高山风电场建设及长期运营对植被与土壤理化性质空间梯度的影响
——以云南省磨豆山为例

杨 晨，石 娟，赵珏珩，张运龙，荆晶莹
（中国农业大学 草业科学与技术学院，北京 海淀区 100193）

摘 要：［目的］评估高山风电场建设与运营对高山草甸植被和土壤养分的空间梯度影响，为高山风电场退化草地的修复提供理论依据。［方法］在云南省玉溪市磨豆山风电场区选取3个风机样地及3个未建风机的对照样地，在每个样地按西北、东北、东南、西南4个方位，分别于距风机基座（或中心点）0，20，50，100 m设置采样点，分析植被特征与土壤养分，揭示风电场的生态影响。［结果］①风电场建设显著降低了植被地上生物量（$p<0.01$）和植物群落多样性指数（$p<0.05$）。在风机区内，地上生物量随距离增加极显著上升（$p<0.01$），100 m处达最高值。多样性指数受方位显著影响（$p<0.05$），西南方位最高。②土壤有机质、全氮、含水量均极显著降低（$p<0.001$），土壤pH显著升高（$p<0.05$）。随着与风机距离增加，土壤有机质、全氮、含水率增加。③不同风机辐射半径的土壤速效钾含量存在显著差异（$p<0.05$），其含量随半径增大呈上升趋势。④风机存在与否对土壤速效磷含量无显著影响（$p>0.05$）。［结论］风电场对周边植被地上生物量、群落多样性以及土壤有机质、全氮与含水量等关键理化性质存在显著负面影响，且影响强度随着与风机距离的增加而减弱。因此，生态修复宜实施分区修复策略。距风机20 m范围内为高强度干扰区，应采取土壤改良与植被重建；20—100 m为中低强度干扰区，宜以自然恢复为主，辅以人工促进措施。

关键词：风电场；植被；土壤养分；空间梯度；生态恢复
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）04-0208-10 **中图分类号：**X171，S812

文献参数：杨晨，石娟，赵珏珩，等.高山风电场建设及长期运营对植被与土壤理化性质空间梯度的影响[J].水土保持通报，2026，46（4）：208-217. Yang Chen，Shi Juan，Zhao Jueheng，et al. Spatial gradient effects of construction and long-term operation of alpine wind farms on vegetation and soil physicochemical properties [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（4）：208-217.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.033 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.033**

Spatial gradient effects of construction and long-term operation of alpine wind farms on vegetation and soil physicochemical properties
—A case study of Modou Mountain，Yunnan Province

Yang Chen，Shi Juan，Zhao Jueheng，Zhang Yunlong，Jing Jingying
（*College of Grassland Science and Technology*，*China Agricultural University*，*Beijing* 100193，*China*）

Abstract：［Objective］The effects of wind farm construction and operation on alpine meadow vegetation and soil nutrients were investigated in order to provide a theoretical basis for the restoration of degraded grasslands in alpine wind farm areas.［Methods］Three turbine plots and three control plots without turbines were selected in the Moudou Mountain wind farm of Yuxi City，Yunnan Province. Within each plot，sampling points were established at four directions（northwest，northeast，southeast，southwest）and at distances of 0，20，50，and 100 meters from the turbine base（or central point for control plots）. A comparative analysis of vegetation characteristics and soil nutrients was conducted to elucidate the ecological effects of wind farm construction and operation on local

收稿日期：2025-09-25 **修回日期：**2026-03-15 **采用日期：**2026-03-16
资助项目：国家重点研发计划项目“风电场的土地立体化利用及生态效益评估技术”（2022YFF1303403）
第一作者：杨晨（2004—），男（汉族），河南省漯河市人，硕士，研究方向为草地生态与管理。Email：a13193912231@163.com。
通信作者：荆晶莹（1984—），女（汉族），山东省青岛市人，博士，副教授，主要从事植物土壤互作与草地生态系统健康研究。Email：Jingying.jing@cau.edu.cn。

vegetation and soil. [Results] ① Wind farm construction significantly reduced aboveground biomass ($p<0.01$) and plant community diversity ($p<0.05$). Within turbine plots, aboveground biomass increased significantly with distance ($p<0.01$), reaching its highest level at 100 m. The diversity index varied significantly by direction ($p<0.05$), with the southwest direction showing the highest values. ② Soil organic matter, total nitrogen, and water content were significantly reduced ($p<0.001$), while soil pH value was significantly increased ($p<0.05$). The contents of soil organic matter, total nitrogen and water content increased with increasing distance from the turbine. ③ Soil available potassium content differed significantly at different radiation radii of the turbine ($p<0.05$), showing an increasing trend with increasing radius. ④ The presence of turbines had no significant effect on soil available phosphorus (AP) content ($p>0.05$). [Conclusion] The construction and operation of the wind farm has significant negative effects on surrounding vegetation, particularly aboveground biomass and community diversity, as well as on key soil physicochemical properties, including organic matter, total nitrogen, and moisture content. The intensity of these effects diminishes with increasing distance from the turbine. Therefore, ecological restoration should follow a zoned strategy. In the high-intensity disturbance zone within 20 m of the turbine, active interventions such as soil amelioration and vegetation reconstruction are recommended. In the moderate- to low-intensity disturbance zone (20—100 m), natural recovery should be prioritized, supplemented with human-assisted measures.

Keywords: wind farm; vegetation; soil nutrients; spatial gradient; ecological restoration

风能作为一种极具发展潜力的可再生能源[1],在减少碳排放,缓解温室效应方面贡献突出[2-3],发展风电已然成为提升可再生能源在发电结构中占比、助力实现“双碳”宏伟目标的核心路径[4-5]。然而,在山地风电场建设进程中,由于风力发电机组需要建造平台以及场内道路修筑、配套设施建设等需求,也伴随着显著的生态代价,造成地表扰动、植被破坏、土壤侵蚀等问题[6]。风电机组运行还可能通过改变局域风速、湿度、蒸发等气候因子,间接影响植被生长和土壤水分养分循环。

高海拔山区风电场建设通常占地面积大,且存在土石方开挖、回填现象,会导致大面积的地表裸露以及地表植被扰动,遇降水时水土流失频发,严重时诱发滑坡、崩塌等地质危害,对项目区周边生态环境影响严重[7]。青海省某高海拔风电场由于初期建设严重破坏土壤结构导致土壤侵蚀频发,如水力侵蚀、风力侵蚀[8]。云南省将军山山地风电场也发现建设及维护过程中的土方开挖和土壤压实等工程措施短期内会减少土壤有机碳和养分积累,改变原有植物群落结构和植被覆盖[9]。

高海拔山区建设期以及运营期都会导致对周边环境的破坏,建设期植被遭到大面积直接破坏,地表植物被铲除等。运营期风力发电机组的尾流效应会改变边界层中大尺度运动动能的收支模式与时空分布,对周遭温度、降水和风速产生影响[10-11];风电场运营期间的长期影响也不容忽视,风机基础周边的植被群落结构会因人为干扰发生显著改变。例如,在辉腾锡勒草原风电场,风机架设过程会破坏土壤表层,导致以风机为中心 160～250 m 范围内出现裸土地;风机后期维护的人为活动干扰严重,致使被破坏的植被恢复速度缓慢[11],同时辉腾锡勒近年来的风电场也发现对周围环境的降雨量、蒸发量及相对湿度等气象因子产生负面影响[12]。风力发电机组日常运作将影响局部小气候,进而影响植物的正常生长繁殖,造成植被多样性、植被生物量的降低。风电开发会引发生物多样性及生态系统服务功能的转变,主要表现为对气候、土壤、生物群落及景观格局的影响[8]。研究发现,中国北方风电场建设会降低其周边植被生产力[13];王希平[11]对辉腾锡勒草原风电场开发运营植被响应分析,发现风电场建设降低了植被生长指数。

尽管已有研究广泛报道了风电场建设与运营对高海拔生态系统产生的负面影响,但多数成果仍集中于现象描述与整体效应评估,而对生态因子在空间梯度上的响应规律缺乏系统量化,尤其是在地形复杂,生态脆弱的高山区域。这种空间分异规律的认知缺失,制约了风电场周边生态修复措施的精准布局与效率提升。因此,本研究以云南省玉溪市磨豆山高海拔风电场为研究对象,通过设置沿风机径向与不同方位的系统采样梯度,重点解析植被特征与土壤养分参数的空间分异模式,旨在精确量化风电场影响的范围与强度变化规律,并识别关键驱动因素,为高海拔风电场区的生态影响评估提供理论补充,也可为风电场扰动区域的“分区-分类-分级”精准修复提供实践依据,对推动风电产业与高山生态系统协调可持续发展具有重要科学意义与现实价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究选取云南省玉溪市磨豆山风电场作为试验场区。该场区位于云南省玉溪市华宁县与江川区交界处的山脊地带(东经102°44′—102°52′,北纬24°19′—24°25′),属典型的高海拔山地风电场,区域面积约60 km²。该区域属于中亚热带半湿润高原季风气候,年平均气温为16 ℃,年均日照时数2 165 h,年均降雨量916 mm左右,多年平均风速6.2 m/s。其中降雨集中在每年6—10月,每年11月至次年1月会出现冻害现象。

磨豆山风电场于2010年前后启动建设,分多期开发,目前已建成风机百余台,总装机容量超过200 MW,是云南省较早规模化开发的高山风电项目之一。风机沿山脊线布设,单机容量多为1.5~2.0 MW。建设过程中需修建宽约6~8 m的施工道路、大型风机平台(单个平台面积通常为30 m×30 m以上)及电缆沟槽,导致地表植被清除、土壤翻动与压实,对原生高山草甸造成显著扰动。该区域地理位置独特,地处滇中腹地,能有效利用丰富的风力资源。周边有省道经过,交通条件良好,便于设备运输和人员往来。这里受西南季风和南支西风急流影响,风力资源丰富且稳定,是云南省较大的风力发电场之一,对当地清洁能源供应有重要意义,同时也成为热门的观景打卡地。

研究区土壤类型以红壤为主,质地以黏壤土和砂质黏土为主。由于风电场已运行十余年,且地处生态脆弱的高山草甸带,其长期累积的生态效应具有典型性和代表性,是研究风电开发对高寒/高山草地生态系统影响的理想场所。风电场区域内现以荒草地为主,草地退化现象明显。研究区原生植被为以针茅属(*Stipa* spp.)和嵩草属(*Kobresia* spp.)为主的高山草甸群落。本研究选取其中3个风机平台作为研究对象,对其进行植被监测和土壤采样,另选取3处未建造风机、但地形地貌与植被背景相似的山头作为对照样地(表1)。所选风机平台及对照样地在地形(均为山脊顶部)、海拔、坡向和原始植被群落上均具有相似性,以尽量减少本底差异对结果的干扰。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究的采样距离设置(0—100 m)基于理论依据与实地条件共同确定。虽然环境影响评价与风场设计方案参考了200 m的理论影响半径,但该数值表征的是最大潜在影响范围。在磨豆山的复杂地形中,实地调查表明,多数风机点位在100 m范围外即出现显著的地形转折(如坡度陡增、山体变化)。若将采样扩展至150—200 m,会引入海拔、坡向与坡位等关键地形因子的显著差异,这些混杂因素将干扰对风机距离这一单一变量的解析。因此,为在严格控制地形变量的前提下进行有效的空间梯度分析,本研究将采样范围限定于同一山头的均质坡面系统内,取样范围为100 m,试验样地取样时用GPS对机组基座进行经纬度定位并记录,同时用皮尺分别沿西北、东北、东南、西南4个方向距基座距离0 m(围栏处中心点),20 m,50 m,100 m确定采样点;对照样地选取邻近区域内无风机分布、植被未受扰动的自然山顶,以样地山头中心作为参照点,采用GPS对该中心点进行经纬度定位并记录,同时用皮尺分别沿西北、东北、东南、西南4个方向,距参照点0,20,50,100 m处确定采样点。最终每个样地(试验样地和对照样地)分别从4个方位(西北、东北、东南、西南)取样,每个方位取样4个距风机距离不同的采样点(图1)。样点方位设置主要依据该地区盛行风向(西南风和东南风),以期捕捉风电机组可能产生的下行风/尾流效应的空间变异。由于地形(山的朝向、坡度等)原因,同一距离取样点在海拔上存在微小差异,可能导致误差。

表1 取样点地理位置

Table 1 Geographic locations of sampling points

样地	经度	纬度	海拔高度/m	叶片长度/m	轮毂高度/m
1号风机	102°54′14″E	24°20′46″N	2 540	45.3	80
4号风机	102°53′57″E	24°20′11″N	2 473	45.3	80
7号风机	102°53′49″E	24°19′38″N	2 528	45.3	80
对照样地1	102°55′00″E	24°21′27″N	2 315	—	—
对照样地2	102°54′51″E	24°21′38″N	2 450	—	—
对照样地3	102°54′40″E	24°22′5″N	2 390	—	—

1.2.2 野外取样和样品处理

2024年7月选择植被生长旺季进行野外样品采集,先对风力发电场地面的植被开展调查,根据图1取样点选择具有代表性、特殊性的区域,进行0.5 m×0.5 m的样方调查,测定样方内植物盖度、多度,同时以样方内各物种多度为基础计算植被多样性指数,植被多样性采用Shannon-Wiener指数表征;将样方内植被的地上部分全部剪下,称鲜重,带回实验室后在105 ℃下集中杀青60 min,并对其在80 ℃的恒温干燥箱中进行烘干处理至恒重,用精度为0.01 g的电子天平称干重并记录地上生物量。

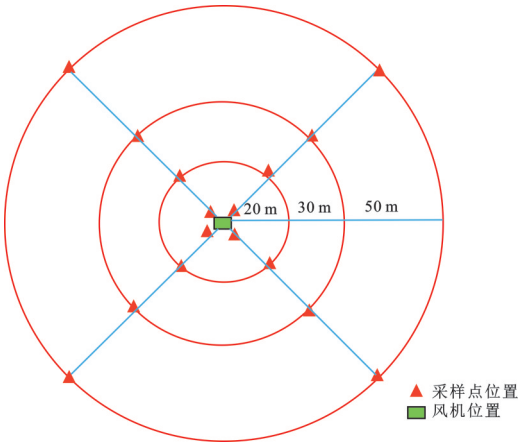


图 1　取样点位置示意图

Fig.1　Schematic diagram of sampling point locations

1.2.3　土壤采集及样品的测定

各采样点采样深度为 0—20 cm,选择此深度是因为该层是草地植被根系的主要分布层和养分活跃层。按照图 1 确定的采样点用土钻采集混合土样(在每个采样点中心及四周共 5 土钻土混合过筛),然后将其装进已经预先编号的取样袋内,并统一归类,最后全部带回实验室。到试验室及时进行土壤样品制备,以便后续实验室分析。采样过程应尽可能避免天气、环境等自然条件对土壤待测各项指标造成的影响。

土壤理化性质及养分含量的测定:土壤含水率用烘干法测得;pH 值采用电极电位法测定(1∶2.5 土水比);土壤有机碳含量(g/kg)测定采用重铬酸钾氧化外加热法;土壤全氮(g/kg)用凯氏定氮法;速效磷(mg/kg)采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(mg/kg)采用乙酸铵提取法测定;无机氮采用流动注射分析法测定。

1.3　数据处理

应用 Microsoft Office Excel 2024,SPSS 27.0 数理统计分析软件对野外监测数据以及试验数据进行整理,采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验“风机存在与否”和“辐射半径”及其交互作用对各指标的影响。显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。若交互作用显著,则进行简单效应分析;若主效应显著,则用 Duncan 法进行多重比较。用 Microsoft Office Excel 2024, Origin 2024 二维绘图软件对数据制图和模拟。

2　结果与分析

2.1　风机存在与否、距风机距离及方位对植被的影响

风电场存在对植被特性产生了显著影响,但不同指标的响应模式存在差异(图 2)。具体而言,风机存在显著降低了植被地上生物量与多样性指数。双因素方差分析表明,风机存在与否对二者均有显著或极显著影响(生物量:$p<0.01$;多样性:$p<0.05$),且无风机对照区的测量值均显著高于风机区。在风机区内,地上生物量随风机距离的增加而极显著地上升($p<0.01$),0 m 处生物量最低,100 m 处最高。在风机存在的区域内,多样性指数受风机方位的显著影响($p<0.05$),与风机辐射半径无关,其中西南方位的多样性显著高于东南、东北及西北方位。

与生物量和多样性不同,风机存在与否对植被盖度并未产生显著影响($p>0.05$)。但其与辐射距离的交互作用显著($p<0.05$)。该交互作用表现为一种相反的梯度模式:在无风机区,盖度随距离增加略微下降;而在风机区,盖度则随距离增加呈现恢复态势。当仅聚焦风机区内数据时,方位与辐射距离对盖度均无显著影响。

2.2　风机存在与否与距风机距离对土壤理化性质的影响

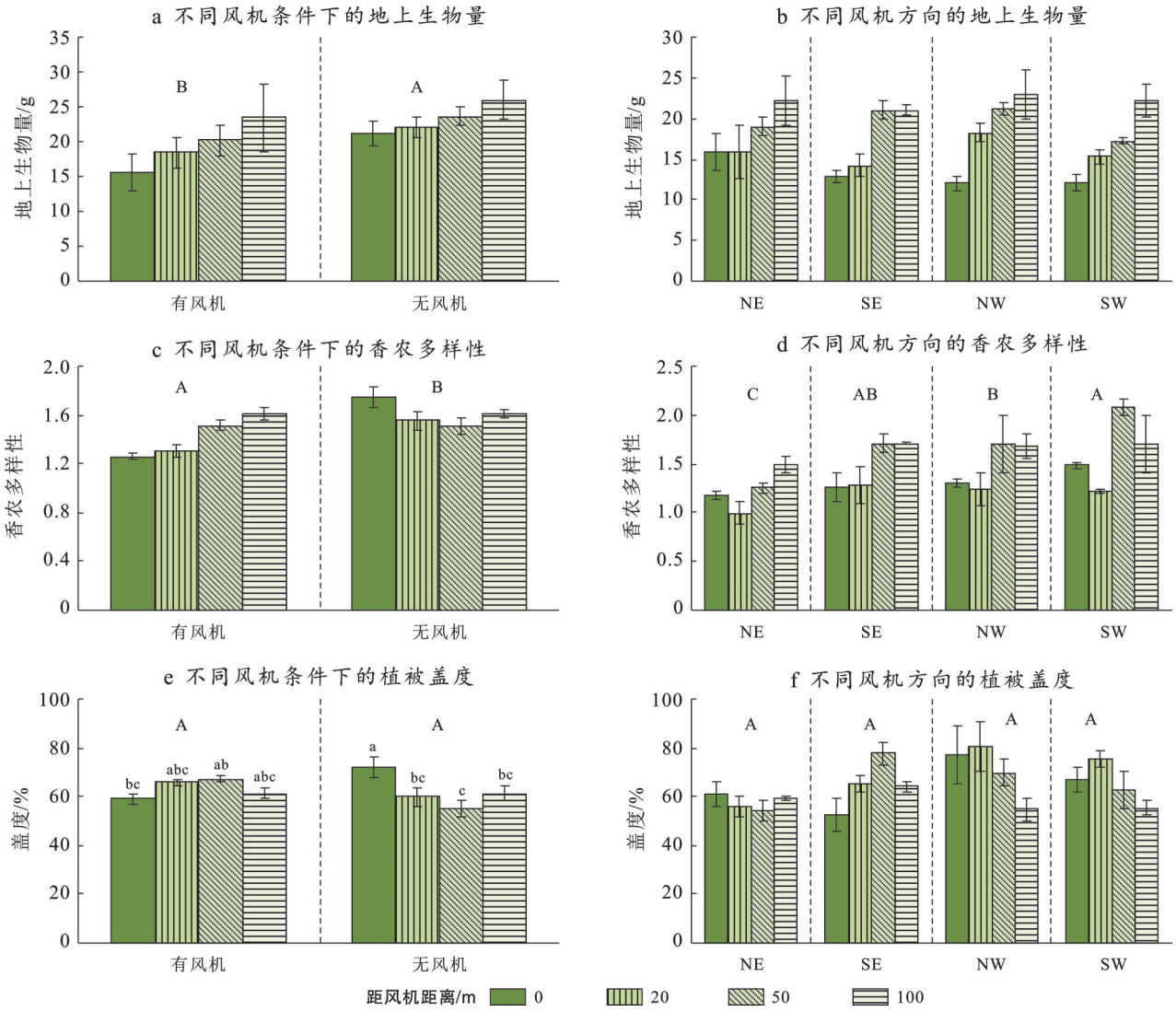
风电场建设显著改变了区域下垫面土壤属性的空间分布格局(图 3)。双因素方差分析表明,风机存在与否及其与辐射半径的交互作用是导致多数土壤养分指标和水分变化的关键驱动因子。

风机布设对土壤有机质和全氮含量产生了极显著的负面影响($p<0.001$)。与无风机对照区相比,风机平台及邻近区域(0 m, 20 m)的有机质和全氮含量显著降低。在风机影响范围内,二者含量均随辐射半径增加呈显著上升趋势,在 100 m 处含量最高,且显著高于 0 m 和 20 m 处($p<0.01$),表明风机扰动对土壤养分的负面影响随距离增加而减弱。

土壤速效钾的变化模式较为复杂。其含量主要受风机存在与辐射半径交互作用的极显著影响($p<0.001$),两者主效应均不显著。在风机布设区域内,不同辐射距离的土壤速效钾含量存在显著差异,100 m 辐射半径处土壤速效钾含量显著高于 50 m 处,50 m 处显著高于 0 m 和 20 m 处。以 20 m 实际风机平台直径为界,呈现出辐射距离越近,土壤速效钾含量越低的趋势,风电场的建设显著降低土壤速效钾含量可能与风机建设和运营造成的土壤挖填、表层矿物暴露、植被吸收减少及含水率变化等间接扰动相关。相比之下,风电场建设对土壤速效磷含量无显著影响($p>0.05$)。

风机建设造成的土壤扰动还显著改变了土壤 pH 值($p<0.05$),风机区土壤 pH 普遍高于对照区。土壤含水率则受风机存在的极显著负面影响($p<0.001$),

对照区含水量显著高于风机区。在风机区内，含水率随辐射半径增加显著上升，100 m 处最高，50 m 处次之，均显著高于近风机点，体现出风机对土壤水分的强烈消耗作用。



注：①图中误差棒为标准误差，下同。②左图中字母表示有无风机条件下的植被生物量/香农多样性/植被盖度具有显著差异（$p<0.05$）；不同大写字母表示同一半径下有无风机存在显著差异（$p<0.05$）；右图中 NE 代表东北方位，SE 代表东南方位，NW 代表西北方位，SW 代表西南方位；不同大写字母表示同一距离下不同风机方位植物多样性的存在显著差异（$p<0.05$）。下同。

图 2 风机存在与否、距风机距离及方位对植被的影响

Fig.2 Effects of wind turbine presence, distance from wind turbine, and orientation on vegetation

2.3 距风机距离与方位对土壤理化性质的影响

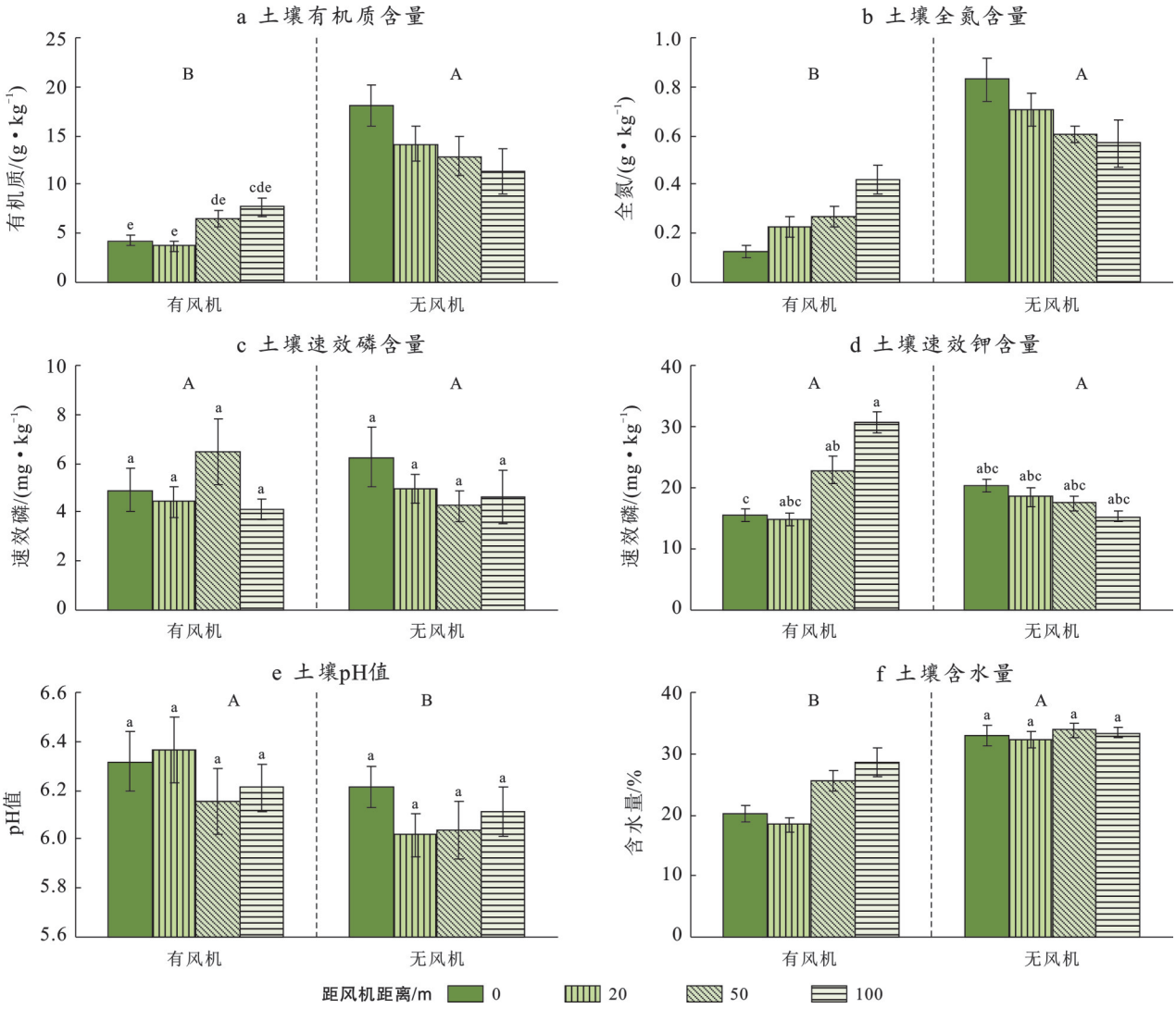
针对风机布设区的分析表明，土壤属性主要受辐射半径即距离风车的距离影响，而风机方位未表现出明显作用（图 4）。双因素方差分析显示，风机方位及其与辐射半径的交互作用对土壤有机质、全氮、速效钾及含水率均无显著影响（$p>0.05$）。

相比之下，辐射半径作为单一因素，对上述土壤属性产生了显著或极显著的影响（$p<0.05$）。具体来说，随着辐射半径的增大，土壤有机质与全氮含量呈极显著上升趋势（$p<0.01$），土壤含水率也呈极显著上升趋势（$p<0.001$），速效钾含量则呈显著上升趋势（$p<0.05$）。

2.4 各指标间 Spearman 相关性分析

通过分析建造风机区域的植物特性及土壤指标之间相关性（图 5a），发现土壤速效钾与有机质含量存在显著的正相关关系（$p<0.05$），相关系数为 0.312；土壤全氮与有机质含量存在显著的正相关关系（$p<0.05$），相关系数为 0.660；土壤含水率和土壤全氮含量存在显著的正相关关系（$p<0.05$），相关系数为 0.53；土壤 pH 值与土壤含水率、土壤速效钾含量存在显著的负相关关系（$p<0.05$），相关系数分别为 −0.297，−0.268；植被盖度与地上植物生物量存在显著的正相关关系（$p<0.05$），相关系数为 0.367。通过分析未建造风机区域的植物特性及土壤指标之

间相关性(图 5b),发现土壤速效钾含量与土壤速效磷含量、pH 值、土壤含水率以及植被盖度存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数分别为 0.306,0.401,0.367,0.379;土壤有机质含量与土壤速效磷含量、全氮、pH 值、含水率以及植被盖度存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数分别为 0.346,0.789,0.410,0.462,0.270;土壤速效磷含量与全氮、含水率存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关性系数分别为 0.343,0.504;土壤全氮含量与 pH 值、土壤含水率以及植被盖度存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数分别为 0.381,0.578,0.371;土壤含水率与植被多样性、植被盖度存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数分别为 0.299,0.333;植物地上生物量与植被盖度存在显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数为 0.384。分析已建造风电场区域与未建造区域的 Spearman 相关性,发现未建造风机样地各指标间联系更为紧密,存在更多显著相关的线性关系。



注:柱状图中小写字母表示不同距离间的差异比较($p<0.05$);大写字母表示有无风机存在显著差异($p<0.05$)。

图 3　风机存在与否与距风机距离对土壤理化性质的影响

Fig.3　Effects of wind turbine presence and distance from wind turbine on soil physicochemical properties

3　讨　论

3.1　风机建设及运营对植被影响

分析对比未建造过风电场区域的对照样地和风力发电场区域内的试验样地,结果显示,风机建设和运营对植被产生了显著的负面效应,具体表现为植被生物量与多样性显著降低,但对植被盖度的影响并不显著。解云虎[14]认为随着风力发电场建造后恢复时间的延长,植被得以明显恢复,约经过 11 a 的自然恢复后植被覆盖度接近没有建造风力发电机的对照样地。根据前人研究,恢复年限越久,植被恢复效果越好。本研究区域内风机运营时期已达 11 a,在植

被盖度方面恢复效果较好，因此风电场区域植被盖度与对照无显著差异。然而，风电场区域植被生物量以及植物多样性仍然显著低于未建造过风电场的对照样地。这一结果揭示了植被不同属性对风电扰动的响应存在明显的恢复速率分异：盖度可较快恢复，但生物量与多样性恢复显著滞后。盖度的相对稳定可能源于先锋草本物种（如一年生杂类草或耐扰禾草）的快速定殖，其虽能覆盖地表、减少水土流失，但生物量低、生态功能弱。相比之下，生物量和多样性的持续偏低，反映出群落演替受阻，这可能与土壤养分库退化密切相关。运营期风机产生的尾流、噪声及阴影效应可能通过改变温度、湿度、风速等小气候因子，影响植物光合作用、水分平衡及传粉过程，从而抑制了生物量的积累和多样性的恢复[15]。

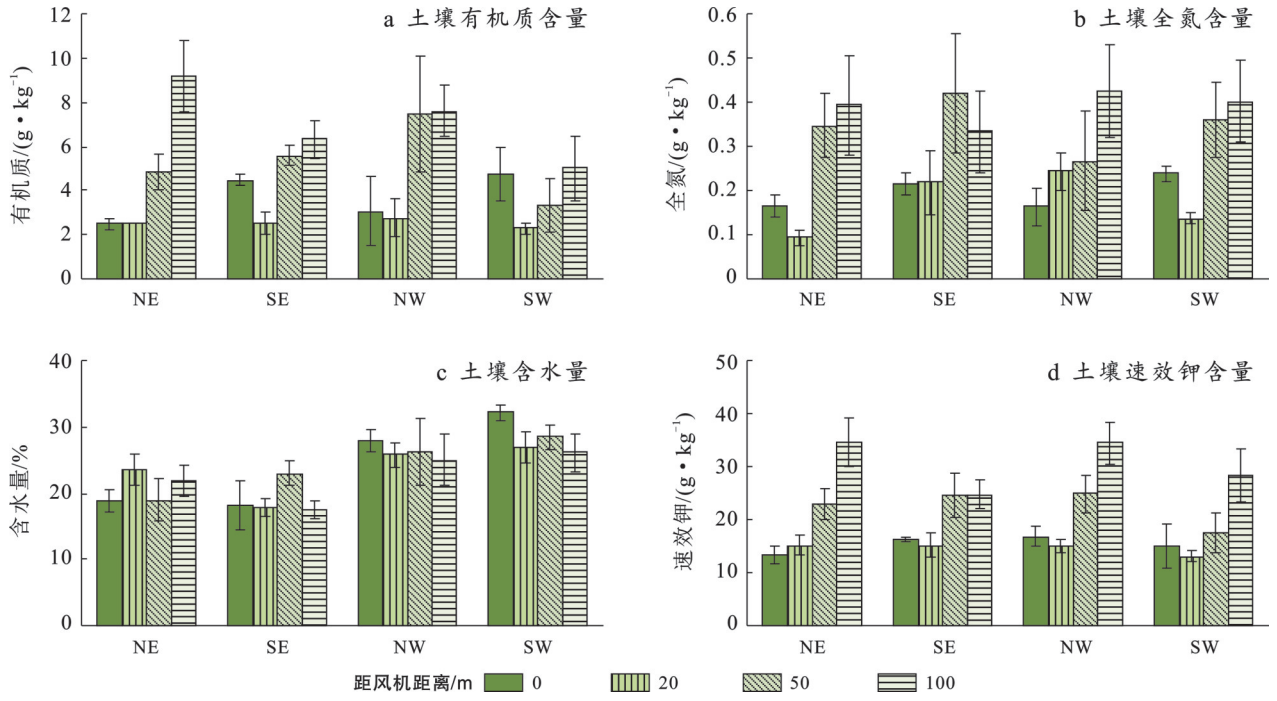
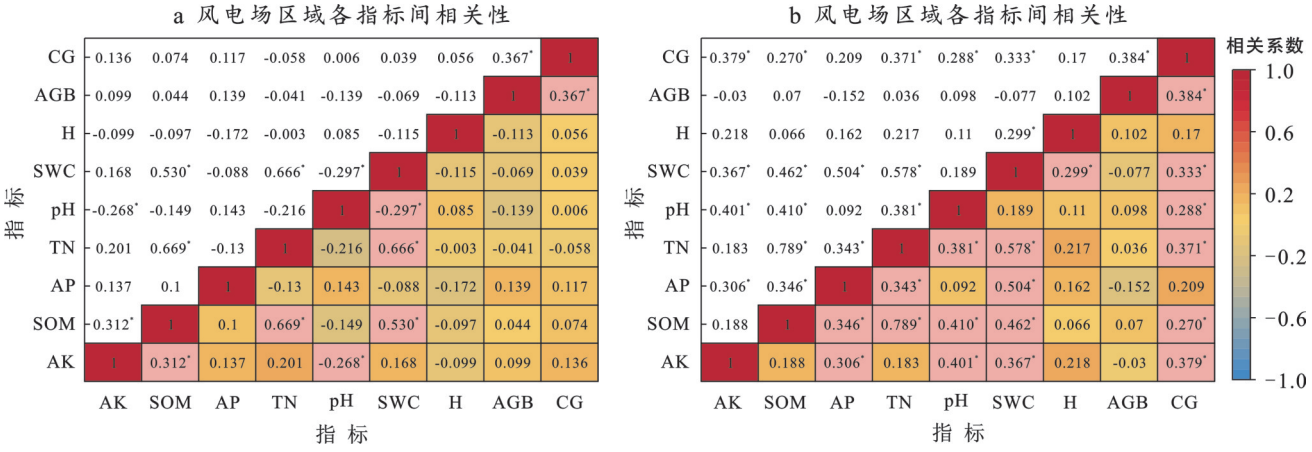


图 4 风机辐射方位与距风机距离对土壤理化性质影响

Fig.4 Effects of wind turbine orientation and distance from wind turbine on soil physicochemical properties



注：①AK为土壤速效钾含量；SOM为土壤有机质含量；AP为土壤速效磷含量；TN为土壤全氮含量；pH为土壤酸碱度；SWC为土壤含水量；H为香农-威纳指数；AGB为地上生物量；CG为群落盖度。②颜色表示相关性系数。红色代表正相关，蓝色代表负相关，颜色越深相关性越强。③图中圆点旁的星号表示相关性的显著性，*对应在0.05水平上显著。

图 5 有无风机区域各指标间相关性

Fig.5 Correlation among indicators with or without wind farm

值得注意的是，植被指标表现出清晰的空间梯度格局：地上生物量随距风机距离增加而极显著地上升（$p<0.01$），0 m 和 20 m 处显著低于 50 m 和 100 m 处；多样性指数虽不受距离影响，但在西南方位显著高于其他方位（$p<0.05$）。这表明风机扰动具有明显的空间衰减效应，这与李智兰等[16]的研究结论一致。

这可能是由于建造风电场时风机平台内区域的植被遭到破坏、土壤遭到扰动及回填,以及风电场日常运营时风机平台内区域受到的扰动也大于风机平台外区域[13]。这一发现对生态修复实践具有直接指导意义,有助于制定更有针对性和有效性的恢复措施。

此外,多样性在西南方位显著更高,可能与局地微气候(如太阳辐射更强、风速较低)或施工残留扰动差异有关,值得后续结合风向频率、地形遮蔽效应及土壤微环境进行精细化建模分析。本研究结果综合表明,风电场区的植被退化是建设期初始破坏与运营期持续干扰(如局域小气候变化、人为活动)共同作用的结果,且功能恢复远滞后于结构恢复。生态修复不应仅以“是否返青”为标准,而应聚焦于高质量群落重建与生态系统功能提升。

3.2　风机建设及运营对土壤理化性质的影响

本研究发现,风电场显著改变了高山草甸土壤的关键理化性质:与未建风机的对照样地相比,风机区土壤有机质、全氮和含水率均极显著降低($p<0.001$),而pH值显著升高($p<0.05$)。这些变化并非均匀分布,而是呈现出以风机基座为中心、随距离增加而逐步缓解的明显空间梯度,其中20 m为关键分界线:平台内外土壤养分状况差异显著。

蒸散发作为地表能量平衡和交换、地表物理过程的重要因子,是生态系统地表水、碳、氮等物质循环过程的主导因子,蒸散发的变化会对生态系统物质及能量循环产生重大影响。李国庆通过遥感技术从区域尺度探讨风电场对区域蒸散发的影响,发现风电场会加快地表区域蒸散发[17],与本研究发现一致,与未建造风电场的自然草地相比,风电场区域内土壤pH值较高,土壤有机质、全氮、含水率降低。由于风电场内植被生物量较小,凋落物输入量下降,土壤微生物能用于分解矿化的有机底物减少,进而抑制有机质合成与氮矿化过程,造成有机质含量较低[18],形成植被退化、土壤贫瘠的负反馈循环。

土壤pH值的升高可能与有机质分解受阻、土壤淋溶作用减弱有关,一方面,有机质分解受阻导致有机酸(如腐殖酸、富里酸)生成减少;另一方面,地表覆盖减少可能削弱降水淋溶作用,使碱性离子(如Ca^{2+}、Mg^{2+})相对富集[19]。值得注意的是,速效钾在近风机区(0—20 m)含量较高,可能与建设过程中矿物质的翻出或土壤压实导致钾释放特性改变有关,但其生物有效性及长期变化需进一步研究。

土壤养分的空间梯度特征表明,风机对土壤的影响不仅源于建设期的初始破坏(如表土剥离、平台压实),更受到运营期持续扰动(如维护车辆碾压、人为踩踏),进一步加剧近风机区土壤退化。风机的不同方位对土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾、含水率、pH值无显著影响,可能是由于风机叶片会随风向、风速进行调整,风机叶片朝向不固定。风机不同辐射半径下土壤有机质、全氮、速效钾含量存在显著差异,随着辐射半径增大,土壤养分含量越高,20 m是一个明显的分界线,风机平台内外区域土壤养分含量差异巨大,表明20 m半径内的风机平台区域是土壤退化的“高强度核心区”,其养分库重建缓慢,恢复潜力最低。因此,在制定恢复措施时,应依据这一空间梯度规律实施分区治理:优先对20 m内区域采取工程与生物措施,而对20—100 m区域则以促进自然恢复为主,辅以适度干预。

3.3　研究展望

本研究聚焦于单风机辐射梯度,然而,不同地区风电场生态环境效应存在显著差异。费婷婷等针对河北省风电场的研究发现,风电场建设对周边植被和局地微气候具有明显的减绿、增温和降湿环境效应,影响发生的拐点在距风电设施300—400 m处,风电场生态环境效应受到区域气候、植被类型和土壤特性的共同调制,不能简单一概而论[20]。未来研究可探究风电场集群对区域生态系统功能(如生物多样性维持、水源涵养)的综合影响,同时借助遥感、景观生态学方法及模型模拟,从更大尺度评估风电开发的生态风险。

其次,本研究采用“空间替代时间”的方法,通过比较不同距离梯度上的植被与土壤状况来推断风电场扰动的长期生态效应。然而,该方法无法捕捉同一地点随时间演化的动态过程,生态恢复是一个受多因素影响的非线性过程[14],建设初期的剧烈干扰主要表现为土壤压实、植被清除等直接物理破坏,而运营期的影响则更为复杂。长期观测数据显示,风机运行导致的局地风速、湍流强度以及微气候(如近地表气温、降水量和相对湿度)的改变,会影响到植物的传粉和种子传播效率,进而对植物群落的结构与动态产生长期影响[18];长期运营的风电场可能通过改变微气候诱导土壤形成“肥沃岛效应”,并进一步影响溶解性有机质(DOM)的组成与微生物的相互作用[21]。因此,仅凭空间梯度推测时间动态仍存在不确定性。同时100 m是本研究在地形限制下可实现的最大取样距离,不代表风机生态影响的理论最大边界;在更远距离(如150—200 m)是否仍存在显著生态效应,需要进一步的扩展采样或遥感尺度分析。建议未来在风电场区设置长期的定位观测样地,通过长期定位监测,为探究生态修复提供更全面的科学依据。

另外,本研究主要关注了风机建设和运营对地表植被与土壤的影响,未能深入探究土壤垂直剖面结构对风机扰动的响应。风电场建设和运营过程中所涉及的地基开挖、压实等活动都有可能对土壤深层结构、养分分布等产生影响。研究显示,风电场的建设会显著影响表层土壤的物理性质,如增加土壤容重、降低持水量和孔隙度[22],但针对深层土壤的研究表明,风电场的建设并未显著改变土壤养分在垂直剖面上的"表聚性"分布特征,深层(40—60 cm)土壤养分含量在扰动区与未扰动区之间无显著差异[16]。未来研究可结合土壤剖面分层采样、地下传感器监测等技术,构建"地上-地下"一体化的风电场生态监测体系,从而更全面地解析其长期环境效应。

4 结 论

(1)风电建设与运营显著降低了风机平台附近(尤其是20 m范围内)植被地上生物量与香农多样性指数,但对植被覆盖度无显著影响,表明植被不同指标恢复速度存在差异。

(2)风机建设与运营导致土壤有机质、全氮含量及含水率显著降低,pH值升高。土壤有机质、全氮、速效钾及含水率随风电机组距离增大而升高,反映出风机扰动具有明显的空间梯度效应;不同方位间无显著差异。

(3)综合植被和土壤理化性质的响应,风电场对植被和土壤的干扰是建设期破坏与运营期持续扰动共同作用的结果,其干扰强度随与风机距离增加而减弱。据此,生态修复宜遵循分区治理原则:距风机0—20 m的高强度干扰区实施以土壤改良与植被重建为主的主动修复;20—100 m的中低强度干扰区则以自然恢复为主,辅以人工促进措施,以实现高效且差异化的生态恢复目标。

参考文献(References)

[1] 赵学峰,宫晓梅,陈文平.大气污染治理中低碳排放技术的研究与应用[J].中国资源综合利用,2025,43(2):246-248.
Zhao Xuefeng, Gong Xiaomei, Chen Wenping. Research and application of low-carbon emission technology in air pollution control [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025,43(2):246-248.

[2] 李琪光,张栩浩,赵德龙,等.低碳背景下环境监测与保护策略研究[J].环境科学与管理,2024,49(9):123-128.
Li Qiguang, Zhang Xuhao, Zhao Delong, et al. Analysis of environmental monitoring and protection strategies under a low-carbon environment [J]. Environmental Science and Management, 2024,49(9):123-128.

[3] 王立波.基于低碳经济的制造业企业新能源经济发展策略分析[J].现代工业经济和信息化,2024,14(10):259-261.
Wang Libo. Analysis of new energy economy development strategy of manufacturing enterprises based on low carbon economy [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2024,14(10):259-261.

[4] 闻勇.山地风电场生态治理与修复技术实践[J].中国水土保持,2022(10):50-52.
Wen Yong. Ecological control and restoration technology of mountain wind farms [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(10):50-52.

[5] 陈雅禾,丁宁,白孝轩,等.风力发电及储能系统碳足迹分析[J].中国环境科学,2025,45(5):2926-2931.
Chen Yahe, Ding Ning, Bai Xiaoxuan, et al. Carbon footprint analysis of wind power system with generation and storage [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2926-2931.

[6] 张立中,赵海波.风电场生态环境评价及其恢复治理技术研究[J].能源与环保,2021,43(11):17-22.
Zhang Lizhong, Zhao Haibo. Research on ecological environment evaluation and rehabilitation technology of wind farm [J]. China Energy and Environmental Protection, 2021,43(11):17-22.

[7] 汪传理.安徽省山区风电开发项目水土流失防治重点及对策[J].安徽农学通报,2017,23(14):158-160.
Wang Chuanli. Key points and countermeasures of the soil and water loss control in wind power development project in mountain area of Anhui Province [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017,23(14):158-160.

[8] 马全峰,田维,陈伟奇.青海高海拔山区风电项目水土保持防治措施体系[J].电力勘测设计,2025(4):48-52.
Ma Quanfeng, Tian Wei, Chen Weiqi. Soil and water conservation and prevention measures system for wind power projects in high altitude mountainous areas of Qinghai Province [J]. Electric Power Survey & Design, 2025(4):48-52.

[9] 张力琛,范立张,马常威,等.山地风电场建设对土壤性质和植被覆盖的影响:以云南省将军山风电场为例[J].生态学杂志,2022,41(12):2397-2405.
Zhang Lichen, Fan Lizhang, Ma Changwei, et al. Influence of mountain wind farm construction on soil properties and vegetation cover: A case study of Jiangjunshan wind farm in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(12):2397-2405.

[10] 蒋俊霞,杨丽薇,李振朝,等.风电场对气候环境的影响研究进展[J].地球科学进展,2019,34(10):1038-1049.
Jiang Junxia, Yang Liwei, Li Zhenchao, et al. Progress in the research on the impact of wind farms on climate and environment [J]. Advances in Earth Science, 2019,

34(10):1038-1049.

[11] 王希平.辉腾锡勒草原风电场开发运营植被响应分析研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
Wang Xiping. Study on vegetation response to development and operation of wind farm in Huitengxile Grassland [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.

[12] Zhang Tao, Meng Meng, Cao Yang, et al. Research on effect of construction of Huitengxile wind farm to grassland ecosystem with transitions of land use and landscape pattern [J]. Procedia Engineering, 2017,174: 780-787.

[13] Li Guoqing, Zhang Chunhua, Zhang Li, et al. Wind farm effect on grassland vegetation due to its influence on the range, intensity and variation of wind direction [C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). July 10-15, 2016, Beijing, China. IEEE, 2016:1304-1306.

[14] 解云虎.风力发电场对植被及土壤性质的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古师范大学,2015.
Xie Yunhu. Effects of wind power station on vegetation and soil properties [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Normal University, 2015.

[15] Lehnardt Y, Barber J R, Berger-Tal O. Effects of wind turbine noise on songbird behavior during nonbreeding season [J]. Conservation Biology, 2024,38(2):e14188.

[16] 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[J].水土保持研究,2015,22(4):61-66.
Li Zhilan. Effect of wind power site construction on soil nutrients and vegetation of the surrounding disturbed region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(4):61-66.

[17] 李国庆,刘志锋,常学礼,等.风电场对草地蒸散发影响分析[J].生态科学,2016,35(6):146-151.
Li Guoqing, Liu Zhifeng, Chang Xueli, et al. Effects of wind farms on grassland regional surface evapotranspiration [J]. Ecological Science, 2016,35(6):146-151.

[18] 刘春青,张韬,汪超,等.风电场内外植被组成和土壤肥力质量的比较[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2020,41(2):30-36.
Liu Chunqing, Zhang Tao, Wang Chao, et al. Comparison of vegetation composition and soil fertility quality inside and outside the wind farm [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2020,41(2):30-36.

[19] Pekkan O I, Senyel Kurkcuoglu M A, Cabuk S N, et al. Assessing the effects of wind farms on soil organic carbon [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(14):18216-18233.

[20] Fei Tingting, Lu Dangui, Li Yan, et al. The impact of the wind farm on the vegetation and the microclimate *via* remote sensing: A case study in Hebei Province, China [J]. Energy, Ecology and Environment, 2026,11(2):215-232.

[21] Li Qingyi, Chen Jun, Peng Siwei, et al. Wind farm-induced redistribution of soil organic matter: Molecular insights into dissolved organic matter and microbial interactions [J]. Applied Soil Ecology, 2025,215:106459.

[22] 谢嘉炜,魏龙,肖石红,等.连州风电场对周边土壤物理性质的影响[J].林业与环境科学,2021,37(4):40-45.
Xie Jiawei, Wei Long, Xiao Shihong, et al. Impact of wind farm in Lianzhou City on the physical properties of the surrounding soil [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2021,37(4):40-45.

(上接第 207 页)

[28] 佘宇晨,陈楚琳,毛淑桢,等.基于 MSPA-Linkage Mapper的长株潭核心区生态网络构建与优化[J].林草资源研究,2024(4):60-69.
She Yuchen, Chen Chulin, Mao Shuzhen, et al. Construction and optimization of ecological network in the core area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan based on MSPA-linkage mapper [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(4):60-69.

[29] 黄杰,黄义忠.基于 InVEST-MSPA 的文山州区域生态网络构建[J].环境监测管理与技术,2024,36(5):41-46.
Huang Jie, Huang Yizhong. Construction of regional ecological network in Wenshan Prefecture based on InVEST-MSPA [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2024, 36(5): 41-46.

[30] 凌子燕,蒋卫国,李金鬼,等.桂林市典型喀斯特区湿地生态网络研究[J].湿地科学,2022,20(6):739-746.
Ling Ziyan, Jiang Weiguo, Li Jinwei, et al. Wetland ecological network of typical Karst area in Guilin City [J]. Wetland Science, 2022,20(6):739-746.