

DOI: 10.20103/j.stxb.202309262088

赵春黎, 马文勇, 张雅京, 程恩起, 曹飞, 孙浩, 严岩, 郭佳玮. 不同尺度光伏电站的生态效应. 生态学报, 2024, 44(23): 10964-10973.

Zhao C L, Ma W Y, Zhang Y J, Cheng E Q, Cao F, Sun H, Yan Y, Guo J W. Exploration of ecological effects of photovoltaic power stations at different scales. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10964-10973.

## 不同尺度光伏电站的生态效应

赵春黎<sup>1,2,3</sup>, 马文勇<sup>4,5</sup>, 张雅京<sup>6</sup>, 程恩起<sup>2</sup>, 曹飞<sup>1,3</sup>, 孙浩<sup>1,3</sup>, 严岩<sup>2,\*</sup>, 郭佳玮<sup>2</sup>

1 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100092

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100092

4 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094

5 中国科学院空天信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094

6 生态环境部环境发展中心, 北京 100029

**摘要:** 双碳背景下光伏产业发展潜力巨大, 未来或将占能源装机总量的 40%。大规模光伏电站必然对当地生态系统产生复杂影响, 更突显了探究光伏电站发展与生态保护之间平衡关系的重要性。基于文献综述的方法, 提出“微观局地-宏观区域-全球尺度”的光伏电站多尺度生态影响路径和概念框架, 梳理了光伏在全生命周期不同环节的外部性生态环境影响, 其负外部性以光伏组件生产和报废环节的环境污染、资源浪费问题为主, 正外部性, 表现在其在运营期间各项生态功能的提升、及在全球变化减缓方面的贡献。综述了各尺度所关注的研究方向和主要评估指标: 在局地微观尺度, 光伏电站主要影响地表温度、空气湿度和局地风速、土壤和植被等要素和指标; 在宏观区域尺度, 更多研究光伏电站对区域生态系统服务、对生态和经济效益的影响和改变, 以及光伏与区域生态保护修复协同发展的潜在方向; 在全球尺度重点关注对气候、生物多样性等全球性问题的作用; 并探讨了不同多尺度下生态影响和效应的关联关系。研究可以为光伏电站和区域生态的协同发展提供理论依据。

**关键词:** 生态效应; 光伏电站; 协同发展; 外部性

## Exploration of ecological effects of photovoltaic power stations at different scales

ZHAO Chunli<sup>1,2,3</sup>, MA Wenyong<sup>4,5</sup>, ZHANG Yajing<sup>6</sup>, CHENG Enqi<sup>2</sup>, CAO Fei<sup>1,3</sup>, SUN Hao<sup>1,3</sup>, YAN Yan<sup>2,\*</sup>, GUO Jiawei<sup>2</sup>

1 Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment the People's Republic Of China, Beijing 100092, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 National Key Laboratory of Satellite Remote Sensing for Environmental Protection, Beijing 100092, China

4 International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China

5 Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

6 Environmental Development Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

**Abstract:** Under the dual objectives of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, the photovoltaic (PV) industry holds tremendous development potential. It is estimated that PV could contribute to approximately 40% of the total installed energy capacity in the future. The establishment of large-scale PV power stations will inevitably lead to complex and multifaceted impacts on the local ecosystem. Therefore, it is crucial to explore and strike a balance between the development of PV power stations and ecological protection. This study employs a literature review method to propose a

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金 (42207523); 国家自然科学基金面上项目 (72174193)

**收稿日期:** 2023-09-26; **网络出版日期:** 2024-08-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

multi-scale ecological impact pathway and conceptual framework for PV power, encompassing “micro-local, macro-regional, and global scales.” The study systematically examines the external ecological environment impacts of PV power at different stages throughout its life cycle. The analysis identifies the negative externalities predominantly arising from environmental pollution and resource wastage during the production and disposal phases of PV components. Conversely, the positive externalities are highlighted during the operational phase, where PV power contributes to the enhancement of various ecological functions and plays a significant role in global change mitigation. On a micro-local scale, the research focuses on the primary effects of PV power stations on surface temperature, air humidity, local wind speed, soil, and vegetation. These micro-scale impacts are critical as they directly influence the immediate environment surrounding PV installations. At the macro-regional scale, the study delves into the broader impacts and changes brought about by PV power stations on regional ecosystem services. It evaluates the ecological and economic benefits, emphasizing the potential for synergistic development between PV installations and regional ecological protection and restoration efforts. This level of analysis is essential for understanding how regional policies and planning can integrate PV development with ecological conservation strategies. At the global scale, the study emphasizes the significance of PV power in addressing global issues such as climate change and biodiversity. It explores the interplay between ecological impacts and effects across different scales, highlighting the contributions of PV power to global ecological sustainability. In conclusion, this study provides a comprehensive analysis of the ecological impacts of PV power across multiple scales. By summarizing the main research and evaluation indicators at each scale, it offers a theoretical basis for the coordinated development of PV power and regional ecology. This multi-scale approach is expected to inform future strategies and policies, ensuring that the expansion of PV power is aligned with ecological preservation and sustainable development goals.

**Key Words:** ecological effects; photovoltaic power stations; synergistic development; externality

## 1 碳中和背景下我国光伏电站发展潜力与生态影响并存

能源系统的快速零碳化是实现碳中和目标的必要条件之一。我国正加速从“化石能源向可再生能源为主”的能源消费结构转化,这一背景下,光伏装机将不断攀升(图1)。2020年中国光伏行业协会向外界公布了“十四五”光伏装机需求,预计2060年光伏装机占比将达到40%,总装机量54.7亿kW,较目前有26倍的增长空间,复合年增速约为10%。

我国是太阳能资源丰富的国家之一,具有发展绿色能源的优势。光伏发电需占用大量的土地资源,十四五期间我国新增光伏用地面积约为2400—3200km<sup>2</sup>;2060年光伏用地总面积将达到58.5万km<sup>2</sup>[1]。如此大面积的光伏电站布设和运行,将不可避免地在光伏场地尺度和区域尺度产生一定的生态影响,如短期和局地尺度上引起光伏电站周边各项环境要素的改变,长期和宏观尺度上则对区域生态演替产生复杂影响。

目前光伏用地以戈壁光伏和草地光伏的占比最大[2]。草地和荒漠生态系统地处我国典型的生态脆弱区。光伏电站必然会对当地生态系统产生长期和复杂的影响。如何协调脆弱生态系统保护与光伏电站生态影响,成为亟需解决的重要的科学问题。随着光伏装机数量和规模的上升,这一问题也日益受到重视。在脆弱生态区发展光伏,有必要开展光伏电站对区域生态系统的影响评估。

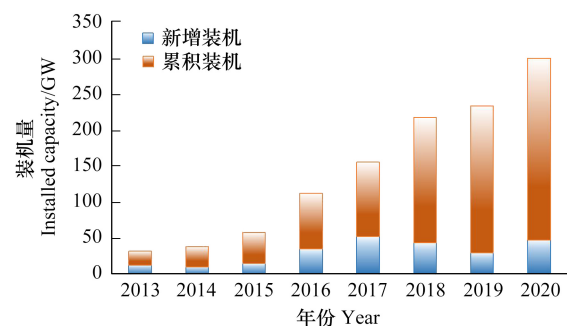


图1 我国历年光伏装机容量

Fig.1 Cumulative Photovoltaic Installed Capacity of China  
吉瓦(gigawatt,GW),1吉瓦(GW)=100万kW

### 2 不同尺度的光伏电站生态效应概念框架

通过分析光伏电站生态影响的路径,本研究提出了光伏电站生态影响的三个尺度,既,局地微观尺度的生态要素改变-区域宏观尺度的生态系统变化-全球尺度下减排的协同效应(图 2)。

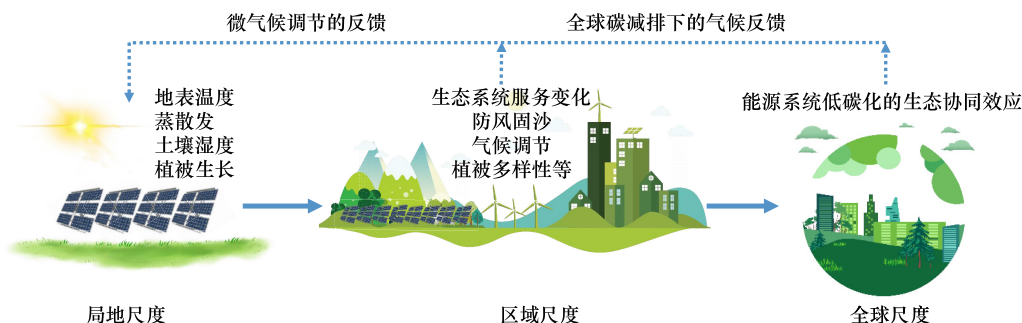


图 2 光伏电站生态系统影响的尺度特征

Fig.2 Scale Characteristics of Ecological Impact of Photovoltaic Power Stations

基于上述三个生态尺度,本研究也梳理和分类了光伏在全生命周期不同环节的外部性(图 3),分别是正外部性(正向的生态环境影响)、负外部性(负向的生态环境影响)、及局地尺度上一些生态环境要素的改变,这些改变还需要结合下垫面状况等研究其下一步可能产生的外部效应。通过外部性分析,揭示出光伏的负外部性,以光伏构件生产和报废环节处置不当造成的环境污染、资源浪费问题为主;当前光伏研究及其结论所揭示的,更多是其对局地生态环境要素的改变及其带来的正外部性,表现在其在运营期间各项生态功能的提升、以及在全球变化减缓方面的贡献。

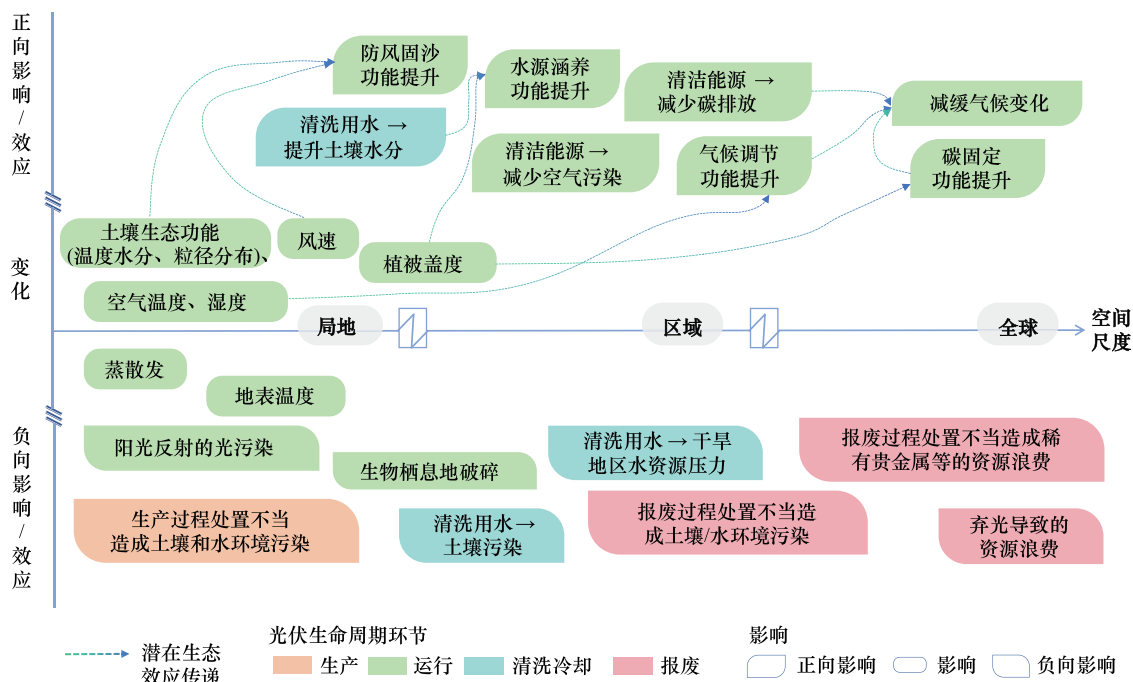


图 3 光伏的生态环境外部性分析

Fig.3 Environmental Externalities of Photovoltaic Power

图 3 中各类外部性的连接箭头,也揭示了光伏外部效应之间存在潜在的生态效应传递。例如土壤粒径和地表风俗的改变,可能会提升防风固沙生态功能、植被盖度和土壤水分的增加会提升水源涵养生态功能,等。基于这种生态效应的传递,本研究将光伏电站在局地尺度上的这类生态要素的改变,定义为光伏电站的生态影响,其通过潜在生态效应的传递,产生的生态功能的变化及更大尺度的生态系统变化,定义为光伏电站的生态效应。

光伏电站在局地微观、区域宏观和全球等不同空间尺度上的生态影响和效应也是相互关联的(图 2、3)。具体来看,微观尺度上更关注下垫面的水、热、土壤、植被等具体指标特征和变化,宏观尺度上的生态效应侧重区域综合效益和生态系统服务的时空动态变化,其中碳效应也是全球变化中重点关注领域,本研究中将其作为光伏电场在全球尺度上关注的典型问题。基于局地微观尺度-区域宏观尺度-全球尺度光伏电站的生态影响和效应的探讨,本研究在后文章中总结和梳理了各尺度所关注的生态要素和功能的变化。

从局地-区域-全球三个尺度的相互关联来看,区域尺度的生态影响,一定程度是局地生态要素变化的累积效应在区域尺度的呈现;全球和区域的生物多样性、温室气体和污染物的分布以及气候的变化,都源于小尺度的生态效应,这种变化也最终反馈到小尺度并产生影响<sup>[3]</sup>。从局地-区域-全球的尺度上的生态效应传递,也是通过生态系统服务跨尺度的空间流动来实现的<sup>[4]</sup>。全球尺度和区域尺度的生态效应,在不同尺度上所关注的指标侧重有所不同,其中碳效应、气候调节、生物多样性指标不仅是区域生态效应关注的指标,也是全球尺度上的热点问题;区域和全球尺度的气候调节,也会反馈到局地尺度下水、热、土壤、植被等要素的变化。后文也将着重梳理和综述上述各尺度下光伏电站生态影响和效应的研究进展。

### 3 局地微观尺度生态影响

#### 3.1 光伏电站对局地环境要素的影响

##### 1) 对地表温度、空气温度的影响

基于气象模型和实地观测的光伏电场对地表温度的影响研究显示,光伏电站建成后,太阳辐射能转换为电能,地表吸收的太阳辐射量降低,导致气温的日较差、年较差和地表温度回升速度均有所降低<sup>[5]</sup>。光伏电场不仅改变了地表温度的自然变化规律,而且还影响到周围 100m 的缓冲区<sup>[6-8]</sup>。对甘肃省金昌市西坡光伏电站的研究显示,对周围 400m 范围内的地表温度影响较大,且降温幅度与距离成反比<sup>[9]</sup>。光伏电站在夜间具有保温效应,而在白天有降温效应,白天是明显的“冷岛”,全年白天地表温度平均降幅为 0.65℃;夜晚是明显的“热岛”,全年夜晚地表温度平均升幅 0.54℃,但“热岛”和“冷岛”效应在不同季节差异很大<sup>[8,10-14]</sup>。水面光伏的研究,也表明了湖面光伏电站热效应的存在,表现为光伏板对湖体水温夏季存在遮蔽效应,冬季则为加热效应<sup>[15]</sup>。

##### 2) 对蒸散发和空气湿度的影响

针对光伏对地表水汽蒸发的影响,系统性的热力学模型揭示了戈壁大规模铺设光伏板后对土壤蒸发的影响,表明光伏电池板使得地表蒸发力减弱<sup>[16]</sup>。主要是由于大面积的电池板覆盖在地表,对水分的蒸散起到了阻碍作用,有效减缓水分的蒸散,使周边局部的空气湿度增加<sup>[5]</sup>。

##### 3) 对局地风速和沙尘天气的影响

大面积的光伏阵列会减弱地表风速,降低地表输沙率,并增加地表粗糙度<sup>[17-18]</sup>。在荒漠区域,光伏用地对区域环境的水热调节作用越大,降低沙尘暴爆发的作用就越明显<sup>[19-22]</sup>。

总体来说,关于光伏电站对局地气候要素的影响,侧重点也逐渐从单一要素的影响研究向多要素之间的关联关系转变,如基于植被动态的气候模型结果显示,在撒哈拉沙漠构建大规模风能和光伏发电,会形成“地表反射-植被-降水量”的正反馈,并起到区域生态修复的效果<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 光伏电站对土壤的影响

##### 1) 影响土壤温度和水分



光伏电站的布设不仅改变局地的微气候,也间接影响土壤温度和水分。对格尔木荒漠地区光伏电站土壤温度的观测显示,站内与站外土壤温度的日、年变化趋势均一致,在 10cm 的土壤浅层,站内土壤温度日较差明显低于站外,说明光伏电站对区域土壤温度具有调温作用<sup>[24]</sup>;冬季光伏电站是冷源,站外 5—180cm 各层土壤温度均明显高于站内,而站内各层土壤温度年较差均大于站外<sup>[10]</sup>。

太阳能电池板的遮挡作用,使地表水分蒸发减少,有效提高土壤的蓄水保墒能力,有利于土壤理化性质的改良<sup>[25]</sup>。王颖等观测了建站前后光伏阵列对土壤水分分布的影响,认为邻近光伏阵列的土壤水分值是提升的;随离光伏电场的距离增大影响逐渐减弱,在距离光伏阵列覆盖区 1400m 之外,土壤水分受到的影响可以忽略不计<sup>[26]</sup>。

## 2) 影响土壤表层不同粒径颗粒的分布

对土壤、沙漠的地表颗粒分布的特征分析,可以支撑区域尺度上光伏电场对防风固沙服务影响的探究。由于光伏板的阻挡作用,减弱了地表风速,降低了地表输沙率,土壤也侵蚀大幅减少<sup>[17]</sup>。对乌兰布和沙漠东北缘光伏电站土壤表层颗粒的空间异质特征分析指出,电站内、站区中心区域与南北两缘土壤粒度组成最细,从中心区域向电站南北两缘土壤粒径表现为先增粗后变细的趋势<sup>[18]</sup>。因此,光伏电站作为一种机械挡沙措施对沙漠地区的风沙流具有“再分配”作用,光伏电板及其支架的布设在防风固沙方面具有高立式沙障的作用<sup>[10]</sup>。

## 3.3 光伏电站对局地植被的影响

光伏电站改变局地微气候和土壤理化成分,对当地植被的生长、群落特征等产生间接的影响<sup>[27—28]</sup>。对土默特左旗羊草草原进行物种多样性植被调查,结果表明,光伏布设改变了草本植物种类分布,降低了草地自然植被的多样性<sup>[29]</sup>。戈壁光伏电站物种丰富度随土壤含水率的变化呈“U”型分布,而沙漠光伏电站土壤含水率与物种丰富度呈正相关关系<sup>[30]</sup>。光伏电站内的植物种类多样性的研究显示,光伏电站能够显著提高该区域的植被覆盖率,有利于改善脆弱生态环境<sup>[31]</sup>。此外,植物可以减少风尘对光伏板的磨损和干扰<sup>[10]</sup>。干旱半干旱区域,光伏电站建设对土壤、植被生态系统的促进作用大于其所带来的负面影响<sup>[27]</sup>。光伏不同的排列部署方式也会显著影响区域内小气候、土壤性质和植被特征<sup>[32]</sup>。总体来说,光伏电站对植被多样性的影响是复杂的,受区域气候、土壤、本底植被群落、光伏板布局特征等多重因素的作用和影响,光伏电站对植被多样性的影响因地理区域和生态系统而异。

## 4 区域宏观尺度效应

宏观区域尺度上的光伏生态效应,本研究重点讨论其对生态系统服务产生影响及产生的生态效益,并提出了光伏电站与区域生态保护修复的协同发展。

### 4.1 光伏电站对区域生态系统的影响

光伏电站部署后改变了下垫面生态环境要素,局地尺度生态要素的变化通过累积效应影响区域生态过程,进而作用于区域生态系统的格局、质量和过程,并可能进一步影响区域生态效益和生态安全格局。

光伏电站通过影响局地光、热、水等微气候,以及土壤和植被条件,综合作用于区域生态系统。相关研究关注光伏电场对陆地生态系统的影响,包括土壤碳/氮循环、植被多样性、动物活动、人类福祉等领域<sup>[11—12, 33—35]</sup>。戈壁区光伏研究显示,大面积的电池板覆盖起到了沙障的作用,在降低地表水分蒸发率的同时,有助于植被恢复,防风固沙并达到治理荒漠化的作用<sup>[19—22]</sup>。光伏电场对局地气候的影响表现为,使得区域降水不均匀<sup>[11]</sup>和区域的小气候向着“冬暖夏凉”趋势发展,对区域小气候有调节改善作用<sup>[5]</sup>。并且在长时间尺度上,可能进一步影响区域生态系统演替和区域生态安全格局。

### 4.2 光伏生态效益及经济效益

光伏生态效益的研究当前集中在两个方向:一是通过生态系统服务提升产生的级联效应;二是光伏扶贫工程下的经济收益。

生态效益一般将生态系统服务评估的物质质量/价值量作为效益<sup>[36-37]</sup>,从储水效益,防风固沙效益等角度来看,则是水土保持量、水源涵养量,防风固沙量或其价值。结合森林、荒漠草地等生态效益的研究<sup>[38-39]</sup>,笔者提出,光伏生态效益是区域生态系统因光伏电站产生的各项服务价值的总和。即,光伏通过对生态系统服务进行调节,导致区域生态效益的改变或提升。可以通过空间叠置法和适宜性评估,分析其适宜范围(效益最大区)。同时,生态系统服务级联效应下的当地居民福祉的提升也值得探讨。

除了生态效益外,光伏扶贫作为国家“十大精准扶贫工程”之一,也产生了直接经济效益。在国家光伏扶贫政策的支持下,已有很多成功案例。据报道,大同多个贫困村光伏年收益达到 20 多万元,收益可以持续 25 年左右;截至 2020 年,大同市光伏扶贫累计收益 1.69 亿元。青海塔拉滩光伏扶贫电站截止 2020 年 7 月累计发电就达到了 1.3 亿度,收入 9000 多万元,全省光伏年发电产值预期 8.8 亿元,扶贫收益 5.7 亿元,带动 7.7 万户 28.3 万贫困人口脱贫,占全省贫困人口的一半以上。

#### 4.3 光伏电站与区域生态保护修复的协同发展

我国在发展和布局光伏用地的同时,也重点实施了一批生态保护修复工程。光伏电站集中分布的荒漠和草地脆弱生态系统,也是我国生态保护修复工程的部署重点区域。其中戈壁荒漠区光伏的相关研究都揭示了光伏系统对区域植被恢复的促进作用<sup>[27,30]</sup>。以草地生态系统为例,本研究提出了光伏电站及其对生态保护修复的协同发展思路(图 4),包括生态脆弱区生态质量提升-防风固沙能力提升-大气联防联控等方面的区域生态保护修复的协同。

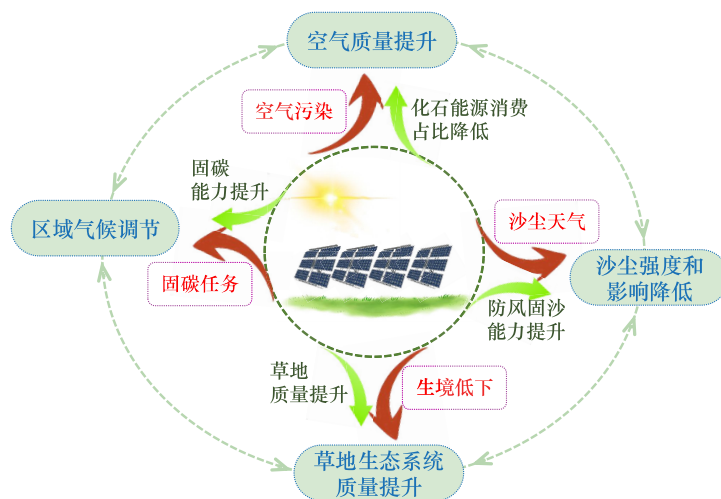


图 4 光伏电站与区域生态保护修复协同发展示意图

Fig.4 Illustration of Synergistic Development between Photovoltaic Power and Regional Ecological Protection and Restoration

空气质量提升方面,光伏产业主要是通过改善能源结构来实现区域空气质量提升。在与区域大气联防联控协同发展下,未来光伏占比增强(或将占到能源比重的 40%),化石能源消费的比例大幅降低,将实现空气污染物的源头削减。防风固沙方面,相关研究显示,西北地区光伏电站部署后可以削减沙尘强度<sup>[18-19]</sup>,防风固沙服务提高<sup>[22]</sup>。生境质量提升和区域气候调节方面,生境质量提升表现在植被多样性和生产力的提升,通过改变提升生态系统服务,并进一步作用于微气候的调节。相关研究显示,干旱半干旱区域光伏电站部署后植被盖度有所提升,物种多样性下降<sup>[40]</sup>。以上也是未来开展“光伏+”项目的一些理论和实践依据。

## 5 全球尺度生态效应

光伏电站在全球尺度的生态效应是通过气候调节和碳效应实现的。其中气候与植被间存在复杂的相互反馈关系;碳效应则主要包括光伏系统的碳排放特征、区域生态系统固碳服务<sup>[35]</sup>,及对能源系统的影响(图 5)。

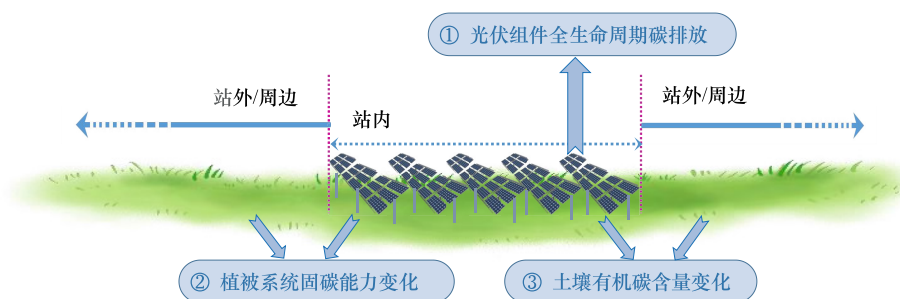


图5 光伏系统碳效应示意图

Fig.5 Diagram of Carbon Effect in Photovoltaic Systems

### 5.1 光伏电站系统的碳排放

光伏发电减少了化石能源的消耗和温室气体的排放,其减碳效应是关注的热点。光伏电站碳排放的主要研究方法是生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA),其中常用的评价指标为碳排放(Greenhouse gases, GHG)和能量回收期(Energy payback time, EPBT)<sup>[41]</sup>(表1)。

表1 光伏电站碳排放主要评估方法<sup>[41]</sup>

Table 1 Primary assessment methods for carbon emissions from photovoltaic power stations

指标 Index	内涵 Connotation	评估 assessment
碳排放 Carbon emission	光伏系统全生命周期中碳排放总量与总发电量比值	$\text{GHG}_{\text{e-rate}} = \frac{\text{GHG}_{\text{e-total}}}{E_{\text{LCA-output}}} = \frac{\text{GHG}_{\text{PV}} + \text{GHG}_{\text{BOS}}}{E_{\text{LCA-output}}}$ <p><math>\text{GHG}_{\text{e-rate}}</math> 为光伏发电每产生一单位电量时等价排放的碳量,单位: <math>\text{gCO}_2\text{-eq kW}^{-1} \text{h}^{-1}</math>; <math>\text{GHG}_{\text{e-total}}</math> 是光伏发电整个生命周期中碳排放总量,单位: <math>\text{gCO}_2\text{-eq}</math>; <math>E_{\text{LCA-output}}</math> 是光伏发电系统生命周期中总发电量,单位: <math>\text{kW} \cdot \text{h}</math></p>
能量回收期 Energy recuperation period	光伏系统发电量达到其生命周期中总耗能的年限	$\text{EPBT} = \frac{E_{\text{input}} + E_{\text{BOS.E}}}{E_{\text{output}}}$ <p><math>E_{\text{input}}</math> 表示光伏组件生命周期中所需的所有能量,单位: MJ。 <math>E_{\text{BOS.E}}</math> 为光伏发电系统中能量平衡设备(BOS)需要的所有能量,单位: MJ。 <math>E_{\text{output}}</math> 表示光伏发电系统生命周期中年平均发电量,单位: MJ</p>

以上指标的评估,区域差异较大。部分 LCA 研究结果显示,光伏电站生命周期中,碳排放量为  $16\text{--}40 \text{ gCO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ <sup>[42-45]</sup>,其全生命周期的总排放强度为  $0.26 \text{ kg kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ <sup>[46]</sup>,国内关于光伏电站生命周期能量回收期为  $3\text{--}6\text{a}$ <sup>[47]</sup>。光伏组件差异也是全生命周期评估结果差异的原因之一<sup>[48]</sup>。

同时,全生命周期视角下光伏电站生态影响包含其生产、使用和回收阶段各阶段。本研究聚焦讨论其在使用过程中的生态影响,但也不能忽视其在生产和回收阶段的外部效应。如生产环节中,硅基光伏电池制造中使用的各类化学物质的环境污染风险,能源和碳排放过程的环境效应<sup>[49]</sup>;光伏回收阶段面临的有害物质处理和资源再利用<sup>[50-51]</sup>;以及在全生命周期中对人类健康和生态系统健康的影响等<sup>[48]</sup>。

### 5.2 区域固碳服务的变化

大规模光伏电站的建设,对地表环境的改变非常显著,起其对生态系统固碳能力的影响,主要包括植被生产力和土壤有机碳库两方面。

光伏电站影响生态系统生产力<sup>[52]</sup>,生产力是反映生态系统固碳能力的重要指标,植被恢复可显著提高有机碳含量<sup>[53]</sup>,越来越多的研究开始关注光伏电站对植被生产力的影响。土壤有机碳含量和动态变化影响着全球碳循环<sup>[54]</sup>, $0\text{--}100\text{cm}$  土层土壤的碳储量就占陆地植被碳库的  $2/3$ <sup>[55]</sup>,土壤有机碳也是衡量光伏电站土壤修复程度的主要指标之一<sup>[52]</sup>。



### 5.3 能源系统低碳化的生态协同

大规模光伏电站的运行,也产生了生态与能源系统低碳化的生态协同效应,包括减少温室气体排放、能源系统低碳化和生态协同效应三个方面。减少温室气体排放角度,光伏电站产生的是可再生能源,相较于煤、石油或天然气等燃料,其在运行期间的温室气体排放极低。随着光伏电力的增长,全球的碳排放量减少,有助于抑制气候变暖<sup>[56]</sup>,对我国屋顶光伏减排潜力的分析结果显示,仅2020年,中国354个城市的RPV总减排潜力为40亿吨,接近碳减排量的70%电力和热力部门的排放,而北方和东北电网的屋顶光伏单位发电量碳排放的减缓则更为明显<sup>[49]</sup>。能源系统的低碳化角度,光伏技术的普及和成本下降推动了全球能源系统的低碳化转型,这不仅减少温室气体排放,还可以减少与化石燃料开采和使用相关的其他环境问题,如空气污染、水资源污染和生态破坏<sup>[57]</sup>,在全球气候变化减缓战略中,相关研究显示,从抵消入射太阳辐射的表面反射率降低所造成的增温影响所需的“收支平衡时间”(BET)指标来看,光伏电站的效率在很大程度上优于植树造林<sup>[58]</sup>;生态协同角度,除了降碳的其他生态效益,如,减少化石燃料的燃烧降低了大气污染物,进而改善空气质量,减少人类健康问题和环境损害等<sup>[59]</sup>。

光伏电站在全球尺度上的生态效应,也是其在区域尺度生态影响的空间外溢<sup>[60]</sup>,生物多样性问题同样也是全球尺度和区域尺度上都需要考虑的问题,但不同尺度上关注的问题侧重点则有所不同。如在区域尺度上表现为光伏影响下的植物群落的分布和结构变化;在全球尺度下,生物多样性可能会稳定草地等生态系统的类型的生产力,而不是提高其生产力,这一尺度下还需要讨论生物多样性和固碳效应的权衡关系<sup>[61]</sup>。

## 6 总结与讨论

本文提出了光伏电站在局地-区域-全球三个尺度上影响生态环境和效应研究,探讨了光伏不同生命周期环节中的生态环境外部性,构建了不同尺度的光伏电站生态效应概念框架,以为未来光伏电站生态影响的系统性评估提供理论框架和依据。

1)通过分析光伏电站生态影响的路径,本研究提出了光伏电站生态影响的三个尺度,分别是:局地微观尺度的生态要素改变、区域宏观尺度的生态系统变化、全球尺度下减排的协同效应,并具体展开综述了不同尺度上当前国内外研究所关注的评估要素和功能指标。不同空间尺度上的生态影响和效应也是相互关联的,从局地-区域-全球的尺度上的生态效应传递,也是通过生态系统服务跨尺度的空间流动来实现的。

2)研究梳理了光伏在全生命周期不同环节的外部性,通过外部性分析,揭示出光伏的负外部性,以光伏构件生产和报废环节处置不当造成的环境污染、资源浪费问题为主;对局地生态环境要素的改变及其带来影响的研究结果以正外部性居多,表现在运营期间各项生态功能的提升、以及在全球变化减缓方面的贡献。解决光伏构件的环境污染和资源浪费问题,成为降低光伏负外部性影响的关键环节。

3)局地和区域尺度的光伏电站生态影响研究,从研究方法来说,当前多集中在单个光伏场地的影响评估,研究手段以野外监测为主,尚不足以支撑样方尺度上光伏电站生态影响规律和特征的总结。以遥感与野外调查相结合的方法,获取区域内同类型光伏电站的斑块及生态参量数据,提炼和总结区域光伏电站对植被生态影响的规律和机制,也将成为光伏生态影响的重要技术方法。从研究要素来看,当前研究多聚焦于对具体生态要素的时空动态评估,如地表温度,土壤水分、NDVI等具体要素的动态变化,缺少关于生态影响的驱动因素的解析,光伏生态效应的驱动机制与响应研究也有待开展。

4)区域尺度上探讨光伏生态影响与生态保护修复的协同关系也将是未来的研究方向之一。不同区域光伏与生态保护修复的协同内容具有地域差异性,需根据当地实际情况来分析讨论。有必要开展针对不同区域的不同生态生态系统类型的光伏生态效应的规律和特征总结。

### 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. *Nature*,



- 2023, 619(7971): 761-767.
- [ 2 ] 温礼, 张荣慧, 苏伟, 王伟. 我国光伏用地遥感监测分类体系和解译标志建立方法研究. 国土资源信息化, 2017(4): 32-36.
- [ 3 ] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology: the Robert H. MacArthur award lecture. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943-1967.
- [ 4 ] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [ 5 ] 卢霞. 荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析——以酒泉市东洞滩百万千瓦光伏示范基地为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [ 6 ] Yu X L, Guo X L, Wu Z C. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote sensing*, 2014, 6(10): 9829-9852.
- [ 7 ] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [ 8 ] 李国庆, Armstrong Alona, 刘哲. 光伏电场对地表温度的影响研究. 太阳能学报, 2020, 41(12): 117-123.
- [ 9 ] 刘哲, 杨华, 陈星宇, 李国庆, 沈彪群. 光伏电场对地表温度的影响分析. 地理空间信息, 2019, 17(10): 20-23, 10.
- [ 10 ] 王祯仪, 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. 水土保持通报, 2019, 39(1): 191-196.
- [ 11 ] Armstrong A, Waldron S, Whitaker J, Ostle N J. Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 1699-1706.
- [ 12 ] Armstrong A, Ostle N J, Whitaker J. Solar power plants microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental research letters*, 2016, 11(7): 074016.
- [ 13 ] Fthenakis V, Yu Y H. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms//2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, USA, 2013.
- [ 14 ] Chang R, Shen Y B, Luo Y, Wang B, Yang Z, Guo P. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable energy*, 2018, 118.
- [ 15 ] Li P D, Gao X Q, Li Z C, Ye T G, Zhou X Y. Effects of fishery complementary photovoltaic power plant on near-surface meteorology and energy balance. *Renewable Energy*, 2022, 187: 698-709.
- [ 16 ] 徐珂. 我国西北综合能源基地构建的意义及其潜在环境影响分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [ 17 ] 姚娜, 吴薇, 程艳辉, 明海廷. 光伏电场水土保持措施配置初探——以鄯西县光伏发电工程为例. 亚热带水土保持, 2014, 26(1): 52-55.
- [ 18 ] 赵鹏宇, 高永, 党晓宏, 辛静, 刘斌, 娜仁格日勒, 丁延龙. 乌兰布和沙漠东北缘光伏电站表层土壤颗粒空间异质特征. 内蒙古林业科技, 2016, 42(2): 11-14, 25.
- [ 19 ] 刘世增, 常兆丰, 朱淑娟, 韩福贵, 仲生年, 段小峰. 沙漠戈壁光伏电站的生态学意义. 生态经济, 2016, 32(2): 177-181.
- [ 20 ] 中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [ 21 ] Chang Z F, Liu S Z, Zhu S J, Han F G, Zhong S N, Duan X F. Ecological functions of PV power plants in the desert and Gobi. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(2): 130-136.
- [ 22 ] 常兆丰, 刘世增, 王祺, 王飞, 孙涛, 刘淑娟, 王芳琳. 沙漠、戈壁光伏产业防沙治沙的生态功能——以甘肃河西走廊为例. 生态经济, 2018, 34(8): 199-202, 208.
- [ 23 ] 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. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022.
- [ 24 ] 高晓清, 杨丽薇, 吕芳, 马丽云, 惠小英, 侯旭宏, 李海玲. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1439-1445.
- [ 25 ] 汤懋苍, 孙淑华, 钟强, 吴士杰. 下垫面能量储放与天气变化. 高原气象, 1982, 1(1): 24-34.
- [ 26 ] 王颖, 李国庆, 周洁, 王梦瑶, 宋媛. 光伏阵列对土壤水分的影响研究. 太阳能, 2021(7): 53-58.
- [ 27 ] 王涛, 王得祥, 郭廷栋, 张岗岗, 赵世雄, 牛怀诚, 卢舜瑜, 林虎. 光伏电站建设对土壤和植被的影响. 水土保持研究, 2016, 23(3): 90-94.
- [ 28 ] 郭尧, 郭元朝. 浅谈分布式光伏发电与浑善达克沙地“小生物经济圈”结合的发展模式. 太阳能, 2016(10): 14-18.
- [ 29 ] 翟波, 高永, 党晓宏, 陈曦, 程波, 刘湘杰, 张超. 光伏板对羊草群落特征及多样性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2237-2243.
- [ 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. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 190-196, 212.
- [ 31 ] 武广萍, 李兴德, 何巍, 张鹏. 光伏电站对生态敏感地区的环境影响分析及防治. 甘肃科技, 2014, 30(22): 78-80.
- [ 32 ] 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. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(10): 4241-4252.
- [ 33 ] Gabor P, Jombach S. The relation between the biological activity and the land surface temperature in Budapest. *Applied ecology & environmental*

- research, 2009, 7(3):241-251.
- [34] Edalat M M, Stephen H. Effects of two utility-scale solar energy plants on land-cover patterns using SMA of Thematic Mapper data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 1139-1152.
- [35] Nemet G F. Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(6): 2173-2178.
- [36] 伏文兵, 严友进, 李华林, 林栳桓, 胡刚, 黄朝海. 岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价. *西南大学学报: 自然科学版*, 2021, 43(7): 146-156.
- [37] 杨晓辉, 杨凤鹏, 罗晚霞. 彭阳县流域治理生态效益分析. *中国水土保持*, 2021(7): 43-46.
- [38] 赵轩. 伊春国有林区森林生态系统效益核算及效益提升研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- [39] 荣浩, 何京丽, 张欣, 张林, 杨红艳. 荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 295-300.
- [40] 董霁红, 吉莉, 房阿曼. 典型干旱半干旱草原矿区生态累积效应. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1945-1956.
- [41] 李芬, 杨勇, 赵晋斌, 陈正洪, 高晓清, 申彦波. 光伏电站建设运行对气候环境的能量影响. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 71-77.
- [42] Dones R, Frischknecht R. Life - cycle assessment of photovoltaic systems; results of Swiss studies on energy chains. *Progress in Photovoltaics*, 1998, 6: 117-125.
- [43] Fthenakis V M, Kim H C, Alsema E. Emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(6): 2168-2174.
- [44] Mason J E, Fthenakis V M, Hansen T, Kim H C. Energy payback and life-cycle CO<sub>2</sub> emissions of the BOS in an optimized 3 · 5? MW PV installation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2006, 14(2): 179-190.
- [45] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems; Japanese case. *Energy*, 2005, 30(11/12): 2042-2056.
- [46] 焦在强, 崔焱, 闫兴国, 张要玲, 于奇. 光伏电站项目全生命周期碳排放研究. *中国资源综合利用*, 2023, 41(10): 158-160.
- [47] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究. *太阳能*, 2009(1): 9-14.
- [48] Jia X J, Zhou C L, Tang Y H, et al. Life cycle assessment on PERC solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 227(5): 111112. DOI:10.1016/j.solmat.2021.111112.
- [49] 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. *Nature Communications*, 2023, 14: 2347.
- [50] 陈琛, 焦芬, 刘维, 李炜焱, 杨璧玮, 洪雪丽. 废旧晶体硅光伏组件资源化回收研究进展. *化工环保*, 2022, 42(5): 511-517.
- [51] 吴智朋, 高德东, 王珊, 魏晓旭, 邵明玺, 辛元庆. 废旧晶体硅光伏组件回收技术研究进展. *机械工程学报*, 2023, 59(7): 307-329.
- [52] 赵晶, 郝孟婕, 王清宇, 刘美英. 不同植被恢复模式下光伏电站土壤有机碳储量分布特征. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 1033-1039.
- [53] 董云中, 王永亮, 张建杰, 张强, 杨治平. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 955-960.
- [54] 黎鹏, 张勇, 李夏浩祺, 孙彩丽, 段奥华, 刘国彬. 黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 29-33.
- [55] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [56] Creutzig F, Agoston P, Goldschmidt J C, Luderer G, Nemet G, Pietzcker R C. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy*, 2017, 2(9): 17140.
- [57] Jacobson M Z, Delucchi M A, Cameron M A, Mathiesen B V. Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes. *Renewable Energy*, 2018, 123: 236-248.
- [58] Stern R, Muller J D, Rotenberg E, Amer M, Segev L, Yakir D. Photovoltaic fields largely outperform afforestation efficiency in global climate change mitigation strategies. *PNAS Nexus*, 2023, 2(11): pgad352.
- [59] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(26): 12052-12057.
- [60] 鞠昌华, 裴文明, 张慧. 生态安全: 基于多尺度的考察. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5): 626-634.
- [61] Wang Y F, Cadotte M W, Chen Y X, Fraser L H, Zhang Y H, Huang F M, Luo S, Shi N Y, Loreau M. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in natural grasslands. *Nature Communications*, 2019, 10: 3207.