



任务13 光伏系统的可靠性与性能

S
PVPS
P

极端天气对光伏电站的运行 和经济影响

2025



IEA PVPS TCP是什么？

国际能源署 (IEA) 成立于1974年，是经济合作与发展组织 (OECD) 框架内的一个自主机构。技术合作计划 (TCP) 的创建是基于一个信念，即能源安全和可持续性的未来始于全球合作。这些计划由来自政府、学术界和产业的6,000名专家组成，致力于推进共同研究和具体能源技术的应用。

国际能源署光伏发电系统计划 (IEA PVPS) 是国际能源署 (IEA) 内TCP项目之一，成立于1993年。该计划的目标是“加强国际合作，促进光伏太阳能作为可持续能源系统转型基石的作用。”为实现这一目标，该计划成员已开展了多种光伏发电系统应用方面的联合研究项目。该计划由一个执行委员会负责整体领导，该委员会由每个国家或组织成员各派一名代表组成，负责指定不同的“任务”，这些任务可以是研究项目或活动领域。

国际能源署光伏计划 (IEA PVPS) 的28个参与国家是澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、中国、丹麦、芬兰、法国、德国、印度、以色列、意大利、日本、韩国、立陶宛、马来西亚、摩洛哥、荷兰、挪威、葡萄牙、南非、西班牙、瑞典、瑞士、泰国、土耳其、英国和美利坚合众国。欧洲委员会、欧洲光伏协会和新加坡太阳能研究所也是会员。

访问我们：www.iea-pvps.org

什么是IEA PVPS任务13？

在iea pvps框架内，任务13旨在为致力于提高光伏组件和系统运行、可靠性和质量的市场参与者提供支持。项目内收集的不同气候区光伏系统运行数据将有助于为评估当前光伏可靠性和性能状况提供基础。

任务13的一般设置提供了一个通用平台，用于总结和报告在各种环境和应用中对光伏系统质量、性能、可靠性和寿命产生影响的技术方面。通过跨越国际合作，我们可以充分利用每个成员国的研究和经验，并将这些知识整合到宝贵的最佳实践和方法总结中，以确保光伏系统发挥最佳性能并持续提供具有竞争力的投资回报。

任务13迄今为止已成功创建了用于计算能够指示光伏组件和系统质量的各种参数的框架。该框架现在已经就绪，可以被那些对高质量报告中包含的结果表示赞赏的行业使用。

国际能源署光伏计划成员国参与任务13的国家有澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、智利、中国、丹麦、芬兰、法国、德国、以色列、意大利、日本、荷兰、挪威、西班牙、瑞典、瑞士、泰国以及美国，还有新加坡太阳能研究所。

免责声明

国际太阳能光伏计划 (IEA PVPS TCP) 在国际能源署 (IEA) 的赞助下组织，但在职能和法律上具有自主性。IEA PVPS TCP 的观点、发现和出版物不一定代表 IEA 秘书处或其个别成员国的观点或政策。

版权声明

此内容可自由使用、复制和重新分发，但需注明适当出处 (请参考“建议引用”)。例外情况是，某些受版权保护的图片根据其单独的图片说明可能不可复制。

建议引文

极端天气对PV Power Plants的运营和经济影响 Burnham, L., Tanahashi, T. (2025). Burnham, L., Tanahashi, T., Jahn, U. (编), (报告编号T13-33:2025)。IEA PVPS任务13。 <https://doi.org/10.69766/FFNG4976>

封面图片

由2024年席卷美国东南部的飓风米尔顿造成的对光伏电站的损坏归因于设计不良的单轴跟踪系统 (来源：劳莉·伯恩汉姆，桑迪亚国家实验室)。



国际能源署光伏发电系统计划

IEA光伏系统计划任务13
可靠性与性能
光伏系统

极端天气对光伏电站的运行和经济影响

报告 IEA-PVPS T13-33:2025 202
5年12月

ISBN: 978-1-7642902-4-1 DOI: <https://doi.org/10.69766/FFNG4976>



作者们

主要作者

劳里·伯恩哈姆，美国桑迪亚国家实验室，美国
田名亮，日本国立先进工业科学技术研究院 (AIST)，日本
约翰·塞迪威克，美国VDE美洲区，美国
克里斯托弗·鲍尔杜斯-尤尔森，加拿大自然资源部-加拿大能源材料技术中心，加拿大
亚历山大·格兰伦德，瑞典RISE研究机构，瑞典
莱昂纳多·米凯利，意大利罗马 sapienza 大学，意大利
安娜·海姆斯撒特，德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 ISE，德国
纳雷德拉·希拉德卡，印度孟买理工学院，印度

贡献者

约翰·艾伦，中密歇根大学，美国
伊芙琳·班伯格，瑞士东部应用科技大学，瑞士
彼得·博斯托克，VDE美洲区，美国
大卫·布雷尔利，VDE美洲区，美国
克里斯托夫·布彻，伯尔尼 Fachhochschule，瑞士
布赖姆·阿伊萨，卡塔尔环境与能源研究所，卡塔尔
里卡多·康塞桑，西班牙IMDEA能源研究所
本杰明·菲吉斯，卡塔尔环境与能源研究所，卡塔尔
胡安·洛佩斯·加西亚，卡塔尔环境与能源研究所，卡塔尔
托雷·穆勒，德国PVRADAR Labs GmbH
丹努普·S·皮拉伊，卡塔尔环境与能源研究所，卡塔尔
玛丽拉拉·里韦拉，德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所ISE
布拉姆·霍克斯，澳大利亚新南威尔士大学 (UNSW)
大卫·莫尔，意大利波尔察诺/布伦佐欧洲学院 (EURAC)

编辑

劳里·伯恩哈姆，美国桑迪亚国家实验室 田纳 ori·田纳沙希，日本国立先进工业科学和技术研究所 (AIST) 乌尔丽克·雅恩，德国弗劳恩霍夫硅光伏中心CSP



目录

致谢	7
缩写列表	8
执行摘要.....	9
1 引言.....	12
2 热带气旋：飓风、台风和季风	15
2.1 概述	15
2.2 设备损坏和失效机理	16
2.3 经济影响	16
2.4 诊断工具	17
2.5 缓解策略.....	18
2.6 关键要点和建议.....	19
3 强对流天气：冰雹、龙卷风和直击暴风.....	23
3.1 概述	23
3.2 案例研究、失效模式和事件严重程度.....	24
3.3 对流风暴造成的经济损失	26
3.4 对流性风暴损伤的响应策略.....	26
3.5 对流风暴风险缓解策略.....	27
3.6 关键要点	29
4 暴风雪和暴风雪	31
4.1 概述	31
4.2 运营影响	32
4.3 缓解策略.....	36
5 尘埃和沙尘暴.....	41
5.1 定义和频率.....	41
5.2 相关风险.....	41
5.3 建议.....	43
6 热浪.....	46
6.1 定义	46
6.2 对光伏生产的影响	47
6.3 两种热浪类型	48
6.4 热降解效应	49
6.5 缓解策略和关键要点.....	50
7 洪水	51



7.1 概述	51
7.2 当前实践及其局限性.....	51
7.3 水灾对光伏电站的损害.....	51
7.4 建议和关键点.....	54
8 野火	55
8.1 概述	55
8.2 光伏系统面临野火风险	56
8.3 经济影响	57
8.4 性能损失.....	57
8.5 缓解策略.....	59
8.6 主要建议和要点	60
9 结论.....	61
参考文献.....	64



致谢

本文的主要作者想要感谢IEA-PVPS任务13成员和其他国际专家为这份报告做出的许多宝贵且值得赞赏的贡献。此外，作者特别感谢以下人士对这份报告进行的全面审阅：Lenny Tinker（美国能源部太阳能技术办公室，美国）、Yves Poissant（加拿大自然资源部——CanmetENERGY，加拿大）、Minoru Kobayashi（日本新能源产业技术综合开发机构，日本）和Bert Herteleer（瑞士苏黎世联邦理工学院，瑞士），他们的细致且有见地的审阅显著提升了报告的整体质量。我们也要感谢Franz Baumgartner和Markus Klenk（瑞士苏黎世应用科技大学，瑞士）审阅了报告的一部分。

本报告及其反映的工作得到了众多政府机构的支持，包括：

德国联邦经济事务和气候行动部（BMWK），合同编号03EE1120B。

美国能源部能效与可再生能源办公室（EERE）下属的太阳能技术办公室奖励编号38268、38535和52773。

日本新能源产业技术发展组织（NEDO），合同编号20000860-0。

由意大利大学与研究中心在“丽塔·Levi-蒙塔尔奇尼”2019年奖学金下资助的Sole4PV项目。

瑞典能源署，根据工作订单177609



缩写列表

AOD 气溶胶光学厚度
 BOS 系统平衡
 CAPEX 资本支出
 DHI 直接水平辐照度
 DOD 光学深度
 DSS 尘埃和沙尘暴
 ECMWF 欧洲中期天气预报中心 EL 电致发光
 GHI 全球水平面太阳辐射强度
 IP 防护等级
 IPCC 政府间气候变化专门委员会
 IR 红外
 I_{sc} 短路电流
 LCOE 平准化能源成本
 激光雷达 光检测与测距MPPT 最大功率点跟踪
 NOAA 美国国家海洋和大气管理局
 运维 运营和维护 OPEX 运营支出
 PID 潜在诱导退化 POA 阵列平面PM_{2.5} 直径小于2.5微米的空气颗粒物^{2.5}
 PM₁₀ 直径小于10微米的空气悬浮颗粒物¹⁰
 PV 光伏
 PV_{pot} 潜在光伏产量
 rd 降解速率
 RCP 快速浓缩潜力
 ROCC 远程操作控制中心
 实时时钟 区域测试中心
 sat 地表气温
 SCADA 监控和数据采集
 SCB 字符串组合框
 TAS 表面温度TC 温度系数
 TW 太瓦
 Voc 开路电压



执行摘要

在一个日益由大气化学变化定义的人本世界中，已经出现了两种明显的趋势。一种是极端和非正常天气事件发生频率和严重程度的增加，后者由气温升高和湿度及降水模式的变化驱动；另一种是光伏（PV）装机容量的快速加速，包括光伏向新气候区的推广，截至2024年已部署2太瓦（TW）于六大洲，并预计到2030年将达到8太瓦（TW）。

为确保全球光伏发电的进一步增长，需要关注全球气候趋势和设计光伏系统的机会，以使其能够抵御特定风暴威胁并快速恢复。传统上，太阳能技术一直是通用商品，而在组件和系统设计中，具体的气候压力因素一直是一个次要考虑因素。然而，随着太阳能设备遍布几乎所有气候区，针对特定天气威胁的设计优化正引起关注。本报告全面分析了变化中的天气模式及其对全球光伏系统可靠性和性能的预期影响。按风暴类别划分，报告涵盖了对光伏电站最重要的极端天气事件：热带气旋、对流风暴、暴风雪、沙尘暴、热浪、洪水和野火。针对每一类别，报告提供了威胁形势的概述，以及设计和采购的最佳实践、缓解策略、风暴后评估和后续运行与维护（O&M）策略。

该报告还考虑了光伏系统因天气造成的损坏，这些损坏可分为两类：

1) 灾难性的，例如模块、线路或整个系统的破坏，例如模块从其支架上松脱、机架倒塌、玻璃破碎；以及2) 亚灾难性的，例如，目视检查结果显示没有可检测的损坏，尽管太阳能电池或其他模块组件可能发生了内部损坏，只有通过昂贵的成像技术，例如红外（IR）或电致发光（EL）成像才能检测到，未诊断的损坏可能会随时间恶化，导致加速性能下降或模块组件（例如背板和封装材料）加速老化。

此外，报告承认，太阳能行业的科技创新，包括新材料和组件的普及，给日益加剧的气候压力的世界带来了不确定性。新兴电池和组件架构的长期可靠性尚不清楚，特别是在极端天气条件下，模块和硬件组件承受着加速测试所未能捕捉到的综合和循环力。

此外，光伏系统在极端天气下的韧性很大程度上取决于每个风暴的独特特性——包括应力因子的数量和类型、这些应力因子如何以可预测和不可预测的方式相互作用，以及这种相互作用如何影响系统的组件。即便如此，围绕最佳实践可以进行一般化推断：1) 场地规划应始终包括对场地特定天气威胁的审查；2) 设计和采购决策应基于威胁格局。例如，在易遭冰雹的地区，更喜欢前玻璃较厚的组件；在多雪地区，无边框组件优于有边框组件；在热带气旋为主要风险的地区，不仅要考虑组件架构，更要考虑固定系统组件的紧固件和其他硬件。单轴跟踪器的积载算法也必须通过防损跟踪记录进行验证。此外，每个场地都必须有一套针对天气威胁的特定协议和响应策略，并准备好随时遵循它们。最后，但同样重要的是，电站的运行状态必须



应考虑。正在施工的站点更容易受到侵蚀，因为缺乏地面覆盖物，更容易受到风害，因为模块可能没有正确固定并且容易受到飞溅碎片的影响，还可能受到电气损坏，如果电缆和连接器暴露在潮湿中。相比之下，完全运行的工厂因电气网络损坏而面临现场火灾的风险，并且可能有长时间的电力损失。

关键点

1. 大多数光伏电站如果选址得当、设计和维护得当，可以经受住大多数极端天气事件。
2. 本报告考虑了以下天气事件：1) 具有短期影响且发生零星的，例如热带气旋、对流风暴（包括冰雹）；以及2) 具有长期影响且倾向于重复发生的，例如雪、沙尘暴、热浪和野火。从影响的角度来看，光伏系统中可以识别出两种类型的损害：急性损害和慢性损害。第一类光伏电站的风险评估是关键的第一步，而第二类电站的设计优化是优先事项。从韧性和减缓的角度来看，场地规划至关重要。基于对历史天气数据的回顾和每个地点未来极端天气事件的概率的风险评估是关键，必须在设计阶段解决。一旦威胁状况得到正确评估，项目开发商和所有者必须做出明智的设计和采购选择。所有材料和结构组件必须符合规范；模块架构也很重要，例如专门为抗冰雹而设计的模块。此外，强烈建议由独立工程师审查支架/跟踪器设计，包括硬件。此外，建筑师应密切注意拟建场地的地形和地质条件。例如，在斜坡地上安装光伏系统时，基础应包括防止热带气旋或洪水引发滑坡的特征。
3. 站点所有者和运营商应保留相关的调试文件，特别是与能源生产相关的文件，以便于将来可以将其作为基准来比较未来性能。同样，任何电致发光（EL）和红外（IR）图像，以及外观检查记录和-V测量记录，都应予以保存。
4. 电气性能数据对于评估极端天气事件的影响以及由此可能导致的系统加速老化至关重要。当与天气数据（如温度、太阳辐照度和风速）相结合时，这些信息形成时间序列数据，有助于检测与天气相关的损坏。场站所有者和维护团队需要提高对收集和保存这些数据重要性的认识。
5. 可靠的运行和维护（O&M）协议至关重要。在风暴暴露后未解决的缺陷可能会随着时间的推移暴露于额外的环境胁迫因素（如热量、风和湿度）而恶化。因此，对恢复的太阳能光伏（PV）系统的电力输出进行持续监测对于确保其性能和可靠性至关重要。如果检测到发电量显著下降，收集的数据将有助于业主就进一步行动（如系统翻新）做出明智的决策。
6. 主动维护同样重要，并应根据风险概率量身定制。例如，在热带气旋之前，检查紧固性等任务



紧固件和清理杂物，这些可能变成空气中飞散的——应提前进行。

7. 如果发生极端天气造成的损坏，应尽快实施纠正性维护。立即措施包括1)通过断开电网并打开所有断路器来确保现场安全；以及2)对受损的光伏系统进行电气和机械检查。损坏的设备应原地保留，等待保险或其他索赔相关检查，但在重新通电之前，所有损坏的光伏组件和电气部件必须更换。



1 引言

极端天气事件有多种定义方式：根据其经济影响、复发概率、相对于历史测量的强度以及与均值的距离。政府间气候变化专门委员会（IPCC）将极端天气定义为“在特定的时间和地点年份中较为罕见的事件”。术语“罕见事件”通常指发生在第10th 或 90th 从前一个观察值推导出的概率分布的百分位数[1]。此外，政府间气候变化专门委员会已报告称，人为气候变化导致大多数极端天气类别的强度和频率增加，并造成超出自然气候变异可能导致的广泛不利影响（见图1）。

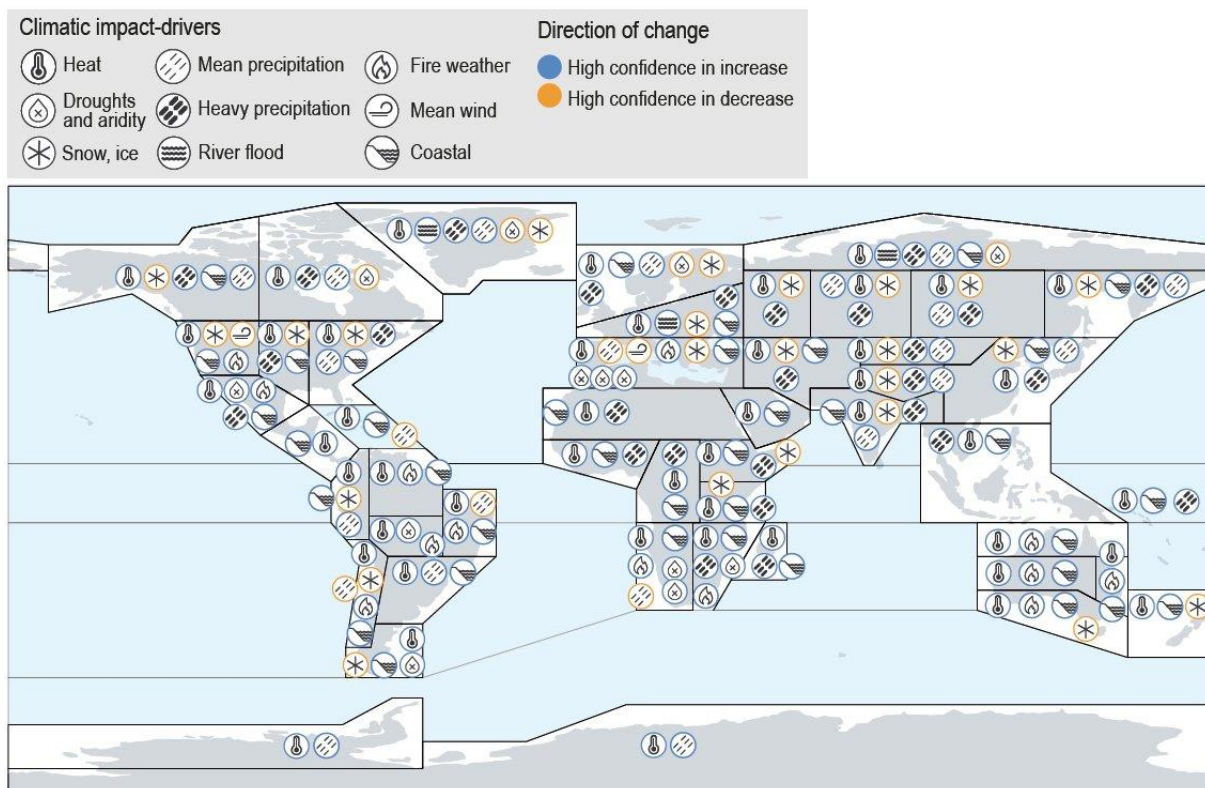


图1：由政府间气候变化专门委员会工作组1预测的全球风暴活动频率变化，蓝色圆圈表示活动增加，橙色圆圈表示活动减少。预测的全球温度升高以及降水量的增加，直接影响光伏系统的效率和可靠性[1]。

风暴频率和强度的预期增加对全球光伏装机容量具有影响，其后果包括1)急性影响（发电损失和物理破坏）和2)慢性影响（组件和系统加速退化）。每种影响类别都有其自身的关键绩效指标，这些指标范围从资源可用性到防灾和运维策略的投资金额，到间接成本，包括保险溢价。

随着全球太阳能装机容量持续从目前的2太瓦扩展至预计到2030年的8太瓦，极端天气带来的运行和经济后果也可能随之增加。后者反映了人口密集的沿海地区太阳能容量的快速增长



区域，其中风暴活动频繁且风暴造成损害很可能对资源可用性产生不成比例的影响[2]。

由热带气旋、大雪、冰雹、野火和其他事件造成的对光伏系统的损害，会直接影响光伏系统的平准化能源成本（LCOE）（见图2）；同时，它们通过降低太阳能发电的可用性，并制造出可能——即使是不应得的——社会抵制的基础，产生了更广泛的社会影响[2]。

尽管有多个引人注目的案例研究，但全球范围内天气灾害的多重影响尚未得到全面评估。此外，光伏系统全生命周期成本和性能的长期影响尚未得到充分量化。虽然理解后者需要资产所有者进行更多信息共享，但本报告旨在总结目前已知的最佳实践，以分享经验并帮助提高全球光伏系统的韧性。

在本报告中，来自五大洲的一组光伏专家考察了全球发生的七种极端天气事件，并按以下顺序呈现：热带气旋、对流风暴、暴风雪、沙尘暴、热浪、洪水和野火。对于我们努力捕捉的每种极端天气事件——根据可用数据——我们力求呈现急性期的影响（例如，由于辐照度损失和光伏系统机械应力损坏导致的发电量减少）以及慢性期的影响（例如，光伏组件和系统平衡部件中潜在的可靠性问题，导致性能欠佳）。此外，重要的是要注意，光伏系统可能在施工期间或电站完全投入运营后受损。施工阶段面临着独特的挑战：场地可能被平整，但通常缺乏地面覆盖，因此极易遭受洪水和侵蚀；组件可能已安装在支架上，但尚未互连且未进行扭矩验证；连接器可能未连接且未封盖，因此暴露于湿气和灰尘中；电缆可能铺设在露天沟槽中。

本报告也承认了光伏产业中导致风暴相关损害增加的潜在趋势，包括熟练安装人员的短缺以及更大更薄模块的普及。我们的意图并不是暗示光伏系统对极端天气具有固有的脆弱性，而是为设计更强大的系统提供基于证据的合理依据，这是一种针对特定天气威胁的战略方法。此外，我们还讨论了缓解策略，包括预测性和纠正性维护方法，以提高整体系统韧性。读者应注意，韧性的一般原则适用于多个风暴类别，并将发现某些缓解策略在多个章节中反复出现。这种重叠是故意的，以便每章都能独立存在。

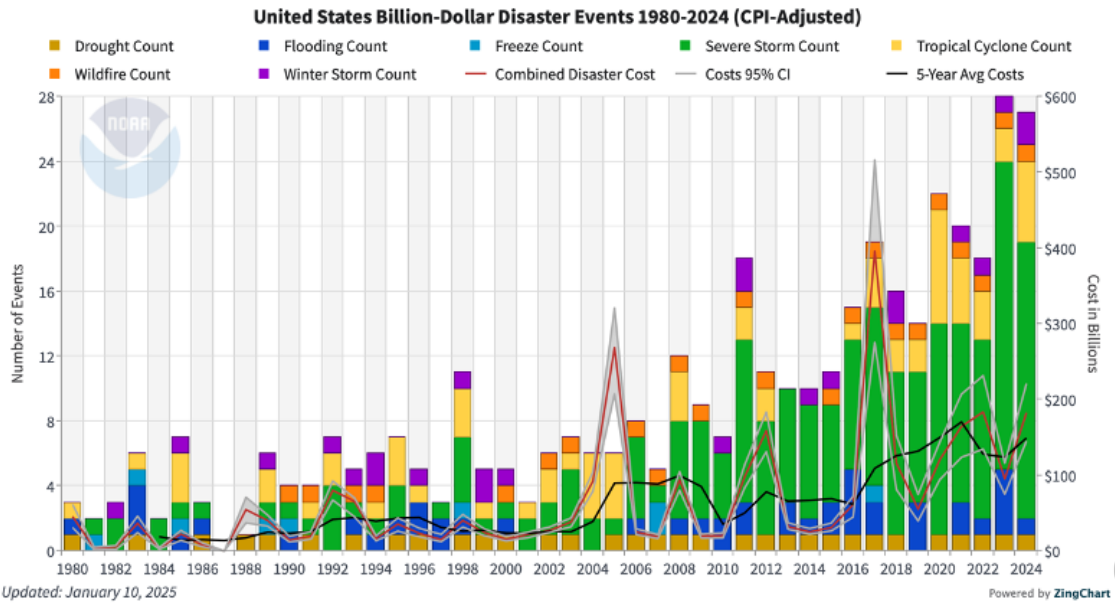


图2：美国灾害成本评估：热带气旋、内涝、干旱与热浪、强局部风暴（即龙卷风、冰雹、直线风灾害）、野火、农作物冻害事件与冬季风暴造成的总损失、直接损失（美元）[3]。



2 热带气旋：飓风、台风和季风

2.1 概述

台风是一个涵盖飓风、台风和热带风暴的通用术语。这些破坏性天气事件是全球性的，发生在美国东海岸以及亚洲（即印度洋和西太平洋），如图3[4]所示。虽然每种类型的热带风暴的具体定义（包括强度）有所不同，但它们由于强风（通常超过 $33 \text{ m/s} \approx 119 \text{ km/h}$ ）和暴雨（可能导致洪水）而可能对基础设施造成严重破坏，包括房屋、电力线路和交通网络。近年来，位于台风路径上的光伏系统也遭受了灾难性破坏，促使人们努力识别耐久性设计和最佳实践，以确保电站的生存能力。

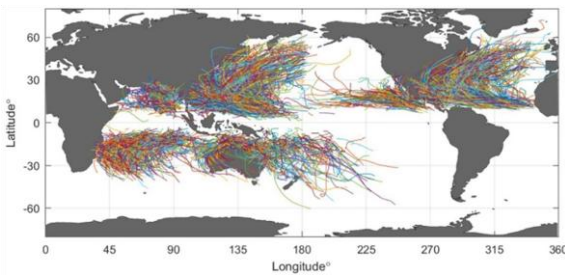


图3：从IBTrACS[4]中提取的热带气旋轨迹。知识共享许可协议CC BY 4.0。

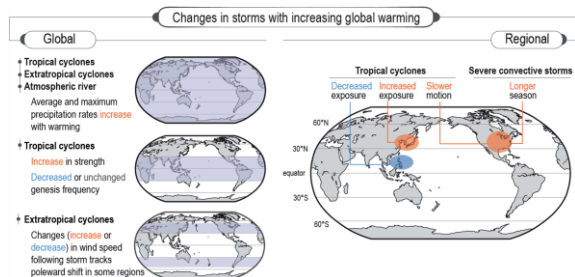


图4：热带气旋行为过去和预期变化的总结示意图[1]。

根据ipcc预测（见图4），热带气旋的强度预计将会增加，尽管它们的形成频率可能会降低或保持不变[1]。它们预计强度的一个指标是提议将萨菲尔-辛普森飓风等级扩展，从5级（超过70米/秒=252公里/小时），到6级，对于风速超过86米/秒（ ≈ 310 公里/小时）的情况[5]。此外，由于热带气旋与温度相关（与海洋温度升高有关），预计会随着全球变暖水平的增加而出现6级当量的风暴

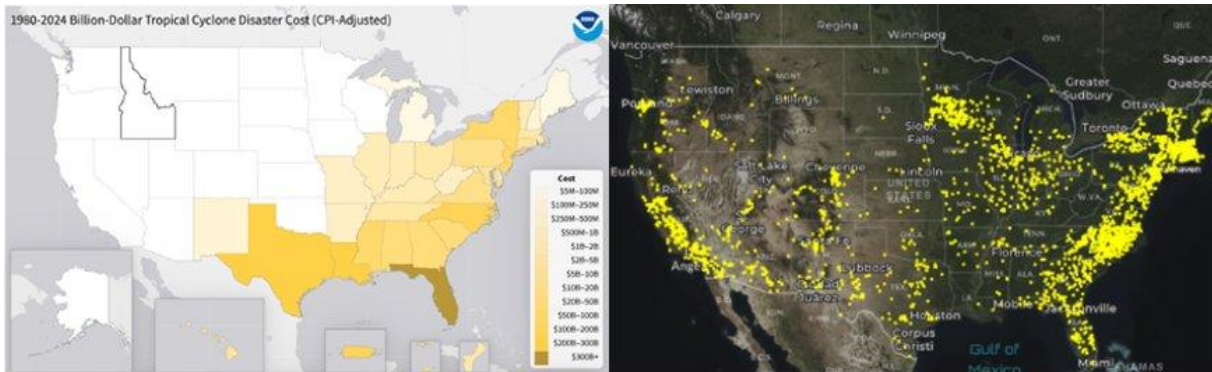


图5：左侧图片描绘了损失超过10亿美元美金的由热带气旋造成的经济损失[6]；右侧图片显示了光伏电站的分布[7], [8]。佛罗里达州在美国经历了最多的热带气旋灾害，其太阳能装机容量排名第三；德克萨斯州在这两个类别中均排名第二。



北美和亚洲沿海地区安装的太阳能光伏系统被认为最容易受到台风的损害[1],[5]，如图5所示。此外，随着风暴活动的扩大，先前未受强烈风暴影响的地区也可能面临风险，例如2024年毁灭了北卡罗来纳州500多英里（≈805公里）内陆地区的飓风海伦娜。

2.2 设备损坏和失效机理

风暴损害通常归因于设计不良的货架系统以及/或安装不良的螺栓和紧固件。扭矩不足或未设计用于高压应力条件（例如机械强度低）的紧固件是一个常见问题。螺纹螺栓的松动和磨损可能导致在风天气候中松动——如果风荷载足够严重——则可能引发级联效应，从货架或跟踪平台的倒塌到模块被从紧固件中拉出，通常是成批的（见图6）。此外，过度的、重复的风荷载如果超过安装硬件的允许应力，会导致螺栓和支撑结构的不可逆变形。

跟踪系统，其中模块连接到一端固定的单个扭矩管上，容易受到模块高风载荷加剧的扭转应力的影响。如果硬件不足以承受风载荷，强风会引发扭转共振，导致模块上的应力不断加剧，最终引发失控失效事件。该过程始于行末模块开始颤振，然后从边缘向中央模块（中央模块由驱动机构支撑，因此是行列中最刚性的部分）扭曲，随着外层模块松动，扭曲逐渐加剧，并从一块模块传播到另一块模块。最终，跟踪器会扭曲分离，导致空中模块和整个行列的损失[9]。



图6：2024年美国飓风海伦造成的损坏的跟踪系统显示。紧固件故障导致模块从扭矩管脱落并撕裂电气连接。
照片：L. Burnham。

损坏也可能超出机械故障，还包括电气故障风险的增加。强风可能松动电缆，导致连接器内部的磨损和/或插针和插座的局部分离。松散或拧紧不良的连接器变得容易受到湿气侵入，进而导致腐蚀、高电阻并最终失效[10]。强降雨也可能导致水渗透到组合箱/电源调节箱的壳体内部，扰乱整个工厂的电路。

2.3 经济影响

台风对光伏电站的经济影响是多方面的，从发电损失到物理损坏再到运营成本增加。一项关于18次飓风事件期间发电损失的研究表明，在风暴活动期间（可能归因于跟踪器处于停机位置和辐照度降低的组合），电力损失约为50%，尽管发电后来恢复正常[11]。统计分析还显示，飓风天气期间的性能比率——正如预期的那样——为12.6%。



低于非飓风天的水平[12]。然而，近期的数据显示，由于强风和暴雨造成的年产量损失（中位数）相对较小，每个类别约为1%[13]。同项研究表明，对于超过最小风速阈值（25 m/s = 90 km/h）的场站，光伏系统的退化率会加速[13]。正如作者所解释的，这种效应可能因周边环境（例如风影效应）和/或适当的运行维护实践而有所不同。虽然需要更多数据，但预测热带气旋造成的发电损失似乎可行，并将这些预测模型纳入新电站的设计和采购阶段，以确保更准确的LCOE计算，并为更可靠的设计提供依据。

这种概率建模越来越多地基于风暴事件频率的上升和成本的上升而变得合理。随着光伏安装数量的增长，恶劣天气造成的保险赔付可能会上升。例如，在日本，2017年至2021年保险赔付增加了3.7倍[14]，其中很大一部分归因于强风、洪水和相关原因造成的损害[15]。虽然热带气旋的强度预计会增加[1]，但光伏系统的保险费率也可能随之上升，与恶劣损害风险的增加相称。这代表了极端天气的一种间接但可衡量的经济影响。

2.4 诊断工具

需要两种类型的灾后评估来诊断热带气旋造成的破坏：1) 电力分析，以准确估计风暴对电力安全性和发电能力的影响；以及2) 结构分析，以记录模块、支架和相关硬件的任何物理损坏。强烈建议对易受热带气旋影响地区的光伏电力系统进行每日或实时监测，各种服务提供商提供具有先进技术（例如，他们自己的光伏性能软件）的监控系统。如果经过适当监测的光伏系统在热带气旋期间或之后出现电力发电异常减少，必须立即确认电力安全。特别是，应检查汇流箱、逆变器和高电压设备外壳是否有被风吹动的雨水侵入。还可以部署机载或手持红外热像仪来验证光伏连接器的电力安全。从安全角度来看，在没有破裂的组件玻璃的情况下，对太阳能电池损坏的诊断不太紧急。后者涉及对一部分

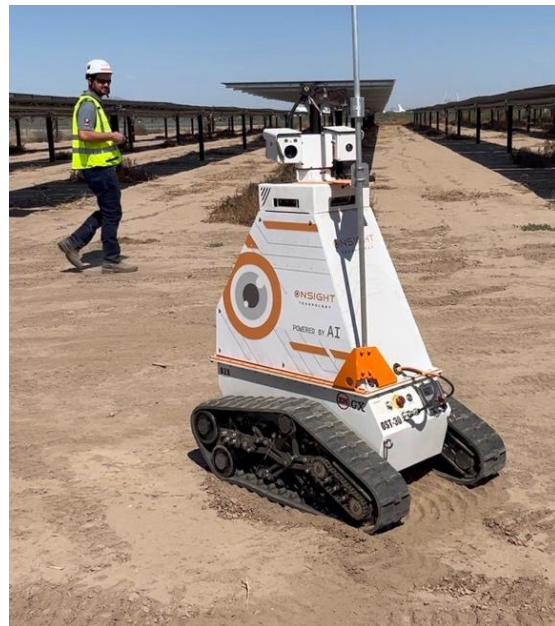


图 7：配备热成像和光学相机的地面机器人可以图像模块的前后两侧，以及后侧的电气网络。照片：L.伯纳姆。

对模块进行EL成像，但该过程耗时且昂贵，通常仅在怀疑细胞损伤时才会进行，甚至那时也可能仅对部分模块进行采样（有关EL成像的更多信息，请参见第三章）。

除使用航空无人机对现场进行勘测并记录全场地损坏情况（例如损坏模块/排的数量和位置）外，还需要进行人工检查



确定结构损坏。尽管光探测和测距（激光雷达）技术（配备或不配备无人机）未来可能很有价值[16]，但目前的最佳实践要求进行逐行详细检查，以评估模块、货架硬件和电气Bos的完整性。能够在每个模块上巡检并拍摄连接器热成像图的地面机器人是一项正在获得关注的技术，尤其是在最大的光伏电站（见图7），但尚未普及。能够飞行于行间并拍摄背面图像的新一代无人机也备受关注，但需要更复杂的控制和导航软件。

2.5 缓解策略

由于光伏系统在热带和亚热带地区迅速普及，热带气旋对光伏系统的损害正在增加。为缓解强风和暴雨带来的日益严峻的威胁，最佳实践（如表1所示）可分为四个阶段：1）项目规划，2）系统设计，3）施工和调试，4）运行和维护。

项目规划阶段 在，考虑热带气旋活动的历史模式（参见表2）非常重要。这些信息对于判断某个特定地点是高灾险还是低灾险，以及是否可以为该地点设计具有弹性的光伏系统至关重要。例如，人们可以根据相关的气象参数（例如风速、降水量等）估算拟建光伏系统的资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）。同时建议分析历史风模式，因为主导风向及其斜坡率可以提供有关跟踪器收起策略的信息。

设计阶段 The，然而，是减轻严重损害的关键阶段[17]。在易遭飓风侵袭地区安装的太阳能光伏系统的详细设计建议见表3。系统设计者应遵循这些指南，以确保结构组件和太阳能光伏组件所选材料符合这些法规规定的限值。此外，应考虑“不同气候条件下光伏电站运行与维护指南”第5.6.5章中所述的建议[10]。本报告的作者还强烈建议，由在螺栓连接和特定于气候应力因素的失效机制方面具有专长的独立工程师审查支架/跟踪系统的选择。

建设和调试 在 安装培训至关重要，现场人员应接受明确培训，正确安装模块紧固件以及螺栓连接，这些被广泛认为是许多货架系统中的薄弱环节，而现有的规范和标准对此覆盖不足。例如，当前的太阳能光伏审核标准，如IEC 62446，尽管其对系统可靠性至关重要，但并未包括对紧固件的检查或扭矩审核。在调试阶段，记录代理人应（1）验证所有或大部分指定结构连接的正确安装，以及（2）对至少1%的紧固件进行扭矩审核。如果10%或更多的这些紧固件要么过紧要么过松，承包商应重新安装所有紧固件[18]。此外，电气电缆的不当管理对太阳能光伏连接器的完整性以及最终电气系统平衡构成重大风险。其他应避免的糟糕做法包括松散的悬挂线缆、广泛依赖塑料扎带以及太阳能光伏电缆的不当布线[19]。

运维 Translation error 在阶段，网站所有者或网站运营商应实施针对风暴前后运维任务的明确协议，包括提前于风暴存放跟踪系统的存放策略以及风暴后的检查，检查包括模块检查、紧固件扭矩测试



以及连接器的热成像[20]。虽然这些工作可以由现场人员完成，但建议聘请经验丰富的咨询工程师来管理恢复工作。此外，在接触系统之前，由合格的电工进行安全检查是必不可少的[20]。

2.6 核心要点和建议

在易受频繁热带气旋影响的地区，项目规划应包含整体风险评估，其中需考虑历史和预测的天气模式以及设计和采购决策。换句话说，历史天气状况以及未来的预测，应指导规划阶段，并在每个具体场地设计中得到体现。

对现有及部分已建成的光伏系统进行风暴前后规划也极为重要。该规划包括对现场人员的安装和响应培训，以及向相关人员传播详细的规程以减少混乱并最大化响应和恢复策略。根据天气预报和各机构的警报（表2）快速执行的风暴前响应，应成为任何现场操作手册的组成部分。以下反制措施是最基本的要求。

在建系统风暴前阶段：

- 清理阵列内外的杂物，并固定松散材料，以避免风吹物体损坏组件。
- 确保所有外露连接器都被盖住，或至少在组件下方进行固定，以最大程度减少其暴露于水和灰尘侵入的情况。
- 将电缆固定到机架上，以避免风载荷造成的磨损和应力。

运行系统台风前阶段：

- 对所有紧固件进行扭矩审计。
- 根据制造商规范停放单轴跟踪系统。
- 通过打开断路器、熔断器和开关，关闭所有组件。

施工系统飓风过后阶段（除投用系统建议外）：

- 检查货架柱是否因侵蚀而移位或松动。
- 记录开放式沟槽和暴露电缆的任何洪水情况。
- 检查模块托盘的完整性。
- 更换任何看起来脏或湿的未匹配的开放连接器。

运行系统风暴后阶段：

- 目视检查光伏组件（正面和背面）、安装结构、紧固件、电缆、连接器（组件间和主干）、汇流箱、逆变器箱、布线和其他组件的损坏。重要的是要 1) 检查檩条和轨道是否有裂缝或变形的迹象；2) 寻找电缆磨损的迹象；3) 更换断裂的扎带和其他失效的电缆紧固件；以及 4) 确认连接器没有坐在积水中，或显示浸没的迹象（例如，藻类生长）。
- 干燥并清洁组合箱和逆变器箱的内部。收件箱中的组件那些接触过水或高湿度的应该仔细检查指示物防止湿气侵入，如有必要则更换，此后监测是否有提高抗性以确保电气安全。



- 对紧固件进行扭矩审核。
- 测试所有系统的电气故障。
- 在系统通电前更换任何损坏的电气部件。
- 在系统重新通电后以及6个月和12个月时，对连接器的子集进行热成像检测。

表1：包含减少热带气旋损害建议的参考文献。

国家	发行人	标题	已发布年	参考编号
美国	US-FEMA	美国维尔京群岛的飓风艾尔玛和玛利亚 建筑性能观察、建议-2018 事务，技术指导		[21]
美国	美國-紅十字會和維護	屋顶太阳能板安装：设计，安装 -2018年颶風伊爾瑪和瑪麗亞		[22]
美国	美國-能源效率與可再生能源署	美国维尔京群岛 - 恢复建议 飓风和其他环境中的太阳能光伏系统 恶劣天气	2018	[23]
美国	远程方法调用	风暴下的太阳能：选择弹性最佳实践 地面安装光伏系统，抗飓风设计	2018	[24]
美国	NREL	严重天气下的太阳能光伏发电：成本考量 为光伏系统抗风暴加固操作规程 2020 ence		[25]
美国	远程方法调用	风暴下的太阳能 第二部分：选择最佳实践 抗飓风2020年屋顶光伏系统 姿势		[26]
美国	远程方法调用	风暴中的太阳：为政策制定者选择最佳 小型韧性光伏系统实践指南 2020 岛屿发展中国家		[27]
美国	美国联邦紧急事务管理署和应对气候脆弱性、风险与2021影响	光伏系统业主指南：识别、评估		[19]
美国	NREL	应对风暴的太阳能光伏系统 2022		[20]
美国	美國-能源效率與可再生能源署	迈向太阳能光伏抗风暴能力 - 学习 - 来自飓风损失和重建更好	2023	[18]
澳	皇后-land 政府	飓风和风暴潮抗性建筑指南 为昆士兰家庭	2019	[28]
	Nexttracker ing	缓解极端天气风险 第一部分：理解 如何差异化管理设计与控制策略 2020 为太阳能发展开辟新机遇		[29]
	Nexttracker	缓解极端天气风险第二部分：生存 大风事件和动态风效应 差异化太阳能项目设计与控制策略 策略	2021	[30]
	FM全球	财产损失预防数据表1-15：屋顶- 安装式太阳能光伏板	2024	[31]
	FM全球	财产损失预防数据表 7-106： 地面 mounted 太阳能光伏发电	2024	[32]



表格2：每个地区关于台风的官方信息来源。

区域	官方信息来源
北大西洋，东太平洋和西太平洋	美国国家飓风中心
西太平洋	日本气象厅
印度洋	印度气象部门
从东经30°到东经90°的南印度洋	法国气象局——留尼汪
90°E至125°E的南印度洋，以北10°S	印度尼西亚BMKG
南印度洋和南太平洋 从90°E到160°E	澳大利亚气象局
160°E以东，南太平洋10°S以北	巴布亚新几内亚国家气象服务
160°E以西，25°S以北的南太平洋	斐济气象服务
西太平洋，160°E以西，25°S以南	新西兰气象服务部门



表3：光伏系统抗风荷载设计代表性法规和指南。

国家/ 区域	发行人	代码 #	标题	已发布 年	参考编号
美国	ASCE	7-22	最小设计荷载与关联 建筑物和其他的评定标准 结构	2021	[33]
美国	SEAOC	PV2-2017	太阳能电池板抗风设计	2017	[34]
欧盟	CEN	EN 1991-1-4/AC	欧足码 1：结构上的作用力 第一部分-第四部分：一般动作 - 风 关系	2010	[35]
AU/NZ	SA/NZS	AS/NZS 1170.2	结构设计措施，第2部分：风 操作	2021	[36]
CN	CS	GB 50009-2012	加载建筑设计的代码 结构	2012	[37]
TW	CNS- TW	CNS 16189	设计风评估指南 大量光伏系统 \"部令\"的解释	2022	[38]
JP	METI		太阳能光伏技术标准 \"发电设施\"	2021	[39]
JP	JISC	JIS C 8955	加载结构设计指南 光伏阵列	2017	[40]
JP	NEDO		地面设计指南 支架式太阳能光伏发电 系统	2019	[41]
JP	NEDO		设计和施工指南 用于坡地地面安装太阳能 光伏电力系统	2023	[42]
JP	NEDO		设计和施工指南 用于浮动式太阳能光伏发电 系统	2023	[43]
JP	NEDO		设计和施工指南 用于农业光伏系统	2023	[44]
	IEC	IEC TS 63348	光伏 (PV) 组件评估 到安装结构接口	下 discus- 西昂	[45]



3 严重强对流天气：冰雹、龙卷风和直线风

3.1 概述

剧烈对流天气（例如雷暴）会产生具有破坏性的冰雹、强烈的风暴阵风和龙卷风，可能导致重大的财产损失[46]。近年来，虽然冰雹相对不频繁，但已成为光伏发电系统保险损失的主要原因，因此是太阳能行业的主要关注点[47]。本章强调冰雹风险识别、量化和管理，以符合已发布的保险损失数据，但这里提出的通用分析科学原理——以及基于工程的风险评估方法——适用于所有对流天气灾害，包括龙卷风和直线风。

3.1.1 定义

美国国家气象局（NWS）术语表[48]，由国家海洋和大气管理局（NOAA）维护，提供了气象定义，包括以下总结的定义，这些定义是理解强对流风暴风险的基础：

强雷暴。 产生龙卷风，风速至少为26米/秒（=93千米/小时），和/或直径超过25毫米的冰雹。

你好。 阵雨以不规则的冰粒或直径超过5毫米的冰球形式降下
严重冰雹 直径。S，根据NWS的定义，其直径超过25毫米。

旋风。 一个猛烈旋转的空气柱，其环流达到地面；在局部尺度上，龙卷风是最具破坏性的大气现象。

直线风。 无旋转的雷暴风（即，不是龙卷风）。

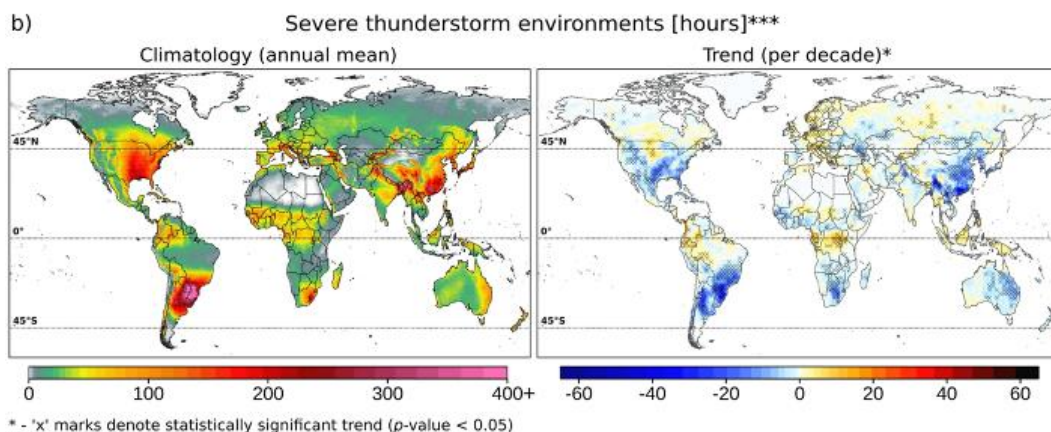


图8：欧洲中期天气预报中心再分析v5（ERA5）描绘了强雷暴环境的气候和趋势数据[49]。

3.1.2 地理分布

对流风暴是一种全球现象，常见于看到显著太阳能市场增长的地区（例如，美国中部、南欧、中国南部和东部）



澳大利亚) 并且与图8 [49] 中显示的强雷暴环境相吻合。虽然规模远小于飓风和台风 (见第2章), 但强对流风暴在全球范围内发生, 对除南极洲以外的所有大陆构成威胁 [46]。由于它们普遍的地理分布, 强对流风暴在每年对太阳能资产的潜在破坏性可能比其他任何大规模自然灾害都要大 [47] 与雷暴相关的冰雹在全国许多地方每年发生一次以上的事件, 其发生的频率远高于龙卷风 [50]。

此外, 气候[51]模型通常预测未来几十年有利于雷暴的气象条件将加剧, 从而导致风暴频率和严重程度[51]的增加。然而, 关于这种预期增长在区域和全球尺度上如何展开的细节, 仍然是科学研究的主题[49]。尽管科学界对强对流风暴气候和趋势的认识仍在进行中[49],[51], 但保险行业已经积累了大量关于小规模强对流天气事件 (例如冰雹、龙卷风和风暴) 财务影响的数据, 表明威胁环境正在扩大。例如, 一家由慕尼黑再保险公司资助的2019年研究记录了37年间南欧冰雹事件显著增加[52]。最近, GCube保险公司报告称, (2018-2023年) 五年内, 由强对流风暴引起的冰雹占受保太阳能行业总损失的54%[53]。

3.2 案例研究、故障模式和事件严重程度

以下案例研究描述了冰雹或风暴特有的频率、严重程度和技术考量, 包括损害 (见图9)。

3.2.1 冰雹损失事件

冰雹通过凝结形成, 当对流风暴的上升气流将水滴带到大气中极寒区域时, 它们会冻结、生长并增加质量。当向下的重力超过雷暴上升气流的力量时, 冰雹会落下[54]。为了满足IEC 61215-2产品资格标准中最低的弹道冲击要求, 光伏组件设计必须承受11次25毫米冰球的终端速度冲击。随着全球太阳能市场的普及, 与直径超过25毫米的自然冰雹一致的灾难性损坏报告也越来越多。以下案例研究说明了冰雹对全球光伏系统可能产生的影响范围。

北布拉班特/林堡, 荷兰 (2016). 2016年6月23日, 荷兰东南部的大雷暴产生了严重的冰雹和财产损失。当地报告记录了冰雹直径最大范围为6厘米 (网球) 至7厘米 (棒球)。对由此产生的保险损失的全面统计分析表明, 根据该尺寸范围冰雹的频率和分布, 暴露在4厘米 (乒乓球) 至5厘米 (大于高尔夫球) 范围内的太阳能电池板表面可见损坏出人意料地最为严重[55]。除了可见的冰雹损坏外, 该研究还提到了与太阳能电池板“隐形”冰雹损坏 (细胞裂纹) 相关的保险损失。在典型的一年中, 冰雹



图9：科罗拉多州的一个太阳能电池板被创纪录的冰雹风暴损坏，影响了25-50%的现场光伏组件。照片：丹尼斯·舒勒德 /NREL。



在荷兰，它占保险的恶劣天气损失的19%；2016年，冰雹占与恶劣天气相关的保险损失的73%。

得克萨斯州佩科斯县，美国 (2019)。 2019年5月，得克萨斯州西部季节性雷暴产生了造成损害的冰雹，落在182兆瓦级的米德韦太阳能电站。根据保险报告，严重的冰雹在该600公顷的场地损坏了超过40万块太阳能电池板，导致保险损失达7000万至8000万美元[56]。冰雹造成的损害包括碎玻璃以及细胞开裂的电池板[57]。为了应对这些损失的史无前例的规模，保险

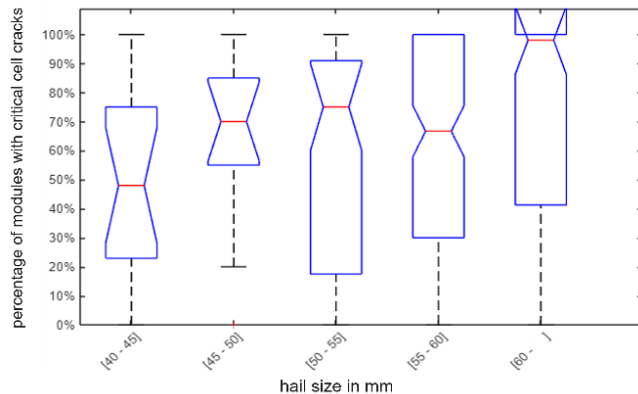


图10：冰雹直径的函数关系图表示有临界单元裂纹的模块的百分比[60]。

该地区保费上涨了400%[58]。

瑞士 (2021)。 2021年6月和7月，瑞士经历了一系列广泛而剧烈的冰雹灾害，其中最严重的一次发生在6月28日。冰雹直径达到9厘米，对人口密集地区造成了严重破坏，导致近年来与冰雹相关的损失最为昂贵[59]。瑞士所有光伏系统中有约15%位于经历过直径大于5厘米冰雹的区域。当冰雹直径超过4厘米时通常会产生损害，而直径大于5厘米的冰雹则观察到显著增加的损害。除了玻璃破碎外，对411个受影响光伏系统中的约6000块组件的EL图像显示，57%的组件存在明显的细胞裂纹。细胞裂纹的可能性随冰雹尺寸增加而增加，但各类别的分布范围都很高（见图10）[60]。

得克萨斯州西部，美国 (2022)。 得克萨斯州的冰雹季节（5月至6月）对多个太阳能项目造成了毁灭性打击，累计冰雹损失估计高达3亿美元[61]。根据保险报告，位于安德鲁斯县、布朗县和佩科斯县的四个独立太阳能农场（分别为347兆瓦、415兆瓦、500兆瓦和500兆瓦）遭受了严重的冰雹损害，这些场地的冰雹尺寸从6厘米（网球）到9厘米（软式棒球）不等[57]。

3.2.2 风暴损失事件

对流风暴引起的风害通常是由直线性风而不是龙卷风造成的。尽管龙卷风的风速可能达到160至480公里/小时（约44至133米/秒），并会摧毁其路径上的任何光伏系统，但龙卷风通常是规模小、持续时间短、发生频率低的事件。相比之下，80至100公里/小时（22至28米/秒）范围内的直线性风——明显低于典型项目设计风速——已对多个固定倾角和单轴跟踪系统造成了损害。事实上，早在2015年，一份工程报告就指出，虽然在大规模应用中结构风害很少见，但在符合规范的结构中已观察到损坏[62]；这一发现已得到轶事证据的加强。根据现场系统中螺旋扭曲的报告，风工程师推测，单轴跟踪器的扭转不稳定性，加上设计不当或扭紧的硬件，可能是观察到的损坏的根本原因[63]。澳大利亚和美国的案例研究说明了风害对光伏造成的损害。

达尔文港，昆士兰州，澳大利亚 (2018)。 2018年10月，一场季节性雷暴损坏了支持约2000块太阳能电池板的55兆瓦-单轴跟踪器。



对Oakey 2太阳能项目[30]进行了评级。尽管与对流风暴相关的实测风 gust 仅达到74公里/小时 (≈ 21 米/秒)，但两个串联、模块呈竖向排列的跟踪器遭受了与扭转驰振一致的结构损伤，这是一种由风引起的在相对适度的风速下可能发生在柔性结构中的不稳定性[9]。

拉玛县，德克萨斯州，美国 (2023)。 2023年3月，德克萨斯北部的一个公用事业规模太阳能项目，与戴尔文邓斯采用相同的模块设计，发生了直线风损害，与扭转跟踪器不稳定性一致。根据保险行业利益相关者的说法，该地区经历了80公里/小时 (≈ 22 米/秒) 范围内的最大风 gust，远低于项目设计风速，造成损失估计为3000万美元[56]。

3.3 对流风暴造成的经济影响

冰雹是太阳能行业全球经济损失的主要原因。尽管与冰雹相关的保险索赔相对较少，但冰雹造成的损失远比其他类型的索赔相关的高昂。例如，GCube 2018-2023 年的太阳能损失数据显示，冰雹占索赔数量（即索赔总数）的 1.4%，但占索赔价值（即总发生成本）的 54.2% [53]。在此数据集中，四起最大的索赔，合计损失超过 2.24 亿美元，被归因于冰雹。相比之下，由于所有其他类型的恶劣天气事件（包括雷暴、洪水、飓风、风事件和闪电）造成的综合损失占 GCube 总发生损失不到 10% [53]。

直接经济影响，其中包括但不限于能源生产损失、库存和法医调查成本、确定根本原因的咨询成本、解决与替换硬件兼容性问题的工程成本、重新供电的时间和物料成本、进出口运输成本、回收和处置成本、项目利益相关者之间争议产生的法律成本、保险费成本增加等等。虽然冰雹损失事件不频繁，但由此造成的损害程度可能会增加保险费率，侵蚀投资者信心并引起消费者担忧。

3.4 对流风暴损坏的响应策略

合适的响应策略根据受影响光伏系统的容量而变化。在住宅和商业应用中，财产所有者在损失事件发生后通常会启动保险索赔。为了处理索赔，保险核赔员需要

来自光伏技术专家（如原始安装承包商或运维专家）的损害评估。该人员检查现场以识别可见（通常是玻璃破碎）和不可见的损害。如图11所示，不可见损害（无玻璃损坏时的电池片裂纹）最好通过EL成像[64]、[65]进行诊断，但该过程必须在黑暗中执行，相对复杂且昂贵。因此，在分布式应用中，技术人员通常会结合热红外（IR）成像、I-V曲线跟踪和目视检查来识别受损电池片，但电池裂纹仅在IR图像和I-

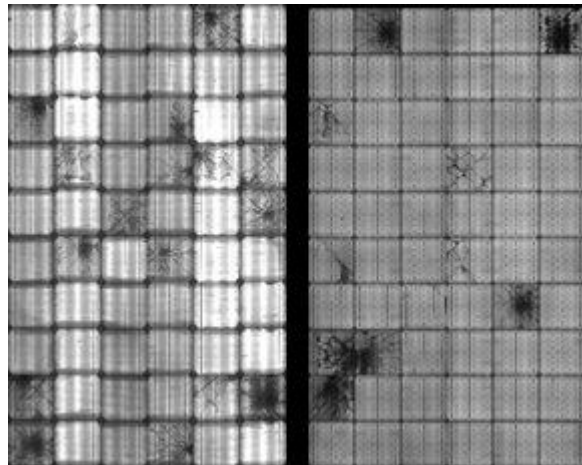


图11：冰雹受损模块的EL图像具有独特的裂纹模式。



几年老化后的V曲线。因此，雷击事件后，应密切监测可能存在未诊断出裂纹单元模块。

理想情况下，屋顶系统应使用直接更换部件进行重新供电，但项目利益相关者可能会面临寻找与原部件的物理形态和电气特性相匹配的模块的挑战。如果是这样，服务提供者通常有两个前进的路径。第一个选项是重新设计系统，将新旧组件集成到并联电路或系统中；第二个选项是宣布全面损失，并将保险赔付款项用于购买新系统。

对冰雹影响的公用事业规模站点，响应策略更为复杂，应在项目的运维合同中予以规定，该合同应包括一份详细的强对流天气响应计划（例如，追踪器收纳策略），旨在最小化严重的冰雹或风害（参见第3.5节）。此外，现场项目经理和远程操作控制中心（ROCC）人员应接受充分培训，获得相应权限，并能够访问工厂的监督控制数据采集（SCADA）系统，以便根据气象数据快速实施响应计划。在发生损失事件后，站点经理或ROCC人员应详尽记录任何可能需要用以支持保单和/或保险索赔的证据或活动[66]。

移除、回收和更换40万或更多受损光伏组件是一项昂贵且复杂的后勤任务。法医活动通常从使用照片和红外图像的系统级航空测量开始，以识别碎玻璃（可见损伤）和退化（不可见损伤）的组件。复杂性的增加在于损伤可能是随机的，表明冰雹事件的随机性质，并可能导致组件损坏的不均匀分布，包括仅后部玻璃破碎，从而使检查过程复杂化。EL成像通常是需要进行的，因为它可以识别单元开裂的根本原因，特别是具有表明冰雹撞击的独特模式的裂缝，但只有预定的百分比组件可能会成像。根据收集的数据，一位独立工程师或技术顾问将制定再发电计划。在大规模公用事业应用（>100MW）中，冰雹损害通常集中在特定的块或子阵列中。因此，根据对风暴损害的统计分析，通常会按块或按行进行组件级诊断。

3.5 对流风暴风险缓解策略

尽管在有些地方，剧烈对流风暴的风险是不可避免的，但通过提高技术素养、尽职调查和风险缓解实践，可以最大程度地减少大型项目损失[67]。具体的策略包括以下内容：

识别并量化恶劣天气风险。 在选址和设计阶段，所有潜在场地都应进行初步风暴风险评估[68],[69]。目标是根据具体位置确定冰雹和直线风风险（低、中等、高）。合格的技朧顾问应量化保险公司要求的（例如，百年一遇事件）和典型投资持有期（例如，十年、二十年和四十年持有）的事件复发间隔内的概率损失水平。这些损失研究的目标是提供基于场地特定气象特征（例如，通过严重程度和识别的历史冰雹事件）的比较可能的最大损失（PML）和年平均损失（AAL）值。

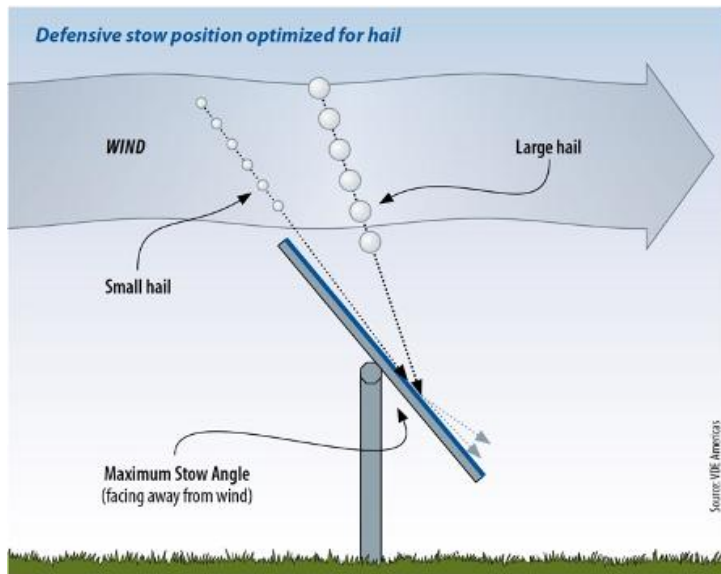


图12：抗冰雹优化的一轴跟踪器防御收纳位置[67]。

抗风和抗热加固 [70]。模块倾斜角也有助于提高抗冰雹能力 [71]，并且选择跟踪系统对于抵御冰雹风暴也至关重要。关键特征包括先进的收纳能力、快速响应时间和能够承受高风载荷和循环振动的螺栓连接。最佳防御位置如图12所示。此外，由于许多风暴急流和下沉风通常规模较小且分布不均，一个场地应配备多个风速计以确保风速数据的准确性。

在高风险地区，利益相关者可以通过部署抗雹模块[67],[70]以及遵循抗雹存放最佳实践[66],[71]来降低财务风险。在某些司法管辖区，根据建筑材料分类标准确定的增强抗雹能力是建筑规范或可保性要求[72]。在易受破坏性直线风影响的地区，应关注追踪器风荷载规范，以及系统的设计（例如，肖像模式中的模块数量、周边排增强、动态风敏感性）、追踪器存放策略和ROCC能力[66]。

改进测试标准和操作规程。 IEC 61215-2 中的弹道冲击测试要求是合格/不合格的性质，并未根据冰雹的严重脆弱性或恢复能力来区分产品设计[73]。这些依赖冰球的测试也未考虑冰雹的不均匀表面形态。要经济有效地设计和部署耐冰雹光伏组件和系统，需要提高产品测试标准，提供具有统计学意义的比较测试结果，并考虑整个系统，从螺栓的直径到组件的大小。虽然增强测试（例如静风洞测试、动态风分析以及计算流体动力学分析）可以在正常条件下防止合规跟踪器设计中的结构失效，但这些测试并非强制要求[74]。更重要的是，就耐冰雹能力而言，采用跟踪器系统的防御性冰雹收容策略至关重要，当正确执行时——已知能够显著减少与风和/或冰雹相关的损害[57]、[30]、[66]、[73]。下一次技术突破将是先进的收容算法，该算法能根据信誉良好的气象服务提供商提供的电子气象警报快速自动地将跟踪器置于防御性冰雹收容状态[66]。在跟踪器制造商允许的情况下，鉴于冰雹损失事件的严重程度，冰雹收容应优先于其他收容模式[57]、[66]。

频率) 和项目特定的技术考量 (例如，光伏组件玻璃厚度、跟踪器折叠角度等等) [56]。

进行战略技术调整。 战略设计选择可以大大提高光伏电站抵御冰雹的可能性，同时优化投资者回报。项目利益相关方在采购时应特别关注组件规格（特别是前玻璃的厚度和玻璃背板的 наличие）。超出资质测试表明，组件防弹冲击性能是前玻璃厚度的函数



3.6 核心要点

强对流天气风险并非光伏部署的不可逾越的障碍，但近年来巨大的损失表明需要更加关注缓解策略和最佳实践。

- 由于一系列极端天气事件，对太阳能资产的强对流风暴风险正在增加市场和科技变革。在技术方面，光伏系统正在在模块制造商向更大尺寸的模块过渡时更加脆弱较弱的正面的玻璃。在市场上的正面，公用事业规模的项目在地点中增加受到损坏性直线风和严重冰雹的影响。
- 光伏组件应根据位置风险进行选择。抗弹冲击性能是一个前玻璃厚度和热强化功能[70]；以及是否背板是玻璃或透明聚合物（后者降低阻力）。组件包装和封装技术也能影响抗细胞裂纹能力[13]，[75]。模块尺寸、框架和安装也会影响可能的冰雹损失。
- 为获得最佳效果，概率模型应包含从实验室冷冻冰球对场内自然形成冰雹的影响[68]，[76]，因此数据更准确地反映冰雹的不均匀性和撞击角度。
- 单轴跟踪器智能和主动跟踪控制，增加倾斜角度可以显著通过减少暴露的玻璃面积和增加一瞥（非直接）击打的次数[57]，[71]。
- 及时准确的早期天气警报是防御冰雹损失的重要第一道防线。ROCC越早收到恶劣天气警报，操作员或控制系统就越早可以发送冰雹收纳命令。这种早期预警确保所有追踪器在暴风雨来临前能最佳地收纳[66]。
- 在严重雷暴事件期间，太阳辐照度相对较低，因此应主动固定影响不大对一年生植物生产[77]。然而，对生存能力至关重要是尽早转为防御性停泊位置 [66]。
- 因为冰雹是超局地的现象，传统的冰雹图缺乏粒需要奇点来表征风险。保险业通常将冰雹风险跨相对较大的区域，例如一度经度乘一度纬度（约10000公里）²。提高站点和技术准确性的一项重要步骤是进行特定地点的冰雹风险评估是要在一个较小的网格区域内计算风险（参见图13）[68]。

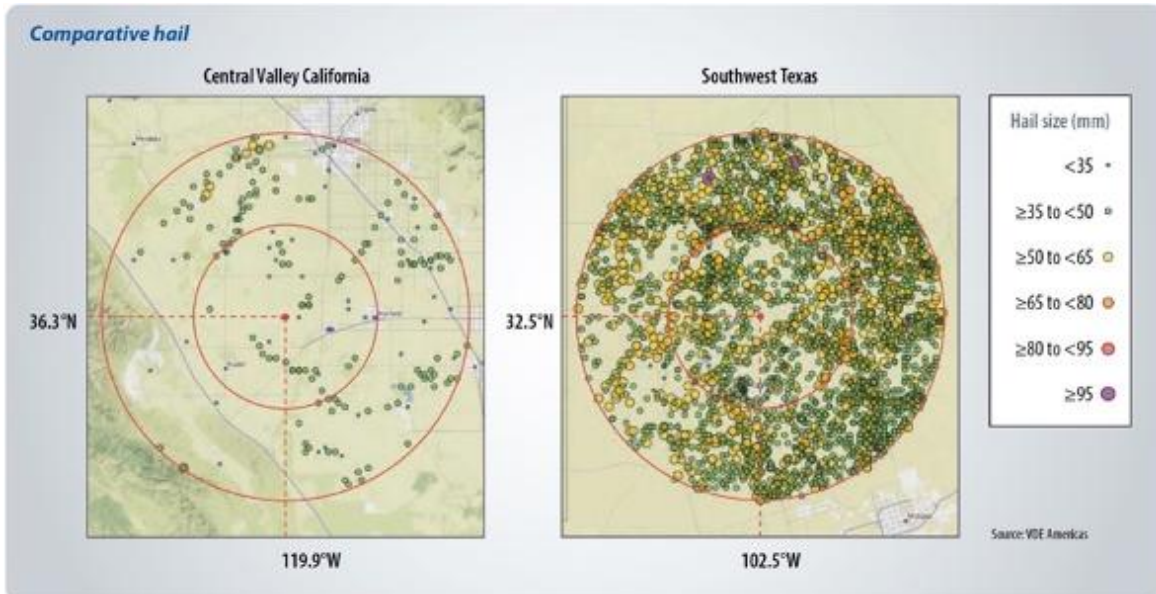


图13：基于校准雷达数据 [67]，比较低风险地区（加利福尼亚）和高风险地区（德克萨斯）的冰雹频率和分布



4 暴风雪和暴风雪

4.1 概述

北半球基本上处处都有降雪，几乎无处不在，在某个高度和某个时间点都会发生，如图14所示。在典型的冬季，积雪至少覆盖了50%的总陆地面积，并且是主要的降水形式；暴风雪通常也是可预测的，也就是说，在那些地区在一个或多个冬季月份中会反复出现降雪。尽管美国国家气象局（NWS）没有对暴风雪的正式定义，但该机构将暴风雪定义为：1）持续时间为三个小时或更长时间；2）有持续的风或频繁的大风超过56公里/小时；3）造成能见度低于0.4公里低能见度条件。

虽然适用于多雪气候的设计参数在IEA子任务3.2报告《光伏系统关键性能指标优化指南》[78]中有描述，但本章的重点是极端暴雪和季节性重雪。尽管在两种情况下，目标都是尽快从光伏板上清除积雪，以最小化阴影和发电损失，在打破纪录的大雪期间，清除积雪的挑战加剧，这既通过积雪的累积厘米数定义，也通过受影响的地表面积定义。

根据气候变化模型，高纬度地区可能会在缩短的冬季经历比正常情况更重的降雪，这对光伏组件产生双重影响：1）极端降雪事件会威胁到组件和安装系统的结构完整性；2）它们会长时间阻挡辐照度到达太阳能电池。

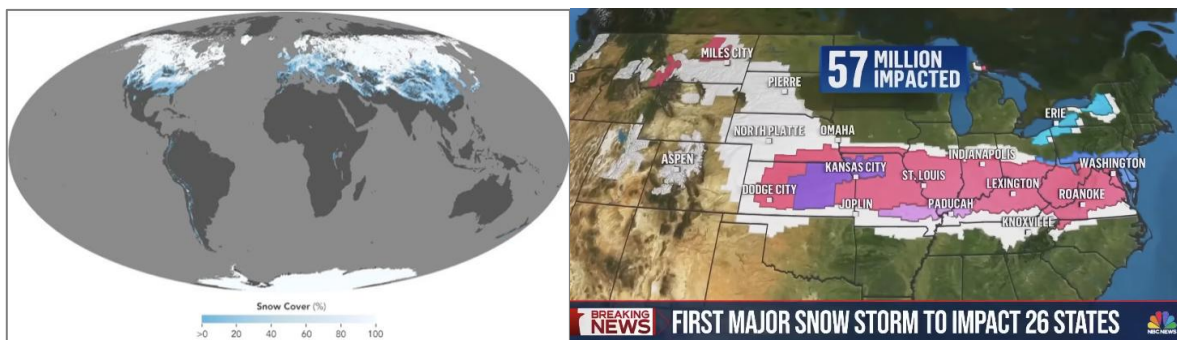


图14：2025年1月全球积雪分布（左）展示了北半球冬季通常被大量积雪覆盖的土地。[来源：<https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/global-maps/snow-cover/>] 在美国（右侧），单一风暴常常从西向东席卷，可能对光伏GW级设备造成遮挡。



4.2 运营影响

4.2.1 资源可用性

随着光伏在较高纬度地区的部署扩展，太阳能与积雪相交区域的资源可用性成为一个新兴挑战。在整个冬季，雪暴频繁发生，大量降雪覆盖了美国北部、加拿大、欧洲和亚洲。一场雪暴可能席卷数千公里，特别是在美国，许多风暴起源于落基山脉并向东移动。这些巨大的风暴可能影响数百吉瓦的光伏系统，积雪可能从少量尘埃到100厘米或更深的大雨，遮挡面板。此外，一场风暴可能紧随另一场之后，为已有的积雪增加更多。当积雪达到一定深度时——该深度因温度、湿度、风速和积雪年龄而异——发电停止，光伏电站实际上离线。因此，全球多个研究机构专注于1) 开发经济高效且可靠的策略，以加速模块除雪；以及2) 预测和减轻受风暴影响地区的太阳能发电损失。除雪策略在4.3节下讨论，量化由积雪引起的能量损失的模型也在此讨论。然而，能够使电网运营商在雪暴后管理发电损失和光伏电站突然的斜坡率 (ramp-rate) 的精确预测模型仍在开发中。无论如何，识别积雪遮挡及其推论——除雪——的基本参数，对于太阳能持续增长和在北部地区的电网渗透至关重要。

4.2.2 功率损耗

尽管寒冷的温度和雪的高反照率提高了光伏系统在冬季持续积雪地区的效率，但光伏系统的雪遮蔽引起的功率损失是显著的，并受多种设计参数的影响，包括倾角、组件架构、组件朝向、表面粗糙度和离地高度。例如，美国的一个30度固定倾角的大型太阳能电站，在持续积雪条件下，1月和2月的功率损失高达90%。随着太阳能发电规模的扩大，识别和验证加速雪融化和增加冬季光伏电站可用性的策略是一个重要的研究领域。

忽略积雪作为30年期性能保证的因素会导致高估发电量。因此，包含因积雪遮挡造成的能量损失对于精确的长期性能建模非常重要，以确保合理的财务评估和系统尺寸。正如下文所述，积雪损失可以用多种现有方法进行估算，但没有任何一种方法能完全捕捉所涉及的变量，包括组件朝向、形状因子、电气架构和非均匀脱落模式。

若能明确识别覆雪时段，并结合性能数据，同时若能将雪的影响与其他损耗机制（如逆变器停机或辐照度低）区分开来，那么就能估算由雪造成的损耗。此外，辐照度数据仅能用于实时计算损耗，而非预测性计算。此外，量化单场风暴的经济影响取决于阵列被覆盖的时间长度，而该时长又由多个变量决定，包括雪深、环境温度、风速、湿度等，以及电费成本。



4.2.3 物理损坏

除了能量输出减少外，大雪还可能对太阳能装置造成物理性损坏：组件会在重量下弯曲，导致玻璃和电池片开裂；部分融化的雪形成的冰坝会剪切组件的底部框架；而设计不当的支架会在大雪负载下倒塌。新雪和冰的密度范围为 $30\text{--}50\text{ kg/m}^3$ 和 $800\text{--}900\text{ kg/m}^3$ 分别地，但随着雪的变老和温度的升高，雪会压实，晶体将失去它们的树枝状结构，从而导致孔隙率降低和每垂直毫米的重量增加。雪的重量还是环境温度和湿度的函数。此外，如果新雪在旧雪脱落之前到达，模块上的负载可能会随着时间的推移而增加。此外，随着雪脱落，其分布和相关的负载应力在模块表面是非均匀的，并且通常集中在模块的下边缘，使模块受拉并使框架受力。另一个问题是，大量雪的脱落会在阵列下形成雪丘，高到足以阻挡模块的下部。

在极端暴风雪情况下，在现有积雪上堆积半米或更多的积雪可能会掩埋阵列的下部。雪 obstruction 对单轴跟踪系统尤其成问题，如图15所示。跟踪器无法在深雪中移动，它将同时经历发电损失和电机压力。

模块根据IEC 61215-2进行静态机械载荷评级，其中模拟雪载荷通过气动方式施加，或通过重量以均匀和逐渐的方式施加到玻璃前后表面，排除模块框架或横梁。测试在室温下进行，并在每一侧保持5400帕斯卡的恒定载荷一小时。这些步骤重复三次，同时监控内部电路的电气连续性[79]。对于不同的安装配置和安全系数，测试可能需要重复进行。模块也可以根据IEC 62938承受非均匀载荷条件，该标准要求指定倾斜角度下对模块进行阶梯分布的非均匀载荷。与静态载荷测试一样，非均匀载荷测试也在室温下进行。然而，现场条件却截然不同，因为雪是重复的，经常累积，并且总是伴随着低温以及温度波动。



图15：密歇根区域试验中心（RTC）的跟踪系统上承受着重大的雪载，加上较深的积雪和一些雪漂移，导致该系统暂时无法运行。照片来源：保罗·W·戴奇。

在Tanahashi等人最近的研究[80]中，使用位于日本新庄的三组光伏测试阵列对重雪载荷进行了考察。测试阵列配备了集成在内部的载荷传感器



在10°、20°和30°的组件倾斜角度处安装固定装置。10°倾斜阵列的雪压最大，排布前沿的正面载荷高达6-8 kN/m。20°和30°倾斜角度的雪荷载逐渐减小。如图16b和16c所示，当组件上的积雪与地面的积雪连续连接时，载荷增加。

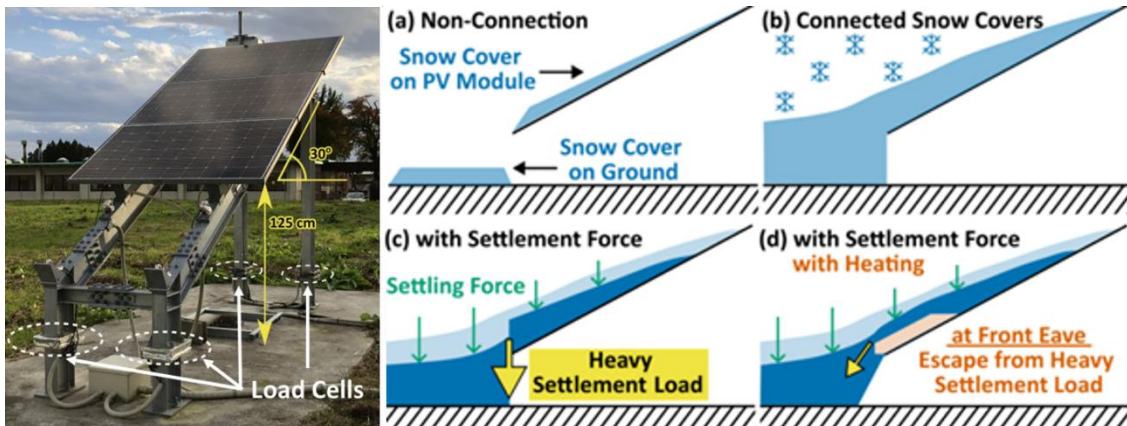


图16：实验光伏装置设置图，显示带负载传感器的三个子阵列中的一个。a)、b)、c)和d)的描述展示了积雪过程、连续雪堆的形成、组件的沉降和加载，以及背面加热融雪的过程[80]。

在适宜的气象条件下，风可以作为一种强大的力量清除模块上的积雪，但风也参与积雪的形成，特别是在北极地区，那里的雪含水量低。风可以形成雪堆，特别是在诸如山脊、建筑物或光伏阵列等障碍物的迎风面，这可能导致雪在特定区域集中，例如在行列之间。一项来自挪威斯瓦尔巴群岛的研究案例表明，雪堆部分覆盖了一个由四排模拟组件组成的地面安装测试阵列，每排宽度为10米[81]。随后的模拟研究显示，抬高组件可减少雪堆，但会增加支架成本。也可以选择较低的角度倾斜，这实际上相当于抬高组件，或者改变方位角使组件与主导风向平行，但两种方案都会导致发电量降低[82]。

雪堆也可能对屋顶光伏系统造成问题[83]。图17a展示了一个北欧瑞典工业屋顶安装的光伏系统的雪堆深度摄影测量模型[84]。一个相邻的墙面阻挡了风吹雪，导致一些模块上形成雪堆，深而重到足以破坏模块，如图17b所示。请注意，这些模块在角部被夹紧，这与制造商的建议相悖，突出了正确安装可能防止模块倒塌的事实。

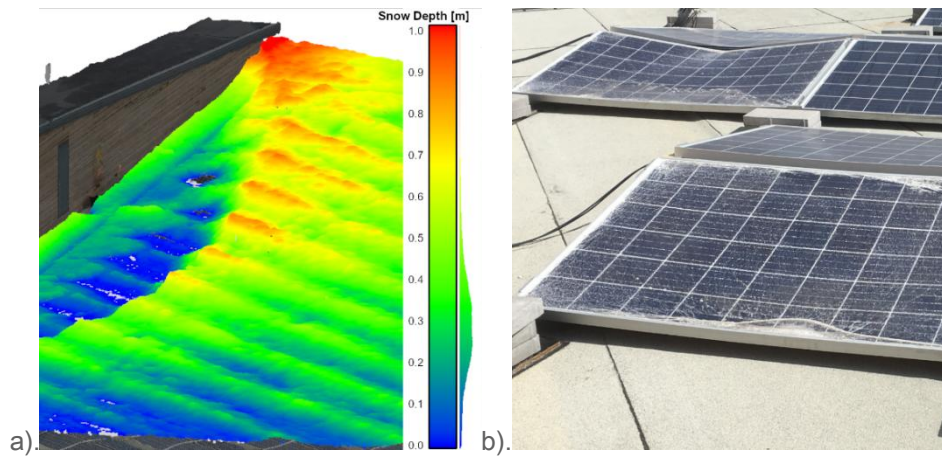


图17：a) 3D模型揭示了工业屋顶光伏系统上积雪的重量分布；b) 由于雪堆损坏而被错误安装的光伏组件的可见图像。照片来源：瑞典研究学院。

此外，182毫米（M10）和210毫米（G12）电池的快速采用，这两种电池分别约占2025年市场总量的31%和62%[85]，引发了可靠性问题。新型大尺寸组件目前尺寸可达2.3米 x 1.3米（30公斤），但通常不针对重雪载荷进行加固[86]。Burnham等人[87]正在对多种组件技术（不同电池尺寸、形状、前后板等）和安装架构（固定倾角与跟踪器）进行对比分析，以评估它们在冬季的鲁棒性（见图18）。特别值得关注的是认证测试未能涵盖的多种气候应力因素：即累积、重复、累加的风雪载荷以及相关的低温，这些因素会增加电池开裂的敏感性。这项工作的结果将于2026年发表，旨在为冬季鲁棒性系统的设计提供信息。

覆雪也会导致电池板开裂的可能性，这与与物理应力相关的各种原因有关。研究表明，随着环境气温下降，电池板的脆性会增强，这意味着在寒冷多雪的环境中更可能出现裂纹形成。有趣的是，初步数据显示，由电池板裂纹引起的功率损失（不包括冰雹电池板损伤）在多雪气候中比温和气候高约3%，在多雪气候中比潮湿/干燥气候高高达6%[88]。此外，有迹象表明，当暴露在低温下时，玻璃/背板组件更容易因负载引起的裂纹形成，并且一些额定值为3.6 kPa或更高的组件可以在低至1.0 kPa的负载下受损[84][89][90]。在撰写本文时，针对不同组件设计和覆雪的现场测试正在进行中，以更好地模拟和预测电池板开裂，并为寒冷多雪地区提供更可靠的组件选择。研究工作也在进行中，以比较电池板互联技术，如多丝带技术，这些技术与较低的电池板裂纹形成相关[91]。



图18：美国密歇根州卡卢梅特市的密歇根州新兴太阳能技术实时测试中心测试阵列。正在进行一项比较可靠性分析，针对六种不同的组件技术，其尺寸、电池尺寸、前玻璃和背板各不相同，并对每个组件进行雪载荷、风载荷、挠度、温度和直流功率的监测。在每个冬季结束时，所有组件都使用电致发光成像进行裂纹评估。图片来源：L. 烧恩哈姆。

除了光伏测试场地，组件耐久性数据还可以通过经历重雪负荷的光伏阵列的现场数据来补充。日本国立技术评价机构（NITE）指出，2018-2021年，东北和北海道地区的43个光伏系统因重雪和冰冻而受损。本研究中的光伏阵列包括中（50 kW–2 MW）型和大型（> 2 MW）系统。受影响系统的总容量约为30 MW，最常见的损伤是组件框架变形[92]。在NITE的第二项研究中[93]，在雪的中型和大型阵列报告结果中增加了小型（10–50 kW）类别。第二项研究从2021年4月持续到2023年3月，覆盖了65个阵列，主要位于北海道、东北、中部和中国地区。注意到与重雪期相关的多种轻微至严重损伤事件，NITE建议使用监控摄像头快速检测积雪，并进行定期现场检查以清除积雪。

4.3 缓解策略

缓解策略，主要集中于大型地面电站，并必须应对可靠性和可用性的双重挑战，可分为三类：主动切荷、被动切荷和设计优化。主动方法涉及机械或热干预；被动方法包括应用涂料改变盖玻片的拓扑结构以创造疏水或亲水表面；设计方法包括使用双面/无边框组件、固定倾角系统的更大倾角以及固定倾角和跟踪阵列的足够地面间隙。

4.3.1 主动卸载方法

主动方法包括模块的内部加热、正面或背面的外部加热、使用耙或吹风机进行机械清除，以及增加单轴跟踪的倾斜角度



系统。近年来，人们开始关注通过向模块注入受控的前向电流偏置来产生热量融化积雪[94]。例如，挪威奥斯陆的Aarseth等人使用商用直流电力电子设备，向1兆瓦屋顶阵列的每个模块施加10安培的电流（45伏特的前向偏置），得出结论认为偏置加热对于除雪是有效的，但能源和经济回收期取决于天气条件和电价[95]。所需能量的大小取决于环境温度、风速和积雪量，以及系统设计，倾斜角度越高，所需能量越少，因为雪在较高的倾斜角度上比在较低的倾斜角度上更容易滑动。然而，电流注入的长期经济和可靠性效益仍不清楚，也未在工业规模上进行过测试。例如，前向偏置加热对模块老化和旁路二极管可靠性的影响尚未得到研究。而且，该策略如何影响模块保修也不明确。另一个挑战是，融化后的水必须从系统中运走，以避免在阵列或屋顶上重新结冰，尤其是对于带女儿墙的商用屋顶。

第二种方法涉及一个电阻元件，例如透明导电氧化物或图案化的导体，将其应用于任一模块表面。在Tanahashi等人[80]的一项研究中，在背板上应用了铜网；结果表明，融化在模块上的雪和地面上的雪之间形成了一个空气间隙和不连续性。如图16d所示，该间隙减少了作用在模块上的总载荷。当地面上的积雪和模块上的积雪连续时[80]，地面上的积雪会对光伏阵列施加向下的力。Li等人通过将电阻加热与透明疏水铝纳米结构相结合应用于前端，结合主动和被动方法来增强雪的滑动[96]。然而，这种方法的实用性，包括成本和可靠性等方面的考虑，尚未得到证实。

一种三是人工清扫，但后者如果雪耙[97]和其他设备撞击模块可能会造成模块损坏。该方法也是一种劳动密集型，并且在高辐照度天作为卸雪的发起者最有效。第四种方法是单轴跟踪系统开发先进的收起策略。在合适的气象条件（如低温和低辐照度（见图15））下，雪可以附着在光伏模块上，即使倾斜度为 52° 也是如此。先进的跟踪器控制算法可以根据预期的雪、环境空气温度和盛行风向来规定收起策略。关键是时机：雪太少会导致发电损失；雪太多会对电机造成严重压力。密歇根理工大学正在进行的研究表明，高倾斜角度与将模块远离风向收起相结合是一种有前景的策略[98]。

4.3.2 表面涂层

航空公司和航运业应用防雪和防冰涂层是一种普遍且常见的做法，但专门为太阳能电池板配制的涂层面临两个挑战：1) 透光率必须长时间保持，涂层需经得起最小的UV诱导降解；2) 涂层必须能在光伏板整个使用寿命中抵抗分层和表面磨损。迄今为止最著名的研究针对防雪涂层，主要关注透明聚合物基涂层，这些涂层可降低冰的脱附力，从而在零下温度下也能实现被动雪脱落[99]。在阿拉斯加对该新型涂层进行的实地试验表明，与未涂层的参考模块相比，涂覆模块的输出更高[100][101]，但缺乏耐久性数据。下一代技术的示范计划在密歇根州北部进行，以验证其性能和光伏应用的潜力。



4.3.3 被动脱落方法、模块选择和设计考虑

与带框单面组件相比，双面和框外组件架构具有固有的融雪优势。框外组件设计，尽管对于大面积晶体硅组件不切实际，但其融雪速度比带框组件快 50% [102]。虽然双面组件的融雪速度不如框外组件，但在多雪气候中仍然具有明显优势，因为它们在高反照率条件下（冬季典型情况）能产生更多能量；它们在正面被雪遮蔽时也能发电 [103], [104]。例如，Hayibo 等人记录了在密歇根州 Escanaba 附近的双面 420 kW 系统与单面 1.2 MW 系统相比的双面增益为 19% [105]。Burnham 等人比较了单面组件与共位于双轴跟踪器上的带框和框外双面组件 [106]。由于背面辐照，双面组件的融雪效果优于单面组件，这增加了组件温度。与带框组件相比，框外双面组件具有更大的融雪潜力。

除了模块的选择之外，固定倾角式货架的设计也会影响阵列在雪天条件下的表现。雪滑落通常在至少 45° 的倾角下效果最好 [107]。对于降雪严重的地区，建议采用更陡峭的角度。大于纬度的倾角可能会降低年发电量，但可以改善除雪效果，保护模块免受雪载荷的损害，并提高前后表面反射率（图 19）。

然而，加速融雪的一个负面影响是，在大量降雪在显著融化或通过风或升华进行自然清除之前就脱落时，可能会导致系统边缘积聚成堆，从而阻碍进一步的融雪并对模块造成物理损坏（见图 15）。



图 19：桑迪亚国家实验室在密歇根 RTC 安装的混合朝向系统示例。正在进行对朝南固定倾角与垂直朝东和朝西的双面组件相对性能的分析，这些组件几乎不收集雪。图片来源：保尔·戴斯

卸雪和随后的雪堆形成也取决于搁置架的配置。将搁置架抬高到高于地面，以考虑该地点冬季平均雪深，在大多数情况下，应能为雪提供足够的卸落和堆积空间 [107]。行数也可以限制以减少能形成雪堆的雪量。



4.4 量化积雪损失

经验方法

对于这种方法，该方法基于历史数据，通过比较冬季产生的能量与无雪条件下应产生的能量来量化雪损失。加热的阵列平面（POA）辐射表可以提供比较测量值与模型雪损失所需的辐照度数据。挑战在于找到一种方法来精确识别阵列何时被雪覆盖以及被覆盖的程度。其他挑战包括监测面板上雪的深度和密度，这反过来又反映了环境气象条件、雪的透射率、每个面板上雪分布的均匀性或不均匀性以及面板的电气结构。总体而言，目标是通过确定阵列何时被雪覆盖以及被覆盖多少，并将这些时期测量的能量与模拟的无雪输出进行比较，来量化雪损失。

对于研究站点，时间序列 POA 数字图像，结合图像处理算法（见图20），可以量化组件级和串级雪被覆盖率[108], [105]。虽然这种方法是历史性的而非预测性的，但它能够比较不同系统设计的性能。为电网管理预测发电量是一项更复杂的任务，需要雪损失算法。

建模方法

大多数降雪损失模型根据环境温度/辐照度、倾斜角预测降雪脱落。几种建模方法使用基于从测试阵列收集的数据经验得出的因子，尽管这些结果不代表所有组件技术、安装配置、位置或气候。Pawlu k等人[109]确定了11种降雪损失模型。其中一些在多个地点进行了验证[110]、[111]、[112]，而另一些则相对未经充分测试。在这些模型中，Marion等人[111]、[113]、[114]、Townsend和Powers[110]、SunPower[115]以及Andrews等人[116]的模型记录最为详尽。使用大型阵列数据对不同的降雪损失模型进行比较和验证将显著有助于将降雪损失建模整合到最佳实践程序中[117]。



图20：单轴跟踪器的光伏组件上的积雪。黄色四边形表示为分析非均匀掉落模式而对组件进行的分割。照片来源：劳里·伯恩哈姆。



4.5 主要收获和建议

在极端雪情下，当单场暴风雪可能降雪达一米时，目标是要：1) 尽快将雪从面板上卸除以恢复发电；2) 通过设计能承受雪的重量的系统，包括硬件以及模块，来减少载荷损坏；3) 提高安装系统的高度以最大程度地减少雪堆对模块的影响。

加速融雪的建议包括以下几点：

- 针对单轴跟踪系统，基于倾斜角和风向，实现先进的堆放策略，以最小化积雪粘附。
- 确保每行的下边缘足够高，以便雪可以自由地滑落和堆积，并考虑该地区的最大预期降雪量。
- 安装双面组件，其吸收后侧辐照度，因此比单面组件更快地滑落积雪。
- 如果可行，考虑到其他设计、安装和采购限制，考虑无框组件而不是有框组件。
- 考虑安装一个辅助的垂直双面组件阵列，以备发电，满足关键负载。
- 选择更坚固的组件（前玻璃更厚、表面积更小）
- 安装经过精心设计的支架/跟踪系统，其柱子、轨道、檩条和螺栓能够承受重复和动态的风载荷。
- 进行冬季后的目视检查，以寻找任何损坏，并对一部分进行热成像以寻找热点证据。



5 粉尘和沙尘暴

5.1 定义和频率

沙尘暴 (DSSs) 的特点是大气中悬浮着大量颗粒物, 降低了到达地球表面的辐照强度。这些事件通常由雷暴或强气压梯度产生的强风吹过干旱和半干旱地区引发[118], [119]。它们在光伏能源生产方面会带来重大的局部、全国和国际影响。

图21显示了晴天辐射、沙尘光学厚度 (表示沙尘通过大气层时光线造成的衰减; 详见第5.3.1小节) 和云量[120]。观测显示, 悬浮沙尘的影响, 用沙尘光学厚度表示, 是光伏系统的一个显著问题, 因为具有高太阳能潜力的地理区域 (即晴天辐射高且总云量低) 也是更容易经历沙尘暴的地区。沙尘暴主要影响干旱和半干旱地区, 但它们产生的沙尘也能长途传输, 从其发源地, 例如中东[121], [122], 到达欧洲和其他大陆。鉴于光伏系统的全球分布不断扩大, 受影响的面积也很广, 沙尘暴有可能造成显著的宏观尺度影响: 由沙尘暴引起的光伏发电站发电量突然下降, 有可能暂时使国家电网不稳定[120]。

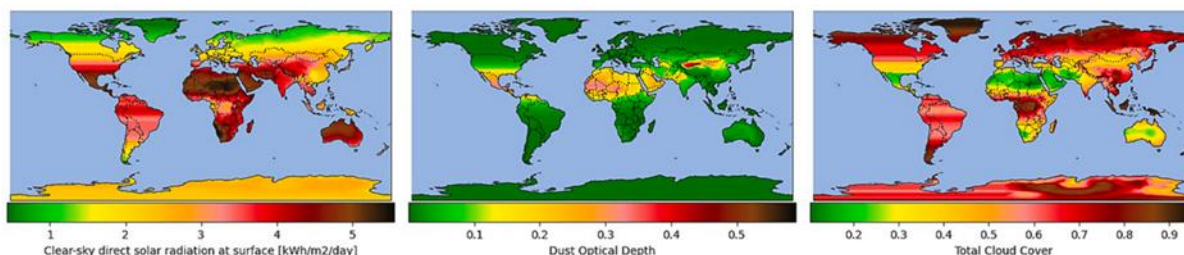


图21: 平均无云直射太阳辐射 (左)、气溶胶光学厚度 (中) 和总云量 (右) 的地图[120]。数据表示为年平均值。

5.2 相关风险

粉尘和沙尘暴可以通过两种方式影响光伏系统。首先, 由于悬浮颗粒对阳光的吸收、反射和散射, 存在表面辐照强度降低的协同效应。具体而言, 全球水平面辐照度 (GHI) 和法向直接辐照度 (DNI) 的下降幅度分别高达40-50%和80-90% [123]。其次, DSSs的潜在更持久的影响是光伏组件表面颗粒 (即污渍) 的累积增加。污渍会降低组件的能量输出, 其影响在天空晴朗后仍会持续, 例如, 在葡萄牙和沙特阿拉伯的DSS事件后, 据报道的持续损失高达7%和20% [121], [124]。

以下部分介绍了来自不同气候地区 (卡塔尔和伊比利亚半岛) 的两个案例研究。这些地区值得关注, 因为它们展示了沙尘暴对不同污染模式场址的影响: 卡塔尔全年承受更高且更稳定的污染, 而西班牙和葡萄牙等国家则经历季节性污染, 大部分损失发生在夏季。



5.2.1 卡塔尔/阿拉伯半岛

中东和北非 (MENA) 地区, 包括卡塔尔国, 全年辐照度水平高, 因此对大型光伏发电具有经济吸引力。然而, 频繁的分布式发电系统 (DSS) 是这一地区光伏发电的主要挑战。

在2015年4月发生的一次极端DSS事件后, 卡塔尔多哈的一个系统的能量产出下降了超过50% (见图22)。即使那次事件被认为是数十年来最严重的事件, 但严重程度较低但仍相当大的DSS并不少见。Javed等人[125]估计, 在2014年至2019年期间, 多哈有10%的天数发生了DSS事件, 夏季月份 (6月至9月) 的比例始终较高。最严重的七次DSS事件导致每次事件的PV性能损失超过5%, 而55次强度较轻的DSS事件仍导致了高于2%的损失。

作者还报告说, 在DSS天, 直径10 μm 及以下的平均每日空气悬浮颗粒物(PM10)范围在115至339 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 对平均 10 $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在晴朗的日子里 [125]。他们测量到在 DSSs 期间, 由于悬浮颗粒导致的太阳辐射衰减为 8%。此外, 他们还发现, 与晴朗的日子 (0.42%/天) 相比, DSS 天气期间 (1.23%/天) 的积污损失增长速度更快, 导致卡塔尔的平均积污率为 0.52%/天。尽管, 由于风的作用, DSS 事件后的积污损失立即下降, 但 Javed 等人 [125] 仍然得出结论, DSSs 使卡塔尔的积污损失增加超过 20 倍。

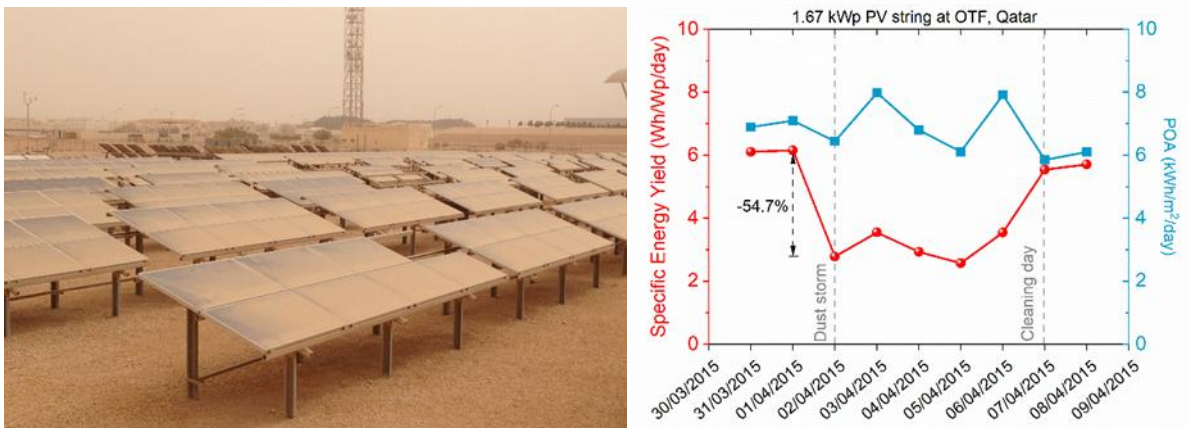


图22：卡塔尔多哈的沙尘暴（2015年4月2日）在卡塔尔环境与能源研究所户外试验设施。照片中描绘了被尘土覆盖的面板（左）；相对于可用辐照度（蓝色），能量产出下降（红色）显示（右），相对可用辐照度在一天内功率下降超过50%。输出在清洁后恢复。

5.2.2 伊比利亚半岛/欧洲

由于盛行风模式及其靠近撒哈拉, 伊比利亚半岛经常受到沙尘入侵, 其后果比欧洲其他地区更严重。2022年3月下旬发生了一次极端沙尘暴事件, 影响了半岛大部分地区长达17天[120]。悬浮的粉尘和沙粒的高浓度以及同时发生的恶劣天气条件, 使西班牙的太阳能光伏发电量在两周内减少了50%。在最糟糕的一天, 全国太阳能光伏发电能力预期产量超过了80%。然而, 由于降雨量异常大, 这提供了“自然”的污渍清除, 在那段时间内, 污渍损失没有出现实质性增加。



相比之下，2017年2月和3月在葡萄牙记录到的两次沙尘侵入导致了由于污染造成的能源生产显著下降（见图23）。具体来说，在葡萄牙Évora市郊的第一起事件中，测量到了高达8%的创纪录电力损失[121]。第二起事件影响较小，损失最高仅为3%。这种有限的影响主要归因于第二场沙尘暴的尘埃浓度较低以及持续时间较短。

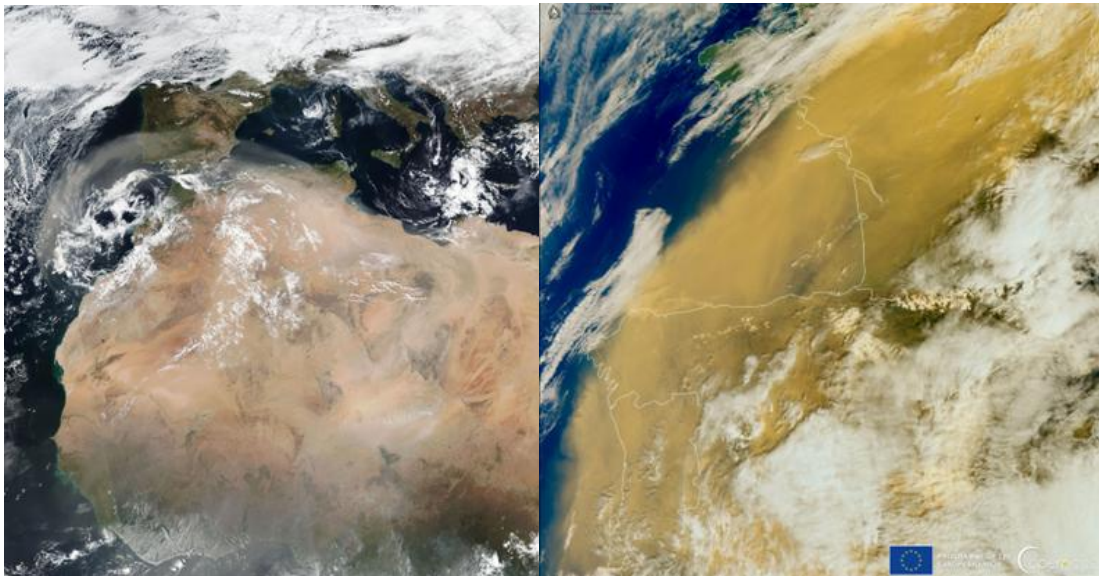


图23：真彩色图像（左 由NOAA/NASA Suomi NPP卫星上的可见光红外成像辐射计 Suite (VIIRS) 获取的（2017年2月21日）；以及图像（right）来自欧盟，2022年3月15日的哥白尼哨兵-3卫星图像，显示撒哈拉沙尘暴笼罩着法国、西班牙和葡萄牙的天空[126]。

5.3 建议

5.3.1 监控

实时监测和短期预测对于限制决策支持系统（DSS）对光伏（PV）的负面影响都至关重要。基于气溶胶光学厚度（AOD）和粉尘光学厚度（DOD）可以追踪和预测极端沙尘暴事件，这两个无量纲参数用于测量大气中太阳辐射的消光。AOD或DOD的较高值表示能见度降低，到达地球表面的太阳辐射减少。AOD测量柱状气溶胶负载（即尘埃、烟雾和其他颗粒物对太阳辐射衰减的综合贡献），而DOD仅考虑大气中悬浮的矿物粉尘颗粒。因此，DOD更适合用于DSS监测，因为它排除了与沙尘暴没有直接联系的非粉尘气溶胶。然而，由于AOD的可用性更广，实践中更常采用AOD。AOD和DOD值可以是地面测量的，也可以从卫星或再分析数据中获取（参见表格4，或[127]了解更多全面和详细列表）。



表4：气溶胶数据来源示例。

源	描述	参考文献
aeronet (气溶胶机器人网络)程序	地面实测气溶胶特性在七- 全球各地	[128]
ModIs 尘埃气溶胶 (MIDAS)	从插值中获得的网格化DOD值 卫星和再分析数据。	[129]
欧洲中期天气预报中心大气 位置重新分析4 (EAC4)	全球大气成分再分析 tion.	[130]

d Gkikas 等人[131] 将 DSS 在一天中的分类为“极端”，如果：

$$AOD(d) > \overline{AOD} + 4 \cdot \sigma_{AOD} \tag{1}$$

其中 \overline{AOD} 和 σ_{AOD} 分别是某个位置的平均气溶胶光学厚度及其 AOT 标准差。同样地，如果：DSSs已被分类为“强烈”。

$$\overline{AOD} + 4 \cdot \sigma_{AOD} > AOD(d) > \overline{AOD} + 2 \cdot \sigma_{AOD} \tag{2}$$

然而，尘埃仅部分导致气溶胶负荷的光学效应。因此，Papachristopoulou等人[126]建议将先前方程（1、2）中的AOD替换为DOD。此外，2024年2月，哥白尼启动了气溶胶警报服务，该服务根据感兴趣的地理区域和气溶胶种类通知用户DSS事件的发生[132]。

颗粒物指数，例如PM₁₀和PM_{2.5}，也可以检测到发生和沙尘暴事件的强度，并且既可在地面观测数据集也可在卫星反演数据集中获得。具体而言，PM₁₀阈值为100、150和200 μg/m³ 已被雇佣用于检测DSS在各种研究中的发生[133], [134], [135], [136]。或者，当PM₁₀平均浓度超过200 μg/m³时，已识别出DSSs。对于超过4小时在一天，且最大小时值超过250 μg/m³ [137]。但是应注意的是，PM₁₀和PM_{2.5}仅提供气溶胶负荷的部分概述因为它们主要与大气柱的下部仅[138]。

如前所述，灰尘沉积速率增加会导致即使天空放晴后性能损失时间延长。正如之前IEA PVPS任务13报告[139]中所述，可通过模型估算灰尘沉积或使用传感器进行测量。灰尘测量站是最常见的灰尘测量解决方案：它们比较两个光伏设备的电气输出（短路电流或最大功率输出），其中一个已清洁，另一个未清洁[140]。然而应强调的是，由沙尘暴引起的灰尘沉积可能显著不均匀。这意味着基于短路电流和最大功率输出的测量可能会得出不同的估算值[141]。例如，在调查2017年2月葡萄牙事件（见上文）时，Conceição等人[121]发现功率输出下降了8%（见图24），但由于旁路二极管激活，短路电流的损失限制在3%。因此，更倾向于使用最大功率输出测量。

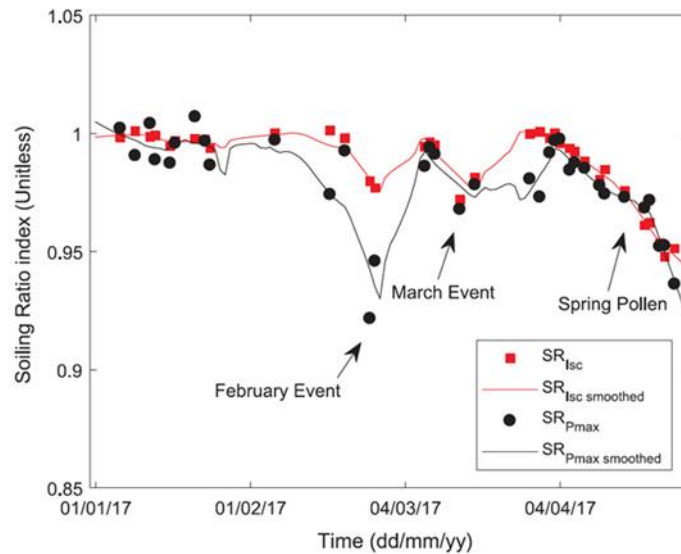


图24：2017年1月至4月葡萄牙Évora市附近农村地区的灰尘污染率指数（无灰尘条件下的实际电力输出与预期电力输出的比值）[121]。测量比较短路电流（Isc，黑色）与最大功率（Pmax，红色）。

5.3.2 缓解

减轻沙尘暴的影响意味着减少污损引起的损失。在易受污损的地区，如卡塔尔，定期污损的累积影响通常造成的损失比急性沙尘暴的发生造成的损失更大。相比之下，在南部欧洲等地区，当沙尘暴发生时，污损造成的损失会显著更高。在两种情况下，都可以制定和定期部署缓解方案。

对于常规污损，缓解措施可以是预防性的或纠正性的[139]。预防旨在通过降低其沉积速率或促进其自然去除来减少污损。在可能的情况下，在有DSS（分布式发电系统）的情况下，应将组件倒置放置，或者至少以尽可能高的倾角远离风向，以减少前表面污损。请注意，尽管取得了 promising results [142]，跟踪器仍然受最大角度限制（通常为 $\pm 45^\circ$ ）至 $\pm 60^\circ$ 。它们预期移动到的目标。此外，高风速条件，这是许多DSS事件的典型特征，可以将光伏系统置于结构风险之中，从而使高堆放选项不可行。另一种替代方案是使用“防尘墙”，其旨在改变风场模式，使大部分污染颗粒远离光伏系统[143]，但该技术需要在广泛部署之前达到更成熟的状态。抗污染涂层技术是减少灰尘粘附到光伏面板前表面的又一项策略，从而降低污染积累率，并因此减少清洁需求[144]。

纠正措施包括一旦模块表面已经积累土壤时将其移除。此策略可通过手动、半自动和全自动清洁方法执行[144]。然而，由沙尘暴引起的污染被发现在模块上比“常规”污染更难去除，因为土壤在模块上的密度。随着污染密度的增加，清洁效率下降，可能会使常规清洁技术（例如自动机器人）无效。这意味着，在DSS事件后，可能需要多次清洁运行才能去除积累的颗粒。还应注意，主动清洁方法可能会降低模块的抗反射涂层，导致效率略有下降，尽管即时收益将非常显著。



6 热浪

6.1 定义

热浪没有统一的定义。一些气候研究基于温度阈值或温度的百分位数和最短持续时间来定义，例如持续三个或更多 consecutive 热天和热夜。在 1969-1998 年的计算中，热天（夜）是指每日气温超过长期每日 95th 夏季季节（北半球6月-9月；南半球12月-3月）的百分位数。另一个定义是，热浪必须持续至少六天，最高气温超过当地90th 历史时期（1961-1990年）的百分位数。另一种定义——由STARDEX（欧洲地区极端事件的统计和区域动态降尺度）项目提出——将热浪定义为至少连续六天的序列，其中每日最高气温至少高于气候值5°C。气候值是针对参考模拟中每个日历日的5天窗口中心计算的[145]。

6.1.1 预期变化

多个IPCC报告预测更强烈、持续时间更长的热浪，包括西欧、地中海以及美国东南部和西部地区的明显热浪，这是由于温室气体增加导致的环流变化所致。但这些情景或模型显示出非均匀变化（见图25），意味着极端模式难以缩放，导致热浪难以预测[146]。

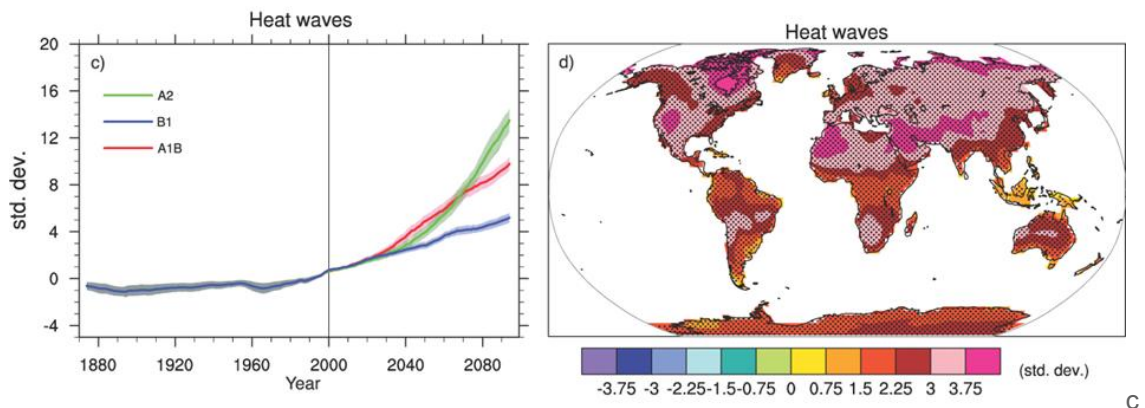


图25：左：根据不同情景，全球平均热浪变化（定义为一年中最长的连续至少五天高温期，且每日最高气温至少比同年同日气候态高5°C）。右：模拟热浪的空间模式在两个20年平均（2080-2099年减去1980-1999年）之间的变化（偏差）[147]。

地表温度（TAS）变化预测——根据IPCC气候情景快速浓度路径（RCP）8.5——到本世纪末的变化范围在3至5°C之间，并且与南部和东部欧洲潜在光伏发电量（PVpot）的关联平均感应变化为-3%（见图26）[148]。

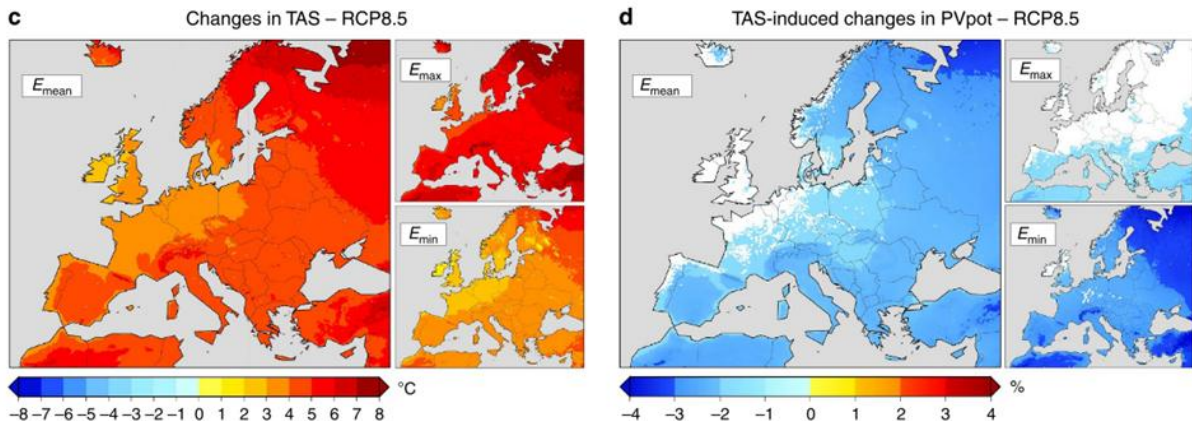


图26：左：由地表温度（TAS）表示的气候变化预测；右：至本世纪末（2070-2099相对于1970-1999）TAS的预测增加可能会影响光伏潜力（PVpot）[148]。

6.2 对光伏生产的影响

光伏发电受温度负面影响，当温度超过 25°C 时，电池性能呈线性下降。对晶体硅电池的研究发现，温度每高于 25°C 1°C ，电池效率在相对意义上降低 $0.2\% \sim 0.5\%$ 。光伏系统中的设备如控制系统、电缆和逆变器也受高温影响，导致能量输出降低和地下导线容量下降[149]。电缆也易受热应力影响，会伸缩，对光伏系统的电气连接施加机械应力，除非系统设计合理，否则连接可能受损。

热也会导致逆变器性能下降，大多数逆变器在环境温度超过阈值时（即 40°C 或 50°C ）会进行温度降额（即限制输出功率），而温度降额的值（ $\%/^{\circ}\text{C}$ ）则因逆变器品牌和型号而异，阵列电压、逆变器MPPT工作窗口和电网连接电压在实际中会影响该值。一项针对德国约1300个光伏系统（共23000台逆变器）的研究显示，随着环境温度的升高，逆变器的过热警告有所增加，尽管实际故障率相对较低，但仍需要更多极端环境的数据来理解对逆变器效率的影响[150]。

6.2.1 自然灾害的影响

野火是热浪的常见后果，在地面安装的太阳能电池板下干燥的植被着火并蔓延至太阳能农场的案例已有几起。两起此类事件发生在2022年欧洲的热浪期间（见图27），其中草地火灾可能是由连接器或逆变器的电弧故障引发，并在荷兰一个30兆瓦的太阳能农场和英国一个20兆瓦的太阳能农场中通过干燥的植被迅速蔓延[151]。有关野火的更多信息可在下一章找到。



图27：英国地面安装的太阳能电池板下的草地火灾[151]。来源：每日邮报英国(<https://www.independent.co.uk/climate-change/news/dorset-solar-farm-fire-verwood-b2121279.html>)。

6.3 两种热浪

热浪要么是干的，相对湿度低于33%；要么是湿的，相对湿度高于66%。这两种类型都可能发生在同一地区，例如在东亚，其中干燥热浪在西北地区盛行，靠近主要沙漠地区，而湿润热浪通常发生在南部地区，靠近沿海地区[152]。

一个干热浪的例子来自以色列内盖夫沙漠的弗劳恩霍夫ISE监测站（位于30.8°纬度）。该地点Sde Boqer既有高辐照度和温度条件，但湿度较低。年平均辐照量约为2,276 kWh/年/m²，环境温度为20.4°C，有效组件温度为35.4°C，风速为2.0 m/s，在47°C时相对湿度为13%。大约每两到四年就会在这里出现破纪录的热浪，包括2010年、2012年、2016年、2018年、2020年和2021年。

2020年5月14日至22日记录的热浪，温度达到40-43°C，具体取决于地点。虽然没有打破绝对温度记录，但这一热浪因其持续时间长而引人注目[153]。图28展示了自2011年以来部署在内盖夫的参考硅光伏组件的日平均电气参数。虚线绿色线表示热浪前后平均值的改变，P_{mpp}降低了12.5W（9.8%），I_{sc}降低了0.3A（5.7%），V_{oc}降低了1.1V（3.2%）。根据该年户外测量数据，计算这些参数的温度系数（TC）时，TC_{P_{mpp}}是-0.39%，TC_{I_{sc}}是-0.0043%，和TC_{V_{oc}}是-0.33%。

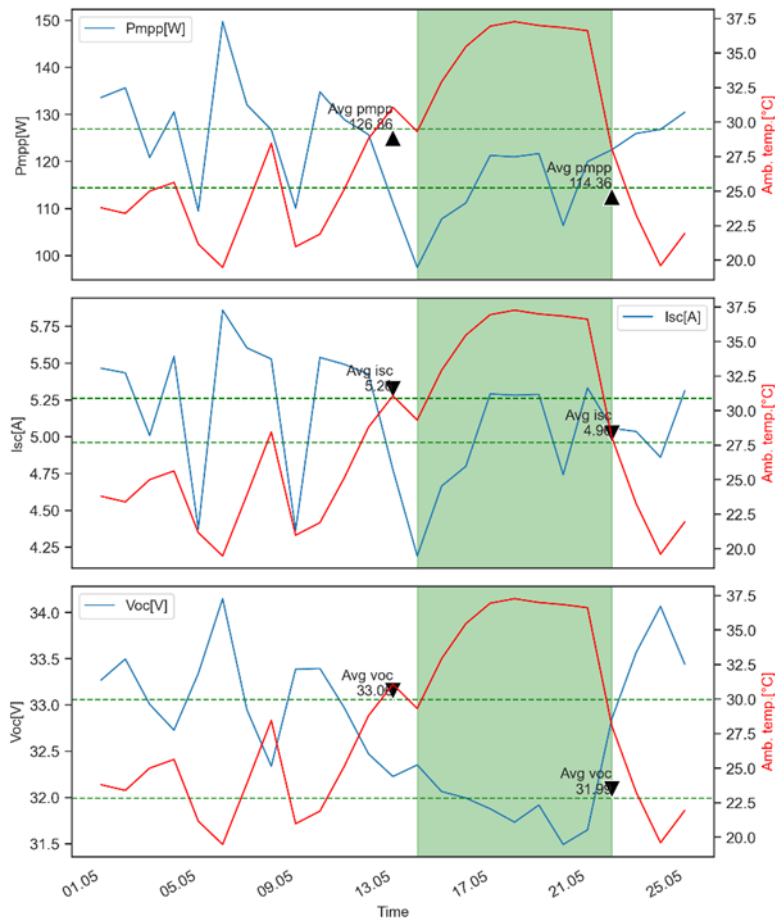


图28：2020年5月以色列内盖夫地区光伏组件的Pmpp、Isc和Voc变化情况。显示的是5月14日至22日（绿色区域）的炎热天气期间的环境温度（红色曲线）。虚线绿色曲线表示热浪前后组件总平均值的降低，显示了组件性能的下降。数据来自弗劳恩霍夫户外性能实验室——内盖夫沙漠测试点。

6.4 热降解效应

卡亚等人提出一个考虑全球不同地区光伏组件气候负荷的模型[154]。结果证实高温是降解的主要加速因素；具体的降解机制映射可以在[155]中找到。研究人员指出，在欧洲最热地区（西班牙南部和葡萄牙）的降解率可高达0.8%/年，在全球赤道附近地区可高达1.4%/年。降解也表现为沙漠气候中常见的组件故障，包括封装褪色、背面板起霜和/或分层。有趣的是，尽管沙漠中紫外线水平和温度很高，但低湿度降低了光降解的影响。干旱气候的年降解率估计为0.74%/年，相当于运行21.4年后达到初始性能的80%。

一项由Theristis领导、比较部署在不同美国气候区模块降解速率的研究发现，在佛罗里达的炎热、湿润的热带气候中安装的模块的降解速率几乎是相同模块的两倍（中值Rd值为-1.12%/年）。



在 Нью-Мексико (炎热干燥) 和科罗拉多 (凉爽) 安装, 其 Rd 值分别为 -0.56%/年 和 -0.61%/年 [156]。

6.5 缓解策略和关键点

- **系统规划**：逆变器应安装在能最大限度避免过热的地方, 即通风良好且遮阴的位置。至少应避免安装在散热器附近, 例如混凝土结构或建筑物; 应相互隔离, 并在现有遮阴不足时配备遮阳罩
- **模块选择**：具有低温系数的太阳能电池板, 如黄铜矿、异质结和TOPCon, 是高温地区的良好选择。
- **降解率**：需要更多关于技术和位置特定退化率的分析, 以提高性能模型的准确性和LCOE计算。
- **运维实践**：由于热浪通常与干旱相关, 干旱会造成多尘条件, 因此应在持续热浪过后清洁模块。此外, 还应对模块进行检查并进行热成像, 以便及早发现局部阴影、热点或电池片裂纹。
- **冷却技术**：一些公司提供主动冷却系统, 在炎热的日子里向面板顶部喷洒再生雨水, 从而降低模组的运行温度。正在研究其他解决方案, 包括附着在光伏模组的水凝胶以及太阳能电站与风力涡轮机的共址以用于冷却气流[151], 但这些选项尚未被广泛采用。



7 洪水

7.1 概述

气候变化导致全球大部分地区的洪水发生频率和严重程度均有所增加。洪水的严重程度在许多地区打破了历史记录，包括通常降雨量很少的干旱地区。此外，随着海平面上升，沿海地区的陆地面临着越来越大的危险洪水的风险，从其他天气灾害，包括加剧的飓风，发生。尽管所有易受洪水影响的设施都容易受损[157][158][159]，但本章特指针对光伏电站的威胁，并通过案例研究加以说明。本章还包含了基于印度案例研究[160]的减轻光伏相关洪水风险的最佳实践。

7.2 现行做法及其局限性

目前，减少光伏电站洪水风险分为两类：1) 将电站选址在低风险区域；2) 制定完善的雨水管理计划，该计划包括管道将水从光伏组件、逆变器和其他重要结构引导至雨水池。

然而，这两种方法都有局限性，因为它们基于的历史洪水模式可能不再能代表全球气候模式预测的转变，包括极端降水量的增加。历史上洪水较少发生的地区出现的灾难性洪水表明，“易 Flood”地区的洪水严重程度可能会加剧[161]。

保险，虽然对许多与天气相关的损害是一种保护策略，但对于洪水来说，通常并非一个简单的解决方案，原因有二。一是光伏相关的洪水保险很少见；二是当保险可用时，往往过于限制而不可行。例如，某些政策要求在预期洪水时“关闭”植物，仅在专家认为安全后方可启动。然而，并非所有光伏植物都具有“快速关闭”功能，该功能可切断交流电源以及各个组件之间的连接。对于大多数大型电站来说，模块数量实在太多，无法在预期洪水时断开单个模块。设计抗洪光伏植物需要前瞻性的方法，该方法应考虑实际预测，包括大多数气候模型所预测的极端洪水事件。

7.3 光伏电站洪水损害

洪水对光伏电站造成的损害可归因于两种主要应力因素：1) 对快速流动的洪水的水力阻力；2) 设备（包括电气元件）的淹没，导致水浸。以下分别给出了这两种应力因素造成的损害详情（调查由印度理工学院孟买光伏研究中心和教育中心进行）：

7.3.1 抗急流洪水

当安装在结构上的光伏组件被快速流动的洪水淹没时，组件对水流阻力取决于其朝向。当组件处于高倾斜角度时，会产生高阻力，可能导致灾难性后果。印度南部的一个固定倾斜、朝南的电站 exemplifies the risk（见图29）。在这种情况下，流动水的力量如此之大，以至于增加



模块/结构的强度来承受这种破坏。唯一的选择是进行设计变更，以降低结构对急流水的抗力。



图29：印度南部因快速流动的洪水而受损的PV结构。例如包括被摧毁的组件和结构；被连根拔起的基座；以及被洪水碎片击碎的玻璃。

为了减小阻力，模块应安装接近水平或安装在具有该容纳能力的跟踪器上。例如，一个与上述位置相同区域的工厂部分，将光伏模块安装在混凝土结构上的运河上方（也称为运河顶光伏），但倾角仅为6度。该区域经历了同样的急流，并且模块也被淹没。然而，由于低倾角意味着对水流阻力较小，因此可见的结构损坏很小，如图30所示。



图30：带有混凝土结构的渠道顶部光伏系统对洪水表现出弹性，因为低倾斜设计对快速流动的水阻力较小。

7.3.2 潜水

所有地面光伏电站都易受洪水侵袭，因为商用光伏组件并非设计用来承受被淹没在水下的情况。BOS组件，如汇流箱（SCB）和逆变器，在水下更容易发生故障。考虑到淹没可能持续数天，并且在此期间水可能比光伏组件高出几英尺，如图31所示。此外，洪水 waters 含有大量泥沙，并含有污染物，这些污染物会渗入并污染设备。



图31：在洪泛事件期间，光伏电站的部分区域被淹没在1-3英尺深的水中约两天。

即使浸没时，光伏组件也能接收到足够的光以在组串/SCB/逆变器级别产生高电压。安全隐患很大：当水位下降时，电流泄漏会立即导致短路和火灾，如图32所示。当存在高电压时，组串逆变器/SCB特别容易发生灾难性损坏。



图32：在受洪水影响的太阳能电站对逆变器进行火灾攻击并烧毁SCB。

由淹没引起的模块损坏分为三类：

- **连接箱故障**：现场研究表明，那些仅具有防尘等级（IP）65的带接线盒的模块出现了烧痕和部分熔化的外壳，表明接线盒内部发生了短路/热点。相比之下，具有浇封剂且能承受短暂水浸的IP67级接线盒



尽管浸泡在1-3英尺深的水中超过48小时，但未发现水侵入的迹象。这些初步发现表明，对于洪水易发地区的任何工厂，应将较高等级的接线盒指定为模块采购的一部分。

- **加速PID/腐蚀** 标记为“抗PID”的模块在浸没时未显示出加速的PID，与非浸没的字符串相比。EL成像也没有显示出细胞裂纹的增加，尽管这个结果可能取决于细胞尺寸和模块架构。然而，这些模块的长期性能比仍然是未知的。
- **染玻璃** 退水后，运河顶部的模块上可见大量淤泥，尽管用肥皂水清洗，玻璃仍永久性染色（见图33）。结果是模块中出现永久性热点，这可能会在长期内导致可靠性问题。



图33：洪水后的泥沙沉积导致模块永久性污渍，从而产生了热点。

7.4 推荐和要点

基于历史洪水模式的预测需要被基于先进的气候模型的新的洪水预报系统所取代。此外，新的光伏电站的设计必须反映出日益严重的洪水威胁，并规定倾斜角度和存放策略，以降低对急流水的物理阻力。

推荐的设计策略包括：

- 低倾角安装以减小阻力，尽管后者必须根据植物的纬度以及非赤道地区光伏植物对年发电量的影响进行考虑。
- 部署带控制算法的单轴跟踪器，以便在洪水预期时将组件水平收纳。然而，这种方法必须包括对跟踪器支架的坚固设计，以确保它们能够承受侵蚀。带钢条的混凝土结构更坚固，但不适于大规模应用。
- 采购配备IP67或更高级别接线盒的光伏组件。
- 采购适用于逆变器和SCB的IP67或更高级别的包装。注意，增加的保护层可能会降低它们的可维护性。
- 提高组串逆变器和SCB的离地间隙。注意：任何对光伏板遮光的影响都必须进行考虑。

此外，安全必须始终是首要任务。在接近被淹没的系统之前，必须将其完全断电。此外，洪水会将意想不到的、潜在危险的野生动物带入光伏电站区域，包括有毒蛇类，在勘察损坏情况时，人员需要格外小心。



8 野火

8.1 概述

野火几乎无处不在，发生在除南极洲以外的所有大陆（见图34）。它们的频率和强度也在增加[162]，预计到2030年全球将增加14%，到本世纪末将增加50%[163]。在美国，气候-火灾模型预测，2021年至2050年，森林火灾面积将比2018-2020年季节翻一番[164]。其他大陆也预测会有类似的增长：未来十年，南欧的灾难性火灾可能增加十倍（见图35）[165]。澳大利亚、土耳其、希腊、意大利、法国和西班牙也记录了大规模火灾。2023年，加拿大经历了迄今为止最严重的火灾季节，烧毁了1850万公顷土地。2002年至2018年期间，澳大利亚的平均烧毁面积增加了350%。趋势很明确；剩下的问题是，预计野火活动的增加将在多大程度上对光伏系统的性能和可靠性产生负面影响，无论是在地方层面还是区域层面。

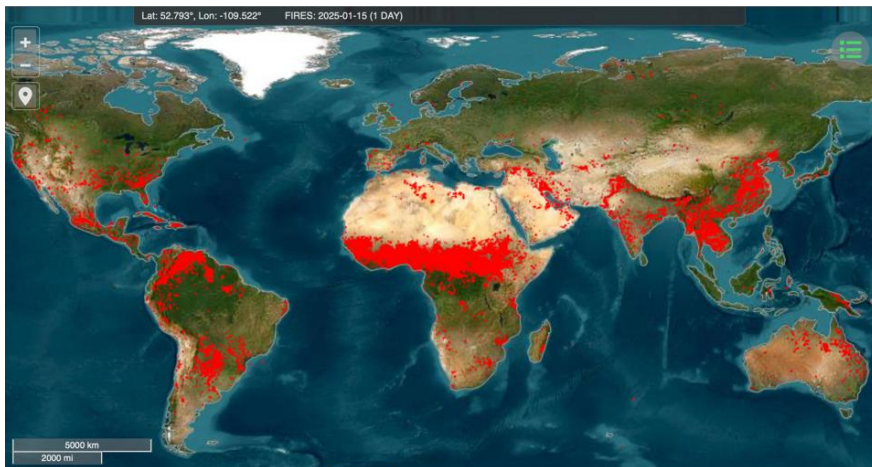


图34：展示了全球在一天（2025年1月15日）的野火发生情况，但请注意，南美洲、非洲和亚洲的大多数火灾是为清理土地而故意设置的。

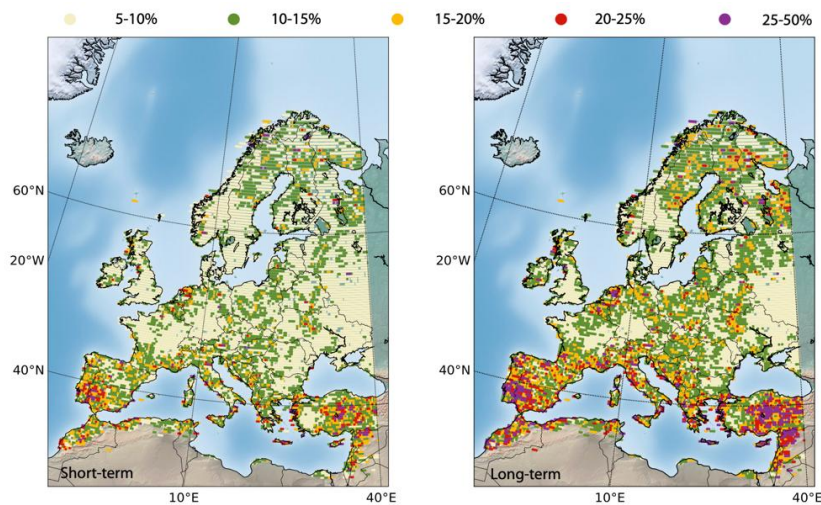


图35：欧洲极端火灾事件概率从现在（左图）到未来20年（右图）的增长。火灾活动的地理增长与高辐照度地区重叠，这些地区也正在经历光伏装机容量的增加。



火灾可能由人类活动引发，既可能是故意的，例如砍伐雨林，也可能是无意的，例如处理香烟或篝火不当。它们也可能由电力网络中的电弧故障引发，尤其是在周围植被干燥且管理不善的情况下。但是——总体而言——野火的主要驱动力是环境气温的上升趋势，尤其是在高纬度地区，当气温升高伴随着降雨减少、大风和干燥植被时，这一趋势尤为显著。

然而，需要注意的是，大多数野火发生在有燃料的地方，即对光伏开发商缺乏吸引力的植被茂密的山区和偏远地区，这些地区也远离电力负荷。但人口数据显示，所谓的荒野和市郊之间的差距正在缩小，尤其是在美国西部，这增加了对包括光伏设施在内的关键基础设施的风险。同时，光伏电站引发火灾的风险也在增加，这是由故障逆变器和非正常光伏连接器引起的电弧故障以及植被管理不足（见图36）的结合。

8.2 太阳能光伏系统野火风险

关于野火破坏或损害光伏系统程度的可用数据很少；对于任何亚灾难性影响，例如烟雾暴露后组件和其他部件的加速降解，数据也同样缺乏。尽管如此，合理地可识别三种影响类别：

- **全部或部分破坏。** 野火吞噬了一个光伏电站并摧毁了全部或部分电站，需要全部或部分重新发电。
- **性能损失。** 遮挡阳光、充满颗粒物的烟雾羽流会减少发电量，并且在烟雾消散后，会沉积颗粒物到剩余的模块上。
- **亚灾难性损坏** 野火颗粒物可能具有腐蚀性和导电性，但它们对光伏系统长期可靠性的影响记录不佳。鉴于其微小的直径，PM颗粒物可能会穿透电气平衡系统，例如，未正确拧紧或维护且施工期间未闭合的连接器，但缺乏证据。类似地，人们对现场火灾的热量如何影响定义半径内的模块知之甚少，可能性从裂纹电池和背片到封装材料损坏不等。^{2.5}



图36：现场草火，可能由电弧故障引发，产生浓烟，可污染并穿透光伏系统，潜在造成长期可靠性风险。



8.3 经济影响

据Gcube研究，光伏系统因野火损坏的保险索赔数量重大，尽管野火损失损坏仅占提交的冰雹损坏索赔的一小部分（见图37）。关于相对成本（即每个极端天气类别的索赔总额比例），野火造成的经济损失与飓风和洪水造成的经济损失相当，但远低于冰雹损坏。

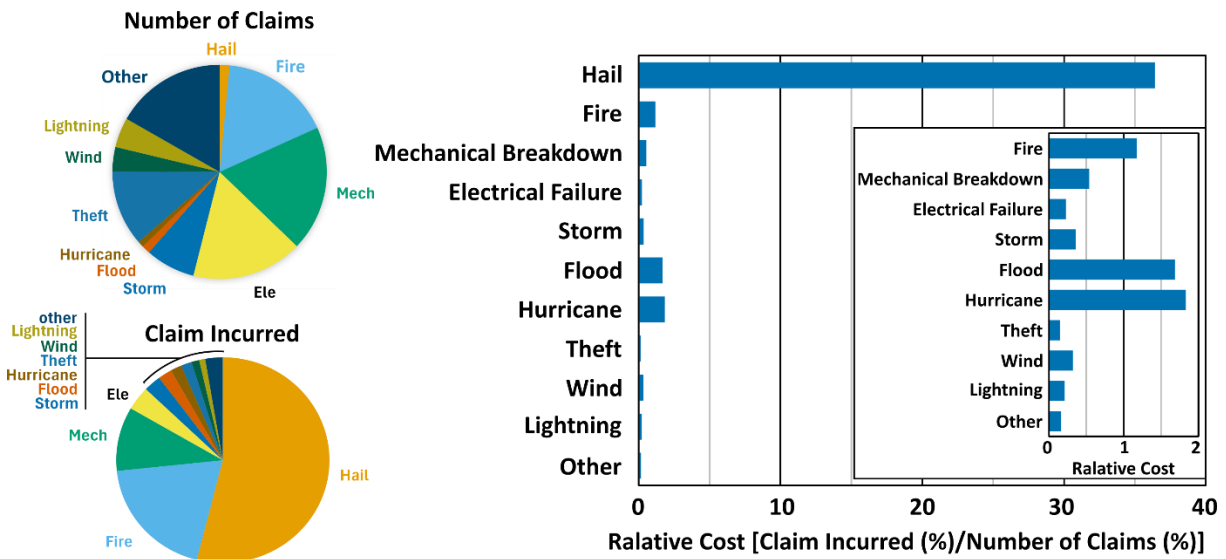


图37. 光伏系统火灾索赔数量很高，但总成本远低于冰雹，与飓风和洪水相似（改编自Gcube白皮书[53]）

8.4 性能损耗

大量研究记录了遮挡辐照量的野火烟雾对光伏性能的影响，能源生产下降高达40%，在某些情况下持续数周。2014年，堪培拉发生的一场火灾事件导致一个光伏电站的峰值发电量下降了27%。加利福尼亚州是美国野火活动最活跃、但同时也安装了最高太阳能容量的州，其因野火烟雾造成的太阳能损失最为严重。当测量发电量与无烟雾条件下的模型发电量进行比较时，一个电站的烟雾损失范围为9.4–37.8%，另一个电站的烟雾损失范围为9–49%[166]。受影响最严重的地点在中午12点至下午1点的峰值时段平均能源生产损失为15%[167]。此外，这些影响往往不是局部的。例如，苏门答腊岛燃烧的森林减少了新加坡一个光伏系统的能源输出15–25%[168]。2023年，加拿大野火烟雾笼罩了美国东部大部分地区，大气颗粒物持续数月。

8.4.1 2019-2020年新南威尔士州森林大火

福特分析了来自新南威尔士州170个分布式屋顶光伏系统的历史能源数据，将测量输出与空气颗粒物（PM_{2.5}）浓度相关联，后者是烟雾密度的指标[169]。颗粒物浓度数据^{2.5}是从一个距离为5公里的PM地面测量传感器网络中收集的^{2.5}。作者估计由此产生的总能量损失约为175 ± 35吉瓦时，相当于最坏情况下的经济损失

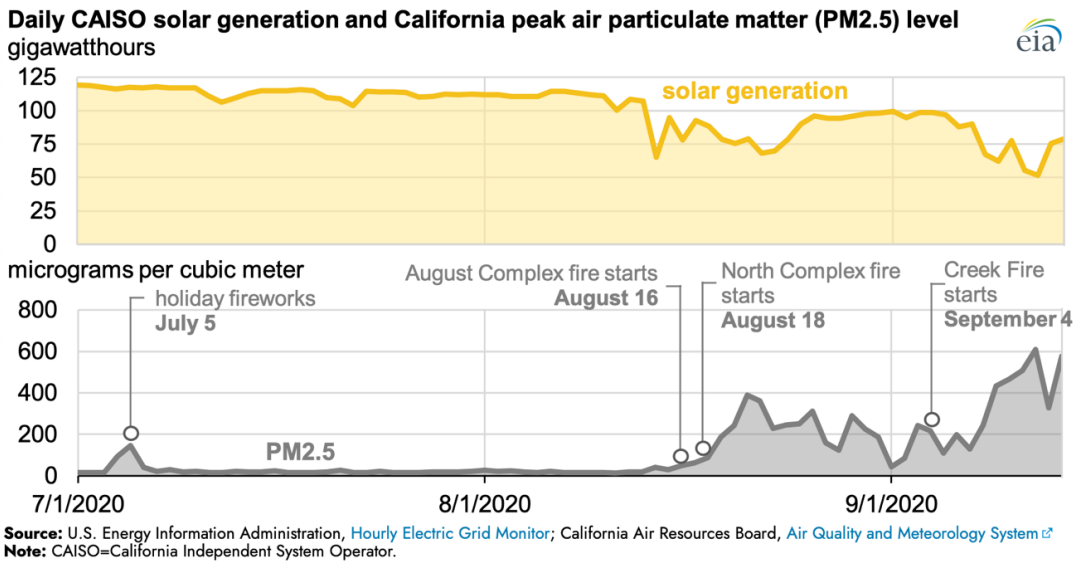


图39：加利福尼亚州2020年野火高发季节的每日太阳能发电量显示急剧下降（顶部）与烟雾密度峰值（底部）。

8.5 缓解策略

现场产生的火灾（通常由电弧故障引发）有时被归类为野火。但它们与外部引发的野火在四个方面有所不同：它们1）可预测性较低；2）相对容易控制；3）持续时间较短；以及4）在物理上具有破坏性，但对遮蔽辐照度的影响很小。

要最小化现场火灾的可能性，需要对光伏电站的电力系统组件进行定期检查，包括光伏连接器、逆变器和布线。修剪或控制植被也同样非常重要，尤其是当植被的含水量较低时。一些场地部署了烟雾探测器，结合摄像头，可以向电网运营商发送警报，从而实现快速响应。

降低不受控制的外部野火风险更具挑战性，主要依赖于根据历史火灾模式和预测的降水变化做出良好的选址决策。但跟踪可能影响该设施的火灾活动也同样重要。在下降的烟羽情况下，操作员可以选择将该设施停机；如果前进的火焰威胁到该设施，则可以进行灭火活动，包括在设施周边使用阻燃剂。

FUEGO是由加州大学伯克利分校开发的高级软件，用于基于来自多个来源的数据（包括卫星、配备视觉和热成像摄像头的无人机、有人驾驶飞机和火塔）识别早期形成的火灾。此外，一些公司正在开发基于人工智能和机器学习的野火预报工具，包括在芬兰阿尔托大学开发的Fire CNN、慕尼黑的OroraTech、荷兰的Overstory和Edgybees。



8.6 主要建议和要点

在火灾风险低的地域建设光伏电站可能是一项挑战，考虑到全球范围内野火活动的蔓延、光伏应用的增加以及烟尘的扩散。虽然那些地区的地形对光伏发电不利，但尽量减少电站与生长密集的松林之间的距离非常重要。然而，光伏电站面临的最大威胁可能并非火灾造成的物理破坏，而是密集的、含有颗粒物的烟尘羽流，这些烟尘会降低辐照度，并在组件和电气BOS上沉积灰烬和烟黑。虽然无法解决辐照度遮挡的问题，但已经确定了一些最佳实践，用于整体风险降低，特别是减少烟尘暴露的风险。

活动前缓解策略：

- 在场地开发前进行风险评估，包括对历史的分析和预期的火焰形状。
- 实施一个既能解决建设又能解决建设后问题的响应策略风险。例如，在一个中高风险地区，所有连接器都应该带盖子直到互联和电缆应处于保护性覆盖下
要最小化 1) 烟雾颗粒进入连接器；以及 2) 进入可能引发电弧故障和现场火灾的粉尘。
- 实施一个包括定期修剪和高度-的植被管理策略
在干旱条件下保持警惕，以最大限度减少现场火灾的可能性。
- 在多个现场安装烟雾探测器，以便系统可以关停并且迅速调动响应团队。这类警报对于遏制现场火灾，但它们只有在使用得当且第一响应者能够快速响应。
- 跟踪日益精确的森林火灾预报，包括季节性和地理方面。
图形化地。类似地，当预测有大量烟雾羽流正在前往一座光伏电站进行维护时，应断开电站以最大程度减少纳米颗粒的侵入
逆变器。如果颗粒物浓度很高，则停机应尽可能小
考虑到辐照度降低对能量损失的影响。
- 将倾斜追踪器远离主风向，以最大限度减少正面污染。

事件后缓解策略：

- 进行目视检查，重点关注可能暴露在高烟雾中的字符串，并在模块中检查分层、玻璃开裂或变色、背板污染以及连接盒和连接器外壳的变形/开裂/退化的证据。
- 检查逆变器滤网是否有污垢，特别是碳粉污染。实施清洁规程，如果模块玻璃显得异常脏污或雨后仍明显脏污 监控未来1-3年的系统性能，并计算性能比率以识别任何性能不足。



9 结论

本报告识别了极端天气事件频率和强度预计增加对光伏安装的潜在风险，并提供了缓解这些风险的一般指南。我们的目标是提供一个信息库和最佳实践，为尚未跟上其生命周期内暴风雨暴露的现实（从湿气侵入到光伏固定件和跟踪器接头的结构应力）的行业提供参考。

幸运的是，许多光伏电站经受住了极端天气事件的考验，包括高强度飓风，但其他电站——即使那些邻近未受损电站的——却被摧毁了。大多数情况下，无论是来自冰雹、洪水还是飓风的威胁，差异在于设计和采购阶段所采取的注意事项，以确保建造一个设计精良的系统，从桩基深度到檩条抗拉强度，再到螺栓的组成和直径。虽然本报告不涉及材料疲劳和连接松动等具体挑战，但它确实提供了特定风暴事件对光伏系统影响的广泛概述，并提出了缓解策略和最佳实践。

极端天气事件分为两类：1) 影响期相对较短的事件，例如热带气旋、对流风暴（包括冰雹）和洪水（参见表格5）；以及2) 影响期较长的事件，例如雪、沙尘暴、热浪和野火。

表5：极端天气事件的一般方面。

天气事件	持续时间	可预测窗口
热带气旋	† 1-2天	‡ 提前2-3天
冰雹	† 1-2天	‡ 提前24小时
降雪	3 - 6个月	‡ (重病例) 数天在advance
粉尘 沙尘暴	几天 - 1个月	‡ 提前5天以内
热浪	1 - 6个月	
洪水	† 几天	‡ 提前一天
森林火灾	1天 - 数月	

剑号标记 (†) 在持续时间列中指示暂时性事件，而双剑号标记 (‡) 在可预测性窗口列中表示可在指定时间范围内进行预测的事件。

后者可能存在持续数年的慢性后果，例如对太阳能电池的重复压力，也可能更短暂，例如积雪或灰尘遮挡，这种情况可能持续数周，但最终在下雨时会消散。

从韧性（从负面影响中恢复的能力）和缓解（为减少潜在影响而采取的行动）的角度来看，适当的规划和设计是至关重要的，并且胜过所有其他回应。例如，对历史天气记录进行彻底的审查，以及为每个地点模拟极端天气事件的未来预测，应该是强制性的。此步骤涉及根据各种指标（如事件复发间隔、极端事件的大小和投资持有期）识别风险，以确保在设计阶段有效地考虑每个因素。

一旦威胁态势图绘制完成，架构师、项目开发者和安装商就必须做出恰当的设计和采购决策。材料和结构



组件应遵守规范和标准，并在特定的气候胁迫群下证明其生存能力。此外，建筑师必须仔细考虑拟建场址的地形和地质特征。例如，在斜坡地形上构建光伏系统时，地基应包含防止热带气旋或洪水引发滑坡的措施。减轻各种天气事件影响的关键建议总结在下表6中。

表 6：针对各自天气事件的设计减轻影响的建议

天气事件	建议 (简要概述；详细指南分别在各章节提供)
热带旋风	<ul style="list-style-type: none"> - 设计坚固的安装结构，以承受强风载荷。 - 使用能承受强风载荷和暴雨的光伏组件。
冰雹	<ul style="list-style-type: none"> - 将一个充分的装载系统整合到跟踪器中。 - 使用具有较厚前玻璃的太阳能电池板以增强耐用性。
雪	<ul style="list-style-type: none"> - 具有高倾斜角（如果固定倾斜）的航空器先进的收存策略雪（如果有追踪器）和高离地间隙， - 选择能承受重雪载荷的太阳能电池板（前玻璃更厚且重ier框架相对于表面积）。 - 考虑具有除雪功能的太阳能电池板（例如无边框设计）。
尘埃 沙尘暴	<ul style="list-style-type: none"> - 引入预防性设计以减少土壤积累（例如，追踪器）能够以大角度倾斜的系统 - 比较抗污涂层的性能与预测的污损损失。 - 制定性能和成本效益的清洁方案。
热浪	<ul style="list-style-type: none"> - 在凉爽、遮阴的位置安装逆变器或为遮阴添加遮盖物。 - 选择低温系数低的太阳能电池板。
洪水	<ul style="list-style-type: none"> - 安装能够快速移动到水平存放位置的系统减少对流动水的阻力。 - 使用高离地间隙的坚固安装结构为逆变器字符串组合框。 - 为逆变器和中继箱安装高度防水容器（IP67）。
森林火灾	<ul style="list-style-type: none"> - 建立快速响应策略，包括停机协议 - 进行火灾后的检查，并随后监测模块的迹象和连接器退化。

此外，网站所有者/运营商应保留各种文件，包括与容量测试和能源生产相关的文件、模块和组件规范，以及



调试。任何EL和/或IR图像，以及视觉检查和I-V测量的文件，都应保存，以建立基线，以便可以将风暴影响的系统与之进行比较。

电气性能数据也作为评估极端天气事件影响及加速老化增加影响的根本依据。将电气性能数据与温度、辐照度、风速等天气条件相结合，可提供时间序列数据，以帮助识别天气造成的损害。但场地所有者和维护人员必须认识到获取和维护此类数据的重要性。

主动维护规程同样至关重要，并且应反映威胁的可预测性。例如，在强风事件之前，应对紧固件进行扭矩审核，并清除可能飞入空中的现场杂物。

如果极端天气造成损坏，应尽快开始修复。活动包括1) 通过断开电网并打开所有断路器来确保现场安全；2) 对受影响的太阳能光伏系统进行电气和机械检查；原位和3) 造成损坏待保险公司通知及后续检验。所有受损光伏组件和电气部件应在重新送电前更换。脏污严重的组件应清洁；电气部件应进行红外成像；电气电缆应按需检查和重新安装。在尘暴事件后，光伏组件表面以及SCB和逆变器外壳内外电气部件表面必须清洁。

长期运维规程同样至关重要。在风暴恢复阶段未能完全处理的缺陷可能会因温度、风、湿度等环境因素而加剧。因此，对已恢复运行的PV系统（太阳能光伏系统）进行持续发电监测对于建立其持续健康状况和效率至关重要。如果出现显著的发电量下降，业主将拥有所需数据来决定下一步行动，包括系统翻新。

总而言之，本报告的作者认为，通过遵循上述建议，世界大部分地区的光伏系统可以抵御大多数恶劣天气威胁，并保持为电力生产提供稳健可靠来源。



参考书目

- [1] 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), “气候变化 2021 – 物理科学基础,” 剑桥大学出版社, 2023 年 7 月。doi: 10.1017/9781009157896. [2] 王启, 刘凯, 谢伟, 阿里·塔西姆, 吴杰, 和王明, “光伏安装是”*地球通讯* 在极低产量的风险区域广泛部署环境, 第5卷, 第1期, 第752页, 2024年12月, doi: 10.1038/s43247-024-01932-4. [3] 美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心 (NCEI), “美国十亿美元级的气象和气候灾害: 时间序列。” 访问时间: 2025年4月14日。[在线]. 可获得: <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/time-series> [4] A. Tamizi和I. R. Young, “全球热带气旋风和地表波科学数据 浮标和卫星平台的测量数据,” 第11卷, 第1期, 第106页, 1月2024, doi: 10.1038/s41597-024-02955-4. [5] M. F. 韦纳和 J. P. 科辛斯, “一个开放式萨菲尔-美国国家科学院院报 辛普森飓风风级在一个变暖的世界中”, 第121卷, 第7, p. e2308901121, 2024年2月, doi: 10.1073/PNAS.2308901121. [6] 美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心 (NCEI), “美国数十亿美元天气和气候灾害: 灾害成本和频率。” 访问日期: 2025年4月11日。[在线]. 可获得: <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/mapping> 等 [7] K. S. 富田 “地面固定式大型太阳能的地理校正多边形数据库”*科学数据* 美国光伏电站,” 第10卷, 第1期, 第760页, 2023年11月, doi: 10.1038/s41597-023-02644-8. [8] 劳伦斯伯克利国家实验室和美国地质调查局, “美国大型太阳能光电数据库。” 访问日期: 2025年4月11日。[网络]. 网址: <https://energy.usgs.gov/uspvdb/viewer/#3/41.77/-85.57> [9] J. Gifford, “长篇: Oakey发生了什么问题 – 澳大利亚太阳能电站杂志,”*太阳能电站杂志*. 访问日期: 2024年3月26日。[网络]. 网址: <https://www.pv-magazine-australia.com/2019/12/07/long-read-what-broke-at-oakey/> 等. *太阳能发电站运行维护指南* [10] 乌尔里希·雅恩, *在不同的气候* 巴黎, 法国: 国际能源署, 2022年。[在线]. 获取: <https://iea-pvps.org/key-topics/guidelines-for-operation-and-maintenance-of-photovoltaic-power-plants-in-different-climates/> [11] W. Cole, D. Greer, and K. Lamb, “利用本地光伏满足关键负荷的潜力”*Sol. Energy* 在飓风期间, 卷. 205, 期. 二月, pp. 37–43, 2020年7月, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.094. [12] N. D. Jackson 和 T. Gunda, “评估极端天气对公用事业规模应用能源 美国光伏电站性能,” 第302卷, 第117508页, 2021年11月, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117508. [13] D. C. 乔丹, K. 佩里, R. 怀特, 和 C. 德莱恩, “极端天气和光伏性能,”*IEEE 光伏汇刊*, 第13卷, 第6期, 第830–835页, 2023年11月, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3304357. [14] M. Yamazaki, “光伏发电系统设计与施工指南 (日语).” 访问日期: 2024年11月25日。[在线]. 可获得: <https://www.jpaea.gr.jp/wp->



- content/uploads/211224_2_NEDO.pdf
- [15] 研究表明：对光伏发电设施保险事故的理解企业趋势（日语），“日本一般保险协会，2024年。”
[在线]. 获取方式：https://www.sonpo.or.jp/news/notice/2023/pdf/240209_report.pdf
- [16] GreenValley国际，“太阳能 - 使用LiDAR进行智能检测项目”点云数据。”访问时间：2024年11月25日。[在线]. 可用：
<https://www.greenvalleyintl.com/power-line-case-studies/solar-energy-intelligent-inspection-project.html>
- [17] “太阳能光伏系统设计中的恶劣天气韧性。”访问时间：3月26日2024。[在线]. 可获得：<https://www.energy.gov/femp/severe-weather-resilience-太阳能光伏系统设计>
- [18] J. 艾尔沃斯 等，“迈向太阳能光伏抗飓风能力：从飓风中学习损失与重建更好”，“联邦能源管理计划，华盛顿特区，美国，2023年。访问时间：2024年3月26日。[在线]. 可获取：
<https://www.energy.gov/femp/articles/toward-solar-photovoltaic-storm-resilience-学习飓风损失与重建>
- [19] G. 罗宾逊 等 “光伏系统业主指南：识别、评估和解决”气候脆弱性、风险和影响，”联邦能源管理计划华盛顿特区，美国，2021年。访问时间：2024年3月26日。[在线]. 可用：
<https://www.energy.gov/femp/articles/pv-system-owners-guide-identifying-assessing-and-addressing-weather-vulnerabilities>
- [20] “为应对风暴而准备太阳能光伏系统”，美国国家可再生能源实验室（NREL），科罗拉多州金（美国），2022年。访问时间：2022年10月18日。[在线]. 获取方式：<https://www.osti.gov/biblio/1873500>
- [21] FMEA缓解评估小组，“美国维尔京群岛的飓风伊尔玛和玛丽亚”岛屿：建筑性能观察、建议和技术指南，”美国联邦紧急事务管理署，华盛顿特区，美国，2018年。
[在线]. 获取：<https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/170486>
- [22] FMEA缓解评估团队，“屋顶太阳能电池板固定：设计，安装和维护，”美国联邦紧急事务管理局，华盛顿美国 DC，2018年。[在线]. 可用：https://www.fema.gov/media-library-data/1535554011182-e061c2804fab7556ec848ffc091d6487/USVI-RA5RoofTopSolarPanelAttachment_finalv3_508.pdf
- [23] “飓风和其他恶劣天气中的太阳能光伏系统”，美国能源部管理项目，美国华盛顿特区，2018年8月。访问日期：2024年3月26日。
[在线]. 可获得：<https://www.osti.gov/biblio/1468519>
- [24] C. Burgess和J. Goodman，“在风暴下为太阳能选择最佳实践以提高弹性地面安装式光伏系统，抗飓风能力，”落基山研究所，巴塞尔，美国公司，2018年。[在线]. 获取：https://rmi.org/wp-content/uploads/2018/06/暴风雨下的岛屿太阳能报告_2018年6月12日数字版.pdf
- [25] J. 艾尔沃斯和O. 范吉特，“恶劣天气中的太阳能光伏发电：成本对耐风暴加固光伏系统的弹性考虑，”国家可再生能源实验室（NREL），科罗拉多州戈尔登（美国），2020年6月。doi: 10.2172/1659785.
- [26] C. Burgess、S. Detweiler、C. Needham和F. Oudheusden，“太阳风暴之下 第二部分：选择适用于飓风暴露的弹性屋顶光伏系统的最佳实践”



落基山研究所，科罗拉多州巴Salt，美国，2020年。[在线]. 可用：<https://rmi.org/solar-under-storm-part-ii-designing-hurricane-resilient-pv-systems/> [27] C. Burgess, J. Locke 和 L. Stone, “风暴中的太阳能：为小型岛屿发展中国家制定具有韧性的光伏系统最佳实践指南”，落基山研究所，科罗拉多州巴Salt，美国，2020年。访问日期：2024年3月26日。[在线]. 可用：<https://rmi.org/solar-under-storm-for-policymakers/> [28] “昆士兰住宅抗飓风和风暴潮建造指南 | 昆士兰重建局”，昆士兰重建局，2019年。访问日期：2024年3月26日。[在线]. 可用：<https://www.qra.qld.gov.au/resilient-homes/cyclone-and-storm-tide-resilient-building-guidance-queensland-homes> [29] A. Roedel 和 K. Whitfield, “白皮书：缓解极端天气风险 第一部分：理解差异化设计和控制策略如何解锁太阳能开发的新机遇”，Nextacker，2020年。访问日期：2024年3月26日。[在线]. 可用：<https://info.nextacker.com/mitigating-extreme-weather-risk> [30] A. Roedel 和 J. Butcher, “Nextacker 白皮书：缓解极端天气风险 第二部分：利用差异化太阳能项目设计和控制策略应对高风速事件和动态风效应”，Nextacker，2021年。访问日期：2024年3月26日。[在线]. 可用：<https://info.nextacker.com/mitigating-extreme-weather-risk-part-2> [31] “财产损失预防数据表 1-15：屋顶安装的太阳能光伏板”，FM 全球公司，2024年。[在线]. 可用：<https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets> [32] “财产损失预防数据表 7-106：地面安装的太阳能光伏电站”，FM 全球公司，2024年。[在线]. 可用：<https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets> [33] “建筑及其他结构的最小设计荷载及相关准则 (ASCE/SEI 7-22)”，美国土木工程师协会，2021年。[在线]. 可用：<https://www.asce.org/asce-7/> [34] SEAOC 太阳能光伏系统委员会，“太阳能阵列风荷载设计 (PV2-2017)”，加州结构工程师协会 (SEAOC)，加州萨克拉门托，美国，2017年。[35] “欧洲规范 1. 结构上的作用 - 一般作用 - 风作用 (EN 1991-1-4/AC)”，欧洲标准委员会 (CEN)，2010年。访问日期：2024年3月26日。[在线]. 可用：<https://knowledge.bsigroup.com/products/eurocode-1-actions-on-structures-general-actions-wind-actions?version=standard> [36] “结构设计作用，第2部分：风作用 (AS/NZS 1170.2:2021)”，新西兰标准和澳大利亚标准，2021年。[在线]. 可用：<https://www.standards.org.au/standards-catalogue/standard-details?designation=as-nzs-1170-2-2021> [37] “建筑结构设计荷载 (GB 50009-2012)”，中华人民共和国住房和城乡建设部，2012年。[在线]. 可用：<https://www.chinesestandard.net/AMP/PDF.amp.aspx/GB50009-2012> [38] “光伏系统设计风荷载评估指南 (CNS-16189:2022)”，中华民国经济部标准、计量及检验局，2022年。[在线]. 可用：https://cns-standards.org/CNS_standard_cn.asp?code=CNS_16189



- [39] “《太阳能光伏发电设施技术标准行政命令》的解释（日文）”，日本经济产业省，2021年。[在线]. 可获得：https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2021/04/20210401-05.pdf [40] “光伏阵列结构荷载设计指南（JIS C 8955）”，日本标准协会，2017年。[在线]. 可获得：https://store accuristech.com/standards/jis-c-8955-2017?product_id=1984692 [41] “地面安装型太阳能光伏系统设计指南（日文）”，新能源产业技术开发组织（NEDO）、日本光伏能源协会（JPEA）和奥之助建设株式会社，2019年。[在线]. 可获得：<https://www.nedo.go.jp/content/100895022.pdf> 倾斜地面安装式太阳能光伏系统的设计和施工指南 [42] 电力系统（日语）. 新能源和工业技术开发组织（NEDO），日本，2023年。[在线]. 获取方式：<https://www.nedo.go.jp/content/100960314.pdf> 浮动式太阳能光伏发电系统设计和施工指南（在 [43] 日语）. 新能源和工业技术开发组织（NEDO），日本，2023年。[在线]. 获取方式：<https://www.nedo.go.jp/content/100960316.pdf> [44] “农业光伏系统设计与施工指南（日语）”，新能源和工业技术开发组织（NEDO），日本，2023年。[在线]. 获取方式：<https://www.nedo.go.jp/content/100960315.pdf> [45] “光伏（PV）组件与安装结构接口评估（IEC TS 63348）”，国际电工委员会。[在线]. 获取方式：https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:59822593875:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1276,23,104319 [46] J. T. Allen, “迈向对强对流环境的全球理解。” 访问日期：2024年11月21日。[在线]. 获取方式：https://people.se.cmich.edu/allen4jt/allen_currentprojects_globalstorms.html [47] R. Kennedy, “超过一半的太阳能设施损失索赔成本是由于冰雹损坏,” 国际光伏杂志。[在线]. 获取方式：<https://pv-magazine-usa.com/2023/12/06/over-half-of-solar-facility-loss-claim-costs-are-due-to-hail-damage/> [48] 国家海洋和大气管理局（NOAA）, “气象术语表。” 访问日期：2024年11月21日。[在线]. 获取方式：<https://www.noaa.gov/jetstream/appendix/weather-glossary> [49] M. Taszarek, J. T. Allen, M. Marchio, 和 H. E. Brooks, “全球气候学和趋势npj气候大气科学 在从ERA5和探空数据得到的大气对流环境中, , 第4卷, 第1期, 第35页, 2021年6月, doi: 10.1038/s41612-021-00190-x。等 地球物理研究 [50] J. T. 艾伦 “理解地球系统中的冰雹”, 第58卷, 第1, 2020年3月, doi: 10.1029/2019RG000665. [51] A. R. Crimmins, C. W. Avery, D. R. Easterling, K. E. Kunkel, B. C. Stewart, 和 T. K. Maycock, 编, “第五次国家气候评估,” 华盛顿特区, 2023. doi: 10.7930/NCA5.2023.



- [52] 慕尼黑再保险公司, “冰雹——一个被低估且日益增长的风险: 采取行动的充分理由:” 行动。”访问时间: 2024年11月21日。[在线]. 可获得: <https://www.munichre.com/en/insights/natural-disaster-and-climate-change/hail.html>
- [53] GCube Insurance, “HAIL NO! Defending solar against nature’s cold assault”, 2023。[在线]. 获取: <https://gcube-insurance.com/Insights/Reports/Hail-No>
- [54] 美国国家气象局国家强风暴实验室, “恶劣天气101 - 冰雹。”访问时间: 11月2024年21日。[在线]. 获取方式: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/hail/>
- [55] T. Teule, M. Appeldoorn, P. Bosma, L. Sprenger, E. Koks和H. de Moel, “The 冰雹对太阳能电池板的脆弱性,” 2019年12月。访问时间: 2024年11月21日。[在线] 可用的: <https://research.vu.nl/en/publications/the-vulnerability-of-solar-panels-to-hail>
- [56] A. Sagar, “德克萨斯州冰雹风暴预计将造成7000万至8000万美元的太阳能损失”, Insurance Insider。访问时间: 2024年11月22日。[在线]. 获取方式: https://www.insuranceinsider.com/article/2876gerfr59h81ziaca2o/texas-hailstorm-set-to-generate-70-million-to-80-million-solar-losses?zeph_sso_ott=Ui7BBs
- [57] B.泰勒, J.塞德威克, 和M.佩罗, “技术如何保护太阳能发电厂” 极端天气。”访问时间: 2024年11月22日。[在线]. 获取方式: <https://vimeo.com/881850247/4dc43fc4be>
- [58] T.西尔维娅, “极端天气正导致太阳能保险保费飙升,” 光伏杂志。访问日期: 2024年11月22日。[在线]. 获取方式: <https://pv-magazine-usa.com/2020/12/14/极端天气导致太阳能保险费率-explode/>
- [59] J. Kopp, K. Schröder, C. Schwierz, A. Hering, U. Germann, 和O. Martius, “The summer 2021年瑞士冰雹天气: 天气状况、主要影响及独特“观测数据,” 天气, 第78卷, 第7期, 第184–191页, 2023年7月, doi: 10.1002/wea.4306.
- [60] E. Bamberger, “评估针对光伏模块的冰雹损害的现场测量 (对 hail 对光伏组件造成损害的现场测量评估)”, 在 光伏会议, 2024年。[在线]. 网址: https://www.swissolar.ch/pv-tagung/pvt24/presentationen/pvt24_session-5a.zip 瑞士
- [61] J. Scully, “太阳能电池板测试“不足以解释极端事件日益严重的情况 天气”, 报道声称, “PV Tech. 访问时间: 2024年11月22日。[在线]. 可供查阅: <https://www.pv-tech.org/solar-module-testing-inadequate-to-account-for-rising-extreme-weather-report-claims/>
- [62] J. H. 凯恩 and D. 银行, “大型光伏电站的风荷载,” 在 SEAOC 公约, 2015。[在线]. 获取: https://www.cppwind.com/wp-content/uploads/2020/12/对公用规模太阳能光伏电站的风荷载 Plants_DBanks_2015.pdf 2015
- [63] C. 罗赫, P. A. 布尔克, 和 D. 银行, “单轴太阳能跟踪的扭转不稳定性 系统,” 在 第十四届风工程国际会议, 巴西的里约热内卢, 2015。[在线]. 可获得: <https://cppwind.cachecloud.com/wp-content/uploads/2020/12/单轴太阳能跟踪系统扭转失稳-Rohr-Bourke-Banks-2015.pdf>
- [64] “太阳能光伏系统 hail 损害减轻”, 联邦能源管理计划。[在线]. 可用: <https://www.energy.gov/femp/hail-damage-mitigation-solar-photovoltaic-systems>



- [65] T. 克罗普, M. 舒伯特, 和 J.H. 韦纳, “功率损失的定量预测
能量 使用电致发光的损坏光伏组件”, 第11卷, 第5期, 第
1172, 2018年5月, doi: 10.3390/en11051172。 [66] P. Bostock, K. Elser, 和 J. Previtali, “单轴跟踪
器 mounted 太阳能项目的冰雹堆积最佳实践,” VDE America, 2024。 [在线]。可获取: <https://www.vde.com/resource/blob/2302740/4deff2e307bc9e60c300db76ec070b51/hail-stow-tech-memo-pdf-data.pdf> [67] J. Sedgwick, “应对冰雹风暴,” PV Magazine。访问时间: 2024年11月22日。 [在线]。可获取
: <https://www.pv-magazine.com/2022/12/24/weekend-read-navigating-hailstorms/> [68] P. Bostock, “
冰雹猫: 介绍一种识别、量化和管理冰雹风险的方法,
PV可靠性研讨会2024 in 科罗拉多州拉基伍德, 美国: 国家可再生能源实验室 (NREL), 2024, 第 319 页
。 [在线]。可获得: <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/90586.pdf> [69] S. Bhavsar 和 N. Shiradkar, “基于数
据的方法量化冰雹风险
2022 IEEE 国际新兴会议 对光伏电站的影响,”
电子 (ICEE), IEEE, 2022年12月, 第1-4页, doi: 10.1109/ICEE56203.2022.10117841。 [70] C. Kedi
r, “用钢化玻璃制成的模块对冰雹的弹性大约是2倍
太阳能风险评估2023 与热强化玻璃相同的影响,” kwh分析, 2023, 第7页。 [在线]。可在<https://www.kwhanalytics.com/solar-risk-assessment> [71] “冰雹抗性测试与结果分析: 对Nextacker冰雹存放的评价,” RE
TC, 2020。 [72] CFPA 欧洲, “防冰雹损害,” 2022。访问日期: 2024年11月25日。 [在线]。可在https://cfpa-eu/app/uploads/2022/07/Guideline_Hail20230301a-1.pdf [73] “理解冰雹耐久性测试 (HDT) 项目,” RETC, 20
22。访问日期: 2024年11月24日。 [在线]。可在<https://retc-ca.com/download-2022-pvmi> [74] A. Roedel 和
S. Uphill-Brown, “为风而设计: 使用动态风分析和防护存放策略来降低太阳能跟踪器寿命成本,” Nextacker
, 2018。访问日期: 2024年11月24日。 [在线]。可在[https://info.nextacker.com/nextacker-designing-for-t
he-wind](https://info.nextacker.com/nextacker-designing-for-the-wind) [75] “从随机到可重复: PVEL 的 PV 组件产品资格项目中冰雹应力序列的内部情况,” PVEL, 2021。 [在
线]。可在[https://www.pvel.com/wp-content/uploads/PVEL_White-Paper_Hail-Stress-Sequence-for-PV
-Modules.pdf](https://www.pvel.com/wp-content/uploads/PVEL_White-Paper_Hail-Stress-Sequence-for-PV-Modules.pdf) [76] A. Heymsfield, M. Szakáll, A. Jost, I. Giammanco 和 R. Wright, “对霰和冰雹终端速度、质量
通量和动能的综合观测研究,”
大气科学杂志, 第75卷, 第11期, 第3861–3885页, 2018年11月, doi: 10.1175/JAS-D-18-0035.1。 [77] N.
Thompson, “主动冰雹积载计划可以降低财产保险费率,” kwh Analytics, 2023。访问日期: 2024年11月25
日。 [在线]。获取方式: <https://www.kwhanalytics.com/solar-risk-assessment> [78] IEA PVPS 任务 13 子任务
3.2 小组, “光伏系统优化指南”



关键绩效指标, “2025。 [79] “地面光伏 (PV) 组件——设计合格与型式批准——第2部分: 测试程序 (IEC 61215-2) , ”国际电工委员会, 日内瓦, 瑞士, 2021。 [在线]。获取: <https://webstore.iec.ch/publication/61350> [80] T. Tanahashi, T. Chiba, S. Adachi, Y. Tsuno, K. Ikeda 和 T. Oozeki, “缓解”*2023 光伏可靠性* 在 snowy region 安装的 PV 模块上的 heavy snow load, ”*工坊*, 2023, 第76页。 [在线]。获取方式: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87918.pdf> [81] I. Frimannslund, T. Thiis, A. Aalberg, 和 B. Thorud, “极地太阳能电站 – *Sol. Energy* 探究潜力和设计挑战”, 第 224 卷, 第 35–42 页, 2021 年 8 月, doi: 10.1016/j.solener.2021.05.069. [82] I. Frimannslund, T. Thiis, A. D. Ferreira, 和 B. Thorud, “太阳能电站冷区科学 关于雪堆积累和能量产出的设计参数技术。”, 第201卷, 第103613页, 2022年9月, doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2022.103613. [83] A. Brooks, S. Gamble, J. Dale, 和 M. Gibbons, “确定建筑物上的雪荷载 *CSCE 2014 第四届国际结构专业会议* 带太阳能电池板, ”在, 哈利法克斯, NS: 加拿大土木工程师学会, 2014, 第. CST-49. [84] M. Lindh, A. Granlund, J. Sundström, M. Axelsson 和 A. M. Petersson, “屋面太阳能设施积雪效应及处理 (Effects and management of snow loads in roof-mounted solar installations),” 瑞典能源署, 2024。 [在线]。获取: <https://www.e2b2.se/media/nv0jrg2h/slutrappport-p2018-016202.pdf> *光伏杂志* [85] 方, “满足不断增长的需求, ”, 2022。 访问日期: 11月20日 2024。 [在线]。获取方式: <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/keeping-up-with-growing-demand/> *光伏杂志* [86] T. 西尔维娅, “在降本增效的道路上, ”, 2022。 访问日期: 2024年11月20日。 [在线]。获取方式: <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/on-track-for-cost-reduction/> [87] L. Burnham, D. Riley, B. King, W. Snyder, K. Santistevan, 和 P. W. Dice, “模块可靠性在冬季: 跨多个模块的挠曲和电池裂纹现场分析” *2023 IEEE 第50届光伏专家会议 (PVSC)* “架构”, 在, IEEE, 2023年6月, 第1-3页。 doi: 10.1109/PVSC48320.2023.10359901. 等 [88] L. 帕帕格里里 “微裂纹的建模和实验研究更新。 *能源 晶体硅光伏: 综述*, 卷. 145, 页. 2387–2408, 2020年1月, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.138. [89] E. J. Schneller, H. Seigneur, J. Lincoln, 和 A. M. Gabor, “寒冷 *2019 IEEE 在光伏组件机械耐久性测试中的温度暴露*, ” *第46届光伏专家会议 (PVSC)*, IEEE, 2019年6月, 第1521–1524页。 doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980533. 等 [90] 塞格尼尔 “, “在低温下硅太阳能电池中的微裂纹形成, ” *2019 IEEE 第46届光伏 specialists 会议 (PVSC)* in, IEEE, 2019年6月, 第1–6. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.9198968. [91] M. Köntges, J. Lin, 和 L. Bruckman, “新型光伏电池和组件技术的降解与失效模式, ” 国际能源署, 法国巴黎, 2025. doi: 10.69766/ATBD2730.



- [92] 国家技术评价研究所 (NITE), “大雪年太阳能板雪害激增——相当于四年75,000户人家的供电量 (日语)。” 访问时间: 2025年4月18日。[在线]. 获取方式: <https://www.nite.go.jp/gcet/tso/prs230126.html>
- [93] 国家技术评价研究所 (NITE), “大雪年太阳能板及相关设备损坏急剧增加——即使对小型电力系统也造成严重影响 (日语)。” [在线]. 获取方式: <https://www.nite.go.jp/gcet/tso/prs231222.html>
- [94] E. Bellini, “加热太阳能板除雪”, PV Magazine. [在线]. 获取方式: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/18/heating-solar-panels-to-clear-snow/>
- 等 [95] B. L. 阿尔塞特, “缓解屋顶光伏系统积雪以获得更高的能量产量
第35届欧洲光伏太阳能会议和展览会 “更安全的屋顶”, 在 ,
2018, pp. 1630–1635. doi: 10.4229/35thEUPVSEC20182018-6CO.3.5.
- 等 [96] L. 李 , 在严酷气候条件下实现超高效可再生能源技术
先进功能材料 电热除雪、化霜和除冰, , 第32卷, 第31期,
p. 2201521, 2022年8月, doi: 10.1002/ADFM.202201521. [97] A. Granlund, M. Lindh, T. Vikberg, 和 A. M. Peterson, “清除积雪的评估
第八届世界光伏能源大会 屋顶光伏方法, “在
转换”, 2022, pp. 1122–1128. doi: 10.4229/WCPEC-82022-4DO.4.6. [98] A. Chutani, A. Dyreson, and L. Burnham, “光伏单损失估算
IEEE 第53届光伏专业会议 (PVSC) 轴追踪系统, “在 , 2025.
- [99] A. Dhyani, C. Pike, J. L. Braid, E. Whitney, L. Burnham 和 A. Tuteja, “利用具有低表面能的防冰表面促进田间太阳能电池板的大规模积雪脱落”
先进材料与技术 界面韧性, , 第2101032页, 2021年11月, doi:
10.1002/admt.202101032.
- 桑迪亚实验室新闻 [100] K. Sullivan, “光伏板顶雪沐日”, 第74卷, 第13期, 第10页, 2022年。访问于: 2024年11月21日。[在线]. 获取途径: https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/81/2022/07/labnews_07-14-22.pdf
- [101] B. Mohammadian, N. Namdari, A. H. Abou Yassine, J. Heil, R. Rizvi, 和 H. Sojoudi, 高级 “雪的形成到堆积和消融的界面现象”
胶体界面科学, 第294卷, 第102480页, 2021年8月, doi: 10.1016/J.CIS.2021.102480. [102] D. Riley, L. Burnham, B. Walker, 和 J. M. Pearce, “覆雪差异
2019 IEEE 第46届 带框架和框架less组件的光伏系统, “在”
光伏专家会议 (PVSC), IEEE, 2019年6月, 第558–561页. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981389. [103] R. W. Andrews 和 J. M. Pearce, “光谱反照率对非晶硅
Sol. Energy 和晶体硅太阳能光伏器件性能, , 第91卷, 第
233–241, 2013年5月, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.030. [104] M. P. 布伦南, A. L. 阿布拉马斯, R. W. 安德鲁斯, 和 J. M. 皮尔斯, “光谱
能源材料与太阳能电池 在太阳能光伏设备上的反照率”, 第124卷, 第111–116页, 2014年5月, doi: 10.1016/j.solmat.2014.01.046. [105] K. S. Hayibo, A. Petsiuk, P. Mayville, L. Brown, 和 J. M. Pearce, “单面与双面
更新. 能源 在雪的环境中的太阳能光伏系统”, 第193卷, 第657–668页, 2022年6月, doi: 10.1016/j.rene.2022.05.050. [106] L. Burnham, D. Riley, B. Walker, 和 J. M. Pearce, “双面光伏



- 在一个高纬度高反照率环境中双轴跟踪器上的模块，“在
IEEE第46届光伏专家会议 (PVSC) , IEEE, 2019年6月, 第1320–
1327. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980964. 2019
- [107] M. 罗斯和J. 罗耶, “寒冷气候对光伏系统的影响”, 在
寒冷气候中的光伏发电 , M. 罗索尔和 J. 罗耶, 编, 伦敦, 英国: 詹姆斯和
詹姆斯科学出版社有限公司, 1999年, 第39-66页。[在线].可获取:
<http://www.rerinfo.ca/english/publications/pubBook1999PVinCC.html>
- [108] J. L. Braid、D. Riley、J. M. Pearce和L. Burnham, “图像分析方法”
量化光伏系统中的积雪损失,”在 *2020 第47届IEEE光伏专家会议
会议(PVSC)* , IEEE, 2020年6月, 第1510–1516页. doi:
10.1109/PVSC45281.2020.9300373.
- [109] R. E. Pawluk、Y. Chen和Y. She, “由于雪导致的光伏发电损失
—关于影响因素、估算和缓解的文献综述 *更新。持续。*
能源评论 , 第107卷, 第171–182页, 2019年6月, doi: 10.1016/J.RSER.2018.12.031.
- [110] T. Townsend和L. Powers, “光伏与雪：两个冬季的最新进展
在SIERRA中的测量,” *2011 第37届IEEE光伏专家会议* ,
IEEE, 2011年6月, 第003231–003236页。doi: 10.1109/PVSC.2011.6186627.
- [111] B. 马里昂, R. 施泰费尔, H. 凯恩, 和 G. 圣卡伦斯, “测量和建模科罗拉多州和威斯康星州地区光
伏系统因雪造成的能量损失”
Sol. Energy , 第 97 卷, 第 112–121 页, 2013 年 11 月, doi: 10.1016/j.solener.2013.07.029.
- 等 [112] C. 巴尔杜斯-朱尔斯, “光伏系统积雪损失：验证玛丽昂
IEEE 光伏汇刊 和汤森德模型, , 第1-11页, 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3264644.
- [113] M. B. Ogaard, I. Frimannslund, H. N. Riise, and J. Selj, “雪损失建模用于屋顶
安装式光伏系统：改进马里昂积雪损失模型 *IEEE J.*
光伏 , 第12卷, 第4期, 第1005-1013页, 2022年7月, doi:
10.1109/JPHOTOV.2022.3166909.
- [114] M. 范诺德, T. 兰德尔, 和S. 安德森, “利用雪诱导的PV损失建模”
推断光伏系统模型, “ *能量* , 第14卷, 第6期, 第1574页, 3月
2021, doi: 10.3390/en14061574.
- [115] D. Gun, “动态雪损失模型与验证”, 在 *2018 第十届光伏性能
建模工作坊* , 2018. [在线]. 获取：[https://pvpmc.sandia.gov/resources-
and-events/events/2018年第十届光伏性能建模研讨会/](https://pvpmc.sandia.gov/resources-and-events/events/2018年第十届光伏性能建模研讨会/)
- [116] R. W. 安德鲁斯、A. 波拉德和J. M. 皮尔斯, “降雪对太阳能的影响”
光伏性能,” *Sol. Energy* , 卷. 92, 页. 84–97, 2013年6月, doi:
10.1016/j.solener.2013.02.014.
- [117] E.C. cooper,L.Burnham和J.L.Braid, “基于光伏逆变器的量化
关于雪况和失电条件, “ *EPJ 光伏* , 第15卷, 第6页, 2024年2月, doi:
10.1051/epjpv/2024004.
- [118] B. Rayegani, S. Barati, H. Goshtasb, S. Gachpaz, J. Ramezani, 和 H. Sarkheil, “Sand
和沙尘暴源识别：一种遥感方法 *生态指示* , 卷
112,第October 2019期,第106099页,2020年,doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106099.
- [119] C. Opp, M. Groll, H. Abbasi, and M. A. Foroushani, “沙尘的原因和影响”
沙尘暴：过去的研究教会了我们什么？一项调查 *J.风险金融管理* , 卷
14卷,第7期,第326页,2021年,doi:10.3390/jrfm14070326.



- [120] L. 米歇利, F. 阿尔蒙西德, J. G. 贝萨, Á. 费尔南德斯-索拉斯, 和 E. F. 费尔南德斯, “The 极端沙尘暴对国家光伏能源供应的影响 保持。
能源技术评估 , 第62卷, 第103607页, 2024年2月, doi: 10.1016/j.seta.2024.103607.
- [121] R. Conceição 等 , “撒哈拉沙尘输送到欧洲及其对光伏的影响 性能: 关于葡萄牙污染的一个案例研究 Sol. Energy , 第160卷, 第September期 2017, 第94–102页, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.059.
- [122] S. J. 克雷默, B. P. 基特曼, P. 茂泽玛, 和 F. 延安, “季节内变率” 佛罗里达州南部地区扬尘浓度升高, “ J.地球物理研究.大气 , 第125卷 第6卷, 第1-14页, 2020年, doi: 10.1029/2019JD031874.
- [123] P.G. 科斯莫波罗斯 等 “用模型评估粉尘对表面太阳辐照度的影响 模拟、卫星观测和地面测量, “ 大气测量 科技. , 第10卷, 第7期, pp. 2435–2453, 2017年7月, doi: 10.5194/amt-10-2435-2017.
- [124] M. J. Adinoyi和S. A. M. Said, “尘埃积累对功率输出效应 太阳能光伏组件, “ 更新. 能源 , 卷60, 第633-636页, 2013年12月, doi: 10.1016/j.renene.2013.06.014.
- [125] W. Javed, B. Guo, B. Figgis, L. Martin Pomares,和B. Aïssa, “多年现场评估光伏积尘的季节变化和 环境因素 Sol. Energy 一个沙漠环境, ”, 第211卷, 第1392-1402页, 2020年11月, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.076.
- 等 [126] 卡普拉西斯托普洛乌 “15年总悬浮颗粒物和尘霾气溶胶直接影响的综合分析 遥感 在地中海盆地的太阳辐射/能量中, 第14卷, 第7期, 第 1535 页, 2022 年 3 月, doi: 10.3390/rs14071535.
- [127] 孟贾特·森古普塔 等 , 太阳能资源用于高渗透率和大规模应用: 第四版 . 2024. [在线]. 获取方式: [https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-资源用于高渗透和大规模应用/#:\\$~\\$.text=The](https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-资源用于高渗透和大规模应用/#:$~$.text=The)
- [128] D.M. 吉莱斯 等 “气溶胶机器人网络 (AERONET) 版本3的进展 数据库——改进云端自动化近实时质量控制算法 针对太阳光度计气溶胶光学厚度 (AOD) 测量的筛选 大气 测量技术 , 第12卷, 第1期, 第169-209页, 2019年1月, doi: 10.5194/amt-12-169-2019.
- [129] A. 格卡斯 等 , “Modls尘气溶胶 (MIDAS) : 一个全球细分分辨率尘气溶胶光学厚度 数据集, ” 大气测量技术 , 第14卷, 第1期, 第309–334页, 2021, doi: 10.5194/amt-14-309-2021.
- [130] A. 英尼斯 等 , “cams全球再分析 (eac4) , ”哥白尼大气监测 服务 (CAMS) 大气数据存储 (ADS) 。访问时间: 2024年11月27日。[在线]。 可用的: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/cams-global-reanalysis>
- [131] A. 格卡斯 等 , “地中海 intense desert dust episodes 的 regime 基于 基于当代卫星观测和地面测量 大气化学 物理 , 第13卷, 第23期, 第12135–12154页, 2013, doi: 10.5194/acp-13-12135-2013.
- [132] 哥白尼, “CAMS气溶胶警报。”访问时间: 2024年5月15日。[在线]. 获取方式: <https://aerosol-alerts.atmosphere.copernicus.eu/>
- [133] S. Bodenheimer, I. M. Lensky, 和U. Dayan, “东方的特征的描述 源于地中海的尘暴面积; 北非与阿拉伯半岛对比 大气 环境. , 第198卷, 第158-165页, 2019年2月, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.034.
- [134] N. 米德尔顿 等 “一项关于呼吸和心血管的10年时间序列分析”



- 尼科西亚，塞浦路斯地区的发病率：空气污染和尘埃短期变化的影响
风暴，” *环境健康*，第7卷，第1期，第39页，2008年12月，doi: 10.1186/1476-069X-7-39.
- [135] R. Givehchi, M. Arhami 和 M. Tajrishy, “中东尘埃源的贡献
城市受体中PM10水平区域研究：伊朗德黑兰案例研究” *大气环境*，
卷. 75, 页. 287–295, 2013年8月, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.039.
- [136] L. Thalib和A. Al-Taiar, “沙尘暴和医院哮喘入院的风险
在科威特，” *科学通报*，第433卷，第347–351页，2012年9月，doi:
10.1016/j.scitotenv.2012.06.082.
- [137] E. Ganor, A. Stupp, 和 P. Alpert, “一种确定矿物粉尘
对空气质量的影响” *大气环境*，第43卷，第34期，第5463–5468页，2009年11月，
doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.07.028.
- [138] A. 格卡斯 等， “地中海强烈沙尘暴及其垂直
基于遥感数据的结构” *大气化学与物理*，第16卷，第13期，第
8609–8642，2016年7月，doi: 10.5194/acp-16-8609-2016.
- [139] C. 施尔 等， *沾染损失 – 对光伏电站性能的影响
报告 IEA-PVPS T13-21:2022* . 2022. [在线]. 获取方式：<https://iea-pvps.org/key-topics/污染损失对光伏电站性能的影响/>
- [140] J. G. Bessa, L. Micheli, F. Almonacid和E. F. Fernández, “监测光伏
污染：当前和潜在策略的评估、挑战和前景”
iScience，第24卷，第3期，第102165页，2021年3月，doi: 10.1016/j.isci.2021.102165.
- [141] M. 戈斯坦, B. 利特曼, J. R. 卡隆, 和 L. 邓恩, “比较光伏电站污渍
从光伏组件辐照度和功率测量中提取的测量值，”
2013 IEEE 第39届光伏专家会议 (PVSC)，IEEE, 2013年6月，第
3004–3009. doi: 10.1109/PVSC.2013.6745094.
- 等 [142] M. Z. 卡恩， “玻璃涂层和跟踪程序的污染缓解潜力
光伏研究与应用 沙特阿拉伯的沙漠气候，”第32卷，第1期，第
45–55，2024年1月，doi: 10.1002/pip.3736.
- [143] C. 桑索姆, P. 金, A. 费尔南德斯-加西亚, H. 奥尔蒙德, T. 卡亚尼, 和H. 布贾特, “
为减少CSP电站集热器镜面污染而设计的防尘装置” *太阳能热发电技术
2017：聚光太阳能与化学能源国际会议
系统*，圣地亚哥，智利，2018年，第030017页。doi: 10.1063/1.5067033.
- [144] K. 伊尔塞等， “基于成本效益分析的玷污损失及缓解策略评估
用于太阳能发电，” *焦耳*，第3卷，第10期，第2303–2321页，2019年10月，doi:
10.1016/j.joule.2019.08.019.
- [145] A. 勒蒙苏, A. 博兰, S. 索莫, 和V. 马松, “热浪发生
在21世纪的巴黎盆地 (法国)” *气候研究*，第61卷，第1期，第75–91页，
2014年9月，doi: 10.3354/cr01235.
- [146] G. A. 米勒和C. 泰巴尔迪, “更强烈、更频繁、持续时间更长的高温
21世纪的海浪，” *科学*，卷. 305, 第. 5686, 页. 994–997, 2004年8月13日，
doi: 10.1126/science.1098704.
- [147] 政府间气候变化专门委员会 (IPCC), “AR4气候变化2007：
物理学基础，”剑桥大学出版社，2007年。访问时间：2024年11月19日。
[在线]. 获取方式：<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- [148] S. 埃雷兹 等， “气候变化对光伏发电的影响在
欧洲，” *自然通信*，第6卷，第1期，第10014页，2015年12月，doi: 10.1038/ncomms10014.



- [149] S. Aivalioti, “电力部门对热浪的适应” *萨宾中心气候变化法律哥伦比亚法学院 2015年1月*, 2015年1月, 访问于: 2024年5月20日. [在线]. 可访问: https://scholarship.law.columbia.edu/sabin_climate_change/136
- [150] K. 赖费尔, “热浪期间太阳能项目的注意事项”, 光伏杂志国际. 访问时间: 2024年5月20日. [在线]. 获取方式: <https://www.pv-magazine.com/2022/07/20/考虑高温天气下太阳能项目的注意事项/>
- [151] R. 雷根, “全球热浪考验太阳能板”, 太阳能论坛. 访问时间: 2024年5月20日. [在线]. 获取方式: <https://solartribune.com/global-heat-wave-puts-solar-test-panels/>
- [152] K.-J. 哈 等, “东干热浪和湿热浪的动力学和特征” 亚洲, *npj气候大气科学*, 第5卷, 第1期, 第49页, 2022年6月, doi: 10.1038/s41612-022-00272-4.
- [153] A. Porat, 《2020年5月14日至22日的极端热浪》, 以色列气象服务. 访问时间: 2024年5月20日. [在线]. 可访问: <https://ims.gov.il/en/node/106>
- [154] 一、K. A. Kaaya, M. Koehl, A. P. Mehilli, S. de Cardona Mariano 和 K. A. Weiss, “光伏组件室外服务寿命预测建模: 综合气候胁迫因子的影响” *IEEE 光伏汇刊 关于光伏组件功率衰减*, 卷9, 第4期, pp. 1105–1112, 2019年7月, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2916197.
- [155] J. Ascencio-Vásquez, I. Kaaya, K. Brecl, K.-A. Weiss, and M. Topič, “全球气候数据处理和光伏降解机制及降解速率的制图” *能量 模块*, 第12卷, 第24期, 第4749页, 2019年12月, doi: 10.3390/en12244749.
- [156] M. 治疗师, J. 斯坦, C. 德莱尼, D. 乔丹, C. 罗宾逊, W. 塞库利奇, 等, 匿名 近期光伏组件技术的早期性能退化分析 *Prog Photovolt Res Appl* 卷31, 第2期, 第149-160页, 2023年4月, doi: [10.1002/pip.3615](https://doi.org/10.1002/pip.3615).
- 自然气候变化 [157] G. 辛普金斯, 《印度的极端降雨》, 第7卷, 第11期, 第760–760页, 2017年11月, doi: 10.1038/nclimate3429.
- [158] H. Upadhyaya, “喀拉拉洪水: 当61座水库都没有时, 应该期待什么 应急计划?”, “DownToEarth”. 访问时间: 2024年11月29日. [在线]. 获取方式: <https://www.downtoearth.org.in/natural-disasters/kerala-floods-what-to-expect-when-61-dams-no-emergency-plans--61416>
- [159] “洪水, 致命的年度特征——还要多久才会被遗忘了”, “DNA-印度”. 访问时间: 2024年11月29日. [在线]. 可访问: <https://www.dnaindia.com/india/report-floods-a-lethal-annual-feature-how-long-will-it-be-forgotten-2654699>
- [160] N. Shiradkar, “在洪水影响的太阳能发电厂中观察到的可靠性和安全问题 并且策略以减轻未来损坏”, 在 *2019 IEEE 第46届光伏专家会议(PVSC)*, IEEE, 2019年6月, 第3097-3102页. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981158.
- [161] 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) *1.5摄氏度的全球变暖*. 剑桥大学出版社, 2018年. doi: 10.1017/9781009157940.
- [162] M. W. 琼斯 等, “2023-2024年野火状况” *地球系统科学数据*, 第16卷, 第8期, pp. 3601–3685, 2024年8月, doi: 10.5194/essd-16-3601-2024.
- [163] 联合国环境规划署, “如野火般蔓延: 日益增长的威胁” “非同寻常的景观火灾”, 2022年. 访问日期: 2024年11月19日. [在线]. 获取方式: <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fire>



- [164] j. t. abatzoglou, d. s. battisti, a. p. williams, w. d. hansen, b. j. harvey, and c. a. kolden, “projected increases in western us forest fire despite growing fuel constraints,” *地球与环境通报* , 第2卷, 第1期, 第227页, 2021年11月, doi: 10.1038/s43247-021-00299-0. [165] S. El Garroussi, F. Di Giuseppe, C. Barnard, 和 F. Wetterhall, “欧洲直面 *npj气候大气科学* 在变暖的气候下, 极端火灾增加了十倍,” , 第7卷, 第1, 第30页, 2024年1月, doi:10.1038/s41612-024-00575-8. [166] L. Donaldson, D. M. Piper 和 D. Jayaweera, “时间太阳能光伏发电 *IEEE 访问* 因野火烟雾导致产能下降,” , 卷 9, 页 79841–79852, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084528. [167] S. D. Gilletly, N. D. Jackson, 和 A. Staid, “量化野火诱发影响至 2021 *IEEE 48th* 在美国西部生产的光伏能源,” 在 *光伏专家会议 (PVSC)* , IEEE, 2021年6月, 第1619–1625页。doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518514。
- 等 [168] A. M. 诺布尔 “关于雾霾对光伏系统产量的影响” *更新。能源* 新加坡, “ , 卷. 89, 第 389–400 页, 2016 年 4 月, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.11.079.D. [169] E. Ford, I. M. Peters, 和 B. Hoex, “量化野火烟雾对太阳能的影响 *iScience* 澳大利亚的光伏发电,” , 卷 27, 第 2 期, 第 108611 页, 2024 年 2 月, doi: 10.1016/j.isci.2023.108611.

