



崔艺凡,魏淑花,张海翔,曹梓渝,熊昌宇,徐瑾瑜,陆叶,马建华,班丽萍. 陆上风电场对环境与昆虫的影响及其应对对策[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(09): 206-216.

CUI Yifan, WEI Shuhua, ZHANG Haixiang, CAO Ziyu, XIONG Changyu, XU Jinyu, LU Ye, MA Jianhua, BAN Liping. Impact of onshore wind farm on the environment and insects and countermeasures[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 206-216.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.19

陆上风电场对环境与昆虫的影响及其应对对策

崔艺凡^{1,2} 魏淑花^{2*} 张海翔^{1,2} 曹梓渝^{2,3} 熊昌宇^{2,3} 徐瑾瑜² 陆叶²
马建华² 班丽萍^{1*}

(1. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193;

2. 宁夏农林科学院 植物保护研究所, 银川 750002;

3. 北方民族大学 生物科学与工程学院, 银川 750021)

摘要 为明确陆上风电场对昆虫的影响,在中国知网、Web of Science 和 SpringerLink 等网站以“风力发电”“昆虫”“环境”中英文为关键词,检索1960年9月—2024年9月陆上风力发电影响生态环境方面的相关文献,从风电场的建设期与运行期2个方面综合分析国内外陆上风电场对当地环境与昆虫的影响机制。结果表明:风电场建设期土地被占用、生境连通性变差与运行期产生的视觉污染、噪音、电磁辐射及干扰大气环流等问题会造成土壤养分流失、植被群落结构特征相关指数下降及昆虫生长发育受限。建议将风电场对生态环境的影响与经济效益相结合,合理规划空间布局使风电均匀排布,并及时开展植被与土壤的修复工作;未来可开展关于昆虫的生物学特性研究试验、关注风电场内生态环境间的互作关系,明确对当地指示物种的影响情况,建成风电场影响生态环境的多因素评价体系。

关键词 陆上风电场; 大气环流; 植被; 土壤; 昆虫

中图分类号 TM614;Q968.1;X820.3

文章编号 1007-4333(2025)09-0206-11

文献标志码 A

Impact of onshore wind farm on the environment and insects and countermeasures

CUI Yifan^{1,2}, WEI Shuhua^{2*}, ZHANG Haixiang^{1,2}, CAO Ziyu^{2,3}, XIONG Changyu^{2,3},
XU Jinyu², LU Ye², MA Jianhua², BAN Liping^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;

3. College of Biological Science & Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract To clarify the effects of onshore wind farm on insects, the relevant literature on the ecological environment impacts of onshore wind power published from September 1960 to September 2024 were retrieved from CNKI, Web of Science, SpringerLink and other databases by taking “wind power generation”, “insects” and “environment” as keywords. The impact mechanisms of domestic and foreign onshore wind farms on local environments and insects were comprehensively analyzed from two aspects of construction period and operation period. The results indicate that: During the construction phase, land occupation and poor habitat connectivity,

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2023BEG02048)

第一作者: 崔艺凡(ORCID:0009-0000-0609-9150),博士研究生,E-mail:cuiyifan1212@163.com

通讯作者: 班丽萍(ORCID:0000-0001-8560-6922),教授,主要从事草地害虫的治理和防控研究,E-mail:liping_ban@163.com;

魏淑花(ORCID:0000-0003-2479-707X),副研究员,主要从事草地害虫的治理和防控研究,E-mail:weishuhua666@163.com

and during the operational phase, issues such as visual pollution, noise, electromagnetic radiation, and disruption of atmospheric circulation lead to soil nutrient loss, a decline in vegetation community structure indices, and restricted growth and development of insects. It is recommended to integrate the ecological impacts of wind farms with economic benefits, rationally plan the spatial layout to achieve uniform distribution of wind turbines, and timely implement vegetation and soil restoration. Future research could include experiments on the biological characteristics of relevant insects, focus on interactions within the wind farm ecosystem, clarify impacts on local indicator species, and establish a multifactorial evaluation system for assessing wind farm impacts on the ecological environment.

Keywords onshore wind farms; atmospheric circulation; vegetation; soil; insect

面对全球气候变化危机和能源结构的快速转变,风力发电已成为最主要的可再生能源^[1]。在大力发展风力发电的同时,其对生态系统及生物多样性也造成了一定的影响,如鸟类、昆虫和哺乳动物等生物对风电产生了规避反应,风电场内多种土壤养分含量下降、植被生产力减弱,但风电运行产生的热量也会对生物具有吸引作用^[1-4]。因此,开展风力发电在建设及运行过程中对环境及生物影响机制的探究,并提出应对对策,对全面了解风力发电产业、推动风力发电的科学发展具有重要意义。

截至2021年底,全球新增风电装机容量已达 9.36×10^7 kW,累计装机 8.37×10^8 kW,较2020年增长12%^[1]。随着对绿色低碳发展理念的贯彻,2021年陆上风电新增装机容量占比达77.5%^[1]。截至2024年6月,我国风电累计并网容量达到 4.67×10^8 kW,同比增长20%,其中陆上风电为 4.29×10^8 kW,海上风电为 3.82×10^7 kW^[5]。据全球风能理事会(Global Wind Energy Council)预测,2022—2026年,全球新增风电装机容量将达到 5.57×10^8 kW,风电产业的发展势头仍较强劲^[1]。

我国的风力发电场多在陆上建设^[2],往往建设在北部的草原或戈壁沙漠上^[6],然而,这些大力开发风能资源的地区普遍存在植被覆盖度较低、生态环境脆弱等问题^[7]。陆上风电场对环境的影响主要体现在扰动大气环流,进而影响风电场内的温度、降水等^[8-9];占用土地资源进而影响土地的结构、功能和理化性质等^[3];改变土壤容重、含水率及养分含量等从而对植被产生负面影响^[10];风电场产生的噪音、视觉污染以及电磁辐射等对环境产生不利的影响^[11-18]。

昆虫通过采食、传粉、繁殖等生命活动,常被作为指示环境的生物,是生态系统中消费者和分解者的主要参与类群,在草地恢复演替中具有不容忽视

的作用^[19]。与其他生物相比,昆虫具有更强的适应能力并占据了多样性水平更高的空间和尺度更小的生境^[20]。因此,昆虫对栖息地环境的变化具有更高的敏锐性。昆虫作为鸟类的重要食物来源,与植被、土壤共同构成生态系统的重要组成部分,是整个生态系统的物质和养分循环的重要环节,其生物多样性水平的高低也可间接反映出其他生物的多样性^[21]。风电对昆虫的影响主要体现在风机产生的视觉污染对昆虫的求偶、交配等行为以及生长发育的影响^[18,22-24];风机运转产生的噪音对昆虫生长、繁殖、行为等多方面的影响^[11];风机产生的电磁辐射对昆虫生长发育的不利影响^[18,25];风电场建设运维对植被的破坏进而影响到昆虫个体生长发育及群落组成^[26-28]。

当前,风力发电对生物影响的研究及综述多针对鸟类^[29-31]、蝙蝠^[32-33]及鱼类^[34-35]等,对昆虫类群影响的综合分析鲜见报道。本研究在中国知网、Web of Science和SpringerLink等网站以“风力发电”、“昆虫”、“环境”的中英文为关键词,检索1960年9月—2024年9月陆上风电场对昆虫的影响的相关文献,从陆上风电场的建设期与运行期2个方面对土壤、植被、大气环流及产生的声、光、电磁对昆虫多样性的影响进行综合分析,并提出应对建议,旨在明确陆上风电场对昆虫的作用,以期为风电场的选址、科学利用与管理提供参考。

1 陆上风电场影响昆虫的主要因素

陆上风电场影响昆虫主要表现为风力发电机产生的声、光、电磁对昆虫造成以下3个方面的影响:1)视觉污染:风力发电柱体的阴影及大型叶片的转动会对昆虫产生视觉干扰^[11],并且风电机与当地景观的契合度以及风电机的布置、尺寸、设计等因素的不协调也会在客观上造成视觉污染^[36-38]。同

时,褚建^[11]指出风电机产生的阴影直径(d)最大为风机叶片直径的10倍,若按照大型风电机叶片 $d=70\text{ m}$ 计算,方圆700 m内的昆虫与植被都会被阴影遮住一定时间,导致昆虫与植被接收到的光照从持续变为间断光照,进而影响植被和昆虫的正常生长^[15]。此外,光照被打断也会造成地表温度不均等使植被和昆虫的生长受到负面影响^[11]。2)噪音:噪音存在于风电开发的整个过程,建设期产生的打桩声,声级最高,为急性噪音^[12-14];运行期的噪音主要来自于风机叶片的气流和风轮转动产生的尾流,该噪音强度与风轮转动的角速度、叶片转动的叶尖线速度和叶片的空气动力负荷均呈正相关,少部分来源于齿轮、轴承等部件运动时产生的摩擦、撞击^[15-16]。运行期的噪音具有累积性,影响更为长久^[17]。噪音产生的声学干扰,掩蔽声学交流,会影响当地动物休息、取食、活动、迁徙^[18,22-24]。3)电磁辐射:在风力发电系统中,电磁辐射主要来源于变电站、发电机和输电线路,这样的低空磁场势必会对周围生存的动、植物的生长产生负面影响,同时降低环境的稳定性,给动物的生长发育造成进一步的阻碍^[18,25]。

2 陆上风电场对昆虫的直接影响

2.1 视觉污染对昆虫的影响

风电设备产生的视觉污染主要包括风力发电柱体和大型叶片转动时产生转动的阴影对昆虫造成的视觉干扰,并且与风电机的布置、尺寸、设计以及同当地景观的契合度等因素有关^[39]。风电机叶片转动时所产生的光影持续转动会令人产生心烦和眩晕的症状^[11],也会影响昆虫的生长发育。据相关部门对风电机叶片转动所产生的阴影进行统计发现,风电机阴影晃动的直径最大为其风轮直径的10倍,以现有的大型风电机的风轮直径 $d=70\text{ m}$ 计算,与风机距离 $>700\text{ m}$ 的区域风电机的阴影晃动影响将不存在^[11],Gamboa等^[39]指出与风电机距离在500~1 000 m外的区域风电桩产生的阴影效应将不再起作用。昆虫在长期的进化中对光产生了不同的适应性,大多数昆虫能够十分敏锐地感知光影的变化^[40]。同时,光是生态体系中重要的能量来源,与性信息素的产生、释放密切相关^[41]。已有多项研究表明,光会对昆虫的求偶、交配等生物学特性产生重要的影响,如毛健夜蛾(*Brithys crini*)的交

配和产卵行为都发生在光周期的暗期中进行,当暗期 $<40\text{ min}$ 不会发生交配行为^[40];桃小食心虫(*Carposina niponensis*)的寿命和小地老虎(*Agrotis ipsilon*)的寿命、孵化率及羽化率都会随着光照时间的延长而表现出先增加后减少的变化趋势^[42-43];强光照会抑制棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)的交配行为,而相对黑暗的微光处理会促使其快速交配^[44];在连续暗期或光期,沙漠蝗(*Schistocera gregaria*)的行为节律性都会消失^[45],因此视觉污染导致的光影变化可能影响昆虫的生长发育。

风电机的布置、尺寸和颜色等设计一般会选择白色或灰色的、尺寸一致的风电机,并将其均匀规范的成群布置,给人以协调舒服的感觉^[46]。而对于昆虫来说,风电机颜色可能会起到吸引作用,因此,风机周围活跃活动的昆虫常常会在风机运转过程中被撞死。Voigt等^[4]在植物生长季对德国30 000台陆上风电场进行试点研究估测,约有1 200 t昆虫因碰撞到运转中的风电机而死。位于温带的每个风电机每年约杀死400万只昆虫^[47]。Long等^[46]在选择了白色和浅灰色2种常见的风机颜色外,又选择了深灰色和黑色不常见的2种风机颜色,以及根据许多访花昆虫天生的颜色偏好选择了棕色、红色、黄色等共计10种颜色探究不同颜色的风电设备对昆虫的吸引力,结果显示,在中午时段黄色是最吸引昆虫的颜色,风电机常用的白色和浅灰色也会比其他7种颜色更具吸引力。黑色也对昆虫有很高的吸引力,这可能是因为黑色的吸热特性较强,对昆虫产生了“热诱惑”^[47],使用热成像仪器对运行中的风电机进行监测发现,风电机顶部、叶片和机舱内的温度均高于周围的空气,这也可能是风电机吸引昆虫的原因之一^[48]。

2.2 噪音对昆虫的影响

风电的噪音分别在建设期和运行期产生。在风电的建设施工期噪音主要为设备运输、推土机、起重机、搅拌机等机械施工产生的^[23]。因其风电机组装机区域通常为生态脆弱区,噪音对施工区野生动物的栖息环境势必会造成一定影响^[7]。风电机运行期的噪音主要来源于发电机、齿轮箱和风机叶片切割空气产生的^[11,24],由于衡量尺度不同,又分为单机和机群噪音。其中,单机噪音又细分为机械和空气动力噪音^[16]。机械噪音包括:齿轮噪音(由于齿

轮互撞和摩擦激起齿轮体的振动,通过固体结构辐射齿轮噪音)、轴承噪音(轴承内相对运动元件摩擦和振动以及转动部件的不平衡引起撞击产生噪音)、周期作用力激发噪音(转动机械部件产生周期作用力激发的噪音)、电机噪音(电机产生电磁振动,通过固体结构辐射电磁噪音)以及散热器、风机等辅助设备产生的噪音^[49]。空气动力噪音来源于叶片与空气之间的相互作用,其强度取决于风机叶片尖端的线速度和叶片的空气动力负荷,与风力发电机的型号及塔架设计密切相关,是风电机产生噪音的主要来源^[16]。机群噪音并非单机噪音的总和,而是由于机群的排列是经风洞试验后确定的,单机间隔为6 d(d为风轮直径),而风机间距在4~6 d时风速又恢复到常态,因此噪音强度也随着风速减小而明显衰减,单机间隔6 d以上时机群内不存在噪音累积的问题^[15]。

单台风电机正常运行产生的噪音通常在90~100 dB(A)^[49]。孙春顺等^[49]对风电场内噪音做了详细的监测发现,容量为1 500 kW的风电机,轮毂高度70 m,单台风电机轮毂处噪声值为102 dB(A),风电制造厂商通过使用隔音材料对噪音大小进行控制,可以使功率 $>1 \times 10^3$ kW的风机轮毂周围的噪音控制在93 dB(A)以内,功率 $<1 \times 10^3$ kW的风机轮毂周围的噪音控制在90 dB(A)以内。距离风电机40 m远的区域噪音下降为50~60 dB(A),相当于正常社交中普通说话的水平。当风从风电机吹向500 m远的房屋,房屋内噪音大小为25~35 dB(A),10台风电机在相同条件下产生的噪音水平为35~45 dB(A),如果风朝相反的方向吹,则房屋内噪音水平将降至10 dB(A)以下^[49]。GB 3096—2008《声环境质量标准》^[16]中明确规定:居民住宅、行政办公等活动需保持安静的环境,噪音应在昼间 ≤ 50 dB(A),夜间 ≤ 45 dB(A)。傅一迪等^[16]对望江屯二期风电场的噪音进行测量发现,该地区风电场昼间噪音达标处距噪音源75 m,夜间达标处距噪音源485 m。褚建^[11]对青海省风电场噪音值测量发现,距风电场500 m以外区域噪音可达到GB 3096—2008^[16]的要求。Gamboa等^[39]则建议风电桩的建设应距居民区 >1 km。根据风电机对昆虫产生吸引^[46-47]及风电机正常运行时产生噪音的范围^[11,16]推知,生活在风电场噪音环境和被吸引在风电机

外壳上的昆虫常处于90~100 dB(A)的高噪音环境中。

已有多项研究表明噪音会通过干扰昆虫信息传递、威胁感知、吸引配偶、竞争行为等方式对昆虫的生长发育产生影响^[50-52]。如饲养在噪音环境下的滨海油葫芦(*Teleogryllus oceanicus*)雌性个体会比生活在无噪音干扰环境中的额外耗费80%的时间定位1 m远的模拟雄性^[53];暴露于交通噪音和海浪噪音的环境中时,奥米亚棕蝇(*Ormia ochracea*)对田蟋蟀(*Gryllus lineaticeps*)的捕获率显著下降^[54];将沙漠蝗(*Gryllus lineaticeps*)置于120 dB噪音环境中持续干扰12 h后,发现沙漠蝗对噪音表现得格外敏感,这种敏感度会随着年龄的增长而减弱^[55];生活在地下的埋葬甲虫(*Nicrophorus marginatus*)已被证实其成虫对低频的地震噪音敏感,地震噪音使其生殖产量降低,地震噪音使幼虫的数量减少、体重下降^[56];由于蛙类对城市噪音的适应性提高导致蠓在其体内的寄生率显著降低,原因是蠓对环境噪音非常敏感^[57]。因此,风电场正常运行的噪音环境必然会影响风电场内昆虫的生长发育和多样性。

2.3 电磁辐射对昆虫的影响

电气设备在运行时都会产生电磁辐射,其辐射源主要有发电机、电动机、输电线路和变电站等^[15]。就风力发电机机组而言,其辐射源主要有发电机、变电站、输电线路三部分。通常的风电场输电线路为66 kV,而有些风电场的电压会达到110 kV,因此不同风电场都会产生不同程度的电磁辐射^[11]。电场和磁场往往是相伴相生的,通过测量结果和模型模拟得出,风电机产生的电场虽可被完全屏蔽,但仍会有磁场存在;而由于电与磁的伴生关系,磁场的出现又会产生能量较低的电场而被敏感的动物感知^[58]。

通常将磁场强度为10 mT以上的磁场定义为强磁场;将磁场强度为10 μ T以下的磁场定义为极弱磁场;介于两者之间的为弱磁场。常见的磁场有地磁场,磁场强度为30~50 μ T^[59]。昆虫能够感知磁场变化并受到磁场的干扰已被多项研究所证实。通常来说,中低强度的磁场会对生物体产生正效应,而高强度或长时间的磁场干扰往往会对生物产生负作用甚至致残、致死^[60]。Leveagood等^[61]将果蝇放在1 T的永磁体附近发现其后代数有所增加;周志芳等^[62]研究发现,将黄粉虫放在

0.025~0.047 T的磁化杯中,其产卵量、孵化率及幼虫体重均表明现显增加;王明明^[59]观察发现,放在150、200、300、360和520 mT的5个恒定磁场中的小菜蛾(*Plutella xylostella*)的卵、幼虫和蛹期的发育期均长于无磁场处理的对照组,且发育历期随磁场强度的增大而增长,成蛹率均显著低于对照组。在磁场强度 ≥ 360 mT时,小菜蛾的产卵量下降50%、寿命缩减5 d。Presman^[63]将果蝇放在0.30~0.44 T磁场中发现,其后代中有大量个体的虫眼变形,磁场强度增加到1.2 T时,果蝇成虫在1 h内全部死亡。闫蒙蒙^[64]研究表明,近零磁场可显著延长粘虫的幼虫发育期,但蛹重、交配率和黏虫蛾的平均飞行速度均降低飞行距离变短。刘瑞莹^[65]通过探究模拟迁飞型昆虫褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)在迁出、迁入地的地磁场强度变化对褐飞虱影响试验结果表明,褐飞虱春季从广州迁入南京时地磁场从45 μ T增加到50 μ T,其成虫的寿命缩短了30%左右,雌虫产卵量升高30%,且F₁的卵期也显著缩短、卵的孵化率显著升高,可见磁场强度变强对褐飞虱种群更有利。同时,也有研究证明部分生物对磁场不敏感,Bassetto等^[26]利用“T”形迷宫对300~500 μ T磁场下的果蝇进行偏好试验,发现果蝇没有感应磁场的的能力。

2.4 风电场建设及运行维护对昆虫的影响

由于风电场建设时期会对土地的结构、功能与理化性质造成影响,包括建设道路、车辆行驶对土地的碾压、建筑材料堆放对土地的破坏,导致土壤生态受到损害^[27]。有些风电场地表植被遭到破坏后导致了风电场内的地表裸露,含水量降低,引起风电场内的水土流失^[27-28]。风电场运行时期也会对土壤理化性质造成影响,比如,使土壤pH升高、含水量减少,并发现风电场的运行会使土壤矿质养分(除全磷外)降低^[10]。由于风电场建设与运行维护会对土壤、植被造成污染和不利影响^[66]。风电场植被的减少,直接破坏了昆虫正常的生存环境,会导致昆虫的生长发育受阻、种群数量减少。

3 陆上风电场对昆虫的间接影响

3.1 对大气环流的扰动

陆上风力发电能够对气候条件产生影响,风电

场运行期间会引起大气环流的扰动、改变当地的小气候、影响局部地区的水肥气热条件,进而对下垫面的生态环境产生直接和间接的影响^[8]。张力琛等^[9]通过对云南省将军山风电场进行现场实测与数值模拟分析发现,风电机产生的尾流效应会引起大气边界层大尺度运动动能收支模式与时空分布的改变,从而对风电场内的温度、降水和风速等产生重要影响。姜艳丰等^[67]通过分析ETM和SPOT5卫星的遥感影像发现,内蒙古辉腾锡勒风电场的修建不仅改变了该区域的景观格局,还对降水、蒸发量及相对湿度等气象因子造成一定影响。已有研究表明,风电场的建设会增加场内大气温度和夜间地表温度^[68-70],只是增温幅度和显著增温季节会因当地的气候条件和下垫面类型的差异而有所不同,并且增温幅度都 <1 $^{\circ}\text{C}$ ^[71-73]。另有研究表明,风电机的运行会降低风速,但程度并不大,张雪婷等^[74]对湖北省大悟风电场研究得出风速减小幅度小于年际间变化。

3.2 对植被的影响

陆上风电场在建设时期对植被的影响与干扰土壤的方式相似,且对植被的影响也与风电场对土壤的干扰相关。在风电场建设过程中,开挖与修整工程公路、修建风机平台基座、堆弃渣场和碾压运输作业影响土壤的容重、含水率、养分含量等甚至会造成区域内景观的破碎化,这些都会对植被产生负面影响^[2,9]。另外,风电场建设过程中产生的扬尘降落在植被的叶片上会堵塞气孔,影响光合作用和蒸腾作用,将导致叶片失水、干枯甚至死亡^[3]。

而在风电场的运行时期,由于植被恢复的过程相对漫长、大型运输车辆和维护检修车辆的频繁来往以及风力发电会产生阴影干扰植被光照、改变局地小气候等原因,植被同样会受到风电运行的持续干扰。刘青春等^[75]研究表明,内蒙古辉腾锡勒草原风电场的建设运行导致植被生长指数下降;在土耳其卡拉布伦半岛的研究也表明,风电场的建设和运行导致当地植被盖度下降^[76];赵雪杉等^[8]在河北蔚县风电场调查发现,植被的盖度与风电场的运行时间呈显著正相关,运行期为1年的风电场植被盖度仅为7.35%,而运行9年时,其植被盖度达到了82.34%,同时,植被的盖度也随着辐射半径的增加而增加,风电场辐射半径为50 m的植被盖度比风电场辐射半径为10 m的盖度高;汪超等^[77]发现风电场

的运行会导致蒸发量升高、空气相对湿度下降,进而抑制植被的生长;李国庆等^[78]对我国北方风电场研究发现,风电场会降低附近植被的NDVI,并且迎风的植被受到的影响最大;另对内蒙古灰腾梁风电场的研究发现,风电的运行虽然一定程度上破坏了风电场内植被,但有利于上风区和下风区植被的恢复,上风区植被恢复程度尤为明显^[79]。

3.3 对土壤的影响

风电场建设时期因占用一定的土地资源,会对土地结构、功能与理化性质产生一定的影响^[8]。尽管已有研究表明风电场的修建实际占用面积并不大,以额定功率为850 kW的风电机为例,每10 000 kW的永久性占地仅有0.2 hm²,且每个风电场中所建造的升压站占地也仅约1.0 hm²^[80]。但在施工阶段,大型车辆对风电机组材料的频繁运输以及用于道路建设、材料堆放等的临时用地长期被占用,导致场地内的草地受到破坏,在施工结束以后很难恢复场地的土壤原貌^[81]。例如,青海省共和县风电场建设过程中占用了部分草地作为临时用地,建成后则成为了建筑废料的堆放场或硬化场地,其土质密度升高,草地因被破坏失去了原有的结构和功能^[82]。同时,地表植被受到破坏后导致了风电场内的地表土壤裸露,含水量降低,引起风电场内的水土流失^[27-28],对于建在荒漠地带的风电场,土壤被侵蚀的情况会进一步加剧,从而加速了土壤中的有机质分解和养分流失^[11]。柴亚凡等^[83]在对甘肃酒泉戈壁荒漠区的风电场扰动地表面积调查结果显示,道路建设区和风力发电区对地表干扰最大,甘肃河西走廊风电场地表受到干扰的主要因素为道路施工扰动,这些对地表的扰动加剧了水土流失;在风电场建设时期造成的水土流失会促进可溶性盐类在土壤中的累积,进而导致土壤pH升高。为了保护土地,国外也有相关政策规定,可再生能源的开发只能在已被破坏的农田、草地、荒地和灌丛上进行^[84]。

在风电场运行时期会对土壤理化性质造成影响。李智兰^[10]在山西武家山风电场调查中也发现,风电场的建设会导致土壤pH升高、含水量下降,风电场的运行导致土壤中植被所需的营养元素(除了总P)含量下降,且随着辐射半径的加长,土壤中营养元素与植被生长所需的各种营养成分含量均升高,但当辐射半径达到4 km时,土壤中各种矿质元

素与植被生长所需的各种营养成分含量与对照样地(距风电干扰区3 km外)差异不显著,表明了风电场对植被与土壤的影响范围 ≤ 3 km。赵雪杉^[8]对河北蔚县运行期的风电场进行土壤养分调查发现,风电场内土壤的全氮、有效磷和速效钾的平均含量均显著低于对照样地(风电干扰区3 km外),且随着辐射半径的延伸,土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾的平均含量也逐渐增加。刘青春等^[75]分析发现,辉腾锡勒草原上的风电场建设导致0—20 cm的土壤肥力指标显著下降。在土耳其卡拉布伦半岛的研究也发现,风电场的建设显著降低了当地的土壤有机碳含量^[76]。另外,陆上风电机在安装、调试及日常维护检修中,如操作不慎发生漏油、滴油等现象或出现油布等废品乱扔情况,同样也会污染土壤与植被,对其造成不利影响^[66]。

4 对策与建议

4.1 陆上风电场建设前

多项研究表明噪音、光污染和电磁辐射均会对昆虫产生影响^[11-18]。因此,在陆上风电场建设前,应致力于升级风电机技术,提高风电机防磁、降噪和降温等性能,以减小对生态环境的影响是未来风电机升级的方向。也可通过斟酌颜色的选用、风电的排布等方式减少对昆虫正常生长发育及行为的不利影响。或探寻减少甚至避免漏油等污染的方法,延长风电机组的寿命、提高配件耐用性以减轻后续维修压力,有助于缓解风电场对生态环境的负面影响^[81]。但在技术升级上也应注意材料的成本问题,将风电场对生态环境的影响与经济效益相联系,做到保护生态环境的同时降低成本的投入,实现陆上风电场的科学利用。

4.2 陆上风电场建设中

陆上风电场的建设过程中对土壤和植被是破坏性的影响,在施工过程中可通过合理规划永久道路、临时道路、材料堆放位置等空间布局,以减少土地和植被受损面积,从而减轻对当地生态环境的破坏^[85]。在施工结束后应对施工过程中造成的破坏及时补救,如对建成后的风电场进行补播补种,开展土壤与植被的修复工作,并将恢复植被作为风电场建设运行的先决条件。同时,做好水土保持的监测工作,以帮助恢复当地的生态环境,减少风电场对生态环境的不利影响^[85-88]。在后续研究中也可根据

据不同地域特征开展相应的植物优势种的研究,助力生态环境的恢复进程。

4.3 陆上风电场运行期

风电企业要增强社会责任,在风电场运行期持续加强风电场植被恢复与生态改善方面的措施,并积极运用新技术、新方法减少风电场运行期产生的噪音、磁场等对环境和生物的影响。中国可再生能源学会风能专业委员会、中国电力科学研究院等相关研究机构要开展对风电机产生的阴影范围、噪音、电磁辐射等指标的监测工作,在未来的研究中应补充风电场产生的视觉污染、噪音及电磁辐射等干扰对环境及生物影响的数据支持以明确、缩小风电场阴影效应、噪音及电磁影响的具体范围,并详细测量记录调查地的各项环境因子,如温湿度、风向风速、降水量、海拔等,加强调查结果与各项环境因子的相关性研究,对风电场噪音、电磁、视觉污染等因素综合评分,以便得出不同环境中风电场的建设与运行对当地环境与生物的影响效应。同时,也可根据磁场、噪音和风速等数据开展相关室内试验,模拟风电场内环境因子的变化对风电场内生物的生物特性影响。例如,已有研究表明,果蝇在1.0 T永磁体上表现为后代数量有所增加,而在0.3~1.2 T磁场中表现为虫眼大量变形甚至大量死亡,但将其放入0.000 3~0.000 5 T磁场时却被证实感知不到磁场^[26,61]。因此在后续研究中应以实地探测结果为基础对风电场内昆虫进行相关室内试验,比如以风电场内优势昆虫作为首要研究对象探究风电场内环境因子的变化对其生物学特性影响。另外,目前风电场对昆虫与环境的影响多在某一固定的风电场中进行调查,关注点在局部范围,调查范围较小,且调查时间较短,其结果可能会因当年当地的气候特点产生定向的偏差。因此,在未来的调查中可扩大调查范围、延长调查年限,得出某个区域多个风电场对生态环境综合评价^[3]。在未来的调查中应注重风电场对整个生态系统的宏观影响,关注风电场内生态环境间的互作关系,建成风电场影响生态环境的多因素评价体系,为风电场的选址、科学利用与管理提供参考依据。

参考文献 Reference

[1] 姚怡然,梅应丹. 风能资源开发利用对生物多样性的影响[J]. 环境影响评价, 2023, 45(3): 39-43

Yao Y R, Mei Y D. The impact of the development and utilization of wind energy resources on biodiversity[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2023, 45(3): 39-43 (in Chinese)

[2] 马松尧,陈龙,滕泽宇,丁爱军,何子豪. 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, Ding A J, He Z H. Vegetation changes in wind farm in desert steppe region[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 186-192 (in Chinese)

[3] 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 (in Chinese)

[4] Voigt C C. Insect fatalities at wind turbines as biodiversity sinks[J]. *Conservation Science and Practice*, 2021, 3(5): e366

[5] 国家能源局. 国家能源局2024年上半年新闻发布会文字实录[EB/OL](2024-07-31)[2024-09-17]. http://www.nea.gov.cn/2024-07/31/c_1310783380.htm

National Energy Administration. Transcript of the National Energy Administration's press conference for the first half of 2024[EB/OL](2024-07-31)[2024-09-17]. http://www.nea.gov.cn/2024-07/31/c_1310783380.htm

[6] 邓隐北. 风力发电-发展潜力巨大的清洁能源[J]. 能源研究与信息, 2002, 18(4): 243-246

Deng Y B. Wind power generation-A clean energy source with tremendous potentiality[J]. *Energy Research and Information*, 2002, 18(4): 243-246 (in Chinese)

[7] 王涛,吴薇,薛娴,张伟民,韩致文,孙庆伟. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 24-29

Wang T, Wu W, Xue X, Zhang W M, Han Z W, Sun Q W. Time-space evolution of desertification land in northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 24-29 (in Chinese)

[8] 赵雪杉. 风电场土壤养分及植被变化研究[D]. 保定:河北农业大学, 2018

Zhao X S. Study on soil nutrients and vegetation changes in wind farms[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[9] 张力琛,范立张,马常威,刘军华,朱勇,陈哲,吴建平. 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 L C, Fan L Z, Ma C W, Liu J H, Zhu Y, Chen Z, Wu J P. 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 (in Chinese)

[10] 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 (in Chinese)

[11] 褚建. 风力发电对青海生态环境的影响[J]. 青海环境, 2006, 16(3): 123-124

Chu J. Influence of wind power generation on ecological environment in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2006, 16(3): 123-124 (in Chinese)

[12] Marx J, Schreiber A, Zapp P. Response to 'Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines' [J]. *Journal of Cleaner*

- Production*, 2019, 219: 33-34
- [13] Norro A M J, Rumes B, Degraer S J. Differentiating between underwater construction noise of monopile and jacket foundations for offshore windmills: A case study from the Belgian part of the North Sea[J/OL]. *Scientific World Journal*, (2013-03-18). DOI: doi.org/10.1155/2013/897624
- [14] 张然. 海上风电场水下打桩噪声研究[D]. 厦门:厦门大学,2019
- Zhang R. Study on underwater piling noise for offshore wind farm[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019 (in Chinese)
- [15] 赵大庆,王莹,韩玺山. 风力发电场的主要环境问题[J]. 环境保护科学,2005, 31(3): 66-67
- Zhao D Q, Wang Y, Han X S. Main environmental problem of wind electric power generation field[J]. *Environmental Protection Science*, 2005, 31(3): 66-67 (in Chinese)
- [16] 傅一迪. 风电场声环境影响探析:以望江屯风电场二期工程为例[J]. 环境科学与管理,2013,38(6): 187-191
- Fu Y D. Sound environment impact of wind power plants: Case study of Wangjiang Village wind power station phaseII[J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(6): 187-191 (in Chinese)
- [17] Tougaard J, Hermannsen L, Madsen P T. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines?[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(5): 2885-2893
- [18] 苏文,吴霓,章柳立,陈绵润. 海上风电工程对海洋生物影响的研究进展[J]. 海洋通报,2020,39(3): 291-299
- Su W, Wu N, Zhang L L, Chen M R. A review of research on the effect of offshore wind power project on marine organisms[J]. *Marine Science Bulletin*, 2020, 39(3): 291-299 (in Chinese)
- [19] 邓文静,韦启浪,彭琪,李家兴,雷有为,张娜,莫小阳. 湖南雪峰山自然保护区两栖动物多样性调查及人为干扰研究[J]. 生命科学研究,2021,25(4): 338-346
- Deng W J, Wei Q L, Peng Q, Li J X, Lei Y W, Zhang N, Mo X Y. Study on biodiversity and human disturbances of amphibians in Xuefengshan nature reserve, Hunan Province[J]. *Life Science Research*, 2021, 25(4): 338-346 (in Chinese)
- [20] 李旭梅. 宁夏草甸草原植物多样性与昆虫物种多样性关系研究[D]. 银川:宁夏大学,2023
- Li X M. Study on the relationship between plant diversity and insect species diversity in meadow grassland of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023 (in Chinese)
- [21] 马晓宇. 内蒙古达里诺尔风电场昆虫群落结构及多样性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2014
- Ma X Y. Study on insect community structure and diversity of dalinuoer wind farm in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2014 (in Chinese)
- [22] Zhang X G, Guo H Y, Chen J, Song J K, Xu K D, Lin J, Zhang S Y. Potential effects of underwater noise from wind turbines on the marbled rockfish (*Sebasticus marmoratus*)[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2021, 37(4): 514-522
- [23] 魏庆勇,刘巧梅,刘来胜. 风电场开发的环境效益及环境影响[J]. 环境与可持续发展,2009,34(1): 11-13
- Wei Q Y, Liu Q M, Liu L S. Environmental benefits and environmental impact of wind farm development[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2009, 34(1): 11-13 (in Chinese)
- [24] 杨国华,鲍丽芳,韩世军. 分布式风力发电开发对宁夏局部生态环境的影响研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(21): 12832-12833
- Yang G H, Bao L F, Han S J. The impact on ecological environment of Ningxia regional area for distributed wind electricity exploitation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(21): 12832-12833 (in Chinese)
- [25] 高荣喜. 风电、光伏工程对林业有害生物防控的影响[J]. 山西林业,2022(S1): 52-53
- Gao R X. Influence of wind power and photovoltaic engineering on prevention and control of forest pests[J]. *Forestry of Shanxi*, 2022(S1): 52-53 (in Chinese)
- [26] Bassetto M, Reichl T, Kobylkov D, Kattinig D R, Winklhofer M, Hore P J, Mouritsen H. No evidence for magnetic field effects on the behaviour of *Drosophila*[J]. *Nature*, 2023, 620(7974): 595-599
- [27] 赵陟峰,吴震,周建海,周波,张新民. 风电场建设对河西走廊水土流失的影响及防治对策[J]. 中国水土保持,2011(8): 17-18,26
- Zhao Z F, Wu Z, Zhou J H, Zhou B, Zhang X M. Influence of wind farm construction on soil erosion in Hexi Corridor and its prevention and control countermeasures[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(8): 17-18, 26 (in Chinese)
- [28] 柴亚凡,周波,罗进选,吕文强. 河西走廊风电场道路建设探讨[J]. 中国水土保持,2018(7): 41-43
- Chai Y F, Zhou B, Luo J X, Lv W Q. Approach to road construction of wind farms in the Hexi Corridor[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(7): 41-43 (in Chinese)
- [29] Petterssonsson J. The Impact of Offshore Wind Farms on Bird Life in Southern Kalmar sound, Sweden[R]. Lund: Sweedish Energy Agency, 2005
- [30] Cook A S CP, Johnston A, Wright L J, Burton N H K. BTO Research Report No 618: A review of flight heights and avoidance rates of birds in relation to offshore windfarms[R]. Thetford: British Trust for Ornithology, 2012
- [31] Furness R W, Wade H M, Masden E A. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 119: 56-66
- [32] Thompson M, Beston J A, Etterson M, Diffendorfer J E, Loss S R. Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States[J]. *Biological Conservation*, 2017, 215: 241-245
- [33] Reynolds D S. Monitoring the potential impact of a wind development site on Bats in the Northeast[J]. *Journal of Wildlife Management*, 2006, 70(5): 1219-1227
- [34] Dong Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority, The Danish Forest and Natrue Agency. *Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues*[M]. Copenhagen: Danish Energy Authority, 2006
- [35] Westerberg H, Lagenfelt I. Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel[J]. *Fisheries Management & Ecology*, 2008, 15(5-6): 369-375
- [36] Krewitt W, Nitsch J. The potential for electricity generation from on-shore wind energy under the constraints of nature conservation: A case study for two regions in Germany[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(10): 1645-1655
- [37] Krause C L. Our visual landscape: Managing the landscape under special consideration of visual aspects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 54: 239-254
- [38] Hurtado J P, Fernandez J, Parrondo J L, Blanco E. Spanish method of visual impact evaluation in wind farms[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, 8(5): 483-491
- [39] Gamboa G, Munda G. The problem of windfarm location: A social multi-

- criteria evaluation framework[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(3): 1564-1583
- [40] 邱小芳. 光对毛蠹夜蛾繁殖生物学特性的影响研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2018
- Qiu X F. Effect of light on reproductive biological characteristics of *Spodoptera Pilosa* [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018 (in Chinese)
- [41] 张坤胜, 杨伟, 卓志航, 邓志彬, 杨春平, 杨桦, 周建华, 肖银波, 贾玉珍. 蜀柏毒蛾生殖行为及性信息素产生与释放节律[J]. 昆虫学报, 2012, 55(1): 46-54
- Zhang K S, Yang W, Zhuo Z H, Deng Z B, Yang C P, Yang H, Zhou J H, Xiao Y B, Jia Y Z. Reproduction behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release in *Parocneria orientalis* (Lepidoptera: Lymantriidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55(1): 46-54 (in Chinese)
- [42] 张月亮, 慕卫, 赵德, 魏光, 潘金菊. 光照时间和冷藏对桃小食心虫生长发育和繁殖的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1348-1350
- Zhang Y L, Mu W, Zhao D, Wei G, Pan J J. Effects of illumination and cold storage on development and reproduction of *Carposina niponensis* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1348-1350 (in Chinese)
- [43] Iqbal T, Inayatullah M, Sadozai A, Khan I A. Effect of light and dark exposure on the different life parameters of silk worm, *Bombyx mori* L. (Bombycidae: Lepidoptera) [J]. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2008, 24(1): 1016-1018
- [44] 闫硕, 李慧婷, 朱威龙, 朱家林, 张青文, 刘小侠. 光强度对棉铃虫交配行为的影响[J]. 昆虫学报, 2014, 57(9): 1045-1050
- Yan S, Li H T, Zhu W L, Zhu J L, Zhang Q W, Liu X X. Effects of light intensity on the sexual behavior of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57(9): 1045-1050 (in Chinese)
- [45] Padgham D E. Hatching rhythms in the desert locust, *Schistocerca gregaria* [J]. *Physiological Entomology*, 1981, 6(2): 191-198
- [46] Long C V, Flint J A, Lepper P A. Insect attraction to wind turbines: Does colour play a role? [J]. *European Journal of Wildlife Research*, 2011, 57(2): 323-331.
- [47] MacGregor K A, Lemaitre J. The management utility of large-scale environmental drivers of bat mortality at wind energy facilities: The effects of facility size, elevation and geographic location [J/OL]. *Global Ecology and Conservation*, (2019-12-20). DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00871
- [48] Horn J W, Arnett E B, Kunz T H. Behavioral responses of bats to operating wind turbines [J]. *Journal of Wildlife Management*, 2008, 72(1): 123-132
- [49] 孙春顺, 王耀南, 李欣然, 马士英. 风力发电工程对环境的影响[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(2): 19-23
- Sun C S, Wang Y N, Li X R, Ma S Y. Environmental impacts of wind power generation projects [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2008, 23(2): 19-23 (in Chinese)
- [50] Lampe U, Reinhold K, Schmoll T. How grasshoppers respond to road noise: Developmental plasticity and population differentiation in acoustic signalling [J]. *Functional Ecology*, 2014, 28(3): 660-668
- [51] Orci K M, Petrůczki K, Barta Z. Instantaneous song modification in response to fluctuating traffic noise in the tree cricket *Oecanthus pellucens* [J]. *Animal Behaviour*, 2016, 112: 187-194
- [52] Cunningham G M, Fahrig L. Mate attraction by male anurans in the presence of traffic noise [J]. *Animal Conservation*, 2013, 16(3): 275-285
- [53] Gurule-Small G A, Tinghitella R M. Developmental experience with anthropogenic noise hinders adult mate location in an acoustically signalling invertebrate [J/OL]. *Biology Letters*, (2018-02-28). DOI: https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0714
- [54] Phillips J N, Ruef S K, Garvin C M, Le M T, Francis C D. Background noise disrupts host-parasitoid interactions [J/OL]. *Royal Society Open Science*, (2019-09-25). DOI: https://doi.org/10.1098/rsos.190867
- [55] Austin T T, Woodrow C, Pinchin J, Montealegre-Z F, Warren B. Effects of age and noise on tympanal displacement in the Desert Locust [J/OL]. *Journal of Insect Physiology*, (2023-12-03). DOI: doi.org/10.1016/j.jinsphys.2023.104595
- [56] Phillips M E, Chio G, Hall C L, ter Hofstede H M, Howard D R. Seismic noise influences brood size dynamics in a subterranean insect with biparental care [J]. *Animal Behaviour*, 2020, 161: 15-22
- [57] McMahon T A, Rohr J R, Bernal X E. Light and noise pollution interact to disrupt interspecific interactions [J]. *Ecology*, 2017, 98(5): 1290-1299
- [58] Centre for Marine and Coastal Studies. A baseline assessment of electromagnetic fields generated by offshore windfarm cables [R]. Liverpool: Centre for Marine and Coastal Studies University of Liverpool, 2003
- [59] 王明明. 磁场和LED光照对小菜蛾生物学特性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2010
- Wang M M. Effects of magnetic field and LED illumination on biological characteristics of *Plutella xylostella* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010 (in Chinese)
- [60] 鲁勇军, 余珏. 磁场生物学效应研究进展[J]. 基础医学与临床, 1994, 14(5): 9-14
- Lu Y J, Yu Y. Research progress on the biological effects of magnetic fields [J]. *Basic & Clinical Medicine*, 1994, 14(5): 9-14 (in Chinese)
- [61] Levensgood W C, Shinkle M P. Solar flare effects on living organisms confined in magnetic fields [J]. *Nature*, 1962, 195: 967-970
- [62] 周志芳, 贺桂欣, 赵香兰, 张洪喜, 张雪刚. 磁化杯磁场对黄粉蚜生长和繁殖的影响[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1995(2): 60-62
- Zhou Z F, He G X, Zhao X L, Zhang H X, Zhang X G. Influence of magnetic field on the growth and reproduction of *Tenebrio Molitor Linnacus* [J]. *Journal of Hebei Agrotechnical Teachers College*, 1995(2): 60-62 (in Chinese)
- [63] Presman A S. *Electromagnetic Fields and Life* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1970
- [64] 闫蒙蒙. 近零磁场对粘虫生长发育、繁殖及飞行能力的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020
- Yan M M. Effects of near-zero magnetic field on growth, reproduction and flight ability of armyworm [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis, 2020 (in Chinese)
- [65] 刘瑞莹. 模拟地磁场强度变化对褐飞虱生长发育繁殖与行为影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021
- Liu R Y. Effects of simulated change in geomagnetic field intensity on the growth, development, reproduction and behavior of brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) and the respective mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [66] 白文慧. 大规模风电开发对环境的影响分析[J]. 技术与市场, 2013, 20(4): 64-65
- Bai W H. Analysis on the impact of large-scale wind power development on environment [J]. *Technology and Market*, 2013, 20(4): 64-65 (in Chinese)
- [67] 姜艳丰, 曹阳, 张韬. 辉腾锡勒草原风电场建设对NDVI时空及气象因子的响

- 应[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2020, 41(3): 38-44
- Jiang Y F, Cao Y, Zhang T. Response of the construction of huitengxile grassland wind farm to NDVI space-time and meteorological factors[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2020, 41(3): 38-44 (in Chinese)
- [68] Armstrong A, Burton R R, Lee S E, Mobbs S, Ostle N, Smith V, Waldron S, Whitaker J. Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation[J/OL]. *Environmental Research Letters*, (2016-04-22), DOI: doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044024
- [69] 徐荣会. 干旱区风电场对局地微气象环境的影响研究: 以苏尼特右旗朱日和风电场为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014
- Xu R H. Study on the influence of wind farm in arid area on local micro-meteorological environment: Taking Zhurihe wind farm in sunite right banner as an example[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [70] 胡菊. 大型风电场建设对区域气候影响的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012
- Hu J. Numerical simulation research on impact of large-scale wind farms on regional climate[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012 (in Chinese)
- [71] 马兴悦. 基于卫星遥感资料的河北坝上风电场对地表温度和植被的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022
- Ma X Y. Impacts of wind farms on land surface temperature and vegetation in Hebei Bashang based on satellite remote sensing data[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022 (in Chinese)
- [72] 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[J/OL]. *Remote Sensing*, (2016-09-23), DOI: doi.org/10.3390/rs8100790
- [73] 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[J/OL]. *Environmental Research Letters*, (2022-02-11), DOI: doi.org/10.1088/1748-9326/ac49ba
- [74] 张雪婷, 李金鑫, 陈正洪, 何飞, 崔杨. 我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探: 以湖北大悟为例[J]. 气象科技进展, 2019, 9(2): 56-61
- Zhang X T, Li J X, Chen Z H, He F, Cui Y. A preliminary exploration on the influence of wind farms on local climate in Dabie Mountainous areas in China: A case study of Dawu in Hubei Province [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(2): 56-61 (in Chinese)
- [75] 刘春青, 张韬, 汪超, 刘佳慧. 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 C Q, Zhang T, Wang C, Liu J H. 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 (in Chinese)
- [76] Pekkan O I, Kurkcuglu M A S, Cabuk S N, Aksoy T, Yilmazel B, Kucukpehlivan T, Dabanli A, Cabuk A, Cetin M. Assessing the effects of wind farms on soil organic carbon[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(14): 18216-18233
- [77] 汪超, 张韬. 辉腾锡勒草原风机数量与多种因子相关性分析[J]. 热带农业工程, 2019, 43(1): 103-105
- Wang C, Zhang T. Correlation between the number of fan and various factors in Huiteng Siller grassland[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2019, 43(1): 103-105 (in Chinese)
- [78] Li G Q, Zhang C H, Zhang L, Zhang M. Wind farm effect on grassland vegetation due to its influence on the range, intensity and variation of wind direction[C]. In: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016: 1304-1306
- [79] 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[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 959-964
- Li G Q, Zhang C H, Zhang L, Zhang M. Effects of wind farms on grassland vegetation: A case study of Huitengliang wind farm, Inner Mongolia[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 959-964 (in Chinese)
- [80] 申全民. 关于加快张家口坝上风电开发的对策建议[J]. 经济论坛, 2007(4): 41-43, 69
- Shen Q M. Countermeasures and suggestions on speeding up the development of wind power in the Zhangjiakou Bashang [J]. *Economic Tribune*, 2007(4): 41-43, 69 (in Chinese)
- [81] 安定明. 风电开发对坝上地区生态环境的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(14): 7479-7480
- An D M. Studies on the impact of wind electricity exploitation on ecological environment of Bashang area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(14): 7479-7480 (in Chinese)
- [82] 王志科, 张嘉宸, 李廷山, 周小永, 袁鹏洲. 高海拔地区风电场建设对环境的影响及水土保持对策探讨: 以共和县切吉乡 1000MW 风电项目为例[J]. 绿色科技, 2020(20): 140-142
- Wang Z K, Zhang J C, Li T S, Zhou X Y, Yuan P Z. Discussion on environmental impact of wind farm project construction in high altitude area and soil and water conservation prevention: Taking the 1000MW wind power project in Qieji Township of Hainan Province as an example[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(20): 140-142 (in Chinese)
- [83] 柴亚凡, 周波, 李欣娟, 周建海, 杨靖文. 戈壁荒漠区风电场用地水土流失特征及其预测[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(S1): 20-24
- Chai Y F, Zhou B, Li X J, Zhou J H, Yang J W. Characteristic and prediction of soil and water loss in wind power farm space required of the Gobi Desert[J]. *Science of Soil and Water Conservation in China*, 2013, 11(S1): 20-24 (in Chinese)
- [84] Obane H, Yu N G, Asano K. Assessing land use and potential conflict in solar and onshore wind energy in Japan[J/OL]. *Renewable Energy*, (2020-06-19). DOI: doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.018
- [85] 陈强, 迟洪明, 丁伟, 杨昊天, 吴吉军, 杨奕颖, 吴旭东, 张亚峰, 季波, 李云飞, 张志山, 刘立超. 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
- Chen Q, Chi H M, Ding W, Yang H T, Wu J J, Yang Y Y, Wu X D, Zhang Y F, Ji B, Li Y F, Zhang Z S, Liu L C. Theory and strategies for vegetation conservation and ecological restoration in a large-scale photovoltaic power station in the southern Tengger Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(5): 123-132 (in Chinese)
- [86] 张姗. 九寨沟景区震后景观格局变化及景观修复研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020
- Zhang S. Study on landscape pattern change and landscape restoration of Jiuzhaigou scenic spot after earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020 (in Chinese)
- [87] 赵欣. 黑岱沟露天煤矿生态修复后的景观生态格局变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013
- Zhao X. Landscape ecological pattern change research of Hei-Dai-Gou opencast coal mine after ecological restoration[D]. Hohhot: Inner Mongolia

University, 2013 (in Chinese)

[88] 卞正富, 雷少刚, 刘辉, 邓喀中. 风积沙区超大工作面开采生态环境破坏过程与恢复对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 305-310

Bian Z F, Lei S G, Liu H, Deng K Z. The process and countermeasures for

ecological damage and restoration in coal mining area with super-size mining face at aeolian sandy site[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(2): 305-310 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 崔艺凡, 中国农业大学草业科学与技术学院草学专业博士研究生。中国农业大学宁夏彭阳草业科技小院院长, 2024年6月获中国农业大学草业科学与技术学院优秀开题奖, 2024年10月获中国农业大学学业二等奖奖学金, 2025届中国农业大学优秀硕士毕业生。参与发表论文6篇, 其中以第一作者身份发表1篇。



通讯作者简介: 魏淑花, 博士, 宁夏农林科学院植物保护研究所副研究员, 主要从事草地虫害发生规律、监测预报及综合防控技术研究和示范工作。国家林业和草原局“草原生物灾害防治国家创新联盟”副秘书长; 国家自然科学基金项目同行评议人; 中国农业大学和北方民族大学校外兼职硕士生导师; 宁夏生物学会昆虫专委会秘书长, 入选2021年宁夏回族自治区青年拔尖人才。主持参加国家、自治区级各类项目10余项, 其中主持国家自然科学基金2项、国家重点研发专项子课题1项。获得宁夏回族自治区科技进步奖4项, 获发明专利8项, 实用新型专利5项, 制定地方标准13项, 软间著作权10余项; 发表学术论文40余篇(其中SCI论文10余篇), 参编著作6部。



通讯作者简介: 班丽萍, 博士, 中国农业大学草业科学与技术学院教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为草地害虫的治理和防控。为农业农村部饲草作物有害生物防治专家委员会委员, 国家林草局草原蝗灾防治指挥部专家组成员, 担任中国草学会草地保护专业委员会常务理事, 中国昆虫学直翅类昆虫学专业委员会委员, 《植物保护学报》编委等学术职务。先后主持国家自然科学基金、北京市自然科学基金、国家重点研发计划项目(子课题主持)等多项, 现为北京市现代农业产业体系植保岗位科学家。在 *Genome Research*、*BMC Biology* 等杂志发表论文50余篇, 主编/副主编著作4部, 参编若干部。