

光伏电站建设对土壤环境的影响综述

吴昌焱

西南林业大学水土保持学院

DOI:10.12238/eep.v8i3.2624

[摘要] 随着全球对可再生能源的需求日益增加,光伏电站作为一种重要的清洁能源技术,在推动能源转型和应对气候变化方面发挥着重要作用,其规模化建设日益加快。然而,光伏电站对土壤环境的潜在影响逐渐受到关注。本文系统梳理了当前光伏电站建设过程中对土壤环境的主要干扰路径,涵盖土壤结构破坏、理化性质变化、微气候调节及微生物群落组成改变等方面。研究发现,光伏板的遮阴效应显著改变了地表温湿条件,进而影响土壤水分循环和有机质含量;场地压实与土地覆被改变则导致土壤通气性下降和养分流失;与此同时,土壤微生物多样性与功能结构亦发生显著变化,可能削弱土壤生态功能。针对上述问题,本文进一步探讨了“农光互补”等生态调控模式在缓解土壤退化、促进土地可持续利用方面的作用。结果表明,合理的空间布局与生态修复措施可有效提升光伏用地的生态承载力,降低其对土壤系统的负面影响。本研究为评估光伏电站生态风险、制定科学建设规范及推动可再生能源绿色发展提供了理论依据与政策参考。

[关键词] 光伏电站; 土壤环境; 植被; 土壤微生物

中图分类号: TV74 **文献标识码:** A

A Review on the Impact of Photovoltaic Power Station Construction on Soil Environment and Its Regulation Strategies

Changyan Wu

College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University

[Abstract] With the increasing global demand for renewable energy, photovoltaic (PV) power stations, as a crucial clean energy technology, play a significant role in promoting energy transition and addressing climate change, leading to accelerated large-scale construction. However, the potential impacts of PV power stations on the soil environment have gradually garnered attention. This paper systematically reviews the primary disturbance pathways of PV power station construction on the soil environment, encompassing soil structure disruption, changes in physicochemical properties, microclimate regulation, and alterations in microbial community composition. The study reveals that the shading effect of PV panels significantly modifies surface temperature and humidity conditions, thereby affecting soil water cycling and organic matter content. Site compaction and land cover changes lead to reduced soil aeration and nutrient loss. Concurrently, significant shifts in soil microbial diversity and functional structure may weaken soil ecological functions. In response to these issues, this paper further explores the role of ecological regulation models, such as "agrivoltaics," in mitigating soil degradation and promoting sustainable land use. The results indicate that rational spatial planning and ecological restoration measures can effectively enhance the ecological carrying capacity of PV land use and reduce its negative impacts on soil systems. This study provides theoretical foundations and policy references for assessing the ecological risks of PV power stations, formulating scientific construction standards, and advancing the green development of renewable energy.

[Key words] photovoltaic power station; soil environment; vegetation; soil microorganisms

目前,日益严峻的全球环境危机正推动能源体系向高效、清洁、多元化、智能化的方向转变。太阳能是一种可再生能源,是最清洁的能源之一,已成为人类使用能源的重要组成部分。太阳能光伏发电是一种经济有效的太阳能利用模式,其碳足迹小,对环境没

有危害,在缓解全球气候变化、减少温室气体排放以及保障能源供应安全等方面具有显著优势^[1]。根据《世界能源统计年鉴2023》的统计数据,2022年全球光伏发电装机容量仅占总电力容量的4.5%,预计至2030年,将提供全球15%的电力供应。

1 全球光伏产业发展概况

全球光伏产业在近两年经历了快速发展,但同时也面临着一些挑战。总体来看,中国在全球光伏市场中占据主导地位,但在政策、创新和市场竞争力等方面,国内外存在显著差异。

全球市场概况全球范围内,光伏产业正经历着从化石燃料向可再生能源转型的关键时期^[2]。太阳能作为最常见、最廉价、最成熟的可再生能源技术,在全球能源结构中占据着越来越重要的地位。特别是在应对气候变化和能源危机的背景下,光伏发电的重要性日益凸显。2024年,全球光伏新增装机容量持续增长。然而,由于主要光伏组件需求普遍面临经济疲弱、电网消纳能力不足以及关税壁垒等挑战,光伏市场增速有所放缓。尽管如此,国际能源署预测到2030年全球光伏装机容量将突破5TW。

1.1 中国光伏产业。中国光伏产业在全球市场中占据主导地位,拥有最大的光伏技术专利数量,控制着从原材料到光伏组件的供应,并且在光伏新增装机容量方面也处于领先地位。中国政府对可再生能源的大力支持,也推动了国内光伏产业的快速发展。中国光伏产业的政策导向正从政府主导向市场驱动转变,目标是在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。政策补贴在光伏产业的发展中起到了重要的推动作用。中国光伏企业在技术创新方面取得了显著进展,但仍面临着缺乏核心技术的挑战。为了更好地追赶关键技术领域,需要明确中国当前的光伏技术积累。为实现“双碳”目标,中国能源领域正朝着可再生能源电力系统转型,光伏新能源逐渐从辅助能源发展为替代能源,甚至成为主要的发电形式。

1.2 国外光伏产业。本土化和贸易保护主义相结合的政策。欧洲光伏市场受到经济、电网和贸易壁垒等因素的影响,增长速度放缓。欧洲光伏产业协会预测,未来几年欧洲美国的光伏产业发展受到政策、创新和市场动态的综合影响。与中国不同,美国采取了光伏市场将保持增长态势。其他发展中国家也逐渐认识到太阳能的潜力,并积极发展光伏产业。例如,埃及正在借鉴中国的成功经验,发展本国的光伏产业。全球光伏产业正朝着更加多元化和可持续发展的方向发展。国际合作和技术交流将有助于推动全球光伏产业的共同发展。

2 光伏电站建设对土壤环境的影响

2.1 土壤结构与成分。光伏电站的建设可能改变土壤的物理结构和化学成分。光伏电站会通过改变土地利用模式,影响土壤的有机碳含量及其组分。一项针对黄河三角洲的研究指出,不同的土地利用方式(如农田、草地和林地)会显著影响土壤的质地、团聚体稳定性和土壤碳含量。在光伏电站建设区域,土壤压实可能是个问题。有研究表明,土壤容重会受到土地利用变化的影响。土壤压实会降低土壤孔隙度,减少水分渗透,从而影响植物生长和养分循环。也有研究发现,通过引入植被恢复措施,可以改善光伏电站土壤的物理和化学性质^[3]。种植豆科植物可以增加土壤的氮含量,提高土壤肥力。一些研究表明,光伏板可能会改变土壤的pH值和养分含量。例如,铜和锌在鸟粪石沉淀过程中的共沉淀现象,表明重金属可能会污染土壤。此外,光伏设施的

钢桩基础可能因土壤腐蚀而影响土壤环境。杨永明等研究了特高压直流输电线路接地极附近土壤结构对电力变压器直流偏置的影响,也说明了电力设施对土壤的影响。

2.2 土地利用模式。光伏电站的建设无疑改变了土地利用模式。大规模的光伏电站通常占据大片土地,这可能导致原有植被的破坏和土壤的扰动。为建设光伏电站,部分农田被征用,直接减少了耕地面积。许多光伏电站选址在干旱、半干旱地区的草地或荒地上,改变了原有植被类型和生态功能。部分光伏项目可能占用林地,导致森林面积减少,影响生物多样性。通过合理的土地管理,可以将光伏电站与农业生产相结合,实现土地的综合利用。例如,农光互补模式可以在光伏板下种植耐阴作物,提高土地利用效率。一项在中国西南干热河谷地区的研究表明,在光伏阵列下种植花生和黑麦草可以改善土壤质量^[4]。

2.3 微气候与土壤水分。光伏板的覆盖会改变地表的微气候条件,特别是土壤温度和湿度。研究表明,光伏电站具有隔热和保温的功能,对浅层土壤的影响较大。具体来说,光伏板可以降低地表温度,减少水分蒸发,从而提高土壤湿度^[5]。土壤水分主要受土壤温度的影响,同时也与土壤深度、光伏面板类型以及降水量等因素有关。大型光伏电站的能量收支和水循环变化会影响表层土壤的温度和湿度,产生明显的生态水文效应。光伏面板主要通过反射太阳辐射,在地面形成阴影,从而降低土壤温度,减少了光伏面板下土壤的水分蒸发。光伏面板还能通过改变降雨的空间分布,增加面板边缘土壤的水分。由于光伏面板的反射率和热容量较低,因此光伏面板正下方的空气比其他区域温度上升更快、湿度更低,增加了土壤水分的蒸发和植物的蒸腾作用,因此光伏电站的建设对该区域的土壤水分存在复杂的影响。光伏面板通常具有增湿作用,可以增加土壤水分分布的局部异质性,即光伏电站及其周围的土壤含水量普遍较低,光伏面板阵列之间和组件下方的土壤含水量相对较高。斜单轴光伏面板的增湿作用显著优于固定倾斜光伏面板,并且浅层土壤的湿度显著高于站外。

2.4 土壤微生物。光伏电站的建设对土壤微生物群落产生了显著影响,这种影响体现在群落结构、多样性以及功能上。光伏板的铺设改变了地表光照、温度和湿度等环境因子,进而影响土壤微生物群落的组成和多样性。在光伏电站的阴影区和非阴影区,植物和真菌群落的 α 多样性受到显著影响^[6]。光伏电站还会影响土壤细菌和真菌网络的组装过程和共现模式。有研究发现,光伏电站建设后,土壤微生物群落结构发生显著变化,一些有益菌如固氮菌的数量增加,而另一些有害菌的数量减少。土壤微生物在维持土壤生态功能方面起着关键作用,包括养分循环、有机质分解和污染物降解等。光伏电站的建设可能影响这些功能。例如,光伏电站的建设可能导致土壤微生物碳和磷限制加剧。此外,重金属污染也可能影响土壤微生物群落的多样性和生物量,以及转化酶的活性。

2.5 植被。光伏电站的建设对植被产生多方面的影响,涉及植被多样性、生物量、土壤性质和微气候等多个方面。这些影响在很大程度上取决于光伏电站的规模、所处生态环境以及采

取的植被管理措施。光伏电站的建设可能导致植被多样性和生物量的显著变化。一些研究表明,光伏板的遮蔽效应会影响植物的光合作用,从而改变植物群落的结构和组成^[7]。在青海沙漠地区的大型光伏电站中,物种丰富度和Shannon-Wiener指数都发生了显著变化。在干旱沙地生态系统中,光伏板可以通过改善土壤表面的微环境来显著促进植被恢复。植被恢复可以增加土壤碳储量。在半干旱地区,通过植树造林等措施,可以有效提高光伏电站区域的土壤碳储量,尤其是在植被恢复的后期,对植物位置的合理选择以及种植密度的控制,将有助于对光伏电站区域的土壤进行改良。

2.6光伏电站的潜在不利影响。光伏电站作为一种清洁能源,在应对气候变化和能源转型中扮演着重要角色,但其建设和运营也可能带来一些潜在的不利影响,主要体现在对生态环境、土地利用以及社会经济等方面。对陆地生态系统的影响,光伏电站的建设可能对陆地生态系统产生多方面的影响。研究表明,光伏电站的建设可能导致土地利用类型的改变,进而影响地表能量平衡^[8]。一些研究发现,光伏电站的建设可能导致植物多样性和土壤微生物多样性降低。此外,光伏电站也可能对土壤理化性质产生影响,改变土壤碳储量。大规模的光伏电站建设需要平整土地,这可能会破坏地表植被,导致水土流失加剧。在干旱、半干旱地区,地表水和地下水中有相当数量的可溶性盐,在强烈的地表蒸发作用下,盐类在土壤表面或内部的运移和积聚会加剧土壤的局部盐渍化,进而破坏土壤结构,导致土壤质量下降。光伏电站运营期间,土壤温、湿度变化引起的盐分运移和积累会导致光伏面板间形成明显的风蚀区和堆积区,面板下形成收缩区。当严重的风蚀区和堆积区出现时,原有的土壤结构会被彻底破坏,自然植被难以定植和生长,土壤退化加剧还会带来一定的环境安全问题。

光伏面板还会因火灾、热冲击以及气象等因素造成意外损坏,受损部分暴露在雨水中时,产生的渗滤液进入土壤和水体环境也会产生次生的环境危害。光伏组件的生产和回收过程中可能会产生废水和废气,如果不加以处理,可能会对水和土壤环境造成污染。环境生命周期评估光伏电站的环境生命周期评估显示,光伏组件的生产、运输和安装过程需要消耗大量的能源和材料,这也会对环境产生一定的影响。尽管光伏发电本身不会释放有毒物质,但在整个生命周期中,仍然存在环境影响。在土地资源紧张的地区,光伏电站可能会占用农业用地或其他具有生态价值的土地。还可能对景观、居民生活以及电网稳定性产生一定的影响。大规模的光伏电站可能会改变原有的景观,引发居民的视觉不适。此外,光伏电站的并网可能会对电网的稳定性带来挑战,需要采取相应的技术手段来解决。

3 结论与建议

光伏电站的建设在推动清洁能源利用和减少温室气体排放方面具有显著的优势,但其对土壤环境的影响也不容忽视。研究表明,光伏电站可能通过压实土壤、改变土地利用方式以及光伏板的遮阳效应,显著影响土壤的物理性质和生态功能,进而影响

植物生长和土壤健康。尽管如此,通过实施合理的生态调控措施,如农光互补和适当的植被恢复,能够有效减轻这些负面影响,促进土壤环境的改善和恢复。土壤微生物群落的变化则表现出复杂的生态反应,其中一些有益微生物的增多可能有助于提升土壤的生态功能。然而,大规模光伏电站的建设仍然可能带来生态系统的压力,如土地资源的过度占用、植被破坏及水土流失等问题。为了实现光伏产业的可持续发展,制定相应的政策与技术措施,以减少对环境的负面影响。确保光伏电站建设在促进能源转型和生态环境保护之间达到平衡,为未来光伏产业的健康、可持续发展奠定基础。未来在推进光伏产业发展的过程中,应综合考虑土地资源承载能力和生态安全底线,优化光伏电站的规划选址与管理措施,实现生态保护与新能源开发的协调统一。通过建立科学的评估体系与动态监测机制,有助于保障光伏发展路径的可持续性。

[项目]

云南省科技计划重点项目“光伏太阳能利用模式对石漠生生态系统碳汇影响效应及其调控策略”(202401AS070014)。

[参考文献]

[1] ZHANG L B, DU Q, ZHOU D Q, et al. How does the photovoltaic industry contribute to China's carbon neutrality goal? analysis of a system dynamics simulation[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 151868.

[2] Wang F, Liu W. The Current Status, Challenges, and Future of China's Photovoltaic Industry: A Literature Review and Outlook[J]. Energies, 2024, 17(22): 5694–5694.

[3] Shuying J, Junran L, Yongqiang L, et al. Variation of soil organic carbon and physical properties in relation to land uses in the Yellow River Delta, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 20317–20317.

[4] Luo J, Luo Z, Li W, et al. The Early Effects of an Agrivoltaic System within a Different Crop Cultivation on Soil Quality in Dry-Hot Valley Eco-Fragile Areas[J]. Agronomy, 2024, 14(3): 584.

[5] Yue S, Guo M, Zou P, et al. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(14): 1–13.

[6] Li T, Lu L, Kang Z, et al. Contrasting responses of soil bacterial and fungal networks to photovoltaic power station[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1494681–1494681.

[7] Bai Z, Jia A, Bai Z, et al. Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity. Front. Microbiol. 13:1065899.

[8] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望[J]. 环境科学, 2024, 45(01): 239–247.

作者简介:

吴昌焱(1998--), 男, 汉族, 四川省宜宾市高县人, 硕士研究生, 从事的研究方向: 水土保持与荒漠化防治。