



•综述•

集中式大型光伏及风电电场生态影响：进展与展望

彭昀月^{1*}, 罗永梅¹, 徐泽楠², 靳彤¹

1. 大自然保护协会(美国)北京代表处, 北京 100600; 2. 南开大学, 天津 300110

摘要: 在“碳达峰”和“碳中和”目标的驱动下, 我国可再生能源增长势头迅猛, 而随着光伏、风电的大规模发展, 其生态影响问题也引发关注, 但缺乏系统性的研究综述。本文回顾了国内外集中式光伏和陆上风电电场对环境、物种多样性和生态系统服务功能影响的研究, 发现: 光伏的生态影响主要体现在对土壤、植被和栖息地质量的改变, 对部分物种有不利影响, 在较为干旱的地区, 光伏设施能起到降温增湿的作用, 促进植被恢复, 在荒漠地区可以发挥防风固沙的生态作用; 风电电场的生态影响集中在对土壤植被的扰动、造成鸟类碰撞死亡和栖息地破碎化等方面, 影响物种迁徙和区域生态系统服务功能。但目前的研究在生态影响机制和生态系统整体影响方面还存在不足, 对此, 本文提出了完善与统一调查方法、采用先进的生态环境调查技术、加强在物种和生态系统水平上的系统性影响研究等建议。未来需要进一步研究光伏、风电电场的生态影响, 在能源规划初期关注生态本底调查和生物多样性评估, 并制定相应的生态影响减缓策略。

关键词: 光伏; 风电; 生态影响; 影响机制

彭昀月, 罗永梅, 徐泽楠, 靳彤 (2024) 集中式大型光伏及风电电场生态影响: 进展与展望. 生物多样性, 32, 23212. doi: 10.17520/biods.2023212.

Peng YY, Luo YM, Xu ZN, Jin T (2024) Ecological impacts of centralized large-scale photovoltaics and wind farms: Progress and prospects. Biodiversity Science, 32, 23212. doi: 10.17520/biods.2023212.

Ecological impacts of centralized large-scale photovoltaics and wind farms: Progress and prospects

Yunyue Peng^{1*}, Yongmei Luo¹, Zenan Xu², Tong Jin¹

1 The Nature Conservancy Beijing Representative Office, Beijing 100600

2 Nankai University, Tianjin 300110

ABSTRACT

Background and Aims: Driven by China's carbon neutrality goals, renewable energy is growing drastically, spurring the large-scale development of photovoltaics (PVs) and wind power. Despite this prevalence, systematic reviews detailing the ecological concerns associated with these technologies are scarce.

Methods: We provide an overview of domestic and international research on the environmental impact of centralized PV and onshore wind farms, focusing on species diversity and ecosystem services.

Results: PVs and wind farms both alter climate factors, including temperature, humidity and wind speed. The construction of PVs and wind farms damages vegetation, causing soil erosion and water loss. Construction also results in solid waste and wastewater, contributing to pollution around the site. The ecological impact of PVs is mainly reflected by changes in vegetation and habitat quality, which can have adverse effects on certain species. In relatively arid areas, PVs can play a role in lowering temperatures and increasing humidity, promoting vegetation recovery. In desert areas, they can act as windbreaks. Wind farms can result in soil and vegetation disturbances, bird collisions and mortality, and habitat fragmentation, all of which affect species migration and regional ecosystem services. Despite these potential issues, current research remains insufficient in assessing ecological impact systematically.

Prospects: We recommend research focusing on three particular areas: (1) Improving and unifying survey methods for accessing ecological impacts on centralized PVs and wind farms; (2) Adopting advanced ecological survey techniques; and (3) Strengthening systematic studies on ecological impacts at the species and ecosystem levels. Moving forward, it

收稿日期: 2023-06-21; 接受日期: 2023-11-26

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yunyue.peng@tnc.org

is necessary to study the ecological impacts of PVs and wind farms in depth. Biodiversity assessments should be implemented at the early stages of energy planning, and corresponding mitigation strategies should be adopted.

Key words: photovoltaics; wind power; ecological impacts; impact mechanism

2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出中国二氧化碳排在2030年前达峰和在2060年前实现中和的目标。随后, 我国逐步推进“双碳”政策与行动, 印发了《2030年前碳达峰行动方案》《“十四五”可再生能源发展规划》等一系列政策文件, 鼓励发展可再生能源。设立了到2025年非化石能源消费比重达20%左右, 到2030年非化石能源消费比重达25%左右, 其中风电、太阳能发电总装机容量达到12亿kW以上的阶段性目标(<https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/P020220601502009073293.pdf>)。2022年1月, 习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习时强调“要把促进新能源和清洁能源发展放在更加突出的位置”(<http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2022/01/26/ARTI1643157757349116.shtml>)。数据显示, 截至2022年底, 中国风电装机容量约3.7亿kW, 同比增长11.2%, 太阳能发电装机容量约3.9亿kW, 同比增长28.1% (https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/18/content_5737696.htm)。

在传统观念中, 光伏^①和风电因碳排放低、污染少而被认为是清洁能源, 但目前的研究发现光伏和风电也有很多“不清洁”之处, 存在一定的生态问题, 如占用野生动植物栖息地、造成鸟类死亡、影响动物迁徙等([Gamboa & Munda, 2007](#))。[刘越强和赵华\(2017\)](#)对云南西线鸟类迁徙通道和越冬区域的调查显示, 在已建风电场附近有54只鸟与风电电机发生撞击, 其中有23只死亡。2021年12月, 一只由中国科学院生态环境研究中心追踪监测的东方白鹳(*Ciconia boyciana*)在鄱阳湖越冬时就因撞上风力发电机而死亡([任西婵等, 2022](#))。然而目前对光伏、风电生态影响机制和响应的研究还不够深入、清晰, 在现今可再生能源快速增长的势头下, 集中式大规模风电和光伏的发展将逐步占据更大的国土空间面积, 必然需要提高其对生态系统和生物多样性影响的认识, 从而采取相应的措施规避或减缓其生态

影响, 在选址规划中也需要更多地考量生态红线和自然保护地等国土空间规划和生物多样性因素([惠婧璇等, 2020](#)), 避免或减少光伏和风电对自然生态的影响。

认识到光伏和风电会对生态环境产生一定的影响, 《“十四五”可再生能源发展规划》中也提出“加强可再生能源开发生态环境保护关键技术研究。重点针对水电、风电等开发过程中对生态环境造成的影响, 开展水生生态、陆生生态影响基础研究及相关环境影响减缓技术研究”(<https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/P020220601502009073293.pdf>), 将生态影响的减缓技术作为可再生能源发展规划的一项重点工作。因此, 为了解目前相关研究进展, 本文综述了国内外集中式光伏和风电电场对环境因子、物种多样性和生态系统服务的影响研究, 针对研究中的不足提出了相关研究建议。根据现有文献资料梳理, 本文将光伏和风电电场的生态影响分为环境、物种多样性和生态系统服务三个方面。其中对环境的影响包括微气候、土壤和造成的环境污染; 在物种多样性方面主要概述了对植物、昆虫、鸟类、蝙蝠这几个主要类群及对其他动物的影响; 在生态系统服务方面概述了光伏和风电对生态系统服务的影响, 包括维持养分循环、固碳释氧、水土保持、调节气候等方面的影响。

1 集中式光伏电场生态影响

1.1 环境

集中式光伏电场的环境影响不可忽视, 本节从微气候、土壤和环境污染方面阐释了光伏电场对环境的影响。

1.1.1 微气候

集中式大型光伏电场对局地微气候有一定的影响, 主要体现在温度、湿度和风速上。多数研究发现, 光伏电场具有“热岛效应”, 电场局地温度普遍高于周围温度, 同时降低相对湿度。但温湿度的变化也随时间、季节、海拔和电场所处位置变化, 在干旱地区, 光伏电场则有明显的降温增湿效应([赵](#)

① 本文太阳能发电类型只讨论大型集中式光伏发电(photovoltaic, PV), 不考虑光热发电(concentrating solar power, CSP)。

鹏宇等, 2016; Wu et al, 2020; 郑隽卿等, 2023)。例如, 有研究表明, 青海共和光伏电站有日间增温和夜间降温现象^①; 英国威尔特郡的光伏电站夏季温度低于周围环境, 冬季则高于周围环境(Armstrong et al, 2016); 青海格尔木的光伏电站则是白天气温低于周围温度, 夜间气温高于周围环境(高晓清等, 2016)。此外, 光伏电场自身组件的性质、铺设方式和规模也会影响温度变化(郑隽卿等, 2023)。还有研究显示, 大型光伏设施的阻挡作用还会降低局地风速(王涛等, 2016; 常兆丰等, 2018; 王祯仪等, 2019), 从而影响光伏电场的微气候。

1.1.2 土壤

光伏设施的建设和安装常常需要较大规模的景观改造, 包括清除植被覆盖、土地平整、压实土壤和道路建设等, 这些改造会通过改变土壤水分和风速等增加土壤侵蚀和水土流失概率(Hernandez et al, 2014), 进而降低土壤过滤污染物的能力、增加河流泥沙负荷、减少地下水补给以及增加洪水发生的可能性等(Dhar et al, 2020)。在干旱区域植被覆盖的减少会显著增加沙尘, 在气候变化的影响下世界大部分干旱地区的干旱发生概率将会增多, 加剧风和沙尘排放(dust emissions)造成的土壤侵蚀(Hernandez et al, 2014)。土壤侵蚀导致的土壤资源可用性减少和土壤养分变化还会导致生物多样性的丧失, 并阻碍受到破坏的植被的恢复(Guerrero-Campo & Montserrat-Marti, 2004)。建设施工时大规模的土地平整使原有的生物土壤结皮被翻动, 土壤变得容易受到侵蚀, 对依赖土壤环境的动植物产生负面影响(Munson et al, 2011)。如果光伏电站位于斜坡上, 光伏板之间的通道的侵蚀现象则可能会加重(Battany & Grismer, 2000)。而在沙漠、戈壁和荒漠地区建设的光伏电场对土壤植被的扰动影响相对较小。

在运行期间, 光伏电站的绝热保温作用对浅层土的影响较大^②, 在干旱荒漠地区的光伏电站会产生保水增湿效应, 并且距离光伏区域越远土壤水分受到的影响越小, 土壤水分升高将有利于植被的生长(王颖等, 2021)。在青藏高原高寒荒漠草地, 光伏设施建成后能一定程度上增加局地土壤的保水保

肥性, 但也可能让土壤微生物群落变得脆弱(丁成翔和刘禹, 2021)。

1.1.3 环境污染

光伏电场在其建设、安装和运营期间, 环境污染问题不容忽视。光伏电场在施工过程中会产生不少建筑、设施、运输车辆和施工人员生活废弃物, 还会因为冲洗机械设备等产生废、污水及施工人员生活污水的排放, 对环境造成影响(靳绍鹏等, 2020; 赵彦军, 2020)。光伏电场运行过程中在某些情况下会使用除草剂来根除植被, 新建道路会进一步增加生物的死亡(Hamed & Alshare, 2021)。光伏设施运营和维护期间所需的化学物质(例如抑尘剂、防锈剂、防冻剂)和除草剂若不能妥善处理, 可能对生态系统造成污染, 污染水体并可能对当地和区域生物多样性产生长期的有害影响(Stoms et al, 2013; Hernandez et al, 2014)。光伏板的运维需要不定期地进行人工清洁, 使用洗涤剂清洗却往往缺乏废水收集处理装置, 导致土壤和水体的污染。据统计, 光伏电场每年约清洗15次, 清洗1 MW光伏需要5 t清水和230 kg的清洁剂(石杰等, 2022)。另外, 光伏电场还有其他环境问题。如在建设过程中, 运输车辆排放的尾气、施工阶段产生的扬尘会造成大气污染问题, 机械施工造成噪声污染, 光伏设施在运营阶段还可能引发电磁干扰, 同时集中式光伏电场的太阳能电池板会发生反射和折射现象, 引发光污染, 尽管这些影响通常较小(赵彦军, 2020; 杨松波, 2023)。光伏电场在全生命周期中都伴随着环境风险, 在服务期满后设施拆除施工也会带来固体废弃物、水、噪音等污染, 废旧的光伏电池组件以铅酸蓄电池为主, 若回收处理不当污染风险也较大。

1.2 物种多样性

1.2.1 植物

在光伏电场建设期间, 设施的运输、安装以及道路的施工都会对土地及其表土植被造成不同程度的破坏, 而多数研究表明光伏电站建成运行后由于电站微气候的变化, 有利于植被生长, 提高植被覆盖度。一般来说, 光伏电站内因为光伏板的遮蔽降低了板下的空气温度, 土壤水分蒸发量减小, 土壤水分得以保持, 且用水清洁光伏板也会增加湿度和土壤含水量, 使植被盖度、生物量和物种丰富度增高。尤其是对于干旱沙漠来说, 光伏板可以显著影响局地微

① 冶晓娟 (2023) 大型荒漠光伏开发对局地环境的影响——以共和光伏电站为例。硕士学位论文, 长江大学, 湖北荆州。

② 秦一凡 (2021) 大型荒漠光伏开发对局地微气候-土壤-植被的影响研究。硕士学位论文, 西安理工大学, 西安。

生境, 加快植被恢复进度和恢复质量(Liu et al, 2019), 但可能呈现碎片化(Uldrijan et al, 2022)。甘肃河西走廊的光伏电站研究证明光伏板的遮阴效应有利于保持土壤水分, 有利于自然植被恢复, 增加植物多样性、改变群落组成(尚雯等, 2020)。青海共和塔拉滩光伏电站建成后由于对地表的人为干扰减少, 加上电站内的微环境条件改善, 有利于植被自然恢复, 从而提高了研究区的植被覆盖度^①。在干旱半干旱区域, 光伏电站建设能降低电站内风速, 降低土壤pH值、提高土壤肥力, 使植物种类、物种多样性指数和生物量增加, 因此促进土壤、植被生态系统恢复^②。英国11个大型光伏电站的对照实验证明光伏电站建成后植物多样性的增加源于电站内的土壤-微气候改变, 光伏设施的建设会改变站内的微气候, 产生更多样化的微气候类型, 如有荫蔽和无荫蔽的环境、潮湿和干燥的环境; 而植物的多样性会使无脊椎动物(包括传粉性昆虫)更丰富, 进而增加鸟类物种的多样性(Montag et al, 2016)。因此, 由于土壤-植被-微气候的变化, 光伏发电场可能对提升栖息地质量有促进作用(Liu et al, 2019)。

但也有不同地点的研究显示光伏电站设施建成后会降低植物生物量和多样性。一项对英国草地生态系统光伏电站的调查显示, 由于光伏板的遮蔽, 板下温度和湿度都有所降低, 植物物种多样性和生物量均较低(Armstrong et al, 2016)。对内蒙古中部光伏电站的羊草(*Leymus chinensis*)群落研究显示光伏电站有效降低了板下的气温, 电板内外最大温差达到10.13℃, 并增加了大气湿度, 减少了板下土壤水分蒸发量, 改善了优势种羊草的营养生长状况, 进而降低了其他植物种的多样性^③。山西晋北地区荒漠化生态系统中的光伏电站建成后植被生物量显著下降, 但同一地区盐碱化土地上的光伏电站使植物生物量显著增加^④。光伏电场也可能降低栖息地质量, 例如在日本和韩国, 大中型光伏电站造成了大量半自然生境的丧失, 包括次生林/人工林、次生草地/人工草地和农业用地(Kim et al, 2021)。

① 秦一凡 (2021) 大型荒漠光伏开发对局地微气候-土壤-植被的影响研究. 硕士学位论文, 西安理工大学, 西安.

② 王涛 (2015) 光伏电站建设对靖边县土壤、植被的影响研究. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌.

③ 翟波 (2019) 光伏电站内羊草群落特征及其影响机制. 硕士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特.

④ 刘怡 (2020) 光伏电站对晋北两种典型退化生态系统的影响. 硕士学位论文, 山西财经大学, 太原.

1.2.2 昆虫

目前有研究表明光伏电场对昆虫会造成一定影响。由于偏振光是水生无脊椎动物在识别水体用作产卵地时使用的最重要的感官线索之一, 而深色的光伏板反射水平偏振光的比例高于水, 因此推测光伏板可能比水体对水生昆虫更有吸引力, 从而诱导其在生存可能性不大的地方产卵, 潜在影响水生无脊椎动物种群(Taylor, 2014)。蜉蝣目、毛翅目、双翅目长足虻科和虻科昆虫最容易被太阳能电池板吸引, 并且产卵次数多于在水上产卵的次数(Horváth et al, 2010)。

1.2.3 鸟类

光伏对鸟类的影响可以分成直接影响和间接影响两大类。直接影响指光伏设施在建设和运行期间直接影响鸟类活动或导致鸟类伤亡, 间接影响则是通过改变原有栖息地从而影响鸟类的生存和繁衍。研究普遍认为鸟类通过偏振光识别水体, 鸟类可能会因为光伏板反射的偏振光把太阳能板与水体混淆, 增加发生碰撞和烧伤的可能, 但这类事件的发生概率很低, 远低于其他人为原因造成的死亡率, 如车辆碰撞、建筑物碰撞和风能或化石燃料开发(Taylor, 2014)。而往往鸟类和光伏板发生碰撞后不致命, 鸟类在光伏电场死亡的主要原因是烧伤和撞击后形成创伤影响活动能力而造成被捕食(Kagan et al, 2014)。美国加利福尼亚州和内华达州光伏电场的一项研究显示, 每年因光伏设施死亡的鸟类约为2.49只/MW (Kosciuch et al, 2020)。也有研究证明光伏电站内一些小型雀形目鸟类的数量高于周边草地, 但体型较大的鸚科和猛禽的数量则低于周边草地, 因为光伏板提供了遮阳的地方以及栖息地, 增加了鸟类在光伏电站的活动, 而光伏设施的建设通常会造成周围土地裸露, 不适合猛禽捕食或筑巢(Devault et al, 2014)。

1.2.4 蝙蝠

蝙蝠通过回声定位会将任何延伸的、回声平滑的表面视为水体, 因此蝙蝠也同样会误以为横向排列的太阳能板是水源而发生碰撞(Greif & Siemers, 2010), 但目前缺乏直接针对光伏设施对蝙蝠影响的进一步研究(Taylor, 2014)。在英国进行的一项调查显示在光伏电场采取了一定的管理措施, 如混播草种、放牧、施用除草剂和肥料等, 光伏下的植被

多样性相比对照地块(光伏用地原有的用地类型)显著增多,使得无脊椎动物(如蝴蝶、胡蜂等)数量增多,鸟类数量从而增多,但蝙蝠数量显著减少(Montag et al, 2016)。

1.2.5 其他动物

光伏电场对其他动物物种,如有蹄类动物、两栖动物和爬行动物的影响大多是负面的(<https://kings-printer.alberta.ca/documents/Acts/E12.pdf>)。光伏电场及其周围区域由于工程建设和道路的拓展会进一步增加生物的死亡率,也更容易受到外来物种入侵,它们会与本地物种竞争,导致本地种的灭绝,并创造一个新的人工环境(Hernandez et al, 2014)。美国一项光伏环评报告显示,光伏电厂将严重影响和威胁沙漠地鼠龟(*Gopherus agassizii*),以及当地特殊的动植物物种生存(US-BLM, 2009)。相反,在美国San Joaquin沙漠,敏狐(*Vulpes macrotis*)则会利用光伏设施作为庇护所躲避捕食者,从而提高种群生存力(Cypher et al, 2021)。但现有针对光伏对大型哺乳动物的影响研究还较少。

集中式光伏发电场可以直接影响栖息地质量和物种迁徙路线,并可能导致栖息地损失和碎片化。如光伏电场及周围道路导致的生境破碎化可能使物种对特定区域敏感,造成物种迁徙障碍,增加了种群间基因交流中断的风险,导致敏感物种和濒危物种的减少甚至消失,威胁生物多样性,破坏生态系统平衡。大规模的输电线网建设也会产生长期和短期的生态影响,包括迫使野生动物迁移、植被覆盖减少和栖息地质量下降,其影响程度可能取决于前期土地利用类型、地形、场地的物理特征以及植被生产力和植被类型(Hernandez et al, 2014; Hamed & Alshare, 2021)。受干扰的栖息地的恢复需要较长的时间,但如果管理得当,光伏电场可以增加区域的物种数量,为濒危动植物创造新的栖息地,并利用边缘效应更好地修复土地(Nekola, 2012)。因为大规模光伏电场造成栖息地碎片化而受影响的物种有加拿大盘羊(*Ovis canadensis*)、鹿、乌龟等其他物种(Lovich & Ennen, 2011; Chock et al, 2021)。

输电线网络造成的生境破碎化可能会使入侵物种取代本地物种,对本地群落结构造成影响(Gelbard & Belnap, 2003)。虽然规模化的输电网络可能引入新的群落,促进形成新的生境类型,从而

产生更高的多样性,但本地种需要和外来入侵物种竞争,因此网络建设后的植被恢复阶段本地物种多样性往往较低,外来物种多样性则较高。

而光伏电场对物种死亡、栖息地丧失、动物迁移等影响很少单独发生,往往是伴随的(Taylor, 2014)。与化石能源相比,光伏发电方式对物种的迁移潜力虽有不利影响,但因为微气候的改变对当地栖息地质量却有正向促进作用(Turney & Fthenakis, 2011),从而使得集中式光伏电场对物种多样性和栖息地功能整体的影响并不清晰,有待更深入、系统地研究。气候变化还可能改变物种未来的分布和迁移廊道,但这种变化如何改变光伏对物种的影响还不确定(Hernandez et al, 2014)。

1.3 生态系统服务

光伏电站建成后当地生态系统的固碳释氧、维持土壤养分循环、水土保持、水源涵养、调节微气候及维持生物多样性等功能和文化服务均会发生一定的变化,且对不同生态系统影响不同。

集中式的可再生能源电场普遍规模较大,因此占地面积大、土地利用效率偏低,并且会和农业用地冲突(Hamed & Alshare, 2021)。土地覆盖面积发生大规模变化,进而会对土壤生态系统的功能造成影响。土壤生态系统服务包括支持植物生长、养分循环、物质过滤、土壤固碳等(程琨等, 2015)。针对美国各类型能源的调查显示(图1),每MW风能和光伏发电量的各种直接和间接土地需求总和,包含能源生产、加工、运输、传送以及储存废料过程中所需的土地总和,分别为70.6 ac和43.5 ac,远高于化石能源和核能(Stevens et al, 2017)。大型集中式光伏电场属于土地密集型产业,平均每MW发电容量(solar capacity of electricity generation)需要8.1 ac土地或每MW太阳能发电量(solar electricity produced) 31.4 ac(Ong, 2013)。但光伏系统在包括风能、水力发电和生物质能在内的可再生能源中,单位面积发电量最大,土地利用效率最高(Fthenakis & Kim, 2009)。光伏对土地的大面积利用会影响地表覆盖,改变土壤生态系统的功能,包括改变该区域的土壤碳储量、土地碳汇和初级生产力等。美国加州的多个大型集中式光伏项目位于灌丛和灌木林生态系统,导致产生375 km²的土地覆盖变化,28%的光伏设施位于农田和牧场,包括155 km²的土地利用变

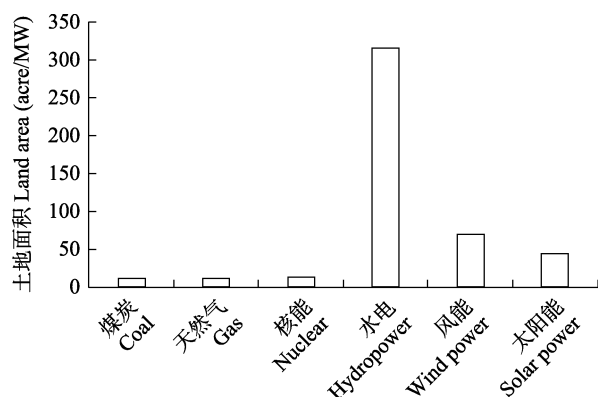


图1 不同类型能源生产、加工、运输及废弃物处理全过程所需土地面积。根据Stevens等(2017)重绘。

Fig. 1 The land area required for the entire process of energy production, processing, transportation, and waste disposal among different types of energy. Redrawn from Stevens et al (2017).

化(Hernandez et al, 2015)。但与其他能源系统相比, 光伏对土地利用变化的影响相对较小(Hernandez et al, 2014)。在美国西部的5个生态系统中, 开采石油和天然气会直接影响2,070万 ha的土地(占每个陆地生态系统的4.5%), 但土地受潜在干扰的总面积超过5,000万 ha (11.1%), 相比之下, 太阳能开发对土地覆盖变化的潜在影响仅为所有生态系统总和的1% (Copeland et al, 2011)。与化石能源相比, 利用太阳能发电不仅有利于减排, 还能替代传统薪柴, 减少森林和草原破坏, 替代传统生物质能源(秸秆、牲畜粪便等)并减少氮流失(Wang et al, 2012)。然而针对在不同生态系统中开发太阳能资源在影响养分循环和土地碳汇潜力等方面的研究还十分匮乏。

在水土保持方面, 光伏电站的建设过程, 包括清除植被和修建道路, 会造成不同程度的水土流失, 特别是在干旱或半干旱地区, 但和化石能源相比, 光伏电场在建设施工期间造成的土壤侵蚀较少(Turney & Fthenakis, 2011; 刘冬晓, 2020; Hamed & Alshare, 2021)。也有研究认为光伏电站站内风速小、风向较为单一, 具有挡风阻沙效应, 且光伏阵列能削弱近地表风速, 降低风蚀发生可能^①, 而光伏板及其下方的植被组成的复合系统可以有效地预防沙地生态系统的风蚀(Li et al, 2018), 减缓水土流失的发生。在沙漠、戈壁的光伏电场还

具有阻沙固沙、消减沙尘暴的生态功能, 研究显示甘肃河西走廊光伏电场的阻固流沙功能相当于相同面积固沙林的5倍以上和相同面积沙障的59倍(常兆丰等, 2018)。若配合人工治沙措施, 如沙网、沙障、在地表扎草方格等, 可实现防沙、治沙的功能。

从整体来看, 不同生态系统在光伏电场建设后的生态系统服务功能变化不一。山西晋北地区荒漠化和盐碱化两种土地类型上的光伏电站在调节气候和维持养分循环功能上均显著提高, 但就其整体生态系统服务而言, 荒漠化土地在光伏电站建成后下降, 盐碱化土地则有所提高^②。Hastik等(2015)对阿尔卑斯山光伏电场的生态系统服务功能进行了研究, 结果显示光伏电场在供给服务功能方面会和粮食生产竞争土地资源, 在调节服务功能方面由于光伏板的遮挡植物种群发生变化, 在文化服务功能方面人工元素对“原始”或“传统”景观会产生视觉影响。通过计算生态系统服务价值, 光伏板及其下方的植被复合生态系统服务价值可达电力效益价值的34.93%, 在防治荒漠化方面具有巨大潜力(Liu et al, 2020)。

2 集中式陆上风电电场生态影响研究进展

2.1 环境

陆上风电电场的建设和运营对不同环境因子会产生不同的影响, 本节重点讲述集中式风电电场对微气候、土壤的影响以及可能造成的环境污染问题。

2.1.1 微气候

集中式风电电场会影响局地的气候与气象条件。大型风电机组在运行过程中一方面会改变局地空气动力学, 影响边界层湍流和大气环流, 从而改变地表和近地层大气之间的水分交换, 改变当地水文气象, 另一方面风穿过风机叶片时大部分风的动能被风机转化为电能, 造成风机尾流效应, 影响降水、温度、风速等局部气候要素(蒋俊霞等, 2019; Dhar et al, 2020)。一项美国的遥感监测研究显示, 德克萨斯州风电场的建设使周围地表增温0.72℃(Zhou et al, 2012)。美国加州San Geronio Pass风电场的研究发现, 风电场下风区域的温度改变高达

① 石涛 (2021) 光伏电站芦苇沙障防风固沙效益研究. 硕士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特。

② 刘怡 (2020) 光伏电站对晋北两种典型退化生态系统的影响. 硕士学位论文, 山西财经大学, 太原。

4~8℃, 且下风区域12 km处的温度始终高于上风区域8 km处(Walsh-Thomas et al, 2012)。Tang等(2017)研究发现中国北方风力发电场有顺风增温效应, 王刚等(2021)^①对内蒙古典型草原风电场的研究发现风电场使大气出现显著的增温减湿效应。对内蒙古朱日和风电场的研究则发现, 风电场对附近240 m范围内的荒漠草原地表温度有显著降温趋势, 在其90 m范围内的蒸散发也显著减少。也有调查发现风电场对当地气候有改善作用, 如降低风速可以减轻沙尘暴灾害等(胡菊和王姝, 2018)。尽管如此, 风电场对气候的影响仅在局地层面, 对全球气候的平均影响很小(蒋俊霞等, 2019)。

2.1.2 土壤

风力发电场在施工时会改变电场内微气候, 对下垫面主要是表层土壤生态环境产生影响^②, 但并不会影响深层土壤养分含量(李智兰, 2015)。华北地区的一项研究报告称, 风电场通过影响大气环流, 抑制了土壤含水量, 并增强了水分胁迫(Tang et al, 2017)。与光伏电场类似, 建设阶段地基的挖掘工程、机械和风机的运输安装、道路铺设以及输电线的搭建都可能对土壤造成破坏, 干扰土壤生态平衡, 而这些破坏会像蝴蝶效应一样导致微气候的变化, 引起局部土壤侵蚀, 风电场运行期间土壤水分的减少还会进一步加重水土流失, 进而影响整个生态系统, 需要很长时间去恢复(Dhar et al, 2020; Sayed et al, 2020)。

2.1.3 环境污染

风电场在建设和运营阶段对环境的影响包括产生废水、污水、固体废弃物、噪声、大气污染物等, 造成不同程度的环境污染。风电场建设时期大量挖掘施工以及废弃砂石、水泥料等施工材料往往会形成大量废弃物, 在施工过程中也会因为机械施工、平整场地、道路修建和车辆运输等造成噪声污染, 运营期间风电机组的运转也会产生噪声(Poulsen et al, 2018; 杜文静和关佳杰, 2019)。混凝土搅拌机冲洗产生的废水、砂石料加工废水及运输车辆和施工设备的冲洗废水是风电场主要的废水来源(吴建国等, 2023)。有研究表示风电场建设施工

现场的废水和油液会渗入地下土壤, 造成严重的环境污染, 威胁周围水体水质, 危害生态系统健康(Nazir et al, 2020)。风电场施工期的场地平整、土地挖填、道路修建等工作会产生扬尘, 施工器械和运输车辆也会产生尾气, 大型风电场的尾流效应还会影响当地大气边界层, 从而影响大气污染物的传输(王强等, 2019)。此外, 风电运营阶段还具有电磁辐射的环境风险, 虽然并未有证据证明风电场电磁辐射会影响健康, 但会影响周围的广播信号等, 而风电场的光影视觉影响则会为周围居民和野生动物带来安全隐患(Dhar et al, 2020)。风电场的环境影响贯穿整个风电项目的全生命周期, 风电机组的退役也同样面临着施工带来的噪声、水、大气和固废污染问题(Hall et al, 2020; 吴建国等, 2023)。但目前关于风电场建设和运行造成环境污染从而影响生态系统功能的调查研究还不足。

2.2 物种多样性

2.2.1 植物

大型集中式风力发电场在建设过程中的工程措施会使植被遭到破坏, 还会引起大气环流扰动, 改变局地微气候, 影响周边区域植被和土壤, 降低植被生长各指标和土壤养分(李智兰, 2015)。华北地区风电场运行期间土壤含水量普遍下降, 直接导致风电场区初级生产总值降低8.9%, 年度初级净产量降低4.0%(Tang et al, 2017)。在内蒙古锡林郭勒盟灰腾梁风电场, 受风电建设扰动的区域其植物群落物种多样性及均匀度均低于对照区域^③。福建安溪龙门风电场项目的环境影响评价也显示项目会对场区地表植被造成破坏, 导致植被面积和生物量减少, 在施工期还需要临时占用部分生态公益林, 造成一定的生态影响(陈志强, 2017)。风能设施的建设和维护还会通过清除植被、破坏土壤和潜在的土壤侵蚀来改变生态系统结构, 森林砍伐等会造成生境破碎化和栖息地丧失, 影响物种的生存和繁衍(Laffta, 2014; Nazir et al, 2020)。对山西北部一风电场的研究表明风电场的施工建设改变了原有草灌生态系统的结构, 影响范围达到两侧100 m范围, 影响周围区域发挥栖息地功能(赵珍伟, 2021)。但也有研究显示风电场可能促进植被生长, Li等(2018)研究证

① 王刚 (2021) 风电场对内蒙古典型草原近地面大气及土壤温湿度的影响研究. 硕士学位论文, 鲁东大学, 山东烟台.

② 赵雪杉 (2018) 风电场地土壤养分及植被变化研究. 硕士学位论文, 河北农业大学, 河北保定.

③ 张爽爽 (2012) 风电场建设对生态环境影响的研究——以锡林郭勒盟灰腾梁风电场为例. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.

明撒哈拉沙漠大型光伏和风电场可共同提升局地气温, 增加降雨量和植被覆盖度。

2.2.2 鸟类

风电场对鸟类的直接影响是鸟与风力发电机碰撞造成的死亡。导致鸟类与风机碰撞的因素有: 风力发电塔发光会吸引鸟类; 恶劣天气条件下鸟类容易迷路且飞行高度较低, 增加碰撞发生几率; 老式、较低的风力发电塔的高度会吸引鸟类筑巢, 增加死亡率, 但较高的风力发电塔并不构成威胁(Josimović & Pucar, 2010; Santos et al, 2010; Sayed et al, 2020)。对英国数十个风电场(Pearce-Higgins et al, 2012)的研究发现, 在施工阶段柳雷鸟苏格兰亚种(*Lagopus lagopus scoticus*)、扇尾沙锥(*Gallinago gallinago*)和白腰杓鹬(*Numenius arquata*)密度有所下降, 但施工后有两个物种的密度未能恢复, 说明风电场在施工阶段也会对部分鸟类造成不可逆的影响。据统计, 鸟类的死亡率在每年每风机0.02只至7.36只之间(Wang et al, 2015), 但与化石燃料相比, 风机杀死的鸟类至少要少95% (Sovacool, 2009)。还有研究认为鸟类可以快速适应风机(Hau & Renouard, 2006)。输电线若设计不当也会使濒危猛禽等鸟类面临触电死亡的威胁(Bennun et al, 2021)。

因碰撞而发生的鸟类死亡也因物种差异而不同, 风电场会对雀形目和草原松鸡(*Tympanuchus cupido*)等鸟类造成不同程度的死亡, 小型雀形目鸟类是风电场致死的主要种类, 但对种群影响小(AWWI, 2017), 体型较大、快速飞行和迁徙的物种种群受风力发电场的影响更大(朱永可等, 2016; Gasparatos et al, 2017)。猛禽类由于飞行高度、路线和觅食更容易受到风电场的影响, 且部分物种寿命长、繁殖率低, 因此猛禽类种群更易受到撞击死亡的影响(Wang et al, 2015)。候鸟迁徙区域与风能资源丰富的区域有地理重叠, 风力发电场建设可能对候鸟迁徙等产生影响, 但实际发生撞击较少(张建华等, 2017)。德国的一项调查(Hötter et al, 2006)显示, 风力发电场对涉禽和猎禽的负面影响较大, 但对湿地苇莺(*Acrocephalus palustris*)和芦鹀(*Emberiza schoeniclus*)这些体型较小的鸟类来说, 风电场的影响不大。风电场对雁类的影响较大, 包括豆雁(*Anser fabalis*)、白额雁(*A. albifrons*)、灰雁(*A. anser*)和白颊黑雁(*Branta leucopsis*)以及麦鸡属

(*Vanellus*)鸟类、赤颈鸭(*Mareca penelope*)和欧金鸻(*Pluvialis apricaria*), 因为它们翅膀较大, 更易与风机发生碰撞。还有一些鸟类因为风电场的建设而迁移至其他更适宜栖息的地区, 导致风电场内的鸟类密度和多样性下降(宋宁宁, 2022)。不同地区风电场对当地鸟类物种的影响汇总见附录1。

鸟类在繁殖期和非繁殖期受风电场的影响也不同, 通常风电场对繁殖期鸟类的影响小, 而对非繁殖期鸟类的影响大。在非繁殖期, 常常能观察到鸟类与风力发电场保持较远的距离, 尤其是野外栖息需要开阔栖息地的鸟类, 如雁、鸭和部分涉禽, 但猛禽类、椋鸟科、鸦属(*Corvus*)鸟类、苍鹭(*Ardea cinerea*)、蛎鹬(*Haematopus ostralegus*)和海鸥就经常在风力发电场附近或内部被观察到, 较为敏感的物种一般栖息在距离风电场至少400–500 m的地方(Hötter et al, 2006)。在广西兴安片区风电场对秋季鸟类多样性的调查显示, 距风机700 m以外的区域鸟类丰富度最高, 数量明显增加, 而在700 m范围内的鸟类数量变化不明显(黄勇杰等, 2022)。在上海崇明北湖风电场, 风电场内的喜鹊密度和总巢密度显著低于风电场外的对照区域, 推测是由于风机所带来的涡流和风力导致距离较近的鸟巢位置高度较低且损毁率增加造成的(宋宁宁, 2022)。

风力发电场建在山脊上或地形变化大的地方(例如高原地带的边缘), 会造成很高的伤亡率, 特别是猛禽类(徐晓羽和肖懿芝, 2021); 湿地区域的风力发电场的伤亡率也特别高, 湿地或山脊上每台风力发电机的碰撞率约为每年两只(Hötter et al, 2006)。有研究预测鸟类在飞过风电场时被杀死的风险是0.01%–0.02% (Winkelman, 1994)。而在越冬候鸟丰富的长江三角洲海岸带江苏沿岸河口区域, 雁鸭类的分布与风电场有重叠, 受风电场影响显著, 因此在风电选址规划时要避开水鸟关键栖息地及周边0–300 m缓冲区(赵闪闪, 2022)。

但对种群来说, 风能造成的死亡与自然死亡不同, 风机不具有选择性, 不仅是适应能力差的个体会被杀死, 而且对种群发展具有潜在重要性的个体也会被杀死(Hötter et al, 2006)。尽管风电场造成的鸟类死亡率不高, 然而对一些生长速度慢、繁殖率低的物种而言, 风电场造成的个体死亡会对种群数量有显著的影响(朱永可等, 2016)。

风电场对鸟类的间接影响包括栖息地破坏和形成地理屏障阻碍迁徙。由于鸟类易与风机发生碰撞,周围区域也不适宜鸟类生存,因此造成风电场周围的栖息地功能性丧失(Marques et al, 2020)。鸟类迁徙时需要的通道一般较为宽阔,风力发电机和相关基础设施占地面积较大,加上风力发电塔建设、道路施工等会加剧生境破碎化,为鸟类等动物进入风电场区域的栖息地觅食等行为造成障碍,干扰鸟类的迁徙路线,栖息地连通性变差,影响应有的生物廊道功能(Dhar et al, 2020),并导致鸟类在寻找觅食、越冬、繁殖和换毛期的栖息地时产生额外的飞行,消耗更多的能量,也会造成鸟类的死亡,可能增加鹤科鸟类、秃鹫(*Aegypius monachus*)、大鸨(*Otis tarda*)和很多迁徙物种等弱势种群的死亡率(Drewitt & Langston, 2006; Bennun et al, 2021)。风电场的光源也是影响鸟类迁徙安全的重要因素,尤其是夜间迁徙鸟类(Poot et al, 2008)。

2.2.3 蝙蝠

不少研究证实风力发电设施会造成蝙蝠的大量死亡(Kunz et al, 2007),尤其是常常在开阔地带觅食的蝙蝠(Bennun et al, 2021),这是由于蝙蝠会被风机产生的电磁场辐射吸引从而造成撞击死亡(Sayed et al, 2020)。还有调查显示,靠近林地的风机比在开阔地带的风机对蝙蝠的危害更大,在夏末和秋天时蝙蝠被杀死的几率更高(Hötter et al, 2006)。目前已有不少研究调查风电场对不同种类蝙蝠的影响,如风机造成西班牙南部的宽耳犬吻蝠(*Tadarida insignis*)死亡数量呈现增长的趋势,欧洲南部蝙蝠与风机碰撞发生死亡的主要种类为伏翼属(*Pipistrelus*)、棕蝠属(*Eptesicus*)和山蝠属(*Nyctalus*) (Muñoz & Farfán, 2020; Salguero et al, 2023)。

2.2.4 其他动物

风电场对动物的影响主要体现在鸟类、蝙蝠等飞行类动物上,但对其他哺乳动物也会有不同程度的影响,尽管相关研究还不多。在风力发电场建设后,部分栖息地被破坏,阻碍了部分野生动物的移动。德国有研究证明风电场建设后鹿和野兔的活动减少了,但一些小型哺乳动物数量有所增加,如草原犬鼠属(*Cynomys* spp.)、棉尾兔属(*Sylvilagus* spp.)、白尾兔(*Lepus townsendii*) (Hötter et al, 2006)。在波兰西南部,食草哺乳动物,如西方狍(*Capreolus*

capreolus)和欧洲野兔(*Lepus europaeus*)会避免靠近风机和避免进入风电场内部,而雉鸡(*Phasianus colchicus*)则相反,对靠近风机表现积极,赤狐(*Vulpes vulpes*)对风机的反应则较为中性(Bopucki et al, 2017)。

风电项目易将完整的生境切割成破碎的景观单元,损害生态系统完整性,而对此类设施和人类活动敏感的野生动植物会改变觅食和迁徙路径,以避免风机,证明风电电场对物种栖息和迁徙等生态过程有一定的阻碍,阻碍生境之间的交流廊道(艾婧文等, 2023)。在印度,印度羚(*Antelope cervicapra*)、印度瞪羚(*Gazella bennettii*)、亚洲胡狼(*Canis aureus*)和丛林猫(*Felis chaus*)会主动避开风电场占主导地位的栖息地,从而使风电场改变了这些动物的种群分布格局和对原有栖息地的利用(Kumara et al, 2022)。风力发电场会改变驯鹿(*Rangifer tarandus*)的迁徙廊道,驯鹿也会选择回避风电场作为其栖息地和产犊地点(Skarin et al, 2015, 2018)。

2.3 生态系统服务

风电场对生态系统服务也有一定的影响。集中式风力发电场往往会在较大的区域范围内改变景观和土地利用类型,进而影响土地及生态系统的结构和功能(吴建国等, 2023),风电场的施工建设也会对作为物种栖息地和迁移通道的当地生态系统的功能产生一定的影响。集中式风力发电场通常占地面积大。大型风力设施每MW发电量(output capacity)所需面积在24.7–123.6 ac之间(Denholm et al, 2009),平均用地面积是60 ac/MW (<https://www.renewableenergyworld.com/baseload/bioenergy/environmental-footprints-of-renewable-energy-vs-nuclear-46546/#gref>)。但大部分的面积是风机之间必须的间距和道路,永久受干扰的土地不到1 ac,临时受干扰的土地(建设期和其他临时占用土地等)只有3.5 ac (Stevens et al, 2017)。在风电设施建设阶段,可能会通过森林砍伐等手段来清除地表植被,使该地块变为工业用地,改变其原有土地可提供的生态系统服务。另外,风电场占用较大面积的土地,在施工建设完成后,占用的部分土地变成了建筑物或地表被硬化,使土地失去了原有土壤生态系统的结构和功能,影响其发挥支持植物生长、土壤固碳、物质过滤等功能,相关风电场对土地碳汇潜力及其他生态系统服务的

影响还缺乏研究。

而对于生态系统的水土保持功能来说,研究普遍认为风电场建设阶段的工程措施会破坏土壤生态平衡,导致微气候变化并引发土壤侵蚀现象,加重水土流失,影响生态系统功能(Dhar et al, 2020)。辽西地区是辽宁省风能资源比较丰富的地区之一,但区域水土流失严重、生态环境较为脆弱,发展风力发电项目对生态环境影响较大,加剧水土流失现象^①。还有研究表明风电场可以减少沙尘暴的发生(Sharifian, 2015)。阿尔卑斯山区的调查结果表明风电场会破坏鸟类和蝙蝠的栖息地,干扰它们的飞行路线,影响生态系统调节服务功能,而在文化服务功能方面,风能开发所用的人工技术元素对“原始”或“传统”景观则会产生视觉影响(Hastik et al, 2015)。

3 总结与展望

目前针对大型集中式光伏和风电电场生态影响的研究涉及的角度较多,包含有各类环境、物种多样性和生态系统服务的影响研究(附录2)。其中光伏的生态影响主要体现在对微气候、土壤、植被和栖息地质量的改变,尤其是在较为干旱的地区,光伏设施在运行期间能起到降温增湿的作用,促进植被的生长与恢复,进而增加其他昆虫、鸟类的数量,在荒漠地区可以发挥防风固沙的生态作用。主要影响概括如下:(1)在环境方面,集中式光伏电场的建设施工导致土壤侵蚀和水土流失,带来废弃物、废水等污染。光伏电场在运营阶段会改变局地温度、湿度和风速,可能涉及化学物质的使用导致环境污染。(2)在生物多样性方面,光伏设施的建设会破坏植被,在干旱半干旱区,光伏电场运行期间则会促进植被生长;对鸟类和蝙蝠的影响以碰撞死亡为主,但也有可能因植被的增多而促使昆虫和鸟类增多;光伏电场对有蹄类动物、两栖动物、爬行动物和无脊椎动物大多是负面影响;大规模的光伏电场还会导致生境破碎化,使栖息地质量下降,影响物种迁徙。(3)在生态系统功能方面,光伏电场会改变土地利用和土地碳汇,在运行期有降低风蚀、减缓水土流失的可能,并使得不同的生态系统服务发生变化,包括固碳释氧、水源涵养、维持土壤养分循环、水

土保持、调节微气候和文化价值等。

风电电场的生态影响主要体现在对土壤植被的扰动、造成鸟类碰撞死亡和栖息地破碎化,影响物种迁徙。主要影响概括如下:(1)在环境方面,风电设施在建设施工阶段会引起局部土壤侵蚀,带来固体废弃物、废水、污水、噪音等污染。风电场在运行期间会改变局地温度、降水和风速,加重水土流失,并产生噪音、电磁干扰等。(2)在生物多样性方面,风电电场的施工建设会破坏植被,降低植物物种多样性;针对鸟类而言,风电电场的影响主要是碰撞造成的死亡,以小型雀形目鸟类为主,对体型较大的涉禽、猎禽、雁形目鸟类的影响也较大,对一些寿命长、繁殖率低的物种来说,单一个体的死亡对种群的影响较大;风电电场占地面积广,造成生境破碎化,影响栖息地的功能,还会形成地理屏障阻碍候鸟等的迁徙。(3)在生态系统功能方面,风电电场会改变土地利用,影响土地碳汇,在建设期引发的土壤侵蚀会影响水土保持功能,改变生态系统调节和文化服务功能。

3.1 研究不足

综合来看,目前光伏和风电电场生态影响的研究还不够深入且不成体系,缺乏系统性的关于生态影响机制和生态系统响应的研究。

关于生态影响机制,缺乏针对同一地点光伏电场和风电场建设前后对比的野外调查和分析,而在有限的对比研究中,一些外部因素如气候变化、城镇扩张等会影响调研结果,增加此类研究的不确定性。具体来说,缺乏对国内不同物种(尤其是保护物种)的行为变化、种群动态和适应性的定量研究,缺乏深入了解光伏风电对物种繁殖、迁徙等的影响。在调查方法上,现阶段对于鸟类死亡现象的研究也存在一些问题,在测量鸟类死亡率时,鸟类尸体有可能在研究人员到来之前就被清理或移走了,因此在死亡率测量上存在较大的不确定性(Wang et al, 2015),还需改进调查方法,增加长期监测手段。

在生态系统方面,集中式光伏风电电场对生态系统整体的影响并不清晰,有待更深入、系统地研究。目前缺乏各地区不同生态系统类型中光伏、风电电场生态影响的广泛样本调查,缺乏针对特定区域各个方面生态影响的深入研究以增进对特定区域或生态系统类型中光伏、风电开发的认识,制定

① 王晓文 (2017) 辽西地区风电场生态环境影响分析与可持续发展模式研究. 硕士学位论文, 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新.

针对性的减缓措施。不同生态系统中光伏、风电电场建设后对土地碳汇潜力、生态系统服务价值的影响研究也较为匮乏。

3.2 展望

集中式光伏、风电电场的生态影响还需要更多的关注和进一步研究, 包括: (1)增加针对不同生态系统类型的研究, 系统地比较光伏和风电对不同生态系统的短期和长期影响, 可以更好地确定可再生能源的优先开发区域。(2)完善、统一调查方法, 运用先进的生态环境调查技术对多个光伏和风电电场开展野外观测和模型研究, 系统、深入调查光伏和风电电场在物种和生态系统水平上的影响, 从而完善对光伏和风电生态环境影响的综合认识, 进而制定规避、减缓和补偿生态影响的策略。(3)生态系统服务价值可以较好地体现可再生能源开发后的生态系统功能变化和生态效益, 因此加强电场建设前后生态系统服务价值核算研究, 也可以有效评估生态影响。(4)除完善对生态影响的研究、提升研究水平外, 光伏、风电项目在规划初期就应关注和开展区域生态本底的调查, 进行标准化研究与生物多样性评估。土地开发利用应详细划定社区、生物、水、设计和施工过程等在全生命周期的土地利用规定, 减少对土地和生物多样性的干扰(Sinha et al, 2018)。在项目施工建设前后搜集物种调查数据, 进行长期物种和生态监测, 增加实验研究调查对野生动物的影响, 提高认识(Conkling et al, 2021)。在建设前预估项目的潜在生态影响, 在建设后科学评估实际开发对生态环境的影响, 并探索实际与预测的差异、影响的因果机制, 以及减少风险产生的缓解和恢复措施(Laffa, 2014)。此外, 一般光伏和风电场的预期运行寿命为20–30年, 电场设施退役后的土地复垦和生态恢复问题也值得关注(Dhar et al, 2020)。

期望未来在更加全面且深入的实地调查和研究基础上, 关注并针对不利的生态影响制定不同的减缓策略与方法, 开发选址工具以选择适宜开发太阳能和风能的区域开展可再生能源项目, 减少可再生能源对生态的影响, 从而在更高维度上共同助力于气候变化减缓与适应以及全球生物多样性保护。

致谢: 感谢3位匿名审稿人, 他们极具建设性的意见极大地提高了本文的质量。

ORCID

彭昀月  <https://orcid.org/0009-0006-5572-4518>

罗永梅  <https://orcid.org/0009-0007-9604-2385>

靳彤  <https://orcid.org/0000-0003-2521-0381>

参考文献

- Ai JW, Yu KY, Huang RX, Geng JW, Xie Z, Liu J (2023) The impact of wind power projects on potential ecological corridors based on the MSPA-MCR Model. *Acta Ecologica Sinica*, 43, 3665–3676. (in Chinese with English abstract) [艾婧文, 余坤勇, 黄茹鲜, 耿建伟, 谢祯, 刘健 (2023) 基于MSPA-MCR模型的风电项目对潜在生态廊道影响研究. *生态学报*, 43, 3665–3676.]
- Allison TD, Cochrane JF, Lonsdorf E, Sanders-Reed C (2017) A review of options for mitigating take of golden eagles at wind energy facilities. *Journal of Raptor Research*, 51, 319–333.
- Armstrong A, Ostle NJ, Whitaker J (2016) Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 7, 74016.
- AWWI (American Wind and Wildlife Institute) (2017) Wind Turbine Interactions with Wildlife and Their Habitats: A Summary of Research Results and Priority Questions. <https://rewi.org/wp-content/uploads/2017/07/AWWI-Wind-Wildlife-Interactions-Summary-June-2017.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Battany MC, Grismer ME (2000) Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: Effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes*, 14, 1289–1304.
- Bennun L, Bochove JV, Ng C, Fletcher C, Carbone G (2021) Mitigating Biodiversity Impacts Associated with Solar and Wind Energy Development: Guidelines for Project Developers. IUCN, Gland & The Biodiversity Consultancy, Cambridge. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2021-004-En.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Bopucki R, Klich D, Gielarek S (2017) Do terrestrial animals avoid areas close to turbines in functioning wind farms in agricultural landscapes? *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1–11.
- Chang ZF, Wang Q, Liu SZ, Wang FL, Liu SJ, Wang F, Sun T, Zhan KJ (2018) Preliminary study on the effect of desert Gobi photovoltaic farms on sand consolidation—A case study of Gansu Hexi Corridor. *Soil and Water Conservation in China*, (8), 18–22. (in Chinese) [常兆丰, 王祺, 刘世增, 王芳琳, 刘淑娟, 王飞, 孙涛, 詹科杰 (2018) 沙漠戈壁光伏电场固沙效应初步研究——以甘肃河西走廊为例. *中国水土保持*, (8), 18–22.]
- Chen ZQ (2017) Eco-environmental impact in EIA of wind power generation project. *Journal of Environment & Development*, 29(6), 27, 29. (in Chinese with English

- abstract) [陈志强 (2017) 风力发电项目环评中的生态环境影响. 环境与发展, 29(6), 27, 29.]
- Cheng K, Yue Q, Xu XR, Yan M, Pan GX (2015) Characterizing and quantifying soil resilience for ecosystem services. *Scientia Agricultura Sinica*, 48, 4621–4629. (in Chinese with English abstract) [程琨, 岳骞, 徐向瑞, 闫明, 潘根兴 (2015) 土壤生态系统服务功能表征与计量. 中国农业科学, 48, 4621–4629.]
- Chock RY, Clucas B, Peterson EK, Blackwell BF, Blumstein DT, Church K, Fernández-Juricic E, Francescoli G, Greggor AL, Kemp P (2021) Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. *Conservation Science and Practice*, 3, e319.
- Conkling T, Loss S, Diffendorfer J, Duerr A, Katzner T (2021) Limitations, lack of standardization, and recommended best practices in studies of renewable energy effects on birds and bats. *Conservation Biology*, 35, 64–76.
- Copeland HE, Pocewicz A, Kiesecker JM (2011) Geography of energy development in Western North America: Potential impacts on terrestrial ecosystems. In: *Energy Development and Wildlife Conservation in Western North America* (ed. Naugle DE), pp. 7–22. Island Press, Washington, DC.
- Cypher BL, Boroski BB, Burton RK, Meade DE, Phillips SE, Leitner P, Kelly EC, Westall TL, Dart J (2021) Photovoltaic solar farms in California: Can we have renewable electricity and our species, too? *California Fish and Wildlife*, 107, 231–248.
- Dahl EL, May R, Hoel PL, Bevanger K, Pedersen HC, Røskoft E, Stokke BG (2013) White-tailed eagles (*Haliaeetus albicilla*) at the Smøla wind-power plant, Central Norway, lack behavioral flight responses to wind turbines. *Wildlife Society Bulletin*, 37, 66–74.
- De Lucas M, Ferrer M, Bechard MJ, Muñoz AR (2012) Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biological Conservation*, 147, 184–189.
- Denholm P, Hand M, Jackson M, Ong S (2009) Land Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States. National Renewable Energy Laboratory, Golden. <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45834.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Devault T, Seamans T, Schmidt J, Belant J, Blackwell B, Mooers N, Tyson L, Pelt L (2014) Bird use of solar photovoltaic installations at US airports: Implications for aviation safety. *Landscape and Urban Planning*, 122, 122–128.
- Dhar A, Naeth M, Jennings P, El-Din M (2020) Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. *Science of the Total Environment*, 718, 134602.
- Ding CX, Liu Y (2021) Impact of photovoltaic park construction on soil prokaryotic microbial communities in alpine desert grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 29, 1061–1069. (in Chinese with English abstract) [丁成翔, 刘禹 (2021) 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. 草地学报, 29, 1061–1069.]
- Drewitt A, Langston R (2006) Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, 148, 29–42.
- Du WJ, Guan JJ (2019) Environmental impact and countermeasures of wind power construction in Yunnan. *Environmental Science Survey*, 38, 79–81. (in Chinese with English abstract) [杜文静, 关佳杰 (2019) 云南省风电建设项目对环境的影响及对策措施. 环境科学导刊, 38, 79–81.]
- Everaert J (2003) Windturbines en vogels in Vlaanderen: Voorlopige onderzoeksresultaten en aanbevelingen. *Natuur Oriolus*, 69, 145–155.
- Fthenakis V, Kim HC (2009) Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1465–1474.
- Gamboa G, Munda G (2007) The problem of windfarm location: A social multi-criteria evaluation framework. *Energy Policy*, 35, 1564–1583.
- Gao XQ, Yang LW, Lü F, Ma LY, Li HL, Hui XY, Hou XH (2016) Observational study on the impact of the large solar farm on air temperature and humidity in desert areas of Golmud. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 37, 2909–2915. (in Chinese with English abstract) [高晓清, 杨丽薇, 吕芳, 马丽云, 李海玲, 惠小英, 侯旭宏 (2016) 光伏电站对格尔木荒漠地区空气温湿度影响的观测研究. 太阳能学报, 37, 2909–2915.]
- Gasparatos A, Doll C, Esteban M, Ahmed A, Olang T (2017) Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a green economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161–184.
- Gelbard J, Belnap J (2003) Roads as conduits for exotic plant invasions in a semiarid landscape. *Conservation Biology*, 17, 420–432.
- Greif S, Siemers B (2010) Innate recognition of water bodies in echolocating bats. *Nature Communications*, 1, 107.
- Grodsky SM, Jennelle CS, Drake D (2013) Bird mortality at a wind-energy facility near a wetland of international importance. *The Condor*, 115, 700–711.
- Guerrero-Campo J, Montserrat-Marti G (2004) Comparison of floristic changes on vegetation affected by different levels of soil erosion in Miocene clays and Eocene marls from Northeast Spain. *Plant Ecology*, 173, 83–93.
- Hall R, João E, Knapp CW (2020) Environmental impacts of decommissioning: Onshore versus offshore wind farms. *Environmental Impact Assessment Review*, 83, 106404.
- Hamed TA, Alshare A (2021) Environmental impact of solar and wind energy—A review. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10, 1090387.
- Hastik R, Basso S, Geitner C, Haida C, Poljanec A, Portaccio

- A, Vrščaj B, Walzer C (2015) Renewable energies and ecosystem service impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 608–623.
- Hau E, Renouard H (2006) *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd edn. Springer, Berlin.
- Hernandez R, Easter S, Murphy-Mariscal M, Maestre F, Tavassoli M, Allen EB, Barrows C, Belnap J, Ochoa-Hueso R, Ravi S, Allen M (2014) Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779.
- Hernandez RR, Hoffacker MK, Murphy-Mariscal ML, Wu GC, Allen MF (2015) Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112, 13579–13584.
- Horváth G, Blahó M, Egri Á, Kriska G, Seres I, Robertson B (2010) Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology*, 24, 1644–1653.
- Hötter H, Thomsen K, Jeromin H (2006) Impacts on Biodiversity of Exploitation of Renewable Energy Sources: The Example of Birds and Bats. *Nature and Biodiversity Conservation Union (NABU), Bergenhusen*. https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/englischewindkraftstudie_1252510701.pdf. (accessed on 2024-02-11)
- Hu J, Wang S (2018) Impact of large-scale wind power base located in Gansu Jiuquan on regional climate. *Global Energy Interconnection*, 1(2), 120–128. (in Chinese with English abstract) [胡菊, 王姝 (2018) 甘肃酒泉大型风电基地对区域气候的影响研究. *全球能源互联网*, 1(2), 120–128.]
- Huang YJ, Zhao YY, Wen YG, Sun DJ, Gao H, Liang J, Zhu J, Zhou XG (2022) Birds diversity and their influence by wind turbines in autumn at Xing'an area wind farms, Xing'an County, Guangxi. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 38, 304–310. (in Chinese with English abstract) [黄勇杰, 赵岩岩, 温远光, 孙冬婧, 高惠, 梁佳, 朱健, 周晓果 (2022) 广西兴安县兴安片区风电场秋季鸟类多样性及其受风机的影响. *广西科学院学报*, 38, 304–310.]
- Hui JX, Han X, Cui C, Luo YM (2020) Eco-friendly onshore wind power development policy recommendations. *Electric Power Equipment Management*, (9), 27–28, 37. (in Chinese) [惠婧璇, 韩雪, 崔成, 罗永梅 (2020) 生态友好的陆上风电发展政策建议. *电力设备管理*, (9), 27–28, 37.]
- Hunt WG (2001) Continuing studies of golden eagles at Altamont Pass. In: *Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV*, p. 15, Carmel.
- Hunt WG, Jackman RE, Hunt TL, Driscoll DE, Culp L (1999) A Population Study of Golden Eagles in the Altamont Pass Wind Resource Area: Population Trend Analysis, 1994–1997. National Renewable Energy Laboratory, Golden & Predatory Bird Research Group, University of California, Santa Cruz. <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/26092.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Jiang JX, Yang LW, Li ZC, Gao XQ (2019) Progress in the research on the impact of wind farms on climate and environment. *Advances in Earth Science*, 34, 1038–1049. (in Chinese with English abstract) [蒋俊霞, 杨丽薇, 李振朝, 高晓清 (2019) 风电场对气候环境的影响研究进展. *地球科学进展*, 34, 1038–1049.]
- Jin SP, Chen ZQ, Zhao L, Guo J, Hou YJ (2020) Analysis on prevention and control of ecological environment impact of photovoltaic power generation construction projects. *Energy and Energy Conservation*, (11), 59–60, 106. (in Chinese with English abstract) [靳绍鹏, 陈智清, 赵龙, 国洁, 侯永江 (2020) 光伏发电建设项目生态环境影响防控分析. *能源与节能*, (11), 59–60, 106.]
- Josimović B, Pucar M (2010) The strategic environmental impact assessment of electric wind energy plants: Case study 'Bavanište' (Serbia). *Renewable Energy*, 35, 1509–1519.
- Kagan RA, Viner TC, Trail PW, Espinoza EO (2014) Avian Mortality at Solar Energy Facilities in Southern California: A Preliminary Analysis. National Fish and Wildlife Forensics Laboratory, Ashland, Oregon. <https://usiraq.procon.org/sourcefiles/avian-mortality-solar-energy-ivanpah-apr-2014.PDF>. (accessed on 2024-02-11)
- Kim JY, Koide D, Ishihama F, Kadoya T, Nishihiro J (2021) Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats. *Science of the Total Environment*, 779, 146475.
- Kitano M, Smallwood KS, Fukaya K (2023) Bird carcass detection from integrated trials at multiple wind farms. *The Journal of Wildlife Management*, 87, e22326.
- Kosciuch K, Riser-Espinoza D, Gerringer M, Erickson W (2020) A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S. *PLoS ONE*, 15, e232034.
- Kruckenbergh H, Jaene J (1999) Zum Einfluss eines Windparks auf die Verteilung weidender Bläßgänse im Rheiderland (Landkreis Leer, Niedersachsen). *Natur und Landschaft*, 74, 420–427.
- Kumara HN, Babu S, Rao GB, Mahato S, Bhattacharya M, Rao NVR, Tamiliniyan D, Parengal H, Deepak D, Balakrishnan A (2022) Responses of birds and mammals to long-established wind farms in India. *Scientific Reports*, 12, 1339.
- Kunz T, Arnett E, Erickson W, Hoar A, Johnson G, Larkin R, Strickland M, Thresher R, Tuttle M (2007) Ecological impacts of wind energy development on bats: Questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 315–324.
- Laffta S (2014) Environmental impacts of wind energy. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1, 251–254.
- Larsen JK, Madsen J (2000) Effects of wind turbines and other

- physical elements on field utilization by pink-footed geese (*Anser brachyrhynchus*): A landscape perspective. *Landscape Ecology*, 15, 755–764.
- Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, Rivas J, Kucharski F, Kirk-Davidoff D, Bach E, Zeng N (2018) Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. *Science*, 361, 1019–1022.
- Li ZL (2015) Effect of wind power site construction on soil nutrients and vegetation of the surrounding disturbed region. *Research of Soil and Water Conservation*, 22(6), 61–66. (in Chinese with English abstract) [李智兰 (2015) 风电场建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响. *水土保持研究*, 22(6), 61–66.]
- Liu DX (2020) Management of solar photovoltaic power plants in the context of eco-environmental protection. *Regional Governance*, (3), 176–178. (in Chinese) [刘冬晓 (2020) 生态环境保护视域下的太阳能光伏电站管理. *区域治理*, (3), 176–178.]
- Liu Y, Zhang R, Huang Z, Cheng Z, López-Vicente M, Ma XR, Wu G (2019) Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in arid sandy ecosystem. *Land Degradation & Development*, 30, 2177–2186.
- Liu Y, Zhang R, Ma X, Wu G (2020) Combined ecological and economic benefits of the solar photovoltaic industry in arid sandy ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121376.
- Liu YQ, Zhao H (2017) Investigation on bird strike in wind farm in bird sensitive area in Yunnan Province. *Environmental Science Survey*, 36, 167–169. (in Chinese with English abstract) [刘越强, 赵华 (2017) 云南鸟类敏感区域已建风电场鸟撞影响调查. *环境科学导刊*, 36, 167–169.]
- Lovich JE, Ennen JR (2011) Wildlife conservation and solar energy development in the desert southwest, United States. *Bioscience*, 61, 982–992.
- Marques A, Santos C, Hanssen F, Muñoz A, Onrubia A, Wikelski M, Moreira F, Palmeirim J, Silva J (2020) Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. *Journal of Animal Ecology*, 89, 93–103.
- Montag H, Parker DG, Clarkson T (2016) The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity: A Comparative Study. Clarkson and Woods, Somerset & Wychwood Biodiversity, Devon. https://helapco.gr/wp-content/uploads/Solar_Farms_Biodiversity_Study.pdf. (accessed on 2024-02-11)
- Muñoz AR, Farfán MÁ (2020) European free-tailed bat fatalities at wind farms in southern Spain. *Biodiversity and Conservation*, 43, 37–41.
- Munson S, Belnap J, Okin G (2011) Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 3854–3859.
- Nazir MS, Bilal M, Sohail HM, Liu B, Chen W, Iqbal H (2020) Impacts of renewable energy atlas: Reaping the benefits of renewables and biodiversity threats. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 22113–22124.
- Nekola J (2012) The impact of a utility corridor on terrestrial gastropod biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 21, 781–795.
- Newton I, Little B (2009) Assessment of wind-farm and other bird casualties from carcasses found on a Northumbrian beach over an 11-year period. *Bird Study*, 56, 158–167.
- Ong C (2013) Land-use Requirements for Solar Power Plants in the United States. National Renewable Energy Laboratory, Golden. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Pearce-Higgins J, Stephen L, Douse A, Langston R (2012) Greater impacts of wind farms on bird populations during construction than subsequent operation: Results of a multi-site and multi-species analysis. *Journal of Applied Ecology*, 49, 386–394.
- Poot H, De Vries H, Donners M, Wernand M, Marquenie J (2008) Green light for nocturnally migrating birds. *Ecology and Society*, 13(2), 47.
- Poulsen AH, Raaschou-Nielsen O, Peña A, Hahmann AN, Nordsborg RB, Ketzel M, Brandt J, Sørensen M (2018) Short-term nighttime wind turbine noise and cardiovascular events: A nationwide case-crossover study from Denmark. *Environment International*, 114, 160–166.
- Ralston-Paton S, Smallie J, Pearson A, Ramalho R (2017) Wind Energy's Impacts on Birds in South Africa: A Preliminary Review of the Results of Operational Monitoring at the First Wind Farms of the Renewable Energy Independent Power Producer Procurement Programme in South Africa. BirdLife South Africa, Johannesburg. <https://www.birdlife.org.za/wp-content/uploads/2018/06/Wind-Energy-and-Birds-Impacts.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Reid T, Krüger S, Whitfield DP, Amar A (2015) Using spatial analyses of bearded vulture movements in southern Africa to inform wind turbine placement. *Journal of Applied Ecology*, 52, 881–892.
- Ren XC, Yi KP, Cao L (2022) Optimizing layout of wind farms and power grids to avoid bird strikes. *Environmental Protection Science*, 48(3), 13–19. (in Chinese with English abstract) [任西婵, 伊坤朋, 曹垒 (2022) 优化风电场和电网布局以避免鸟撞. *环境保护科学*, 48(3), 13–19.]
- Rushworth I, Krüger S (2014) Wind farms threaten southern Africa's cliff-nesting vultures. *Ostrich*, 85, 13–23.
- Salguero MM, De la Cruz A, Muñoz A, Arroyo GM (2023) Bat mortality in wind farms of southern Europe: Temporal patterns and implications in the current context of climate change. *Biodiversity and Conservation*, 32, 3953–3971.
- Santos M, Bastos R, Travassos P, Bessa Santos R, Repas M, Cabral J (2010) Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain

- ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators*, 10, 192–205.
- Sayed E, Wilberforce Awotwe T, Elsaid K, Rabaia M, Abdelkareem M, Chae K, Olabi AG (2020) A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of the Total Environment*, 766, 144505.
- Shang W, Zhang ZP, Fu GQ, Wan X, Zhang WX, Xiao B, Yang XM, Man DQ, Jin HX, Li YQ (2020) Effects of Photovoltaic Farm Construction on Vegetation and Soil Microorganisms in the Desert Area of Hexi Corridor. Gansu Research Institute of Sand Control, Lanzhou. (in Chinese) [尚雯, 张芝萍, 付贵全, 万翔, 张卫星, 肖斌, 杨雪梅, 满多清, 金红喜, 李玉强 (2020) 光伏电场建设对河西走廊荒漠区植被和土壤微生物的影响. 甘肃省治沙研究所, 兰州.]
- Sharifian M (2015) The Paths of Clean Technology: From Innovation to Commercialization. PhD dissertation, Faculty of Business, University of Alberta, Alberta.
- Shi J, Yang QM, Li JA, Tang PC (2022) An overview of the environmental impact issues and implications of wastewater generated by photovoltaic panel cleaning. *Cleaning World*, 38(5), 47–49. (in Chinese) [石杰, 杨乔木, 李继安, 唐鹏程 (2022) 浅谈光伏板清洁产生污水的环境影响问题及启示. 清洗世界, 38(5), 47–49.]
- Sinha P, Hoffman B, Sakers J, Althouse L (2018) Best practices in responsible land use for improving biodiversity at a utility-scale solar facility. *Case Studies in the Environment*, 2(1), 1–12.
- Skarin A, Nellemann C, Rönnegård L, Sandström P, Lundqvist H (2015) Wind farm construction impacts reindeer migration and movement corridors. *Landscape Ecology*, 30, 1527–1540.
- Skarin A, Sandström P, Alam M (2018) Out of sight of wind turbines—Reindeer response to wind farms in operation. *Ecology and Evolution*, 8, 9906–9919.
- Song NN (2022) Effects of Wind Farm and Its Sounding Landscape Factors on Magpie (*Pica pica*) Nest in Agroforestry System: A Case Study of Chongming Beihu Wind Farm. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [宋宁宁 (2022) 农林复合生态系统中风电场及其周边景观因子对喜鹊巢的影响. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Sovacool B (2009) Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity. *Energy Policy*, 37, 2241–2248.
- Stevens L, Anderson B, Cowan C, Colton K, Johnson D (2017) The Footprint of Energy: Land Use of U. S. Electricity Production. <https://docs.wind-watch.org/US-footprints-Strata-2017.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Stoms D, Dashiell S, Davis F (2013) Siting solar energy development to minimize biological impacts. *Renewable Energy*, 57, 289–298.
- Tang B, Wu D, Zhao X, Zhou T, Zhao W, Wei H (2017) The observed impacts of wind farms on local vegetation growth in Northern China. *Remote Sensing*, 9(4), 332.
- Taylor R (2014) Potential Ecological Impacts of Ground-mounted Photovoltaic Solar Panels in the UK: An Introduction and Literature Review. BSG Ecology, Newport. <https://www.bsg-ecology.com/wp-content/uploads/2019/04/Solar-Panels-and-Wildlife-Review-2019.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- TBC (The Biodiversity Consultancy) (2019) Wind Energy: Managing Biodiversity Risks. The Biodiversity Consultancy, Cambridge. <https://www.thebiodiversityconsultancy.com/fileadmin/uploads/tbc/Documents/Resources/Wind-energy-TBC-IBN-August-2019-1.pdf>. (accessed on 2024-02-11)
- Tesfahunegn W, Datiko D, Wale M, Hailay GE, Hunduma T (2020) Impact of wind energy development on birds and bats: The case of Adama wind farm, Central Ethiopia. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 81, 1–9.
- Turney D, Fthenakis V (2011) Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3261–3270.
- Uldrijan D, Cerny M, Winkler J (2022) Solar park: Opportunity or threat for vegetation and ecosystem. *Journal of Ecological Engineering*, 23, 1–10.
- US-BLM (United States Bureau of Land Management) (2010) California Desert Conservation Area Plan Amendment and Final Environmental Impact Statement for the Ivanpah Solar Electric Generating System Project. United States Department of the Interior, Needles.
- Villegas-Patracá R, Cabrera-Cruz SA, Herrera-Alsina L (2014) Soaring migratory birds avoid wind farm in the Isthmus of Tehuantepec, southern Mexico. *PLoS ONE*, 9, e92462.
- Walsh-Thomas JM, Cervone G, Agouris P, Manca G (2012) Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6432–6437.
- Wang LM, Li HQ, Cheng SK (2012) A study of the ecological effects of solar energy development in Tibet. *Mountain Research and Development*, 32, 83–91.
- Wang G, Zhao YM, Dong L, Li GQ (2021) Effects of wind turbines on land surface temperature and evapotranspiration in a desert steppe. *Geomatics World*, 28(2), 74–81. (in Chinese with English abstract) [王刚, 赵玉梅, 董丽, 李国庆 (2021) 风力发电机对荒漠草原地表温度及蒸散发的影响. 地理信息世界, 28(2), 74–81.]
- Wang Q, Luo K, Wu CL, Fan JR (2019) Wind resource assessment of weather research and forecasting model coupled with wind farm parameterization model. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 53, 1572–1581. (in Chinese with English abstract) [王强, 罗坤, 吴春雷, 樊建人 (2019) 耦合风电场参数化模型的天气预报模式对风资源的评估和验证. 浙江大学学报(工学版), 53,

- 1572–1581.]
- Wang SF, Wang SC, Smith P (2015) Ecological impacts of wind farms on birds: Questions, hypotheses, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 599–607.
- Wang T, Wang DX, Guo TD, Zhang GG, Zhao SX, Niu HC, Lu SY, Lin H (2016) The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(3), 90–94. (in Chinese with English abstract) [王涛, 王得祥, 郭廷栋, 张岗岗, 赵世雄, 牛怀诚, 卢舜瑜, 林虎 (2016) 光伏电站建设对土壤和植被的影响. *水土保持研究*, 23(3), 90–94.]
- Wang Y, Li GQ, Zhou J, Wang MY, Song Y (2021) Research on influence of PV array on soil moisture. *Solar Energy*, (7), 53–58. (in Chinese with English abstract) [王颖, 李国庆, 周洁, 王梦瑶, 宋媛 (2021) 光伏阵列对土壤水分的影响研究. *太阳能*, (7), 53–58.]
- Wang ZY, Wang J, Gao Y, Dang XH, Meng ZJ (2019) Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39, 191–196. (in Chinese with English abstract) [王祯仪, 汪季, 高永, 党晓宏, 蒙仲举 (2019) 光伏电站建设对沙区生态环境的影响. *水土保持通报*, 39, 191–196.]
- Winkelman JE (1994) Bird/Wind Turbine Investigations in Europe. In: *Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting*, pp. 20–21, Denver.
- Wu JG, Gong Q, Wang Y (2023) The impacts of wind farms on ecosystems, biodiversity, and the environments. *Ecological Economy*, 39(9), 167–178. (in Chinese with English abstract) [吴建国, 巩倩, 王阳 (2023) 风电场对生态系统、生物多样性及环境的影响. *生态经济*, 39(9), 167–178.]
- Wu W, Yue S, Zhou X, Guo M, Wang J, Ren L, Yuan B (2020) Observational study on the impact of large-scale photovoltaic development in deserts on local air temperature and humidity. *Sustainability*, 12, 3403.
- Xu XY, Xiao YZ (2021) Wind power development in the Pearl River Delta and its threat to birds and related countermeasures. *Modern Vocational Education*, (33), 178–181. (in Chinese) [徐晓羽, 肖懿芝 (2021) 珠三角风电发展及其对鸟类威胁和相关应对措施. *现代职业教育*, (33), 178–181.]
- Yang SB (2023) Environmental impact assessment and pollution prevention for photovoltaic projects. *Low Carbon World*, 13(8), 19–21. (in Chinese) [杨松波 (2023) 光伏项目环境影响评价及污染防治. *低碳世界*, 13(8), 19–21.]
- Zhang JH, Ke T, Jiang HB, Liu L (2017) Analysis of the impact of wind power on migratory birds. *Green Environmental Protection Building Materials*, (7), 23. (in Chinese) [张建华, 柯涛, 姜洪波, 刘玲 (2017) 风力发电对候鸟的影响分析. *绿色环保建材*, (7), 23.]
- Zhao PY, Gao Y, Chen X, Gao L (2016) Effect of desert photovoltaic power plant on air temperature and humidity. *Western Resources*, (3), 125–128. (in Chinese) [赵鹏宇, 高永, 陈曦, 高亮 (2016) 沙漠光伏电站对空气温湿度影响研究. *西部资源*, (3), 125–128.]
- Zhao S, Xu H, Song N, Wang Z, Li B, Wang T (2020) Effect of wind farms on wintering ducks at an important wintering ground in China along the East Asian-Australasian Flyway. *Ecology and Evolution*, 10, 9567–9580.
- Zhao SS (2022) Study on the Impact of Onshore Wind Farm Developments on the Wintering Waterbirds and Their Conservation Strategies in the Coast of Yangtze River Delta, China. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [赵闪闪 (2022) 长江三角洲海岸带风电开发对越冬水鸟的影响及其保育策略研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Zhao YJ (2020) Impact of photovoltaic power stations on ecological environment and relevant countermeasures. *Journal of Environment & Development*, 32(11), 25–26. (in Chinese with English abstract) [赵彦军 (2020) 光伏电站对生态环境的影响与相关对策. *环境与发展*, 32(11), 25–26.]
- Zhao ZW (2021) Impact of wind farm construction on surface vegetation in Northern Shanxi. *Environmental Science and Management*, 46(5), 160–164. (in Chinese with English abstract) [赵珍伟 (2021) 山西北部风电场建设对地表植被的影响研究. *环境科学与管理*, 46(5), 160–164.]
- Zheng JQ, Luo Y, Chang R, Gao XQ (2023) Study on impact of large-scaled photovoltaic development on local climate and ecosystem. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 44, 253–265. (in Chinese with English abstract) [郑隽卿, 罗勇, 常蕊, 高晓清 (2023) 大规模光伏开发对局地气候生态影响研究. *太阳能学报*, 44, 253–265.]
- Zhou L, Tian Y, Baidya Roy S, Thorncroft C, Bosart LF, Hu Y (2012) Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2, 539–543.
- Zhu YK, Li YD, Lou YQ, Zhou J, Sun YH (2016) Impact of wind farm on birds and mitigation strategies. *Chinese Journal of Zoology*, 51, 682–691. (in Chinese with English abstract) [朱永可, 李阳端, 楼瑛强, 周江, 孙悦华 (2016) 风力发电对鸟类的影响以及应对措施. *动物学杂志*, 51, 682–691.]

(责任编辑: 李晟 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2023212>