

陈强,迟洪明,丁伟,等.腾格里沙漠南缘大型光伏基地植被保护和生态修复的理论对策[J].中国沙漠,2024,44(5):123-132.

腾格里沙漠南缘大型光伏基地植被保护和生态修复的理论对策

陈强¹,迟洪明²,丁伟²,杨昊天³,吴吉军⁴,杨奕颖²,吴旭东⁵,
张亚峰³,季波⁵,李云飞³,张志山³,刘立超³

(1.国家能源集团联合动力技术有限公司,北京 100000; 2.龙源(北京)太阳能技术有限公司,北京 100000; 3.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,甘肃 兰州 730000; 4.宁夏龙源新能源有限公司,宁夏 银川 750002; 5.宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所,宁夏 银川 750002)

摘要:推动新能源发展、促进能源结构改革是解决气候变化和能源短缺问题的根本途径,大力发展光伏新能源是中国实现碳达峰、碳中和目标的重要内容。近年来光伏新能源基地建设急剧发展,而在全国粮食安全战略下,土地资源成为光伏电站建设的主要约束条件。为了应对这一挑战,国家鼓励在严格保护生态前提下,在沙漠、戈壁、荒漠等区域选址建设大型光伏基地。沙漠地区地形复杂,风沙肆虐,环境恶劣,植被破坏容易、修复难,在建设大型光伏电站过程中,如何既能有效提高光伏发电效率,又能保护好植被,具有极大的挑战性。本文以腾格里沙漠南缘大型光伏基地为研究对象,调查和分析了项目区自然环境条件、植被状况和土壤水分特征,分析了固沙灌木盖度与灌木死亡率、土壤水分与灌木盖度和灌木死亡率之间的关系,基于腾格里沙漠南缘固沙植被长期生态研究成果以及沙漠和退化生态系统生态恢复的理论和实践,提出了沙漠地区开展科学的植物保护和生态修复建议,旨在助力沙漠光伏建设+生态保护+生态修复综合模式的探索 and 开发,打造高质量大型沙漠光伏+沙漠治理示范样板。

关键词:腾格里沙漠;大型光伏基地;荒漠化防治;植被保护;生态保护

文章编号: 1000-694X(2024)05-123-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00037

中图分类号: Q948.15

文献标志码: A

0 引言

可持续是人类社会发展的必然选择,生态文明建设是中华民族永续发展的千年大计,必须树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念^[1]。大力发展可再生能源已经成为全球能源转型和应对气候变化的重大战略方向,是保障国家能源安全、实现“双碳”目标和全面推进美丽中国建设的必然选择^[2-13]。光伏发电在新能源体系中占据着重要地位,大型光伏基地建设是构建清洁低碳、安全高效能源体系的重大举措,是中国生态文明建设、可持续发展的客观要求^[14-16]。

2021年,习近平主席提出“中国将持续推进产

业结构和能源结构调整,大力发展可再生能源,在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风电光伏基地项目”。2022年,《以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地规划布局方案》和《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》发布,提出“规划建设以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地,是贯彻落实党中央、国务院决策部署,支撑如期实现碳达峰碳中和目标任务、推动能源清洁低碳转型、提高能源安全保障能力的重大举措”。2023年,《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》进一步明确支持绿色能源发展,加快大型光伏基地建设,规范项目用地管理,在严格保护生态前提下,鼓励在沙漠、

收稿日期:2023-12-21; 改回日期:2024-04-02

资助项目:龙源电力集团股份有限公司科技项目(LYH-2021-04);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01019);甘肃省自然科学基金项目(23JRR659);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)

作者简介:陈强(1971—),男,江苏南通人,高级工程师,主要从事新能源相关技术与管理工作。E-mail: 12073504@ceic.com

通信作者:杨昊天(E-mail: yanght@lzb.ac.cn)

戈壁、荒漠等区域选址建设大型光伏基地。

腾格里沙漠深处内陆,总面积约 $5.1\times 10^4\text{ km}^2$ ^[17],自然环境恶劣,风沙危害频繁,生态系统脆弱,破坏容易修复难,因此在沙漠土地利用过程中必须坚持保护优先原则。植被重建是沙漠边缘和沙漠化土地治理的有效手段^[18-21],近年来在沙漠地区开展了大规模植被重建以固定流动沙丘,防风固沙作用明显,有效减少了区域风沙危害。沙漠地区光照资源丰富,可利用面积巨大,是光伏发电的理想场地。在沙漠中建设大型光伏基地,不仅能有效利用充沛的光照资源,生产清洁能源,减少碳排放,还能通过改善局地小气候提高植物成活率^[22],结合传统的机械和生物固沙措施,有助于形成高质量高效率的光伏+防沙治沙综合治理新模式。

腾格里沙漠南缘大型光伏基地地处黄河“几字弯”核心区,距黄河直线距离不足10 km,在黄河“几字弯”攻坚战和黄河流域高质量发展中具有重要的作用和地位。腾格里沙漠中卫新能源基地6 GW光伏复合项目是全国首批首个国家千万千瓦级“沙戈荒”新能源基地,是“宁电入湘”工程(宁夏-湖南 ± 800 千伏特高压直流工程)的重点配套项目,对保障湖南省能源电力多元化可靠供应和转型意义重大。在大力发展光伏新能源产业和全面开展生态文明建设的背景下,如何权衡沙漠大型光伏基地建设 with 沙漠植被保护是目前政府和企业面临的科学难题。本文拟通过分析腾格里沙漠南缘大型光伏

基地自然环境特征、防沙治沙现状及存在的问题,通过综合调查项目区植被、土壤水分以及二者之间的关系,同时参考腾格里沙漠长期生态学研究理论成果、生态修复技术和实践经验,从科学角度对腾格里沙漠南缘中卫大型光伏基地项目建设过程中的植被保护和生态修复提出对策建议,助力黄河“几字弯”攻坚战,全面实施生态保护与修复工程,大力发展生态光伏治沙,为黄河流域高质量发展提供生态支撑。

1 大型光伏基地项目区概况

1.1 自然环境特征

腾格里沙漠南缘地处西北内陆(图1),受蒙古高压影响较深,具有气候干旱、降水少而集中、温度变化大、风沙多的特点。该区平均年降水量为186 mm(1956—2020年),80%的降水在5—9月;年平均气温 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温极值 $-25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温极值 $38.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,5—7月的平均温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均年潜在蒸发量 $3\,000\text{ mm}$;主风为西北风,年平均风速 $2.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[2]。冬季干旱与春季多风,导致春季风沙活动频繁。流沙区年可能输沙量 $250\sim 450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 。全年起沙风中约60%的风速为 $5.0\sim 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对最大可能输沙量贡献较大的风速等级为 $8.0\sim 9.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。原始景观为典型的流动沙丘,沙丘形态有格状沙丘、新月形沙丘链与单个新月形沙丘(图2),由西北向东南呈逐级降低的台阶分布,

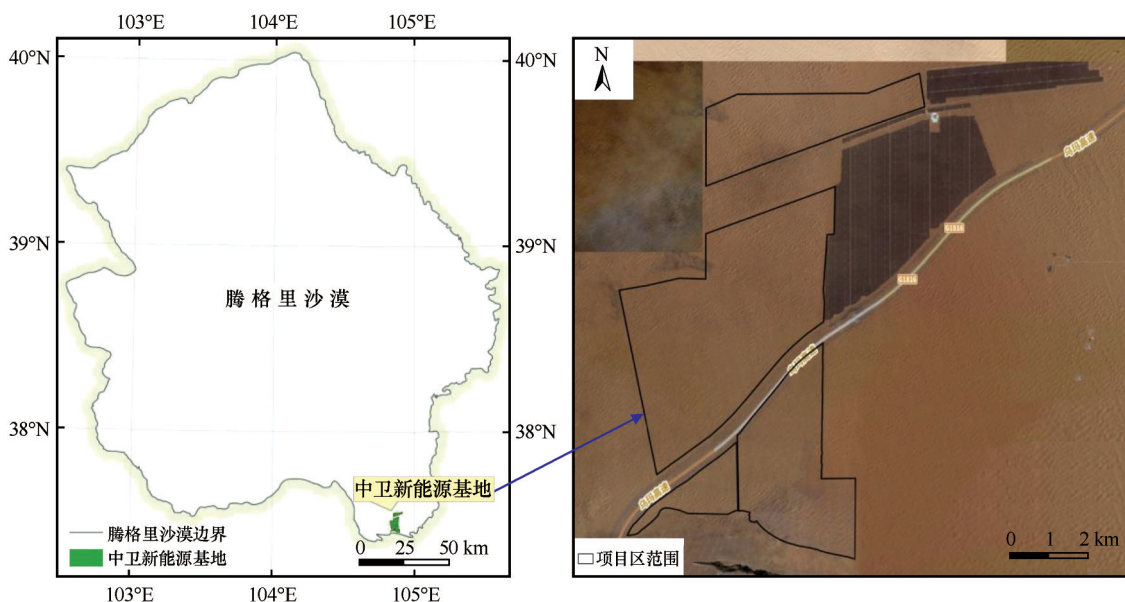


图1 腾格里沙漠南缘大型光伏基地区位图

Fig.1 The geographical location of the large-scale photovoltaic power station located on the southern of Tengger Desert



图2 腾格里沙漠南缘原始流动沙丘和固沙植被区景观

Fig.2 The landscape of mobile sand dunes and sand-binding vegetation on the southern of Tengger Desert

流动沙丘平均向东南方向的移动速率为 $1.57\sim 2.01 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[23-24]。自然植被盖度小于 0.5%,沙丘间零星散布有沙蓬、籽蒿和花棒。

1.2 生态修复概况

近 10 年来,在国家一系列政策的指导和支持下,为了将宁夏建设成全国防沙治沙综合示范区,构筑西部重要的生态安全屏障,宁夏在腾格里沙漠南缘实施了大量的生态修复工程,采用草方格+旱生灌木模式累计完成沙漠治理约 2 万 hm^2 ,生态修复区植被覆盖度显著提升,具有固沙滞尘、阻沙入黄的重要作用,有效解决了黄河宁夏段水沙问题,推动了宁夏防沙治沙事业、生态环境保护和社会发展。

2 固沙植被区灌木与土壤水分关系

2.1 方法

项目区共设置了 6 条样线,单个样线上每隔 200 m 设置一个 $10 \text{ m}\times 10 \text{ m}$ 的样方,合计 114 个样方,在每个样方内调查各灌木物种的数量、高度、冠幅、地径、盖度、死亡率等指标,以反映区域植被特征,分析灌木覆盖度与灌木死亡率之间的关系(图 3)。同时选择流动沙丘(植被盖度为 $<1\%$)和 6 种不同灌木覆盖度的样方(分别为灌木盖度 $<10\%$ 、 $10\%\sim 20\%$ 、 $20\%\sim 30\%$ 、 $30\%\sim 40\%$ 、 $40\%\sim 50\%$ 、 $>50\%$ 的植被区),在流动沙丘顶部、底部和每个灌木覆盖度植被区随机选择 3 个样方,分别采集 0~300 cm 土层每 20 cm 土壤样品,采用烘干法测定不同土壤层土壤水分含量。采用 Pearson 相关性分析方法研究灌木覆盖度与灌木死亡率、土壤水分与灌木覆盖度、土壤水分与灌木死亡率之间的关系,验证人工固沙植被区合适的灌木覆盖度。采用 SPSS 26.0 (SPSS

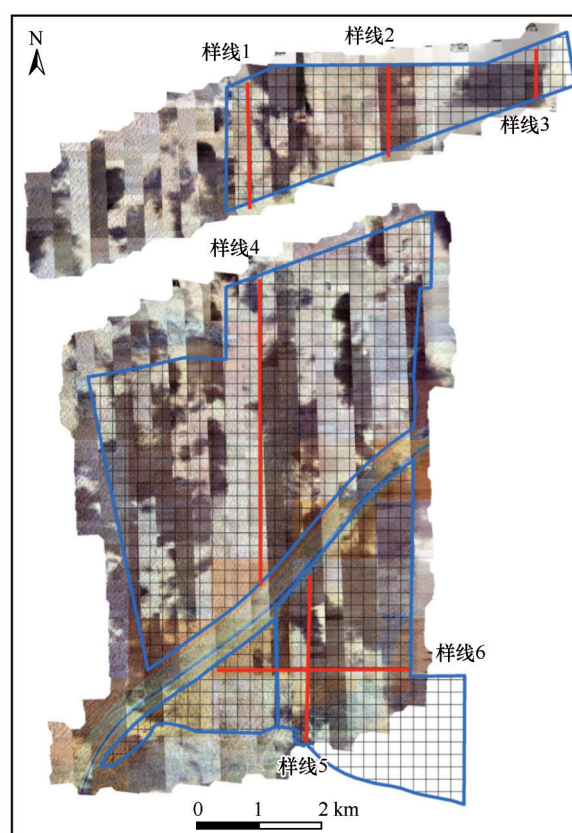


图3 腾格里沙漠南缘大型光伏基地植被综合调查样线图

Fig.3 Comprehensive vegetation survey transect of the large-scale photovoltaic power station located on the southern of Tengger Desert

Inc., Illinois, 美国)进行数据统计分析。用 Origin 9.0 (Origin Lab Corp., 美国)作图。

2.2 灌木覆盖度与死亡率现状

在固沙植被区,灌木盖度为 $>50\%$ 、 $40\%\sim 50\%$ 、 $30\%\sim 40\%$ 、 $20\%\sim 30\%$ 、 $10\%\sim 20\%$ 、 $<10\%$ 的植被比率分别为 19.29%、15.79%、18.42%、14.04%、20.18%、12.28%;灌木的平均死亡率分别为 30.04%、23.67%、26.86%、24.13%、13.45%、6.28%;灌木盖度大于 20%

植被区灌木的死亡率是灌木盖度小于20%植被区灌木死亡率的2.65倍。总体而言,随着灌木盖度的增加,灌木死亡率呈逐渐增加趋势,二者呈显著的线性关系(图4)。

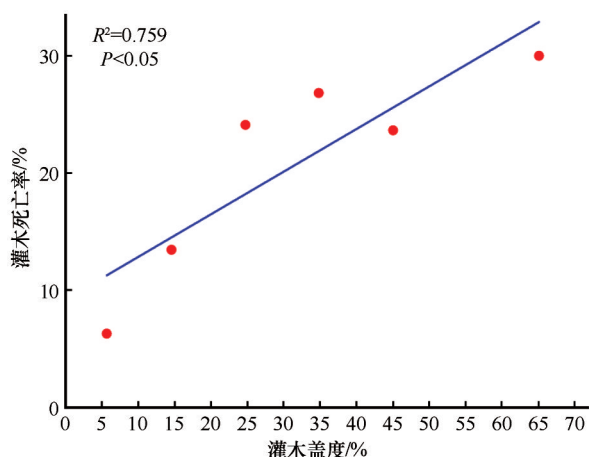


图4 灌木盖度与死亡率的关系

Fig.4 Relationship between shrub cover and mortality

2.3 土壤水分现状

随着土壤深度的增加,土壤水分含量大幅增加,200~300 cm土壤含水量是0~40 cm土壤含水量的3~8倍,稳定的深层土壤水分是维持沙漠灌木健康生长的关键。与流动沙丘底部土壤水分相比,流动沙丘顶部各土壤层(0~40、40~100、100~200、200~300 cm)土壤水分含量均较低(图5),其中40~200 cm土壤平均含水量小于1.5%,土壤水分不足以维持高盖度灌木生长。与流动沙丘土壤水分相比,不同灌木盖度固沙植被区深层土壤水分(100~300 cm)显

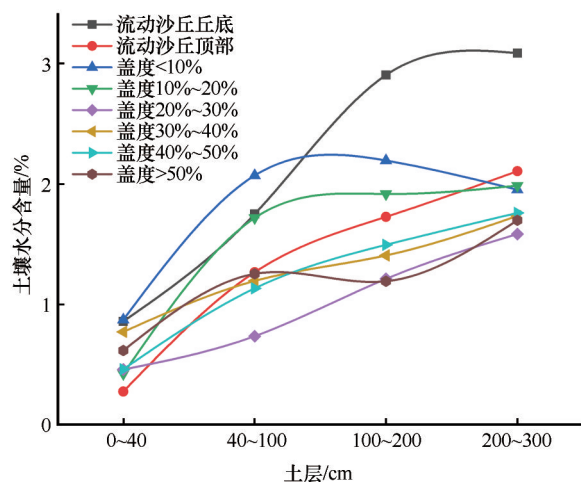


图5 不同灌木覆盖度植被区土壤水分含量

Fig.5 Characteristics of soil water content in vegetation regions with different shrub coverage

著降低,尤其是灌木覆盖度大于30%的植被区,表明固沙植被建立后,高盖度灌木消耗了大量的深层土壤水分。

与灌木盖度小于20%(包括盖度<10%和10%~20%)的植被区相比,灌木盖度大于20%固沙植被区的深层土壤水分显著降低($P<0.05$),其中40~100 cm土层土壤含水量下降了42.91%,100~200 cm土层土壤含水量下降了35.38%,200~300 cm土层土壤含水量下降了13.94%。这表明固沙植被演替前期(<10年)固沙灌木主要利用40~200 cm土壤层水分,其次利用200~300 cm土壤层水分。

2.4 灌木-土壤水分关系

土壤水分含量与灌木盖度的相关性分析结果表明,随着灌木盖度的增加浅层土壤(0~40 cm)含水量变化不大,二者之间不存在显著的线性关系(图6, $P>0.05$)。但随着灌木盖度的增加,深层土壤(40~100、100~200、200~300 cm)含水量呈下降趋势,二者之间存在负相关关系。这是因为花棒、柠条锦鸡儿等固沙灌木为深根系植物,主要利用40 cm以下的深层土壤水分,灌木盖度过高导致土壤水分过度消耗。土壤水分含量与灌木死亡率的相关性分析结果表明,随着土壤水分含量的下降,灌木死亡率呈增加趋势,尤其是深层土壤(40~100 cm、100~200 cm、200~300 cm)水分与灌木死亡率呈显著的负相关关系(图7, $P<0.05$),表明土壤水分的恶化显著增加了灌木的死亡率。

因此,在固沙植被区开展大规模光伏基地建设,需要充分考虑固沙植被区的生态系统现状,基于现有研究成果,采用系统性、整体性保护和恢复的思路,通过科学的人工抚育管理和生态修复措施优化植被结构和盖度,改善土壤深层水分含量,提升生态系统功能和生态系统稳定性。

3 植被保护和生态修复理论依据

3.1 生态水文阈值是沙区植被保护和生态修复理论依据

植被建设是干旱区生态恢复的主要措施,在全球干旱沙漠地区得到了广泛的应用,也是荒漠化防治的有效方法,如何保持固沙植被的稳定性是生态学家和土地管理者面临的挑战。土壤水分动态是人工固沙植被可持续发展的决定因素,固沙植被的

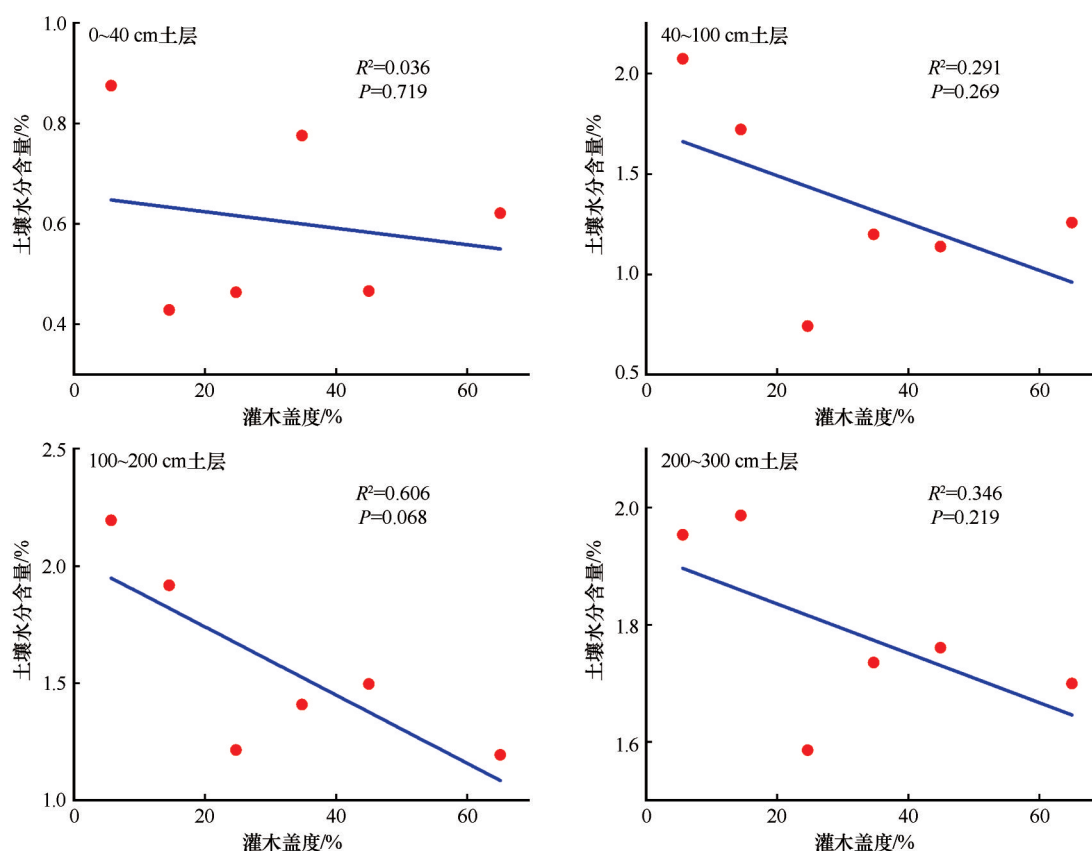


图6 灌木盖度与土壤水分含量关系

Fig.6 Relationship between shrub coverage and soil water content

生态水文阈值是沙区植被保护和生态修复的理论依据,为未来沙区植被恢复重建提供了可量化的参考标准。相关研究采用耦合固沙植被覆盖度与土壤水分动态的生态水文模型,提出了不同沙区的生态水文阈值,即在平均年降水量为200~400 mm中东部沙地,维持固沙植被稳定的植被盖度不宜超过40%;在平均年降水量为100~200 mm的西部沙区可建立并维持低盖度旱生灌木,以草本层片覆盖为优势的固沙植被,其中灌木盖度不宜超过25%^[25-26]。本研究中土壤水分与灌木盖度和灌木死亡率之间的关系表明,深层土壤水分含量与灌木盖度负相关,与灌木死亡率显著负相关,灌木盖度大于20%植被区灌木的死亡率是灌木盖度小于20%固沙植被区灌木死亡率的2.65倍,灌木盖度大于20%植被区40~300 mm土壤层水分含量下降超过30%,支持灌木盖度不宜超过25%的结论。随着灌木的继续生长,深层土壤水分将进一步消耗,土壤水分的恶化反过来又导致灌木的死亡率增加,植被退化的风险加剧,植被的稳定性和可持续性存疑。可以依据干旱沙区(平均年降水量小于200 mm)的生态水文

阈值进行生态系统管理来调节沙地系统的水分平衡,以期实现其生态恢复效益和防风固沙的可持续发展。

3.2 长期生态学研究成果为沙区植被保护和生态修复提供科学支撑

腾格里沙漠南缘的包兰铁路沙坡头人工固沙植被防护体系始建于1956年,60余年来不仅确保包兰铁路沙漠地段的畅通无阻,而且对区域生态环境的恢复产生了巨大的影响,成为中国干旱沙漠地区交通干线沙害治理与生态恢复的成功模式。

宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站对腾格里沙漠南缘固沙植被生态系统进行了长期监测和研究。在固沙植被建立后的60年内,灌木盖度呈现了先增加后降低的演变过程。在固沙植被建立初期,沙面蒸发强烈,形成较厚的干沙层,在无灌溉条件下,选择栽植根系较深的旱生灌木幼苗。固沙植被建立初期(0~10年),灌木盖度逐渐增加;固沙植被建立初期15年后灌木盖度达到最高的33%;随着植被的进一步演变,灌木死亡率逐

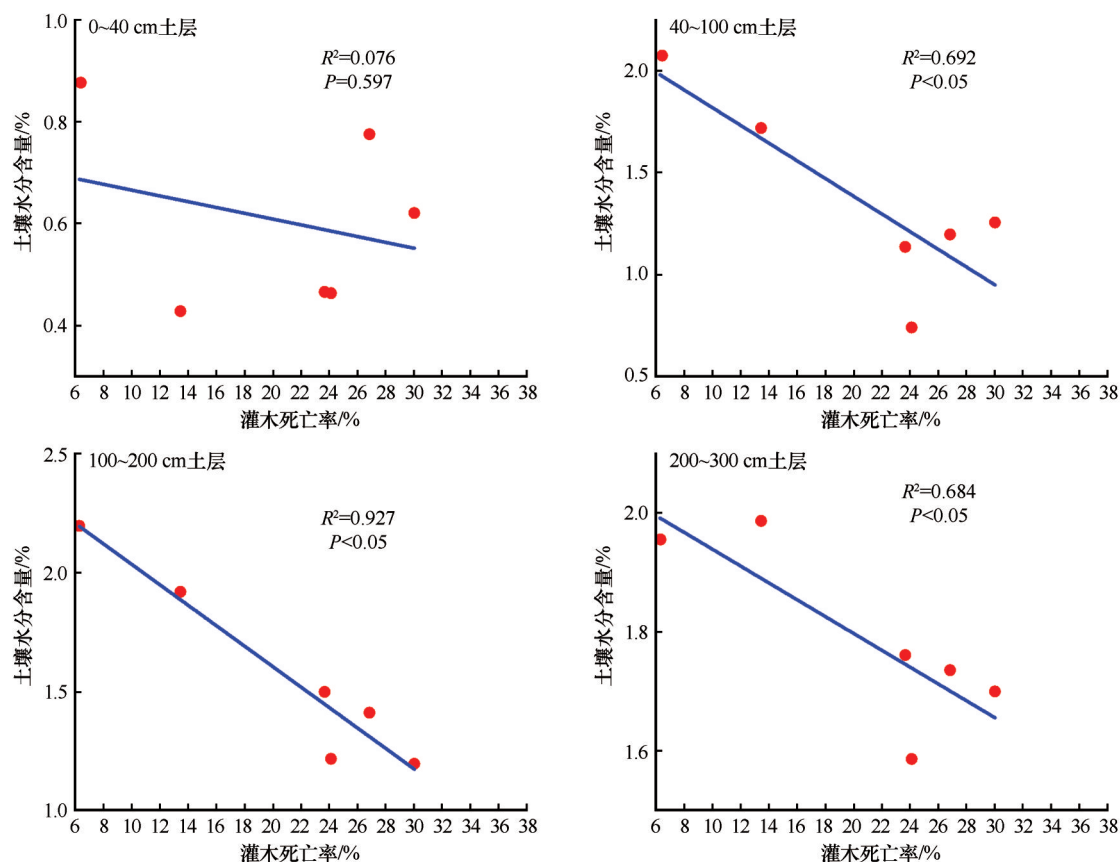


图7 灌木死亡率与土壤水分含量关系

Fig.7 Relationship between shrub mortality and soil water content

渐增加,一些灌木种也逐渐退出;固沙植被建立48年后,灌木的盖度逐渐下降到10%~20%,达到较为稳定的状态。相应地固沙植被区深层土壤水分也发生了剧烈的变化。植被建立初期(0~10年),固沙灌木生长对土壤水分含量影响较小,深层(0.4~3 m)土壤含水量的动态变化均与降水的时空分布显著相关;固沙植被建立10年后,深层(0.4~3 m)土壤含水量迅速下降,与降水的时间分布无相关性,呈现出夏季低冬季高的特点,表明生长季蒸散耗水经常高出同期降水的补给量;固沙植被建立40~48年后,深根系的固沙灌木盖度减少到一定程度,土壤水分也相应地稳定在较低的水平(1.2%),得益于较低的灌木盖度以及土壤动物的活动,深层土壤得到降水补给,深层土壤水分同降水的时间分布再次呈显著相关,开始出现恢复的趋势^[27-29]。长期监测结果进一步验证了固沙灌木与土壤含水量之间的密切关系,表明腾格里沙漠南缘固沙灌木盖度的承载力为10%~20%,为区域植被建设和管理提供了科学支撑,也为全球防沙治沙提供了成功的经验。

4 植被保护与生态修复建议

腾格里沙漠南缘大型光伏基地植被保护和生态修复总体思路是坚持保护优先、重点修复、适度利用的总体原则,严守生态保护红线,在能开展施工的条件下依据生态水文阈值保护固沙植被,并通过科学的生态修复措施显著提升原固沙植被区的生态系统功能,以期达到高水平的植被保护和高质量生态修复的目标。

4.1 植被保护原则

流沙表面是否形成生物土壤结皮是表征沙区生态系统修复效果的重要标志,其盖度越高通常表示土壤生境恢复效果越好。当生物土壤结皮盖度<5%时,土壤抗风蚀能力较弱,与无生物土壤结皮覆盖的流沙差异不显著,沙丘土壤为流动风沙土;当生物土壤结皮盖度为15%~20%时,土壤表面抗风蚀能力显著增加,土壤稳定性较强,可以将土壤判定为半固定风沙土。因此,可将生物土壤结皮盖度15%作为植被保护的阈值,当生物土壤结皮盖度

>15%时,对植被区进行围封保护,当生物土壤结皮盖度<15%时,可以根据灌木盖度和深层土壤水分确定植被保护或管理方案。

植被盖度是沙漠化程度的重要标志。项目区灌木盖度<10%时,沙丘表面依然为流动风沙土,其风沙环境与原始生境差异不大。流沙多分布在沙丘的顶部或背风坡,风沙环境较为恶劣,沙面不稳定,长期保持流动状态,属于沙漠化难治理区,流沙区也可能对周边植被、道路、光伏设备造成危害。为了更好地保护区域植被、提高土地利用效率和后期开展更高质量的生态修复,可在生物土壤结皮盖度<15%的区域,将10%的灌木盖度作为植被保护的阈值。灌木盖度<10%的区域,可以根据施工需求合理利用。灌木盖度>10%的区域,进一步根据生态水文阈值确定保护和管理方案。

土壤含水量,尤其是稳定的深层土壤水分含量是决定固沙植被盖度和生态系统可持续性的最关键因子。腾格里沙漠南缘固沙植被区土壤含水量和植被盖度的长期监测结果表明,二者之间存在显著的相关性,较低的深层土壤含水量能维持的固沙灌木盖度为10%~20%。在全球气候变化背景下,尤其是近年来极端干旱气候事件频发,导致灌木死亡率有增加趋势,因此改善深层土壤含水量是固沙植被适应未来极端干旱事件的重要措施。项目区固沙植被建立8~10年,深层土壤含水量下降显著,尤其是高盖度植被区(灌木盖度>30%)的深层土壤含水量已由3%下降至1.54%,导致灌木死亡率达到30%,灌木盖度为10%~20%植被区的深层土壤含水量约为2%,且灌木死亡率较低,为13.45%。

针对灌木盖度>10%的植被区,为了使深层土壤含水量保持在健康的水平(1.5%~2%),可通过人工抚育管理等措施将项目区的灌木盖度维持在10%~20%。生物土壤结皮盖度<15%、灌木盖度为10%~20%的固沙植被符合区域生态水文阈值,在光伏基地建设过程中要确保灌木盖度维持原状;生物土壤结皮盖度<15%、灌木盖度>20%固沙植被区的灌木盖度超过了区域生态水文阈值,尤其是灌木盖度大于30%的植被区,在施工过程中需要通过平茬、间伐、移植等措施将灌木盖度降低到20%,以期促进项目区固沙植被健康稳定演替。

4.2 植被保护建议

首先使用生长季的高分辨率遥感影像或无人

机航拍影像对项目区植被空间分布特征进行遥感知解译,确定流沙区(植被盖度<1%)、灌木盖度<10%的区域、灌木盖度为10%~20%的区域、灌木盖度为20%~30%的区域、灌木盖度>30%的区域以及生物土壤结皮盖度大于15%和小于15%的区域。使用RTK无人机对项目区进行航拍,获取详细的地形图。基于灌木盖度和地形特征,结合光伏矩阵的施工需求,合理设计永久道路、临时道路、材料堆放场、桩基、箱变位置及光伏方阵空间布局等。永久道路、箱变等永久性用地优先使用流沙区,材料堆放场使用面积较大的流沙区,光伏方阵和临时道路根据植被空间分布和排列特征设计。

灌木盖度<10%的流沙区是难治理区,生态系统功能弱,是潜在的风沙危害区。施工过程中可以先局部平整,既减少风沙危害、便于后期开展生态修复,也提高了土地利用效率;施工完成后开展科学的生态重建,确保重建后生态系统功能和稳定性远超原生境。灌木盖度为10%~20%的区域,灌木行间距较大,大部分区域可以满足施工机械通过,施工过程中尽量减少破坏,如有部分区域破坏需要补植,施工完成后开展科学的生态修复,保证灌木盖度保持原状。灌木盖度>20%的区域,施工过程中通过移植(将较小植株移植至盖度<10%的区域)、间伐(死亡株、不健康植株)、平茬(年龄超过7~8年的高大植株,需要抚育管理)等方式保护施工区的植被,施工完成后确保全区灌木盖度介于10%~20%生态水文阈值内,同时接种蓝藻以增加生物土壤结皮盖度,达到植被-土壤系统的整体恢复,生态系统功能和生态系统稳定性显著提升。

将项目区分为200 m×200 m的网格,每个网格为一个施工和植被保护方阵,施工队伍进场前进行植被保护专题培训,提高施工人员植被保护意识和植被保护技术,建立严格的植被保护监督系统和奖惩制度,确保植被保护方案顺利实施。

4.3 生态修复建议

针对降水量小于200 mm的沙漠大型光伏基地生态系统,目前严重缺乏基础研究数据和理论支撑以及科学的生态修复技术和模式。腾格里沙漠自然生境的长期监测和研究成果为沙漠光伏新生境研究提供了宝贵的经验和理论依据,但还不足以支撑沙漠腹地光伏新生态系统的科学修复和可持续发展。因此,亟需系统开展沙漠腹地大型光伏基地

生态要素长期定位监测与综合示范,获得光伏基地水分、土壤、气象、生物全方位的综合监测数据,因地制宜开展生态重建关键技术研发,分区打造沙漠光伏基地综合示范基地,为生态修复及特色产业开发提供科学支撑,为沙漠光伏+生态+产业的高质量发展提供理论依据、技术支撑和示范模板。

沙漠光伏基地建设极大地改变了水分、光照、温度、风况等自然资源的空间分布特征,必然影响沙漠植物的生理生态过程和适应机制、沙漠生态系统的生态水文过程以及生态系统的结构和功能。应重点研究灌木、草本、隐花植物、生物土壤结皮对新生境的适应机制,筛选适宜沙漠光伏新生境的优良固沙灌木、草本和隐花植物种。研究植物群落组成、结构、功能、多样性的时空演变规律,土壤微生物和动物多样性变化特征,沙漠光伏新生态系统的稳定性维持机制。研发不同生境沙生植物种子萌发率提升技术及灌木栽植成活率提升技术、光伏基地人工生物土壤结皮固沙技术、光伏板间草方格+旱生灌木+草本的多种配置和修复技术、光伏板下草方格+草本+人工生物土壤结皮的多物种配置和修复技术、人工固沙植被的融合抚育技术。集成腾格里沙漠大型光伏基地综合生态重建和修复技术体系,提出沙漠光伏基地生态系统功能提升的适应性管理方法。

沙漠光伏基地建设完成后,在保护现有植被的原则下,充分利用光伏板的集雨和遮阴作用,筛选适宜腾格里沙漠南缘光伏新生境生长的特色经济植物,开展光伏基地特色经济作物种植试验,研发沙漠光伏基地特色产业开发利用新模式。在此基础上,通过与周边乡村、合作社和农业生态公司合作,探索沙漠光伏基地+第三方公司+农民聘用或承包的产业发展路径;最后通过生态修复成效、生态系统功能提升和生产效益综合评价,优化提出光伏基地产业链可持续发展模式,建立光伏+中药材示范基地,为乡村振兴和黄河流域高质量发展提供新的思路和模板。

科学开展沙漠大型光伏基地生态修复和发展光伏基地特色产业,均需建立在对水分、土壤、气象、生物关键要素的长期定位监测基础之上。根据光伏基地特点,主要分为光伏板下和光伏板间两大区域系统开展长期定位监测。监测项目主要包括土壤水分、温度和盐分,地表风蚀和水蚀,小气候

(风况、辐射、日照时间、空气温度、相对湿度、降尘等),植物(高度、冠幅、基径、分盖度、总盖度、生物量、多样性等),土壤(土壤容重、粒径、pH值、电导率、有机碳、全氮、全磷、速效钾、有效磷等),土壤和植被系统碳水交换过程,土壤微生物多样性和功能。全面评价大型光伏基地建设对生态环境的影响,不断优化植被保护和生态修复模式。

5 结语

大力发展光伏新能源是国家改善能源结构,实现碳达峰、碳中和目标的重要举措。沙漠地区光能资源丰富,是极具潜力的大型光伏新能源基地,能有效解决土地资源紧缺问题。但沙漠地区生态环境脆弱,生态系统破坏容易修复难。在推动新时代绿色发展和生态文明建设、严守生态保护红线、加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设、全力打好黄河“几字弯”攻坚战、全面推动黄河流域高质量发展的背景下,在腾格里沙漠南缘开展大规模光伏基地建设要确保建设过程中的植被保护和建设后的高质量生态修复。中国经过几十年的科学研究与实践,在防沙治沙和生态环境修复方面已有成熟的理论和技术,为沙漠大型光伏基地建设的植被保护和生态修复提供科学理论和技术支撑。在光伏基地建设过程中,需要基于腾格里沙漠生态水文学阈值、长期生态学研究成果、固沙植被生长现状、流沙和不同灌木盖度空间分布特征以及光伏建设需求开展科学的植被保护。光伏基地建设完成后,要基于新生境的资源要素研发适地适宜的生态修复措施,开展长期生态系统监测,优化大型光伏基地生态修复和利用模式,服务地区和国家生态安全和基础设施建设,为实现“双碳”目标和建设美丽中国的战略目标提供技术支撑与示范样板。

参考文献:

- [1] 敖阳利.将可持续发展进行到底[N].中国财经报,2023-12-05(3).
- [2] 潘家华.“双碳”目标再解析:概念、挑战和机遇[J/OL].北京工业大学学报(社会科学版),2024,24(3):1-13.
- [3] 梁瑶瑶,陈勇,王英杰.双碳目标下城镇型河流生态环境的复苏探索[J].水利规划与设计,2023(12):47-50.
- [4] 国家发展改革委发布“碳达峰十大行动”进展报告[J].资源再生,2023(5):60-71.
- [5] 发改委.循环经济助力降碳行动扎实推进:碳达峰十大行动”

- 进展[J].中国轮胎资源综合利用,2023(1):22-24.
- [6] 张舜,张蜚.基于光伏发电的铁路与新能源融合潜力评估[J].中国铁路,2023(11):64-71.
- [7] 王鹏.新能源光伏发电项目并购管理与风险研究[J].能源科技,2023,21(5):72-75.
- [8] 马利杰.新能源光伏发电项目建设施工管理措施探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(30):124-126.
- [9] 本刊编辑部.国家能源局组织发布《新型电力系统发展蓝皮书》[J].农村电气化,2023(7):3.
- [10] 本刊编辑部.国家能源局组织发布《新型电力系统发展蓝皮书》新型电力系统将加强四大体系建设[J].农村电工,2023,31(7):1.
- [11] 杜雨萌.国家发改委发布首批碳达峰试点名单包括25个城市和10个园区[N].证券日报,2023-12-07(A02).
- [12] 苏南.碳达峰碳中和“施工细节”亟待形成共识[N].中国能源报,2023-12-04(3).
- [13] 郝杰.发改委发布《国家碳达峰试点建设方案》[J].纺织服装周刊,2023(43):7.
- [14] 国家能源局:加大力度推进大型风电光伏发电基地建设[J].中国设备工程,2023(5):1.
- [15] 贺觉渊.两部门:加快推进大型风电光伏发电基地建设[N].证券时报,2022-02-11(A02).
- [16] 推进光伏发电“领跑者”计划实施与领跑基地建设[J].能源研究与利用,2017(6):12-13.
- [17] 颜长珍,李森,逯军峰,等.1975-2015年腾格里沙漠湖泊面积与数量[J].中国沙漠,2020,40(4):183-189.
- [18] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站60年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.
- [19] 潘刚,邹联付,方江平.“三江流域”地区植被恢复重建试验研究[J].福建林业科技,2008,35(4):111-114.
- [20] 赵志伟,谢新平.浅谈甘肃黄土高原区的植被恢复与重建[J].甘肃科技,2023,39(9):108-110.
- [21] 王辉,郭敬丽.沙地退化植被恢复技术研究进展[J].防护林科技,2023(5):66-69.
- [22] 张呈春,张维福,董智今,等.碳中和背景下光伏阵列对沙漠地区微气候的影响[J].甘肃农业大学学报,2023,58(9):1-12.
- [23] 杨馥宁,吕萍,马芳,等.腾格里沙漠南部格状沙丘的形态演变及移动特征[J].中国沙漠,2023,43(1):107-115.
- [24] 张克存,俎瑞平,屈建军,等.腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J].中国沙漠,2008,28(4):605-610.
- [25] Li X R, Zhang D H, Zhang F, et al. The eco-hydrological threshold for evaluating the stability of sand-binding vegetation in different climatic zones [J]. Ecological Indicators, 2017, 83: 404-415.
- [26] 张定海,李新荣,张鹏.生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J].中国沙漠,2017,37(4):1-11.
- [27] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.中国沙质荒漠地区生态恢复与恢复的基础生态水文[M].北京:科学出版社,2016.
- [28] 李新荣,赵洋,杨昊天,等.生物结皮治理沙化土地的理论与实践[M].杭州:浙江教育出版社,2023.
- [29] Yang H T, Li X R, Wang Z R, et al. Carbon sequestration capacity of shifting sand dune after establishing new vegetation in the Tengger Desert, northern China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 478(1):1-11.

Theory and strategies for vegetation conservation and ecological restoration in a large-scale photovoltaic power station in the southern Tengger Desert

Chen Qiang¹, Chi Hongming², Ding Wei², Yang Haotian³, Wu Jijun⁴, Yang Yiying², Wu Xudong⁵,
Zhang Yafeng³, Ji Bo⁵, Li Yunfei³, Zhang Zhishan³, Liu Lichao³

(1.CNG Energy United Power Technology Company LTD, Beijing 100000, China; 2.Longyuan (Beijing) Solar Technology Co., LTD, Beijing 100000, China; 3.Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4.Ningxia Longyuan New Energy Co., LTD, Yinchuan 750002, China; 5.Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Promoting the development of new energy and reforming the energy structure are fundamentally crucial in addressing climate change and energy scarcity. Vigorously developing photovoltaic new energy is an important approach to achieving the goal of "carbon emission peak and carbon neutralization". In recent years, photovoltaic new energy has experienced a significant surge in growth. However, due to limited land resources under the national food security strategy, constructing photovoltaic power stations faces major constraints. To tackle this challenge, the state encourages the construction of large-scale photovoltaic power station in sandy desert, gravel desert, and desert while strictly ensuring ecological protection. The topography of desert areas is intricate, characterized by harsh wind and sand environments, making the destruction of vegetation a straightforward process, however, restoring ecological systems in such conditions poses significant challenges. Effectively enhancing the efficiency of photovoltaic power generation while simultaneously safeguarding vegetation presents a formidable challenge during the construction of large-scale photovoltaic power stations. This study focuses on the investigation and analysis of natural environmental conditions, vegetation status, and soil water characteristics in the project area located at the southern of Tengger Desert. Furthermore, we examine the correlation between sand-fixing shrub cover and shrub mortality as well as the relationship between soil water content and both shrub cover and shrub mortality. Based on the long-term ecological research findings of sand-fixing vegetation, this study proposes scientific recommendations for plant protection and ecological restoration in desert areas, aiming to facilitate the exploration and development of an integrated model combining desert photovoltaic construction with ecological protection and restoration. These proposals aim to provide technical support for establishing high-quality large-scale demonstration base of desert photovoltaic power stations combined with effective desert governance.

Key words: Tengger Desert; large-scale photovoltaic power base; desertification control; vegetation protection; ecological protection