



水电水利规划设计总院
China Renewable Energy Engineering Institute



大规模太阳能光伏电站的本地 环境影响与效益



© IRENA 2026

除非另有说明，本出版物中的材料可自由使用、共享、复制、再制作、印刷和/或存储，但需注明IRENA为出处和版权所有。本出版物中归第三方所有的材料可能受不同的使用条款和限制约束，并在使用此类材料前需要获得这些第三方的适当许可。

ISBN: 978-92-9260-702-9

引用：国际 renewable 能源署、中国 renewable 能源发展中心和国际自然保护联盟（2026），国际 *大型太阳能光伏电站的当地环境影响与效益*

阿布扎比可再生能源署

可供下载：

如需更多详情或提供反馈：www.irena.org/publications publications@irena.org

关于IRENA

国际可再生能源机构（IRENA）是一个政府间组织，支持各国向可持续能源未来过渡，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识库。IRENA促进各种可再生能源（包括生物质能、地热能、水力发电、海洋能、太阳能和风能）的广泛采用和可持续利用，以实现可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济增长与繁荣。www.irena.org

关于CREEI

成立于1950年的中国可再生能源工程研究院（CREEI）是中国能源领域领先的思想库之一。它是首批获得中国国家能源局正式批准的专业研究和咨询机构。该研究院致力于支持高层政府决策，并以可再生能源为重点，推动国内外可持续发展，涵盖规划、政策分析、工程咨询、质量监督、标准化和国际合作。受政府委托，CREEI在实施和支持近20个政府间多边和双边能源合作机制中发挥了领导作用，其中包括管理中国—IRENA合作办公室和中国—上合组织能源合作中心等。

关于IUCN

成立于1948年的国际自然保护联盟（IUCN）已发展成为世界上规模最大、最具多样性的环境网络。国际自然保护联盟（IUCN）是一个由政府 and 民间社会组织独特组成的成员联盟。其成员包括来自160多个国家的专家和有影响力的政府、非政府和原住民组织，我们的委员会汇集了来自全球的16000多名专家。它为公共、私营和非政府组织提供知识和工具，使人类进步、经济发展和自然保护能够同步进行。IUCN是世界自然状况及其保护措施的权威机构。

致谢

这份报告由国际可再生能源署（IRENA）、中国可再生能源工程研究院（CREEI）和国际自然保护联盟（IUCN）联合编制，在乌特·科利尔（IRENA知识、政策与金融中心主任，代理主任）和蒋浩（中国可再生能源工程研究院首席科学家）的指导下完成。报告作者是冯晋蕾、吕沛瑶（IRENA）、谢月涛、杜思佳（CREEI）、拉切尔·阿桑特-奥苏以及刘启轮（IUCN）。

本报告得益于巴伦·约瑟夫·奥雷、萨莎·亚历山大（联合国防治荒漠化公约）、阿姆贝·埃马纽埃尔·乔奥（联合国大学）、爱德华·佩里（经济合作与发展组织）、维纳·纳吉亚（干旱地区农业研究中心）、亚历山德拉·斯科纳米吉奥（意大利新技术、能源和可持续经济发展局）、张晓华（气候工作基金会）、莉娜·杜比纳（欧洲太阳能联盟）、叶莲娜·梅尔科尼安、斯蒂芬·辛德勒（巴伊瓦可再生能源公司）和理查德·兰德·博吉斯（挪威技术研究院）的评审。

卡罗琳·奥奇恩、盖亚特里·奈尔、吉弗雷·维斯科塔伊特、贡迪亚·索克纳·塞克、汉娜·索菲亚·奎因托、贾伊德夫·达夫列、卡梅尔什·杜凯卡、卡兰普里特·考尔、恩塞博·塞佩兰、帕特里夏·威尔德和威尔逊·马特凯尼亚（IRENA）也提供了评审和反馈。弗朗西斯·菲尔德在斯蒂芬妮·克拉克的支持下提供了出版和编辑监督。技术评审由保罗·科莫尔提供。该报告由斯蒂芬妮·德宾编辑，设计由米儿卜·佩特鲁完成。

国际可再生能源署（IRENA）对中华人民共和国国家能源局和青海省人民政府（中国）为本研究提供的宝贵支持表示诚挚感谢，并对国家电力投资集团公司（SPIC）协调现场调查和提供相关数据表示感谢。

若需提供反馈，请联系：publications@irena.org。

本报告可下载：www.irena.org/publications

免责声明

本出版物和其中包含的材料按“原样”提供。国际可再生能源署已采取一切合理预防措施来核实本出版物中材料的可靠性。然而，国际可再生能源署及其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的保证，无论是明示的还是暗示的，并且他们对使用本出版物或其中包含的材料所导致的任何后果不承担任何责任或责任。

此处所含信息不一定代表IRENA所有成员的观点。提及特定公司或某些项目或产品，并不意味着IRENA优先认可或推荐它们，而不是其他未提及的同类性质的公司或项目或产品。此处采用的名称和材料的呈现方式，并不表明IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的法律地位，或其当局，表达了任何意见。大规模光伏电站的本地环境影响与效益或者关于划定边界或边界的问题。

目录

缩写词.....	6
执行摘要.....	7
1. 太阳能光伏在能源转型.....	9
1.1 发展趋势和作用.....	9
1.2 在主要市场的部署.....	11
1.3 环境方面和考虑事项.....	12
2. 太阳能光伏与当地环境的相互作用.....	14
2.1 整体交互：太阳能光伏所需的土地面积.....	16
2.2 对当地环境方面的可能负面影响.....	17
2.3 可用于协同效益的潜在交互.....	20
3. 太阳能产业促进可持续部署的现有解决方案和实践.....	26
3.1 集成项目设计与规划.....	26
3.2 施工期间影响减缓.....	30
3.3 协同运营与维护.....	31
3.4 其他解决方案与实践.....	36
3.5 从环境到社区.....	38
4. 采用环境友好型实践和获取协同效益的障碍.....	39
5. 推动可持续协同的政策框架	
太阳能光伏项目与当地环境。.....	43
5.1 可持续太阳能光伏项目的总体政策框架.....	43
5.2 应对障碍的政策和措施.....	44
参考资料.....	49

图例

图1	全球累计安装的太阳能光伏容量及其在可再生能源总容量和发电量中的占比，2015-2024.....	9
图2	2015-2024年全球新增太阳能光伏和其他可再生能源装机容量。.....	10
图3	全球光伏和其他的总装机容量及发电量 可再生能源，2023年、2030年和2050年，在1.5°C情景下.....	10
图4	总安装的太阳能光伏（右圆圈）和新增量（左圆圈）在选定 市场和其余世界，2024 (GW).....	11
图5	对选定市场总安装太阳能光伏容量的估计，2024年，2030年 到2050年，1.5°C场景.....	12
图6	不同阶段的太阳能光伏生命周期及其与当地的相互作用 环境。.....	13
图7	光伏电站与当地环境的潜在相互作用： 影响与效益.....	15
图8	对选定地区用于太阳能光伏和高尔夫球场土地面积的比较 国家.....	17
图9	规划及施工期间对环境潜在的影响 过程.....	18
图10	地面温度差异示例：太阳能光伏电站内外的温度差异，2024.....	21
图11	太阳能光伏电站内外风速差异示例，2024.....	22
图12	在太阳能光伏电站建设和运营期间对植被的可能影响.....	24
图13	在整个项目开发周期中的减缓等级 of可再生能源.....	27
图14	六项自然正向能源选址和许可原则.....	28
图15	在施工过程中避免和减少影响措施。.....	30
图16	整合太阳能光伏与农业的潜在协同效益。.....	32
图17	太阳能放牧的潜在协同效益.....	33
图18	与太阳能光伏电站的本地协同效益相关的术语 环境和生物多样性。.....	34
图19	太阳能光伏电站内外湿度差异示例，2024年。.....	35

图 20	光伏电站与土壤、风可能的相互作用和协同效益 温度。	37
图21	采用环保型太阳能光伏运行的主要障碍.....	39
图22	光伏发电与当地环境最大程度协同的政策框架。	43
图23	政策与利益相关者解决采用的主要障碍 可持续实践。	44
图24	太阳能光伏项目规划中CIA的关键步骤.....	46

框格

方框 1	环境、自然、生物多样性和生态系统。	14
------	-------------------------	----

缩写

ACE	东盟能源中心
°C	摄氏度
大麻二酚	生物多样性公约
中情局	累积影响评估
CLEANaction	能源与自然行动联盟合作
cm	厘米
EIA	环境影响评估
ESG	环境、社会及管治
EUR	欧元
温室气体	温室气体
GIS	地理信息系统
GT	吉吨
GW	吉瓦
IRENA	国际可再生能源机构
IUCN	国际自然保护联盟
KBA	关键生物多样性地区
km ²	平方公里
千瓦时	千瓦时
LCOE	平准化能源成本
MW	兆瓦
非政府组织	非政府组织
PV	光伏
RCPEIE	高原能源生态研究所(中国)
人	为自然而生的可再生能源
SEA	战略环境评价
SPIC	国家电力投资集团有限公司(中国)
TNC	大自然保护协会
TWh	太瓦时
UNCCD	联合国防治荒漠化公约
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
美元	美元
WDPA	受保护地区世界数据库
WETO	全球能源转型展望

执行摘要

太阳能光伏 (PV) 是全球最广泛部署的可再生能源技术之一，并将在未来几十年迎来快速发展。截至2024年底，光伏发电贡献了年度新增装机容量的77%和可再生能源总装机容量的42%。2015年至2024年，全球光伏总装机容量增长了八倍以上。这种快速扩张是由成本下降、技术创新和效率提升，以及支持政策和激励措施推动的。根据国际可再生能源机构 (IRENA) 的1.5°C情景，光伏发电预计将在实现与《巴黎协定》气候目标相一致能源转型中发挥关键作用，到2050年将贡献所需可再生能源总量的50%和可再生能源发电量的37%。

太阳能光伏部署会对环境和生物多样性产生许多正面和负面的影响。

从积极方面来看，太阳能光伏可以通过取代来减少温室气体排放并防止空气污染化石燃料发电，从而有助于应对气候变化并改善公共健康。通过适当如果采取相关措施，它还可以为环境和生物多样性提升产生协同效益。负面的方面，增加部署意味着上游材料需求增长，表明更大与用于太阳能光伏制造矿产开采和处理相关的环境影响。此外，光伏电站能与当地环境发生许多相互作用并影响生物多样性。As 太阳能光伏装机加速，政策制定者和利益相关者需要了解这些相互作用。紧急采取适当的措施和政策。

太阳能光伏部署的土地利用影响仍然是其中最复杂的问题之一，人们关注其可能与农业及其他土地利用方式产生竞争。对主要市场太阳能光伏项目部署的评估表明，如果政府采用适当的评估和规划流程，当前和未来的太阳能光伏电站不太可能在全球和主要市场中与农业竞争。然而，对于那些已经面临土地稀缺问题和拥有高密度人口的 countries，土地使用竞争可能会进一步加剧。为了避免这些问题，实施一个涉及多个部门利益相关者的综合规划流程是必要的。

一个光伏发电厂对当地环境产生的任何负面影响，很大程度上取决于所选地点、建设时间和方法，以及部署前的生态状况。如果项目部署在生物多样性价值高、提供重要生态服务或作为野生动物关键栖息地的区域，可能会产生负面影响。光伏项目的建设和输电线路的部署会移除土地上的植被，严重影响野生动物栖息地和原始生态系统。这些行为还可能导致污染、土地退化以及增加洪水风险。另一个风险涉及入侵物种，如果重新种植不基于本地物种，则可能引入入侵物种。同时，在运营阶段，野生动物与光伏板和输电线路之间的碰撞和触电可能会伤害和杀死野生动物，而光伏电站的围栏会导致栖息地破碎化。此外，大型项目可以从结构和视觉上改变景观，从而影响当地的美学和文化遗产。最后，光伏电站会影响其所在地区的微气候和环境因素，例如温度、湿度、土壤条件、植被生长和生物多样性。

应对这些潜在影响需要在项目设计和规划初期就纳入环境和生物多样性考量。项目开发者和行业利益相关者可以采用许多现有的措施和工具。这包括一个包括避免、最小化和恢复的减缓层次结构——以及作为所有其他措施用尽后的最后选择（即抵消）。开发者可以采用六个对自然有利的选址关键原则，包括加速自然正向发展；共同利用；保护、恢复和增强；监测和适应；延长使用寿命；以及参与地方行动者。许多现有的用于评估生物多样性的数据库和制图工具

敏感性及潜在风险有助于太阳能开发商识别低风险地点并最大限度地减少对环境的不良影响。在建设期间，对时机和做法进行仔细评估可以避免对栖息地构成的主要威胁和对野生动物的干扰，并通过植被恢复措施以及规划的野生动物走廊和通道来补充。

在特定条件下，一些环境影响可以转变为能源生产和环境与生物多样性增强之间的协同效益。 结合农业活动与光伏电站，并做必要改造，可提高土地利用效率，增强粮食安全并产生额外收入。例如，在光伏电站内进行牲畜放牧可以减少过度植被引发的火灾风险，节省植被管理成本，并可能提高肉和奶的生产量。在特定条件下，光伏电站的运营可以与植被覆盖率提高和生物多样性增强共存。在干旱和半干旱条件下，光伏部署有助于恢复退化土地，如废弃矿场和棕地，并有助于控制荒漠化和沙尘暴。当光伏部署在水体上时，它可能改善水质并帮助控制藻类水华。在农业缺乏电力接入的地区，光伏可与农业结合为灌溉系统供电，改善民生。

迄今为止，只有少数国家和市场将光伏电站对当地环境的影响系统地纳入工业实践。 在安装规模较大的太阳能光伏发电容量的国家和地区，例如中国、欧洲、日本和韩国，以及美国，太阳能光伏开发商在选址过程中经常使用环境影响评估来避免和减少负面影响。此外，越来越多的太阳能光伏项目开始探索和利用将太阳能光伏电站与农业活动、牲畜放牧、生物多样性增强、退化土地恢复、防沙治沙、水产养殖活动以及其他用途相结合的协同效益。这些做法也被纳入东非国家部署的试点项目中。一些基于与能源和环保利益相关者合作的国际平台和倡议已经开始联合行动，提高政策制定者对这一问题的认识，并为行业利益相关者提供指南、工具和最佳实践。

许多障碍阻碍了旨在在设计规划阶段避免负面影响或利用太阳能发电与环境保护之间的协同效益的可持续实践的推广。 这些障碍包括适应性设备和维护的额外成本、缺乏知识或经验、土地利用政策不明确或不一致，以及缺乏行业标准。这些障碍可能会阻止行业参与者采用现有解决方案和可持续做法。它们还可能由于项目延误和取消导致项目开发商遭受经济损失，而这些延误和取消与当地社区对负面环境影响表示的担忧和反对有关。

需要制定政策和措施来应对这些障碍，并进一步促进可持续实践。 一个总体政策框架应基于在区域、国家和次国家层面的能源、生物多样性和土地利用平衡的考量。政策制定者可以采用许多现有的工具和措施——包括战略环境评估和累积影响评估、整合能源和环境考量的长期目标以及一致的土地利用政策——来保护具有高生物多样性风险的区域。财政和税收激励措施可用于鼓励在选址过程中可避免大多数负面影响的可持续做法，并支持能够实现协同效益的试点项目。迫切需要工业标准和指南来填补知识差距。通过为太阳能光伏行业的参与者和利益相关者提供培训和能力建设，可以进一步缩小这一差距。金融领域，包括多边开发银行和国际金融机构，可以通过确保项目发展的环境要求来发挥关键作用。

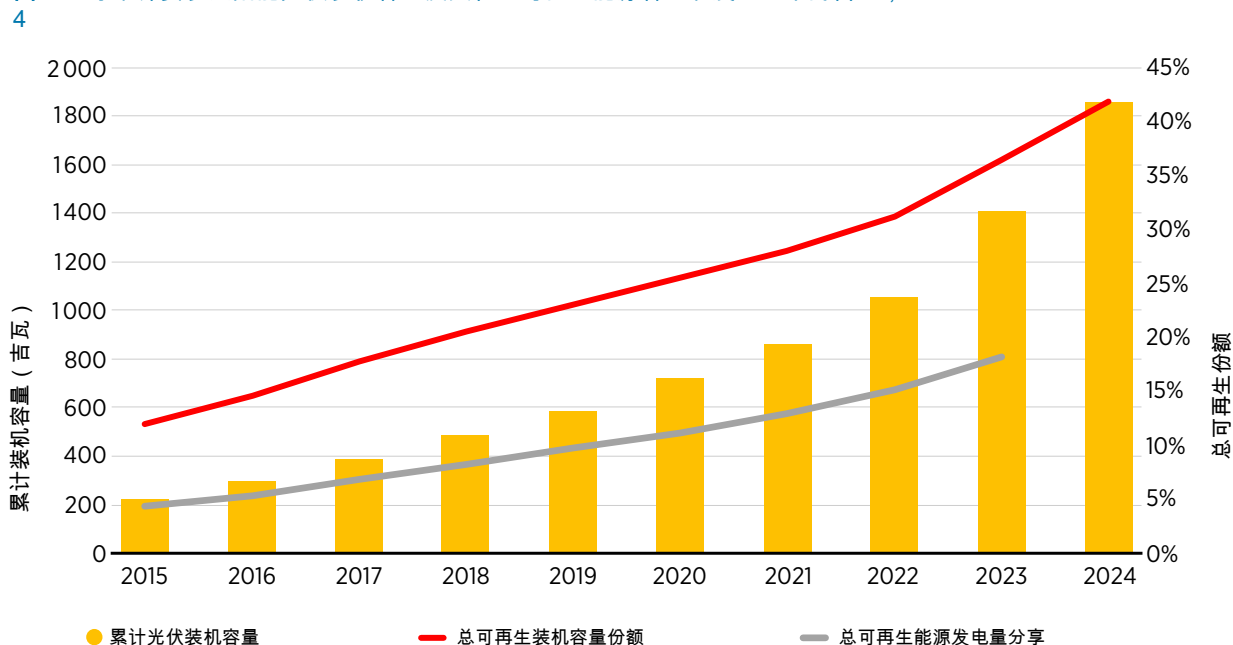
第一章

太阳能光伏 在能源转型中

1.1 发展趋势与作用

太阳能光伏已成为全球最广泛部署的可再生能源技术之一。从2023年开始，太阳能光伏超越了水电，成为最大装机容量可再生能源。到2024年底，全球累计太阳能光伏装机容量（1859吉瓦[GW]）占全球累计可再生能源装机容量（4443吉瓦[GW]）的42%（见图1）。它在2024年占可再生能源新增总量的77%以上（582吉瓦[GW]），并贡献了2023年可再生能源发电总量的18%（8928万亿瓦时[TWh]）。在全球范围内，太阳能光伏电力仍然是第三大可再生能源电力来源，仅次于水电和风电（IRENA，2025a）。

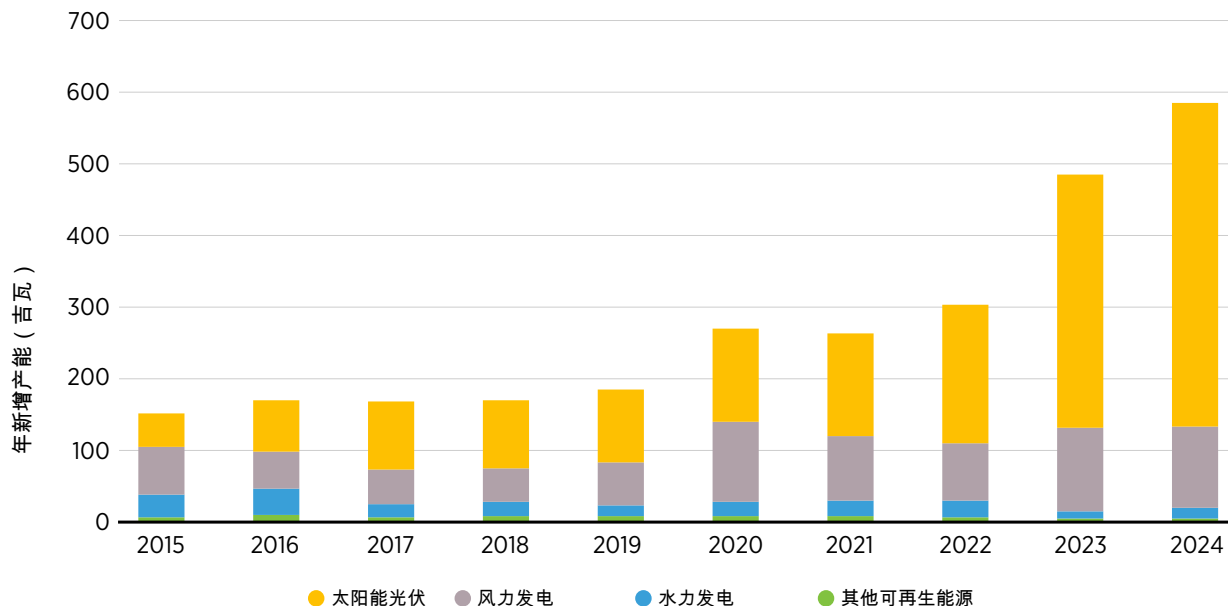
图1 全球累计安装太阳能光伏装机容量及其在总可再生能源容量和发电量中的占比，2015-2024



源码：
(国际可再生能源署，2025a)。
注意：gw = 吉瓦; pv = 光伏。

在过去的十年里，从2015年到2024年，太阳能光伏项目迅速扩张，全球安装的太阳能光伏装机容量增加了八倍以上。2024年，全球太阳能光伏新增量是2015年历史累计部署的两倍（见图1和图2）。这种快速扩张是由许多因素驱动的，包括太阳能光伏技术的成本下降、技术创新和效率提升，以及主要市场的严格支持政策和激励措施。在这些因素中，太阳能光伏电力的较低成本对工业和国家最具吸引力。从2010年到2024年，大型太阳能光伏电站的全球加权平均平准化度电成本（LCOE）下降了90%，从每千瓦时（kWh）0.417美元（美元）下降到每千瓦时0.043美元。2024年，全球太阳能光伏电力的平均成本比最低成本的化石燃料电力低41%，使其成为首选的能源（IRENA，2025b）。

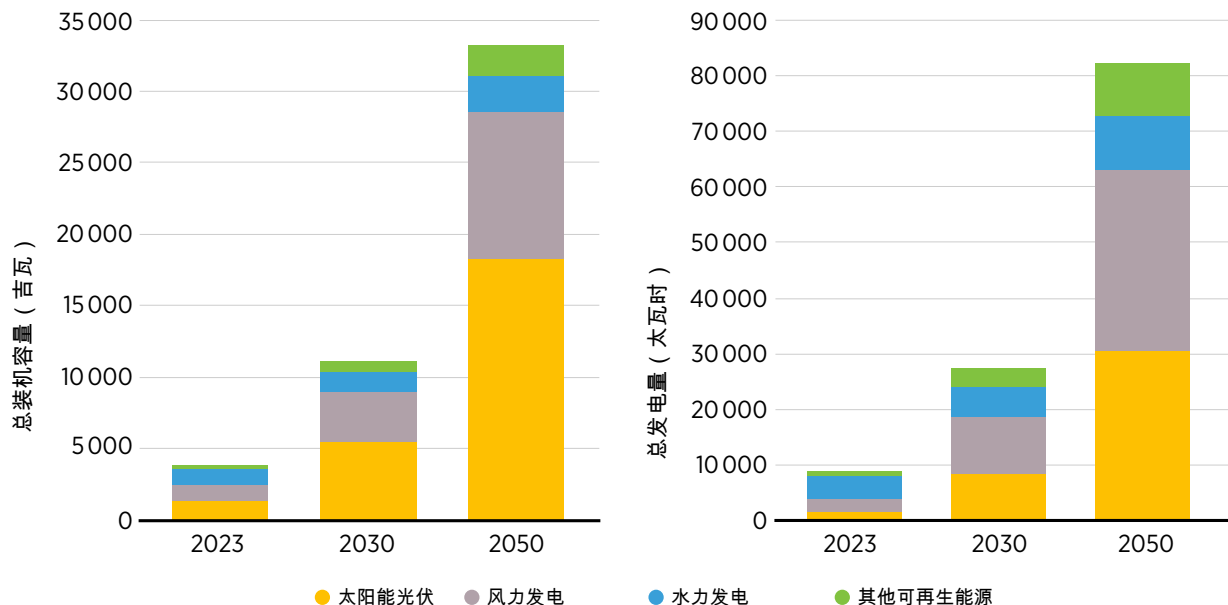
图2 2015-2024年全球新增太阳能光伏和其它可再生能源装机容量



源码：
(国际可再生能源署，2025a).
注意： gw = 吉瓦; pv = 光伏.

根据国际可再生能源署 (IRENA) 《世界能源转型展望 2024》(WETO)，为保持世界与《巴黎协定》气候目标一致，到2030年可再生能源需要提供68%的电力，到2050年需要提供91%(IRENA, 2024a)。太阳能光伏预计将在实现转型目标中发挥关键作用。其需要从当前水平增加至2030年超过5457吉瓦，需要在2025年至2030年间每年增加约600吉瓦。展望到2050年，总装机容量需要达到超过18200吉瓦，以保持与《巴黎》气候目标一致，在1.5摄氏度情景下，将贡献所需可再生能源总量的超过一半（见图3）。太阳能光伏在可再生能源发电中的占比也需要从2023年的18%增加到2030年的31%，到2050年增加到37%。为满足这些部署目标，太阳能光伏项目每年需要超过3300亿美元的投资，较当前水平增加了2.6倍(IRENA, 2024a)。

图3 全球总装机容量（左）和电力发电（右）按太阳能光伏和其他可再生能源划分，2023年、2030年和2050年，在1.5°C情景下



源码：
(国际可再生能源署，2025a).
注意： gw = 吉瓦; pv = 光伏.

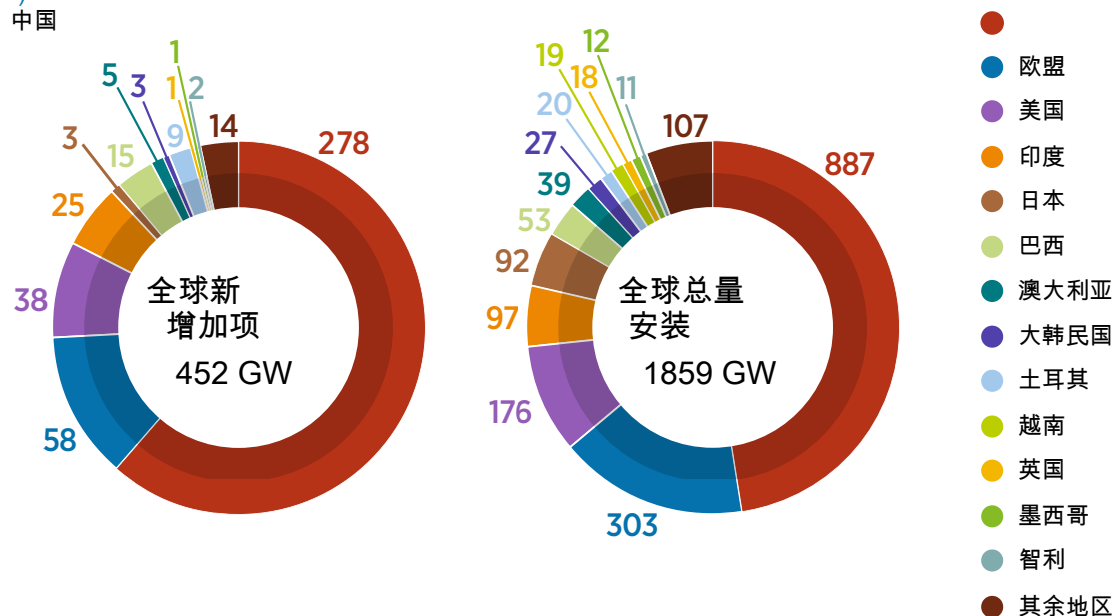
1.2 重要市场的部署

尽管光伏发电在全球范围内经历了快速发展，但其部署在不同地区和国家的程度有所不同。二十国集团成员国，包括澳大利亚、巴西、中国、欧盟、印度、日本和美国，都是具有较大装机容量市场。

中国在过去二十年中大幅提升了太阳能光伏（PV）的部署规模。到2024年，中国占全球新增太阳能光伏装机容量的62%，占总装机容量的48%。然而，2010年时，中国的太阳能光伏总装机容量仅为全球39GW总装机容量中的0.8GW，远低于许多发达国家市场的部署水平，包括比利时、捷克共和国、法国、德国、意大利、日本、西班牙和美国。通过实施强有力的政策框架，包括长期能源战略（“第五年计划”）、财政激励措施、工业指导方针等^{例如}创新和针对性投资，到2024年，中国安装的太阳能光伏板增至（887吉瓦）的水平，几乎是上述国家总和的两倍（IRENA，2025a）。

除中国外，欧盟（303吉瓦）、美国（176吉瓦）、印度（97吉瓦）、日本（92吉瓦）、巴西（53吉瓦）、澳大利亚（39吉瓦）、韩国（27吉瓦）、土耳其（20吉瓦）和越南（19吉瓦）是截至2024年光伏装机容量最大的其他市场（IRENA，2025a）（见图4）。然而，最近，来自不同地区的一些国家在光伏部署方面开始展现出强劲势头。例如，2024年，埃及和南非部署了0.7吉瓦和0.5吉瓦的光伏电站，分别使总装机容量达到2.6吉瓦和6.2吉瓦。沙特阿拉伯部署了1.8吉瓦的光伏项目，使其总容量达到4.3吉瓦。阿拉伯联合酋长国在2023年新增2吉瓦后，2024年又新增700兆瓦（MW）（IRENA，2025a）。然而，大多数发展中国家正在经历较慢的扩张，需要更多投资和强有力的支持政策。

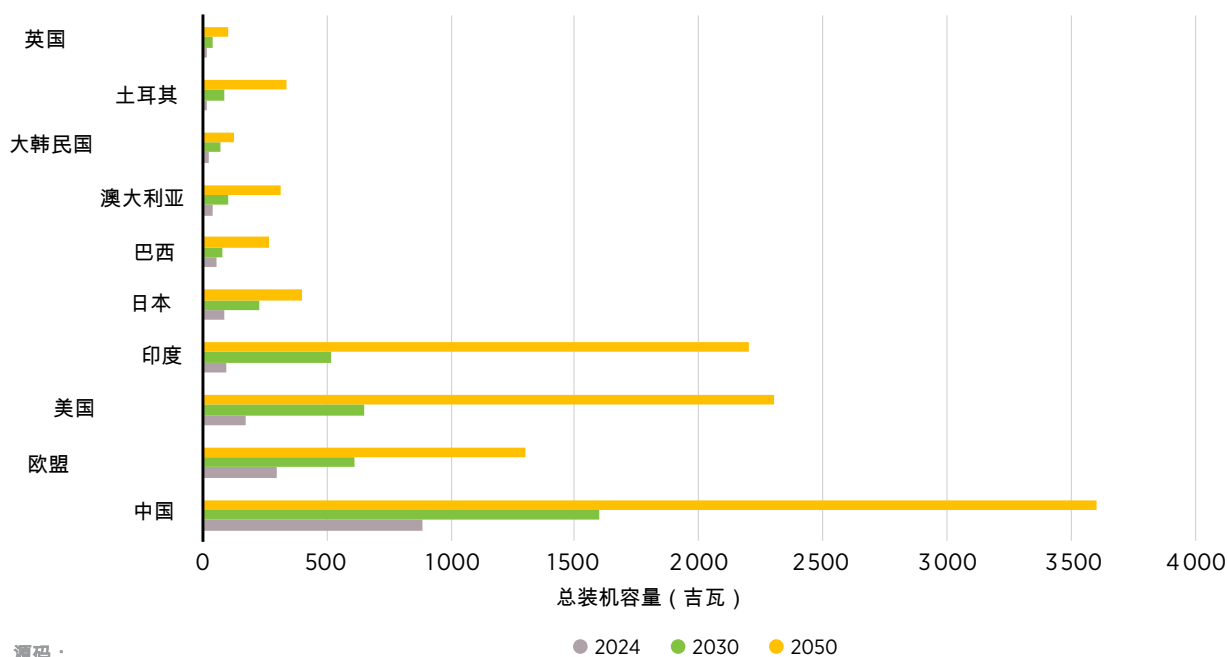
图4 选定市场及世界其他地区的总安装太阳能光伏发电量（右圆圈）和新增量（左圆圈），2024年，（吉瓦）



来源：（IRENA，2025a）。

根据IRENA的1.5摄氏度（°C）情景，预计到2050年，G20成员国将需要贡献全球光伏新增的大部分（超过72%），这主要受到这些市场经济社会活动和能源需求的影响。预计在未来几十年里，澳大利亚、巴西、中国、欧盟、印度、日本和美国仍将是光伏部署规模最大的市场之一。这一预测基于这样一种假设，即雄心勃勃的目标、支持性政策框架以及专门的财政和税收激励措施能够得到采纳（见图5）。

图 5 对选定市场中安装的太阳能光伏总装机容量的估计，2024年、2030年和2050年，1.5°C情景



来源：
（国际 Renewable 能源署，2024a，2025a）。
注意：GW = 吉瓦。

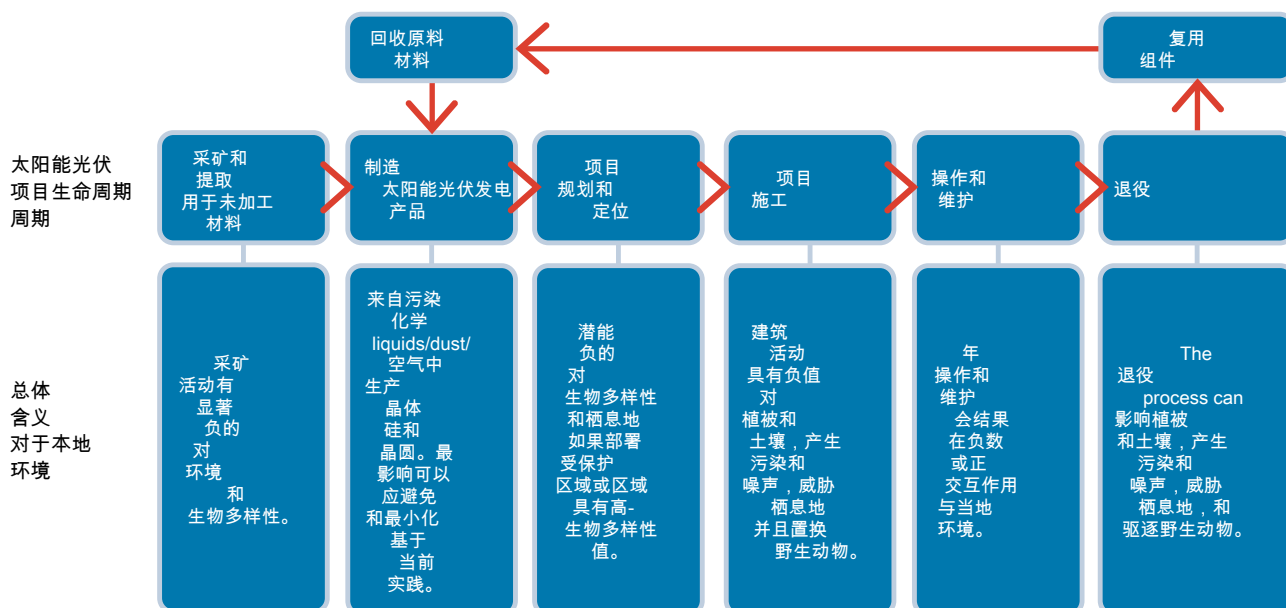
1.3 环境影响与考量

在太阳能光伏的积极环境方面，其有助于减少温室气体（GHG）并应对气候变化挑战的潜力清晰且充满希望。据估计，2019年至2023年间全球部署的太阳能光伏项目每年避免了11吉吨（Gt）的温室气体排放（这些排放本应由燃煤发电厂产生以提供相同的电力供应）。这占2024年全球总温室气体排放量的约3%（IEA，2025）。国际可再生能源署（IRENA）的1.5°C情景表明，到2050年用太阳能光伏发电厂取代燃煤发电厂每年可避免32吉吨的二氧化碳（IRENA，2024a）。

太阳能光伏发电也能减少空气污染，这通常与化石燃料发电有关。例如，燃煤电厂是空气污染物的主要来源，包括二氧化硫、一氧化氮、二氧化氮、黑碳和PM2.5。这些空气污染物对公众健康构成重大威胁，并与全球约一半的早逝死亡病例有关（世界卫生组织，2023年）。在美国，一项研究估计，从2000年到2020年的二十年里，大约一个燃煤电厂导致了1000例超额死亡（美国国立卫生研究院，2023年）。用太阳能光伏发电和其他可再生能源替代化石燃料发电，结合道路交通和供暖领域的电气化，可以显著减少空气污染，从而改善公众福利。

太阳能光伏产业存在一系列其他的环境影响，这些影响可能是正面的也可能是负面的。这些影响可能贯穿整个价值链，包括上游材料需求（见图6）。随着对太阳能光伏技术的需求显著增加，与太阳能电池板制造中使用的原生矿产开采和加工相关的潜在负面影响也随之增加。当采矿和处理行业活跃的地区与生物多样性价值高的地区重叠，且没有采取适当的缓解措施时，对生态系统的影响可能非常显著。这些影响包括栖息地破坏；土壤侵蚀；水、空气和土壤污染；以及地质灾害风险增加。国际可再生能源署（IRENA）估计，在符合巴黎气候目标情景下，到2030年，制造太阳能光伏所需的材料，包括铝、铜和银，将分别达到260万吨（t）、18万吨t和4000吨（IRENA，即将出版）。如果所有这些材料需求都来自原生矿产开采，它们将对土地、水和海洋生态系统造成严重影响。因此，迫切需要制定专门的政策和措施，以在整个供应链中促进循环经济，并减少对原生矿产的需求。

图6 太阳能光伏生命周期不同阶段及其与当地环境的相互作用



当光伏电站达到使用寿命终点（约30年或更久）时，其处理和处置可能对环境产生影响。如果损坏或退役的光伏组件没有被妥善储存或处理，组件中的重金属或有害物质会污染土地、水源、空气和当地生态系统，威胁公众健康。例如，目前安装的大多数光伏组件背板是基于氯化物的，以获得更好的耐久性性能。如果没有采取适当措施，燃烧这些光伏组件背板会产生剧毒的氯化氢，这对包括人类在内的动物可能致命。光伏组件和附加电池含有重金属（如铅、铜、锌和镍）。当报废太阳能电池板没有被妥善储存或管理，这些重金属的泄漏会污染土壤和地下水，这可能会对当地生态系统产生负面影响。

解决这些负面影响需要首先在整个太阳能光伏项目的生命周期中采用循环经济原则（减少、再利用和回收），包括设计、生产、退役、运输、储存和报废处理。推广基于循环利用的太阳能光伏设计可以最大限度地减少化学品和危险材料的使用。环境法规和指令提供了政策工具，以防止填埋并鼓励太阳能电池板的再利用和回收，最大限度地减少环境足迹和污染。

在澳大利亚的维多利亚州，例如，政府已经宣布了禁止太阳能电池板进入垃圾填埋场的法规，从而避免相关的环境影响。中国、欧盟、日本和美国在国家、地区和次国家层面都采用了专门的计划和激励措施，以促进太阳能光伏产业的循环经济，并确保退役太阳能光伏电站的可持续实践，最大限度地减少潜在的环境负面影响。促进太阳能产业的循环经济的另一个好处是为专业公司和受过培训的工人创造就业机会，以运输、处理和处置太阳能电池板。

太阳能光伏行业必须紧急解决太阳能光伏在其生命周期中的环境影响。领先太阳能光伏公司通常利用专业知识和资源来评估其供应链和运营项目的环境、社会和治理（ESG）表现。虽然ESG方法为公司提供了一种重要的合规证明手段，但它可能无法捕捉到在不同市场多元化背景下与生物多样性和当地社区相关的所有相关环境影响和互动（IRENA，2024b）。环境影响可能因地而异，并且了解太阳能光伏电站与当地环境因素之间潜在互动非常重要。

第二章

相互作用

太阳能光伏与地方环境

光伏发电厂¹可以以多种方式与当地环境互动，对自然和土地用途产生正面和负面的影响，例如农业。自然影响及其对生物多样性的影响非常具体于地点、时间（项目安装的季节）、方法和 *例如* 在植物建设期间使用的部署方法。影响是负面的还是正面的，取决于太阳能光伏安装前的环境和生态条件（参见框图 1）。

框1 环境、自然、生物多样性和生态系统

“自然”，“生物多样性”，“生态系统”和“环境”是保护相关语境中使用的术语。这些术语在很多情况下是重叠的，但具有不同的语境和含义。

“自然”通常指物理世界，例如植物、动物、岩石、河流和景观。它包括自然世界中生物和非生物成分（IUCN，2025）。传统上，自然并不表示人类活动或人类创造的东西，例如建筑物、塑料或汽车。作为自然的一部分，“生物多样性”更关注所有来源的活体成分以及生物体之间的变异性。它强调了物种内、物种间和生态系统内的多样性重要性（CBD，2024）。在一个特定空间内，一个“生态系统”是植物、动物和微生物群落及其非生物环境的动态复杂体，作为一个功能单元相互作用（UNEP，2021）。破坏一个平衡的生态系统可能会改变它为自然提供的生态服务。从更广泛的角度来看，“环境”可以有多个定义。它通常指围绕生物体的物理因素，包括自然和人为成分，如水、空气、土地以及支持生命的条件。

这些术语经常重叠，在许多情况下可以互换。自然是最广泛的概念，包括生物和非生物成分。生物多样性是衡量生态系统健康的关键指标之一。在讨论能源设施的环境影响时，能源项目会影响当地环境方面，如大气、水、土壤和周边生态系统。这些变化可能威胁到周边地区的当地生物多样性和野生动物栖息地。随着时间的推移，这些环境影响可能会打破先前生态系统的平衡。这意味着之前减弱或丧失的生态服务，或者它可能提供的新生态服务。

基于：(CBD, 2024; IUCN, 2025; UNEP, 2021)。

在太阳能光伏电站的选址、建设和运营过程中可能会产生负面影响。这些负面影响包括施工期间破坏植被和野生动物、栖息地丧失、土壤退化、水污染和野生动物迁移等。例如，太阳能电站的建设

¹ 本报告中涉及的太阳能光伏电站主要关注从数兆瓦到吉瓦容量的公用事业规模太阳能电站，不包括规模较小的太阳能光伏项目，如住宅太阳能屋顶。2024年，公用事业规模的太阳能光伏项目占全球累计太阳能光伏装机容量的约60%。它们通常覆盖较大的土地面积，表明与当地环境的交互作用更强。小型太阳能光伏项目及太阳能光伏供应链（包括上游采矿和制造）的环境影响将在未来的分析中单独进行分析。

架设输电线路会清除土地上的植被，影响野生动物栖息地，并在大雨期间增加洪水风险。若在光伏板下进行补植，且未基于本地物种，可能会引入入侵物种并破坏原有生态系统。当太阳能光伏电站建在高生态价值或脆弱的生态系统中时，这些负面影响和风险可能更加显著。

积极影响可能源于对太阳能光伏项目进行谨慎的选址、适当的设计以及环保的维护。当太阳能光伏电站部署在受干扰或退化的土地上时，它们可以通过加速土地恢复过程和改善生态系统恢复的有效性而产生积极影响。例如，在多年的运行中，太阳能光伏的遮蔽作用会影响到达地面的太阳辐射，从而导致温度、蒸发、湿度、植物生长和其他问题的变化。这些环境因素的变化本身并不能带来好处。然而，鉴于太阳能光伏电站对当地环境因素的影响，重新平衡的生态系统及其所能提供的服务在某些气候条件下可能是有用的。例如，减少水分蒸发可以为干旱地区的农业活动带来好处，而降低风速可能对控制尘暴问题有益。通过实施适当的措施和可持续的实践，这些环境变化和重新平衡的生态系统可以与多种效益联系起来，包括改善当地生物多样性和创造额外的生态价值（见图7）。这些生态价值可以通过农业或经济活动进一步加以利用，例如作物和水果生产、传粉昆虫保护、牲畜（绵羊、山羊、奶牛）放牧和水产养殖（见第3章）。 例如

图7 太阳能光伏电站与当地环境的潜在相互作用：影响与效益

	直接相互作用	对微观...的影响 气候状况 土壤与植被	对野生动物的影响 栖息地 生态服务/ 函数	对人 impacts 与本地 社区
总体影响 在材料上 与土地利用	<ul style="list-style-type: none"> 材料需求 土地利用 	<ul style="list-style-type: none"> 植被丧失 (例如森林砍伐) 由增加驱动 采矿活动 	<ul style="list-style-type: none"> 对野生动物的威胁 它们的栖息地 	<ul style="list-style-type: none"> 土地利用竞争 公共卫生威胁 链接到抽取式 工业废物
项目设计 和规划 阶段	<ul style="list-style-type: none"> 与重叠 保护区，关键 生物多样性区域或 文化遗产 		<ul style="list-style-type: none"> 对野生动物的威胁 它们的栖息地 野生动物栖息地丧失或 碎片化 	<ul style="list-style-type: none"> 本地工作
建筑 阶段	<ul style="list-style-type: none"> 砍伐林地 开挖 基础和电缆 噪音和废物 	<ul style="list-style-type: none"> 植被丧失 入侵介绍 物种 污染 土壤侵蚀/ 降解 	<ul style="list-style-type: none"> 野生动物栖息地丧失 筑巢干扰 并与繁殖 洪水风险 	<ul style="list-style-type: none"> 增加风险 本地社区 由于污染 地质灾害
操作和 维护	<ul style="list-style-type: none"> 面板遮阳 	<ul style="list-style-type: none"> 温度 蒸发 风速 土壤质量 植被覆盖 植被多样性 需水量 清洁 	<ul style="list-style-type: none"> 增强或恢复 生态系统服务 退化恢复 地 生物多样性增加 丰富度 	<ul style="list-style-type: none"> 对当地的影响 社区 额外收入 本地工作

本章探讨了大型太阳能光伏项目在不同阶段（包括规划选址、建设和运营维护）与当地环境的可能相互作用，这些相互作用涉及土地利用竞争、对当地环境的负面影响以及利用环境影响产生协同效益的潜力。

2.1 总体交互：太阳能光伏所需的土地面积

在太阳能光伏与环境的所有潜在相互作用中，太阳能光伏部署的土地利用影响仍然是其中最复杂的话题之一。虽然需要快速部署太阳能光伏项目来实现能源转型，但人们已经对可能存在的与农业和其他土地使用的竞争表示担忧。

每兆瓦的公用事业规模光伏植物所需的土地面积因地点、太阳能辐射、所使用的技术和发电效率而异。在中国，根据现有技术（SPIC, 2025）估计，每兆瓦的公用事业地面安装式光伏植物需要1-2公顷的土地。在符合巴黎气候目标的情景下，预计到2050年中国光伏部署将覆盖不到该国土地面积的1%。考虑到大多数新增太阳能电站部署在退化土地上并支持荒漠化控制（荒漠化覆盖了中国超过13%的土地面积），光伏部署不太可能与其他农业用地或具有高生物多样性价值的地块竞争。

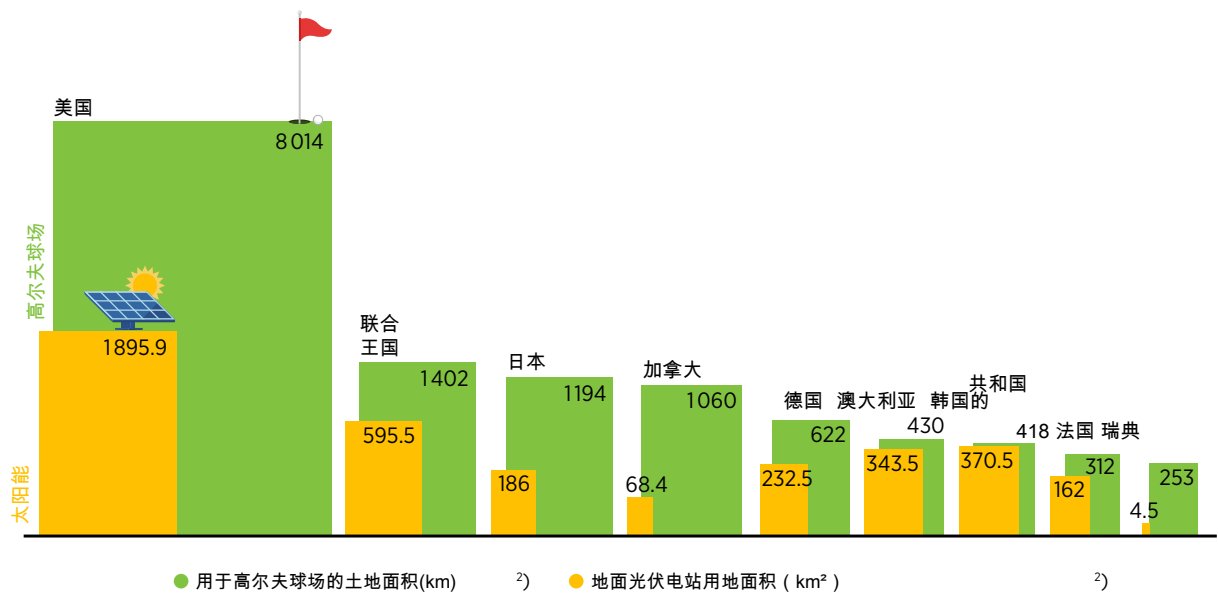
在英国，每个兆瓦的太阳能光伏项目需要大约2公顷的土地面积，根据当前部署的估计（Blaydes., 2025）。为了满足最雄心勃勃的太阳能光伏部署等

到2050年的目标，大型太阳能农场将占英国土地面积的不到0.7%。在这种情况下，即使所有新的太阳能农场都会部署在英国的农业土地上，它将占有所有农田的不到2%，表明与粮食生产的竞争可能性不大（Blaydes., 2025）。在美国，每兆瓦的太阳能农场需要3-4公顷的土地面积等

（SETO, 2021; Wyatt and Kristian, 2021）。基于一项雄心勃勃的假设，并且不考虑短期政治变化，与巴黎气候目标一致的太阳能光伏部署将需要不到美国陆地面积的0.5%，如果与农业用地结合，则需要1%。

基于这些主要市场的估算，到2050年所需的太阳能光伏安装不太可能占用大量土地。如果相关的政策制定和规划流程能够整合，太阳能光伏的部署就不必显著地与农业或生物多样性保护竞争。据估计，2023年全球用于太阳能光伏的总土地面积约为30-70万公顷，不到全球农业用地面积的0.1%。到2050年，这一份额可能增加到0.2%至1.5%（粮农组织，2023年；国际可再生能源署，2025a年）。这表明在全球范围内土地利用竞争的可能性不大。当考虑将太阳能光伏与农业活动相结合的可能协同效益时，土地利用竞争的可能性就会降低，因为能源和农业生产可以协同（参见第三章）。另一方面，如果采用适当的评估和规划流程，新的太阳能光伏部署可以优先用于退化或受干扰的土地，从而最大限度地减少负面影响（参见第三章）。此外，用于其他目的且损害生物多样性或与农业竞争的土地面积一直远大于太阳能光伏使用的土地面积。例如，在澳大利亚、加拿大、日本、英国、美国和许多其他国家，用于高尔夫球场的土地面积可以是公用事业规模太阳能光伏使用的几倍或十倍以上（韦纳尔德等，2025年）。等（见图8）

图8 所选国家太阳能光伏和高尔夫球场用地面积对比



源码：

(Gabbatiss 和 Lempriere, 2025).

注意：该图基于可获得的数据显示了现有状态的比较；它不指示任何未来情况。km² = 平方公里。

值得注意的是，在全球以及上述市场，太阳能光伏与农业之间估算的土地利用竞争未必会在土地利用竞争已十分激烈的经济活动中占主导地位的国家发生。例如，小型岛屿发展中国家可能已经面临土地稀缺和人口高密度的问题。在这种情况下，需要进行仔细评估和综合规划，以避免土地利用竞争。对于其他市场，评估应基于其特定的区域背景、太阳能辐射水平、领土环境、人口密度以及退化土地的规模。这类例子包括边缘土地或被指定为低影响土地或生物多样性价值较低的但可能仍然被当地社区为生计所占据的土地。利用这些土地必须考虑和保护这些当地社区的利益。创新解决方案，例如将太阳能光伏与建筑结构或农业活动相结合（参见第三章），可以增加可再生能源的部署并减少土地稀缺。

2.2 对当地环境方面的潜在负面影响

开垦土地对植被和土壤的可能影响

光伏电站的建设通常涉及土地清理，对植被和土壤质量构成严重威胁。例如，一个10兆瓦光伏电站的项目筹备可能需要清理十多公顷的土地和原生植被。即使采取积极的再造林措施，土地清理期间造成的植被损失也需要时间来恢复。在中国，对甘肃省六个大型太阳能电站的评估发现，土地清理后原生植被覆盖率从原来的10-15%下降到不到2%。如果没有适当的再造林措施，植被需要至少三年才能自然恢复到土地清理前的一半水平（周和王，2019）。

移除植被会导致土壤侵蚀和退化。在建设过程中也会发生类似的影响，包括为安装电缆和基础进行的深挖。在土地清理和建设中，地表土壤结构会受到损坏，以及土壤压实和肥力下降（刘，2025）。如此大面积的植被丧失会增加土壤侵蚀和土地

降解。这在部署在倾斜表面（如山地）的太阳能光伏电站尤其如此。例如

在倾斜面板表面可能会改变地表降雨并增加土壤侵蚀。此外，地面植被的丧失和土壤侵蚀会增加雨季地表径流和洪水的风险。

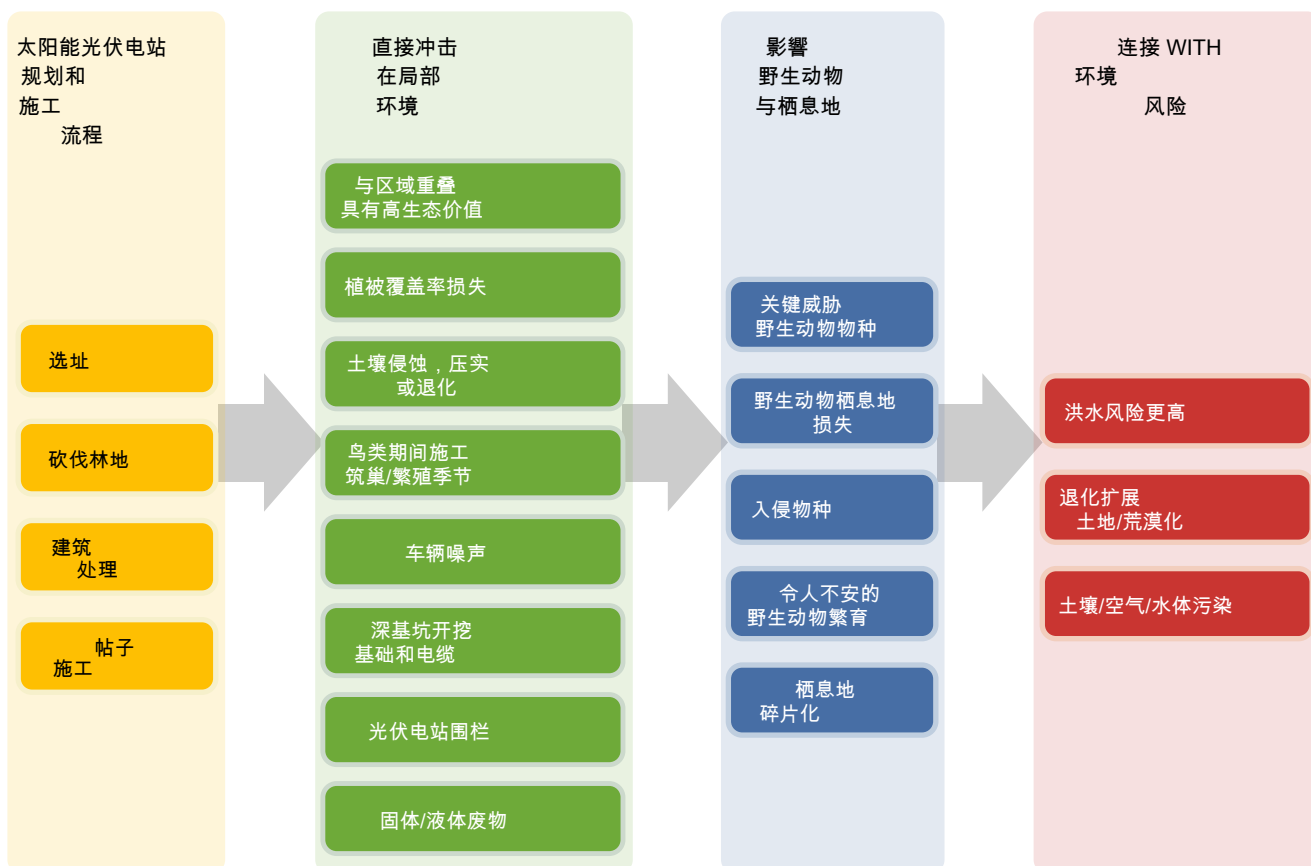
当太阳能电池板部署在荒漠化影响的地区时，施工也可能损坏沙地上现有的生物土壤结皮，这些结皮保护着干旱土地免受荒漠化。因此，施工过程也可能增加荒漠化和沙尘暴的风险。

栖息地和生物多样性的破坏

太阳能光伏建设会导致植被损失，无论是树木、灌木、牧场还是其他植被。当太阳能光伏项目部署在树木和灌木覆盖的土地上时，建设过程和砍伐树林可能会导致或加速森林砍伐过程。森林是地球上80%以上生物多样性的家园，包括80%的两栖动物、75%的鸟类和68%的哺乳动物（联合国粮农组织和联合国环境规划署，2020年）。由于其对于全球生态系统的高价值，全球约21%的森林面积已被国家或地区法律定义为保护区（戴维斯，2025年）。森林地区为整个地球提供许多基本的生态系统服务，如气候调节、空气和水净化、防洪等。类似地，牧场具有重要的生态价值，并在生物多样性和畜牧业中发挥着关键作用。

清除土地、为板式基础和电缆进行深挖，以及修建电厂附设的道路和维修建筑，会导致野生动物栖息地丧失（见图9）。由于对特定生态系统内部原有平衡的破坏，这些活动可能会导致受扰动区域的生态服务功能显著减少（Zhou., 2019）。此外，大型光伏电站的围栏等影响野生动物的活动，这些活动对于获取食物、水和庇护所，以及繁殖活动都至关重要。建设过程中的车辆噪音也可能影响野生动物的繁殖季节。

图 9 规划及施工过程中的环境影响



如果在具有高生物多样性价值或关键野生动物栖息地所在的区域，太阳能光伏电站的运营会对生物多样性和野生动物栖息地产生显著影响。一项研究估计，截至2020年，已有超过200个太阳能光伏项目部署在关键生物多样性区域（KBAs）（Rehbein., 2020）。KBAs被定义 等

根据自然保护国际联盟（IUCN）、国际鸟类联盟和其他保护组织，将其视为对全球生物多样性和整体健康具有显著贡献的区域。由于这些潜在的负面影响，国际保护组织已建议新建的太阳能光伏电站应避免保护区，并优先考虑在受干扰区域建设（参见第三章）。值得注意的是，被定义为生物多样性价值较低的土地区域仍然可能具有重要的生态功能。在这些区域部署太阳能光伏项目仍然需要采取适当的政策和措施，以预防和减轻潜在的负面影响。

野生动物与电网基础设施和面板的碰撞

大型太阳能光伏项目通常位于能源消费中心之外（城市，工业）例如中心)因此需要电网基础设施，包括输电线和变电站，以及道路。这种基础设施的建设和运营可能对环境产生负面影响。

输电线路和变电站通常与太阳能光伏电站相连，这些连接点常常与野生动物栖息地或某些鸟类的迁徙路线重叠。鸟类和其他野生动物会与输电线路和变电站发生碰撞或触电，而输电线路和变电站是用于向消费者输送和分配可再生能源的关键基础设施。与输电线路和变电站的碰撞和触电会导致野生动物严重受伤甚至死亡，而带围栏的变电站则会造成栖息地破碎化和退化。同时，这些碰撞和触电事故通常会导致电力系统中断、设备损坏以及电力公司成本增加。它们还可能增加野火的风险，进而导致财产损失和/或栖息地破坏。

太阳能光伏电站对生物多样性的其他影响包括鸟类与板面的碰撞，以及在重新种植过程中引入入侵物种。在美国加利福尼亚州，有报告称十个太阳能光伏电站可能导致每兆瓦每年死亡2.49只鸟类，基于13年的监测（Kosciuch., 2020）。野生动物，包括鸟类和水生昆虫，可能会将平坦 等

光伏板表面因沾水而产生非适应性行为（IUCN, 2021）。相比之下，据估计，美国每个风力涡轮机（容量平均约为3兆瓦）每年可能造成4至18只鸟死亡（Ritchie, 2025）。太阳能光伏电站的建设以及建设后的再种植过程也可能引入入侵物种，对当地生态系统构成威胁。

对景观和相连文化遗产的影响

大规模光伏电站及其附属电网基础设施的部署从结构和视觉上改变了景观。可能会对其对美学和文化遗产的负面影响表示担忧。

在德国和荷兰，对景观变化的担忧已成为非政府组织（NGO）和当地社区反对可再生能源部署的一个驱动因素（Becker., 2025）。在大多数情况下，原本的农村或自然景观被视为当地的重要组成部分 等社区的历史或日常生活。它们还可以与美学、娱乐服务、旅游价值和文化遗产相关联。

大规模光伏项目的部署可以显著改变景观及其对当地社区的价值。这些对景观和文化价值的潜在负面影响可能引发当地社区的反对，因此构成太阳能光伏部署的主要障碍。例如，在英国，一个计划在农村德文郡部署的占地1100公顷的光伏项目

引起了当地居民对景观变化的担忧（英格兰，2025年）。对当地环境下景观和文化遗产影响的综合评估有助于避免对当地景观和美学价值的损害，从而提高可再生能源的社会接受度。

太阳能光伏电站的用水需求

太阳能光伏电站的用水需求是关于环境影响讨论的另一个议题。太阳能光伏电站运营中的大部分用水用于常规面板清洗，以确保预期发电量。虽然清洗频率取决于当地气候条件，但技术进步和提高清洗效率能够最小化面板清洗的用水需求。然而，当在农业用水面临缺水和水资源压力的地区部署时，合理的规划和对太阳能光伏用水需求的审慎评估可以帮助避免这些地区水资源压力的进一步增加。

鉴于这些潜在的负面环境影响，未来的太阳能光伏发展政策将从中受益于一个综合性的视角，以考虑其潜在的环境影响。这种视角有助于确定哪些措施和解决方案可以开发以避免、减少或缓解这些影响，并确保部署的可持续性。许多国家已将环境影响评估（EIA）作为可再生能源项目许可的强制性前提条件。然而，还需要采取额外措施以解决剩余的不足之处，提高相关产业的能力，增强这些工具的有效性，并专门评估与当地情况相关的独特环境和生物多样性影响（参见第4章和第5章）。如果在项目规划的早期阶段就制定适当的政策和措施，大多数对自然的不利影响都可以避免和最小化（参见第3章）。

2.3 可用于互利共赢的潜在相互作用

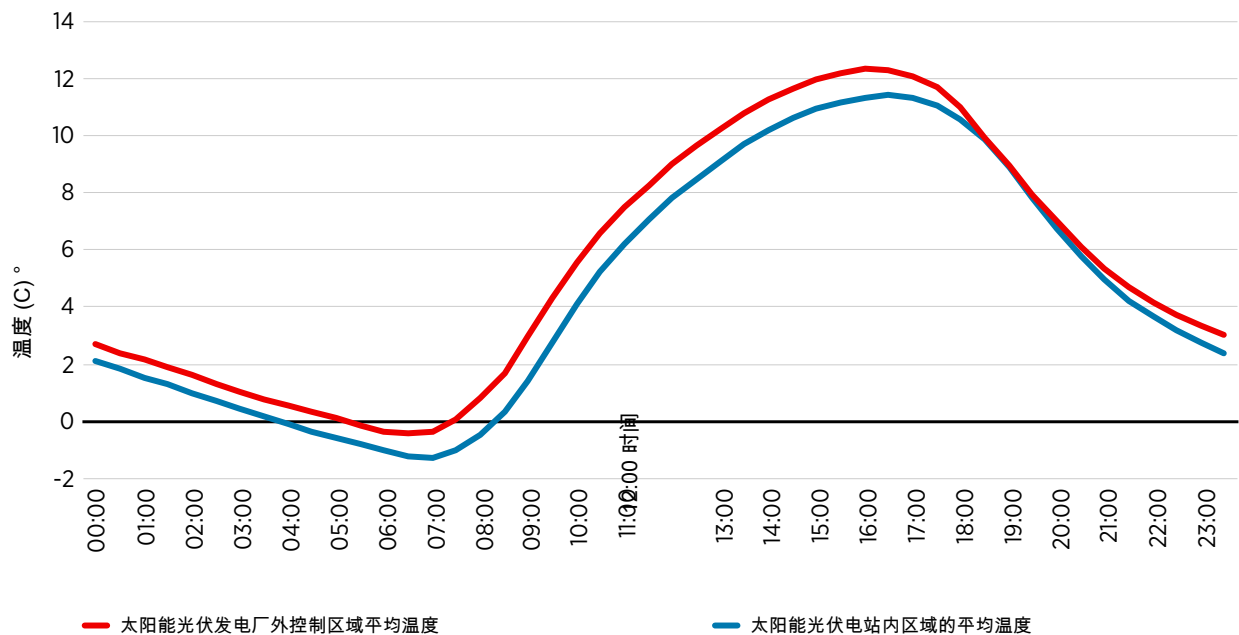
太阳能电站的运行维护通常持续超过30年。在此期间，它们可以通过多种方式与当地环境相互作用。在特定的条件和环境下，其中一些相互作用可以进一步加以利用，以在光伏电站与周边环境之间创造协同效应，并提供额外的生态服务。

从太阳能光伏发电厂到其下方区域造成的遮蔽效应，在项目运行阶段对引发相关环境变化起着基本作用。被太阳能电池板覆盖的大面积遮蔽效应可以影响微气候条件，包括温度、空气湿度、土壤水分和光照可用性。在德国，一项研究发现，太阳能光伏板下方的太阳辐射量可比未覆盖面板的场地方减少30%（弗劳恩霍夫太阳能研究所，2019年）。这种遮蔽差异会影响该区域的微气候及其他相关变化，例如通过降低温度和水分蒸发等变化。从长远来看，它可以改变光伏板下方土壤分解过程和植物群落。

面板下方地面温度降低

减少的太阳辐射与改变的微气候变化有关，尤其是温度降低（Leroy，2025）。在白天，部分太阳辐射被面板吸收并转化为电能。因此，在白天（以及太阳辐射强烈季节）期间，太阳能电站的地面温度可以低于没有太阳能电池板覆盖的其他地方（见图10）。换句话说，太阳能光伏电站可以在白天（由于太阳辐射减少）与较低的地面温度相关联。在日照时间短、气候温和的地区，太阳能电站引起的温度差异可能微不足道。然而，在日照时间较长的地区，太阳能电池板对地面温度的影响可能大于其他地区。

图10 地面温度差异示例：太阳能光伏电站内外的2024年



源码：

(RCPEIE, 2025).

注意： 1) 数据由中国青海省的太阳能光伏电站收集，由高原能源与环境研究所提供；2) 数据显示2024年的平均温差。

同样地，太阳能电池板可以通过将地面发出的能量反射回大气中来减少夜间能量损失。这已被关于部署在农业用地或沙漠地区的多个太阳能电站的研究所证实，在这些地方，太阳能电池板下的夜间（或太阳辐射相当弱的季节）地面温度可能高于没有太阳能电池板的区域。例如，在中国西北部，对太阳能光伏电站的监测表明，它们可以在秋季和冬季使地面温度升高10%至30%。覆盖太阳能电池板区域的地面温度可能比条件相同的无电池板覆盖区域高约1°C (Tan et al., 2025)。对其他太阳能光伏电站的监测等项也揭示了太阳能光伏电站可以使冬季地面温度升高，夏季降低，两者温差约为0.5-0.6°C (赵., 2024)。等

在欧洲和美国也观察到了相同的影响。葡萄牙一座46MW光伏电站专家的监测表明，光伏电站可以在夏季略微降低（约1°C）地面温度，并在冬季提高它 (Hurdac et al., 2024)。当太阳能电池板覆盖一个大面积，例如数百公顷，其下的气流，结合遮阳，即使温差可达1°C左右，也能提供稳定的降温效果。在美国，一个试点太阳能电池板工厂的观测结果，结合俄勒冈州立大学进行的农业活动，显示在太阳能电池板下方的温度比没有太阳能电池板的对照组低0.3°C (Hassanpour Adeh, 2018)。类似地，在亚利桑那州（美国），太阳能光伏项目减少了白天温度升高和夜间温度升高 (Pigott, 2019)。

减少水分蒸发

在光伏电站中可以减少水的蒸发。在中国，部署在干旱和荒漠化地区的规模化光伏电站已被证明在夏季（7月和8月）期间可减少地面蒸发超过24% (SPIC, 2025年)。在德国，光伏电站也被观察到可减少9-22%的水蒸发 (Ludzuweit et al., 2025年)。在植被管理的情况下等项在太阳能光伏板下的农业活动（见第3章），减少水分蒸发导致板下相关的种植活动更有效地利用水资源。在干旱地区，这种效应可以作为一种协同效益来减少水资源压力。

在美国，一个结合了生物质生产的太阳能光伏电站显示，在有太阳能电池板的区域，相同量的水可以产生六倍的生物质，而没有太阳能电池板的区域则不然（Hassanpour Adeh ., 2018）。换句话说，在相同的植被覆盖率下，太阳能电池板下的土地等

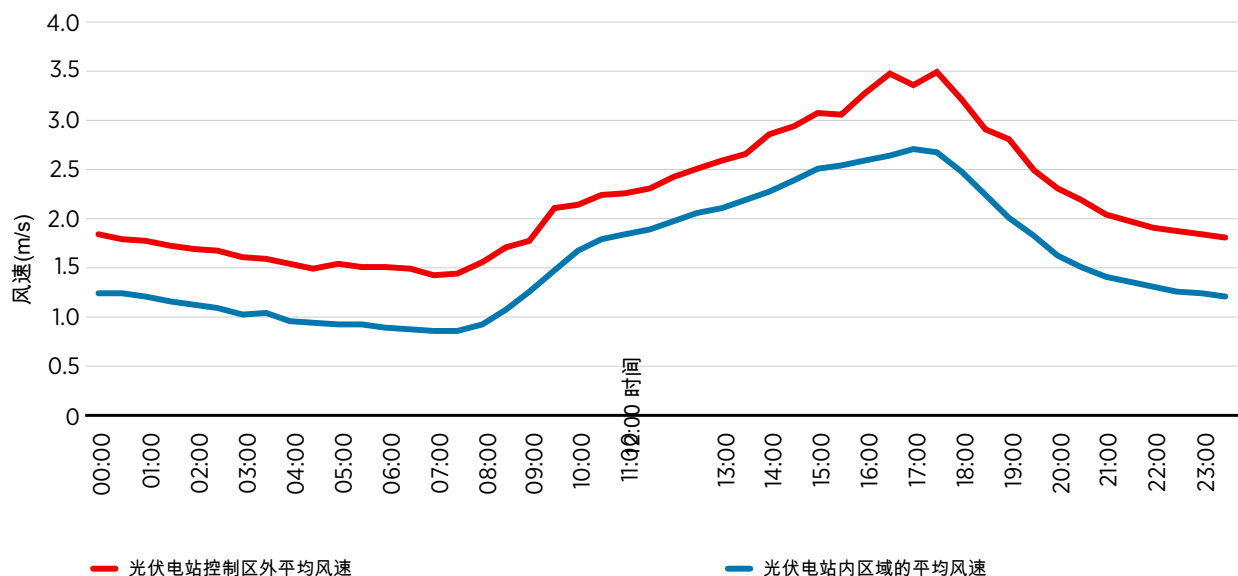
面板可能需要更少的水消耗才能达到相同的覆盖范围。在意大利，在太阳能面板下保持相同水平的植被覆盖，与其他做法相比，需要减少20%的水消耗（Enel, 2023年）。在太阳能光伏项目与农业活动相结合的情况下，减少水分蒸发可提高灌溉效率并降低成本。在联合共和国坦桑尼亚，一项结合太阳能光伏植物和作物生产的试点项目显示，作物灌溉用水需求减少了13.8%（Randle-Boggis ., 2025年）。对联合等
国家还透露，太阳能光伏电站可以减少干旱季节植物生长的水需求（Rahman ., 2023）。等

然而，太阳能电池板会阻挡雨水到达其下方地面，并且由于坡面电池板的集水径流，会增加土壤侵蚀的风险。需要设计得当的项目和附加措施，例如安装在电池板上的雨水沟渠或用于水土保持的植被种植，以帮助减轻这些相关影响。

太阳能电池板下风速降低

大型光伏电站可以降低地面风速和风向。在中国青海省，大型光伏电站（一个吉瓦级项目）面板下方的风速与没有光伏电站的相似区域相比降低了20%至40%（见图11）。这种减少的主要原因是地面部署的光伏板增加了空气流动的阻力，从而降低了近地面的风速。还观察到植物区的风向也发生了变化。在一个位于美国俄勒冈州立大学（美国）的试点项目中，与没有光伏安装的对照组相比，太阳能电池板下方（1.2米（m）高度以下）的风速降低了24%至38%（Hassanpour Adeh ., 2018）。等

图11 太阳能光伏电站内外风速差的示例，2024



源码：

(RCPEIE, 2025).

注意： 1) 数据由中国青海省的太阳能光伏电站收集，由高原能源生态研究所提供；2) 数据显示2024年的平均风速差。m/s = 米每秒；PV = 光伏。

风速降低本身具有中性影响。在高风速是沙尘暴和荒漠化扩展的关键驱动因素的地区，降低风速可以成为一个减少这些风险的杠杆，补充其他专门的沙尘暴控制措施（见第3章）。

土壤湿度增加，土壤温度降低

太阳能光伏电站由于减少了辐射和蒸发，可以增加土壤湿度。这种现象在中国、欧洲和美国多个年份对太阳能光伏电站的监测中已被观察到。在中国北方，一些大型太阳能光伏电站被部署在干旱地区。中国国家电力投资集团有限公司（SPIC）下属子公司对环境指标进行五年（2019-2024）的监测发现，太阳能板下方土壤湿度增加了15%。在美国，亚利桑那大学安装的太阳能板使土壤湿度比无太阳能板的对照区增加了15%（Pigott, 2019）。俄勒冈州立大学另一个试点光伏电站运行七个月后，在20厘米（cm）深度处土壤湿度增加了20%。在40厘米（cm）深度处，土壤湿度增强可以更大（相比对照区增加39%）（Hassanpour Adeh., 2018）。等

在美国中西部地区，太阳能光伏电站也使沉积物拦截率提高了95%以上，水分拦截率提高了19%（Leroy., 2025）。等

土壤温度也可以降低。在德国，已观察到太阳能发电站可以降低土壤温度（Yang, 2017）。在中国，太阳能光伏电站可以将土壤温度降低20%。等

与没有面板覆盖的情况相比（Yang., 2017）。在干旱和半干旱地区，增加土壤 等

水分对土壤健康和植被生长有积极影响。同样地，在经常出现极端高温且威胁植被生长的地区，降低土壤温度是有帮助的。

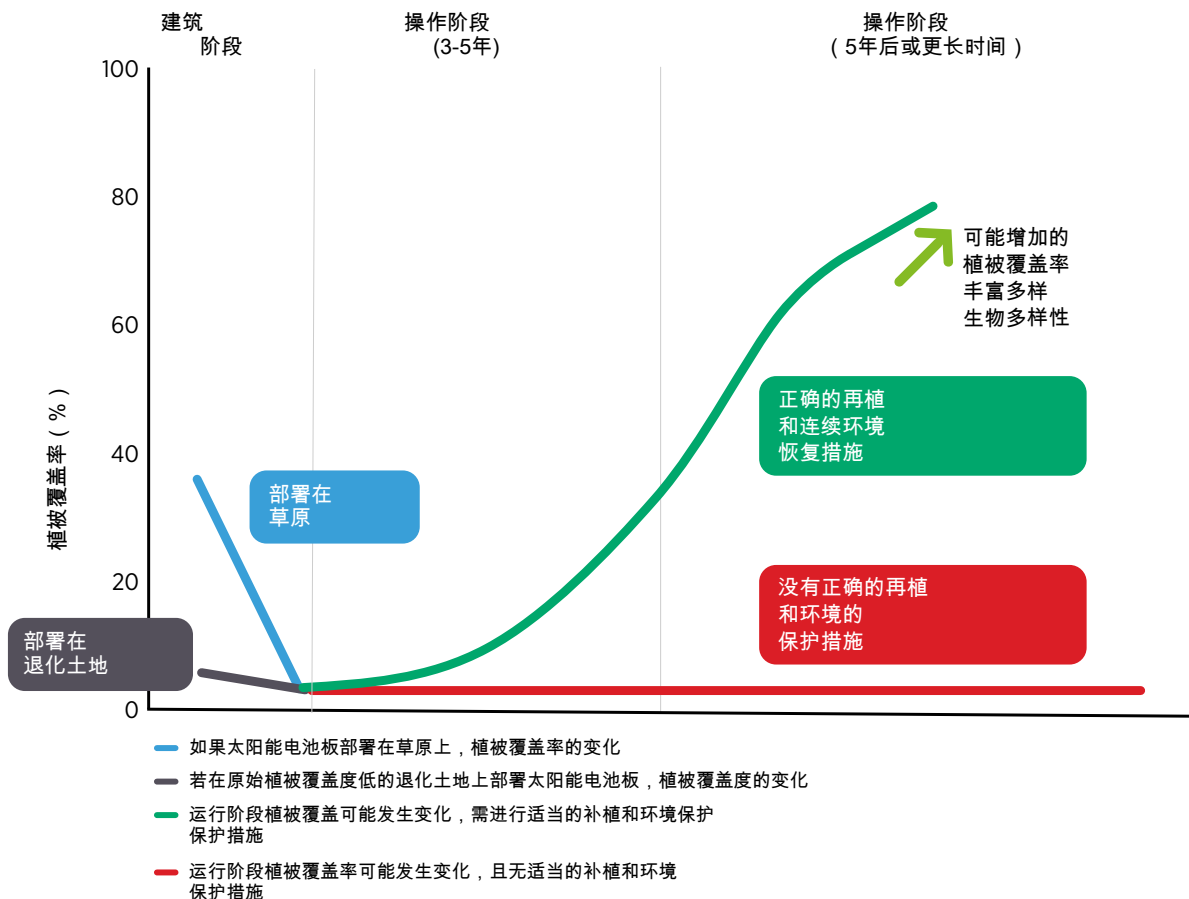
改变土壤质量和植被覆盖率

多年的太阳能运行可以改善土壤质量（Tian., 2024年）。对太阳能发电的土壤监测 等

陕西省（中国）的植物研究表明，除植被恢复外，太阳能电池板下的土壤有机质、磷和钾的含量更高，这些都是植物生长的重要营养素。青海省的太阳能电站观测显示，有机质和氮的含量增加了80%以上。通过对不同地点安装的太阳能电站的研究也证实了类似的影响。这些土壤质量的变化可能与以下事实有关：面板的遮光作用会影响分解过程，加上温度和湿度的变化，以及其他影响（Shang., 2025）。等

在某些环境下，植被覆盖率可以通过改善土壤条件和温度来提升。对在中国共和县部署的太阳能光伏项目的多年监测显示，安装面板的土地上的植被覆盖率在十年间显著增加，从不到2%提升至超过55%。在中国共和县，同样的植被变化也得到观测，一个270MW的太阳能光伏项目使植被覆盖率从不到8%（考虑到这是一个受荒漠化威胁的干旱地区）在不到十年的时间内增长至77%（SPIC, 2025年）。然而值得注意的是，在土地清理减少植被的区域，土壤和植被恢复到原始水平可能需要两到三年甚至更长时间（参见图12）。

图12 太阳能光伏电站建设和运营期间对植被的可能影响



在美国，俄勒冈州立大学的太阳能光伏电站表明，太阳能农场中收获的干生物质（半干旱牧场）的重量比对照区域收获的多90% (Hassanpour Adeh ., 2018)。这是由于太阳能光伏电站中植被生长得到改善。在加利福尼亚州，等对两个太阳能光伏项目的观测发现，太阳能电池板阵列下的植物比没有太阳能光伏植物的地区的植物具有更高的水分和氮含量，以及更低的非消化纤维含量（Gersoff和Sistla，2022）。在英国，研究表明太阳能光伏植物增强了安装面板地区的当地植物（Copping等人，2025）。等

对淡水及海洋系统的影响

太阳能光伏板可以部署在淡水及海水水体上的浮体基础上，例如海洋、湖泊、水库、池塘和运河。浮体太阳能光伏项目为土地有限但水面广阔的地区提供了独特的机会。它们也可以影响水生生态系统的各种因素。

漂浮式光伏项目可以通过减少到达水面上的太阳辐射量来减少水分蒸发和表面温度。据估计，部署在水面的光伏系统可以减少水分蒸发25%至70%，具体取决于当地气候条件（Nisar ., 2022）。在等美国，在北卡罗来纳州部署了一个38MW的漂浮式太阳能光伏电站，覆盖面积超过1000公顷水面。据估计，通过在水面覆盖太阳能板，2020年避免了超过30000立方米的蒸发量（Hussain ., 2024）。等

漂浮式光伏项目也能降低水温。在中国福清市，一个20兆瓦光伏项目部署在养殖池塘上。一项研究表明，光伏使池塘表面的太阳辐射减少了约90%，导致水温平均降低1.5℃，并显著降低了光照强度（Song ., 2024）。等

浮动式光伏系统会改变水质并影响水生生态系统，其长期影响可能是正面的也可能是负面的。到达水面太阳辐射的变化可能导致溶解氧浓度显著增加约8-24%。光伏板还降低了可溶性磷酸盐、活性硅酸盐、总氮、总磷和总有机碳的浓度。所有这些变化和对水生生态系统的影响都会影响生物物种。一个已识别的影响是浮动式光伏可以控制藻类生长。在印度，光伏板部署在灌溉渠道顶部，为农业灌溉系统提供电力。这些板还减少了水的蒸发，并控制了水中的藻类生长，藻类可能会堵塞水泵，损坏灌溉系统和对当地社区造成损害（Sunder，2020）。



太阳能行业促进可持续部署的现有解决方案和实践

3.1 集成项目设计与规划

一个可再生能源项目的规划、设计和管理工作在塑造其环境影响和协同效益方面起着决定性作用。虽然一个规划得当、管理完善的光伏项目可以避免大多数重大负面冲击并为自然带来各种协同效益，但规划不当不仅会造成负面环境影响，还会与当地社区产生紧张关系，这会成为光伏发展的障碍。因此，将环境和生物多样性考虑因素纳入可再生能源项目规划仍然是避免不希望的环境影响的关键。一些工具和方法可以确保这种整合，包括用于支持选址的工具、生物多样性敏感地图和用于评估特定区域生物多样性风险的工具（Bennun., 2021a）。等

项目开发者应采用减缓层级方法，包括避免、减少、恢复和补偿。在可行的选择和措施中，大多数环境影响可以通过在项目规划设计的早期阶段采用适当的工具和实践来避免。因此，将环境和生物多样性考虑因素纳入早期规划阶段应该是项目开发者的首要任务。

环境影响减缓层级

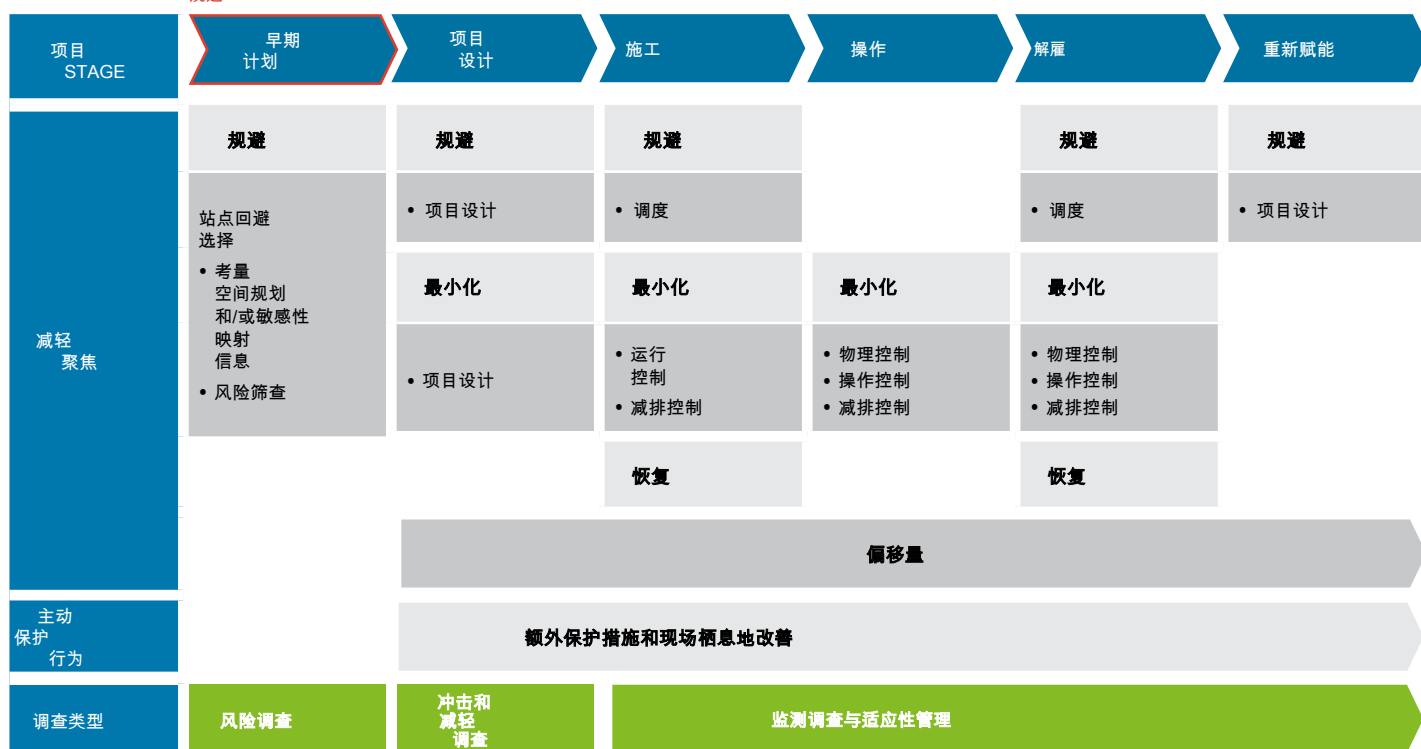
将环境与生物多样性考量融入空间规划过程中可能是避免大多数不希望的环境影响的最有效方法。IUCN和生物多样性咨询公司提出了一种具有缓解层次阶段的策略，以适当管理太阳能光伏电站的潜在影响（见图13）（Bennun, 2021b）。这种缓解层级为利益相关者提供了 等解决项目开发负面影响的框架。

在减缓等级的四个步骤——规避、最小化、恢复和补偿——中，规避是最重要的步骤。它需要适当的场地选择（避免在高风险区域选址）、综合项目设计（整合野生动物和栖息地保护措施），以及施工安排（避免干扰野生动物繁殖和筑巢季节），以预见和防止可能的影响。当影响无法完全规避时，应在项目的每个阶段采取措施，以最小化其强度、持续时间和范围。在建设和退役期间，一些损害无法完全规避或完全最小化；需要采取恢复措施来恢复环境特征和生物多样性成分。补偿²是用于补偿无法避免、最小化或恢复的重大残余影响。它们只应被视为在穷尽所有其他选择后解决残余影响的最后手段。否则，补偿措施可能与漂绿问题相关。在缓解层次结构中，早期规划是最重要的阶段，优化了避免大多数负面影响。

² 根据IUCN，在一些情况下，生物多样性补偿并不可行或不合适。这发生在补偿的技术要求可能无法满足（例如，在其他地方不可能保护或恢复目标物种或生态系统）或理论上补偿是可能的但失败的风险非常高的情况下。在这些情况下，补偿无法使用，这意味着按设计进行的项目不应继续进行（Bennun等人，2021b）。

图 13 可再生能源项目开发周期中的减缓层次

最重要的
优化舞台
规避



来源：(Bennun . , 2021b) 。等

优先在退化土地上部署，或在受干扰区域（例如因建设或采矿活动而改变环境的区域）部署，可以是一种重要方法。太阳能光伏电站通常建议用于在受干扰和退化的土地上部署（例如废弃矿、垃圾填埋场或被化学品污染的土地）。*例如*

在受干扰和退化的土地上，当地植被和动物往往因历史上的建设或采矿活动而被移除或干扰。在这些土地上部署太阳能装置对生物多样性造成的损害，比在自然土地上部署要小。其中一些退化土地，例如矿区，附近可能有输电通道和其他能源基础设施，包括道路和水基础设施，这有助于抵消植物开发商的基础设施成本（TNC，2023）。此外，在生物多样性价值较低或面临土地退化威胁的土地荒漠化地区，部署太阳能光伏也可能有助于控制退化过程。

将环境和生物多样性考量融入项目设计和规划

经过精心设计的、考虑了环境影响的光伏电站可以最大程度地减少不必要的影响，并以高性价比的方式实现协同效益。项目选址或选择项目地点仍然是实现这一目标的最重要步骤之一。

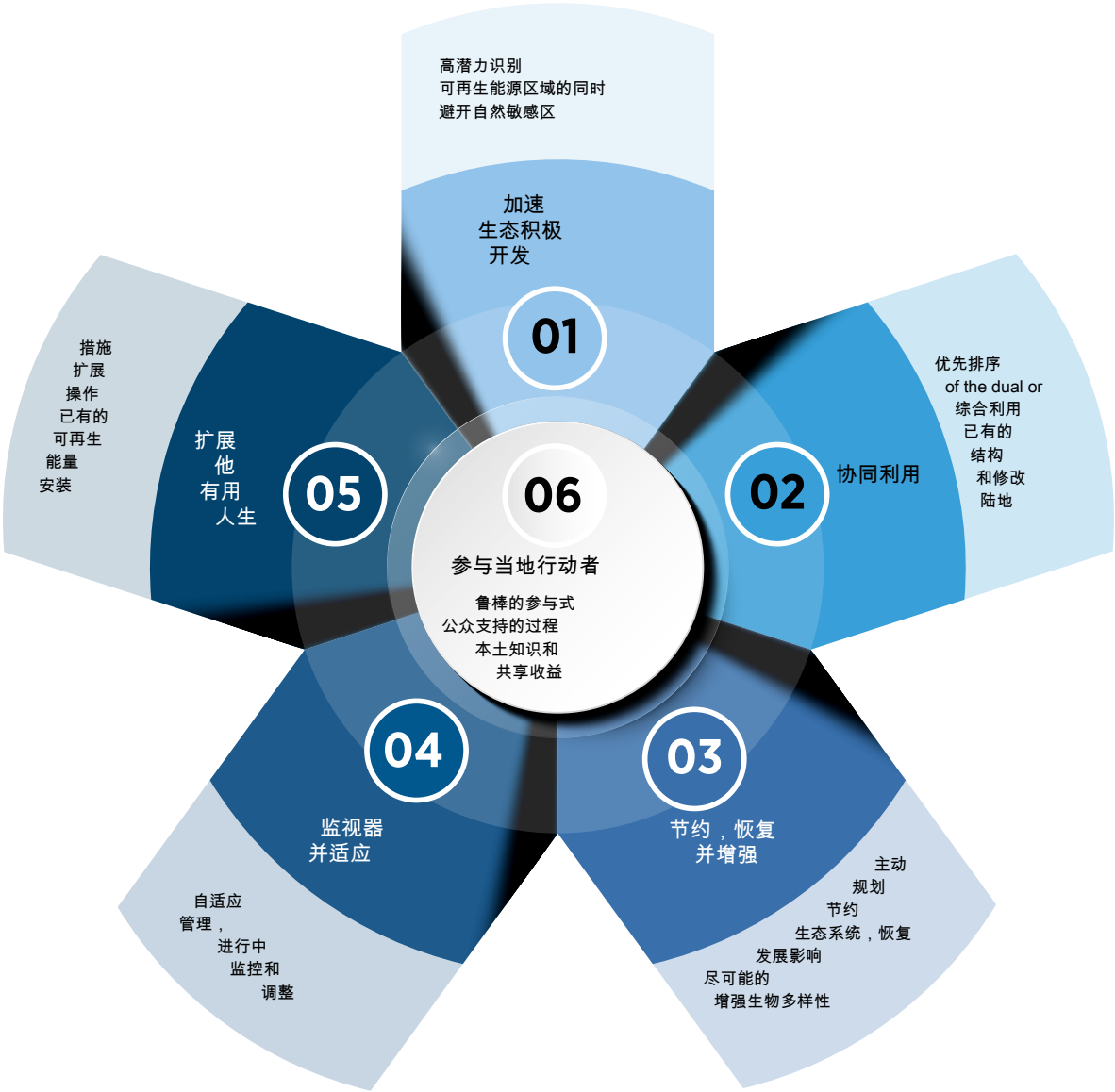
在太阳能光伏发电部署中，环境影响评价通常是在许可和审批过程中必须的步骤。作为一种分析过程，用以审查项目的可能环境影响，环境影响评价已被主要的开发银行和太阳能光伏电站装机容量较大的国家广泛采用，以帮助识别潜在的环境影响和缓解措施。

对于主要的光伏企业而言，环境影响评价也是其关于ESG相关绩效报告的关键组成部分。然而，在许多情况下，现行的环境影响评价政策无法在特定且复杂的背景下捕捉所有可能对野生动物和生物多样性产生的影响。对潜在敏感性的早期了解对开发商有益。

因为它允许他们在实体建设开始之前识别潜在问题（IUCN，2024年）。通过这种方式，太阳能光伏项目公司可以确保从一开始就将适当的缓解措施纳入项目设计。这种理解还使可再生能源项目能够避免并尽量减少与野生动物的潜在接触以及自然的不利影响。

总体而言，太阳能光伏电站的选址应遵循一些基本原则，例如避开具有战略性生态或生物多样性价值或高生产力农田的保护区域。新的太阳能项目也可以部署在受扰土地，如退化的土地或废弃的采矿场。在退化土地面积较大或面临荒漠化威胁的国家，在这些地区部署光伏项目也可以用于加速生态系统的恢复和控制荒漠化及沙尘暴。行动连接能源与自然的联盟（CLEANaction）和国际可再生能源署（IRENA）行动联盟已为自然正向能源项目的选址和许可制定了六项关键原则（见图14）。这些原则呼吁强调保护、恢复和增强生态系统的主动措施，并通过参与式过程让当地参与者参与，以确保公众支持、共享利益和当地知识的整合（IRENA行动联盟，2025）。

图14 六项自然正向能源选址和许可原则



来源：(国际可再生能源署行动联盟，2025)。

用于识别目标可再生能源场区生物多样性风险和价值的空间规划和分区工具，对于帮助开发商避免高影响至关重要。鉴于环境条件和生物多样性，许多现有的制图工具可以帮助太阳能项目开发商在规划过程的早期识别潜在的相互作用和对当地环境和生物多样性的影响。这些现有工具通常使用地理信息系统（GIS）来整合、分析和显示空间和地理数据，作为评估对太阳能光伏电站的建设、运营和维护敏感的生态群落的依据。例如，西班牙国家级可访问的生物多样性制图，它提供给利益相关者，不仅涉及保护区，还涉及鸟类物种的存在和分布。这些制图工具集成了鸟类物种及其栖息地、野生动物走廊和对于濒危物种恢复计划重要的区域等敏感性类别的数据。

许多其他工具已出现，以帮助开发者在光伏电站选址时整合环境考量与生物多样性。例如，综合生物多样性评估工具是一个制图和报告工具，整合了三个全球生物多样性数据集的访问权限：受威胁物种红色名录、保护区数据库以及关键生物多样性领域世界数据库。该工具可帮助光伏电站开发者和规划者了解目标区域的生物多样性状况，包括物种丰富度——通过特定地点的物种数量衡量——以及该地点对物种的相对重要性（IBAT, 2025）。这些工具可以帮助项目开发者和利益相关者确定影响最小的最佳地点。然而，由国际组织开发的大多数这些平台无法为每个国家或地区的光伏项目提供定制化建议，这需要由当地专家进行现场评估来补充。

一个生物多样性敏感性地图或类似工具可以帮助开发者和利益相关者评估特定地区的生物多样性和自然风险，使他们能够识别对当地环境和生物多样性风险较低的区域进行项目部署。国际鸟类联盟（BirdLife International），世界上最大的国际保护组织之一，开发了一个名为Avistep的工具，用于提供鸟类对不同类型能源基础设施（包括风力发电厂、太阳能光伏设施和架空输电线）的敏感性详细空间评估（López and Allinson, 2022）。该工具可支持项目开发者在项目选址层面进行潜在生物多样性影响的筛选和评估，从而帮助开发者识别未来太阳能光伏电站选择的较低风险区域。然而，此类工具目前仅在肯尼亚、埃及、泰国、越南等少数国家可用。需要付出更多努力使其向更多国家地区推广。



3.2 施工期间影响减轻

在太阳能光伏项目施工期间对环境和生物多样性的破坏可以通过采用环保实践来避免和减轻（见图15）。

图15 施工过程中避免和减轻影响措施



对施工时间的仔细评估可以通过避免在本地野生动物的繁殖季节或迁徙路线期间进行施工，从而帮助避免对野生动物造成重大威胁。它还应该避免在土地清理之后和植被恢复措施实施之前，降雨量可能增加土壤侵蚀或洪水发生可能性的季节。施工期间，现场人类活动和车辆应尽量减少废物产生和污染，包括废水和车辆噪声。例如，混凝土基础仍然是目前安装太阳能光伏项目的主要选项之一。从现场混凝土搅拌改为预制混凝土，或从混凝土基础改为螺栓基础，可以避免安装过程中大部分的环境干扰——包括噪声、灰尘和水污染。

植被恢复是减轻环境影响的另一项重要措施。由于开垦土地，植被覆盖率通常在建设期间受到影响。如果采取适当的恢复措施来支持环境恢复，植被可以恢复到光伏电站部署前的相似水平。此后，当地的环境和生物多样性状况可能得到改善，达到比以前更高的水平。植被在运营期间的维护方式对生物多样性成果有显著影响。此外，如果太阳能光伏电站部署在退化土地上，并伴有恢复措施，就可以利用机会来增强当地生物多样性。

野生动物的规划走廊和通道是另一项重要的缓解措施。在美国北卡罗来纳州，建议大型太阳能农场（面积超过40公顷）应保留太阳能设施内的无围栏野生动物通道，以连接潜在的野生动物栖息地。这些通道应为地面鸟类和爬行动物保留30米宽，为更大的哺乳动物（如鹿和猞猁）保留45-90米宽（TNC，2023年）。如果根据当地野生动物评估进行适当设计，太阳能光伏电站周围的透光围栏可以提供另一种支持野生动物移动的方案。

越来越多的太阳能公司开始采用其他环保做法。例如，太阳能电站可以从深挖转向地面布线，从而避免深挖相关的土地影响。对于主要的太阳能光伏公司来说，用影响较小的替代方案来取代光伏基础施工过程正变得越来越流行。之前的做法是挖掘以埋设混凝土基础。改为使用螺旋桩基础可以避免大面积挖掘及其对土地的破坏（Zhou ., 2019）。等

3.3 协同运行与维护

农业光伏一体化

部署在植物上方的太阳能光伏板显著影响了影响植物生长和繁殖的几个关键因素：温度、直射阳光、湿度和水。这些因素也是农业生产活动的主要考虑因素。仔细评估影响表明，将太阳能光伏植物与农业生产活动相结合可以创造协同效益。

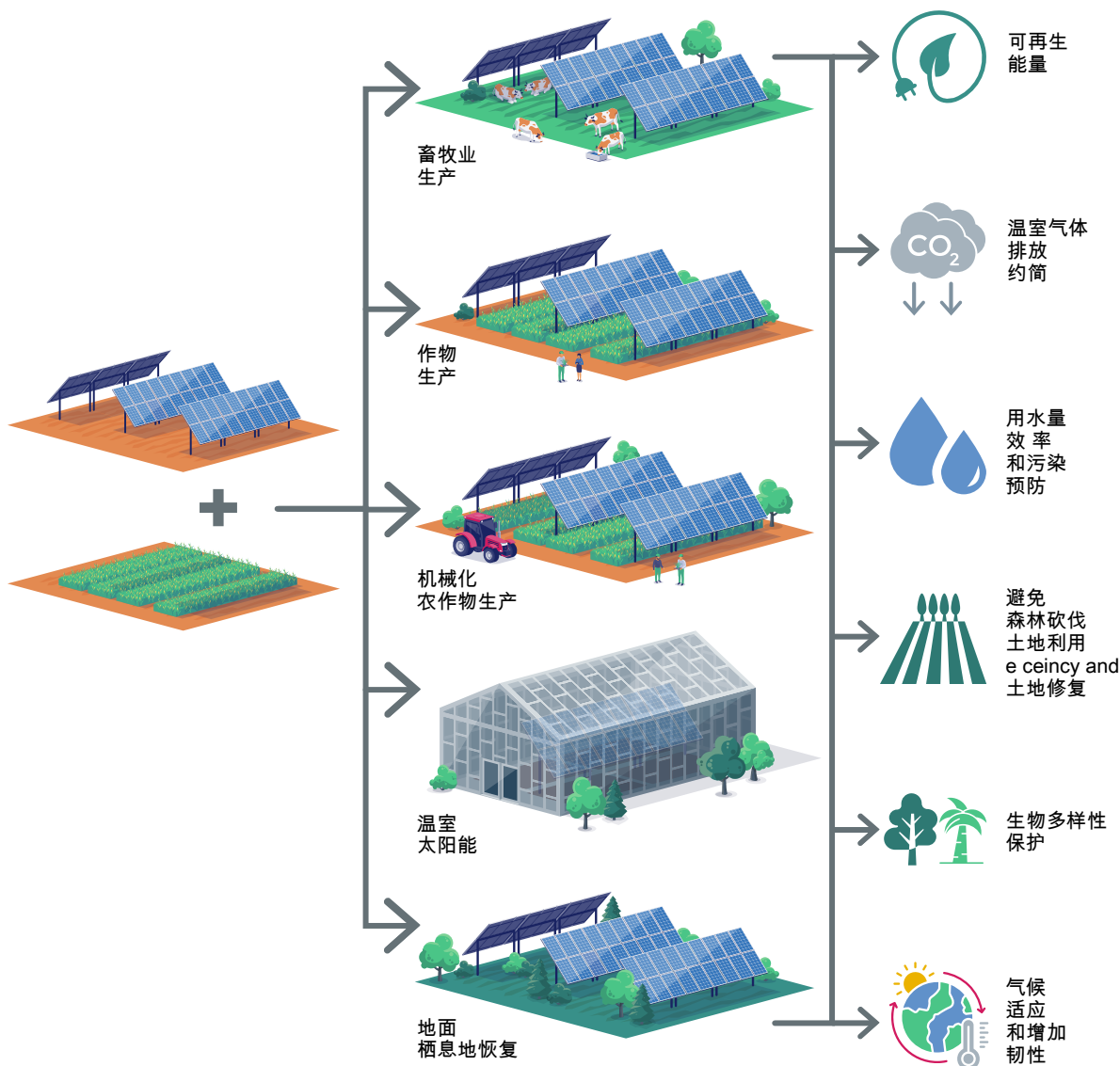
将太阳能光伏电站与农业活动相结合通常被称为农业光伏一体化。³ 这涉及到将太阳能光伏电站和农业活动整合在同一个土地上，包括生产作物、蔬菜、水果和用于医疗目的的草药（见图16）。这种整合使得可再生能源发电和农业生产能够同时在同一个土地上收获。农光互补（Agrivoltaics）还有许多其他术语，包括“农光互补”和“双用太阳能”（Lidoro, 2022; Macknick ., 2022）。然而，值得注意的是 等
光伏农业应基于环保农业实践⁴ 并利用其环境协同效益及其附加值以满足人类食物需求（麦考尔., 2023） 等



³ 在某些市场中，农光互补试点项目小于1兆瓦。

⁴ 非环保型农业实践包括过度使用合成肥料和农药等。

图16 太阳能光伏和农业整合的潜在协同效益



来源：(基林达, 2024)。等

农业光伏可以在多种方面使农业活动受益，包括减少灌溉用水需求；提高作物存活率；以及增加作物、水果和蔬菜的生产力。太阳能光伏与农业相结合可以通过减少光伏板遮蔽造成的蒸散量来减少灌溉用水量（见第2章）。正如对法国、希腊和西班牙的三个运营项目进行监测所证明的那样，农业灌溉的用水量可以减少20-30%（欧洲太阳能联盟，2025年）。在联合共和国坦桑尼亚，由谢菲尔德大学支持的一项试点项目中，太阳能光伏电站与当地作物生产相结合。与常规做法相比，在面板下的豆类作物显示出60%更高的存活率，这表明在当地的气候条件下，农业光伏中的作物恢复力得到了改善。在农业光伏项目中，对作物和蔬菜生产力的影响取决于当地气候和植物类型。需要高强度阳光的作物——如小麦、玉米和水稻——在不同生长季节显示出不同的产量。相比之下，绿叶菜如生菜和菠菜以及根类作物如土豆、萝卜、甜菜和胡萝卜显示出产量的增加（Chirinda, 2024）。等

农业光伏在欧洲、印度和美国提高了农业生产力。在美国，亚利桑那州的一个示范项目表明，一些水果和蔬菜生产（例如 chitepin, 例如番茄的产量是在相同气候条件下但没有太阳能电池板的两到三倍（Pigott, 2019年）。在德国，一项研究发现芹菜在太阳能电池板下的产量比对照区高15%，而小麦在太阳能电池板下的生产力可以提高3%。在意大利，农业光伏系统可以产生

农业地区相比无太阳能板的地区，生产力高出20%至60%，具体取决于作物类型。在意大利，用于饲养牛的饲料种植在太阳能板行间，其产量在板下增加了40%，行间增加了18%；草莓在板下增加了14%。同时，意大利茄子和辣椒的收成分别增加了30%和60%（Enel，2023）。印度马哈拉施特拉邦的一项农业光伏试点项目表明，遮阳效应和蒸发减少可使番茄和棉花的产量提高多达40%（Fraunhofer ISE，2019）。

在缺乏电力供应的地区，农业光伏系统可以与太阳能灌溉相结合，提高干旱地区小农户的农业生产力和抗风险能力。这些系统让农民有机会在干旱季节灌溉作物。在某些情况下，额外的太阳能灌溉可以将生长季节从三个月延长到六个月，从而显著提高农业生产力。

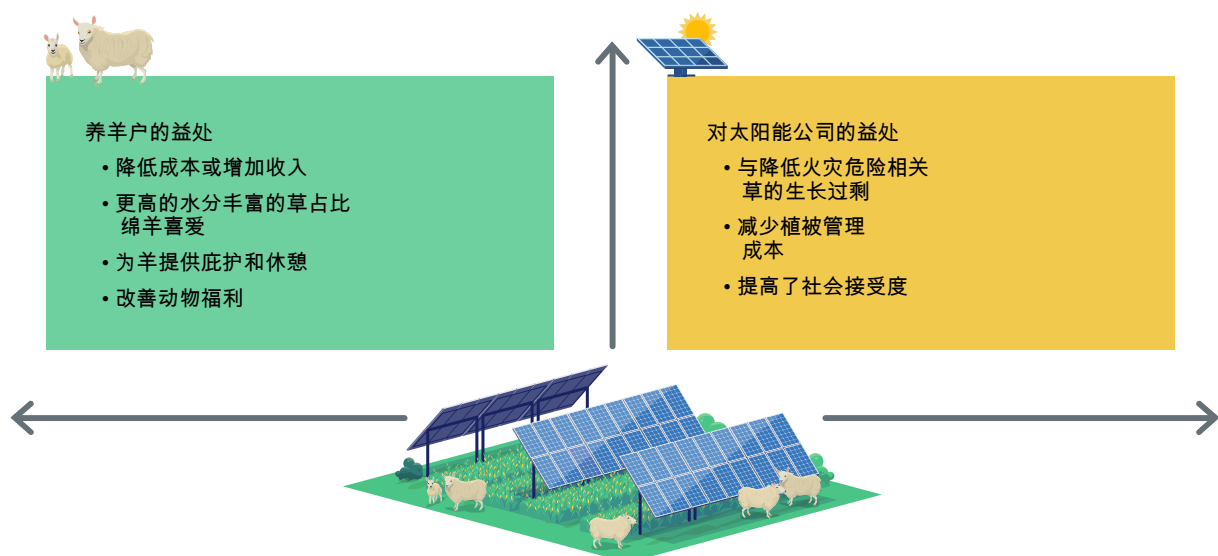
农业太阳能光伏电站需要修改设计和安装，以实现农业活动和机械的运行。这些修改需要基于当地作物类型、地形和农业实践。在欧盟和美国，行业协会和研究所已为行业利益相关者制定了指南。然而，在大多数其他市场，开发商可能会面临缺乏经验或安装成本增加相关的障碍（参见第四章）。

太阳啃食

由于太阳能电池板会导致需要控制的额外植被生长，将太阳能光伏电站与放牧牲畜（如绵羊、山羊、牛、家禽等）相结合也能带来协同效益。例如

放牧与太阳能光伏发电相结合已成为许多太阳能光伏电站的共赢实践（见图17）。通常，太阳能光伏电站内的植被需要定期管理，以防止过度生长的植被遮挡面板或在干燥季节造成火灾隐患。传统的植被管理方案，包括除草剂和割草，既不环保也不经济。因此，放牧被用来管理太阳能电站的植被。在中国共和县，SPIC-拥有的电站与16名农民签订了协议，允许这些农民自2015年以来在太阳能农场中放牧超过600只羊（张，2024年）。在美国，太阳能农场植被管理的放牧成本（每年每公顷279美元）低于割草成本（每年每公顷299美元）或除草剂成本（每年每公顷724美元）（斯图尔特，2025）。等

图17 太阳能放牧的潜在协同效益



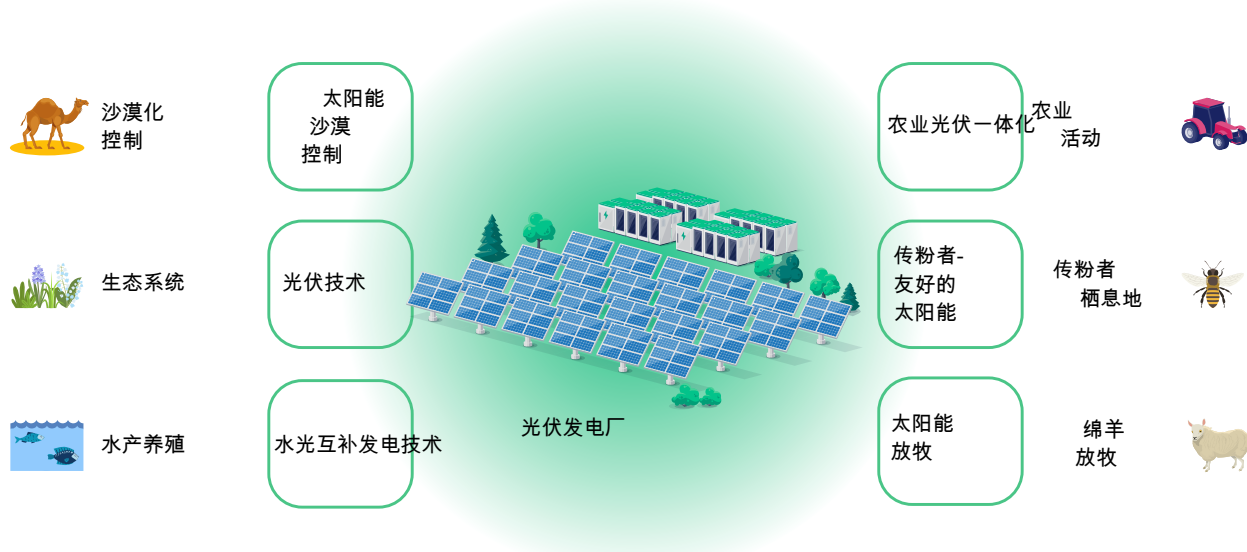
在太阳能电池板下放牧也能使农民受益，因为它们下面的植被会随时间发生变化，从而对牛更适宜，并增加肉和牛奶的产量。这些效益已基于对中国和美国太阳能电站的指标监测得到证实。在美国，由于水分的变化，一种含水量较高、易被食用、受牲畜偏好的牧草（禾草属）从对照区的7%增加到太阳能光伏电站的50%。这意味着由于太阳能光伏电站，牛喜欢的牧草可以显著增加（ Hassanpour Adeh ., 2018 ）。 等

在太阳能辐射和空气温度高的地区，太阳能放牧也能改善牲畜福利，因为这些面板可以保护动物免受热害。

太阳能生态保护

通过在其运营和管理中考虑对自然的影响，太阳能光伏电站还可以促进生物多样性增强，包括鸟类和传粉昆虫种类的增多和种群数量的增加（见图18）。在英国，调查表明太阳能光伏电站可以显著改善当地生物多样性。当太阳能电池板周围的草在夏季不经常被割或放牧（以保持其短），以使其允许更长的草和野生花卉的存在时，太阳能光伏电站可以容纳比其他耕地多六倍的植物和动物物种。特别是，太阳能农场的鸟类丰富度也可以是耕地中的两倍（Copping，2025）。这种观察到的生物多样性增强主要与 等提高太阳能光伏电站的结构异质性，这可以进一步增强生物多样性，从而吸引更多的昆虫和鸟类。

图18 与太阳能光伏电站和当地环境及生物多样性相关的术语



传粉者，如蝴蝶和蜜蜂，可以是生态保护的关键指标，并在农业活动中发挥重要作用。在过去的几十年里，由于杀虫剂、入侵物种、寄生虫、疾病和气候变化 (Bramen, 2020) 的威胁，它们经历了显著衰退。适当管理的太阳能光伏电站可以为传粉者创造合适的栖息地。在美国，太阳能光伏电站下种植传粉者友好型植被已被证明比没有面板的区域传粉者供应量增加三倍 (Leroy, 2025)。此外，传粉者数量的增加等并且本地传粉生物的多样性能改善这些生物为附近农业和整个生态系统提供授粉服务的质量，包括鸟类栖息地的改善。例如，在德国，与没有面板的区域相比，agrivoltaic 项目中的传粉生物丰度提高了33%至88% (Ludzuweit, 2025)。

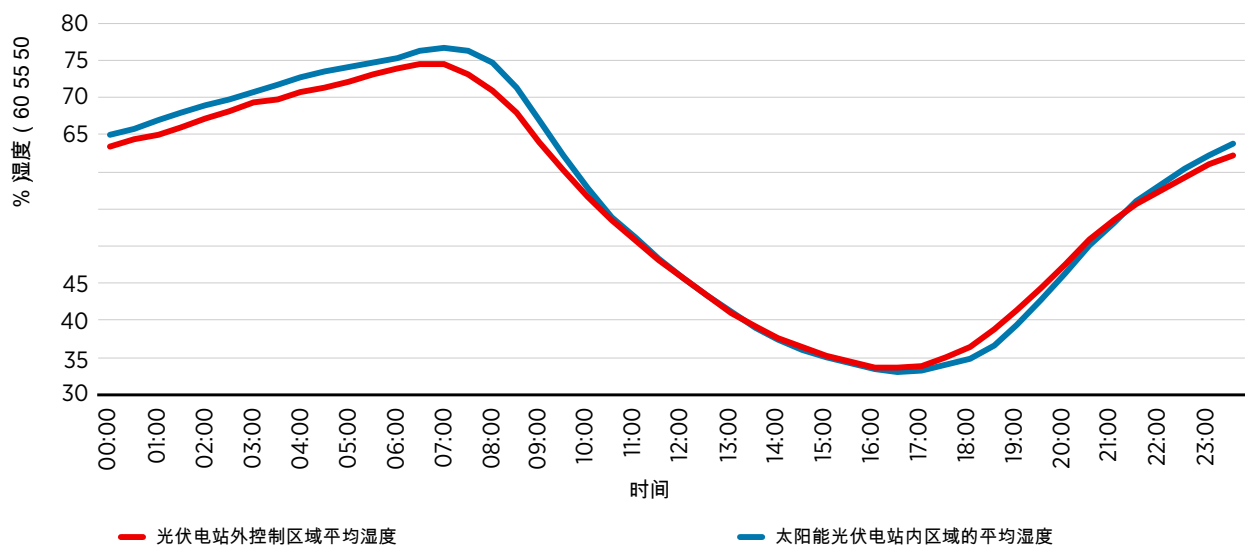
太阳能用于恢复退化土地和防沙

通过减少蒸发、调节温度和改善土壤条件等多重影响，大型太阳能光伏电站可以帮助恢复退化土地，包括受荒漠化影响的地区、废弃的矿区以及棕地。

尽管荒漠对生态系统和特有生物多样性具有重要价值，但荒漠化过程通常与土地退化相关。这些土地的大多数先前用于农业活动、牧场或林业，但由于不可持续的做法而变得退化。干旱地区的退化土地会引起强风驱动的尘暴和沙尘暴。当在受土地退化、荒漠化和沙尘暴影响的地区部署太阳能光伏项目时，它们可以通过恢复退化土地、防治荒漠化和控制沙尘暴来提供额外的协同效益。

在干旱地区，受荒漠化影响的退化土地，高太阳辐射和温度已严重威胁植被的生长以及这些植物所支持的生物多样性。当公用事业规模的太阳能电池板部署在这些地区时，电池板下的温度可以略微降低，湿度与土壤湿度可以增加。这些因素与供水条件相结合时，更有可能使植物生长或恢复。风速的变化是预防荒漠化和沙尘暴的关键考虑因素。降低太阳能电站的风速可能会减缓太阳能电池板覆盖区域的荒漠化。这可以通过太阳能电池板下地表植被在土壤条件改变且定期清洗时进行灌溉会增多的现实情况得到进一步加强。综合所有这些因素，太阳能光伏板可能在控制荒漠化方面发挥至关重要的作用。

图19 太阳能光伏电站内外湿度差示例，2024



源码：

(RCPEIE, 2025).

注意： 1) 数据由中国青海省光伏发电厂收集，由高原能源产业与生态研究中心收集；2) 数据显示2024年平均湿度差。PV = 光伏。

遭受荒漠化和频繁沙尘暴影响的地区可能从这些潜在效益中受益，这些效益得到了对当地生物多样性和生态系统进行仔细评估的支持。在中国，一座850兆瓦的太阳能光伏电站（到2025年已扩建至2.2吉瓦）在易受荒漠化威胁的果洛县退化地区开发。该地区太阳能光伏电站的运营对植被和生物多样性产生了重大影响，自2015年以来进行了持续监测。与太阳能光伏部署相关联，该地区的总体年平均空气湿度在早晨增加了3%（见图19）。20-40厘米以下的土壤温度降低了约17%，太阳能电池板下方10-50厘米（约9%）的土壤湿度比没有电池板的地区（约4%）翻了一番（周某，2019年）。此外，太阳能电池板使太阳能光伏电站的风速降低了53%。另一个等

2011年至2018年的卫星图像对比发现，中国北方部署的30%光伏电站（覆盖约102平方公里退化及荒漠化地区）植被生长和覆盖显著改善（Xia ., 2022）。估计利用约 等

11%的退化土地和荒漠化地区可能在2025年满足全国电力需求（王，2024）。 等

在印度，太阳能光伏项目已证明其适用于干旱和半干旱地区部署，从而为潜在控制荒漠化和退化土地提供了最大协同效应(Rahman ., 2023)。在美国加利福尼亚州，一个部署在西莫哈韦沙漠的太阳能光伏电站 等

也显示出植物和动物物种丰富度增加，这种效应在干旱年最为强烈（Tanner ., 2020）。然而，太阳能光伏电站对荒漠化进程的影响可能并不 等

在任何地区或国家都是相同的。需要进行仔细评估和选址选择，以确保协同效益并避免对沙漠生态系统造成不希望的影响。

漂浮式光伏

漂浮式光伏项目涉及将太阳能光伏设施安装在水面，并且可以与水产养殖活动相结合。它们可能影响水生生态系统，有可能减少水分蒸发和有害藻类生长，同时也能提高节水工作，特别是在干旱地区（Forester ., 2025年）。这些项目可能为承建水域和 等

太阳能发电，减少面板积尘、藻类生长和蒸发速率。与部署在高楼环绕的区域相比，它们还可以减少遮阳损失。

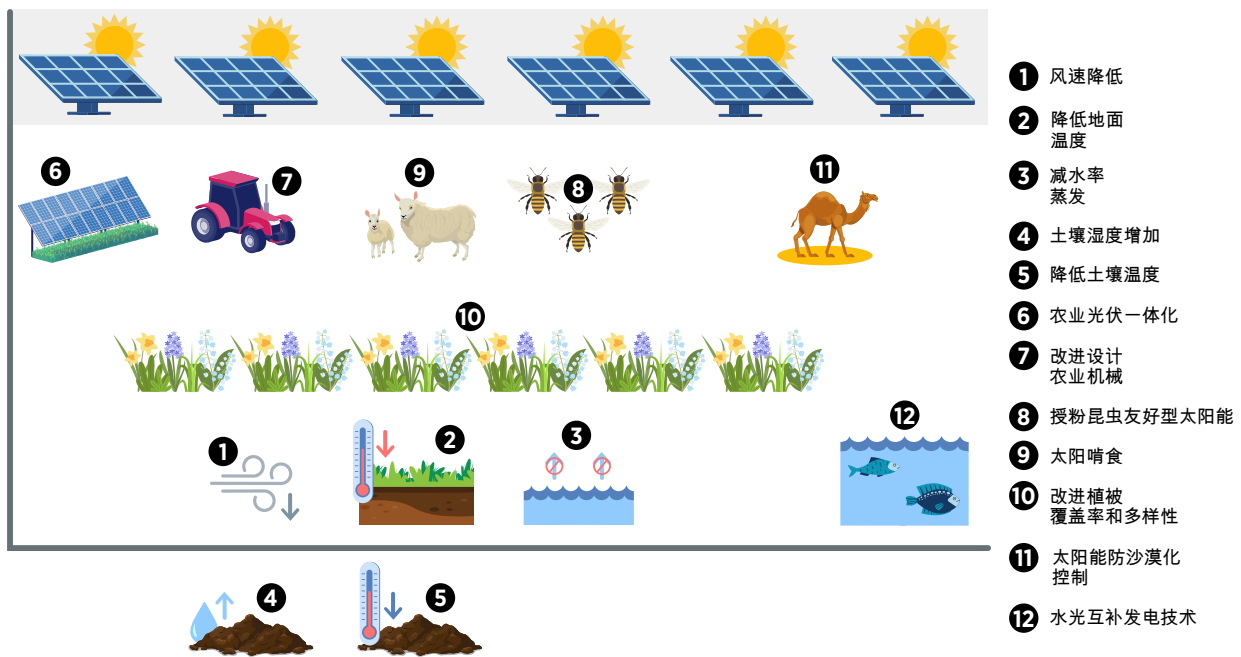
此外，通过减少强太阳辐射的暴露，漂浮式光伏项目可以改善水质并有利于水生生物（Song ., 2024）。在荷兰，一个27.4兆瓦的光伏项目是 等

在 Zwolle 附近的沙坑水面部署。超过三年的监测显示，浮式太阳能电池板（SolarPower Europe, 2022）下方的水生生物数量和多样性增加，包括鱼类、脊椎动物、贻贝和海绵。在中国东营市，一个200兆瓦的浮式太阳能光伏项目与水产养殖活动相结合。它使对虾养殖的生产产量增加了50%（WRI China, 2025）。

3.4 其他解决方案和实践

水资源管理可以成为结合农业、防沙或生态保护活动的太阳能光伏项目的关键因素（见图20）。这包括节水灌溉技术、水资源存储和雨水管理。如果管理不当，太阳能电池板收集的雨水可能会增加土壤侵蚀的风险。收集这些雨水并用于太阳能农场的植物可以是一个双赢的解决方案。焦特布尔（印度）、东川（中国）和莫罗戈罗（联合共和国）的试点项目均表明，增加收集太阳能电池阵列雨水的设施可以成为水保护和农业光伏灌溉的显著解决方案。这也有助于降低与光伏板相关的径流风险。

图 20 太阳能光伏电站与土壤、风和温度的可能相互作用及协同效益



光伏系统产生的能量可以用于为水泵或水处理系统供电（例如沿海地区的海水淡化）。太阳能灌溉是其中最成熟的应用之一，正在被采用 例如

为了改善供水并提高农业生产力。目前，已有超过670兆瓦的太阳能光伏电力用于灌溉泵项目，其中大部分位于亚洲。在印度，与依赖降雨的灌溉相比，太阳能抽水灌溉可以使农民的收入增加50%。在卢旺达，太阳能抽水灌溉可以使农业生产力提高超过30%（Energy4Impact，2021；GOGLA，2019；IRENA和FAO，2021）。

为促进可持续实践，需要本地化解决方案。这些解决方案的所有影响都与当地环境相关，包括气候、地理条件和社会经济状况。每个解决方案最合适的应用地点应基于当地条件。

在农光互补的情况下，适宜性也与当地市场相关，农民可以在此出售农产品，或环境专家可以参与项目规划。对于防沙治沙和退化土地恢复的太阳能电站而言，措施的成效可能很大程度上取决于气候和降水。经验表明，对于年降水量超过400毫米的地区，植树造林和自然植被恢复可能就足够；而对于年降水量不足200毫米的其他干旱地区，则需要更高效的灌溉技术、本地植物再植以及防沙措施（Shang，2025）。局部解决方案也表明 等使用本地植物具有必要性，因为它们能节省维护成本，减少除草剂的需求，并减轻土壤侵蚀问题。在美国，太阳能光伏电站中部署的本地植被已导致生物多样性和丰富度提高（TNC，2023）。

环境和生物多样性相关利益相关者以及当地社区应在整个太阳能光伏项目过程中积极参与。环境组织和研究机构可以在建设前的规划过程和影响评估中参与，以及在运营期间参与土壤、水和生物多样性监测。在西班牙，一个部署在Sierra Brava水库的浮式138兆瓦容量太阳能项目已经涉及保护组织和专家，以支持监测和减缓措施，以减轻该项目对鸟类和生态系统的影响。这种持续的合作也增强了当地社区和市政当局的信心和参与度。

国际保护组织通过跨部门平台积极推广解决方案和最佳实践，以支持太阳能光伏公司进行环境友好型规划和运营。国际自然保护联盟于2021年发起了“为自然可再生能源”（REN）联盟，将能源利益相关方和保护组织聚集在一起，为开发商和政策制定者提供指南、工具和最佳实践，以减轻太阳能和风能项目相关的生物多样性影响。同年，世界自然基金会、国际可再生能源署、国际鸟类保护联盟和其他利益相关方共同推出了CLEANaction，旨在通过知识交流、推广指南和政策倡导，最大限度地减少能源转型对环境的影响。目前，更多类似的区域和国家平台正在开发中，以积极推广现有解决方案并支持可持续实践的发展。

3.5 从环境到社区

太阳能光伏电站的环境影响直接影响生物多样性和当地社区。部署在偏远地区的太阳能光伏电站可以为附近的社区提供可靠的清洁电力，提高他们的生活质量和适应能力，同时为它们生产的作物增加经济价值。这些电站还可以为当地工人提供农业光伏或太阳能放牧所需的工作岗位，为当地承包商（例如重新造林或植被管理）创造新市场，并使土地所有者的收入从能源中多样化 例如生成和农业生产。

太阳能光伏与环境相结合能为当地社区提供季节性就业岗位。在中国共和县，当地村民在太阳能光伏电站工作，清洁面板、管理植被并完成其他任务。在内蒙古（中国）的SPIC 70兆瓦电站，在太阳能板下（覆盖约160公顷）种植本地物种需要约20名当地人工作两个月。为避免秋季火灾风险而割干草需要这批类似的劳工再额外工作一个月（SPIC，2025）。将太阳能光伏电站与环境相结合也可能给当地社区带来间接效益。例如，在美国，研究发现将太阳能光伏电站部署在棕地能使其周边1.6公里范围内房屋财产价值增加5-15%（TNC，2023）。

农民可以从参与整合环保实践（如放羊）的太阳能光伏电站运营中获益。在加拿大，一项研究发现，结合绵羊放牧的大型太阳能农场可以使农民的经济盈利能力提高10%至40%，具体取决于绵羊在市场上的销售方式。这比农业平均水平（7.3%）要高。这考虑了所有投资，包括育种、设备、车辆和人工成本（Gasch，2025）。等

在早期阶段，必须为受可再生能源项目影响的当地社区建立透明且具有意义的本地咨询程序，并采取措施允许它们在成本过高而收益过低时撤回同意。适当和透明的公众参与通过确保潜在的环境问题（包括相关法律问题）得到早期解决，从而加速规划进程（国际可再生能源署行动联盟，2024年）。此外，让当地社区参与进来对于提高对可再生能源地方收益的认识，以及识别和减轻潜在风险和误解非常有益（欧洲环境局，2022年）。

采用障碍

第四章

环保实践与协同效益的利用

一个环境友好和可持续的太阳能光伏项目需要恰当评估对环境和生物多样性的潜在负面影响，并采取必要的措施来避免、最小化和减缓这些影响。它还包括利用太阳能光伏项目运营与当地环境之间的相互作用，并为生物多样性创造协同效益的实践。在全球范围内，据估计，现有太阳能光伏设施中只有极小一部分整合了与其与当地环境相互作用的适当考虑和解决方案，无论是防止还是减缓对当地环境和生物多样性的影响，还是通过将太阳能光伏设施与农业、经济或保护相关的活动相结合来收获协同效益。这些可持续实践中的大多数仍处于试点阶段。它们已在包括中国、欧洲、印度、日本、肯尼亚、坦桑尼亚联合共和国和美国在内的市场上得到报道。

在大多数发展中国家，光伏项目的影响和效益主要存在于学术讨论的范畴或有限的实验规模中，通常与大学和研究所相关，并涉及欧洲专家的参与。这些可持续实践在少数几个主要光伏市场之外的缓慢扩张可归因于各种壁垒。这些壁垒包括高额的初始成本、知识差距、土地利用政策不明确或不一致、与小农户土地权利相关的挑战，以及缺乏行业标准（见图21）。

图21 采用环保型太阳能光伏运行的关键障碍

额外费用	知识和意识差距	不明确或不一致的土地利用政策	挑战与...相关小农户农民	缺乏工业标准
更高成本用于自适应PV建设和设计	不明长-term impacts on 生态系统，例如作为对水，沙漠或海底生态系统	土地利用政策可能不清晰足以指引可再生能源产业在潜在土地上农业光伏用地	小农户可能失去终身教职权利	缺乏标准自适应构建过程和材料为本地定制条件
额外费用用于维护产生的环境因素	不明确的能量性能和经济效益	分类不明确土地使用变化农光互补状态	土地增加租赁价格小农户	缺乏标准整合现有环境避免和最小化工具到项目开发过程
额外费用为设备并且专业所需工作监控以及评估的环境影响	对利益相关者开发和新兴市场关于现有 solutions and 实践			缺乏标准化确保实践经济可行性

调整设备和环保实践的高成本

太阳能光伏电站，结合环境考量，通常需要额外投资来调整常用安装系统或做法，以避免和最小化环境干扰。

农业活动与光伏结合是许多市场中最可行且有吸引力的环保实践。然而，由于机械化耕作在行间的结构要求提高，成本可能增加。尽管不同地区对农光互补的清空要求并无统一标准，但低清空和窄间距的光伏设计可能不适合拖拉机和和其他农业设备。高架面板可以容纳机械设备，但也可能增加安装成本。在美国大部分地区，高于2.4米的高架面板可能不具备经济可行性 (Stewart ., 2025)。然而，行间农光互补的成本差异估计相对较小 等与集约型农光互补相比。

在欧洲，农光互补系统在每千瓦的基础上可能比传统的地面安装式太阳能发电厂贵1.3至2倍 (Rahman ., 2023)。这些较高的成本大部分是由于额外的 等投资于适应性结构和更高的安装成本。在美国，用于农业应用的 elevated solar plants 的安装成本更高，每瓦发电量从 0.07 美元到 0.80 美元不等，比同等发电量的传统地面安装 PV 系统高出 4% 至 52%。在智利，一个在太阳能电池板下种植蓝莓的试点项目可能与其他太阳能安装相比，安装成本高出 22% (Chirinda ., 2024)。在日本， 等农民还报告说，农业光伏项目的堆放成本增加了50%。

在退化土地上部署太阳能光伏电站，同时考虑环境因素，也可能带来高成本挑战。由于当地条件，在废弃矿区和Bào huì地部署太阳能光伏电站的建造成本可能会增加，这可能需要额外的基础设施施工或额外的土地处理，以确保安全并避免污染。在美国，在废弃矿区建设的太阳能农场的建造成本可能比普通绿地建设的要高10-15% (TNC , 2024)。然而，这些成本差异可能会根据系统规模或容量、土地状况、光伏组件类型和定位等因素而差异很大。

一些大型 (数百兆瓦或大于吉瓦) 光伏电站已在中国西北地区部署，以 combat 荒漠化，包括内蒙古以及青海和甘肃省份。额外的环境评估和保护措施——包括环境与生物多样性基线评估、现场环境监测设备、植被恢复、高效灌溉系统、调整的施工和布线流程以及其他相关措施——将产生数百万元至一千多万美元的额外成本。然而，考虑到规模效应，这些额外成本据估计低于这些大型光伏电站初始投资的1% (SPIC , 2025)。通过考虑与减少温室气体排放和避免负面的环境外部性相关的额外效益，这些成本关切可以进一步降低。

项目运行维护期间也可能发生额外成本。这可能包括与农光互补植物相连的雨水收集和储存系统，为灌溉提供水源。其他额外成本可能包括雨水收集管道、面板结构的额外支撑、储水设施和灌溉泵。此外，每年可能还需要进行额外工作，以防止植被和太阳能电池板之间的高湿度微环境导致的 mounting 结构腐蚀。例如，在印度，2017年在拉贾斯坦邦干旱地区安装的一个农光互补项目发现，由于湿度水平较高，结构的基座部分腐蚀速度远快于其他部位，导致额外维护成本 (Rahman ., 2023)。 等

在太阳能放牧和农光互补的情况下，对环保措施的投资可以在几年内获得经济效益。在印度，对金奈一个农光互补项目的分析发现，该项目的投资回收期为六年，而传统太阳能光伏项目的回收期为七年。

未整合农业的项目 (Anusuya) , 2024)。这些项目有更高的盈利能力 等
由于能源和作物带来的双重收入来源，与传统的地面安装光伏系统相比更具盈利能力。通过种植高价值作物，如葡萄、樱桃番茄和彩色辣椒，可以提高盈利能力。然而，这些回收期会受到许多因素的影响，包括农业产量；作物类型；用水效率；光伏板对微气候的遮蔽效应；以及安装、运营和维护的当地成本。

关于对自然长期影响的知识差距

许多主要光伏市场中的项目已经部署了试点项目，这些项目利用了光伏板遮荫以及温度、湿度、土壤和水资源条件变化的协同效益，以及植被生长和多样性的增强。然而，这些观察结果大多发生在过去几年中。随着光伏在许多新地区的快速扩张，其对生物多样性和生态系统服务的影响将持续演变，现有的项目和研究可能无法全面捕捉其对生物多样性和野生动物栖息地的长期影响。

例如，安装在水面上的光伏系统会影响到水体的温度，并且可能控制有害藻类的水华。然而，这种安装对整个水生生态系统在长期内的可能影响尚不清楚。类似地，放羊为农户和光伏系统提供了多种好处，并且已经在许多市场中得到应用。尽管如此，平衡对自然和能源的好处，太阳能光伏电站的最佳载畜密度仍不清楚 (Stewart et al., 2025)。 t
al.

用地政策不明确或不一致

不一致的部门法规和政策仍然是一个主要问题。与能源、农业、环境和土地使用政策相关的立法并不总是协调一致或配套。这可能增加可再生能源开发者的风险和成本，并阻碍可持续实践。土地使用政策涉及多个部门。土地使用政策的严格性或整合性可以阻止或鼓励太阳能光伏公司在特定类型的土地上部署项目。

在大多数国家，农业土地利用政策一直是保障粮食安全的关键措施；因此，将土地利用改变为其他用途可能具有挑战性。例如，在美国的一些情况下，太阳能电池板不能设在农业土地上，或禁止在高品质的、适合农业生产的土壤上安装 (Guarino和Swanson, 2023)。当土地利用政策缺乏关于太阳能光伏项目可以与农业活动相结合的条件以及这些项目中必须满足的标准方面的明确定义时，太阳能开发商可能会因担心罚款或法律行动而犹豫推广这些做法。

在印度，土地利用和税收法规目前区分农业和非农业活动，并对其使用和税收优惠附加了限制。由于光伏农业在几个州已经出现，现行的法规可能不如太阳能光伏项目与农业活动相结合所需的那么清晰 (Rahman ., 2023年)。另一个例子包括与漂浮式光伏项目相关的政策。由于长期- 等
漂浮式光伏的术语影响尚不清楚且可能因环境而异，国家土地利用政策可能难以跟上当地情况。在这种情况下，不一致的土地利用政策可能会阻碍在水体上开发光伏电站，包括在废弃矿场的池塘上，这些地方可以提供明确的环境效益。

与小农户相关的挑战

小农户可能面临租赁成本上升或难以获得土地承包权等问题。当太阳能光伏开发商规划大规模农光互补项目时，目标土地对小农户而言也可能具有重要意义。这些小农户可能会被边缘化，因为土地所有者可能更倾向于太阳能光伏公司提供的更具吸引力的租赁报价。例如，能源生产通常比农业活动能带来更高的回报。在德国，太阳能农场的租赁价格 (超过欧元3400/公顷，相当于美元3942/公顷) 可能比.....

正常农业活动（约300 - 400欧元/公顷，相当于348 - 464美元/公顷）（ENLAPA，2025年）。在美国马里兰州，太阳能公司的租赁费率报价可比农作物生产高出两到六倍（甚至更多）（Sorensen，2022年）。与此同时，小农户等农民可能因缺乏技术能力和技能，而在实施和维护新兴实践（如：农业光伏一体化、太阳能放牧）方面受到限制，并可能发现获取 *例如* 必要培训。为保护小农户的利益而建立的公平且包容的框架应成为政策制定者的重点考虑因素。

缺乏行业标准与指南

目前尚无关于农业光伏或太阳能放牧的标准定义或实践指南。在不同的地区，示范项目可能与当地环境密切相关并互有差异。

尽管中国的许多太阳能光伏电站、欧洲和美国的许多太阳能光伏电站已经采取措施恢复植被、保护野生动物栖息地，并将这些实践与农业活动相结合以获得经济效益，但仍然没有标准化的做法（*例如* 材料、项目设计 *例如* 为太阳能光伏公司和大多数发展中国家及新兴市场中的农民提供（建设）方案。太阳能光伏电站的建设和维护对生物多样性与更广泛环境之间的相互作用是大是小或能否最小化具有重大影响。然而，这些经验大多掌握在大型太阳能光伏投资者手中，他们在战略层面将严格的环境考量置于首位。这些大公司通常能够负担得起资源与能力，以推行评估环境影响并采取科学和数据为基础措施的试点项目。在这些领先太阳能投资者的外部，小型太阳能光伏公司和发展中国家可能难以确定建设与环境与自然相协调的太阳能光伏项目的可持续实践的关键要素。

在农业光伏和太阳能放牧，以及用于防治荒漠化的太阳能的情况下，适用于当地环境的经验和知识主要来自试点项目的运营。农民和羊主可能不知道哪些作物、水果或蔬菜最适合在当地环境中进行农业光伏。太阳能光伏公司也可能需要时间来探索允许机械操作的最佳面板阵列高度、遮阳面积和间距。农业活动和羊群放牧的产量取决于植物选择、农业气候条件和面板密度等因素（Rahman，2023）。平衡等
在退化土地和荒漠化影响区域部署的太阳能项目中的水灌溉和本地植物的使用，在大多数太阳能光伏公司中差异很大。

此外，在应监测和处理哪些环境方面及指标方面缺乏标准。因此，太阳能光伏公司或独立机构的评估可能不被保护组织和非政府组织所接受。缺乏标准也会影响对长期环境影响评估的信心。



政策框架

第五章

促进太阳能光伏项目与当地环境的可持续协同效应

5.1 可持续太阳能光伏项目的总体政策框架

全球可持续发展组织呼吁太阳能光伏部署与环境保护协同增效。三大主要国际公约，包括《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)、《生物多样性公约》(CBD)和《联合国防治荒漠化公约》(UNCCD)，均呼吁在土地、生物多样性和气候变化方面做出承诺的可持续发展。这些国际努力增加了各国和地区被建议平衡能源、生物多样性和土地问题的紧迫性。可再生能源，包括太阳能光伏电站，仍然是应对当前威胁并进一步推动可持续发展目标最具前景的解决方案之一。通过可再生能源实现此类承诺和协同效益需要综合政策框架和适当的激励结构(见图22)。

图22 用于太阳能光伏与当地环境最大化协同效应的政策框架

区域 国家和 亚国家级 等级政策	长期目标和计划 平衡太阳能光伏部署 以及环境考虑因素		一致且清晰的土地利用 针对本地环境的政策	环境 影响 减轻 层级： • 规避 • 最小化 • 缓解 • 偏移
	跨部门合作 和利用了法规 可持续选址和许可 过程		综合政策法规 为了可持续建设， 操作与使用寿命终结 太阳能光伏项目管理	
	财政和税收优惠政策 可持续实践和试点 项目		政策工具，包括战略 环境影响评价 累积影响评估， 等等	
工业 解 指南	工业标准 和指南	商业模式和 最佳实践	能力建设 和培训	国际 合作： • 数据和 信息 • 标准和 最佳实践 • 金融与 投资 • 政策倡导
项目级别 措施和 工具	<ul style="list-style-type: none"> 环境影响评估 战略环境评估 空间规划工具 生物多样性敏感性制图 		<ul style="list-style-type: none"> 跨部门工作小组 for 连续监控和 适应 本地利益相关者参与 	

某些方法和原则可以帮助政策制定者和行业参与者识别最适合其当地背景的机会和驱动因素。例如，国际自然保护联盟（IUCN）界定的方法概述了在规划和设计过程中避免和减少潜在影响，并通过适应性措施减轻剩余威胁的步骤和阶段。同时，持续的利益相关者参与和保护小农的利益应成为相关政策和措施的关键组成部分，以最大限度地提高对自然和当地社区的社会经济效益。

政府战略是实现项目可持续规划的有力保障。基于协调能源与环境目标的国家级长期战略，可以向投资者发出明确信号，避免不同部门之间政策的不一致性。此类战略应得到工业标准和指南的支持，这些标准和指南可以帮助将可持续实践从试点项目扩展到更多市场。政策应防止在法律保护区域或被指定为生物多样性高价值区的部署太阳能光伏项目。项目可以在受干扰或退化的土地上部署，包括棕地和水废弃矿区。在某些情况下，公用规模太阳能电站可以作为对抗荒漠化和沙尘暴发生的选择，最大限度地提高土地恢复和太阳能发电的协同效益，正如中国、印度和美国多个项目所展示的那样。此外，需要培训和能力建设来弥合知识差距。

5.2 应对壁垒的政策和措施

需要制定政策和措施来消除现有障碍，并进一步促进可持续实践的发展，这些实践能够最大限度地减少负面影响，并促进可再生能源发电与环境保护之间的协同效益。这些政策包括综合长期规划和目标、财政和税收激励措施、行业指南和标准，以及专门的 Capacity-building 和培训计划（见图23）。同时，必须从不同部门吸纳利益相关者，以确保这些政策具有整合性、包容性和有效性。这些利益相关者不仅包括国家和地方政府的环保和能源部门，还包括环保非政府组织、研究机构、当地社区和投资者。政策和措施也需要具有适应性，从太阳能光伏项目的早期规划阶段开始，并在运营和退役过程中持续吸纳这些利益相关者。

图23 政策和利益相关者为应对可持续实践采用的主要障碍制定的政策

采用障碍 可持续实践	政策与措施	关键利益相关者
<ul style="list-style-type: none"> • 预付额外成本 改装设备 可持续建造/ 操作 • 利益相关者不知情 现有解决方案 • 不明确或不一致的陆地- 使用策略 • 缺乏技术技能或 实用知识 • 不明确的长期影响 	<ul style="list-style-type: none"> • 战略环境评估方法 • 考虑生物多样性的长期国家能源 目标 • 一致的土地利用政策 • 创新商业模式财政和财政激励 • 行业标准与指南 • 培训和能力建设 	<ul style="list-style-type: none"> • 能源部门 • 环境和生态 部门 • 空间规划部门 • 电网公司 • 可再生能源项目 开发者 • 地方当局 • 投资者 • 本地社区 • 大学和研究机构 • 环境非政府组织 • 其他利益相关方

太阳能光伏战略环境评估 (SEA)

海区环境影响评价 (SEA) 是减轻对当地环境和生物多样性影响的重要工具。虽然环境影响评价 (EIA) 已被许多国家采用为项目批准的强制性程序, 但它存在一些局限性, 必须在政策层面通过采用海区环境影响评价来弥补。国家、区域和地区层面的决策者可以使用该工具从战略层面评估环境和生物多样性影响, 包括对多年 (比具体项目大得多) 区域的评估。基于海区环境影响评价, 计划在低影响评估区域设置的项目可以申请简化、简化的许可流程。该工具为减少项目许可所需时间并为政府部门节约成本提供了一种选择。

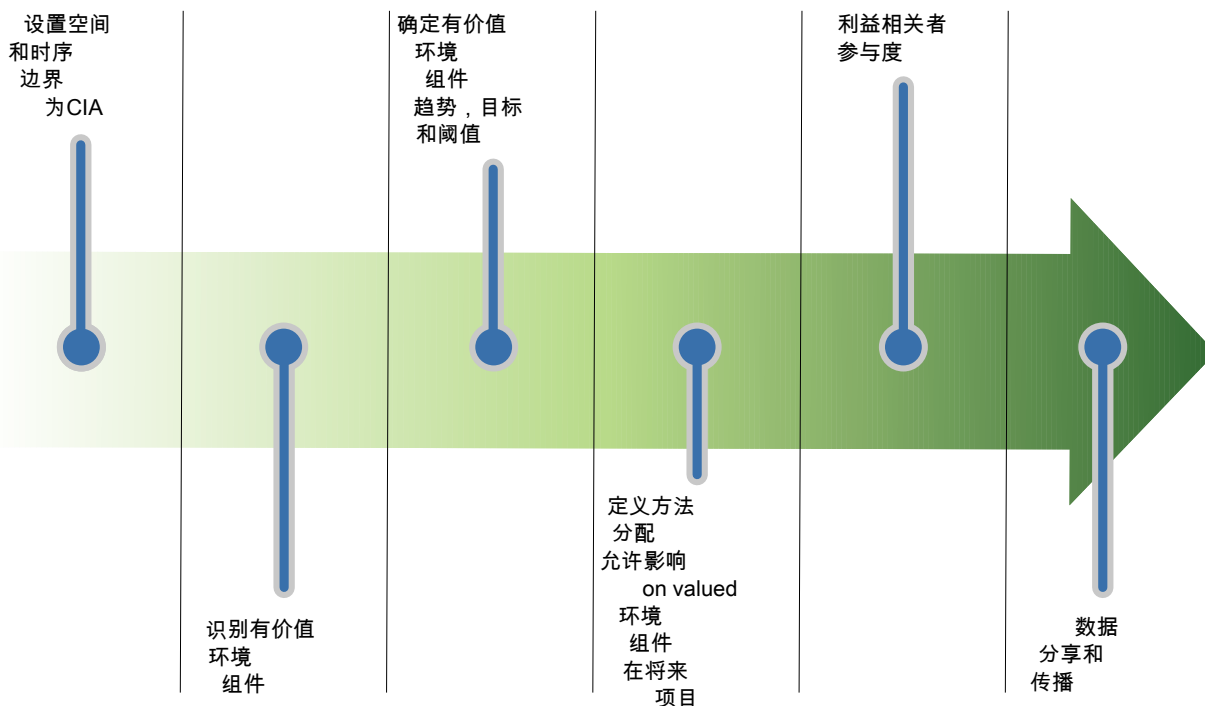
在澳大利亚, SEA已被应用于识别大型能源活动发展区域。一旦环境部门批准了某大型区域的SEA, 该区域内已确定部署加速区域的具体项目无需额外进行环境许可。在南非, 自2015年以来, 相关部门也开始采用SEA。通过SEA过程, 具有更高能源辐射水平且环境影响可识别的区域被优先用于部署新的太阳能光伏项目。在欧盟, 可再生能源指令已将某些区域标识为可再生能源加速区域或人工区域, 这有助于可再生能源项目简化许可流程。

一项累积影响评估 (CIA) 是支持政府对环境评估中战略层面工作的重要工具之一。项目层面的开发影响可以与其他发展或人类活动相结合。当这些环境影响逐渐累积时, 它们可能难以进行评估, 并且确定解决方案也可能很困难。

通过评估将影响同一生态系统的过去、现有和未来项目的环境影响 (参见图24), 环境影响评估 (CIA) 可以进一步加强整合可再生能源和环境影响的效率。基于CIA, 政策制定者可以确保对不同开发商/行业开发和计划的项目, 以及过去和未来项目及其影响进行的整体环境影响评估得到协调, 并且不超过环境的当前和未来承载力。生物多样性的CIA使政策制定者能够确定空间和时间尺度、识别有价值的环 等



图24 太阳能光伏项目规划中CIA的关键步骤



基于：(Bennun., 2024)。等

结合太阳能和环境考量的长期国家目标

虽然许多国家已经宣布了关于太阳能光伏发电部署的长期战略、计划和目标，但其中很少有基于明确、定量的环境与生物多样性结果的组合。这可能与以下事实有关：在大多数国家，能源目标和规划是由能源部定义的，而能源部可能不具备与环境或生态部门相同的一理解解和优先事项。基于太阳能光伏发电环境影响制定的长期目标需要在政府多个层级（国家、州/省和地方）之间进行协调，并汇集各方参与者和 例如 相关领域内的利益相关者解决关切并提出解决方案 (Chirinda)，2024)。等

2025年，负责长期规划、能源以及林业和土地管理的三个中国国家部委联合宣布了一个国家计划，通过在2025年至2030年间部署太阳能光伏发电系统，控制干旱地区的荒漠化和退化土地。该计划旨在到2030年在中国的退化土地和荒漠化地区部署253吉瓦的太阳能光伏发电系统，并恢复670万公顷（公顷）的退化土地 (NFGA .，2025)。在欧洲，27个欧盟成员国中有14个国家将 等

将太阳能光伏纳入其国家农业战略计划 (欧洲太阳能联盟，2022年)。这些综合战略和目标的采纳可以向工业界参与者和投资者发出强烈的信号，从而缓解对政策不一致性的担忧。

限制土地利用政策，避免对生物敏感区域造成干扰

土地利用政策一直是影响能源和基础设施项目（包括光伏电站）发展的有效工具。在考虑光伏电站的环境影响时，应制定限制性土地利用政策，明确限制在法定环境和文化保护区域或生物多样性高的区域进行开发，以避免开发活动造成破坏。

在欧盟，土地利用政策比大多数其他地区更为严格，旨在保护森林和耕地。在这种情况下，优先选择退化土地进行光伏选址，到2050年可以避免88%的太阳能光伏电站与森林和耕地之间的潜在土地竞争 (Ferreras-Alonso .，2024)。在 等

西班牙，根据土地利用政策规定，太阳能光伏电站必须进行环境敏感性分区。

国家限制政策还可以与公认的全球和区域数据库相链接，这些数据库由保护组织维护，包括IUCN红色名录™（IUCN红色名录）、世界保护区数据库（WDPA）、关键生物多样性区域数据库（KBA）和其他几个资源。这些数据库标示生物地理区域、生态系统/栖息地类型和范围、关键栖息地特征的位置、模型预测的栖息地适宜性、物种分布图以及物种出现点的经核实的记录（Bennun., 2021a）。通过这种方式，土地利用政策可以定期更新，从而提供清晰的等为开发者及利益相关者的指导。

创新商业模式财政和财政激励

尽管农光互补和光伏放牧为光伏投资者创造了经济回报，但大多数其他可持续实践都伴随着额外成本，且短期内经济回报甚微。例如，在光伏电站进行荒漠化治理、建设野生动物走廊以及改变低影响电缆和支架结构施工都需要额外成本。如果没有国家强制性要求，这些措施对太阳能企业履行环境和社会责任而言，代表着额外的支出。由于环境和生物多样性通常被视为公共利益相关事项，政府有责任在早期发展阶段激励环保实践的采用。它们可以要求在许可和规划过程中满足环保要求，并为优先采取适当措施以减少非预期环境影响、最大化协同效益的开发者提供激励。这些激励措施可以包括税收优惠和补贴、风险与信贷担保、公平能源定价、净计量电价等。

政策还应激励和鼓励能够将太阳能光伏电站的环境效益转化为中短期至长期内具有盈利能力、可持续发展的创新商业模式。例如，在中国，国有太阳能光伏投资者将投资于中国北方防沙治沙的植被恢复和灌溉系统视为其社会责任的一部分。项目运营商已开始通过收获本地植物作为药用植物（肉苁蓉）（SPIC, 2025）来探索机会。尽管这种创新商业模式尚未实现商业可行性，但它仍然是扩大可持续实践的可行方向，从而使环境影响能够转化为更高市场价值的产品。

行业标准与指南

迫切需要制定行业标准与指南，以弥补知识差距并帮助推广可持续实践。这些标准与指南可为工业参与者在关键考量、步骤和可用工具方面提供总体或具体的指导，以促进环境友好和可持续实践。它们应涵盖太阳能光伏电站的整个流程，从规划与准备到建设、运营与维护、退役及处置。

支持太阳能光伏电站实施环境措施的质量标准与指导应提供明确的定义或相关实践和可能的影响。它们应涵盖选址的程序和条件、技术要求、影响评估、安装和运行期间的健康与安全问题以及其他关键步骤和要求。此类标准和指导旨在为项目开发商、政府和金融机构提供共同的理解，对于政策制定和激励措施的有效管理至关重要。例如，美国自然保护协会已发布相关指导，旨在鼓励将可再生能源项目选址于退化土地，如矿山、垃圾填埋场和棕地，以最大程度地减少环境影响。

像这样的行业指南开始在一些市场出现。在欧盟，行业协会欧洲太阳能光伏产业协会已经开始提供指南，以实现更可持续的农光互补实践。德国也宣布了一项国家政策，以指导农光互补项目中的高度、遮荫和农业生产。然而，这些标准可能不适合新兴市场，预计到2050年，大部分所需的太阳能光伏电站将部署在这些市场。有限的金融资源和当地专业知识可能会进一步阻碍发展中市场的知识扩展。

培训和能力建设

为解决知识差距，有必要对太阳能光伏行业参与者及相关领域利益相关者进行培训和能力建设。例如，为确保阳光分布最佳而对农业光伏系统进行科学设计是一项技能密集型过程，而合理规划野生动物走廊则需要环境知识。同样地，在遮荫条件下进行作物管理需要农民具备高级技能，而旨在利用太阳能光伏电站应对荒漠化威胁的从业者则需要了解荒漠化过程、土地退化和水资源管理。

解决这些跨领域知识和信息差距需要培训和能力建设，这需要借鉴能源和环保两个领域的专业知识和经验。此类技能建设活动需要国家和地方当局的努力，以及能源和环保部门的协调资源。这些努力也受益于国际平台和组织的参与，这些平台和组织可能拥有必要的专业知识。

国际金融利益相关者的支持

多边开发银行和发展金融机构可以在填补这些空白以及支持致力于促进可再生能源项目环境和社稷保障的国家方面发挥关键作用。未来需要更多受实际经验和最佳实践支持的国际层面的指导方针。

当政府能力有限且缺乏环境法规时，国际金融机构也发挥着关键作用。它们可以支持政府建立必要的政策框架，包括法规和激励措施，以及在整个过程期间与利益相关者和当地社区进行互动。这种支持可以促进可持续的规划和选址过程，该过程考虑环境影响和生物多样性，以及项目为发展中市场带来的改善的能源获取和社会经济效益。



参考文献

- 阿努苏亚, K. 等 (2024), 农业光伏: 提升能源粮食水协同发展中的太阳能土地利用效率 *可再生能源焦点*, 卷50, 第100600页, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100600>
- 贝克尔, F. 等 (2025), 太阳能如何改变景观? 荷兰46个建成太阳能电站的比较空间分析 *可再生能源*, 第253卷, 第123621页, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123621>
- 贝努恩, L. 等 (2021a), 减轻太阳能和风能开发相关的生物多样性影响: 项目开发者的指南, 国际自然保护联盟和生物多样性咨询公司, 瑞士日内瓦和英国剑桥 <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2021.04.en>
- 贝南, L. 等 (2021b), 缓解太阳能和风能开发相关的生物多样性影响: 综合与关键信息, 国际自然保护联盟和生物多样性咨询公司, 瑞士日内瓦和英国剑桥, <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2021.06.en>
- 贝努恩, L. 等 (2024), "风力发电和太阳能发电项目及相关基础设施建设生物多样性累积影响评估指南", 国际自然保护联盟 (IUCN), 日内瓦, 瑞士和剑桥, 英国, <https://doi.org/10.2305/ehge6100>
- 布雷德斯, H. 等 (2025), "聚焦太阳能农场土地利用变化" *能源进展*, 第7卷第3期, pp. 033001, IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/2516-1083/adc9f5>
- Bramen, L. (2020) "为传粉者种植", 大自然保护协会, www.nature.org/zh-cn/magazine/magazine-articles/planting-for-pollinators (访问于2025年8月29日)。
- CBD (2024) "昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架", 《生物多样性公约》秘书处 www.cbd.int/gbf (访问于2025年2月18日)。
- 奇林达, N. 等 (2024), 农业光伏发电, 全球环境基金科学技术咨询委员会, 华盛顿特区 https://cdn.unenvironment.org/stagef/public/2025-08/Agriovoltaiacs.pdf?_ga=2.250166598.1331938171.1762233588-551159234.1761557442
- 科普平, J. P., 等 (2025), "太阳能农场管理影响着耕地主导景观中繁殖鸟类的响应" *鸟类研究*, 第72卷第3期, 第217-222页, Taylor & Francis, <https://doi.org/10.1080/00063657.2025.2450392>
- Davis, C. (2025) 森林指定指标: 受保护森林, 世界资源研究所 | 全球森林评论 <https://gfr.wri.org/forest-designation-indicators/protected-forests> (访问于2025年8月9日)。
- EEB (2022), *eeb政策简报: 利用pac情景结果制定针对欧盟自然正向可再生能源的政策措施*, 欧洲环境局, 布鲁塞尔, <https://eeb.org/library/eeb-policy-brief-on-nature-positive-renewables-building-on-the-paris-agreement-compatible-pac-energy-scenario>
- 恩埃尔(2023), "认识农光互补技术", 艾尼勒绿色电力 www.enelgreenpower.com/stories/articles/2023/05/农光互补-产量增加 (访问于2025年8月31日)。
- 能源4影响 (2021) 太阳能灌溉卢旺达: 为小农户开发新市场 www.energy4impact.org/resources/solar-irrigation-rwanda (访问于2025年10月30日)。

英格兰, K. (2025), 对2,700英亩“超级太阳能”项目的担忧, BBC新闻 www.bbc.com/news/articles/c3dn9nxx2jeo (访问于2025年10月29日)。

ENLAPA (2025), 租赁光伏系统用地——当前租赁价格、趋势和2025年潜力, ENLAPA www.enlapa.de/en/magazine/租赁土地用于太阳能系统_德国 (访问于2025年8月31日)。

FAO (2023), 2023年世界粮食安全和营养状况(世界粮食安全和营养状况), 联合国粮食及农业组织, 农业发展国际基金, 联合国儿童基金会粮食计划署, 世界卫生组织, 罗马, <https://doi.org/10.4060/cc3017en>

FAO和UNEP (2020), T 世界森林状况2020: 森林、生物多样性和人类, 粮食及农业组织与联合国环境规划署, 罗马, <https://doi.org/10.4060/ca8642en>

费雷拉斯-阿尔东索, N., 等 . (2024), 通过土地利用规划政策缓解欧盟太阳能部署相关的土地影响 *能源*, 第302卷, 第13 16-17页, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131617>

Forester, E, 等 . (2025), 浮动式太阳能光伏发电选址考量: 系统综述 *可再生能源与可持续能源评论*, 第211卷, 第115360页, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115360>

弗劳恩霍夫协会太阳能研究所 (2019), 农业光伏: 2018年炎热夏季的高产量收获, 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 ISE www.ise.fraunhofer.de/zh-cn/press-media/press-releases/2019/agrophotovoltaics-高-产量-在-2018年炎热夏季.html (访问于2025年8月31日)。

Gabbatiss, J.和Lempriere, M.(2025), 事实核查: 关于太阳能的16个误导性神话, 碳简报 <https://interactive.carbonbrief.org/factcheck/solar/index.html> (访问于2025年8月29日)。

Gasch, A. 等 . (2025), “农光互补绵羊的财务分析: 育种和拍卖羔羊商业模式” *应用能源*, 卷381, 页125057, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125057>

Gersoff, A., 和 Sistla, S. (2022), “表征大规模太阳能对撂荒农田的生态影响”, 农光互补信息中心 www.agricolclearinghouse.org/表征光伏能源在撂荒农田上的生态影响 (访问于2025年8月30日)。

GOGLA (2019), “太阳能水泵如何推动可持续灌溉” <https://gogla.org/blog/how-solar-water-pumps-are-pushing-sustainable-irrigation> (访问于2025年10月30日)。

Guarino, J., 和 Swanson, T. (2023), 新兴农业光伏监管体系: 太阳能放牧综述 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 <https://publish.illinois.edu/acesbockprogram/files/2023/03/Emerging-Agrivoltaic-Regulatory-Systems-Presentation-03.14.23.pdf>

哈桑普尔·阿德赫, E. 等 . (2018), “对土壤湿度、微气象和用水效率具有显著的光伏农业影响” *PLOS ONE*, 卷 13/1 1, 第 e0203256 页, 公开科学图书馆, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>

Hurdac, A. 等 . (2024), 一个小型太阳能公园对温度和植被参数的影响, 从Landsat 8获得 *可再生能源*, 第 221卷, 第119827页, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119827>

侯赛因, T. 等 . (2024), 浮游式光伏 (FPV) 系统对水蒸发的影响: 北卡罗来纳州开放式水库案例研究, 2024 IEEE 堪萨斯电力与能源会议 (KPEC) (pp. 1–4), 电气与电子工程师协会 (IEEE), 曼哈顿, <https://doi.org/10.1109/KPEC615.2024.10676208>

IBAT (2025), “IBAT”, 关于IBAT, www.ibat-alliance.org/about (访问于2025年10月15日)。

IEA (2025), 《可再生能源2025》, 国际能源署, 巴黎, www.iea.org/reports/renewables-2025

IRENA (2024a), 全球能源转型展望2024: 1.5°C路径, 国际可再生能源署, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf

IRENA (2024b), 光伏供应链: 市场整合的技术与ESG标准, 国际可再生能源署, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2024/Sep/Solar-PV供应链-技术和ESG标准市场整合

IRENA (2025a), 2025年可再生能源装机容量统计, 国际可再生能源署, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025

IRENA (2025b), 2024年可再生能源发电成本, 国际可再生能源署, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf

IRENA (即将出版), 能源转型中太阳能光伏的寿命管理, 国际可再生能源机构, 阿布扎比

IRENA行动联盟 (2024) 社区能源效益: 赋能全民福祉, 国际可再生能源署, 阿布扎比, https://coalition.irena.org/-/media/Files/IRENA/Coalition-for-Action/Publication/IRENA_Coalition_Community_energy_benefits_wellbeing_2024.pdf

IRENA行动联盟 (2025) 正向自然的能源原则: 太阳能、风能和电网基础设施的环境选址和许可, 国际可再生能源署, 阿布扎比, https://coalition.irena.org/-/media/Files/IRENA/Coalition-for-Action/Publication/IRENA_PAR_Coalition_Nature_positive_energy_principles_2025.pdf

irena和fao (2021), 农业食品系统中的可再生能源: 迈向可持续发展目标与巴黎协定, 国际可再生能源机构及联合国粮食及农业组织, 阿布扎比和罗马, <https://doi.org/10.4060/cb7433en>

国际自然保护联盟 (2024) 风电和太阳能开发相关的空间规划及基础设施, 世界自然保护联盟, 瑞士格朗德, <https://portals.iucn.org/library/node/52091>

IUCN (2025), 为自然而团结: 走向2045之路, 国际自然保护联盟 https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecrepattach/CGR-2025-2.5-1-Annex_1_20_year_Strategic_Vision_for_the_Union.pdf

Kosciuch, K. 等 . (2020), 美国西南部光伏电站鸟类死亡情况概述 *PLOS ONE*, 卷 15/4, 第 1-21 页, Public Library of Science, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232034>

勒鲁瓦, V. 等 . (2025), 精准太阳能跟踪器对农业用地土壤生物多样性的影响 *土壤科学*, 第 453 卷, 第 117-147 页, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117147>

Lidoro, K.(2022), 市场调研研究: 农光互补, 破晓者, 罗切斯特, <https://science.osti.gov/-/media/sbir/pdf/Market-Research/SETO---Agrivoltaics-August-2022-Public.pdf>

刘, Y. 等 . (2025), 西北地区沙漠生态环境影响光伏电站建设的研究进展 *水土保持科学*, 第23卷/第2期, 第9-17页, <https://doi.org/10.16843/j.sswc.2024025>

洛佩斯, J. S. 和 阿利斯农, T. (2022) *Avistep: 用于能源规划的鸟类敏感性工具. 技术手册*, 国际鸟类联盟, 英国剑桥, <https://avistep.birdlife.org/AVISTEPTechnicalManual.pdf>

Ludzuweit, A., 等 . (2025), 通过栖息地增强策略增强agrivoltaics中的生态系统服务和生物多样性 *可再生能源与可持续能源评论* , 第212卷, 第115380页, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115380>

马尼克, J. 等 . (2022), *美国农光互补成功的五个因素: 来自InSPIRE研究项目的经验教训*, 国家可再生能源实验室, 科罗拉多州金, www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf

麦考尔, J. 等 . (2023), *大型太阳能电站不同地面覆盖的植被管理成本和影响、可持续性*, 第15/7卷, 第5895页, MDPI AG, <https://doi.org/10.3390/su15075895>

NFGA, 等 . (2025), *三北荒漠戈壁地区基于光伏的荒漠化治理规划, 2025-2030 [中文]*, (三北沙漠戈壁荒漠地区光伏治沙规划 2025-2030), 北京, <https://lyt.ln.gov.cn/lyt/index/gnzx/2025062609112680938/index.shtml>

NIH (2023), *与燃煤电厂污染相关的死亡病例*, 美国国立卫生研究院 www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/deaths-associated-pollution-coal-power-plants (访问于2025年7月25日)。

尼斯尔, H. 等 . (2022), *太阳能漂浮式光伏系统与地面光伏系统热电性能对比——一项实验研究* *太阳能* , 第241卷, 第231—47页, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.062>

皮戈特, S. (2019) , *“农光互补在粮食、水、能源三角关系中互利共赢”*, 亚利桑那大学新闻 <https://news.arizona.edu/news/agrivoltaics-proves-mutually-beneficial-across-food-water-energy-nexus> (访问于2025年8月29日)。

拉赫曼, A. 等 . (2023), *印度农业光伏: 规模化面临的挑战与机遇*, 国际可持续发展研究院, 马尼托巴 www.iisd.org/system/files/2023-05/印度农业光伏.pdf

兰德尔-博吉斯, R. J. 等 . (2025), *双倍收获太阳: 东非农业光伏带来的能源、食物和水益处* *可再生能源与可持续能源评论* , 第208卷, 第115066页, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115066>

RCPEIE (2025) *“青海省黄河水电开发有限公司在中国青海省运营的太阳能光伏电站的平均温度、湿度、风速数据”*, 中国, 青海。

雷贝因, J. A., 等 . (2020), *可再生能源开发威胁着全球许多重要的生物多样性区域* *全球变化生物学* , 第26卷/第5期, 第3040—51页 <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>

里奇, H. (2025) , *“风力发电场杀死多少鸟类?”*, 数字中的可持续性 www.sustainabilitybynumbers.com/p/风能鸟类死亡 (访问于2025年9月22日)。

SETO (2021) , *“太阳能未来研究”*, 美国能源部太阳能技术办公室 www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/太阳能未来研究报告.pdf

商, X, 等 . (2025), *“气候生态影响机制和荒漠集中式光伏电站植被恢复模式”* *水土保持科学* , 第23卷/第1期, 第10—20页, <https://doi.org/10.16843/j.sswc.2024074>

太阳能欧洲 (2022) , *太阳能、生物多样性、土地利用: 最佳实践指南*, 布鲁塞尔, https://api.solarpowereurope.org/uploads/4222_SPE_Biodiversity_report_07_mr_09172d7230.pdf?updated_at=2022-11-09T17:10:32.819Z

宋, F., 等 . (2024), *一种渔业补充光伏电站对沿海养殖池塘近地表气象和水质的影响* *水* , 第16/4卷, <https://doi.org/10.3390/w16040526>

索伦森, A., 等 . (2022), 美国到2040年农业用地上的太阳能电站潜在选址 , 美国农田信托, 华盛顿特区, https://armlandinfo.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/03/AFT_FUT2040-solar-white-paper.pdf

SPIC (2025), 与参与太阳能光伏项目环境影响项目的中国国电集团公司 (SPIC) 专家进行面对面访谈

斯图尔特, W. C. 等 . (2025), 利用绵羊放牧进行规模化太阳能场的植被管理: 美国农业生态学见解与现有知识差距 小家畜研究 , 第243卷, 第107439页, <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2025.107439>

桑德, K. (2020), “印度智慧利用太空的‘太空运河’”, BBC新闻 www.bbc.com/future/article/20200803-太阳能运河革新印度的可再生能源 (访问于2025年10月29日)。

Tan, B., 等 . (2025), “该光伏系统在中国西北地区中午时展现出一致的冷却效果” 景观生态学 , 第40卷第3期, <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02058-4>

坦纳, K. E., 等 . (2020), 模拟太阳能电池板在沙漠地貌中创造了改变的微栖息地 生态系统 , 第11/4卷, 第e03089页, <https://doi.org/10.1002/ecs2.3089>

天, Z. 等 . (2024), 光伏电站建设对陆地环境的影响: 回顾与展望, 环境科学, 第45卷/第1期, 第239-47页, <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202301152>

TNC (2023), “低影响太阳能选址与设计原理”, 北卡罗来纳州的自然保护协会 www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/2023SolarGuidanceTNCNC.pdf

TNC (2024) 开采太阳: 矿山和棕地上的清洁能源 , 大自然保护协会 www.nature.org/zh-cn/我们在做什么/我们的优先事项/应对气候变化/气候变化故事/开采太阳-太阳能-前矿址/#hero-banner_immersive_hero-subsection

联合国环境规划署 (2021) , 与自然和解 , 联合国环境规划署, 内罗毕, www.unep.org/resources/making-peace-nature (访问于2025年10月29日)。

Wang, Y., 等 . (2024), 在中国沙漠中考虑环境因素定位合适的大型太阳能农场 环境科学 卷 955 , 第 176911 页 , <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176911>

weinand, j. m., 等 . (2025), 世界各国用于高尔夫球场比风能或太阳能的土地更多 环境研究通讯 , 第7卷/2, 第021012页, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adb7bd>

WHO (2023), “清洁空气和能源获取, 以促进人口健康和实现全民健康覆盖”, 世界卫生组织 www.who.int/publications/m/item/空气净化和能源获取促进更健康的人群和全民健康覆盖 (访问于2024年3月20日)。

WRI中国 (2025) 中国农业光伏: 协同能源-农业发展的现状、潜力和途径 , 世界资源研究所中国, 北京, <https://doi.org/10.46830/wriipt.22.00073>

沃特, J., 和克里斯蒂安, M. (2021), “太阳能的真正土地足迹”, 大平原研究所 <https://betterenergy.org/blog/the-true-land-footprint-of-solar-energy> (访问于2025年8月27日)。

夏, Z. 等 . (2022), “太阳能光伏项目助力中国变沙漠为绿洲: 卫星监测的证据” 环境管理杂志 , 第 324 卷, 第 11 6338 页, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116338>

杨, L. 等 . (2017), \"研究大型光伏太阳能农场在沙漠地区的局部气候效应\"
太阳能 , 第 144 卷, 第 244–53 页, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.015>

Yin, D., 等 . (2017), \"大型光伏电站对共和盆地沙漠地区微气候的影响\" *土壤与水资源保护公报* , 第 37 卷第 3 期
, 第 15–21 页, <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.003>

张, H. (2024) , \"海南州: 塔拉滩上牧民发‘羊’财\" *青海日报* , www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2024/03/07/030038588.shtml (访问日期 : 2025年9月1日) 。

赵, C, 等 . (2024), \"不同尺度下光伏电站的生态效应探索\"
生态学报 , 第44卷/23期, 第10964–73页, <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202309262088>

周 M, 王 X (2019) , 光伏电站工程对土壤和植被的影响 : 以甘肃省河西走廊的戈壁沙漠地区为例 *水土保持科学* 卷
17/2, 页132–138, <https://doi.org/10.16843/j.sswc.2019.02.016>

