刘晓丽,翁锐,蒋理,等.青藏高原脆弱区光伏电站对草地生态系统的影响研究进展[J].中国沙漠,2026,46(5):43-51.

青藏高原脆弱区光伏电站对草地生态系统的影响研究进展

刘晓丽[1],翁 锐[2],蒋 理[2],陈怡宁[1],孙 涛[1]

(1.淮北师范大学 生命科学学院,安徽 淮北 235000;2.华电(尼木)新能源有限公司,西藏 拉萨 851300)

摘要:全球能源转型与低碳进程的加速,推动了光伏电站向青藏高原高寒脆弱区的扩张。该区域生态系统结构简单且恢复力较弱,光伏电站通过改变地表覆盖、微气候、水热分配及土壤性质,对区域生态系统服务构成潜在威胁。现有研究多局限于短期单点观测,缺乏对长期生态轨迹及跨尺度评估能力系统认知。本文基于国内外文献系统梳理与实地监测数据,从微气候-土壤过程-植被响应-服务功能级联视角出发,解析光伏电站在高原生态脆弱区生态效应。结果表明:光伏建设通过土地利用转换、景观破碎化及微生境分化,驱动植被群落重组与优势种更替,进而影响水源涵养、碳固定、水土保持及生物多样性维持等关键服务功能;该影响呈现显著时空异质性与阶段双重性,建设期以扰动主导,运营期具有遮阴、集雨等微生境优化效应。本文整合青藏高原不同草地类型区实证证据,揭示光伏开发与高寒生态系统互馈的核心矛盾及关键不确定性,分析当前研究不足(长期监测缺失、参数—阈值关系不明、多尺度评估工具不足),并提出监测-实验-模拟协同推进的研究框架。研究结果为构建生态影响评估体系及实现能源-生态协同发展提供科学依据。

关键词:高寒脆弱区;光伏电站;调控机制;生态过程;服务功能

文章编号:1000-694X(2026)05-043-09 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00023

中图分类号:G642 **文献标志码**:A

0 引言

光伏发电是应对全球能源危机、缓解气候变化和减少环境污染的关键解决方案[1]。为实现《巴黎协定》设定的减少碳排放和减缓气候变化影响的目标,向可再生能源的转型已成为国际社会共识[2]。作为全球光伏行业领导者,中国在光伏发电领域保持主导地位,截至2025年7月底,中国的可再生能源装机容量已突破21亿kW。其中,风电与光电累计装机容量达到16.8亿kW,占全国总装机容量的46%,构建了全球最为完善的新能源产业技术体系[3]。该产业迅速扩展不仅推动能源结构绿色转型,同时也促使光伏电站的开发逐步向生态脆弱和环境敏感的区域扩大。尽管光伏电站在清洁能源生产中具有显著优势,其大规模部署会改变局地地表特性与微气候条件[4]。这些变化主要源于光伏阵列对地表粗糙度、反照率(暗色组件表面)、能量再分配以及运行过程中废热释放的综合作用效应[5-8]。然而,其环境效应存在显著区域异质性,影响的方向与强度依赖于当地气候背景、生态系统类型及电站设计参数(如组件倾角、覆盖率与布局方式),导致观测结果在不同区域间呈现不一致趋势。

青藏高原被誉为“第三极”,是地球上生态最为脆弱的地区之一,其重要的水资源保护功能和显著的碳释放潜力使其对环境干扰极为敏感。青藏高原具备长日照(年总辐射量普遍超过6 000 MJ·m^{-2})、强烈的太阳辐射、稀薄的空气以及广阔空间,以上自然条件为光伏产业发展提供了理想基础,促使其成为中国清洁可再生能源战略布局的重点区域[6-7]。然而,作为全球海拔最高的地区,青藏高原的生态系统极为脆弱,对地表热扰动高度敏感。该地区高

收稿日期:2026-02-01; **改回日期**:2026-03-03

资助项目:华电西藏高寒高海拔地区牧光互补实证研究科技项目(NMHD2024-008);兰州大学合作项目(22100401);安徽省教育厅自然科学研究项目(2024AH0516369)

作者简介:刘晓丽(1986—),女,甘肃白银人,博士研究生,主要从事多样性研究。E-mail:liuxi028@126.com

通信作者:孙涛(E-mail:sunt231@126.com)

寒植被生长季节短暂，生产力低下，恢复力和抵抗力均较弱，生态系统结构简单，生物多样性维持机制脆弱[7]。大规模集中式光伏电站的快速扩张，不仅通过施工碾压、植被清除直接扰动土壤与地表覆被，更在运营期通过遮蔽效应、风障效应、人为管护及设施分割等路径，深度重构微气候、水文及土壤过程[6-8]。这一系列物理环境的变化必然逐级传导，深刻影响土壤水热动态、植被群落的组成、结构与功能，乃至整个生态系统的服务功能。本文通过系统整合青藏高原不同草地类型区光伏电站的国内外文献与实地监测数据，从微气候-土壤过程-植被响应-生态系统服务级联视角出发，揭示光伏开发对高寒生态系统格局与过程的影响。在此基础上，本文进一步凝练当前光伏-生态权衡的核心矛盾与关键不确定性，为后续建立长期监测网络、开展设计参数对比实验、构建多尺度评估平台提供理论框架与实证基础，从而为高寒脆弱区可再生能源的生态兼容型布局、精准影响评估及适应性修复实践提供科学依据。

1 光伏电站对生态过程的影响

1.1 光伏电站对微气候的影响

在青藏高原高寒地区，大规模光伏电站显著改变了天然草地生态系统的地表物理环境，导致局地微气候发生系统性扰动[7]。高寒草地气温低、辐射强、大风频发、生长季短，生态系统对能量和水分变化更加敏感[4]。光伏阵列通过遮蔽太阳直射、改变地表反照率和阻滞近地层气流，影响生态系统近地表与大气界面间的能量-水分交换过程[8]。与开阔草甸相比，光伏阵列下地表日均净辐射通量显著降低，尽管漫射辐射与反射辐射可部分补偿直射辐射损失，但净辐射总量减少仍导致地表感热与潜热通量下降，进而扰动局地热力环流[4-5,8]。在青藏高原东北部荒漠盆地，光伏阵列覆盖区地表年太阳辐射较对照区降低5.5%~6.4%[9]，其热环境效应呈现显著昼夜分异，白天表现为“冷岛效应”（地表温度较对照区低0.65 ℃），夜间则表现为“热岛效应”（地表温度较对照区高0.54 ℃）。该效应同时具有明显季节动态性，热岛效应在夏季夜间最为明显，而冷岛效应在冬季白天更为突出；这种季节性差异主要源于青藏高原特殊的气候特征与光伏设施热力学特性的复杂交互，涉及太阳辐射角度变化、大气透明度、地表反照率季节性波动、积雪覆盖热交换机制以及区域微气候调节等多维度因素。光伏阵列对局地土壤热性能的影响具有显著的季节性差异，主要表现为春、夏、秋降温作用，冬季则相反呈现保温效应[10-11]。在高寒冻土区，这一调控作用更为明显；在冻融活跃期，光伏阵列下方0~10 cm浅层土壤升温速率减缓，冻结层融化推迟，可能延后植物根系活动与返青进程。在青藏高原高山草甸监测表明，光伏阵列的遮阴效应使得全年光伏板下及板间土壤温度降低低于对照区，板下和板间土壤结冰日期分别较对照提前27 d和20 d，解冻则分别延迟20 d和31 d[12]。此外，光伏阵列还降低了冻融循环的强度与频次，从而减轻冻胀与融沉对土壤结构的扰动，有助于维持表层土壤的稳定性[13]。

同时，光伏阵列增大了地表粗糙度，提升摩擦阻力，从而削弱近地表风速。在青藏高原东部玛曲东能光伏电站的观测显示，与对照区相比，电站内2.5 m高度处风速在春、夏、秋、冬分别下降39.1%、36.0%、33.6%、36.2%[12]。青海共和县塔拉滩光伏园区的观测显示，年均风速由对照点区的3.67 $m\cdot s^{-1}$降至0.74 $m\cdot s^{-1}$，降幅达80%[9]；同时，光伏板对风向的影响具有显著的方向依赖性[12]。风速减弱、遮阴效应与局部降水分布格局的协同作用，共同影响土壤水分含量。微观尺度上，光伏组件还会改变局地降水再分配格局。板下区域因遮蔽作用直接降水减少，而板边缘地带（尤其光伏前沿段）则因面板集流效应产生径流集中，降水输入量相对增加。尽管降水后径流区的空气湿度与土壤含水量可能短暂升高，但光伏板整体遮蔽效应显著抑制土壤蒸发与植被蒸腾，从而在较长时间尺度上增加板下土壤水分含量，或缩小其与板间、径流区及对照区之间的水分差异[14]。在青藏高原高寒草地生态系统，光伏板倾斜安装将降水引至板间间隙，显著增强该区域的水分补给；同时，遮阴作用降低风速、减缓土壤升温，有效抑制蒸发，维持较高土壤水分含量。由此，光伏电站在区域尺度上对土壤湿度的调控呈现明显季节性差异，春秋两季，因土壤春季解冻延迟或秋季结冰提前，电站内土壤水分低于对照区；夏季则相反，板下及板间土壤水分含量较对照高出9%[12]。

1.2 光伏电站对土壤特性的影响

青藏高原生态环境脆弱，光伏电站建设对草地

土壤特性的影响表现出复杂的时空异质性。施工过程中，大型机械的道路铺设、土地开挖及施工作业对土壤结构造成直接、深刻且难以逆转的扰动，是影响土壤生态环境的主要人为驱动因素。重型机械反复碾压破坏原生土壤团粒结构，诱发水土流失，加剧土壤物理性质恶化，具体表现为土壤容重增加、孔隙度下降、通气性与透水性减弱[15-16]。此外，场地开挖、平整和植被清除可能会剥离富含有机质和种子表层草毡层，不仅导致高寒草甸养分库与种子库的消失，也使下层土壤直接暴露。施工过程同时扰乱原生自然土壤剖面层次，可能形成致密层阻隔水分下渗，从而改变局部水文循环路径[17]。裸露且压实的表土植被在未恢复前易受风蚀与水蚀，导致土壤及养分流失。高寒冻土区，地表植被清除与土壤扰动改变地表热量收支平衡；机械散热以及地表反照率降低所增加的太阳辐射，会向地下传导热量，可能加速活动层加深与冻土退化，诱发热融沉降等地质灾害，进而威胁工程安全与生态稳定。电站建成运行中，光伏板遮阴效应改变土壤微环境，对土壤营养组成和生物特性产生双重作用[18-19]。研究表明，光伏阵列内土壤速效磷含量显著高于外围，而全氮、有效磷和有效钾含量差异不明显[20]。光伏电站运营后，土壤养分呈现较大时空变异。在青藏高原共和盆地，电站建设使土壤水分、植被生产力、覆盖度、地上生物量和凋落物增加，促进有机质输入，显著提升土壤有机质和全氮含量，土壤肥力明显增强[21]。此外，不同空间位置的土壤化学特性显示，光伏子阵布局对土壤pH和养分含量有显著影响：光伏布设区板下与板间土壤含盐量低于对照，其中斜单轴子阵区土壤pH、全氮、全钾及有效钾含量均显著高于其他子阵类型[22]。光伏板对风的阻滞作用使板间土壤粉粒和黏粒含量增加、砂砾减少。板间区域光照充足、土温较高、蒸发较快，适宜深根性耐旱植物生长；其根系有助于改善土壤结构、积累有机质，进一步促进细颗粒形成，从而增强土壤稳定性与持水能力，有效抑制板间土壤侵蚀[15]。

1.3　光伏电站对植物群落影响

光伏基础设施的铺设对青藏高原原生植被群落产生扰动，进而改变其组成和结构[23]。此类影响主要表现为植被覆盖度、物种多样性、群落构成及土壤-植被耦合关系的变化，并因海拔、气候及管理措施等因素的不同，呈现出显著的空间异质性与时间动态性[23-27]。光伏阵列的安装通常涉及土地平整、道路修建及电缆铺设等工程活动，直接造成地表植被的清除与破坏，然而电站建成后的植被恢复可有效提升覆盖度与生物量。拉萨尼木和林周光伏电站的调研显示，尽管施工导致原生高寒草地盖度下降，但随着恢复措施推进，站内植被盖度逐年上升。在青藏高原东北共和盆地的光伏电站，建成后三年内植被盖度持续增加，较周边对照区提高83.9%[17]。亦有研究表明，光伏电站内植物生产力显著高于外围区域[25]。施工扰动削弱地表对风蚀与水蚀的抵抗力，加剧局部土壤退化风险。需特别指出的是，与低海拔荒漠不同，高寒草甸施工中重型机械碾压易破坏脆弱的草毡层，其下暴露的岩石风化母质碎屑层养分贫瘠、持水能力差，难以支撑植被恢复，且易发生流失，导致生态修复面临极大挑战[26]。光伏建设通过改变微气候环境间接影响植被生长，重构植物组成和多样性格局，形成生态位分化-优势种重组效应[28]。在空间分布上，板前和板后区域因风速变化及气流汇流形成独特的边缘效应区，板间区域因部分光照和适度遮阴，土壤持水能力增强，成为植被恢复的热点区，其物种多样性指数和盖度普遍高于板下区域[15,22]，且随恢复时间延长，板间植物多样性趋近自然未干扰状态。鲍平安等[27]研究发现，电站建成植被恢复2年后，板间植物群落的Simpson指数、Margalef指数和Pielou指数均显著高于板下及对照样地。板下区域遮阴环境筛选出耐阴、喜湿的一二年生植物，形成多样性较低的耐阴耐旱植物群落[28]，笔者在西藏拉萨林周光伏电站观测发现，适度遮阴有利于耐阴草本植物（如蒲公英，*Taraxacum mongolicum*）生长，提升局部生境物种丰富度；但过度遮蔽则抑制阳生植物，导致群落组成趋于单一。此类微生境异质性变化可能重塑植物种间竞争格局，进而影响群落多样性与稳定性。

2　光伏电站对生态系统服务功能的影响

2.1　光伏电站对水源涵养的影响

近年来，该区域光伏电站迅速扩张，在推动清洁能源转型的同时，也深刻影响着生态系统服务功能。在水源涵养方面，光伏设施通过干扰地表能量

分配与水文循环，呈现出双重生态效应。一方面，光伏板的遮蔽效应显著抑制土壤蒸发，提升局部土壤的含水量；观测数据显示，光伏板下中部及前缘区域土壤温度降低1.47~1.66 ℃，相对湿度增加59.8%~113.6%，显著增强局地水源涵养能力[29-30]。另一方面，在青藏高原干旱区，部分电站为维持板下植被而实施人工灌溉，可能加剧对地下水的依赖，加重区域水资源压力。

2.2 光伏电站对碳汇服务的影响

尽管光伏电站建设阶段的扰动会破坏植被、地表结构及土壤有机碳库，短期内造成碳释放，但在电站建成并运营后，光伏板通过遮阴降温、减少蒸发、改善局地水热条件、减缓热胁迫等机制，在一定范围和程度上促进了高寒草甸或荒漠植物的生长，从而增强生态系统季节性固碳能力[31]。研究表明，青藏高原部分光伏园区植被覆盖度提升后，年净生态系统生产力显著提高，碳通量在年内呈现U形变化，主要受气温及太阳辐射等气象因素驱动，且在多种未来气候情景下仍显示出较强的碳汇潜力[32-35]。此外，在西北荒漠化地区，研究人员已构建光伏板下植被固碳效益的评估方法，验证植被恢复固碳效益。谢卓洋等[34]利用遥感提取甘肃河西走廊地区集中式光伏电站，对光伏板下植被恢复带来固碳效益进行量化核算，结果显示，25年间光伏板下植物总固碳量达276.92万吨CO^2e。

2.3 光伏电站对土壤侵蚀的影响

光伏板通过遮挡自然降水，改变了降水的空间分布格局，形成明显的异质性特征。受光伏板遮蔽影响，板下区域难以获得直接降水，主要依赖周边土壤水分的侧向渗透补给；而雨水沿光伏板边缘汇集后集中滴落，形成高强度的径流与雨滴飞溅。这种边缘集雨效应显著增强了板缘区域的雨滴动能，加剧飞溅侵蚀，导致土壤颗粒被击散、迁移，进而破坏地表土壤结构[17]。有研究表明，光伏板边缘区域雨滴冲击力较平均水平高出3~5倍，而板下区域因雨滴拦截，冲击力减少约60%~80%[36]。笔者在青藏高原拉萨尼木霍德一期光伏电站的观测表明，光伏板拦截降水所引发的飞溅侵蚀效应因草地退化程度而异。在沙化型退化严重的草地，雨水沿板缘集中滴落，持续冲击地表，形成明显侵蚀坑（图1A）与微沟（图1B），侵蚀坑与微沟（图1C），土壤结构遭受破坏。而在原生未退化高寒草甸，地表植被对雨滴具有良好拦截与缓冲作用，地表植被几乎未受影响（图1D）。因此，在青藏高原生态脆弱区，尤其是沙化型退化草地进行光伏电站建设时，应高度重视光伏板铺设可能加剧的土壤侵蚀风险。在电站建成后的植被恢复过程中，亟须针对性地加强水土保持措施，优先筛选适宜的水土保持植物，以提升生态恢复成效与工程可持续性。

此外，光伏电站在防风固沙与土壤保持功能方面的表现因地貌单元而异。在青藏高原塔拉滩光伏电站，光伏阵列显著削弱近地表风速，年均风速由对照点的3.67 $m\cdot s^{-1}$降至0.74 $m\cdot s^{-1}$，降幅达80%[9]，有效减少风沙输移，增强土壤抗蚀性，发挥固沙功能[18]。相比之下，在高寒草甸区，电站建设过程中重型机械碾压破坏草毡层及其根系网络，削弱地表抗蚀能力，加剧冻融侵蚀，显著降低土壤保持功能[18-19]。

2.4 光伏电站对生物多样性的影响

光伏电站在景观与微生境尺度上对生物多样性产生广泛影响，已引发广泛关注。在景观尺度上，电站建设导致栖息地破坏或丧失，并通过夜间热岛效应改变局地气候；在微生境尺度上，光伏阵列通过改变土壤理化性质，形成遮阴、径流、湿度及辐射暴露梯度，重塑小气候与微生境条件，进而影响群落组成与多样性[37-43]。水、光、热是植物生长的关键决定因子，微生境异质性不仅驱动植物群落动态，也间接影响微生物、传粉者、鸟类、蝙蝠及哺乳动物等多类群的栖息地适宜性[43-47]。研究表明，光伏设施覆盖下土壤细菌α多样性显著降低，优势类群相对丰度发生明显偏移，可能干扰氮、碳等养分循环[37]。在青藏高原高寒荒漠草地，建成6年后电站内土壤原核微生物的系统发育多样性、Shannon-Wiener多样性指数和物种丰富度显著高于站外[38]。光伏电站建设期间，人类干扰能降低0~60 cm土层细菌、真菌和放线菌数[39]。植被对光伏微环境的响应表现出物种与空间特异性。遮阴促进耐阴物种扩张，但中高大型禾草，如燕麦草（*Arrhenatherum elatius*）、鸭茅（*Dactylis glomerata*）、黑麦草（*Lolium perenne*）盖度下降，而鹅绒委陵菜（*Potentilla anserina*）或拂子茅（*Calamagrostis epigejos*）等多年生或入侵



图 1　不同草地类型光伏板下土壤侵蚀

Fig.1　Soil erosion under photovoltaic panels in different grassland types

草本盖度上升[28,40]。板下物种数普遍较低，遮阴对多数植物不利[41]。亦有研究显示板下盖度高于板间[39]，反映出微环境与管理措施的交互作用。目前关于青藏高原光伏电站对动物多样性影响的直接研究仍较少，但影响路径可归纳为直接干扰（栖息地破坏、碰撞致死）与间接调控（微生境改变、食物网重组）。施工期临时道路、人为活动与材料堆放侵占或破坏原生栖息地；运行期碰撞风险显著上升，尤其对迁徙鸟类与飞行昆虫构成威胁。全球估算显示，光伏电站每年所致鸟类死亡率约为每兆瓦 2.49~10.7 只[48]，其中 11 种列为保护优先级的非本地夜迁徙鸟类对光–风能源设施尤为敏感[49]。值得注意的是，光伏电站在特定条件下亦显现生物多样性正效应。在水分受限的干旱及半干旱区，光伏板遮阴可缓解植物热应激与蒸散压力，提升土壤种子库存活率与植被生产力，促进物种多样性恢复[7]。在荒漠生态系统中，光伏阵列可充当生态岛，为节肢动物、爬行动物及小型鸟类提供热庇护、觅食与筑巢生境[50]。此外，遮阴导致生长季延长或错位，可能提升植物与传粉者间的物候匹配度[51]。

青藏高原光伏电站对微生物、植物与动物的影响呈现显著的时空异质性与阶段双重性。建设期以生境扰动为主导（负效应），运营期则因微生境优化而显现生态增益（正效应）。光伏设施通过重构光、热、水、风的空间格局，在板下、板间及边缘区形成梯度化微生境，驱动生物类群响应在空间（设施位置）与时间（建设/运营、恢复年限、季节）维度上产生分异。这种多尺度分异格局的形成，源自光伏设施对关键生态过程的差异化调控作用，其核心机制可归纳为以下路径。(1)光照筛选：梯度化辐射条件筛选耐阴或喜光物种，主导植物群落重组；(2)水热调控：改变土壤温湿度与蒸发格局，调控微生物活

性、植被生产力及动物行为节律；(3)基质扰动：施工导致的土壤结构变化直接影响微生物多样性与植被恢复，并通过食物网级联效应波及更高营养级。不同生物类群的响应差异，与其生态位属性、功能角色与响应尺度密切相关。微生物群落高度依赖土壤微环境，其结构与功能变化呈现显著的累积性与滞后性；植物作为光、水、热资源梯度筛选的直接体现者，空间分异格局最为明显；动物则通过栖息地重构与食物网级联效应间接响应，展现出行为可塑性。

3 结论与展望

3.1 结论

青藏高原高寒草地的集中式光伏电站在支撑可再生能源供应、保障区域能源需求以及缓解气候变化方面发挥着积极作用，然而，光伏电站建设也引发了一系列生态影响。这些影响通过辐射削减、遮阴降温、蒸散抑制等多种物理过程耦合与互作，重塑局地温度、水分、光照条件的时空分异格局，改变了地表栖息环境的空间配置。该生态过程对微气候环境形成扰动，也影响土壤理化性质，同时驱动植被群落组成及其多样性空间格局的重组。该变化表现出明显时空异质性与阶段双重性。光伏开发诱导生态系统调整，可能对青藏高原生态脆弱区关键生态系统服务功能构成潜在威胁，特别是在水源涵养、碳固定、水土保持以及生物多样性维持等方面，其负面效应一旦累积或跨越阈值，将难以在短期内恢复。因此，光伏电站与高原生态之间呈现出典型的全球获益-局地受损的权衡关系，其核心矛盾在于能源开发规模扩张的迫切需求与高原生态系统固有脆弱性及有限恢复力之间的持续张力。当前，围绕这一权衡仍存在以下不确定性：(1)长期尺度下土壤碳库演变方向、生物多样性恢复轨迹及生态系统服务净效应尚不明确；(2)光伏阵列关键设计参数(如阵列密度、行间距、运维方式)与生态响应阈值之间缺乏定量关联；(3)面向光伏-生态协同管理的权衡优化机制是否具有跨区域普适性有待验证。未来亟须构建多尺度、长时序的监测-模拟一体化研究框架，量化生态影响与能源产出的权衡边界，识别并界定可持续开发的关键阈值，从而为青藏高原及类似高寒脆弱区实现绿色能源开发与生态保护协同发展提供科学基础与决策支撑。

3.2 展望

青藏高原光伏电站的建设为生态脆弱区能源转型提供了重要契机，然而，当前研究在观测时长、空间覆盖范围与跨尺度整合方面仍存在不足，难以系统揭示光伏开发对高寒生态系统的长期影响轨迹与阈值效应。未来研究应立足监测-实验-模拟三位一体的思路，从以下3个层面系统推进，为高寒脆弱区光伏电站的生态兼容型布局与适应性管理提供科学支撑。(1)构建长期定位监测站。在典型高寒草甸、高寒草原及荒漠草原区选取代表性光伏电站，同步布设站内与站外对照样地，开展微气候、土壤水热、碳氮循环、植被群落及土壤生物等关键过程观测，通过长时序可比数据识别生态影响。(2)开展光伏设计参数对比实验。针对覆盖率、倾角、行间距等关键工程参数，建立多因子对比实验，量化不同参数组合对辐射分配、土壤水分、植被恢复以及碳汇功能的影响。(3)搭建集成遥感—模型—地面观测的评估平台。融合遥感反演(植被生产力、地表温度、土壤水分)、过程模型模拟(生态系统响应轨迹)与地面观测(参数验证与本地化)，突破单一手段的时空尺度局限，实现从点位监测向区域预测—情景推演的跨越，支撑光伏开发对水源涵养、碳固定、水土保持及生物多样性等生态系统服务长期净效应的动态评估。通过上述协同推进，有望逐步揭示高寒脆弱区光伏开发与生态保护的互馈机制，推动从被动修复转向主动适配，为全球类似区域实现可再生能源规模扩张与生态系统可持续协同发展提供科学路径。

参考文献：

[1] Kan A, Zeng Y, Meng X, et al. The linkage between renewable energy potential and sustainable development: understanding solar energy variability and photovoltaic power potential in Tibet, China [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48: 101551

[2] Lee H K, Calvin D, Dasgupta G. Summary for Policymakers: Climate Change 2023: Synthesis Report [R]. IPCC, 2023.

[3] “十四五”我国可再生能源实现大规模、高比例、市场化、高质量跃升发展[EB/OL]. http://www.cnnes.cc/shichang/mingjia/20250903/11589.html.

[4] Wei S, Ziegler A D, Qin Y, et al. Small reduction in land surface

albedo due to solar panel expansion worldwide[J].Communications Earth & Environment,2024,5:474.

[5] Xu Z,Li Y,Qin Y,et al.A global assessment of the effects of solar farms on albedo,vegetation,and land surface temperature using remote sensing[J].Solar Energy,2024,268:112198.

[6] 段美霞.气候变化下青藏高原光伏资源开发潜力研究[D].南京:南京信息工程大学,2025.

[7] Liu Y,Zhang R Q,Huang Z,et al.Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem[J].Land Degradation & Development,2019,30(18):2177-2186.

[8] 郑隽卿,罗勇,常蕊,等.大规模光伏开发对局地气候生态影响研究[J].太阳能学报,2023,44(8):253-265.

[9] 屈准,韩庆杰,殷代英.塔拉滩光伏园区对局地气象条件的影响[J].地理研究,2025,44(7):1811-1825

[10] 李国庆,Armstrong A,刘哲.光伏电场对地表温度的影响研究[J].太阳能学报,2020,41(12):117-123.

[11] Yue S,Wu W,Zhou X,et al.The influence of photovoltaic panels on soil temperature in the gonghe desert area[J].Environmental Engineering Science,2021,38(9):910-920.

[12] Broadbent A M, Krayenhoff E S, Georgescu M,et al.The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(5):989-1006.

[13] 康子军,韩放,豆红强,等.高寒高海拔区大型光伏电站场地冻融侵蚀强度分区评价[J].自然灾害学报,2024,33(4):198-210.

[14] Choi C S,Cagle A E,Macknick,J,et al.Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8:140.

[15] 郝晓珍,于航,吴星叶,等.青藏高原荒漠区典型光伏电站建设对植被属性和土壤性质的影响[J].生态学报,2025,45(11):5510-5526.

[16] 张景波,李新乐,刘雅婧,等."光伏+生态治理"模式的实践挑战与策略建议[J].中国沙漠,2025,45(5):92-101.

[17] Elamri Y,Cheviron B,Mange A,et al.Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots[J].Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(2):1285-1298.

[18] 刘雅婧,王丹阳,常旭,等.光伏电站建设对西北荒漠区生态环境的影响研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):9-17.

[19] 魏佳荣,周侃,张健.青藏高原光伏产业园区的土地退化过程及其空间效应:基于土地退化平衡的视角[J].地理研究,2025,44(8):2057-2079.

[20] 周茂荣,王喜君.光伏电站工程对土壤与植被的影响:以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J].中国水土保持科学,2019,17(2):132-138.

[21] 丁成翔,刘禹.光伏园区建设对青藏高原高寒荒漠草地土壤原核微生物群落的影响[J].草地学报,2021,29(5):1061-1069.

[22] 屈准,杨肃昌,赵鹏,等.青藏高原东北缘大规模光伏电站对高寒沙地植被-土壤的影响研究:以青海共和盆地为例[J].干旱区资源与环境,2024,38(12):92-106.

[23] 张深林,吴田军,刘正国,等.高寒高海拔地区光伏电站建设的草地生态效益评估[J].草原与草坪,2025,45(5):129-136.

[24] Yang S,He T,Yang N,et al.Ecological synergy of solar development on the Qinghai-Tibet Plateau: a decade of ecosystem service change assessment at Talatan Solar Park[J]. Environmental Research Letters,2025,20(7):074014.

[25] Wang T,Wang D X,Guo T D,et al.The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation[J].Research of Soil and Water Conservation,2016,233(3):90-94.

[26] Zhang J,Li Z,Tao J,et al.Observed impacts of ground-mounted photovoltaic systems on the microclimate and soil in an arid area of Gansu,China[J].Atmosphere,2024,15(8):936.

[27] 鲍平安,季波,孙果,等.光伏电站建设对植物群落与土壤特征的影响[J].草业学报,2024,33(12):23-33.

[28] 帅争峰,雷咸道,汪常明,等.北方荒漠草原区光伏电站建设对植物多样性的影响机制研究[J/OL].草地学报,1-17[2026-01-12].https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251011.0911.002.

[29] Chen H,Wu W,Li C,et al.Ecological and environmental effects of global photovoltaic power plants: a meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management,2025,373:123785.

[30] Wu C,Liu H,Yu Y,et al.Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: a modeling study[J].Science of the Total Environment,2022,802:149946.

[31] Wang S,Meng X,Li Q,et al.Environmental impacts of pastoral-integrated photovoltaic power plant in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2025:11301-11315.

[32] 周玉.基于Biome-BGC模型的荒漠光伏生态系统碳通量模拟研究[D].西安:西安理工大学,2024.

[33] 杨思琪,胡远安,张力小,等.干旱区集中式光伏电站对生态系统服务级联影响研究进展[J/OL].环境科学,1-15[2026-01-27].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202505249.

[34] 谢卓洋,鲍学英,李亚娟,等.荒漠化地区集中式光伏电站遥感提取与碳效益核算方法[J].地球信息科学学报,2025,27(12):2951-2965.

[35] 杜笑微,张子琪."高冷"经济看发展丨牧光互补！戈壁变"金滩"的双赢密码[EB/OL].https://www.xinhuanet.com/fortune/20251209/f90699bff1d4442bbbb76f1751a83dd2/c.html

[36] Hu Y,Liu G,Wan L.Water-mediated vegetation impacts of photovoltaic plants: insights from field and satellite data on the Qinghai-Xizang Plateau[J].Journal of Environmental Management,2026,397:128284.

[37] 孙文倩,楚彬,叶国辉,等.光伏发电站对高寒草甸土壤细菌群落组成及多样性的影响研究[J].草地学报,2025,33(2):440-450.

[38] 郝晓珍,于航,吴星叶,等.青藏高原荒漠区典型光伏电站建设对植被属性和土壤性质的影响[J].生态学报,2025,45(11):5510-5526.

[39] 李艳梅,陈奇伯,梁茂,等.干热河谷水电建设干扰对表土层土壤养分及微生物的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):147-152.

[40] Uldrijan D, Kováčiková, M, Jakimiuk A, et al. Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants [J]. Ecological Engineering, 2021,168:106274.

[41] Schindler B Y, Blaustein L, Lotan R, et al.Green roof and photovoltaic panel integration:Effects on plant and arthropod diversity and electricity production [J]. Journal Environment Management,2018,225:288 - 299.

[42] Bousselot J, Slabe T, Klett J, et al.Photovoltaic array influences the growth of green roof plants[J].Journal of Living Architecture,2017,4:1-10.

[43] Gómez-Catasús J, Morales M B, Giralt D, et al.Solar photovoltaic energy development and biodiversity conservation:current knowledge and research gaps[J].Conservation Letters,2024,17(4):e13025.

[44] Averill-Murray R C, Darst C R, Strout N, et al.Conserving population linkages for the Mojave desert tortoise (Gopherus agassizii) [J]. Herpetological Conservation and Biology, 2013, 8:1-15.

[45] McCoshum S M, Geber M A.Land conversion for solar facilities and urban sprawl in Southwest Deserts causes different amounts of habitat loss for Ashmeadiella bees[J].Journal of the Kansas Entomological Society,2020,92:468 - 478.

[46] Szabadi K L, Kurali A, Rahman N A A, et al.The use of solar farms by bats in mosaic landscapes:implications for conservation[J].Global Ecology and Conservation,2023,44:e02481.

[47] Haga C, Maeda M, Hotta W, et al.Scenario analysis of renewable energy - biodiversity nexuses using a forest landscape model[J].Frontiers in Ecology and Evolution,2020,8:155.

[48] Kosciuch K, Riser-Espinoza D, Gerringer M, et al.A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the southwestern U.S[J].PLoS One,2020,15:e0232034.

[49] Katzner T E, Braham M A, Conkling T J, et al.Assessing population-level consequences of anthropogenic stressors for terrestrial wildlife[J].Ecosphere,2020,11:e03046.

[50] Gerringer M B, Smith K T, Kosciuch K L. Observations of greater sage-grouse at a solar energy facility in Wyoming[J]. Western North American Naturalist,2022,82:196 - 200.

[51] Graham M, Ates S, Melathopoulos A P, et al.Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem[J].Scientific Report,2021,11(1):7452.

Impacts of photovoltaic power plants on grassland ecosystems in the fragile regions of the Qinghai-Xizang Plateau

Liu Xiaoli[1], Weng Rui[2], Jiang Li[2], Chen Yining[1], Sun Tao[1]

(1.*College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei* 235000, *Anhui, China*; 2.*Huadian*(*Nimu*) *New Energy Corporation Limited, Lhasa* 851300, *China*)

Abstract: The acceleration of global energy transition and low-carbon development has driven the expansion of photovoltaic (PV) power plants into the ecologically fragile alpine regions of the Qinghai–Xizang Plateau. Characterized by simple ecosystem structures and weak resilience, this region faces potential threats to its ecosystem services from PV installations, which alter land cover, microclimate, hydrothermal distribution, and soil properties. However, existing research remains largely limited to short-term, single-site observations, lacking a systematic understanding of long-term ecological trajectories and cross-scale assessment capabilities. Based on a comprehensive review of domestic and international literature and field monitoring data, this paper examined the ecological effects of PV power plants in ecologically fragile plateau regions from a cascading perspective encompassing microclimate, soil processes, vegetation responses, and ecosystem services. The findings indicate that PV construction drives vegetation community reorganization and dominant species turnover through land-use conversion, landscape fragmentation, and microhabitat differentiation, thereby affecting key ecosystem services such as water conservation, carbon sequestration, soil retention, and biodiversity maintenance. These effects exhibit pronounced spatiotemporal heterogeneity and dual-phase characteristics-disturbance dominates during the construction phase, while microhabitat optimization effects (e.g., shading and rainfall harvesting) emerge during the operational phase. By integrating empirical evidence from different grassland types across the Qinghai-Xizang Plateau, this study identifies the core contradictions and key uncertainties in the feedback between PV development and alpine ecosystems, highlights current research gaps (lack of long-term monitoring, unclear parameter–threshold relationships, and insufficient multi-scale assessment tools), and proposes a collaborative research framework of monitoring-experimentation-modeling. This work deepens the understanding of alpine ecosystem responses to anthropogenic disturbances and provides a scientific basis and practical pathways for establishing ecological impact assessment systems and achieving synergistic development of energy and ecology.

Key words: alpine fragile regions; photovoltaic power plants; regulatory mechanisms; ecological processes; ecosystem services