

DOI: 10.20103/j.stxb.202503200642

蔡靖, 张雅娴, 项潇智, 刘羲, 杜文鹏. 风电建设对锡林郭勒地区植被固碳能力的影响及驱动机制. 生态学报, 2025, 45(24): 12373-12383.

Cai J, Zhang Y X, Xiang X Z, Liu X, Du W P. Influence and driving mechanism of wind power construction on vegetation carbon sequestration capacity in Xilingol area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12373-12383.

风电建设对锡林郭勒地区植被固碳能力的影响及驱动机制

蔡 靖¹, 张雅娴², 项潇智^{1,*}, 刘 羲¹, 杜文鹏¹

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101

2 西南民族大学草地资源学院青藏高原高寒草地生态保护与利用四川林业草原重点实验室, 成都 610041

摘要: 陆地生态系统承载着调节碳循环和平衡碳收支的重要功能, 在风电快速扩张的背景下, 科学评估风电场建设和运行对生态系统固碳能力的影响具有重要意义。针对现有研究在揭示风电大面积扩张对区域植被固碳效应影响及研究区域代表性和系统性不足的问题, 以内蒙古中部的锡林郭勒地区 51 个已建成并稳定运行的风电场为研究对象, 基于 MODIS 净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 遥感数据产品, 运用缓冲区分析、时序分析、相关性分析和随机森林模型等方法, 解析锡林郭勒地区风电场建设及运行对植被固碳效应影响的时空变化特征和驱动因素。结果表明: (1) 风电建设和运行对邻近区域植被 NPP 的影响范围约为 6—8km; (2) 风电场建设后, 场内 NPP 均值较建设前显著增加了 1.8%, 在温性荒漠草原、温性草原和农牧交错区增加效应尤为明显, 而临近风电场的影响区 NPP 变化并不显著; (3) 多维统计显示, 风电场区 NPP 均值变化波动范围较临近风电场的影响区更广, 这可能暗示着风电场受人为因素影响更多; (4) 近地表气温、降水量和相对湿度是风电场 NPP 变化的主导因子。风电场建设后微气候的变化和植被修复措施的实施, 可能是促进风电场内生产力恢复的重要因素。研究结果可加深风电场建设和运行对生态系统影响的理解, 为协调生态保护和风电的开发利用提供科学依据。

关键词: 草原风电; NPP; 北方草原; 固碳效应

Influence and driving mechanism of wind power construction on vegetation carbon sequestration capacity in Xilingol area

CAI Jing¹, ZHANG Yaxian², XIANG Xiaozhi^{1,*}, LIU Xi¹, DU Wenpeng¹

1 Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

2 Sichuan Provincial Forest and Grassland Key Laboratory of Alpine Grassland Conservation and Utilization of Qinghai-Tibetan Plateau, College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract: Terrestrial ecosystems play critical roles in regulating the carbon cycle and maintaining the carbon balance. Against the backdrop of rapid wind power expansion, scientifically assessing the impacts of wind farm construction and operation on ecosystem carbon sequestration capacity holds critical significance. Existing studies have analyzed the impacts of wind farm construction on the carbon sequestration capacity of surface vegetation in different regions through field investigations and remote sensing data analysis. However, the research conclusions remain uncertain. How the stable operation of wind farms affects Net Primary Production (NPP) compared to the pre-construction phase? How far horizontally does this effect extend, and what factors drive the impact of wind farms on vegetation NPP? To address limitations of existing research in revealing the impacts of large-scale wind power expansion on regional vegetation carbon sequestration,

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42401364, 42201335, 42301335)

收稿日期: 2025-03-20; 网络出版日期: 2025-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiangxz@sicnu.edu.cn

particularly regarding insufficient representativeness and systematicity of study areas, this study focused on 51 operational wind farms in Xilingol, central Inner Mongolia. Utilizing MODIS NPP data products, we applied buffer analysis, time-series analysis, correlation analysis, and random forest modeling to examine the spatiotemporal patterns and driving factors of vegetation carbon sequestration impacts from wind farm construction and operation in the Xilingol region. The key findings reveal that: (1) Wind power construction and operation affected vegetation NPP in adjacent areas, with impacts extending up to 6—8 km; (2) Compared with pre-construction levels, Wind Farm Areas (WF) exhibited a statistically significant 1.8% increase in mean NPP, with 80.4% of wind farms experiencing NPP increases—particularly pronounced increases in temperate desert steppe, temperate steppe and agro-pastoral ecotones. The adjacent affected areas showed no significant NPP change; (3) Multidimensional statistics showed wider variation in mean NPP within WF compared to Near Wind Farm Areas (NNWF), potentially implying that WF areas were more affected by human factors; (4) Near-surface air temperature, relative humidity, and precipitation were identified as the dominant climatic drivers of NPP changes in wind farm areas. Land surface temperature and relative humidity primarily drove changes within the wind farms, while land surface temperature and precipitation were the main drivers in adjacent areas. Wind turbine density showed no statistically significant effect on NPP changes within WF and NNWF. Post-construction microclimate modifications and vegetation restoration measures demonstrated a positive effect on productivity recovery within wind farm boundaries. These findings advanced the understanding of wind farm-ecosystem interactions and provided a scientific basis for reconciling ecological conservation with wind power development.

Key Words: grassland wind farm; NPP; grassland of northern China; carbon sequestration effects

在全球气候变暖、能源转型压力与地缘政治博弈三重危机叠加背景下,可再生能源的刚性需求缺口持续扩大。2024年COP29会议通过的《全球储能和电网承诺》明确提出,为实现1.5℃温控目标,需在2030年前将可再生能源装机容量提升至2020年水平的4倍。在众多类型的清洁能源中,风能以其发电成本和技术成熟度方面的优势,已成为推动全球能源结构调整的关键力量^[1]。中国作为全球最大的可再生能源市场和供应链中心,2023年风电新增装机75.9GW,同比增长102%,占全球增量的40%以上^[2]。内蒙古自治区的可利用风能储量占全国总量的57%,2023年风电装机容量达69.61GW,位居全国首位,成为中国最重要的陆上风电基地^[3]。根据《内蒙古自治区“十四五”可再生能源发展规划》,内蒙将继续推进风电发展,计划到2025年实现风电累积装机89GW^[4]。

值得注意的是,位于内蒙古中部的锡林郭勒盟属于干旱半干旱生态敏感地区,其生态系统承载着涵养水源、维持生物多样性和调节碳收支等关键生态系统服务功能^[5],该地区的风电场建设和运行可能会削弱植被生态功能,从而威胁区域生态安全。风电项目建设过程中,挖方回填及基础设施施工直接清除地表植被,导致植被覆盖状况和土层结构的改变,造成植被光合能力下降,减少区域植被的碳固存。风电运行期间,风机的转动对大气边界产生扰动,通过改变风速、地表粗糙度、大气和陆地表层的水热交换等过程改变局地气候条件^[6-7],间接影响植被群落的固碳能力。因此,系统评估风电建设和运行对植被固碳能力的影响具有重要现实意义。

现有研究主要通过实地调查^[8-9]和遥感数据量化风电场建设对地表植被固碳能力的影响,不同区域及空间尺度的研究结论差异显著^[10-13]。例如,李智兰等在山西大同武家山风电场的研究表明,风机建设过程中,土壤压实和地表裸露致使地表温度升高、蒸发量增大,土壤有效养分降低,生物量和枯落物量大幅度减少^[14];而李国庆等在内蒙古辉腾梁地区的研究表明,风机运行后风电场区域近地表气温的改变导致植被NDVI较建设前呈现出积极的恢复趋势,植被覆盖度增加,生长状况改善^[15]。同时,少部分研究基于大量风电场样本,综合探究不同区域风电场建设和运行产生的扰动情况。Zhao等在内蒙古地区的研究发现,风电场建设的干扰导致土壤含水量、有机成分、氮磷等养分下降,植物群落生产力显著下降^[16];而Su等的研究通过对比风电场

建设前后 NPP 的差异则发现风电建设对植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 呈不显著下降影响^[12]。研究区域、风电场的代表性和研究方法的差异是导致研究结果差异的主要原因。在风电大面积扩张背景下,以单一或少量风电场为研究对象、以风电建设前后对比为主的研究忽略了气候空间平稳性的影响,导致研究结论代表性和系统性不足。

鉴于此,本研究使用遥感数据,选取锡林郭勒盟内大量集中的风电场为样本,结合空间距离衰减效应,通过缓冲区分析识别风电场影响域,综合分析风电场建设对不同植被类型区 NPP 影响的时空分布格局,并进一步通过相关性分析和随机森林模型识别 NPP 变化的驱动因素。本研究旨在回答以下科学问题:(1)相较于风电场建设前,风电场稳定运行对 NPP 产生怎样的影响?这种影响在水平方向上能延续多远的距离?(2)哪些因素驱动风电场对 NPP 的影响?研究结果有助于提升风电建设对植被变化扰动的认知,为协调资源利用、区域经济发展和生态系统保护提供科学参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒盟(东经 110°11'—120°00',北纬 41°36'—46°45')位于内蒙古自治区的中部,气候类型属典型温带干旱半干旱大陆性气候,主要气候特点为风大、干旱、寒冷,春季干旱且多风沙,夏季温暖湿润且短暂,秋季霜雪早,冬季寒冷干旱且漫长^[17—18]。研究区植被类型自西向东由温性荒漠草原、温性草原向温性草甸草原过渡,间或有低地草甸,东南部属于农牧交错区。锡林郭勒盟是北方重要的生态安全屏障和清洁能源基地,可开发风电规模达 60GW,是内蒙首个风力发电超百亿的地区,其地理区位与能源负荷中心紧邻,拥有完整的产业链和产业基础,对保障华北、华东和东北的能源供应至关重要。本研究选取了锡林郭勒盟 2006—2015 年间相继建设并已稳定运行的 51 个风电场为研究对象(图 1)。

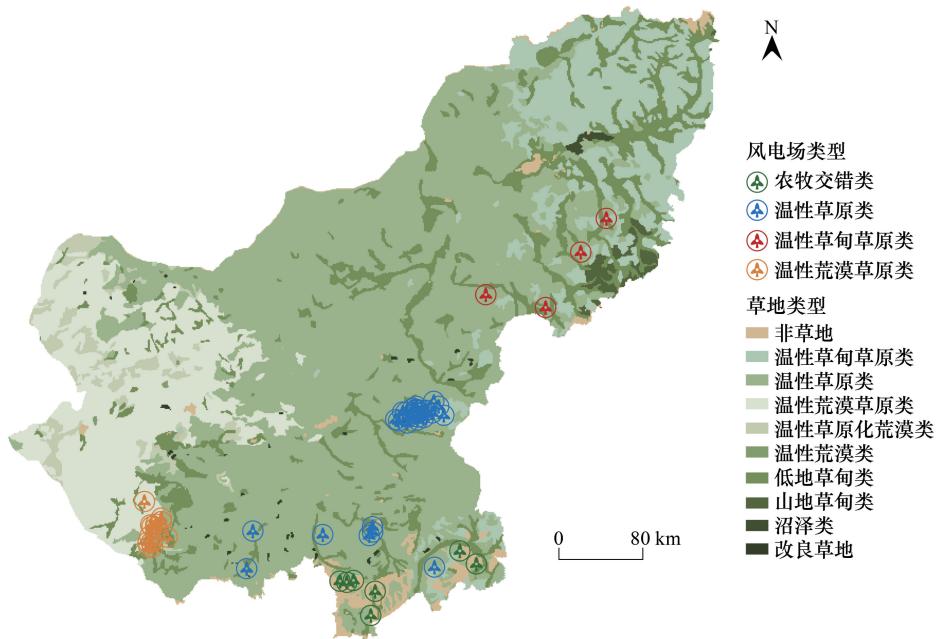


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 风电场影响距离阈值及分区

风电场对周围植被的影响存在空间距离衰减效应^[19—22]。为了确定风电场的空间影响距离阈值,本研究

以每个风电场为核心设置多环缓冲区,在0—30km范围内每2km设置一个缓冲区,在30—50km范围内每5km设置一个缓冲区。以风电场建设前后5年为时间窗口,对比风电场建设前后各缓冲区内的NPP空间平均值,使用最小二乘法计算不同缓冲区风电场建设前后的NPP变化趋势。

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times v_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n v_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left[\sum_{i=1}^n i \right]^2} \quad (1)$$

$$\Delta \text{Slope} = \text{Slope}_{\text{post}} - \text{Slope}_{\text{pre}} \quad (2)$$

式中,Slope为不同缓冲范围内的NPP变化趋势,i为年份,n为总年数,vi为第i年风电场区和各缓冲区内的空间平均值,式(2)中Slope_{post}为风电场运行后5年NPP变化趋势,Slope_{pre}为建设前5年NPP的变化趋势。使用多项式作为距离衰减函数拟合NPP变化趋势与缓冲距离的关系,以确定风电场的影响距离阈值^[23],拟合效果显著且存在拐点时,拐点处为风电场影响距离阈值。

为了进一步分析风电场建设对风电场内外的影响差异,根据风电场影响距离阈值计算结果,将风电场建设区域内定义为风电场区(WF),受到影响未到距离阈值的临近风电场区域定义为影响区(NNWF),超过距离阈值区域定义为对照区(NWF)。为消除溢出效应影响,在每两个区域之间设置2km宽过渡带,不计入统计范畴^[24]。

1.2.2 风电场建设对植被影响的量化

为了量化风电场建设对植被NPP的影响,对风电场建设前后WF和NNWF的NPP平均情况和变化趋势进行比较。区域空间尺度上植被生长还受到微气候的影响,为减小气候变化带来的异常值,将WF和NWF的NPP空间平均值逐年相减,再在时间序列上对比风电场建设前后5年的NPP差值(式3)^[10—11]。对NNWF内植被NPP进行相似的计算(式4),评估风电场对影响区的影响。具体评估方法如下:

$$\Delta \text{NPP}_{\text{wf}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\text{NPP}_{\text{iwf}} - \text{NPP}_{\text{inwf}}) - \sum_{i=1}^{n_2} (\text{NPP}_{\text{iwf}} - \text{NPP}_{\text{inwf}})}{n} \quad (3)$$

$$\Delta \text{NPP}_{\text{nnwf}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\text{NPP}_{\text{innwf}} - \text{NPP}_{\text{inwf}}) - \sum_{i=1}^{n_2} (\text{NPP}_{\text{innwf}} - \text{NPP}_{\text{inwf}})}{n} \quad (4)$$

其中,n₁、n₂分别为建设前后的总年数,NPP_{iwf}、NPP_{inwf}、NPP_{innwf}分别为风电场第i年WF、NNWF、NWF的NPP空间平均值;ΔNPP_{wf}、ΔNPP_{nnwf}为WF和NNWF的NPP的变化值。

风电场对植被的变化趋势可能存在积极或消极的影响,通过式(1)分别计算风电场建设前后5年WF内减去空间异常值的植被NPP变化趋势,再使用式(2)相减计算风电场建设对变化趋势的影响。使用相似方法量化NNWF内植被变化趋势。通过t检验对结果进行显著性检验。

1.2.3 驱动因子分析

NPP受气候变化和人类活动等多种复杂因素的影响而发生改变。为评估植被NPP变化的驱动因素,参照已有风电场对生态环境影响的研究^[11—12],本研究选取近地表气温(Land Surface Temperature,LST)、降水量(Precipitation,PRCP)、潜在蒸散发(Potential Evapotranspiration,PET)和相对湿度(Relative Humidity,RH)等气候因子以及风机密度等人类活动因子作为评估风电场建设运行对NPP影响的驱动因子。首先,采用Person相关性分析对ΔNPP与各驱动因子进行单因子相关性分析。其次,随机森林模型能够弥补Person相关性分析对非线性关系解释性较差的不足,抽样过程中决策树的建立能够有效提高模型的精度^[25—27],因此使用随机森林模型补充分析多个驱动因子特征重要性。本研究通过R语言中的randomForest包运行随机森林模型,对WF和NNWF内的数据分别构建决策树,使用均方误差增加百分比(%IncMSE)作为特征重要性评估指标。

1.3 数据来源

遥感数据具有监测范围广、波谱特征丰富、可重复观测、时间连续等优点,能够提供长时间序列的高精度

综合数据。本研究使用遥感数据和气象站点插值数据分析风电场建设前后 NPP 的变化及 NPP 变化的驱动因子。NPP 和 LST 数据来源于 Earthdata (<https://www.earthdata.nasa.gov>) 平台的卫星数据产品 MOD17A2 和 MOD11A2, PRCP、PET 和 RH 数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn>) 和地球资源数据云平台 (<http://gis5g.com>) , 数据具体来源见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据名称 Data name	数据来源 Data source	空间分辨率 Spatial resolution	时间序列 Time series
植被净初级生产力 Net primary production	Earthdata	500m×500m	2000—2020 年
近地表气温 Land surface temperature	Earthdata	1km×1km	2000—2020 年
降水量 Precipitation	国家青藏高原科学数据中心	1km×1km	2000—2020 年
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	国家青藏高原科学数据中心	1km×1km	2000—2020 年
相对湿度 Relative humidity	地球资源数据云平台	1km×1km	2000—2002 年
	国家青藏高原科学数据中心	1km×1km	2003—2020 年

2 研究结果

2.1 风电场影响距离阈值

NPP 变化与缓冲距离的多项式距离衰减函数拟合结果如图 2 所示,拟合曲线的相关系数 R^2 为 0.8739 ($P < 0.05$)。0—6km 内 NPP 趋势变化波动较大(图 2),拐点出现在 6—8km 缓冲区内,表明风电场对 NPP 的影响距离阈值为 6—8km^[23]。因此,本研究将 2—6km 作为受到风电场影响的影响区(NNWF),8—10km 作为对照区域,各区域的划分如图 3 所示。

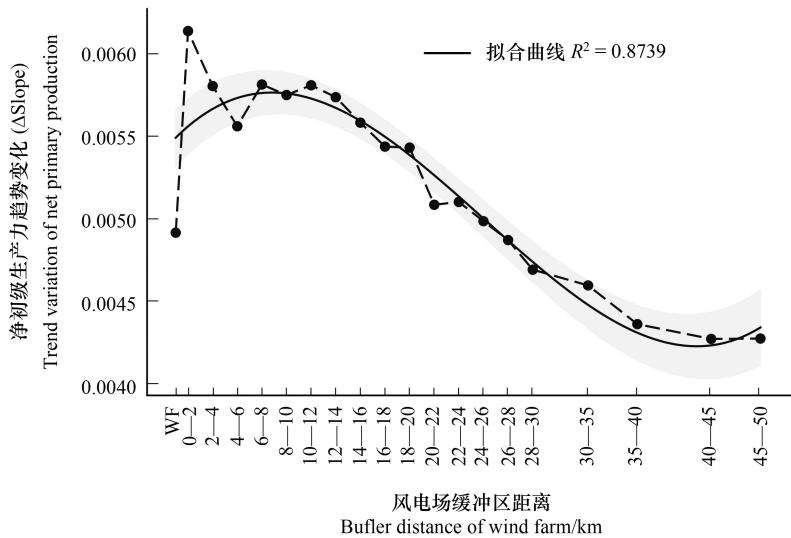


图 2 不同距离缓冲区净初级生产力趋势变化

Fig.2 Trend variation of NPP in different distance buffers

WF:风电场区;阴影区域代表平均值 95% 的置信区间

2.2 风电场建设对植被 NPP 的影响

风电场建设后 WF 内的 NPP 呈现增加的变化趋势,而 NNWF 内呈现下降的变化趋势(图 4)。与建设前相比,WF 的 NPP 极显著增加了 1.8% ($P < 0.01$),WF 区域 NPP 增加的风电场占比为 80.4%,遍布于南部和东部地区,NPP 减少的风电场主要分布在东部地区。NNWF 区域内 NPP 略微减少 0.01%,NPP 增加和减少的风电场数量相当,分别占比 52.9% 和 47.1%,风电场对 NNWF 区域内影响不显著 ($P > 0.05$)。

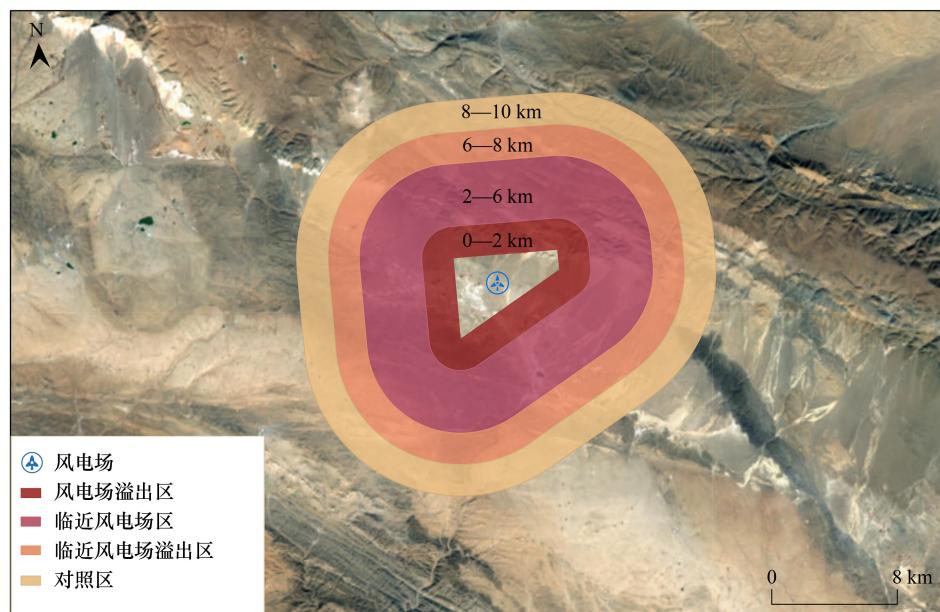


图3 风电场影响分区示意图

Fig.3 Wind farm impact partition diagram

风电场建设对 WF 和 NNWF 内变化趋势(图 4)的影响均不显著($P>0.05$)。WF 内变化趋势总体较建设前增加了 0.09%, 东部地区风电场变化趋势普遍增加 0.5%—0.7%, 南部地区风电场以变化趋势减少为主, 在空间上呈现集聚特征。NNWF 内 NPP 受风电场建设的影响较小, NPP 变化趋势的波动范围主要介于 -0.3%—0.4% 之间, 总体变化趋势基本不变。

对 WF 和 NNWF 的植被 NPP 均值及变化趋势的多维统计结果显示(图 5), 相较于 NNWF, WF 内 NPP 均值变化波动范围较广, 以增加趋势为主。NNWF 内 NPP 均值变化差异较小, 且位于 0 附近波动。风电场不同分区变化趋势波动情况相似, 普遍分布于 0 值附近。不同风电场 WF 和 NNWF 之间的差异反映了: 相比 NNWF, WF 植被 NPP 受到的影响因素可能更为复杂, WF 植被生产力增加可能由生态恢复等人为因素引起。

2.3 不同植被类型风电场建设对植被 NPP 影响的差异

不同地区风电场建设对 NPP 均值和变化趋势的影响存在显著差异(表 2)。不同区域风电场 WF 内 NPP 在建设后均以增加为主, 温性荒漠草原区、温性草原区和农牧交错区风电场变化显著($P<0.01$)。在 NNWF 中, 温性草甸草原区和农牧交错区风电场建设后不显著减少, 而温性荒漠草原区和温性草原区植被 NPP 则不显著增加。

不同植被类型变化趋势在风电场建设后均呈现小幅度波动。其中, 温性草甸草原区变化趋势在 WF 和 NNWF 内分别下降 0.5% 和 0.018%, 农牧交错区变化趋势在 WF 和 NNWF 内分别下降 0.158% 和 0.043%。而温性荒漠草原区变化趋势在 WF 和 NNWF 内则呈现相反的波动, 变化趋势在 WF 和 NNWF 内分别增加 0.343% 和 0.007%。温性草原区在 WF 和 NNWF 内变化趋势则分别增加 0.129% 和减少 0.04%。

2.4 风电场建设影响 NPP 的驱动分析

植被 NPP 变化受到气候因素和人类活动等多重影响, WF 和 NNWF 的 NPP 与各驱动因子的 Person 相关系数如表 3 所示。NPP 变化受 LST 的影响最为显著, 在风电场内外 NPP 与 LST 均呈显著的负相关关系($P<0.05$)。PRCP 对 NPP 的影响在 NNWF 内呈显著正相关, RH 对 WF 植被 NPP 存在显著促进作用。PET 和风机密度在风电场内外与 NPP 变化均无明显相关性。

随机森林模型决定系数 R^2 为 0.31, 远高于随机决定系数 -0.12, 模型在分析中解释度较高。LST 对风电场

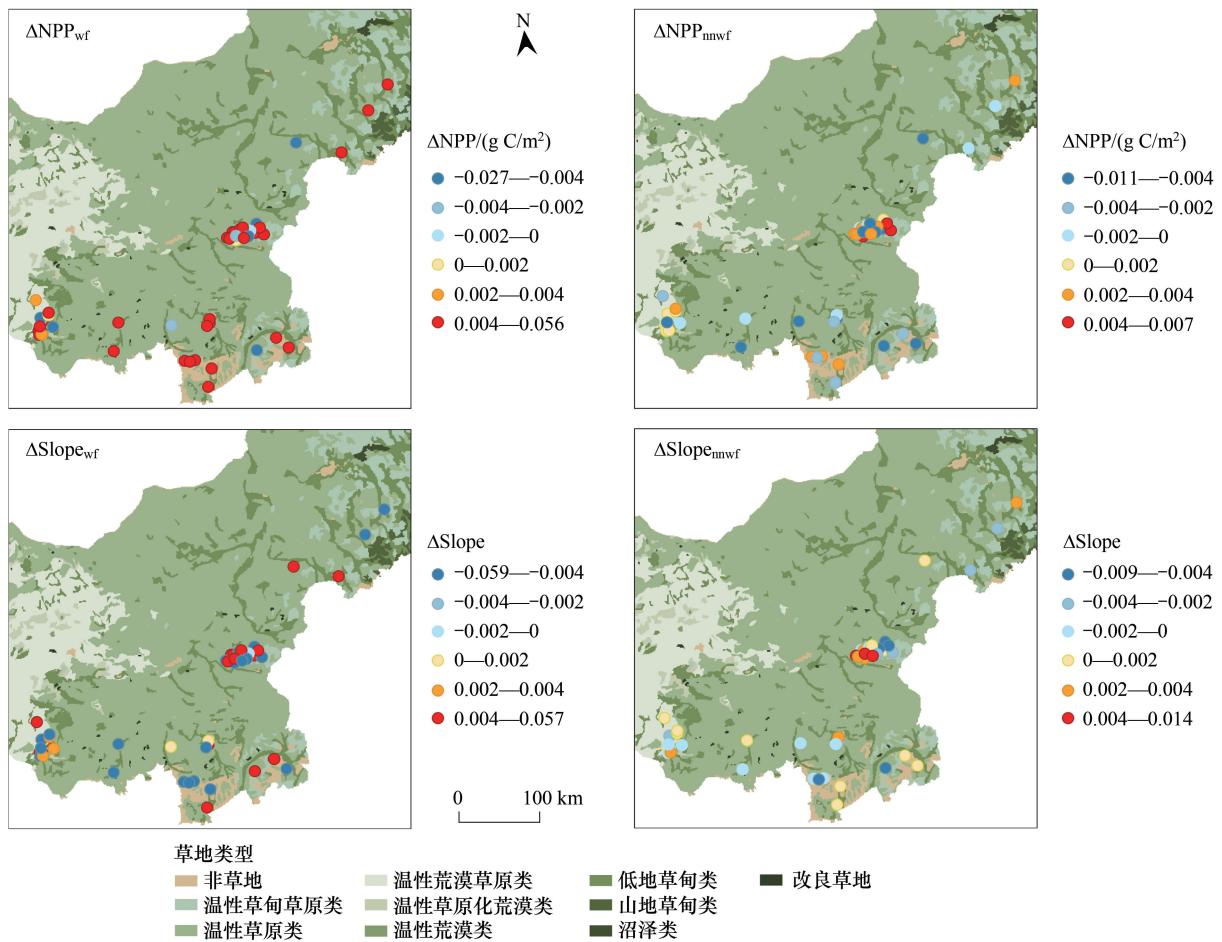


图4 风电场区与影响区净初级生产力均值和趋势的时空变化特征

Fig.4 Spatial and temporal variation characteristics of mean and trend of NPP in wind farm areas and near wind farm areas

ΔNPP_{wf} :风电场区植被净初级生产力均值变化量; ΔNPP_{nnwf} :影响区植被净初级生产力均值变化量; ΔSlope_{wf} :风电场区植被净初级生产力趋势变化量; $\Delta \text{Slope}_{nnwf}$:影响区植被净初级生产力趋势变化量

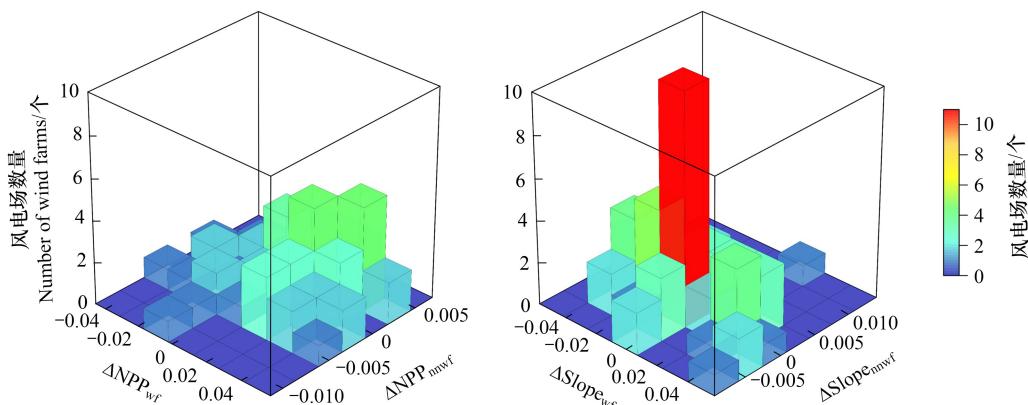


图5 风电场区与影响区净初级生产力均值和趋势变化的多维分布

Fig.5 Multidimensional distribution of mean and trend changes of NPP in wind farm areas and near wind farm areas

内外 NPP 变化影响程度最高, PRCP 是 NNWF 内 NPP 变化的重要驱动因子, 风机密度对 NPP 变化的解释力较低(表 4)。与相关性分析相比, 随机森林模型更为准确地识别了驱动因子影响程度。PET 特征重要性程度在随机森林模型中仅次于 LST 和 PRCP, 对 NNWF 的 NPP 变化存在较为重要的影响。

表 2 不同地区 NPP 均值和变化趋势/%

Table 2 Mean value and trend of NPP in different regions

植被类型区 Vegetation type region	WF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in WF	WF 的 NPP 变化 趋势变化量 Trend variation of NPP in WF	NNWF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in NNWF	NNWF 的 NPP 变化 趋势变化量 Trend variation of NPP in NNWF
温性草原区 Temperate steppe region	1.815 **	0.129	0.005	-0.040
温性草甸草原区 Temperate meadow steppe region	2.896	-0.500	-0.071	-0.018
温性荒漠草原区 Temperate desert steppe region	1.029 **	0.343	0.021	0.007
农牧交错区 Farming-pastoral ecotone	2.736 **	-0.158	-0.115	-0.043

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; WF: 风电场区 Wind farm areas; NNWF: 影响区 Near wind farm areas; NPP: 净初级生产力 Net primary production

表 3 驱动因子 Person 相关系数

Table 3 Driving factor Person correlation coefficient

驱动因子 Driving factor	WF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in WF	NNWF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in NNWF
近地表气温 Land surface temperature	-0.302 *	-0.565 **
降水量 Precipitation	0.041	0.402 **
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	0.057	-0.001
相对湿度 Relative humidity	0.281 *	-0.045
风机密度 Wind turbine density	-0.099	0.102

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

表 4 驱动因子特征重要性均方误差增加百分比/%

Table 4 Driving factor feature importance percentage Increase in Mean Squared Error

驱动因子 Driving factor	WF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in WF	NNWF 的 NPP 变化量 Variation of NPP in NNWF
近地表气温 Land surface temperature	9.82	13.34
降水量 Precipitation	-0.73	12.65
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	-1.60	2.40
相对湿度 Relative humidity	3.46	1.94
风机密度 Wind turbine density	-3.74	-1.65

3 讨论

本文基于 MODIS 卫星遥感数据, 通过空间分析和统计分析, 研究了锡林郭勒地区 51 个风电场建设对 NPP 影响的时空特征。研究发现风电场对 NPP 的影响距离阈值大约在 6—8km 处, Qin 等发现风电场对植被的影响范围大致位于 8—10km 处, 与本研究结果相近^[11]。风电场建设后 WF 内植被 NPP 增加, NNWF 内 NPP 变化不显著, 这与前人的研究结果存在差异。例如在 Liu 等研究中通过遥感解译全内蒙古地区风电场分布数据对比风电场建设前后 NPP 的变化发现植被 NPP 在风电场建设后变化呈现下降趋势^[10], 而 Su 等采用相似思路在内蒙古地区开展的研究则发现 NPP 在建设后基本不变^[12]。这种差异主要是因为建设前后时间

窗口和非风电场对照区选取的不同,本研究通过开展距离阈值分析确定8—10km作为对照区,以每个风电场建设前后5a为时间窗口;Liu等和Su等的研究则直接参考前人研究采用了不同距离的对照缓冲区^[10,12];Su等的研究以风电场建设前后的时间窗口为全部风电场建设时间为依据,而不是研究区内每一个风电场的建设时间为依据^[12]。

本研究的驱动因素分析发现LST和PRCP是影响NPP变化的主导因素,风电建设和运行造成的微气候变化可能是导致NPP变化的主要原因。在局部空间尺度上,风机转子转动产生的涡流增强了气流的垂直混合,改变近地表的温湿度和热通量的垂直分布,从而引起日间近地表出现轻微降温植被的蒸散发强度降低^[24,28—29],这可能使风电场内土壤含水量增加,植被生长水热条件得到改善,导致植被NPP在风电建设后显著增加。除了受到气候因素的影响外,NPP还受到人为因素的干扰。相较于影响区域,风电场区内更为频繁的人类活动是导致风电场内外NPP变化差异的主要原因。在风电项目运行初期,一般会采取禁牧措施,减少牛羊对植被的啃噬,使植被自然恢复,生产力得到提高,同时早期频繁的车辆运维和检修产生的碳氮为植物的光合作用提供了原料^[30],使得风电场区内植被生产力进一步增加,进而导致植被对大气中CO₂固定能力增强。在风电稳定运行期间,补播草种等生态修复措施加速了地表植被的恢复^[31—32],使得植被NPP在较短的时间内得以显著提升^[33]。以往的研究认为风机布设规模大小对地表植被的破坏和微气候变化存在的潜在影响,可能导致区域植被NPP随风电场规模扩张而降低^[11]。然而,在本研究中,风机密度在相关性分析与特征重要性排序中对NPP变化的解释力均较低。这种差异可能由锡林郭勒地区独特的地理位置所导致。研究区位于内蒙古高原腹地,地广人稀,风机密度较为稀疏,风机运行期间难以形成规模效应,对NPP变化产生的影响有限。

不同植被类型NPP对风电场建设的响应存在空间格局差异。在WF内,风电场建设和运行后不同植被类型NPP均呈现增加趋势;而NNWF的NPP在温性草原区和温性荒漠草原区呈现增加趋势,在农牧交错区和温性草甸草原区呈现下降趋势。风电场对不同植被类型NPP的影响存在差异可能与植被对气候变化的响应情况和人类活动扰动程度不同有关。已有研究证实,温性草原和温性荒漠草原涵养水源、保持土壤养分能力较低,对干旱强度变化较为敏感^[34—36]。风电场建设和运行后,日间近地表气温降低和蒸散发减弱,使干旱情况减弱,从而促进了温性草原地区和温性荒漠地区的植被生长,植被覆盖度和生产力相应提高。草甸草原地区植被抗干旱能力较强,区域微气候改善对于植被生长状况的调节能力较不明显。而存在大面积农田分布的农牧交错区,人类活动对植被NPP变化干扰较大,风电场建设和运行后产生的气候变化对NPP影响程度较轻^[37]。

本研究结合遥感影像综合分析风电场植被NPP的时空变化特征和驱动因素,评估风电场建设对NPP的影响,但仍存在局限性。首先,研究所使用的遥感数据在提供丰富连续的植被信息的同时,可能存在一定的不确定性。研究区草本植被具有角度分布的特征,遥感影像观测方向性和准确性会影响NPP量化结果^[18,38]。其次,风机运行将风能转换为电能,由此产生的顺风尾流效应可能对下风向区植被NPP产生不同程度的影响。此外,植被NPP受到复杂人类活动的影响,驱动机制分析所选取的人为因素指标对NPP变化的解释力不足,有必要开展进一步的研究。

4 结论

本文基于卫星遥感数据结合缓冲区分析、时空分析、驱动因子分析等方法,研究锡林郭勒地区51个风电场的植被NPP变化时空格局,确定风电场影响距离阈值约为6—8km,风电场建设后WF内植被NPP显著增加,NPP变化趋势在不同分区变化均不显著。不同植被类型风电场建设后的生态恢复措施对植被生产力恢复产生了积极影响,但在时间序列上,部分风电场植被变化趋势受到了抑制,风电场建设可能对植被年际变化产生潜在的消极影响。风电场内外NPP变化的主要驱动因子分别为LST和PRCP。研究结果进一步加深了对研究区大量风电场植被变化情况的理解,但本文在上下风区对植被可能产生的影响和人为因素对NPP

变化的解释力等方面的研究仍存在不足,有待进一步深入探讨。在应对全球气候变暖和能源安全问题的背景下,锡林郭勒地区风电仍将持续快速发展,建议在风电场建设过程中推进植被生态修复治理一体化建设,恢复和改善生态系统固碳能力。

参考文献(References):

- [1] Feng Y, Lin H Y, Ho S L, Yan J H, Dong J N, Fang S H, Huang Y K. Overview of wind power generation in China: status and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 847-858.
- [2] Global wind energy council, Global Wind Report 2024. (2024-04-16) [2025-01-16]. <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>.
- [3] 内蒙古自治区人民政府.追“新”逐“绿”,汇聚澎湃动能——内蒙古以能源低碳转型有力支撑高质量发展. (2024-10-07) [2025-01-16]. https://www.nmg.gov.cn/zwyw/jrgz/202410/t20241007_2584565.html
- [4] 内蒙古自治区人民政府.内蒙古自治区“十四五”可再生能源发展规划. (2022-06-08) [2025-01-16]. <https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfxxgk/zfxxgkml/ghxx/zxgh/202203/W020220307602288580618/mobile/index.html>
- [5] 唐霞, 刘永新, 马敏, 甄宏超. 内蒙古草原生态系统NEP时空变化特征及影响因素研究. *自然资源遥感*, 2024, 1-9. (2024-09-05). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GTYG20240730007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [6] 李国庆, 李晓兵. 风电场对环境的影响研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(8): 1017-1026.
- [7] 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.
- [8] 贾馨, 李国庆, 王刚, 曹煜. 风电场对草地土壤湿度的影响. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 1125-1134.
- [9] 王刚. 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[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
- [10] Liu L Y, Liu P T, Yu J W, Feng G, Zhang Q, Svenning J C. Wind farms increase land surface temperature and reduce vegetation productivity in the Inner Mongolia. *Geography and Sustainability*, 2024, 5(3): 319-328.
- [11] Qin Y Z, Li Y, Xu R, Hou C C, Armstrong A, Bach E, Wang Y, Fu B J. Impacts of 319 wind farms on surface temperature and vegetation in the United States. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(2): 024026.
- [12] Su N, Li X B, Lyu X, Dang D L, Liu S Y, Zhang C H. Comprehensive assessment of the climatic and vegetation impacts of wind farms on grasslands: a case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122430.
- [13] Ma B R, Yang J H, Chen X H, Zhang L X, Zeng W H. Revealing the ecological impact of low-speed mountain wind power on vegetation and soil erosion in South China: a case study of a typical wind farm in Yunnan. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138020.
- [14] 李智兰. 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*, 2015, 22(4): 61-66.
- [15] 李国庆, 张春华, 张丽, 张蒙. 风电场对草地植被生长影响分析——以内蒙古灰腾梁风电场为例. *地理科学*, 2016, 36(6): 959-964.
- [16] Zhao X C, Li F S, Yuan Y, Ari G N, Yan Y Z, Zhang Q, Olhnuud A, Liu P T. Wind farms reduce grassland plant community diversity and lead to plant community convergence. *BMC Ecology and Evolution*, 2025, 25(1): 10.
- [17] 张雅娴, 樊江文, 李愈哲, 项潇智, 张海燕, 王穗子. 短期围栏封育后再利用对草地植物群落的影响. *生态学报*, 2023, 43(8): 3295-3306.
- [18] 张玥, 许端阳, 王子玉, 张晓宇. 2000—2015年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 603-614.
- [19] Tang B J, Wu D H, Zhao X, Zhou T, Zhao W Q, Wei H. The observed impacts of wind farms on local vegetation growth in northern China. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 332.
- [20] Harris R A, Zhou L M, Xia G. Satellite observations of wind farm impacts on nocturnal land surface temperature in Iowa. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12234-12246.
- [21] Zhou L M, Tian Y H, Baidya Roy S, Thorncroft C, Bosart L F, Hu Y L. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 539-543.
- [22] Chang R, Zhu R, Guo P. A case study of land-surface-temperature impact from large-scale deployment of wind farms in China from Guazhou. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 790.
- [23] 李涛, 高毅华, 王姣娥. 西成高铁陕西段沿线土地利用和景观格局变化的梯度效应. *生态学报*, 2025, 45(4): 1629-1645.
- [24] Feng C T, Cao M, Wang W, Wang H, Liu F Z, Zhang L B, Du J H, Zhou Y, Huang W J, Li J S. Which management measures lead to better performance of China's protected areas in reducing forest loss? *Science of The Total Environment*, 2021, 764: 142895.
- [25] Sarkar S, Das K, Mukherjee A. Groundwater salinity across India: predicting occurrences and controls by field-observations and machine learning modeling. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(8): 3953-3965.
- [26] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.

- [27] Belgiu M, Drăguț L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [28] 蒋俊霞, 杨丽薇, 李振朝, 高晓清. 风电场对气候环境的影响研究进展. *地球科学进展*, 2019, 34(10): 1038-1049.
- [29] Archer C L, Wu S C, Vasel-Be-Hagh A, Brodie J F, Delgado R, St Pé A, Oncley S, Semmer S. The VERTEX field campaign: observations of near-ground effects of wind turbine wakes. *Journal of Turbulence*, 2019, 20(1): 64-92.
- [30] Liu X X, Zhu Z Y, Yu M, Liu X M. Drought-induced productivity and economic losses in grasslands from Inner Mongolia vary across vegetation types. *Regional Environmental Change*, 2021, 21(2): 59.
- [31] 杨霞, 乌吉木吉, 耐力格. 半干旱区草原生态环境质量时空变化及其驱动因素研究——以锡林郭勒为例. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 231-240.
- [32] 王博, 蔺雄奎, 冯占荣, 闫聚辉, 李志刚. 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响. *草业科学*, 2023, 40(9): 2247-2256.
- [33] 连浩宇, 李愈哲. 退耕还草对锡林郭勒草原总初级生产力变化的影响. *生态学报*, 2023, 43(23): 9733-9744.
- [34] 小红, 王永芳, 郭恩亮, 包玉海, 康尧, 美丽. 干旱对锡林郭勒草原植被净初级生产力的影响. *气候与环境研究*, 2024, 29(1): 90-102.
- [35] 李茂林, 闫庆武, 仲晓雅, 朝鲁孟其其格. 干旱半干旱地区植被覆盖度变化及主导因素分析: 以锡林郭勒为例. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(12): 1548-1558.
- [36] 叶博文, 孙标, 史小红, 赵胜男, 邹佳慧, 赵云靓, 姚卫泽. 2000—2021年锡林郭勒草原生态环境质量变化及其驱动因素. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 271-283.
- [37] 欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 路春燕, 王荣林, 张永生, 于显双. 基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价. *生态学报*, 2022, 42(14): 5906-5921.
- [38] 陈兴辉, 张圣微, 赵星宇, 王帅, 章骞, 吕圣薇. 不同气候条件对内蒙古草原植被-土壤协调关系的影响. *环境科学*, 2025, 46(5): 3033-3041.