



潘应鑫, 杨昊天, 尤万学, 张鹏, 赵同亮, 王琦, 吕晓东. 基于文献计量学的规模化光伏电站对生态环境影响研究的可视化分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(08): 169-184.

PAN Yingxin, YANG Haotian, YOU Wanxue, ZHANG Peng, ZHAO Tongliang, WANG Qi, LYU Xiaodong. Bibliometrics-based visualisation of research on the impacts of large-scale photo voltaic power plants on ecological environment[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(08): 169-184.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.15

基于文献计量学的规模化光伏电站对生态环境影响研究的 可视化分析

潘应鑫¹ 杨昊天^{2*} 尤万学³ 张鹏¹ 赵同亮¹ 王琦¹ 吕晓东^{1,4*}

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730030;

3. 宁夏回族自治区中卫沙坡头国家级自然保护区管理局, 宁夏 中卫 755099;

4. 祁连山中部亚高山生态系统野外科学观测研究站, 甘肃 张掖 734400)

摘要 为明确国内外规模化光伏电站建设对生态环境影响领域的研究现状与热点, 基于CNKI和WOS数据库, 使用CiteSpace软件对2011—2023年共226篇中、英文文献进行发文量变化趋势、研究主体、共被引网络和研究热点演化的可视化分析, 系统梳理该领域的研究进展与方向。结果表明: 1) 光伏发电对生态环境影响研究领域, 英文文献年发文量均呈三次多项式增长, WOS数据库文献总量显著高于CNKI。2) 中国发文量居首位, 美国中心度最高, 体现了两国较高的国际学术影响力; 国内研究机构缺乏合作, 中国科学院在国际上对该领域的影响力和贡献度最高; 国内与国外作者间的国际合作尚显薄弱。3) 中文文献研究主题主要聚焦于河西走廊等干旱区植被恢复与生态治理; 英文文献侧重模型模拟光伏电站建设所造成的小尺度或大尺度下的环境影响和气候改变; 目前研究热点包括光伏电站的局地小气候因子影响和生态系统碳储量动态。在后续工作中, 需加强跨气候带长期联网观测, 基于全生命周期评价方法分析不同时期光伏电站的生态环境效应, 构建全生命周期的生态环境影响管理体系, 为光伏产业可持续发展提供科学支撑。

关键词 光伏电站; 文献计量; CiteSpace; 生态环境

中图分类号 X171.1

文章编号 1007-4333(2025)08-0169-16

文献标志码 A

Bibliometrics-based visualisation of research on the impacts of large-scale photo voltaic power plants on ecological environment

PAN Yingxin¹, YANG Haotian^{2*}, YOU Wanxue³, ZHANG Peng¹, ZHAO Tongliang¹,
WANG Qi¹, LYU Xiaodong^{1,4*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Shapotou Desert Research and Experimental Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China;

3. Ningxia Hui Autonomous Region Shapotou National Nature Reserve Administration, Zhongwei 755099, China;

4. Observation Station of Subalpine Ecology Systems in the middle Qilian Mountains, Zhangye 734400, China)

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01019); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究一期项目(2022-YRUC-01-0102); 宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区植物与真菌多样性调查项目

第一作者: 潘应鑫(ORCID:0009-0000-2961-1970), 硕士研究生, E-mail: 1842381319@qq.com

通讯作者: 杨昊天(ORCID:0000-0002-2116-1319), 副研究员, 主要从事沙漠生态恢复研究, E-mail: yanght@lzb.ac.cn

吕晓东(ORCID:0000-0002-6410-1068), 副教授, 主要从事全球变化生态学研究, E-mail: xiaodonglyu@mail.lzjtu.cn

Abstract To clarify the research status and hotspots in the ecological impacts of large-scale photovoltaic (PV) power plant construction, 226 Chinese and English articles were visualized and analyzed by using CiteSpace software based on CNKI and WOS databases. The publication trends, research subjects, co-citation networks and hotspot evolution from 2011 to 2023 were investigated. The research progress and directions in this field are systematically reviewed. The findings indicate that: 1) The annual publication volume of literature on the ecological impact research of photovoltaic power generation exhibits cubic polynomial growth, with the total volume in the WOS database was significantly higher than that in the CNKI. 2) China leads in publication volume, while the United States has the highest degree of centrality, reflecting the greater international academic influence of both countries. There is a lack of cooperation among domestic research institutions, although the Chinese Academy of Sciences shows the highest degree of influence internationally. The international collaboration between domestic and foreign authors is still relatively weak. 3) Chinese literature research topics primarily focus on vegetation restoration and ecological management in arid regions such as the Hexi Corridor, whereas English literature emphasizes model simulations to assess environmental impacts and climate change caused by PV power plant construction at both small and large scales. Current research hotspots include the impacts of PV power plants on local microclimate factors and ecosystem carbon stock dynamics. Future work should prioritize strengthening long-term network observations across climate zones, analyzing the ecological and environmental effects of PV power plants over different periods using life cycle assessment methods, and establishing a comprehensive ecological and environmental impact management system to support the sustainable development of the PV industry.

Keywords photovoltaic power plants; bibliometrics; CiteSpace; ecological environment

当前世界各国正面临能源转型的关键时期,减少碳排放,减缓气候变暖的趋势变得越来越迫切^[1]。为实现《巴黎协定》将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内的目标^[2],开发水电、风能、太阳能等新能源来替代传统化石能源早已成为世界各国的共识^[3]。太阳能被认为是最有前途的可再生能源之一^[4]。根据发电形式可将太阳能发电分为光热发电(CSP)和光伏发电(PV),其中光伏发电是主要的太阳能利用形式^[5]。2024年,全球太阳能发电总装机量首次突破2 TW,全球新增光伏装机量约600 GW,其中中国新增装机量277 GW(占全球46%)^[6]。预计到2050年,光伏发电可满足全球25%~49%的电力需求^[7]。未来光伏发电在调整能源结构和减缓气候变化中将发挥越来越重要的作用,成为实现碳中和目标的核心路径之一。

生态脆弱的沙漠、戈壁、荒漠地区是建设大型光伏基地的主阵地^[8],然而这些区域在受到人类活动和气候变化的干扰后易发生生境退化。目前国内学者采用实地观测和模型模拟的方法,围绕光伏电站对生态环境的影响展开研究,主要聚焦于植被与土壤响应、微气候变化机制以及土地利用与生物多样性三大方向。国内研究多集中于干旱半干

旱区域,发现光伏板遮荫通过调节地表辐射与土壤微气候显著促进植被恢复。例如,河西走廊荒漠区光伏板间因遮荫减少蒸发,使土壤湿度得到提升^[9];宁夏红寺堡光伏电站内由于光伏板对降水的重新分配,电板间和电板前的植被生物量和土壤总有机碳含量增加并促进了土壤微生物的共生^[10],而板下因受光照和降水的限制植物多样性下降^[11];对中国北方干旱地区进行的模拟数值试验表明,光伏电站促进了土壤碳储存^[12]。然而,欧洲研究主要为建立在废弃农田和未利用草原上的光伏电站,发现光伏电站的建设会对生态系统造成一定的负面影响。法国南部半天然草地的研究表明,光伏板安装导致植物物种丰度减少,且土壤真菌生物量显著降低^[13];意大利中部农业用地上的研究表明,由于电站的建设,土壤温度和持水能力显著降低,土壤有机质和微生物活动减少^[14]。这一差异可能与遮荫强度超出植被耐受阈值或区域生态系统敏感性相关。在微气候变化机制方面,国内外研究均表明光伏电站可通过改变地表能量平衡影响局地气候。中国西北戈壁区的观测显示,光伏阵列通过降低潜热通量^[15],及减少夜间长波辐射^[16],使地表温度下降;美国科罗拉多草原则发现,平单轴跟踪支架的

动态遮荫通过调节光合有效辐射的时间分布,显著影响植物净初级生产力的昼夜分异^[17]。土地利用与生物多样性研究则呈现显著区域异质性:国外研究多关注农业生态系统中光伏板安装引发的土地覆被破碎化及动物栖息地连通性降低^[18],强调土地竞争与生态权衡;而国内对我国北方干旱区的研究以荒漠区“光伏治沙”为核心,强调生态修复效益。

文献计量学是将数学、统计学和文献学相结合,通过对大量出版物的定量分析,探索学科的结构特征和热点趋势,并对结果进行评价和预测的一种文献分析方法。与传统的系统定性评价相比,文献计量学在某个研究领域的应用可以帮助研究者基于聚类标签或主题来把握该领域的发展进程和现状。目前,关于光伏建设对生态环境影响的文献计量学分析文章较少,缺乏对该领域的发展历程、研究现状、前沿热点和国内外研究差异的系统梳理与分析。亟需对现有的文献进行综合分析,厘清光伏电站建设对生态环境影响的研究方向、热点、存在问题,准确把握未来发展趋势。

本研究拟以中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)核心合集数据库为数据来源,利用CiteSpace软件对规模化光伏电站的建设对生态环境影响研究领域的文献发文量、研究主体、被引情况和研究热点进行可视化分析,深入了解光伏电站建设对生态环境影响领域的研究进展及热点问题,并提出未来的研究展望,以期为中国光伏电站的环境保护和生态系统管理提供借鉴和理论支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

中文文献来源于CNKI数据库,检索公式为:主题=“光伏电站+光伏电板+光伏开发+光伏园区+太阳能发电”AND主题=“生态+环境+气候”AND主题=“辐射+能量+土壤+空气+风沙+植被+生物”;英文文献来源于WOS核心合集数据库,文献类型选择“Article”和“Review”,检索公式为:TS=(“photovoltaic power” OR “photovoltaic panels” OR “utility-scale photovoltaic” OR “utility-scale solar energy” OR “solar farms” OR “solar panels” OR “solar parks” OR “solar plants” OR “PV power plants” OR “PV panels”) AND TS=(“climate” OR “climatic” OR “microclimatic” OR

“ecosystem” OR “ecological” OR “microclimate” OR “environment” OR “environmental” OR “habitat”) AND TS=(“albedo” OR “vegetation” OR “biodiversity” OR “soil temperatures” OR “air temperature” OR “moisture” OR “microbial”)。检索时间范围为2023年12月31日之前。对得到的文献进行逐一筛选,剔除与研究主题不符合或不相关的文献,共得到110篇中文和116篇英文文献。

1.2 分析方法

采用CiteSpace 6.2.R6软件作为可视化分析工具,以Excel和Origin 2024作为辅助绘图分析工具,对CNKI和WOS数据库有关光伏开发对生态环境影响方面的文献进行可视化分析。以Refworks格式将CNKI数据库检索到的文献数据导出,利用CiteSpace软件的格式转换功能进行转换后,进行可视化分析;将WOS数据库检索到的文献数据以纯文本格式导出,导入CiteSpace软件进行可视化分析。在CiteSpace软件中时间切片设置为1年,链接强度选择Cosine,范围选择Within Slices,节点筛选方式选择g-index($k=25$),其余参数为默认值,分别以合作作者、机构、国家、关键词、被引文献、被引作者和被引期刊为节点类型进行可视化分析。可视化图中节点越大代表发文量和影响力越大,中心度 ≥ 0.1 的节点被紫色圈圈出,连线越粗代表作者间合作程度越密切,节点与连线间不同颜色代表不同发文时间^[19]。

2 结果与分析

2.1 发文量变化趋势

发文量是评估一个领域发展的重要指标,2011—2023年CNKI和WOS数据库发文量趋势如图1所示。可知,2个数据库的发文量增长趋势迅猛,可拟合为三次多项式增长,且 R^2 均 >0.9 ,拟合优度较高。根据曲线走向推测,在未来一段时间内,WOS数据库在该领域的发文量高于CNKI数据库。该领域相关中英文文献共226篇,中文文献110篇,占总发文量的48.67%,最早发表于2014年;英文文献116篇,占总发文量的51.33%,最早发表于2011年。最早发表英文文献的作者是美国哥伦比亚大学的Fthenakis V,其研究内容是关于大规模光伏建设对野生动物产生的影响^[20]。出于能源转型和环境保护的需要,美国较早发展太阳能发电产

业,不仅在技术上取得了突破,而且在政策支持和市场应用也走在前列,推动了学者们对光伏建设的生态环境影响领域的研究。最早发表的中文文献是关于光伏治沙的推广应用,中国西北大片沙漠地区为发展光伏产业提供了条件,光伏的建设为沙漠地区生态恢复提供了选择。2013年国务院《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》,是我国光伏产业发展的纲领性政策,各地政府纷纷响应,国内学者们也开始关注大规模光伏开发对生态环境的影响。

该领域发文量大致可分为3个阶段:起步阶段(2011—2015年)、探索阶段(2016—2019年)、飞速发展阶段(2020—2023年)。起步阶段中、英文文献发文量均约为3篇/年,学者们开始对该领域进行研究,有少量文献发表。2015年中国国家能源局提出“光伏领跑者计划”,进一步推动了光伏开发,掀起了国内学者对光伏建设的生态环境影响领域的研

究。探索阶段年均发文量中文接近10篇/年,英文7篇/年,此阶段发展并不稳定,年度发文量差异较大。飞速发展阶段中文年均发文量超过15篇/年,英文年均发文量接近22篇/年。由于受全球气候危机和能源危机的影响,近年来,光伏产业蓬勃发展。中国在2020年提出“双碳”目标,鼓励在沙漠、戈壁、荒漠地区加快建设大型风电光伏基地项目。2023年自然资源部办公厅《关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知》^[21]鼓励在沙漠、戈壁、荒漠等区域选址建设大型光伏基地。随着相关政策的提出和越来越多学者的加入,为该领域的研究提供了制度保障并创造了良好的学术氛围,发表在国际、国内高水平期刊上的文章呈现出快速增长趋势。目前,大规模光伏开发对生态环境的影响领域在国内和国际上均处于蓬勃发展阶段,这一领域的研究逐步受到学者和研究机构的高度重视,在未来一定时期内仍是研究热点。

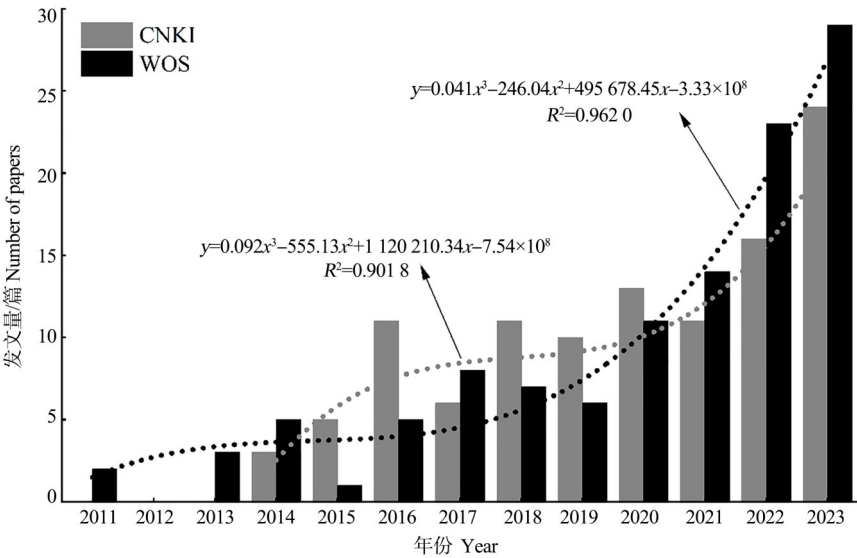


图1 CNKI和WOS数据库发文量趋势

Fig. 1 Trends in the number of papers published in CNKI and WOS databases

2.2 研究主体

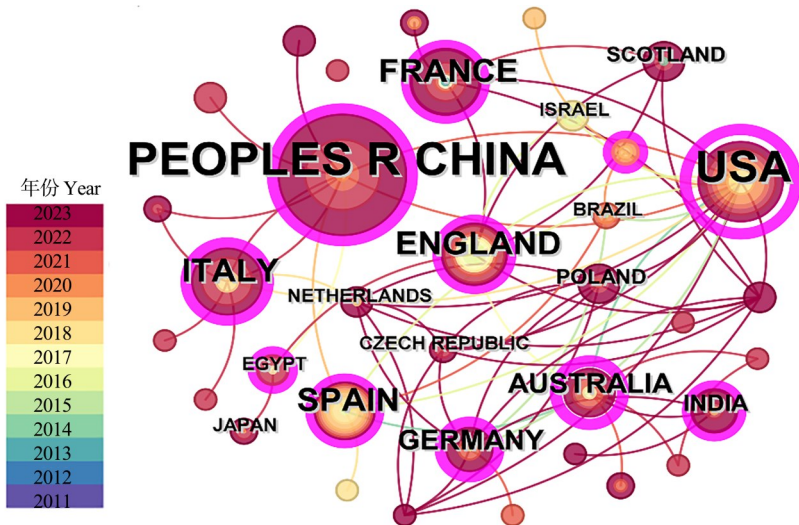
2.2.1 国家合作关系

对WOS数据库中的文献进行国家合作共现可视化分析,结果见图2。共得到35个国家节点($N=35$),70条合作连线($E=70$),密度值为0.1176($Density=0.1176$)。将发文量前9的国家列表排序,结果见表1。发文量排名前9的国家共发文132篇,中国和美国的发文量分别排名第1(39篇)和第2(30篇),占

前9名国家发文量的52.27%,远超其他国家。全球能源危机情况迫切,急需发展清洁能源,推动能源转型,鉴于2国广袤国土衍生的巨大能源需求,其光伏装机容量呈现指数级增长态势^[22-23],这既体现了清洁能源发展战略的加速实施,也反映出2国在环境保护与经济发展动态平衡机制构建上的持续探索。美国的中心度最高,为0.86,与其他国家的联系更密切,在合作网络中有较强的影响力,发挥了更重要的作

用。此外,合作网络中节点间的连线颜色偏红,表明国家间科研合作多属近期建立,然而整体网络密度偏

低,连线偏少,说明在该领域国家间的合作研究较少,仍处于初步发展阶段,未来需加强国际合作。



图中圆圈大小代表节点频次,频次越高,圆圈越大;中心度 ≥ 0.1 的节点被紫色圈圈出;连线代表共现关系;节点与连线颜色代表首次出现时间。下同。

The size of the circle in the figure represents the node frequency, the higher the frequency, the bigger the circle. Nodes with centrality ≥ 1 are circled by purple circle. The connecting line represents the co-occurrence relationship. The node and connecting line colours represent the time of the first appearance. The same below.

图 2 WOS数据库文献的国家合作关系

Fig. 2 International partnerships of publications in the WOS database

表 1 WOS数据库中发文量排名前9的国家

Table 1 Top 9 countries with the highest number of publications in the WOS database

排名 Ranking	国家 Country	发文量/篇 Number of papers	中心度 Centrality
1	中国 China	39	0.35
2	美国 America	30	0.86
3	法国 French	11	0.12
4	英格兰 England	11	0.20
5	意大利 Italy	11	0.27
6	西班牙 Spain	10	0.16
7	澳大利亚 Australia	8	0.41
8	德国 Germany	7	0.21
9	印度 India	5	0.12

2.2.2 机构合作关系可视化

对CNKI和WOS数据库中的文献进行机构合作共现可视化分析,结果见图3。图3(a)中共得到144个机构节点,98条合作连线,密度值为0.0095;

图3(b)中共得到164个机构节点,367条合作连线,密度值为0.0275。机构合作网络的稀疏性与区域异质性揭示了光伏生态影响研究领域的结构性瓶颈。国内机构合作密度仅为国际水平的34.5%,且

144个机构中仅中国科学院大学与内蒙古农业大学形成微弱合作集群,表明国内研究呈现高度碎片化。这种分散性可能导致关键问题,如跨区域生态效应对比的研究资源重复投入以及结论不可比性。相比之下,国际机构合作网络虽覆盖164个节点,但核心枢纽集中于中国科学院(19篇)、法国科学院(8篇)及美国能源部(7篇),三者合作占比达总连线的

的42%(图3(b)),凸显“强中心-弱边缘”的协作特征。从连线颜色上来看,中国科学院与法国科学院近年来在该领域与其他机构的合作关系较多,有比较新的研究进展,显著提升了该领域的全球可见度。机构合作的非均衡格局不仅映射了学科发展的路径依赖,更凸显了构建跨生态系统协作网络的紧迫性。

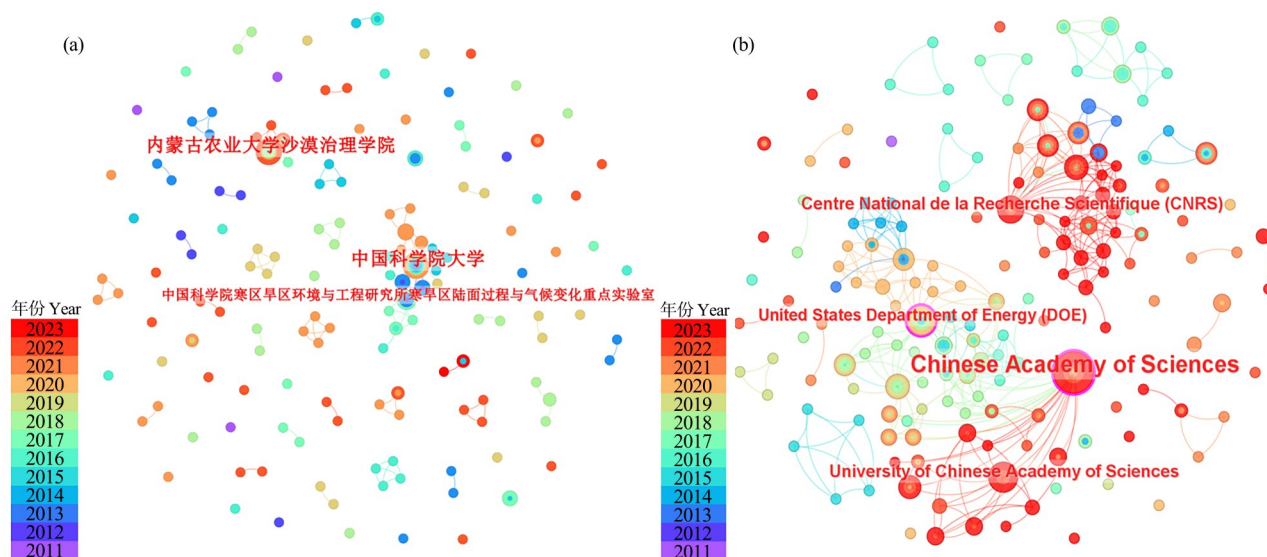


图3 CNKI(a)和WOS(b)数据库发文机构合作共现

Fig. 3 Institutional cooperation co-occurrence in CNKI (a) and WOS (b) databases

2.2.3 作者合作关系可视化

对CNKI和WOS数据库的合作作者进行可视化分析,结果如图4所示。CNKI数据库共得到216个作者节点(图4(a)),WOS数据库共得到242个作者节点(图4(b))。2个数据库均呈现稀疏的合作网络结构,核心作者群的缺失表明该领域尚未形成稳定的学术共同体。此外,2个数据库均未有超过10篇发文量的作者,中国科学院西北生态环境资源研究院的高晓清在CNKI和WOS数据库的发文量均为最高,分别为10和8篇。光伏电站对气候环境影响领域的相关研究正处于萌芽阶段,还未构建出完善的理论体系,未形成具有传承性的研究方向。

2.3 共被引分析

2.3.1 共被引期刊可视化

对WOS数据库的共被引文献进行可视化分析,结果见图5。列出了当2个或多个作者、期刊和文献同时出现在第3篇文献的引用列表中时,引用

关系成立。因此,共被引分析的3种主要形式可以揭示作者、期刊和文献之间的结构和关系^[24]。图5包含了335个期刊节点,1979条连线,表明WOS数据库中的期刊共被引关系较强。被引频次排名前10的期刊如表2所示。可知,被引频次排名前3的期刊依次为 *Renewable and Sustainable Energy Reviews*、*Renewable Energy* 和 *Solar Energy*,引用量分别为96、71和68次。此外,大部分期刊的引用年份呈现显著的时效性,近5年的被引关系占比较高,印证了大规模光伏电站的建设对生态环境影响领域仍处于理论体系构建与核心范式形成的关键发展阶段。被引频次排名前10的期刊2023年JCR影响因子均>3,其中 *Renewable and Sustainable Energy Reviews*、*Applied Energy* 和 *Science* 期刊的影响因子均>10,这一现象既反映了这些期刊在学术界的高影响力与文章质量把控能力,也说明国内外学者高度重视大规模光伏开发利用对生态环境的影响领域研究。

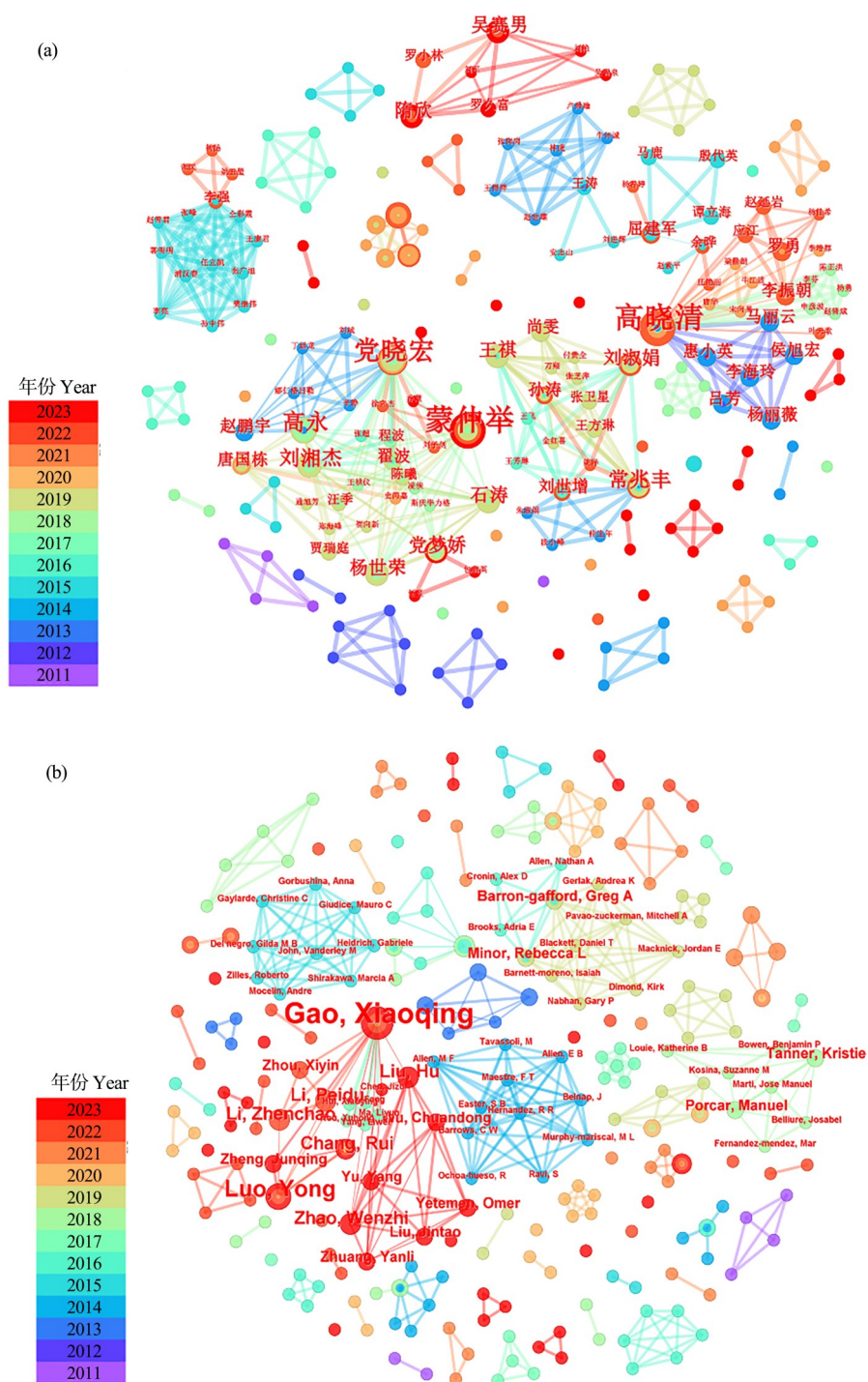


图 4 CNKI(a)和WOS(b)数据库发文作者共现

Fig. 4 Author co-occurrence in CNKI (a) and WOS (b) databases

2.3.2 共被引作者可视化

对WOS数据库的共被引作者进行分析。被引频次前3的作者分别为Hernandez R R、Armstrong A和Barron-Gafford G A,被引频次分别为51、45和31次。2014年,美国加州大学戴维斯分校的

Hernandez R R^[25]以第一作者发表的“Environmental impacts of utility-scale solar energy”是该领域较早发表在高水平期刊的文章。文章综述了太阳能开发对生物多样性、土地利用变化、土壤、水资源以及减缓气候变化的影响,以更好地了解光伏电站与环境

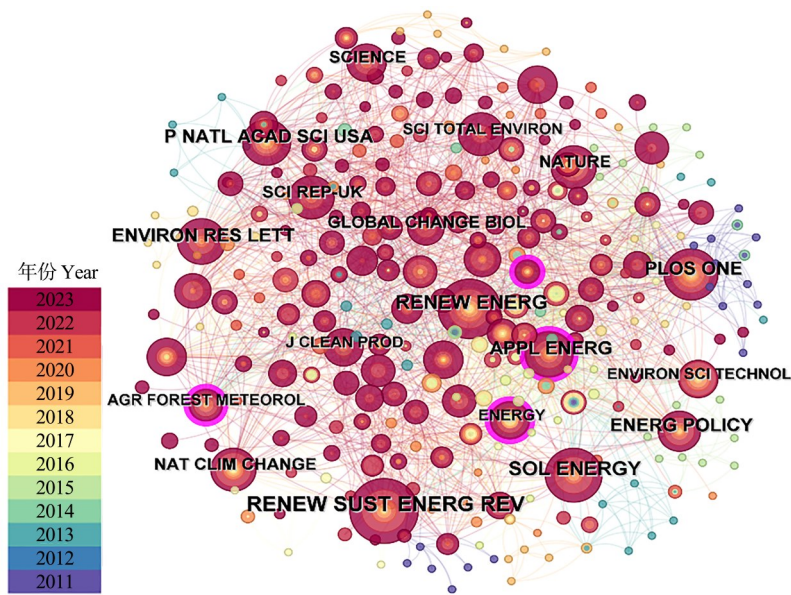


图5 WOS数据库发文期刊共被引可视化

Fig. 5 Visualization of the co-citation of published journals in the WOS database

表2 WOS数据库被引频次排名前10的期刊

Table 2 Top 10 most cited journals in the WOS database

排名 Ranking	期刊 Journal	被引频 次/次 Number of citations	2023年影响 因子 2023 impact factor
1	Renewable and Sustainable Energy Reviews	96	16.3
2	Renewable Energy	71	9.0
3	Solar Energy	68	6.0
4	Applied Energy	54	10.1
5	Environmental Research Letters	53	5.9
6	Plos One	51	3.7
7	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	50	9.4
8	Energy Policy	47	9.3
9	Scientific Reports	44	3.8
10	Science	44	44.7

之间的关系,提高其环境兼容性。该文章在大规模太阳能开发的气候环境影响领域被引率较高,该作者在该领域做出了尤其重要的贡献,推动了该领域的理论发展和技术进步。

2.3.3 共被引文献可视化

利用 CiteSpace 软件进行 WOS 数据库被引文献的突现分析,得到7篇突现文献(表3)。浅蓝色线表示突现未出现的年份,深蓝色线表示突现开始出现的年份,红色线表示突现出现的年份。高被引文

献的时空分布特征揭示了光伏生态影响研究范式的演变轨迹与知识扩散路径。2018 年 Li 等^[26]以“Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation”为题发表在 *Science* 期刊上的文章被引量最高。他们使用了一个动态植被的气候模型来模拟安装在撒哈拉沙漠中的大规模风能和太阳能发电场对气候的影响,结果显示,大规模光伏电站的部署可引发局地温度上升,促使降水量增加 2 倍以上,植被覆盖率

表 3 WOS 数据库被引文献的突现

Table 3 The citation bursts of publications in the WOS database

题目 Title	年份 Year	强度 Strength	开始 年份 Beginning year	结束 年份 Ending year	2011—2023 年
Environmental impacts of utility-scale solar energy	2014	6.36	2015	2019	
Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling	2016	4.23	2018	2021	
The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures	2016	4.23	2018	2021	
The potential of agrivoltaics systems	2016	3.37	2018	2021	
The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance	2019	3.11	2020	2023	
Sustainability of utility-scale solar energy-critical ecological concepts	2017	2.86	2021	2023	
Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas	2017	2.86	2021	2023	

注：浅蓝色线表示突现还未出现的年份，深蓝色线表示突现开始出现的年份，红色线表示突现出现的年份。

Note: The light blue line indicates the year in which the emergence has not yet occurred, the dark blue line indicates the year in which the emergence began, and the red line indicates the year in which the emergence occurred.

的提升进一步强化了大气水循环效率,由此形成的降水-植被正反馈机制持续改善区域生态环境,但是这种气候调节效应具有规模依赖性,对小规模光伏电站的影响较小。该气候模型研究表明大规模光伏电站建设在实现清洁能源供给过程中兼具气候调节功能,其双重效益机制可为应对全球气候变化和能源挑战提供解决方案。2014年Hernandez等^[25]发表在 *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 期刊上的“Environmental impacts of utility-scale solar energy”突现强度最高,为 6.36。该文章被引突现于 2015 年,结束于 2019 年,截止 2023 年仍有被引。文章揭示了大规模光伏开发可协同提升环境效益的潜在机制,并强调了未来研究的基本理论路线,为更好地了解大规模光伏开发与环境之间的关系提供了研究方向。WOS 数据库被引频次排名前 9 的文献见表 4。被引频次排名前 9 的文献基本集中在 2018—2020 年,被引文献的突现也均在近几年,其中 3 篇文献被引突现仍在持续,表明大规模光

伏开发对气候与环境影响的研究尚属新兴领域,目前正处于上升阶段。

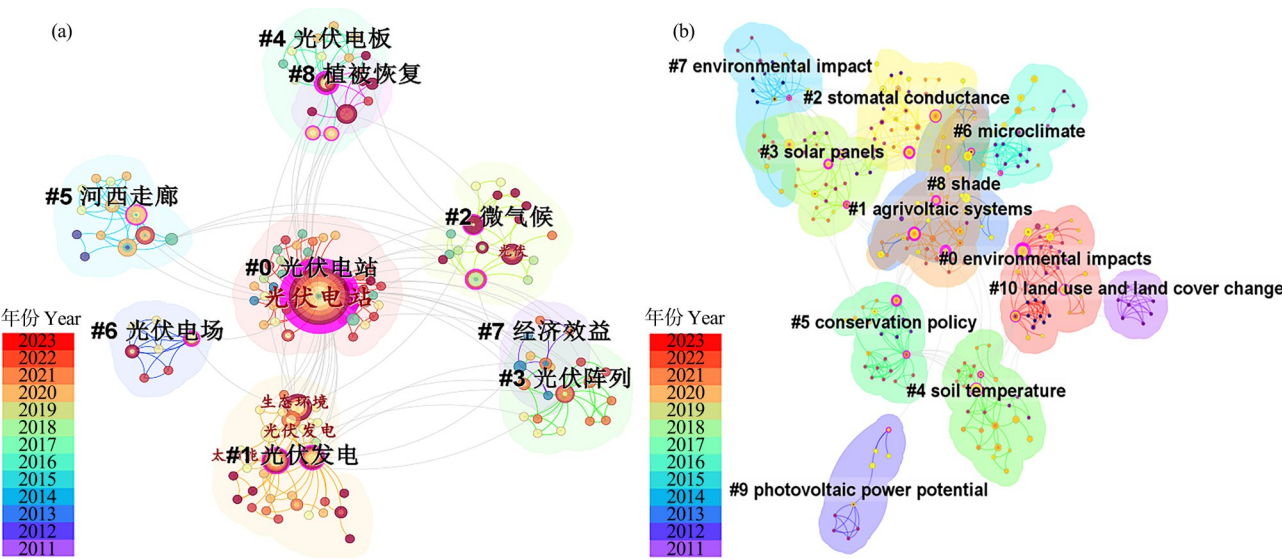
2.4 研究热点分析

2.4.1 关键词聚类

利用 CiteSpace 软件对 CNKI 和 WOS 数据库的文献进行研究热点聚类分析,结果如图 6 所示。关键词聚类分析是将多个密切相关的关键词组成一个聚类,从而得到该领域的主要研究方向^[24]。本研究关键词剪裁算法采用 Pathfinder+Pruning sliced networks+Pruning the merged network,聚类算法采用 LLR,CNKI 和 WOS 数据库关键词分别得到 8 和 10 个聚类。图中聚类编号越小,说明该类别包含的关键词越多,意味着该聚类内的研究影响力越大。CNKI 和 WOS 数据库关键词聚类后得到的 Modularity Q 值分别为 0.811 6 和 0.777 7,均 >0.3 ,表明聚类结构显著,获得的聚类效果较好;Weighted mean silhouette S 值分别为 0.967 0 和 0.925 1,均 >0.5 ,且接近 1,表明网络平均同质性较高,聚类结果合理^[27]。

表4 WOS数据库被引频次排名前9的文献
Table 4 Top 9 most cited documents in the WOS database

排名 Ranking	题目 Title	被引频次/次 Citation frequency	发表年份 Publication year	期刊 Journal
1	Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation	21	2018	<i>Science</i>
2	Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture , micrometeorology and water-use efficiency	19	2018	<i>Plos One</i>
3	Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem	19	2019	<i>Land Degradation & Development</i>
4	Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe , China	18	2018	<i>Renewable Energy</i>
5	The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance	15	2019	<i>Journal of Applied Meteorology and Climatology</i>
6	Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure	15	2020	<i>Frontiers in Environmental Science</i>
7	Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands	13	2019	<i>Nature</i>
8	Environmental impacts of utility-scale solar energy	13	2014	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>
9	Simulated solar panels create altered microhabitats in desert landforms	12	2020	<i>Ecosphere</i>



图中聚类编号越小,该类别包含的关键词越多,该聚类的研究影响力越大。
The smaller the cluster number shown in the graph, the more keywords the category contains and the greater the research impact of the cluster.

图6 CNKI(a)和WOS(b)数据库关键词聚类

Fig. 6 Keywords clustering in CNKI (a) and WOS (b) database

对 2 个数据库排名前 10 的关键词列表,结果见表 5。CNKI 数据库中,频次超过 10 的关键词有“光伏电站”“生态环境”和“光伏发电”,且中心度均 >0.1 ,具有较强的中心性。结合其他排名前 10 的关键词可知,国内研究高度聚焦于河西走廊等干旱区^[9,28-30],研究内容主要为风沙场、植被、空气和土壤温湿度以及局地小气候等^[31-34]。其热点关键词“光伏电站”“生态

环境”“戈壁”和“沙漠”等的强关联性表明,中国学者倾向于将光伏电站视为荒漠化治理的协同工具,这一取向与中国“沙戈荒”基地政策及“双碳”目标的战略需求深度耦合^[35]。然而,此类研究多基于短期观测(≤ 3 年),且大多数案例集中于同一气候带,这可能导致生态增益的结论过度泛化,忽视半湿润区光伏建设可能引发的土壤侵蚀或生物入侵风险。

表 5 CNKI 与 WOS 数据库排名前 10 的关键词
Table 5 Top 10 keywords in CNKI and WOS databases

排名 Ranking	CNKI 数据库 CNKI database				WOS 数据库 WOS database			
	关键词 Keyword	频次 Frequency	中心度 Centrality	年份 Year	关键词 Keyword	频次 Frequency	中心度 Centrality	年份 Year
1	光伏电站	44	0.64	2014	environment impact	22	0.38	2011
2	生态环境	17	0.70	2016	renewable energy	22	0.19	2015
3	光伏发电	12	0.37	2015	energy	17	0.23	2011
4	影响	7	0.08	2015	climate change	13	0.19	2017
5	河西走廊	6	0.19	2016	photovoltaic panels	13	0.20	2014
6	戈壁	6	0.03	2016	performance	13	0.13	2018
7	水土保持	5	0.07	2017	panels	11	0.11	2015
8	沙漠	5	0.11	2014	solar energy	11	0.08	2019
9	光伏产业	5	0.45	2018	diversity	11	0.03	2015
10	环境影响	5	0.19	2018	land use	10	0.06	2011

相比之下,WOS 数据库的关键词频次均 ≥ 10 ,排名前 7 的关键词中心度均 >0.1 ,具有较强的影响,且不同聚类之间的重叠较多(图 6(b)),表明不同聚类词之间的联系较为紧密。国际研究中“conservation policy”“photovoltaic power potential”“agrivoltaic systems”等关键词凸显了方法论优势与问题意识差异:欧美学者更多关注土地利用竞争(如“land use”)及跨尺度气候反馈(如“microclimate”),以及通过对农业光伏系统的研究为土地经济问题提供潜在的解决方案^[36]。此外,模型驱动方法则为全球光伏发展规划提供了风险预警框架。

国内研究强调“生态修复”的技术可行性,如土壤湿度的提升^[37],而国际文献更注重“生态-能源”的系统性平衡,如农业光伏对生物多样性的“双刃

剑”效应^[38],这可能会造成发展中国家偏向生态修复导向的粗放式开发,而发达国家受制于土地资源稀缺性,倾向于精细化生态约束设计。此外,关键词网络的弱交叉性(CNKI 和 WOS 数据库共有关键词较少)表明,国内外学术对话尚未形成统一语义场,可能阻碍跨区域知识迁移与联合技术标准的制定。因此,关键词聚类不仅映射了学科热点,更警示需构建兼容“修复”与“风险”的双重视角,通过方法论融合与数据共享,支撑全球光伏发展的生态适应性策略。

2.4.2 关键词时区

关键词时区图不仅能够呈现出某一领域的研究主题,还能直观地展示出不同时间点的研究热点、主题转变以及主题间的关联。CNKI 数据库 2014—2023 年关键词的路径演化过程如图 7(a)所

示,国内2014年开始出现光伏电站对生态影响领域的研究,初始阶段主要关注光伏治沙及其生态影响,关键词“光伏电站”出现频次最高,贯穿2014—2023年。关键词数量在2020年骤增,更多的学者开始投入到该领域的研究。沙漠治理、碳中和、植被恢复是2022年以来国内研究的热点,其中,植被的相关研究最多^[15,39-41]。总体来说,国内在该领域的研究仍处于探索阶段,学者们在各个方向的研究并未形成完善的体系,未来要加强合作,提升论文发表的质量和数量。

WOS数据库2011—2023年关键词的演化路径如图7(b)所示。2011—2015年“environmental impacts”“renewable”等关键词频繁出现,此阶段的研究大多为光伏电板小尺度范围^[42-44]以及场地范围的模型研究^[45-47],反映了早期研究对光伏开发潜在风险的审慎态度,其核心逻辑源于传统能源项目的生态评估框架^[48]。2016—2019年,出现的关键词有“diversity”“ecosystem”“energy”“photovoltaic panels”“land use”等,此阶段的研究可分为3个方向:光伏电板上微生物群落的研究^[49-50]、屋顶光伏与屋顶绿化结合对小气候的影响^[51-53]、

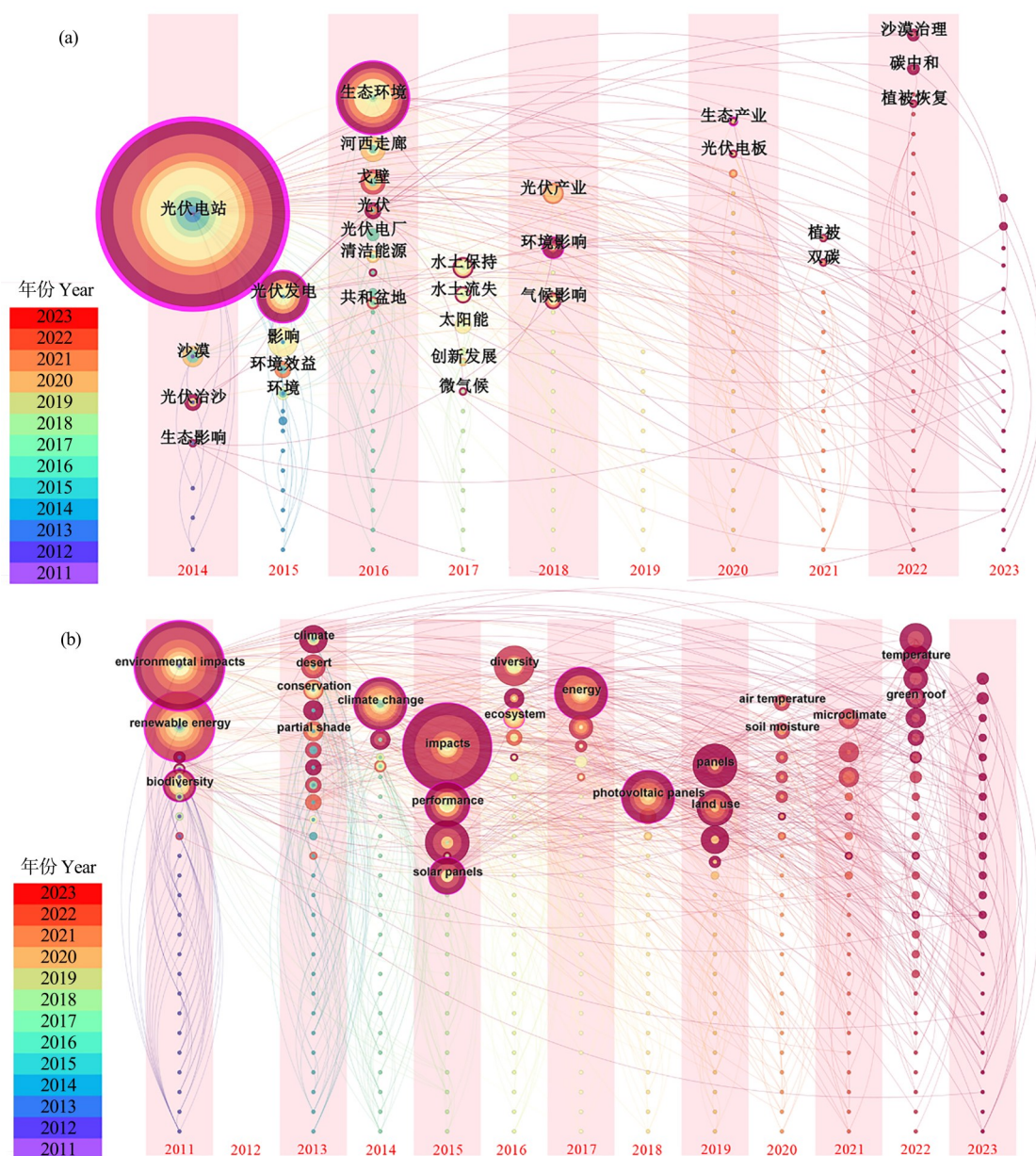


图7 CNKI(a)和WOS(b)数据库关键词时区图

Fig. 7 Time zone of keywords in CNKI (a) and WOS (b) database

农业光伏对土壤和作物产量的影响^[54-56]。2019—2023年“agrivoltaics”“carbon sink”“green roof”等关键词出现,此阶段的研究大都集中在光伏电站如何促进植被生长发育^[57-58]以及光伏电站如何影响局地温湿度等小气候因子^[38,59],并逐渐开始了光伏电站内的碳汇效应研究^[13]。如Moscatelli等^[14]对法国南部的相关研究显示,光伏板间的营养互作对土壤食物网有保护作用,而光伏板下的小气候对植物和土壤微生物产生了严重的负面影响。Wu等^[60]通过构建生态水文模型研究发现,相较于无遮挡区域,光伏板中前区土壤含水量提升了59.8%~113.6%,各遮挡区土壤温度降低了1.47~1.66℃,这主要归因于可用水量激增5~7倍、辐射量削减27%。在年降水量70~500 mm的气候梯度带内,大规模光伏电站建设使超干旱至半湿润气候区的植被年固碳能力提升3.49%~10.25%,其中光伏板滴水线水分补给是核心驱动因素^[13]。

3 结论与展望

3.1 结论

本研究基于CiteSpace软件的可视化分析图谱对CNKI和WOS数据库中2011—2023年有关大规模太阳能开发对生态环境影响领域的文献进行了全面分析,分别对发文量、研究主体、共被引和热点趋势进行了分析讨论。得出以下结论:

1) 发文量变化趋势:研究历程分为3个阶段,2011—2023年中、英文文献均呈指数增长,2020年后进入快速发展期;WOS数据库后期增速显著,总发文量超CNKI。

2) 研究主体:中国在该领域做了较多的研究,发文量位居首位,美国中心度最高,体现了其较大的国际影响力;国内研究机构间合作薄弱;中国科学院和法国科学院领跑国际贡献;作者合作网络尚未形成核心团队。

3) 共被引特征:英文期刊共被引关系较强,*Renewable and Sustainable Energy Reviews* 期刊被引用频次最高,高影响因子期刊主导研究前沿;美国加州大学Hernandez R R的奠基性研究推动了研究领域的发展,被引次数最高。

4) 研究热点:国内聚焦河西走廊等干旱区光伏治沙与植被恢复,国际侧重模型模拟多尺度环境影响;近年来研究热点转向光伏板遮荫效应、局地小气候调控及碳汇潜力。

3.2 展望

国内外在规模化光伏电站建设的生态环境影响领域研究正处于快速发展阶段,在政策引导与科研支撑的双重驱动下,光伏电站生态环境效应将持续成为未来学术研究的热点,基于此,未来研究可在以下4个方面重点开展:

1) 目前的研究多集中于特定气候区域,还远远不够支撑对大规模光伏电站建设的生态环境影响的全面认识,未来还需扩大研究区域,建立跨气候带观测网络,得出具有普适性的结论。

2) 光伏开发的气候环境影响研究目前主要基于短期实地观测和模型模拟,忽视了光伏电站全生命周期的动态累积效应。未来研究需深入探讨光伏电站对气候系统的长期影响,融合历史类比数据与前瞻性模拟数据构建评估框架。

3) 当前该领域的研究合作网络疏松,区域研究热点差异较大,难以形成统一的理论体系。未来研究可加强跨区域合作,建立数据共享平台,覆盖不同气候带与土地利用类型,并整合长期跟踪所获得的数据,从而深入探究其动态演变规律。

4) 该领域跨学科研究不足,且多停留在数据堆砌层面,未来可加强全生命周期视角下的系统优化研究,构建“能源-生态-经济”系统模型,以推动太阳能开发的社会经济和环境效益最大化,将光伏电站产生的碳收益纳入碳核算体系中,为实现能源结构转型及应对气候变化采取合理的规划和管理措施。

参考文献 References

- [1] Wang Y J, Wang R, Tanaka K, Ciais P, Penuelas J, Balkanski Y, Sardans J, Hauglustaine D, Liu W, Xing X F, Li J R, Xu S Q, Xiong Y K, Yang R P, Cao J J, Chen J M, Wang L, Tang X, Zhang R H. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China [J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 761-767
- [2] Schleussner C F, Rogelj J, Schaeffer M, Lissner T, Licker R, Fischer E M, Knutti R, Levermann A, Frieler K, Hare W. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(9): 827-835
- [3] Ghobakhloo M, Fathi M. Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126427
- [4] Yap K Y, Sarimuthu C R, Lim J M. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: A review [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(6): 1043-1059
- [5] Alami A H, Olabi A G, Mdallal A, Rezk A, Radwan A, Rahman S M A, Shah S K, Ali Abdelkareem M. Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis [J]. *International Journal of Thermofluids*, 2023, 18: 100340

- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2024[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024
- [7] Zhang Z X, Chen M, Zhong T, Zhu R, Qian Z, Zhang F, Yang Y, Zhang K, Santi P, Wang K C, Pu Y X, Tian L X, Lü G N, Yan J Y. Carbon mitigation potential afforded by rooftop photovoltaic in China[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2347
- [8] 赵延岩, 应江, 李振朝, 高晓清, 罗勇. 戈壁光伏电站气象要素特征[J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 977-987
- Zhao Y Y, Ying J, Li Z C, Gao X Q, Luo Y. Characteristics of meteorological elements of photovoltaic power plants in Gobi[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(4): 977-987 (in Chinese)
- [9] Shang W, Zhang Z P, Fu G Q, Wang Q, Li Y Q, Chang L. Spatial heterogeneity of vegetation communities and soil properties in a desert solar photovoltaic power station of the Hexi Corridor, northwestern China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2023, 32(3): 2795-2807
- [10] Liu Z Y, Peng T, Ma S L, Qi C, Song Y F, Zhang C J, Li K L, Gao N, Pu M Y, Wang X M, Bi Y R, Na X F. Potential benefits and risks of solar photovoltaic power plants on arid and semi-arid ecosystems: An assessment of soil microbial and plant communities [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1190650
- [11] 任乃芃, 李一坤, 朱柏全, 王一帆, 梁文超, 刘香萍. 光伏电板对草甸草原植物群落特征及物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(3): 766-772
- Ren N P, Li Y K, Zhu B Q, Wang Y F, Liang W C, Liu X P. Effects of photovoltaic panels on plant community characteristics and species diversity in meadow steppe [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(3): 766-772 (in Chinese)
- [12] Wu C D, Liu H, Yu Y, Zhao W Z, Guo L, Liu J T, Yetemen O. Ecohydrological insight: Solar farms facilitate carbon sink enhancement in drylands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118304
- [13] Lambert Q, Bischoff A, Enea M, Gros R. Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1137845
- [14] Moscatelli M C, Marabottini R, Massaccesi L, Marinari S. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area[J]. *Geoderma Regional*, 2022, 29: e00500
- [15] Zhang N, Zhang Z F, Cong Z T, Lei H M, Luo Y. The impact of photovoltaic power plants on surface energy budget based on an ecohydrological model[J]. *Renewable Energy*, 2023, 212: 589-600
- [16] Li Z C, Zhao Y Y, Luo Y, Yang L W, Li P D, Jin X, Jiang J X, Liu R, Gao X Q. A comparative study on the surface radiation characteristics of photovoltaic power plant in the Gobi desert [J]. *Renewable Energy*, 2022, 182: 764-771
- [17] Sturchio M A, Macknick J E, Barron-Gafford G A, Chen A P, Alderfer C, Condon K, Hajek O L, Miller B, Pauletto B, Siggers J A, Slette I J, Knapp A K. Grassland productivity responds unexpectedly to dynamic light and soil water environments induced by photovoltaic arrays [J]. *Ecosphere*, 2022, 13(12): e4334
- [18] Jarčuška B, Gálffyová M, Schnürmacher R, Baláz M, Mišík M, Repel M, Fulín M, Kerestúr D, Lackovičová Z, Mojžiš M, Zámečník M, Kaňuch P, Křištín A. Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscape [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119902
- [19] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. *中国图书馆学报*, 2010, 36(5): 60-68
- Zhao R Y, Xu L M. The knowledge map of the evolution and research frontiers of the bibliometrics [J]. *Journal of Library Science in China*, 2010, 36(5): 60-68 (in Chinese)
- [20] Fthenakis V, Blunden J, Green T, Krueger L, Turney D. Large photovoltaic power plants: Wildlife impacts and benefits [C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference. USA: IEEE, 2011: 002011-002016.
- [21] 自然资源部办公厅, 国家林业和草原局办公室, 国家能源局综合司. 关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知[EB/OL]. [2024-11-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/03/content_5749824.htm
- General Office of Ministry of Natural Resources, State Administration of Forestry and Grassland, General Affairs Department, National Energy Administration. Notice on Supporting the Development of Photovoltaic Power Generation Industry and Standardizing Land Use Management [EB/OL]. [2024-11-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/03/content_5749824.htm (in Chinese)
- [22] Tabassum S, Rahman T, Islam A U, Rahman S, Dipta D R, Roy S, Mohammad N, Nawar N, Hossain E. Solar energy in the United States: Development, challenges and future prospects [J]. *Energies*, 2021, 14(23): 8142
- [23] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 张民, 赵继锋, 李强. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 524-535
- Yao Y B, Zheng S Z, Yang Y, Zhang M, Zhao J F, Li Q. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(10): 524-35 (in Chinese)
- [24] Azam A, Ahmed A, Kamran M S, Hai L, Zhang Z T, Ali A. Knowledge structuring for enhancing mechanical energy harvesting (MEH): An in-depth review from 2000 to 2020 using CiteSpace [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111460
- [25] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, Maestre F T, Tavassoli M, Allen E B, Barrows C W, Belnap J, Ochoa-Hueso R, Ravi S, Allen M F. Environmental impacts of utility-scale solar energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 766-779
- [26] Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, Rivas J, Kucharski F, Kirk-Davidoff D, Bach E, Zeng N. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation[J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022
- [27] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(02): 242-253
- Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, Hu Z G, Wang X W. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains [J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese)
- [28] 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
- Zhou M R, Wang X J. Influence of photovoltaic power station engineering on soil and vegetation: Taking the Gobi Desert Area in the Hexi Corridor of Gansu as an example [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 132-138 (in Chinese)
- [29] 赵鹏宇, 高永, 陈曦, 高亮. 沙漠光伏电站对空气温湿度影响研究[J]. *西部资源*, 2016(3): 125-128
- Zhao P Y, Gao Y, Chen X, Gao L. Study on the influence of desert photovoltaic power station on air temperature and humidity [J]. *Western Resources*, 2016(3): 125-128 (in Chinese)
- [30] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 付贵全, 张卫星, 万翔. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 190-196, 212
- Zhang Z P, Shang W, Wang Q, Fu G Q, Zhang W X, Wan X. Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic (PV) power

- stations in desert region of Hexi Corridor [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 190-196, 212 (in Chinese)
- [31] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 赵素平, 余晔, 谭立海, 肖建华. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 15-21
Yin D Y, Ma L, Qu J J, Zhao S P, Yu Y, Tan L H, Xiao J H. Effect of large photovoltaic power station on microclimate of desert region in Gonghe basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 15-21 (in Chinese)
- [32] 杨若婷, 牛清河, 屈建军, 谢胜波, 王彦奎, 马超. 青海共和盆地固定支架式光伏阵列对阵内风场的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 114-121
Yang R T, Niu Q H, Qu J J, Xie S B, Wang Y K, Ma C. Influence of fixed-stand photovoltaic array on wind field in Gonghe Basin, Qinghai, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 114-121 (in Chinese)
- [33] 王桢仪, 汪季, 高永, 党晓宏, 蒙仲举. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 191-196
Wang Z Y, Wang J, Gao Y, Dang X H, Meng Z J. Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 191-196 (in Chinese)
- [34] 翟波, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 徐立杰, 刘子剑. 内蒙古中部草原区光伏电站对土壤水分及其脉冲响应的的作用机制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 49-56
Zhai B, Gao Y, Dang X H, Meng Z J, Xu L J, Liu Z J. Mechanism of photovoltaic power station on soil moisture and its impulse response in the grassland region of central Inner Mongolia [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2022, 43(6): 49-56 (in Chinese)
- [35] 陈晓栋, 褚庆全. 基于健康农业理念的光伏生态农业园区规划研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 45-51
Chen X D, Chu Q Q. Research on the planning of photovoltaic eco-agricultural park based on the concept of healthy agriculture [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(10): 45-51 (in Chinese)
- [36] Al Mamun M A, Dargusch P, Wadley D, Zulkarnain N A, Aziz A A. A review of research on agrivoltaic systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 161: 112351
- [37] Zhang B, Zhang R H, Li Y, Wang S W, Xing F. Ignoring the effects of photovoltaic array deployment on greenhouse gas emissions may lead to overestimation of the contribution of photovoltaic power generation to greenhouse gas reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(10): 4241-4252
- [38] Hua Y P, Chai J, Chen L, Liu P X. The influences of the desert photovoltaic power station on local climate and environment: A case study in Dunhuang photovoltaic industrial park, Dunhuang City, China in 2019 [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8): 1235
- [39] 杨凯迪, 李国庆, 卢潇楠. 中国西北地区光伏电站对植被空间聚集的影响[J]. 太阳能, 2023(10): 38-44
Yang K D, Li G Q, Lu X N. Effects of PV power stations on vegetation spatial aggregation in northwest China [J]. *Solar Energy*, 2023, (10): 38-44 (in Chinese)
- [40] 乔圣超, 喻朝庆, 黄逍, 刘昌义, 赵子健. “碳中和”下光伏对西北荒漠生态因子与植被分布的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1520-1529
Qiao S C, Yu C Q, Huang X, Liu C Y, Zhao Z J. The impacts of centralized photovoltaic power plants on ecological drivers and vegetation development in China's northwestern desert regions under the carbon neutrality strategy [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1520-1529 (in Chinese)
- [41] 王祎婷, 邹蕊, 王欣悦, 呼煜浩, 陈媛媛. 塔拉滩地区光伏电站建设对植被净初级生产力的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 153-161
Wang Y T, Zou R, Wang X Y, Hu Y H, Chen Y Y. Impact of photovoltaic power plant construction on the net primary productivity of vegetation in the Tala Shoal areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(24): 153-61 (in Chinese)
- [42] Marrou H, Dufour L, Wery J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 38-51
- [43] Marrou H, Guillioni L, Dufour L, Dupraz C, Wery J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 117-132
- [44] Grippo M, Hayse J W, O' Connor B L. Solar energy development and aquatic ecosystems in the southwestern United States: Potential impacts, mitigation, and research needs [J]. *Environmental Management*, 2015, 55(1): 244-256
- [45] Scherba A, Sailor D J, Rosenstiel T N, Wamser C C. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(12): 2542-2551
- [46] Stoms D M, Dashiell S L, Davis F W. Siting solar energy development to minimize biological impacts [J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 289-298
- [47] Hamada Y, Grippo M A. Remote-sensing application for facilitating land resource assessment and monitoring for utility-scale solar energy development [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 097694
- [48] Shirakawa M A, Zilles R, Mocelin A, Gaylarde C C, Gorbushina A, Heidrich G, Giudice M C, Del Negro G M B, John V M. Microbial colonization affects the efficiency of photovoltaic panels in a tropical environment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 160-167
- [49] Dorado-Morales P, Vilanova C, Peretó J, Codoñer F M, Ramón D, Porcar M. A highly diverse, desert-like microbial biocenosis on solar panels in a Mediterranean city [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29235
- [50] Porcar M, Louie K B, Kosina S M, Van Goethem M W, Bowen B P, Tanner K, Northen T R. Microbial ecology on solar panels in Berkeley, CA, United States [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 3043
- [51] Nash C, Clough J, Gedge D, Lindsay R, Newport D, Ciupala M A, Connop S. Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs: A London Olympic Park green roof case study [J]. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 2016, 62(1-2): 74-87
- [52] Peng C H, Yang J Q. The effect of photovoltaic panels on the rooftop temperature in the EnergyPlus simulation environment [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2016(1): 9020567
- [53] Salamanca F, Georgescu M, Mahalov A, Moustauou M, Martilli A. Citywide impacts of cool roof and rooftop solar photovoltaic deployment on near-surface air temperature and cooling energy demand [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, 161(1): 203-221
- [54] Hassanien Emam Hassanien R, Ming L. Influences of greenhouse-integrated semi-transparent photovoltaics on microclimate and lettuce growth [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 11-22
- [55] Tanner K, Martí J M, Belliure J, Fernández-Méndez M, Molina-Menor E, Peretó J, Porcar M. Polar solar panels: Arctic and Antarctic microbiomes display similar taxonomic profiles [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2018, 10(1): 75-79
- [56] Amaducci S, Yin X Y, Colauzzi M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production [J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 545-561
- [57] Uldrijan D, Kováčiková M, Jakimiuk A, Vavřková M D, Winkler J.

- Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 168: 106274
- [58] Bai Z Y, Jia A M, Bai Z J, Qu S M, Zhang M, Kong L H, Sun R H, Wang M J. Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1065899
- [59] Yue S J, Guo M J, Zou P H, Wu W, Zhou X D. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28 (14): 17506-17518
- [60] Wu C D, Liu H, Yu Y, Zhao W Z, Liu J T, Yu H L, Yetemen O. 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

责任编辑: 申青苗



第一作者简介:潘应鑫,兰州交通大学资源与环境专业硕士研究生。硕士在读期间成绩优异,表现突出,参与多项科研项目,多次参加学术交流和实践活动。在校期间,多次获得学业奖学金,获“优秀共青团员”“优秀党员”称号。在学习和生活中,态度积极向上,对待工作责任心强、勤恳踏实。



通讯作者简介:杨昊天,博士,中国科学院西北生态环境资源研究院副研究员。主要从事土壤生态学和植物生态学研究。主持国家自然科学基金委青年基金、科技基础资源调查专项专题、宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目、宁夏回族自治区重点研发计划等项目10余项。发表论文20余篇,其中SCI/EI收录10余篇。参与主编出版专著3部。相关成果获得宁夏回族自治区科技进步一等奖。入选宁夏回族自治区“高层次人才”及中华人民共和国科学技术部创新人才推进计划重点领域“沙区生态恢复与重建”创新团队。



通讯作者简介:吕晓东,副教授,兰州交通大学科研工作办公室主任,硕士研究生导师。主要从事全球气候变化生态学与环境生态修复等研究。主持和参与多项国家级和省部级科研课题,在SCI、EI、CSCSI等学术期刊发表相关学术论文10余篇,授权发明专利1件、实用新型专利1件、软件著作权1件,编著出版《甘肃农业环境问题与保护技术》,参与编著《农业源温室气体监测技术规程与控制技术研究》等。2019年获中华人民共和国农业农村部神农中华农业科技进步二等奖,2023年获甘肃省科技进步奖三等奖。