 (World Bank)、世界卫生组织 (WHO) (2024).《可持续发展目标7追踪报告: 能源进展报告》.世界银行, 华盛顿特区. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jun/IRENA_Tracking_SDG7_energy_progress_2024.pdf

国际能源署 (IEA). (2022).《全球太阳能光伏供应链》.

国际能源署 (IEA) (2023a).《2023年拉丁美洲能源展望》.巴黎. <https://www.iea.org/reports/latin-america-energy-outlook-2023> PDF版本: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1055131a-8dc4-488b-9e9e-7eb4f72bf7ad/LatinAmericaEnergyOutlook.pdf>

国际能源署 (IEA) (2023b).《在新兴与发展中经济体扩大清洁能源私人融资》. <https://www.iea.org/reports/scaling-up-private-finance-for-clean-energy>

国际能源署 (IEA) (2023c).《全球净零排放路线图:实现1.5°C目标的全球路径(Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach)》. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>

国际能源署 (IEA) (2024a).《2024年东南亚能源展望》.巴黎. <https://www.iea.org/reports/southeast-asia-energy-outlook-2024> PDF版本: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac357b64-0020-421c-98d7-f5c468dadb0f/SoutheastAsiaEnergyOutlook2024.pdf>

国际能源署 (IEA) (2024b).《2024年世界能源展望》.巴黎. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> PDF版本: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>

国际能源署 (IEA) (2024c).《非洲清洁能源投资与发展》.巴黎. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-investment-for-development-in-africa> PDF版本: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/aeadbc3e-5020-4c83-bcfe-6a00d1aca49c/CleanenergyinvestmentfordevelopmentinAfrica.pdf>

国际能源署 (IEA) (2024d).《电池与能源安全转型》. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bf-d2b3-446d-8c35-aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf>

国际劳工组织 (ILO). (2019).《绿色未来所需技能:全球视角》.日内瓦:国际劳工局. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_emp/documents/publication/wcms_732214.pdf

能源经济与金融分析研究所. (2023).《商业模式创新推动菲律宾能源转型》. <https://ieefa.org/resources/business-model-innovations-drive-philippines-energy-transition>

印尼基础服务改革研究所 (IESR). (2021).《超越443GW:印度尼西亚无限的可再生能源潜力》. <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2021/10/IESR-Beyond-443-GW-Indonesias-Infinite-Renewable-Energy-Potentials.pdf>

印尼基础服务改革研究所 (IESR). (2025).《2025年印尼太阳能发展展望》. <https://iesr.or.id/en/pustaka/indonesia-solar-energy-outlook-2025/>

国际人权与商业研究所 (Institute for Human Rights and Business, IHRB) (2024).《重新分配摩洛哥燃料补贴以加速可再生能源发展》.公正故事平台 (Just Stories). <https://www.just-stories.org/database/reallocating-moroccos-fuel-subsidies-for-renewable-energy-acceleration>

国际金融公司 (International Finance Corporation, IFC)、世界银行集团 (World Bank Group) (2024).《新兴市场绿色债券报告2023:新兴市场绿色债券发行量增长34%》. <https://www.ifc.org/en/pressroom/2024/emerging-market-green-bonds-report-2023-green-bonds-issuance-in-emerging-markets-increased-34-in-2023>

国际可再生能源署 (IRENA). (2016).《可再生能源的经济效益:量化经济影响》.阿布扎比. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Measuring-the-Economics_2016.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2016b).《释放可再生能源投资潜力:风险缓释与结构性融资的作用》.阿布扎比. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Risk_Mitigation_and_Structured_Finance_2016.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2023a).《2022年可再生能源发电成本》. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2023b).《能源转型的社会经济影响:东南亚篇》.阿布扎比. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Socioeconomic-footprint_energy_transition_SE_Asia_2023.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2024a). 《2024年可再生能源统计数据》. 阿布扎比. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2024b). 《2023年可再生能源发电成本》. 阿布扎比. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2024c). 《2024年世界能源转型展望：1.5°C路径》. 阿布扎比. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2024d). 《撒哈拉以南非洲：可再生能源部署的政策与融资》. 阿布扎比. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_SS_Africa_policies_finance_RE_2024.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2024e). 《分布式光伏的性别视角》. 阿布扎比. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Decentralised_solar_PV_Gender_perspective_2024.pdf

国际可再生能源署 (IRENA). (2025). 《2025年可再生能源统计数据》. 阿布扎比. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf

国际可再生能源署 (IRENA)、国际劳工组织 (ILO). (2024). 《可再生能源与就业：2024年度回顾》. 阿布扎比、日内瓦. https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2024.pdf

国际太阳能联盟 (ISA). (2023). 《2023年全球太阳能投资报告》. <https://isolaralliance.org/uploads/docs/1885d3247cb1a2c5c86d9bf1599a66.pdf>

肯尼亚银行家协会 (KBA). (2015). 《案例研究：为未接触银行服务人群提供绿色金融创新产品——CBA银行与M-KOPA的合作案例》. <https://sfi.kba.co.ke/uploads/case-studies/pdf/mkopa.pdf>

李泓霖. (2023年9月22日). 《降本增效成效显著，为光伏电站智能运维打开空间》. 中国经营网 (China Business Network). <https://www.yicai.com/news/101864762.html>

李俊峰. (2013). 《中国战略性新兴产业研发：太阳能篇》. 北京：机械工业出版社.

Lou, J., Hultman, N., Patwardhan, A., & Qiu, Y. L. (2022). 量化碳项目协同效益与市场影响，推动可持续性融入气候融资考量. 《自然·通讯 - 地球与环境》，3 (1):137.

Lucidity Insights. (2024). 《M-KOPA 在非洲扩张中营收有望突破4亿美元》. <https://lucidityinsights.com/news/mkopa-eyes-400m-revenue>

罗毓. (2022年7月12日). 《送给非洲兄弟的礼物：中国援建光伏电站缓解中非共和国电力短缺》. 新华社. <https://obor.nea.gov.cn/pictureDetails.html?id=3107>

中华人民共和国生态环境部. (2024). 《2024-2025年节能降碳行动方案》. 中国.

印尼能源与矿产资源部、印尼国家电力公司. (2025). 《电力供应业务规划》. <https://web.pln.co.id/stakeholder/ruptl>

中华人民共和国外交部 (Ministry of Foreign Affairs of China). (2024年7月11日). 《中国常驻联合国代表傅聪大使在“加速全球能源转型与互联互通促进可持续发展目标实现”边会上的讲话》. 外交之声 (Voice of Diplomacy). https://www.mfa.gov.cn/zwbdt/673032/wjzs/202407/t20240711_11452099.shtml

M-KOPA公司. (2019). 《通过能源获取为服务不足人群开启金融之路》. <https://efficiencyforaccess.org/wp-content/uploads/M-KOPA-pay-as-you-go-models.pdf>

国家能源局. 《光伏扶贫：完成全部建设任务，扶贫成效广泛认可》. https://www.nea.gov.cn/2020-10/30/c_139478911.htm

国家能源局 (National Energy Administration, NEA). (2025年1月27日). 《2024年可再生能源并网与运行》. 国家能源局. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>

能环宝. (2024年5月31日).《中国2024–2025年节能减碳行动计划》. <https://solar.ofweek.com/2024-05/ART-260003-8480-30636524.html>

美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL). (2025).《最佳研究电池效率图表》. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

PV Tech. (2023年9月15日).《青海完成中国首条光伏组件回收试点线, 实现92.23%综合回收率》. <https://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2426711.shtml>

可再生能源杂志 (Renewable Energy Magazine). (2024年3月19日).《COP28提出的可再生能源容量扩大三倍目标只有在全球紧急纠偏下才可实现》. <https://www.renewableenergymagazine.com/panorama/cop28-goal-of-tripling-renewables-feasible-only-20240319>

《可再生能源世界》杂志 (Renewable Energy World). (2003年3–4月).《2002年光伏制造业激增》. 可再生能源世界, 6(2), 12.

Randle-Boggis, R. J., Barron-Gafford, G. A., Kimaro, A. A., Lamanna, C., Macharia, C., Maro, J., Mbele, A., & Hartley, S. E. (2025).《双重收获阳光: 东非农光互补中的能源、粮食与水资源协同效益》. 可再生与可持续能源评论, 208:115066.

Rao, N. D. (2013).《更好的电力供应是否提高了印度家庭企业的收入?》. 能源政策, 57:532–541. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.025>

国务院新闻办公室 (State Council Information Office). (2024年6月20日).《推进高质量发展系列新闻发布会 (国家能源局)》. https://www.nea.gov.cn/2024-06/20/c_1310779045.htm

Stern, N. (2008).《气候变化经济学》. 美国经济评论, 98(2):1–37. <https://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>

瑞典环境研究院 (Swedish Environmental Research Institute, IVL). (2023).《企业可持续发展的引擎: 全生命周期的新视角》. <https://mp.weixin.qq.com/s/YTnmlnU6vvJ3OGmUjQwQtw>

欧洲太阳能协会 (SPE). (2024).《2024–2028年全球太阳能市场展望》. <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2024-2028>

Tao, J. Y., & Finenko, A. (2016).《超越LCOE: 不同融资方式对小岛屿国家光伏项目收益性的影响》. 能源政策, 94:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.018>

联合国 (UN). (2024).《2024年可持续发展目标报告》. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>

联合国环境规划署 (UNEP). (2023).《2023年排放差距报告》. 内罗毕. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

联合国环境规划署 (UNEP). (2024).《2024年排放差距报告》. 内罗毕. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>

联合国气候变化框架公约秘书处 (UNFCCC). (2023).《2023年国家自主贡献汇总报告》. <https://unfccc.int/ndc-synthesis-report-2023#Means-of-implementation>

王哲. (2025年5月5日).《“百万千瓦屋顶分布式光伏”建设行动, 打造绿色能源转型“重庆模式”》. 人民日报. http://paper.people.com.cn/zgnyb/pad/content/202505/05/content_30072194.html

Wolf, M. (1976).《太阳能电池的历史发展》. 收录于 C. E. Backus (编), 《太阳能电池》. 纽约: IEEE出版社.

伍德麦肯兹公司 (Wood, Mackenzie). (2023).《太阳能贸易与关税报告》. <https://www.woodmac.com>

世界银行集团 (World Bank Group). (2020).《各国光伏发电潜力评估》. 世界银行. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/466331592817725242/pdf/Global-Photovoltaic-Power-Potential-by-Country.pdf>

世界银行集团. (2025).《电力可及率 (占人口百分比)》. 世界银行. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>

世界资源研究所 (World Resources Institute, WRI) . (2023a 年11月9日).《可再生能源助力带路国家绿色发展:深化带路对接与合作,加速非洲可再生能源发展》. <https://wri.org.cn/insights/Review-of-the-Renewable-Energy-Supporting-Belt-and-Road-Initiative-Countries-Green-Development-Series-Salon-3>

世界资源研究所 (WRI) . (2023b年10月20日).《可再生能源推动“一带一路”国家绿色发展,促进公正能源转型》. <https://wri.org.cn/insights/Review-of-the-Renewable-Energy-Supporting-Belt-and-Road-Initiative-Countries-Green-Development-Series-Salon-2-02>杨永明. (2024).《“一带一路”绿色能源合作报告》. 中国电力新闻网 (China Power News Network). https://www.cpnw.com.cn/news/xwtt/202410/t20241023_1745412.html

张晶、杨旭、王哲、刘远、刘翔、丁一. (2023).《基于时间序列遥感数据的1990–2020年东南亚陆基水产养殖区分布及其时空变化研究》.应用地球观测与地理信息国际期刊, 103518.

张锐. (2022).《非洲能源转型的内涵、进展与挑战》. [PDF]. https://xyfz.ajcass.com/UploadFile/Issue/202111080001/2022/2//20220210103404WU_FILE_0.pdf

张万德. (2023年5月22日).《新疆首个高速公路“双储能”自洽光伏供电系统将于5月底试运行》. 天山网. https://www.ts.cn/xwzx/jjxw/202305/t20230522_13621774.shtml

中关村储能产业技术联盟、自然资源保护委员会 (Natural Resources Defense Council, NRDC) . (2023年8月).《双碳目标下电源侧储能综合价值及政策研究评估》.

Zhu, Y., Tian, D., & Yan, F. (2020).《熵权法在决策中的有效性》. 工程中的数学问题 (Mathematical Problems in Engineering), 2020(1), 3564835. <https://doi.org/10.1155/2020/3564835>

尾注

1. 关于“光伏加”的引号使用。光伏加为本文专有名词，指代光伏匹配特定行业/场景供电需求的应用模式。当泛指所有应用场景时使用引号；当明确具体应用场景，如光伏加农业、光伏加渔业时，不使用引号。
2. 全球太阳能理事会(GSC)、欧洲太阳能协会(SPE), 2025
3. 国际可再生能源署(IRENA), 2025
4. 《经济学人》、《太阳能时代的黎明》，2024
5. 国际可再生能源署(IRENA), 2024b
6. 中国新闻网(China News Service), 2021
7. 世界银行(World Bank), 2022
8. 微型太阳能手持设备包括照明、背包等终端设备
9. 联合国气候变化框架公约秘书处(UNFCCC), 2023
10. 根据国际能源署(IEA)2024年发布报告的研究结果，光伏发电结合电池储能的模式在印度已具备与新建燃煤电站竞争的成本优势，并有望在未来几年内逐步具备与中国新建燃煤电站以及美国新建燃气电站竞争的能力。这一趋势使得独立电池储能系统在经济性上开始具备与天然气调峰电站竞争的潜力，而光伏与储能系统的组合则成为当前最具竞争力的新型电力来源之一。引用：国际能源署(IEA), 2024d
11. 女性在可再生能源，特别是离网技术的推广过程中，能够发挥关键作用。这类技术（例如支持创业的太阳能光伏系统）在服务不足和偏远地区的广泛应用，有助于女性获取就业机会并创造收入来源。然而，除性别外，目前多数国家在劳动力多样性指标方面的信息仍极为有限。
12. 可再生能源杂志, 2024
13. 彭博新能源财经(2022年11月9日),《非洲清洁能源投资未现疫情后的反弹》, <https://about.bnef.com/blog/africa-clean-energy-investment-sees-no-post-pandemic-rebound/> (访问日期:2024年5月10日)
14. “一带一路”绿色发展国际联盟, 2024
15. Zhang, R., 2022
16. 国际能源署、国际可再生能源署、联合国统计局、世界银行、世界卫生组织(IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO), 2024
17. 联合国(UN), 2024
18. 此处减排量依据光伏与火电的碳强度差值计算得出，光伏间接排放按20-50克二氧化碳/千瓦时(UNEP, 2023)计，煤电和气电的碳排放强度按820克和410-650克二氧化碳/千瓦时(UNFCCC, 2023)计。
19. 联合国环境规划署(UNEP), 2023
20. 国际可再生能源署(IRENA), 2024a

21. 国际能源署(IEA), 2024b
22. 国际能源署(IEA), 2023a
23. 根据中国国家能源局发布的信息, 2024年7月, 中国风电光伏总装机容量达到12.06亿千瓦, 提前完成“十四五”目标。
24. 印度尼西亚能源与矿产资源部(ESDM), 2025
25. 国际能源署(IEA), 2021
26. 顾佰和;于东晖;李樱等, 2023
27. Rao, 2013
28. 与IRENA不同, 全球太阳能理事会(GSC)和太阳能光伏欧洲协会(SPE)市场信息情报团队跟踪并考虑了所有光伏类型, 包括集中式并网型、住宅和离网型以及工商业型(C&I)光伏的年度装机量, 从而导致机构间的数据存在差异。引用: GSC&SPE, 2025
29. 世界银行集团(World Bank) (2024年10月8日), 《离网光伏或可在 2030 年为全球近 4 亿人提供电力供应(Off-grid Solar Could Provide First-time Electricity Access to Almost 400 Million People Globally by 2030)》。 <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/10/08/off-grid-solar-could-provide-first-time-electricity-access-to-almost-400-million-people-globally-by-2030>
30. M. Wolf.《太阳能电池的发展历程》。见 Backus, C. E. (编), 《太阳能电池, 纽约: IEEE出版社。
31. 可再生能源世界, 2003
32. 李俊峰 (2013年), 《中国战略性新兴产业研发——太阳能篇》, 北京: 机械工业出版社。
33. 清华大学碳中和研究院, 2024
34. 中国光伏行业协会(CPIA), 2025
35. 砷化镓小电池片三结研发的平均转换效率
36. 中国光伏行业协会(CPIA), 2023
37. 钙钛矿叠层太阳能电池效率
38. 中国可再生能源学会光伏专业委员会(CPVS), 2025
39. 美国国家可再生能源实验室, 《太阳能电池效率纪录表: 第63版》
40. 国际能源署(IEA), 2023b
41. 中关村储能产业联盟、自然资源保护协会, 2023, 此表由研究团队根据所引报告中包含的信息分析编制而成。。
42. 国际能源署(IEA), 2024d
43. 李泓霖, 2023
44. 瑞典环境科学研究院有限公司, 2023
45. 光伏們, 2023
46. 全球太阳能理事会 (GSC)、欧洲太阳能协会(SPE), 2025
47. 东非十国: 埃塞俄比亚、厄立特里亚、吉布提、索马里、肯尼亚、乌干达、卢旺达、布隆迪、坦桑尼亚、塞舌尔
48. 东南亚国家联盟 (ASEAN): 印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、泰国、新加坡、文莱、柬埔寨、老挝、缅甸和越南
49. Hunt, Julian David 等, 2018
50. 巴西太阳能光伏能源协会(ABSOLAR), 2025
51. 巴西能源研究公司, 2025
52. 全球太阳能理事会(GSC), (2025年), 《市场情报年度分析》
53. 中国光伏行业协会(CPIA), 2024a
54. 印尼基础服务改革研究所(IESR), 2021
55. 全球太阳能理事会(GSC)、欧洲太阳能协会(SPE), 2025
56. 印尼基础服务改革研究所(IESR), 2025
57. 南非矿产资源与能源部, 2023
58. 肯尼亚能源和石油监管局(Energy and Petroleum Regulatory Authority, EPRA), 2024
59. 中国国家能源局(NEA), 2025

60. 中国国家能源局(NEA) , 2024
61. 中国光伏行业协会(CPIA), 2024b
62. 广汽即广州汽车集团有限公司 (Guangzhou Automobile Group Co., Ltd [GAC])
63. 蔡思浩2024
64. 章馨元, 2024
65. 中国国家能源局(NEA) , 2022
66. Lou, J., Hultman, N., Patwardhan, A., & Qiu, Y., 2022.
67. Randle-Boggis, R. J. et al, 2025
68. 假设该村庄距离主要电网100公里, 规模为100户, 家庭年用电量为1000kwh, 柴油价格为1.3美元/升
69. 详细成本估算过程见附录III
70. 世界资源研究所(WRI), 2023a
71. Cinderby, S., Parkhill, K. A., Langford, S., & Muhoza, C, 2024
72. 传统地权制度在广大农村占主导地位, 其运作依赖部落习俗与社区规范, 土地分配管理权通常掌握在酋长或长老手中。农村土地多属集体所有, 个人或家庭仅享有使用权而非完全产权。
73. Adam 等, 2020
74. Boone, C., 2015.
75. 配图取自新闻《肯尼亚如何“双重利用太阳能”以提高作物产量》。更多信息详见<https://www.brightvibes.com/how-kenya-is-harvesting-the-sun-twice-to-boost-crop-yields/>
76. Zhang, J., Yang, X., Wang, Z., Liu, Y., Liu, X., & Ding, Y., 2023.
77. 国际能源署(IEA), 2024a
78. 国际可再生能源署(IRENA) , 2023b
79. 世界银行集团(World Bank Group), 2025
80. Darrow, H., 2023.
81. 更多信息请访问: https://en.powerchina.cn/2022-10/10/c_818569.htm
82. 更多信息请访问: World's First Far-Offshore Floating PV Project Commences Power Generation, <https://power.in-en.com/html/power-2416669.shtml>
83. 更多信息请见:《中国首个固定长桩基础海上光伏试点项目实现离网发电, 现已投入运行》, http://www.wendeng.gov.cn/art/2023/5/26/art_37139_3670567.html
84. 更多信息请见:《中国三峡集团在安徽淮南并网世界最大浮体光伏电站》, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1899728
85. Ballagh, A., & Weatherby, C., 2024.
86. 调研的新兴市场国家覆盖绝大部分南方国家。引用: 彭博新能源, 2024
87. 印度能源(Energetica India), 2024
88. 纵轴数值表示climatescope对国家可再生能源政策激励的评分, 评分高表示激励政策更多。
89. Institute for Human Rights and Business, 2024.
90. Ballagh, A., & Weatherby, C., 2024.
91. 能环宝, 2024
92. 来源: <https://mnre.gov.in/en/pradhan-mantri-kisan-urja-suraksha-evam-utthaan-mahabhiyaan-pm-kusum>
93. 亚洲基础设施投资银行
94. 配图取自越南漂浮式太阳能项目, 更多信息详见 <https://www.adb.org/projects/51327-001/main>
95. 盖茨基金会(Gates Foundation) , 2022
96. 王祖勋, 2025
97. 世界银行集团国际金融公司(the International Finance Corporation of World Bank Group), 2024
98. 希迪科尔能源地产投资信托公司(CREIT) , 2025

99. 能源经济与金融分析研究所(Institute for Energy Economics and Financial Analysis), 2023

100. Tao, J. Y., & Finenko, A.,2016

101. Ganesh, S. ,2016

102. M-KOPA公司, 2019

103. M-KOPA是一家总部位于肯尼亚的数字金融与科技公司, 向非洲低收入客户提供“即付即用”的太阳能系统、智能手机及其他产品。该公司通过移动支付平台, 让客户以每日或每周的小额分期付款方式完成支付, 从而使清洁能源和基本生活用品更加可负担、更易获得。

104. Lucidity Insights , 2024

105. 肯尼亚银行家协会, 2015

106. 世界资源研究所(WRI) , 2023b

107. 中能传媒能源安全新战略研究院, 2024年

108. 中国外交部, 2024

109. 中国国际发展知识中心, 2025

110. 指所有金砖正式成员国, 包括创始成员国巴西、俄罗斯、印度、中国和南非, 以及后续加入的成员国沙特阿拉伯、埃及、阿联酋、伊朗、埃塞俄比亚和印度尼西亚等。

111. 中国光伏行业协会(CPIA), 2024b

112. 工业和信息化部, 2022

113. Zhu, Y., Tian, D., & Yan, F. , 2020.

114. 肯尼亚北部离网地区农村电气化的混合电力系统方案

115. 柴油发电机燃油消耗指南——蓝钻公司(Blue Diamond)

致谢

本报告凝聚了众多人士的专业知识、实践经验与不懈努力。联合国经济和社会事务部牵头组织了本报告的编制工作, 来自中国能源研究会可再生能源专业委员会、全球太阳能理事会以及中央财经大学绿色金融国际研究院的多位专家合作完成了报告的编写。此外, 来自亚洲、非洲和南美洲的多国专家在报告的研究与撰写过程中也提供了很多宝贵见解与详实资料。我们谨此向以下机构及个人致以诚挚感谢, 感谢他们所做出的重要贡献。

项目团队

联合国经济和社会事务部: 朱巨望、Astra Bonini, Ralph Wahnschafft, Nora Boudghène, Minoru Takada, Bahareh Seyedi, Nadine Salame, Martin Niemetz, Armin Plum, 吕薇、吴昊天、鲍思彤

中国能源研究会可再生能源专业委员会: 李俊峰、李丹、王卫权、王曼、芦丽莎、余翔、李楠、马丽芳、李林泽、伊阳

全球太阳能理事会: 任晓裴、Sonia Dunlop, Anjali Lathigara

中央财经大学绿色金融国际研究院: 沈威、刘炳材

其他专家

报告审阅: Paul Mbuthi, Rabia Ferroukhi, Divyam Nagapla, Daniel Stilpen, Rosana Santos, Fabby Tumiwa, Yunus Alokore

光伏加案例信息提供: Richard Loat, Capellan Tetchi, Bonomo Pierluigi, Dutta Alekhya

图片来源

封面, Soren H on Unsplash; p.ii, Rafael Moreno on Unsplash; p.iv, Micha Sager on Unsplash; p.vi, Newpowa on Unsplash; p.xi, Erik Karits on Unsplash; p.1, Danist Soh on Unsplash; p.6, Sungrow EMEA on Unsplash; p.7, Adrien Olichon on Unsplash; p.14, Itay Peer on Unsplash, Viector on Unsplash, Gervyn Louis on Unsplash, Random Institute on Unsplash, Fer Troulik on Unsplash; p.15, Green Voltaics Energy on Unsplash; p.33, Vlad Burac on Unsplash; p.46, Quang Nguyen Vinh on Unsplash; p.49, Andres Siimon on Unsplash; p.60, tian dayong on Unsplash; p.61, Sandra Parra on Unsplash; p.79, Numo Margues on Unsplash; p.87, yogesh dangi on Unsplash; p.107, Michael Förtsch on Unsplash; p.113, Vlad Burac on Unsplash.

设计：张烨

Copyright © 2025 United Nations

All rights reserved

United Nations publication issued by the Department of
Economic and Social Affairs



**United
Nations**

Department of Economic and Social Affairs

Copyright © 2025 United Nations

All rights reserved

United Nations publication issued by the
Department of Economic and Social Affairs

Reprinted 2025