

民勤新能源风电场典型植物土壤 碳密度估算及其空间分布特征

宋达成^{1,2}, 李广宇³, 樊林⁴, 许劲柏⁴, 吴昊¹,
赵鹏¹, 韩生慧¹, 张晓娟¹, 王昱淇¹,
王忠文¹, 马全林^{2,5}, 靳承东⁶

(1. 甘肃省治沙研究所, 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃兰州 730070;
2. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070; 3. 甘肃省国家公园监测中心, 甘肃兰州 730030;
4. 大唐甘肃发电有限公司, 甘肃兰州 730050; 5. 甘肃省林业科学研究院, 甘肃兰州 730020;
6. 甘肃莲花山国家级自然保护区管护中心, 甘肃临夏 731599)

摘要:为探明大型新能源风电场植被、土壤碳密度分配格局及其影响因素,揭示风电场运行对局地生态系统碳循环过程的驱动机制,针对民勤红砂岗新能源风电场5个不同监测区域(上风部、中心、下风部、边缘及外部对照)共45个样方开展植被、土壤调查及采样,并基于各样品碳含量测定数据,估算风电场运行对不同监测区域典型植物群落生物量积累和土壤碳密度分布的影响。结果表明:风电场运行能够显著改变区域植物群落,从而增加不同监测区域植物碳密度差异,外部对照区域植物碳密度平均值约为 $1.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而风电场内部各区域植物碳密度平均值约为 $0.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;风电场运行对土壤有机碳密度的影响不显著,不同监测区域均处于相同水平,土壤平均有机碳密度总体保持在 $21.45 \sim 29.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;以40 cm土层深度为节点,风电场不同监测区域0~100 cm范围土壤有机碳密度垂直分布总体呈现出浅层土壤(<40 cm)随土层深度的增加而不断升高、深层土壤(>40 cm)随土层深度的增加呈先下降后上升的波动性变化特征;植物总生物量是影响研究区植物碳密度和土壤有机碳含量的关键因子。

关键词:大型风电场;生态影响;生物量;碳密度;空间分布

中图分类号:S719 **文献标志码:**A

Estimation of soil carbon density and spatial distribution characteristics of typical plants at the Minqin new energy wind farm

SONG Dacheng^{1,2}, LI Guangyu³, FAN Lin⁴, XU Jingbai⁴,
WU Hao¹, ZHAO Peng¹, HAN Shenghui¹, ZHANG Xiaojuan¹,
WANG Yuqi¹, WANG Zhongwen¹, MA Quanlin^{2,5}, JIN Chengdong⁶

(1. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu National Park Monitoring Center, Lanzhou, Gansu 730030, China; 4. Datang Gansu Power Generation Co., LTD, Lanzhou, Gansu 730050, China; 5. Gansu Research Academy of Forestry Science and Technology, Lanzhou, Gansu 730020, China; 6. Gansu Lianhuashan Nature Reserve Administration, Linxia, Gansu 731599, China)

Abstract: To investigate the patterns of vegetation and soil carbon density distribution in large-scale new energy wind farms and their influencing factors, as well as to uncover the driving mechanisms by which wind farm operations affect the local ecosystem carbon cycle, this study conducted vegetation and soil surveys and sampling across 45 plots within five distinct monitoring areas (upwind, center, downwind, edge, and external control) of the Min-

收稿日期:2024-07-15

修回日期:2024-09-04

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA078);甘肃省林业和草原科技创新项目(LCCX202303);基于新能源发电与空气制水技术的防沙治沙科技示范项目;甘肃省重点人才项目(GZTZ20240415);国家自然科学基金(32160410)

作者简介:宋达成(1990-),男,山西汾阳人,副研究员,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: songdc90@163.com

通信作者:李广宇(1970-),男,甘肃民勤人,研究员,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 8849950@163.com

qin Hongshagang New Energy Wind Farm. Based on carbon content measurements from the samples, the impact of wind farm operations on biomass accumulation of typical plant communities and soil carbon density distribution in different monitoring areas was estimated. The results showed: (1) Wind farm operations significantly altered the structure of regional plant communities, thereby increasing the variability in plant carbon density across different monitoring areas. The average plant carbon density in the external control area was about $1.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, while the average within the various internal areas of the wind farm was about $0.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. (2) The impact of wind farm operations on soil organic carbon density was not significant, with all monitoring areas maintaining similar levels, and the average soil organic carbon density overall remained between 21.45 and $29.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. (3) Using a soil depth of 40 cm as a node, the vertical distribution of soil organic carbon density in the $0 \sim 100 \text{ cm}$ range of different monitoring areas generally showed an increase with depth in shallow soils ($<40 \text{ cm}$) and a fluctuating decrease followed by an increase in deeper soils ($>40 \text{ cm}$). (4) Total plant biomass is a key factor affecting both plant carbon density and soil organic carbon content in the study area. The findings are expected to provide a scientific foundation for the efficient operation of new energy wind farms in arid regions, contribute to addressing global climate change, and support national ecological security decisions.

Keywords: large wind farm; ecological impact; biomass; carbon density; spatial distribution

陆地生态系统可通过地表植物的光合作用降低大气 CO_2 浓度,并将其固定在植物和土壤内以缓解全球变暖、调节全球气候变化、促进碳循环^[1]。作为陆地生态系统最直观的表现,植物是导致不同区域土地的固碳能力存在显著差异的重要原因^[2]。此外,不同类型土地间的碳交换过程能够显著改变陆地生态系统碳密度^[3]。在当前生态环境问题日益严峻以及气候变化威胁逐步加重的双重背景下,分析植被、土壤碳密度的空间格局演变及其碳汇影响因素已成为学术界研究热点,对增加区域碳储量、实现区域可持续发展具有重要意义^[4]。植物有机碳含量反映了植物的光合碳同化能力,是研究区域植物碳密度的关键因素之一^[5]。估算植物碳密度将有利于人们更好地掌握植被改变对陆地生态系统的影响^[6]。詹瑾等^[7]对科尔沁沙地三种优势固沙植被进行了调查,发现不同植物对水分利用策略的不同导致了其碳分配也存在较大差异。朴世龙等^[8]研究发现干旱等外部因素改变能够使植物“水力传导失效”或“碳饥饿”,并以此进一步影响区域乃至全球陆地生态系统碳源/汇的大小和方向。截至目前,围绕植物碳密度开展的大量研究多涉及单一植被类型,缺乏对于区域生态系统各要素间的整体考量;并且基于遥感监测技术的植物碳密度研究多以 NDVI 指数构建估算模型,存在一定的滞后效应,不能准确反映区域快速气候变化条件下植被碳汇的变化^[9]。土壤作为陆地生态系统中最大的近地表有机碳库,超过植物和大气中储存的碳总和,其储量的微小变化可能会引起大气 CO_2 浓度的剧烈波动^[10]。土壤有机碳密度和养分储存是描述

土壤肥力特性和生产潜力的关键因素,尤其是在植被稀疏的干旱地区,土壤含沙量高,水分和养分储存能力差,结构稳定性低,强烈的风蚀使土壤持续存在降解压力,在这种情况下,区域环境的细微改变更有可能会对土壤产生更大、更复杂的影响^[11]。土壤碳密度受温度、降水量、植物种类和土壤养分等多因子共同调控,是多因素相互作用、相互影响的结果,且主控因素也可能由于研究区域的不同而存在差异^[12-13]。总体来说,以往关于碳密度及其动态变化的研究主要集中于单一碳库(植物碳库或土壤碳库),同时涉及植物和土壤碳库的研究成果相对较少,并且对于土壤碳密度影响因素间的相互作用还缺乏定量评估,不利于理解土壤有机碳积累与植物变化的耦合关系^[14]。

为减缓全球变暖,风能作为重要的清洁能源在全球得到了广泛利用,风力发电作为可再生能源领域中技术最成熟、最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一,已有越来越多的风电场建成投入运行,并取得了显著效果^[15]。虽然传统意义上风力发电被认为是零碳排的清洁能源,不会对环境产生污染,但是其对局地小气候的影响效应不容忽视^[16],尤其是风电装机容量的快速发展以及空间规模的迅速扩张引发了人们对其负面影响的担忧^[17]。部分研究结果显示,风电场在建造和运营过程中会对当地的生态环境产生强烈的影响,一方面会改变植物群落的物种组成,显著降低植物群落的多样性及生产力,另一方面会直接或间接地对土壤结构及养分造成破坏^[18-20]。但也有研究发现风电场上涡轮机的转动能够改变近地面大气层稳定性、加强垂

直混合,从而对其覆盖区域产生明显的增温与局地气候效应,有利于区域植物的生长^[21]。还有研究证实风电场对微气候的调节作用会因其自身组件的性质、铺设方式及规模等不同而有所差异^[22]。总体而言,目前关于干旱区大型新能源风电场对植物、土壤碳密度的影响机制和响应研究还不够深入和清晰,尤其针对风电场运行过程中不同区域植物、土壤碳密度空间变化特征的研究仍相对匮乏。在当下可再生能源快速增长的形势下,大型风电场的发展势必会占据更大的国土空间面积,必须在提高对其生态系统影响认识的基础上,强化现有管理体系,以规避或减缓其对自然生态的不利影响^[23]。

甘肃省民勤县地处典型的干旱荒漠化区域,是河西走廊生态安全的有效屏障,但因其生态环境脆弱,易受极端气候干扰,长期以来面临着严重的生态环境问题。近年来数量众多的新能源风力发电场在民勤红砂岗荒漠戈壁上陆续建成并投入使用,其局地气候效应势必会打破荒漠生态系统原本脆弱的稳定性,影响到河西走廊防沙带生态功能的发挥。基于此,本文通过野外原位取样与室内化验分析相结合的方法,在空间尺度上分析民勤干旱区新能源风电场运行对电场上风部、中心、下风部、边缘及外部对照区域典型植物群落生物量积累和土壤碳密度垂向分布的影响,揭示新能源电场对局地生态系统碳循环过程的驱动机制,为新能源风电场科学运行、应对全球气候变化和维护国家生态安全决策提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市民勤县红砂岗镇新能源(风电)项目工程区(图1,见241页),地处巴丹吉林沙漠南缘、潮水盆地北缘东段、北大山南麓山前冲积平原上,呈典型荒漠戈壁地貌。该区域地形平坦,地势开阔,略呈北高南低之势,平均海拔高度约1450 m,地理坐标为101°59′~102°28′ E,38°53′~39°02′ N(表1)。属典型温带干旱荒漠气候,风沙活动频繁,日温差和年温差较大,日照时间长,干燥少雨,年均温度8.3℃,年均降水量约110 mm,年均蒸发量大于3300 mm。四季多风,以西北风为主,风力一般4~7级,最大9~10级,每年4—5月沙尘暴较为频繁。土壤类型以风沙土为主,石砾含量较高,土壤孔隙度大、含水率低、风蚀严重。区域植被组成简单,覆盖度低,以荒漠植被为主,主要有盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、小果白刺(*Nitraria sibirica*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、合头藜(*Sympegma*

regelii)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)等^[24]。

2 材料与方法

2.1 样地布设

于2023年8月选择民勤县红砂岗镇新能源风电项目工程区内海拔高度相近、地形平坦、受人为影响干扰较小的地段作为研究区域,以风电场外部区域作为对照。由于研究区风电场规模较大,故将区域整体分割为横和纵两条路径开展研究,横向(东西向)按照风电场上风部区域、风电场中心区域、风电场下风部区域布设,纵向(南北向)分为风电场边缘区域、风电场中心区域、风电场外部对照区域排列。此外,由于风电场东西部均有运输道路,人为影响较大,故分别将风电场边缘区域及外部对照区设置在风电场北部、南部范围。各研究样地均为正方形且面积均为1 hm²,且不同研究样地间距离均大于5 km以避免空间自相关。沿每块研究样地的对角线方向分别设置9块10 m×10 m的植物调查样方,呈“米”字型排列,并于每块植物调查样方旁同步设置土壤样品采集点(表1)。

2.2 植被调查

于2023年8月开展植被调查,对研究区45块植被调查样方内的植被群落物种组成、生活型等指标进行统计,对每个样方内的全部灌木植被进行每株调查,记录灌木种类、成活个体数(株)及频度,用卷尺实测株高、冠幅和新梢长度,用游标卡尺测量地径,记录单位均为cm,同时对盖度进行估测。同时对样方内草本植物的种类、个体数、株高、盖度进行测定,掌握风电场不同区域内荒漠植被生长差异。

2.3 样品采集

本研究野外样品采集与植被调查同步进行,所采样品分别涉及土壤和植物两个部分。先将每个土壤样品采集点按照不同土层深度分为5、20、40、60、80、100 cm等6个梯度,再使用土壤铲及环刀(100 cm³)对各梯度进行分层取样。此外,为降低空间异质性,在采集过程中同步对同一样地、相同土层的土壤样品充分混合,之后装入自封袋立即带回实验室处理。采用标准株法对研究区植物生物量进行测定,首先对每块研究样地内的主要植物种进行统计筛选,由于区域灌木植物居多,草本植物极少,所以视实际情况将不同植物种选取标准株9株,在齐地面刈割植物地上部分的同时,将地下根系全部挖出,之后去除全部杂质后将标准株新鲜样品保存于纸质档案袋中立即送往实验室检测。

表 1 研究区样地地理位置信息

Table 1 Geographic location information of the study area plots

监测区域 Monitoring area	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m	群落优势种 Dominant plants species	土壤类型 Soil type
风电场上风部区域 Upwind area	39°02'15.01"N	101°59'52.55"E	1368	珍珠猪毛菜、红砂、白刺、裸果木、合头藜 <i>Salsola passerina</i> 、 <i>Reaumuria songarica</i> 、 <i>Nitraria tangutorum</i> 、 <i>Gymnocarpos przewalskii</i> 、 <i>Sympegma regelii</i>	风沙土 Aeolian sandy soil
风电场中心区域 Core area	38°59'39.20"N	102°07'52.12"E	1309	珍珠猪毛菜、红砂、白刺、霸王 <i>Salsola passerina</i> 、 <i>Reaumuria songarica</i> 、 <i>Nitraria tangutorum</i> 、 <i>Zygophyllum xanthoxylum</i>	
风电场下风部区域 Downwind area	38°57'01.94"N	102°25'54.99"E	1334	珍珠猪毛菜、红砂 <i>Salsola passerina</i> 、 <i>Reaumuria songarica</i>	
风电场边缘区域 Fringe area	39°01'03.01"N	102°28'21.27"E	1410	珍珠猪毛菜、红砂、驼绒藜 <i>Salsola passerina</i> 、 <i>Reaumuria songarica</i> 、 <i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	
风电场外部对照区域 Control area	38°53'57.26"N	102°23'57.35"E	1285	珍珠猪毛菜、红砂、盐爪爪、泡泡刺 <i>Salsola passerina</i> 、 <i>Reaumuria songarica</i> 、 <i>Kalidium foliatum</i> 、 <i>Nitraria sphaerocarpa</i>	

2.4 测定指标及方法

2.4.1 土壤理化性质测定 土壤含水量测定采用恒温箱烘干法,将土壤样品置于 105℃ 下烘干 24 h 直至恒重,以重量百分数表示土壤含水量,以土壤中所含水分重量占烘干土重的百分数表示,计算公式为:土壤含水量=(原土重-烘干土重)/烘干土重×100% = 水重/烘干土重×100%。土壤容重测定采用环刀法。土壤 pH 与电导率分别用 pH 仪(雷磁 PHS-3C, 中国)和电导率仪(雷磁 DDS-307A, 中国)测定,前处理水土混合比例为 5:1,在振荡机摇晃 1 min 后静置,静置 30 min 后置于上清液内进行测定。

2.4.2 碳含量和碳密度测定 于实验室内对土壤样品进行风干、过筛(筛网孔径 0.075 mm)等预处理,并将植物样品放入烘箱设定 80℃ 烘干至恒重,用电子天平称重(精确到 0.0001 g)记录;之后将植物、土壤样品送至甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室采用元素分析仪(Elementar, 德国)进行样品碳含量测定。利用以下公式分别计算研究区植物种碳密度($P_c, t \cdot \text{hm}^{-2}$)及土壤有机碳密度($S_c, t \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$P_c = PB \times PCi \quad (1)$$

$$S_c = \sum SC_i \times BD_i \times D_i \times 0.1 \quad (2)$$

式中, PB 为植物生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); PCi 为植物含碳率(%); SC_i 为第 i 层的土壤有机碳含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); BD_i 为第 i 层的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); D_i 为第 i 层的土层厚度(cm);0.1 为单位转换系数。

2.5 数据统计处理

利用 Excel 2016 整理数据,使用 SPSS Statistics 26.0 软件进行方差分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验,并对植物生物量、土壤有机碳含量垂直

分异进行相关性分析,然后通过 R 3.6.0(R-Development Core Team, 美国)软件中 ggplot2、Vegan、Fossil 包等量化环境因子对植物、土壤碳含量的影响,通过蒙特卡罗置换检验评估各因子贡献是否显著,使用 Origin 2017 软件制图。本研究所有统计分析显著水平均设定为 $P < 0.05$,图表数据为平均数±标准差。

3 结果与分析

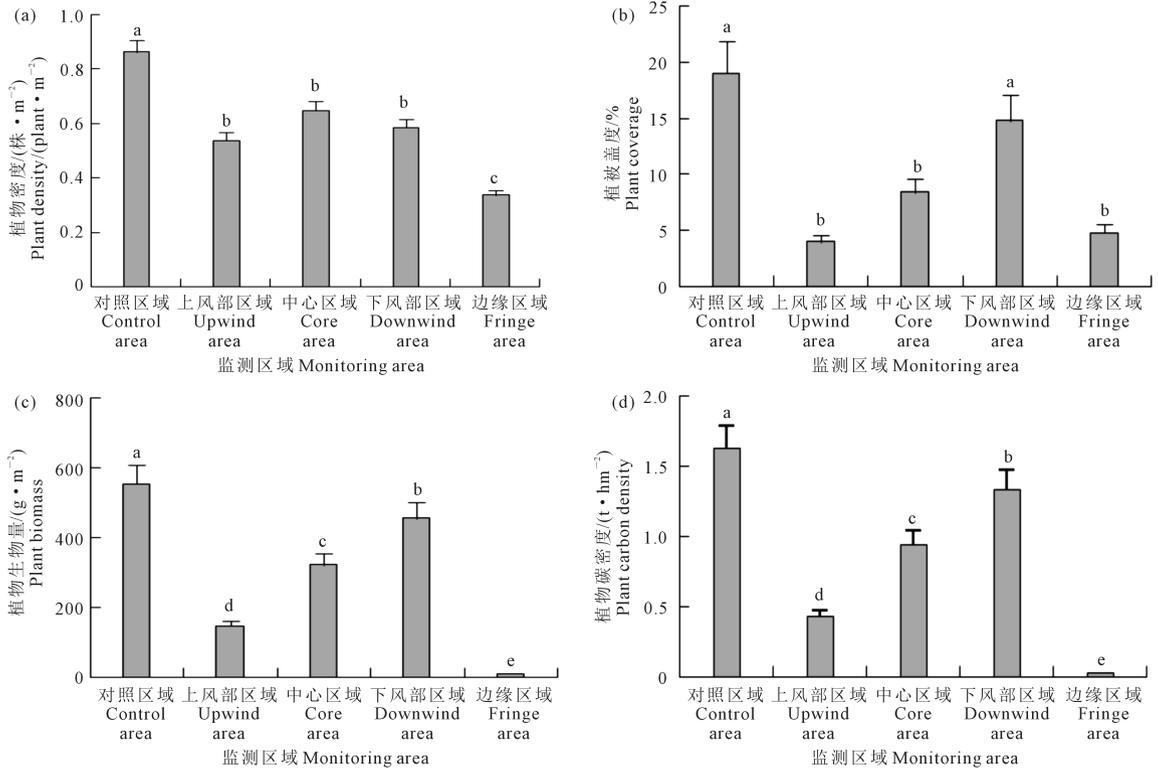
3.1 植物群落及植物碳密度变化特征

研究区荒漠植物群落优势种以红砂、白刺和珍珠猪毛菜为主,植被组成简单且密度较低(表 1,图 2a)。风电场内外植物数量差异显著,风电场外部对照区域植物相对密集,经换算后平均密度约为 $0.86 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$,显著高于风电场内部平均水平($0.53 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)。而风电场内部不同区域植物密度又遵循中心区域($0.65 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)>下风部区域($0.59 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)>上风部区域($0.54 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)的变化规律,但彼此间差异不显著。此外,所有研究样地中,以风电场边缘区域植物最为稀少,显著低于其余区域,平均密度仅为 $0.34 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ 。植物盖度方面,研究区植被盖度总体较低,各区域保持在 4.0%~19.0%之间(图 2b)。所有样地中以风电场外部对照和风电场下风部区域的植被盖度相对较高,分别为 19.0%和 14.8%,显著高于其余监测区域样地;而风电场上风部、中心及边缘区域植被盖度相对较低且彼此间差异不明显,平均盖度仅为 5.7%,较风电场外部对照区域下降了 70.0%。

结合研究区优势植物不同器官的碳含量实测数据(表 2),分别推算不同监测区域植物生物量及植物碳密度(图 2c、d)。结果表明各样地间均差异

显著($P<0.05$)。研究区植物生物量最高的是风电场外部对照区域,单位面积生物量达到了 $554.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。相较于外部对照区域,风电场内部各区域单位面积植物生物量平均值仅为 $233.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,降幅约为 57.8%。风电场内部不同区域间差异程度同样明显,具体表现为下风部区域最高($456.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、中心区域次之($321.83 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、上风部区域最低($147.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。此外,研究区所有研究样地中以风电场边缘区域植物生物量表现最为特殊。经统计,风电场边缘区域植物单位面积生物量仅为

$10.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,远低于其他所有监测区域,风电场外部对照和中心区域分别是其 54.19 倍和 31.43 倍。这可能由两方面原因所导致:一是边缘区域植被死亡率较高;二是边缘区域植被长势较差,地下根系发育程度较低。此外,由于研究区植物长势不佳,生物量累积程度低,致使区域植物碳密度同样表现不理想。各样地植物碳密度表现与植物生物量变化保持一致,由大到小依次为:风电场外部对照($1.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>下风部($1.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>中心($0.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>上风部($0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>边缘区域($0.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

图 2 不同监测区域植物群落特征及碳密度

Fig.2 Characteristics of plant communities and carbon density in different monitoring areas

表 2 研究区优势植物不同器官的含碳率/%

Table 2 Carbon content in different organs of dominant plants in the study area

灌丛种类 Shrub species	枝 Branch	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	种内平均 Interspecific mean
红砂 <i>Reaumuria songarica</i>	28.90±4.31	29.45±2.99	23.83±4.61	30.86±4.17	28.26
珍珠猪毛菜 <i>Salsola passerina</i>	28.76±2.32	29.76±2.01	21.12±1.21	31.30±1.28	27.73
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	31.74±6.01	31.62±6.08	26.19±4.40	30.97±6.07	30.13
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	32.06±2.77	37.32±1.37	23.87±1.04	36.56±0.93	32.45
合头藜 <i>Sympegma regelii</i>	28.70±2.04	28.05±0.18	23.95±0.23	27.73±0.06	27.11
种间平均 Average between species	30.03	31.24	23.79	31.48	

3.2 土壤碳含量及土壤碳密度变化特征

对风电场不同监测区域土壤全碳含量对比分析发现(图 3a、b),研究区土壤全碳含量总体偏低(平均值为 $7.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。风电场外部对照区域土壤平均全碳含量约为 $8.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他监测区域;其次是风电场上风部及中心区域,二者土壤平均全碳含量处于相同水平,彼此差异不明显,分别为 7.42 、 $7.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是要远高于风电场下风部区域($7.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);各样地中风电场边缘区域土壤平均全碳含量最低,仅为 $6.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与其余样地差异较为明显。从垂直方向上看,风电场内外外部土壤全碳含量变化趋势有所不同。具体来说,风电场外部对照区域土壤全碳含量高值均出现在较深层($>40 \text{ cm}$),最高达到了 $11.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而表层土壤($0\sim 5 \text{ cm}$)则相对较低,仅为 $4.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总体

随土层深度的增加呈现出逐渐上升的趋势。风电场内部样地表现则截然相反,其中又以风电场中心和边缘区域最为明显,土壤全碳含量总体表现为随土层深度的增加而逐渐减少。此外,本研究还发现,研究区土壤全碳含量在 $20\sim 60 \text{ cm}$ 土层间变幅较大,而其余土层间虽存在一定波动,但是总体相对稳定。研究区土壤有机碳含量如图 3c、d 所示。与土壤全碳表现相似,区域土壤平均有机碳含量总体仍以外部对照区域($1.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较高,边缘区域($1.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较低。与土壤全碳相比,区域土壤有机碳含量占比较低,平均含量仅为 $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,不到全碳含量的 20.0% 。此外,值得注意的是下风部区域土壤平均有机碳含量提升相对明显,这可能主要与区域风蚀作用密切相关。不同土层深度土壤有机碳含量表现与全碳含量相近,除外部对照区域

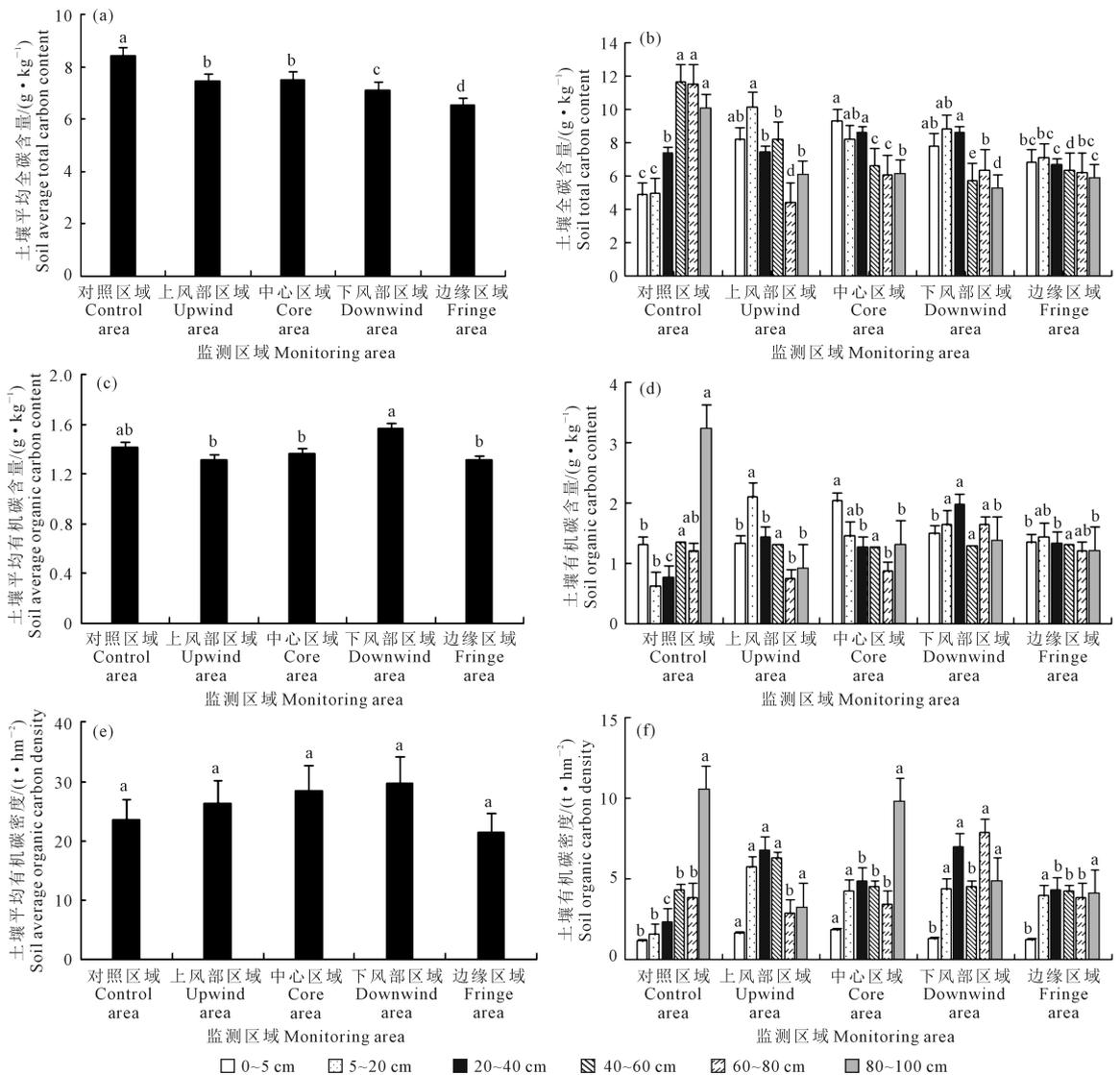


图 3 不同监测区域土壤碳含量及有机碳密度

Fig.3 Soil carbon content and organic carbon density in different monitoring areas

80~100 cm 土层土壤有机碳含量较高外,内部区域随土层深度的增加呈波动性下降趋势。所有样地中,以风电场外部对照区域不同土层土壤间波动较大(0.62~3.21 g·kg⁻¹),而其余样地则相对平缓(0.76~2.03 g·kg⁻¹)。

基于前期测定数据,推算风电场不同监测区域土壤有机碳密度。由图 3e、f 可知,风电场各监测区域土壤平均有机碳密度处于相同水平。风电场内部各区域土壤平均碳密度约为 26.47 t·hm⁻²,风电场外部对照区域土壤平均碳密度约为 23.52 t·hm⁻²;而风电场内部不同区域间土壤平均碳密度具体表现为下风部(29.67 t·hm⁻²)>中心(28.46 t·hm⁻²)>上风部(26.31 t·hm⁻²)>边缘区域(21.45 t·hm⁻²);此外,研究区土壤有机碳密度垂直分异特征明显,各样地土壤均以 40 cm 土层深度为节点,浅层土壤(<40 cm)有机碳密度均随土层深度的增加而持续升高,且其中又以 0~20 cm 区间涨幅较大,20~40 cm 区间相对平缓;深层土壤(>40 cm)有机碳密度总体表现出随土层深度的增加呈先下降后上升的波动性变化态势。总体而言,研究区 0~100 cm 土层深度土壤平均有机碳密度含量表现为 80~100 cm(6.46 t·hm⁻²)>20~40 cm(5.00 t·hm⁻²)>40~60 cm(4.75 t·hm⁻²)>60~80 cm(4.34 t·hm⁻²)>5~20 cm(3.94 t·hm⁻²)>0~5 cm(1.38 t·hm⁻²),表层土壤(0~5 cm)碳密度最低,约为其余组分土壤(5~100 cm)碳密度的 5.63%。值得注意的是,风电场内部各区域 0~40 cm 土层土壤平均有机碳密度约为 3.89 t·hm⁻²,而外部对照区域 0~40 cm 土层土壤平均碳密度约为 1.64 t·hm⁻²,外部仅为内部区域平均值的 42.16%,由此可见,风电场运行对浅层土壤有机碳密度的影响远高于深层土壤。

3.3 土壤理化特征

研究区各样地 0~100 cm 土壤 pH 平均值约为 8.04,整体呈弱碱性(图 4a)。风电场外部对照区域土壤 pH 总体保持在 7.39~8.35,平均值约为 7.87,低于风电场内部区域水平(平均值 8.08)。此外,土壤 pH 随土层深度的变化较小,整体处于 7.39~8.71,且总体以表层土壤(0~40 cm)数值高于深层土壤(40~100 cm)。电导率是指示土壤盐分的关键指标,由图 4b 可知,研究区不同监测区域 0~100 cm 土壤电导率差异较大。风电场外部对照区域土壤电导率平均值(1 765.83 μs·cm⁻¹)显著高于风电场内部区域平均值(917.72 μs·cm⁻¹),前者约为后者的 1.92 倍,并且这种差异更多地体现在 40~100 cm 范围的深层土壤中,说明较表层土壤而言,更多的

盐分聚集于 40 cm 以下区域。风电场核心区域土壤容重平均值约为 1.93 g·cm⁻³,显著高于风电场边缘(1.61 g·cm⁻³)及外部对照区域(1.68 g·cm⁻³)。风电场核心区域三处样地中,以上风部区域土壤容重平均值最高,约为 2.09 g·cm⁻³,下风部区域次之(1.85 g·cm⁻³),中心区域最低(1.84 g·cm⁻³)。这可能是由于风电场建设初期,内部各区域普遍经过土地平整压实等过程,导致这部分土壤更为紧实,而风电场边缘及外部对照区域土壤则相对松散(图 4c)。研究区土壤样品含水量总体较低,且不同样品间存在差异(图 4d)。其中,风电场外部对照区域土壤含水量明显高于其余监测区域土壤,并且这种差异性更多地体现在 40~100 cm 土层范围。具体来说,风电场外部对照区域 0~100 cm 土壤平均含水量约为 3.55%,风电场核心区域土壤平均含水量仅为 1.43%。而对深层土壤(40~100 cm 土层范围)平均含水量进行计算可知,风电场外部对照区域土壤平均含水量约为 5.00%,风电场核心区域土壤平均含水量仅为 1.56%,前者几乎是后者的 3.2 倍。不同土层深度土壤样品含水量总体呈现出深层>浅层>表层的变化趋势,这主要与区域植被覆盖低、地表裸露、日照强烈、蒸发量大等诸多因素有关。

3.4 植物土壤指标相关性分析

利用相关系数图表示研究区植物、土壤特征及彼此间的相关关系(图 5),发现研究区植物与土壤间彼此作用、相互影响。其中植物密度与植物总生物量、植物碳密度、土壤全碳含量显著正相关($P<0.05$);植物盖度与植物总生物量、植物碳密度显著正相关($P<0.05$);植物总生物量与土壤有机碳含量显著正相关($P<0.05$),与植物碳密度极显著正相关($P<0.01$);植物碳密度与土壤有机碳含量显著正相关($P<0.05$);土壤 pH 与土壤电导率显著负相关($P<0.05$);土壤容重与土壤含水量显著负相关($P<0.05$)。其余各指标间相关性不显著。

4 讨论

4.1 风电场对植物群落及植物碳密度的影响

新能源风电场项目往往会在较大的区域范围内改变原有景观单元,从而导致区域原生植物群落为适应环境变化而在空间分布上产生差异^[23]。研究区由于气候干燥、土壤贫瘠、保水性差,致使植物群落结构也较为简单,以灌木植物居多,草本植物极少。珍珠猪毛菜、红砂等作为区域植物群落中的主要建群种及优势种,因其较强的抗逆性、生态可塑

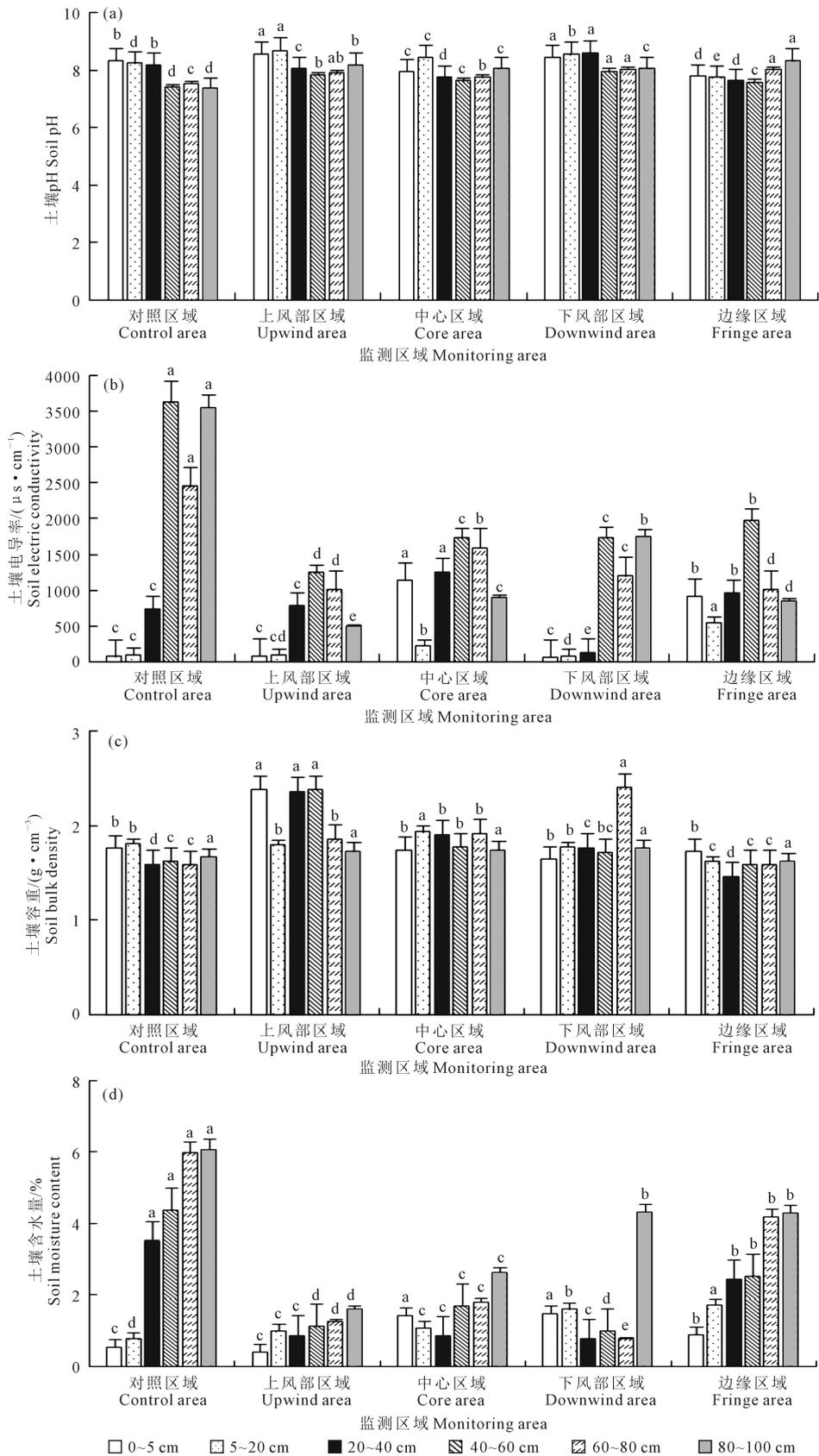


图 4 不同监测区域土壤理化特性

Fig.4 Soil physicochemical properties in different monitoring areas

性和集沙能力使之具备数量效应和极强的竞争力,并且相比草本植物而言,其致密的地上植被层和地下根系层也限制了草本植物的拓殖^[25-26]。不同于原生生境,风电场大型风机的布设使得场区不同位置植物群落所获得的光、热、水等资源差异明显,进而导致植物群落结构发生改变^[27]。前人研究证实,风电场运行对其扰动、非扰动区域植物的影响机制是不同的,结论也并未统一。风电场的运行有可能会加快扰动区域植被的退化,不利于植被生长,并且这种逆向效应会随着远离风电场距离的增加而衰



图 1 研究区概览图

Fig.1 Study area overview map

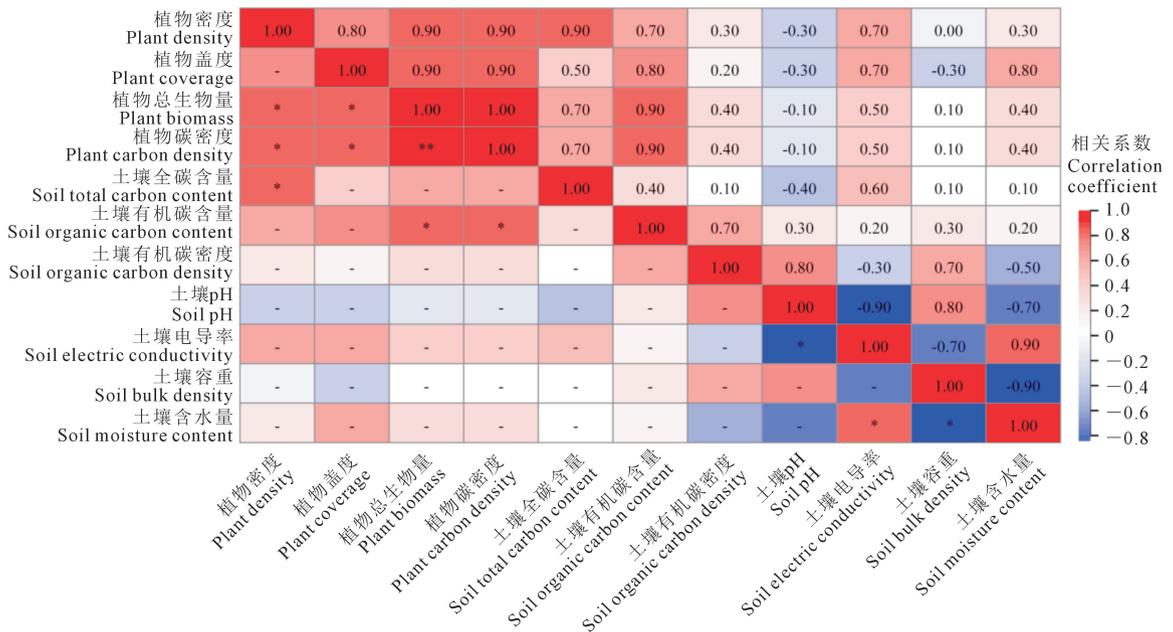


图 5 植物土壤特性与碳密度间的相关性分析

Fig.5 Analysis of the correlation between plant and soil characteristics and carbon density

减^[28-29]。在本研究中,不同监测区域的植物长势总体外部对照区域最优,其次是核心区域,边缘区域较差。风电场建设初期往往需要较大规模清除植被覆盖、土地平整等,并且在实际运行过程中也会受前期土壤压实效应的影响,导致植物恢复难度增加^[30-31]。

植物的固碳作用会受到地形、光照等众多因素的影响,而植物碳密度往往与生物量密切相关。对于干旱区而言,土壤水分是植被生长的主要限制因子,也是其碳汇效益的主要调节因子,改善区域土壤水分条件可能更有利于增加植物碳密度^[32]。以往研究普遍认为,水分是导致干旱地区植物生物量空间分异的重要因素^[33]。本研究中,风电场植物碳密度在水平空间上存在强差异性,总体随外部对照、下风部、中心、上风部、边缘区域呈递减规律。研究区地势总体表现为北高南低,相对边缘区域样

地而言,除了前期施工扰动等因素之外,外部对照区各研究样地总体位于风电场的南侧,而该区域又因为地势相对较低,雨季能够集聚季节性的流水,导致此区域植物碳密度较高。此外,风蚀也是影响植被碳汇的另一重要因素,风电场多建于地形宽阔平坦的强风区域,而干旱区风电场干燥松散的土壤特性更为风蚀创造了有利条件。邱晓娜等^[21]对红砂岗风电场近地层风速进行了测定,结果显示区域距地表 3 m 范围风速表现为上风部>电场中>下风部区域。风机运行吸收了风力动能,导致风电场中心和下风部区域风速相比上风部区域明显减弱,依次为上风部区域的 87.30%和 63.20%,风穿过风电场后风速减少了 36.80%。可见,近地层风速的降低减弱了风电场中心、下风部区域的风蚀过程,从而加剧了风电场不同监测区域植物碳密度差异。值得注意的是,受风力作用的影响,研究区地表植物

凋落物积累量很少,造成了部分碳损失。

4.2 风电场对土壤理化特征及土壤碳密度的影响

土壤有机碳的影响因素主要体现在地形环境及土壤理化性质两方面,影响土壤空间变异的主导因子也存在差异,地形环境如高程、坡向、植被等,理化性质包括 pH、电导率、含水量等^[34]。本研究中,风电场外部对照区域土壤 pH 值显著低于风电场内部各区域。土壤硝化和腐殖质矿化过程能够释放大量 H⁺,同时植物对阳离子的吸收作用也可以起到提升土壤酸度的作用^[35-36]。对于干旱区而言,土壤水分和盐分的正相关关系体现了区域水盐运移的必然方向,即水分汇集区也是盐分的汇集区^[37]。研究区北高南低的地形特征有效促进了土壤水分及盐分在外部区域的累积;同时,研究区土壤以风沙土为主,质地松散的结构特性更有利于水分向深层土壤渗透。此外,风电场内部植被相对稀疏,土地裸露面积大,致使地表温度升高,引起可溶性盐类在土壤表层的逐渐积累,加重了表层土壤的碱化程度。值得注意的是,虽然区域蒸发作用强烈,但是由于土壤整体十分干燥,加之风电场建设初期对土壤的压实作用,综合导致部分区域深层土壤水分和盐分向上的迁移过程受到阻碍^[38]。目前关于植物与土壤有机碳交互作用的研究很多,但是结论却暂未达成共识。例如 Chirino 等^[39]研究表明,植被盖度增加有助于减少土壤侵蚀,从而降低土壤有机碳和全氮的消耗;而赵晓钰等^[40]研究结果显示植物灌丛化在提升土壤有机碳矿化速率的同时,会降低土壤有机碳和全氮含量。研究区风电场外部区域植物长势更好,地表覆盖度更高,从而提升了根系及凋落物对深层土壤的碳输入,而风电场运行不仅改变了其内部区域的土壤植被类型,还会引起不稳定有机碳含量和比例的变化,进而改变土壤有机碳矿化过程^[41]。此外,风电场内部各区域以下风部区域土壤有机质含量显著高于中心及上风部区域,这可能是由于研究区风蚀强烈,风在经过风电场的过程中其动能不断被消耗,风速逐渐降低,导致风电场下风部区域所受风蚀强度也较低,从而减少了由风蚀造成的土壤有机碳含量损失^[42]。总体来说,区域土壤有机碳的差异是多因素共同作用的结果,上述分析因素都可能对风电场土壤有机碳含量产生重要影响^[43]。

生态系统碳储量由植被碳储量和土壤碳储量共同组成,而其中土壤碳储量占比更高^[44]。土壤碳储量与土壤碳密度密切相关,是多因素互作的结果,并且在空间和时间上具有可变性^[45-46]。干旱区

土壤受侵蚀和盐碱化等过程的影响,其在生态系统中的水平可能更低^[47]。Guo 等^[48]研究发现,果树下积累的土壤碳密度比一年生作物高 15.00%,由此得出土地利用方式是控制土壤碳密度的重要因素;Perez-Quezada 等^[49]对智利科金博地区不同植被类型土壤有机碳密度进行了调查,结果显示人工林仅为自然林的 57.81%。一般来说,碳循环和碳固存在浅层土壤更活跃,而稳定碳的周转率更长,这意味着在深层土壤的有机碳密度占比更大^[50]。本研究中,风电场不同监测区域土壤碳密度表现有所不同,不同土层深度土壤碳密度总体呈现出深层>浅层的变化趋势,同样证实了这一结论。针对华北地区风电场的调查发现,风电场能够影响大气环流,增强土壤的水分胁迫,导致土壤含水量普遍下降,致使风电场内部初级生产总值降低 8.90%,如果任由这种态势持续发展,极有可能加重水土流失,从而影响整个生态系统^[51-52]。但也有研究证实,风电场运行带来的增温与局地气候效应,将有利于区域植物的生长^[21]。总之,风电场的建设与运行过程会改变土壤生态系统结构,并对植物生长、土壤固碳等功能产生影响,是一个长期的、多因素互作的复杂过程,未来应针对其辐射区域开展长期监测,细化其对生态系统及生态功能的影响。

5 结 论

- 1) 研究区不同监测区域植物碳密度表现为风电场外部对照>下风部>中心>上风部>边缘区域。
- 2) 风电场运行对区域 0~100 cm 范围土壤有机碳密度影响不显著,不同监测区域处于相同水平。
- 3) 植物总生物量是影响区域植物碳密度和土壤有机碳含量的关键因子。

参 考 文 献:

- [1] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458: 1009-1013.
- [2] TIAN Q L, ZHANG X P, YI H J, et al. Plant diversity drives soil carbon sequestration: evidence from 150 years of vegetation restoration in the temperate zone[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1191704.
- [3] KERTÉSZ Á, NAGY L A, BALÁZS B. Effect of land use change on ecosystem services in Lake Balaton catchment[J]. *Land Use Policy*, 2019, 80: 430-438.
- [4] 黄艳, 刘晓曼, 袁静芳, 等. 2000-2020 年华北干旱半干旱区碳储量变化特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(4): 849-861.
HUANG Y, LIU X M, YUAN J F, et al. Spatial and temporal changes of carbon storage and its influencing factors in arid and semi-arid region of North China from 2000 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(4): 849-861.
- [5] 高伟. 退化草地生态系统碳-氮变化规律及氮添加的生态效应研究

- [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.
- GAO W. The study of carbon-nitrogen dynamics and the ecological effects of nitrogen addition for degraded grassland ecosystem[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010.
- [6] 张磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 干旱区荒漠植物初级生产力及碳储量与功能性状之间的关系[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 63-74.
- ZHANG L, LV G H, JIANG L M, et al. Relationship between primary productivity, carbon storage and functional traits of desert plants in arid regions[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2020, 37(1): 63-74.
- [7] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 等. 半干旱沙区3种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 149-157.
- ZHAN J, LI Y L, HAN D, et al. Biomass allocation and its ecological significance of three dominant sand-fixing shrubs in the semi-arid desert area[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 149-157.
- [8] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(9): 1321-1334.
- PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. Impacts of extreme climatic events on carbon cycle in terrestrial ecosystems[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(9): 1321-1334.
- [9] 曹胜鹏. 中国西北地区气象-农业干旱与陆地植被碳汇的响应关系[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- CAO S P. Response relationship between meteorological and agricultural drought and terrestrial vegetation carbon sinks in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [10] 高琳, 张登山, 龙怀玉, 等. 气候、植被及土壤因素交互作用对宁夏土壤有机碳的影响机制[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10081-10091.
- GAO L, ZHANG D S, LONG H Y, et al. Interaction mechanism of climate, vegetation and soil factors on soil organic carbon at different soil depths in Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10081-10091.
- [11] MA D K, HE Z B, JU W L, et al. Long-term conventional cultivation after desert reclamation is not conducive to the improvement of soil carbon pool and nutrient stocks, a case study from northwest China [J]. Geoderma, 2024, 445: 116893.
- [12] EZA S, PALMER S M, CHAPMAN P J. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands[J]. Geoderma, 2018, 314: 175-183.
- [13] GROSS A, GLASER B. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 5516.
- [14] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9483-9498.
- HOU R P, XIA Z Z, CHEN J, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9483-9498.
- [15] 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 International, 2021, 28(14): 18216-18233.
- [16] 刘朋涛. 内蒙古风电场景观格局演变及生态效应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LIU P T. Landscape pattern evolution and ecological effect of the Inner Mongolia wind farm [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [17] ABBASI S A, ABBASI N. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources [J]. Applied Energy, 2000, 65(1/4): 121-144.
- [18] 吴建国, 巩倩, 王阳. 风电场对生态系统、生物多样性及环境的影响[J]. 生态经济, 2023, 39(9): 167-178, 229.
- WU J G, GONG Q, WANG Y. The impacts of wind farms on ecosystems, biodiversity, and the environments [J]. Ecological Economy, 2023, 39(9): 167-178, 229.
- [19] 马松尧, 陈龙, 滕泽宇, 等. 荒漠草原区风力发电场建设前后的植被变化[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 186-192.
- MA S Y, CHEN L, TENG Z Y, et al. Vegetation changes in wind farm in desert steppe region [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 186-192.
- [20] 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 Z L. 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.
- [21] 邱晓娜, 魏怀东, 郭树江, 等. 干旱荒漠区风电场对植被的影响[J]. 甘肃林业科技, 2022, 47(3): 10-15.
- QIU X N, WEI H D, GUO S J, et al. Effect of wind farms on vegetation in arid desert region [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2022, 47(3): 10-15.
- [22] 郑隼卿, 罗勇, 常蕊, 等. 大规模光伏开发对局地气候生态影响研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 253-265.
- ZHENG J Q, LUO Y, CHANG R, et al. Study on impact of large-scale photovoltaic development on local climate and ecosystem [J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(8): 253-265.
- [23] 彭响月, 罗永梅, 徐泽楠, 等. 集中式大型光伏及风电场生态影响: 进展与展望[J]. 生物多样性, 2024, 32(2): 98-113.
- PENG Y Y, LUO Y M, XU Z N, et al. Ecological impacts of centralized large-scale photovoltaics and wind farms: progress and prospects [J]. Biodiversity Science, 2024, 32(2): 98-113.
- [24] 陆金晖. 大唐武威新能源有限公司红沙岗风电项目建设方案研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- LU J H. Datang Wuwei new energy Co., Ltd. red sand gang wind power project construction plan [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [25] 单立山, 李毅, 董秋莲, 等. 红砂根系构型对干旱的生态适应[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1283-1290.
- SHAN L S, LI Y, DONG Q L, et al. Ecological adaptation of *Reaumuria soongorica* root system architecture to arid environment [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1283-1290.
- [26] 罗久富, 梁松, 袁涛, 等. 光伏组件遮阴对喀斯特地区植物群落结构的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 2982-2990.
- LUO J F, LIANG S, YUAN T, et al. Effects of partial shading by photovoltaic panels on grassland community structure in Karst area [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 2982-2990.
- [27] WANG P C, YU H, XIAO H L, et al. Effects of habitat factors on the plant diversity on naturally-restored wind farm slopes [J]. PeerJ, 2023, 11: 14912.
- [28] 李朋磊, 李国庆, 郑平. 风电场对植被变化影响分析-以重庆武隆风电场为例[J]. 风能, 2017, (5): 76-79.
- LI P L, LI G Q, ZHENG P. Analysis on the effect of wind farm on

- vegetation change: a case study of Chongqing Wulong wind farm[J]. *Wind Energy*, 2017, (5): 76-79.
- [29] 李国庆, 张春华, 张丽, 等. 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[J]. *地理科学*, 2016, 36(6): 959-964.
LI G Q, ZHANG C H, ZHANG L, et al. Effects of wind farms on grassland vegetation: a case study of Huitengliang wind farm, Inner Mongolia[J]. *Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 959-964.
- [30] 柴亚凡, 马金珠, 周波, 等. 戈壁荒漠区风电场建设对水土流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 124-127.
CHAI Y F, MA J Z, ZHOU B, et al. Effects of wind power site construction in Gobi Desert area on soil and water loss[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2): 124-127.
- [31] HERNANDEZ R R, EASTER S B, MURPHY-MARISCAL M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 766-779.
- [32] ZHOU X X, HU C Y, WANG Z J. Distribution of biomass and carbon content in estimation of carbon density for typical forests[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 48: e02707.
- [33] 冯丽, 张景光, 张志山, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被中油蒿的生长及生物量分配动态[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1132-1139.
FENG L, ZHANG J G, ZHANG Z S, et al. Growth and biomass allocation dynamics of *Artemisia ordosica* in sand-fixing vegetation of the Tengger desert of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1132-1139.
- [34] 刘亚静, 刘红健. 燕山南部典型农业区土壤有机碳储量及影响因素研究[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(1): 79-88.
LIU Y J, LIU H J. Study on soil organic carbon storage and influencing factors of typical agricultural areas of southern Yanshan mountains[J]. *Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 46(1): 79-88.
- [35] LI A W, LI C J, ZHANG Y Y, et al. The driving factors and buffering mechanism regulating cropland soil acidification across the Sichuan basin of China[J]. *Catena*, 2023, 220: 106688.
- [36] SCHWEIZER S A, GRAF-ROSENFELLNER M, BHAT N A, et al. Responses of soil organic carbon, aggregate diameters, and hydraulic properties to long-term organic and conventional farming on a Vertisol in India[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(5): 785-797.
- [37] 卫雨西, 陈丽娟, 席海洋, 等. 石羊河流域土壤水分和电导率的空间分布特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 264-273.
WEI Y X, CHEN L J, XI H Y, et al. Spatial differentiation of soil moisture and conductivity in Shiyang river basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(3): 264-273.
- [38] 王璐, 李乐乐, 赖梦霞, 等. 土壤盐分空间异质性成因及对植物生长影响研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(6): 1369-1377.
WANG L, LI L L, LAI M X, et al. Research progress on the causes of spatial heterogeneity of soil salinity and its effects on plants' growth[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(6): 1369-1377.
- [39] CHIRINO E, BONET A, BELLOT J, et al. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain[J]. *Catena*, 2006, 65(1): 19-29.
- [40] 赵晓钰, 陈彦硕, 李志刚, 等. 荒漠草原灌丛转变土壤有机碳矿化及其对降水梯度的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(15): 6630-6641.
ZHAO X Y, CHEN Y S, LI Z G, et al. Soil organic carbon mineralization and its response to precipitation gradients during anthropogenic shrub encroachment in desert steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6630-6641.
- [41] NIE X D, YUAN Z J, HUANG B, et al. Effects of water erosion on soil organic carbon stability in the subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(10): 3564-3575.
- [42] BASILE-DOELSCH I, BALESSENT J, PELLERIN S. Reviews and syntheses: the mechanisms underlying carbon storage in soil[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(21): 5223-5242.
- [43] FUJISAKI K, PERRIN A S, DESJARDINS T, et al. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2773-2786.
- [44] 董凌勃, 海旭莹, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8559-8569.
DONG L B, HAI X Y, WANG X Z, et al. Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8559-8569.
- [45] 王艳芬, 陈佐忠, TIESZEN L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545-551.
WANG Y F, CHEN Z Z, TIESZEN L T. Effects of human activities on soil organic carbon distribution in main steppe in XilinGol region[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1998, 22(6): 545-551.
- [46] WEISSERT L F, SALMOND J A, SCHWENDENMANN L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 80-90.
- [47] MARTIN M P, ORTON T G, LACARCE E, et al. Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale[J]. *Geoderma*, 2014, 223/245: 97-107.
- [48] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [49] PEREZ-QUEZADA J F, DELPIANO C A, SNYDER K A, et al. Carbon pools in an arid shrubland in Chile under natural and afforested conditions[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(1): 29-37.
- [50] RUMPEL C, CHABBI A, MARSCHNER B. Carbon storage and sequestration in subsoil horizons: knowledge, gaps and potentials. In LAL R, LORENZ K, HÜTTL R, et al. (Eds.). *Recarbonization of the Biosphere*, 2012, pp. 445 - 464. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- [51] TANG B J, WU D H, ZHAO X, et al. The observed impacts of wind farms on local vegetation growth in northern China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 332.
- [52] DHAR A, NAETH M A, JENNINGS P D, et al. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 134602.