不同恢复措施对风电场草地群落生产力和物种多样性的影响

彭 阳[1], 高 军[2], 刘晓曼[1], 朱媛君[3], 宝音陶格涛[4], 熊锦芳[5], 刘政鑫[5]

(1.生态环境部 卫星环境应用中心, 北京 100094; 2.生态环境部 南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3.中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所, 北京 100091; 4.内蒙古大学 生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 5.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要: [目的] 研究不同恢复措施对兴安盟风电场草地群落生产力和物种多样性的影响,探索适宜丘陵草地风电场的生态恢复措施组合模式,为丘陵草地风电场生态恢复提供科学指导。[方法] 对内蒙古自治区兴安盟风电场基座不同恢复措施下共计78个处理样方进行试验研究,分析覆土、补播、施肥交互作用对草地群落生产力和物种多样性的影响。[结果] 研究区域内共记录48种植物,分属20科41属,表明恢复后的草地生态系统具备了一定的物种多样性基础;从草地生产力角度看,豆科与禾本科播种比例5∶5,覆土厚度20 cm,播种行距30 cm,施氮肥组合处理为风电场草地最佳恢复模式;从物种多样性角度看,豆科与禾本科播种比例7∶3,覆土厚度20 cm,播种行距15 cm,施氮肥的组合处理为风电场草地适宜补播的恢复模式;从经济成本角度,豆科与禾本科播种比例7∶3,覆土厚度10 cm,播种行距15 cm,施氮肥组合处理为风电场草地最优恢复模式。[结论] 覆土、补播、施肥复合措施促进了短期草地恢复,播种比例和播种行距是影响风电场基座的工程裸露地表群落生产力与物种多样性恢复的主要因素,需要持续监测草地恢复效果的持久性。

关键词: 风电场; 恢复措施; 群落生产力; 物种多样性; 生态恢复

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0021-11 **中图分类号:** X171.4, S812.8

文献参数: 彭阳, 高军, 刘晓曼, 等.不同恢复措施对风电场草地群落生产力和物种多样性的影响[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 21-31. Peng Yang, Gao Jun, Liu Xiaoman, et al. Impacts of different restoration measures on productivity and species diversity of grassland communities in wind farms [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 21-31.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.041 **CSTR:** 32312.14.stbctb.2026.05.041

Impacts of different restoration measures on productivity and species diversity of grassland communities in wind farms

Peng Yang[1], Gao Jun[2], Liu Xiaoman[1], Zhu Yuanjun[3], Baoyintaogetao[4], Xiong Jinfang[5], Liu Zhengxin[5]

(1.*Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing* 100094, *China*; 2.*Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing, Jiangsu* 210042, *China*; 3.*Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*; 4.*School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia* 010021, *China*; 5.*Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of different restoration measures on productivity and species diversity of grassland communities in wind farms of Xing'an League were investigated, and suitable combination patterns of ecological restoration measures were explored, in order to provide scientific guidance for ecological restoration in hilly grassland wind farms. [Methods] An experiment was conducted on 78 treatment plots under different restoration measures at the wind farm foundations of Xing'an League, Inner Mongolia Autonomous Region, to analyze the effects of interactions among soil covering, reseeding and fertilization on productivity and species

收稿日期: 2026-01-27 **修回日期:** 2026-03-30 **采用日期:** 2026-04-11

资助项目: 国家重点研发计划课题"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: 彭阳(1990—),女(汉族),河北省邢台市人,硕士,工程师,主要从事生态修复工作。Email:pyang356@yeah.net。

通信作者: 刘晓曼(1979—),女(汉族),湖北省武汉市人,博士,研究员,主要从事生态修复工作。Email:showma79@163.com。

朱媛君(1992—),男(汉族),内蒙古自治区呼伦贝尔市人,博士,副研究员,主要从事草原修复工作。Email:zhuyuanjun@caf.ac.cn。

diversity of grassland communities. [Results] ① A total of 48 plant species of 20 families and 41 genera were recorded in the study area, indicating that the restored grassland ecosystem had a certain foundation of species diversity. From the perspective of grassland productivity, the optimal restoration model for wind farm grasslands was the combined treatment of a seeding ratio of legumes to grasses at 5∶5, a soil covering thickness of 20 cm, a seeding row spacing of 30 cm, and combined nitrogen fertilization. ② In terms of species diversity, the suitable reseeding restoration model for wind farm grasslands was the combined treatment of a seeding ratio of legumes to grasses at 7∶3, a soil covering thickness of 20 cm, a seeding row spacing of 15 cm, and nitrogen fertilization. ③ Considering the economic cost, the optimal restoration model for wind farm grasslands was a seeding ratio of legumes to grasses at 7∶3, a soil covering thickness of 10 cm, a seeding row spacing of 15 cm, and nitrogen fertilization. [Conclusion] The combined measures of soil covering, reseeding, and fertilization promote short-term grassland restoration. Seeding ratio and sowing row spacing are the main factors affecting the restoration effects of community productivity and species diversity on the exposed surfaces around wind turbine foundations. However, continuous monitoring is required to assess the persistence of grassland restoration effects.

Keywords: wind farm; restoration measures; community productivity; species diversity; ecological restoration

随着能源供需关系的紧张,节能环保资源成为全球关注的焦点。风能作为清洁和环境友好的可再生能源,可以减少对化石燃料的依赖,显示出在满足能源需求,改善能源结构,减少环境污染、促进经济发展方面的优势,成为推动全球能源结构调整的关键力量[1-2]。近年来,中国风电开发建设飞速发展,风能发电项目及发电量处于世界第一位置,是实现经济社会资源和环境可持续发展的重要措施[3]。根据世界风能协会(WWEA)的统计数据,中国2023年风电新增装机75.9 GW,同比增长102%,已成为全球最大的可再生能源市场和供应链中心,占全球增量的40%以上[4]。在风力发电作为关键清洁能源迅猛发展的背景下,其可能带来的生态环境影响引发了学者广泛关注。尽管风力发电相比于其他能源发电,对环境的影响和破坏要小得多,但风电场在建设和运行过程中会对周边生态环境产生影响[5-6]。相关研究表明,风电场在建设和运行过程中对环境的影响重点体现在对植被和土壤的扰动破坏,尤其是在风机基础开挖,场内道路建设,弃土场形成过程中造成的地貌改变,地表植被破坏,土地利用格局改变,水土流失和区域生态功能降低等后果[7-10],严重影响了区域生态安全,并正逐渐成为制约我国风电发展的阻碍因素[11-12]。尽管风电场生态环境影响的研究已较为丰富,但关于如何通过科学手段恢复被破坏的植被与土壤,从而减缓其负面效应的研究依然匮乏。因此,开展风电场周边裸露地表的生态恢复,对防止当地水土流失、提高植被覆盖率意义重大,不仅强化了风电场的环境效益,更推动风电产业从单一的能源供给角色,向协同保障能源安全与促进生态保护的双重目标演进,实现产业发展与自然修复的深度融合[11,13]。

退化生态系统的保护和恢复是提升生态环境质量,实现自然资源的可持续利用,解决环境污染、恢复自然生态平衡的过程[14]。加大生态保护恢复力度,提升生态系统质量和稳定性,对维护国家生态安全具有基础性、战略性作用。草地作为陆地生物圈的重要组成部分,是十分脆弱的。草原生态系统不仅为人类提供饲料和畜牧生产等直接经济价值,还为生物多样性提供了丰富的栖息地,在维持气候平衡、水源涵养和土壤保持等方面具有关键作用[15],其健康状况直接关系到区域生态安全与畜牧业发展[16]。随着我国风电产业的快速发展,一些风电场已建立在草原、荒漠等脆弱生态系统区域。相关研究[2,12,17-18]表明,草原生态系统的风电场建设,显著减少了草地面积,降低了周边区域植被覆盖度、物种多样性指数、地上地下生物量,同时导致土壤含水量、有机质、氮磷等养分下降,削弱了生态系统功能。如荒漠草原区百兆瓦级风力发电场建设造成直接植被生产力损失量为6.79 g/(m^2·a),间接植被生产力损失量为91.43 g/(m^2·a)[19];锡林郭勒草原风电场建设和运行可能会削弱植被生态功能,进而威胁区域生态安全[2];大同武家山风电场的研究表明,风电场降低了周边区域植被覆盖度、物种多样性指数、地上地下生物量[17]。因此,开展草地风电场生态恢复研究,不仅有助于揭示受损草地生态系统的恢复机制与演替规律,更能为风电开发区域的植被重建、土壤改良及可持续管理提供科学依据与技术支撑,对于协调能源开发与生态保护之间的矛盾具有重要的现实意义。

近年来,对于退化草地生态系统的恢复措施和技术的研究不断深化,全球涌现出20多种有效的修复策略和技术。比较常用且成熟的是免耕补播、合

理放牧、人工恢复、围栏封育、耕翻和施肥等技术[20-22]。在风电场生态恢复方面也开展了一定的研究,常用的措施有人工补播、封育管理[13]、休牧禁牧、灌溉、打孔等[23]。本研究采用物种补播、覆土、播种方式、施肥4种处理措施,并分别组合成不同的恢复模式,在大兴安岭西麓中部地区的兴安盟中广核润泽风电场基座下裸露地表开展生态恢复,分析不同恢复模式对草地生产力和物种多样性的影响,确定物种补播、覆土、播种方式及施肥等措施的最优组合模式,以协同提升风电场扰动草地的生产力与物种多样性为目标,初步探究适用于草原地区风电场高效的生态恢复途径,为同类区域的生态恢复提供科学指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

内蒙古自治区兴安盟科尔沁右翼前旗西部中广核新能源润泽风电场(以下简称润泽风电场)是国家第一批以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地项目之一,其建设依托于国家能源转型战略、地方产业帮扶政策及优越的自然地理条件等多重背景。项目所在地风能资源禀赋优越,当地80 m高度风速可达7 m/s,风功率密度为400 W/m^2,且无明显破坏性风速,具备大规模风电开发的自然基础[24]。同时,作为兴安盟重要风电产业帮扶项目,润泽风电场在推动地方经济发展与能源结构优化方面具有重要意义。

研究区地处大兴安岭向松嫩平原过渡带,地理坐标为45°41′51″—47°01′36″N,119°49′39″—122°49′16″E,海拔约800 m,坡度为3°～5°,属山地丘陵区,整体地势北高南低。研究区植被类型属兴安盟大兴安岭西麓草甸草原,建群种和优势种以贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)和洽草(*Koeleria macrantha*)等为主。区域属温带大陆性季风气候,其特点春季干旱多风,夏季高温多雨,秋季干燥多风,冬季漫长寒冷;多年平均气温5.1 ℃,极端最高气温38.8 ℃,极端最低气温−36 ℃;生长期年平均105 d;无霜期年平均105 d,年平均日照2　810.1 h,年均有效积温在26～63.9 ℃;平均年降水量400 mm,降雨集中在每年的6—8月,7—8月降雨最多。

1.2　试验区设计

本研究选取润泽风电场3个相邻且立地条件相似的风电基座下方因建设风电场导致的土壤裸露区域作为试验区(46.07°N,120.35°～120.36°E),海拔约800 m,原有土壤类型为黑钙土。2024年选取每个风电基座下方约300 m^{2}的裸露区域作为试验样地,每个风电基座为一个重复,共计3个重复。每个风电基座(试验样地)下布设26个3 m×3 m的样方,试验样方共计78个。试验处理包括豆科与禾本科播种比例(5∶5,7∶3,3∶7),覆土厚度(厚度10 cm,20 cm),播种行距(行距15 cm,30 cm)以及是否施氮肥(施氮肥8 g/m^2)4种处理,每种处理组合之间间隔1 m。其中播种禾本科物种为羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*),豆科物种为苜蓿(*Medicago sativa*)。具体样方处理编号及试验地布局图如图1所示。

1.3　指标测定

2025年7—8月进行调查,采用样方调查方式,在风电基座下每个3 m×3 m的样方中各选取1个1 m×1 m的草本样方,共计调查78个草本样方。每个风电基座下不同处理为1个重复,共3个重复。主要调查植物群落特征、植被盖度、地上生物量、物种多样性。记录每个样方内的植物物种名称、多度、株高。采用样点法估算每个样方的盖度。将每个样方内的所有观测物齐地刈割,并将刈割的植被地上生物量装入牛皮纸袋,做好记录后称其鲜重,带回实验室置于120 ℃烘箱杀青15 min,然后置65 ℃烘箱中烘干7～8 h,烘至恒重,称其干重。物种多样性指标的计算参照宝音陶格涛、宋永昌[25-26]的方法,计算公式为

Simpson优势度指数:

$$D=1-\sum(P_i\cdot P_i) \tag{1}$$

Shannon-Wiener多样性指数:

$$H=-\sum(P_i\cdot \ln P_i) \tag{2}$$

Pielou均匀度指数:

$$J_{sw}=H/\ln S \tag{3}$$

物种丰富度指数:

$$S=\text{观测到的物种数量} \tag{4}$$

$$\text{地上生物量与物种多样性的变异系数}(C_v)=\left[\text{标准偏差(SD)}/\text{平均值(mean)}\right]\times 100\% \tag{5}$$

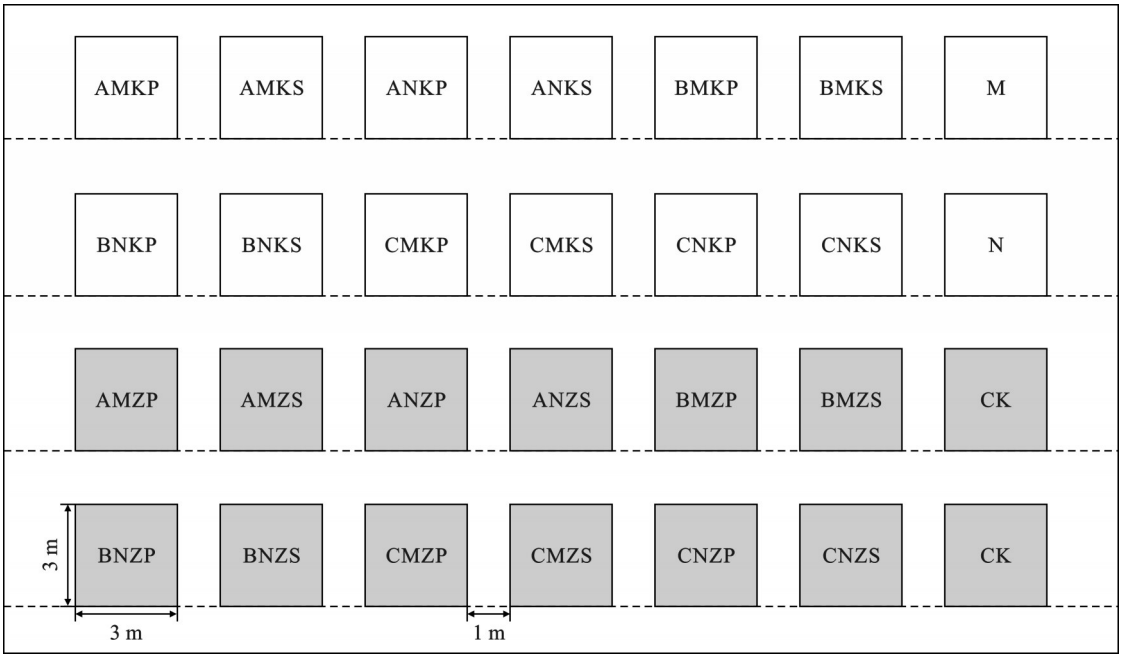
式中:P_i为第i个物种的重要值。P_i=(相对高度+相对盖度)/2。其中,相对高度(%)=某一物种的高度/各物种高度之和×100;相对盖度(%)=某一物种的盖度/各物种的分盖度之和×100。

2　结果与分析

2.1　不同恢复措施下群落物种组成

研究区域内共记录到物种48种,分属20科41属,包括豆科(5种)、禾本科(9种)、菊科(6种)、蔷薇科

(5种)、其他科类植物(23种)等。其中AMKP样方的物种数量最多,有26种,涉及11科。从播种行距来看,30 cm与15 cm的行距中,样方的优势种均为苜蓿、狗尾草,常见的物种均为狼尾草、冰草、黄蒿、无芒雀麦等(表1—2)。在豆科植物中,除对照处理中无苜蓿,其余处理中均存在苜蓿,其中在AMKS处理下其重要值最高为0.33,在CMZS处理下最低为0.16;其次是蒿蓄,除ANZS,M,N处理中无蒿蓄外,其余处理中均存在蒿蓄,CNKS处理下其重要值最高为0.16,CNZP处理下最低为0.02。从整体来看,豆科植物在ANKP处理下重要值最高,为0.48,在对照组重要值最低,为0.11。在禾本科植物中,所有处理中均存在狗尾草、狼尾草和小画眉草;其中狗尾草重要值在BNZP处理下最高为0.20,BMZP处理下最低为0.10;狼尾草重要值在对照处理中最高为0.36,N处理下最低为0.03;小画眉草重要值在对照处理中最高为0.10,BNKS处理下最低为0.04。从整体来看,禾本科植物在ANKP的处理下重要值最高,为0.89,在N处理下最低,为0.27。除豆科与禾本科外,菊科和蔷薇科物种相对较多。在菊科中,黄蒿重要值最高;在蔷薇科中,菊叶委陵菜的重要值最高。其他科中,各物种重要值相对较小。



注:A为豆科与禾本科播种比例为3:7;B为豆科与禾本科播种比例为5:5;C为豆科与禾本科播种比例为7:3;K为播种行距为30 cm;Z为播种行距为15 cm;S为施8 g/m^{2}氮肥;P为未施肥;CK为对照;M为覆土厚度为20 cm;N为覆土厚度为10 cm。下同。

图1 风电基座下恢复试验地布局

Fig.1 Layout of restoration experiments under each wind turbine foundation

研究区域内草本植物中,主要是一年生植物,共24种,占总种数的50.00%;其次为地面芽植物,共15种,占总种数的31.25%;其余物种为地下芽植物1种,地上芽植物8种(图2)。植物水分生态类型以中生类植物为主,其中,中生植物26种,中旱生植物5种,合计31种,占总种数的64.59%;而旱生植物有6种,旱中生植物有7种,占总种数的27.08%;湿生植物有2种,湿中生植物有2种,占总种数的8.33%(图2)。

2.2 不同恢复措施下物种多样性

通过对播种行距30 cm,15 cm中不同恢复措施下样方的物种多样性进行分析,结果显示,播种行距为30 cm时,在Shannon多样性指数方面,AMKP的多样性指数最高,为2.32,但整体无显著差异,数值变化保持在1.99~2.32;在Simpson优势度指数方面,CNKP,CNKS的优势度指数最高,为0.88,但整体同样无显著差异,数值变化保持在0.82~0.88;在丰富度指数方面,AMKP处理下物种丰富度最高,与ANKP,CK有显著差异,整体数值变化保持在9~15;在Pielou均匀度指数方面,CNKP与CNKS数值最高,均为0.92,与M有显著差异,整体数值变化保持在0.85~0.90。在播种行距为15 cm时,CMZS的Shannon多样性指数、Simpson优势度指数、物种丰富度均为最高,分别为2.42,0.90和14.00,CNZS的Pielou均匀度指数最高,为0.93。综上所述,播种行距为15 cm的处理中,除物种丰富度低于播种行距为30 cm的处理外,其余生物多样性指标均高于播种行距为30 cm的处理。从物种多样性变异指数来看,15 cm

播种行距下的植物群落多样性整体上略高于 30 cm 行距。因此,从物种多样性角度,豆科禾本科播种比例 7∶3,覆土厚度 20 cm,播种行距 15 cm,施氮肥的组合处理为风电场草地适宜补播的恢复模式(图 3)。

表 1　不同恢复措施草地群落主要物种及其重要值(播种行距为 30 cm)

Table 1　Main species and their importance values of grassland community under different restoration measures (with sowing row spacing of 30 cm)

物 种	AMKP	AMKS	ANKP	ANKS	BMKP	BMKS	BNKS	CMKP	CMKS	CNKP	CNKS	M	N	CK
苜蓿	0.26	0.33	0.28	0.27	0.22	0.25	0.28	0.22	0.27	0.2	0.21	0.19	0.27	0
狗尾草	0.14	0.14	0.16	0.14	0.17	0.11	0.11	0.11	0.15	0.14	0.14	0.11	0.15	0.17
狼尾草	0.08	0.16	0.13	0.16	0.07	0.13	0.12	0.12	0.1	0.12	0.10	0.10	0.03	0.36
冰 草	0.11	0.11	0.17	0.10	0.13	0.14	0.15	0.12	0.13	0.11	0.09	0.12	0	0
黄 蒿	0.07	0.07	0	0.14	0.07	0.1	0.06	0.10	0.04	0.13	0.10	0.23	0.24	0.13
无芒雀麦	0.06	0.05	0.09	0.09	0.09	0.06	0.07	0.08	0.11	0.08	0.11	0.05	0	0.12
小画眉草	0.07	0.04	0.07	0.08	0.05	0.06	0.04	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.10
萹 蓄	0.04	0.03	0.10	0	0.06	0.08	0.05	0.04	0.05	0.04	0.16	0	0	0.05
马 唐	0.04	0.06	0.05	0.05	0.07	0.09	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0	0.05
燕 麦	0.06	0.05	0.08	0.07	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.06	0.06	0	0	0
薹草	0.05	0.03	0	0	0	0.03	0	0.07	0	0.07	0	0.08	0.18	0.10
细叶益母草	0	0.07	0	0	0.06	0.08	0	0.10	0.03	0	0	0.08	0.07	0.07
羊 草	0.03	0.05	0.07	0	0.03	0	0.10	0.06	0.05	0.05	0.06	0	0	0
车 前	0.05	0.05	0.06	0.02	0.04	0.04	0	0	0	0	0	0.04	0.07	0.13
野 稷	0.03	0.06	0.07	0.04	0	0.06	0	0	0	0	0.04	0.05	0.03	0.07
灰绿藜	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0	0.02	0.06	0	0.03	0.06	0.03
牻牛儿苗	0.04	0.05	0.02	0	0.02	0.04	0	0	0.03	0.03	0	0.01	0.08	0.04
细叶蓼	0.02	0.01	0	0	0.03	0	0.02	0	0	0.04	0.04	0.02	0.07	0
菊叶委陵菜	0.02	0.02	0	0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0.07	0.06	0.09
鹅绒藤	0.26	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0

注:表中植物及其学名分别为苜蓿(*Medicago sativa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、黄蒿(*Artemisia gmelinii*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、小画眉草(*Eragrostis minor*)、萹蓄(*Polygonum aviculare*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、燕麦(*Avena sativa*)、脚薹草(*Carex pediformis*)、细叶益母草(*Leonurus sibiricus*)、羊草(*Leymus chinensis*)、车前(*Plantago asiatica*)、野稷(*Panicum miliaceum*)、灰绿藜(*Oxybasis glauca*)、牻牛儿苗(*Erodium stephanianum*)、细叶蓼(*Persicaria taquetii*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)。

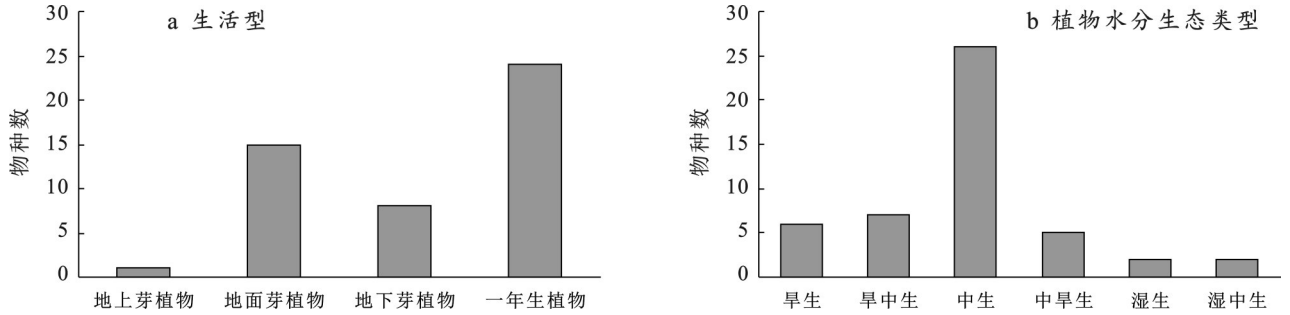


图 2　草地植物 Raunkiaer 生活型谱与水分生态类型

Fig.2　Raunkiaer plant life-form spectrum and water ecological types of grassland

2.3　不同恢复措施下群落生产力

在播种行距为 30 cm 时,BMKS 处理下的平均高度(15.95 cm)、盖度(60.33%)为最高,与 CK,ANKS 有显著差异;BMKS,CNKS 的生物量为最高,分别为 176.19 和 175.16 g,且与 CK,N,BNKS 有显著差异。在播种行距为 15 cm 时,CNZS 处理下的平均高度(15.90 cm)、盖度(61.67%)为最高,且与 CK 有显著差异;CNZP 处理下的生物量最高,为 174.05 g,与 AMZP 有显著差异,其他处理均无显著差异。此外,播种行距 30 cm 的最高生物量高于播种行距为 15 cm 的最高生物量。

从生产力变异系数特征来看,两种播种行距下

的植物群落在平均高度和盖度上表现极为接近,但二者在生物量方面存在关键差异。播种行距15 cm的平均生物量略高于30 cm的生物量,但是其生物量的标准差和变异系数(49.89%,37.45%)均高于30 cm行距(35.83%,28.13%),说明其植物生长不均性更强,产量波动大。播种行距30 cm的生物量,虽然平均生物量稍低,但其变异系数更小。因此,从草地生产力角度来看,豆科禾本科播种比例5∶5,覆土厚度20 cm,播种行距30 cm,施氮肥组合处理为风电场草地最佳恢复模式(图4)。

表2 不同恢复措施草地植物群落主要物种及其重要值(播种行距为15 cm)

Table 2 Main species and their importance values of grassland community under different restoration measures (with sowing row spacing of 15 cm)

物种	AMZP	AMZS	ANZP	ANZS	BMZP	BMZS	BNZP	BNZS	CMZP	CMZS	CNZP	CNZS	M	N	CK
苜蓿	0.21	0.24	0.19	0.22	0.22	0.17	0.18	0.26	0.27	0.16	0.23	0.20	0.19	0.27	0
狗尾草	0.09	0.14	0.13	0.17	0.10	0.14	0.20	0.13	0.11	0.14	0.11	0.14	0.11	0.15	0.17
狼尾草	0.10	0.10	0.11	0.11	0.08	0.11	0.11	0.17	0.11	0.11	0.18	0.11	0.10	0.03	0.36
冰草	0.14	0.10	0.12	0.14	0.15	0.13	0.10	0.15	0.12	0.12	0.10	0.14	0.12	0	0
黄蒿	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09	0.11	0.09	0	0.10	0.05	0.07	0.08	0.23	0.24	0.13
无芒雀麦	0.06	0.05	0.12	0.11	0.08	0.11	0.08	0.11	0.06	0.08	0.08	0.09	0.05	0	0.12
小画眉草	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06	0.10
脚薹草	0	0.04	0.15	0.07	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0	0.06	0	0.08	0.18	0.10
细叶益母草	0.06	0.05	0.04	0	0.10	0.06	0	0.01	0	0.06	0.05	0.05	0.08	0.07	0.07
车前	0	0.03	0.01	0	0.07	0.04	0.05	0	0	0.07	0.05	0.06	0.04	0.07	0.13
萹蓄	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.09	0.04	0.02	0.06	0	0	0.05
燕麦	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.01	0.06	0.05	0.04	0	0	0
马唐	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0	0.05
灰绿藜	0.05	0.03	0	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.06	0.03
野稷	0	0.05	0.04	0	0.02	0	0	0.03	0.05	0	0.04	0.09	0.05	0.03	0.07
菊叶委陵菜	0	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0	0	0	0	0.02	0.10	0.07	0.06	0.09
猪毛菜	0.03	0.02	0.07	0.01	0.05	0.04	0.04	0	0.05	0	0	0.06	0	0.03	0.05
羊草	0.12	0.06	0.04	0	0.04	0.05	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0
二裂委陵菜	0.13	0.03	0.02	0.03	0	0.02	0	0	0.03	0	0.04	0	0.02	0.03	0
细叶蓼	0.03	0.02	0	0	0.02	0.02	0.06	0	0.03	0.03	0.03	0	0.02	0.07	0

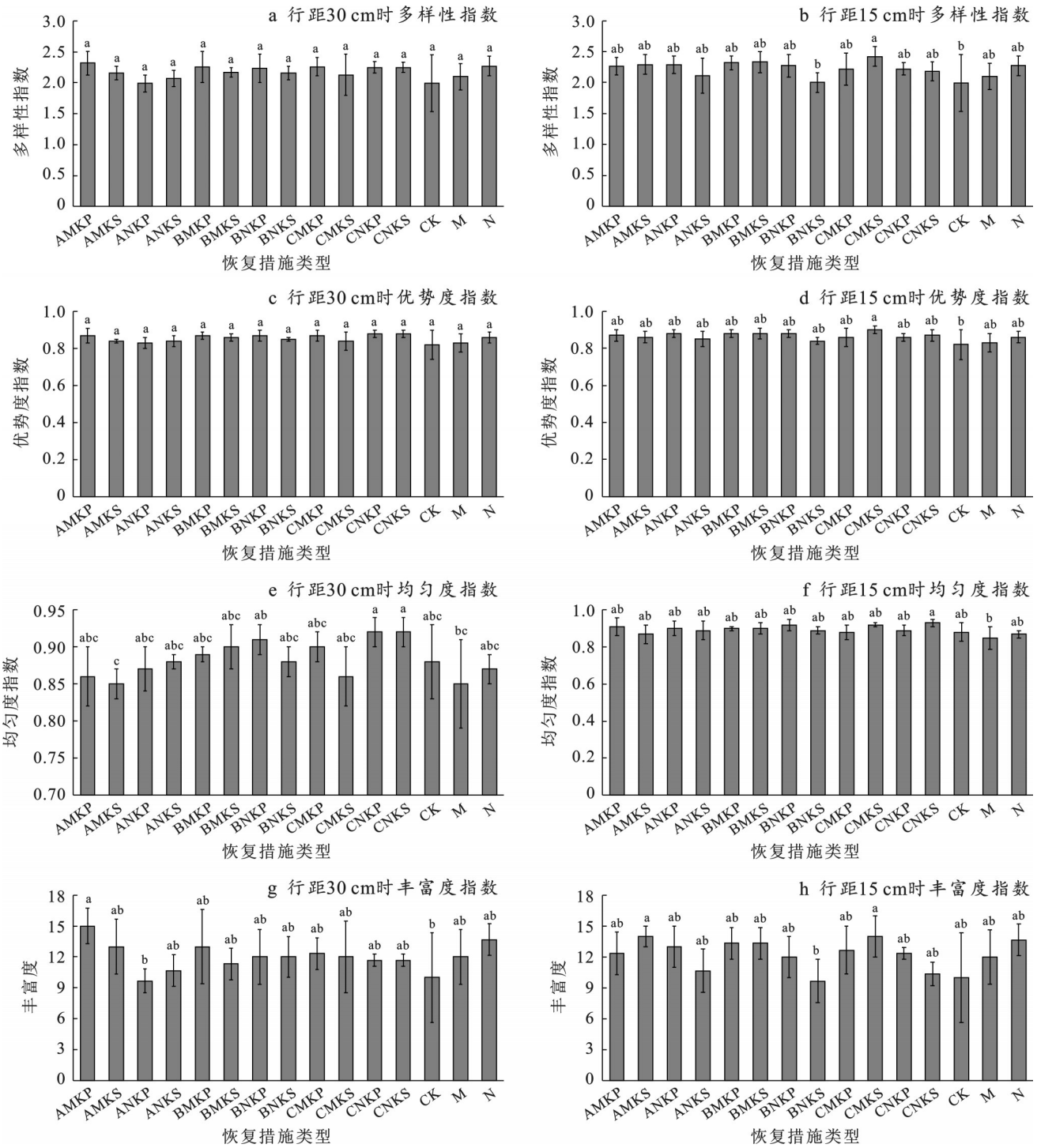
注:表中涉及植物及其学名分别为猪毛菜(*Salsola collina*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)。

3 讨 论

3.1 不同生态恢复措施对退化草地物种组成和物种多样性的促进作用

生态恢复措施组合模式改善了风电场裸露基座下退化草地的物种组成结构。物种丰富度较对照区提升17%,受风电场干扰的样地整体物种多样性水平得到提升。本研究中,覆土20 cm较覆土10 cm更能迅速改良土壤基质,在较短时间内为生态系统恢复创造必要的物理、化学与生物条件[16],这与田曼等[27]的研究结果相似。播种行距15 cm为提高该系统物种多样性的合理配置,有助于提高土壤养分利用效率,增强混播体系的适应能力[28]。辅以施氮肥可增加土壤可利用资源,调节植物竞争强度。豆科禾本科播种比例为7∶3是提高该系统物种多样性的合适比例,主要源于豆科植物具有固氮培肥和改善土壤结构的功能,且较高的豆科比例抑制了禾本科植物的早期竞争优势,避免了单一物种对资源的垄断,为更多物种的共存创造了生态位空间。

现有研究[29-31]表明,施肥、补播、覆土等恢复措施能够通过改善微生境,调节种间竞争,促进物种稳定生长,从而有效提升物种多样性指数,推动退化草地向健康群落恢复。如施肥方式下,大针茅、羊草、糙隐子草植物功能性状对Simpson指数的提高产生积极影响;施有机肥+免耕补播显著增加Shannon-Wiener指数和Pielou指数;在相同补播条件下,覆土措施能够促进草地植被群落恢复,提升Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数。但也有研究认为,单个施肥措施短期内会影响群落高度而不影响物种多样性[32]。本研究中,聚焦补播、施肥与覆土措施相结合,大于单效应,有助于提升草地物种多样性水平。



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

图 3　不同恢复措施下草地植物群落物种多样性水平差异

Fig.3　Differences in species diversity levels of grassland community under different restoration measures

3.2　不同生态恢复措施对退化草地生产力的促进作用

伴随物种组成与多样性的优化,草地生产力也同步提升。本研究显示,豆科禾本科比例5∶5,覆土厚度20 cm,播种行距30 cm并施氮肥下,恢复草地的地上生物量较对照区增加了63.73 g/m^2,生产力提升达56.67%。已有研究表明,不同恢复措施对退化草地生产力提升具有协同作用:补播能迅速恢复植被[33];混播可兼顾生产力和群落稳定性;覆土通过改善土壤结构,提升植被盖度、高度及地上生物量[27];而施肥则是调控物种多样性和提升生物量的有效手段之一[34]。草地生产力与物种多样性最佳恢复措施中不同的处理在于豆科禾本科比例及播种行距,豆禾混播有助于提高草地生产力,这与鲍平安等[35]的

研究结果相似;行距配置可优化植株对光、热、水、肥等资源的利用效率,促进个体与群体的协调发展,从而实现草地产量的最大化,这与郭常英等[28]的研究结论相似。

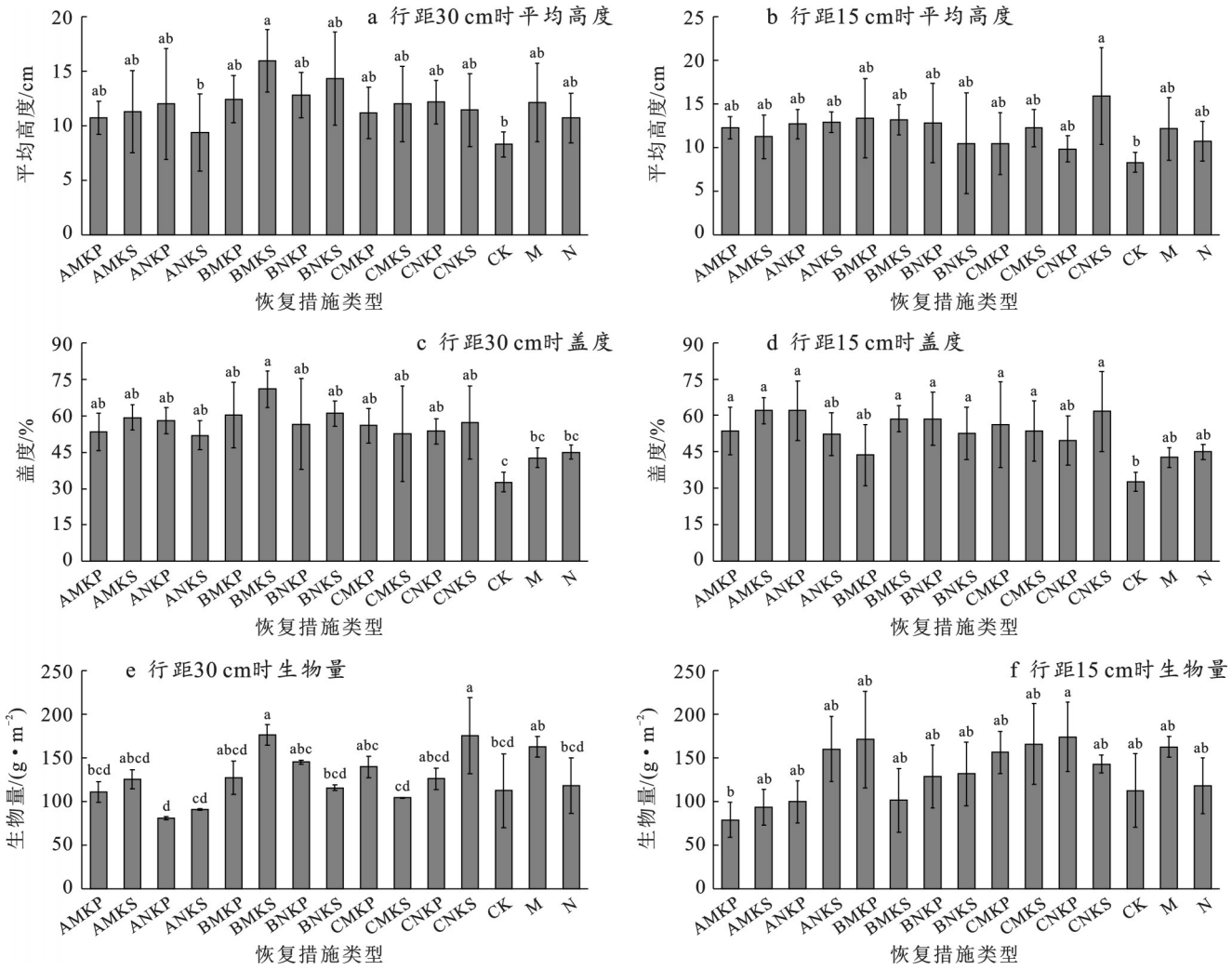


图4 不同恢复措施下生产力差异

Fig.4 Differences in productivity under different restoration measures

此外,相较于单一措施,综合恢复措施不仅能优化群落结构,还能最大限度地协同提升物种多样性与生产力水平。蔡靖等[2]指出,针对不同植被类型风电场建设的恢复措施能够有效促进植被生产力恢复,本研究进一步证实了这一结论,并揭示了在草地风电场中,补播、施肥、覆土组合实施同样能实现生产力的提升,扩展了该恢复措施的适用范围。草地生态系统生产力的稳定性对维持其服务功能至关重要,不仅参与碳循环,支持生物多样性保护和农业生产,还在水源调节、气候调节等方面发挥关键作用。补播、覆土、施肥等综合生态恢复措施,既能直接优化群落结构,又能间接改善环境条件,有助于构建生产力高且稳定性强的草地生态系统。

3.3 风电场生态恢复存在的问题及对策

实施适宜的生态恢复措施对遏制草原退化,促进生态系统整体恢复具有重要贡献。当前风电场退化草地的生态恢复实践已取得一定进展,但整体成效仍面临多重挑战。在本试验中,受研究周期所限,仅监测了恢复措施实施后第二年的植被生长情况,无法反映长期演替变化和恢复效果。如果缺乏持续有效的后期管护机制,恢复区域在放牧、人为踩踏等干扰下,生态恢复成果将难以巩固,陷入“边恢复,边退化”的困境。此外,现有恢复技术多为单一手段的叠加,尚未形成能够系统应对风电场低温、强风、土壤贫瘠等特殊环境条件的集成化技术体系,这严重制约着风电场恢复实践。

针对上述问题,为进一步提升风电场退化草地生态恢复的长期效益和推广可行性,建议在后续研究与实践中对恢复区域进行连续多年的系统监测,重点关注植被群落演替、土壤理化性质及生态功能

恢复进程。通过构建“监测—评估—反馈”的动态研究体系,为巩固生态恢复效果提供科学依据。针对后期养护的问题,建立长效管护机制,实施硬性管控即严格执行分区禁牧、轮牧与专人巡查制度,结合“宣传引导”即强化对牧民的生态教育,构筑起减少人为干扰的双重防线。针对恢复技术多为单一手段的情况,构建集成化恢复技术体系,整合微生境改良,乡土物种筛选,后期监测等技术,形成适配风电场生境的标准化恢复流程,降低推广难度。通过上述针对性对策,可有效解决风电场生态恢复中的关键问题,实现修复成果的长期稳定,推动风电场建设运行与草地生态系统的协调发展。未来研究可进一步聚焦恢复措施的长期效益监测,为风电场及同类工程区的生态恢复提供更科学的理论支撑和实践参考。

4　结　论

随着风电这一清洁能源的规模化发展,如何在保障绿色电力稳定供给的同时,守护并恢复风电场区及其周边的生态系统,已成为制约行业可持续发展的核心课题。在风电场推进有针对性的生态恢复工作,不仅是实现从风电场建设“生态影响减缓”到“生态价值增益”的关键跃迁,更是人工恢复技术与自然演替规律深度融合的实践探索,为未来草地风电场成为“清洁能源生产”与“生态功能提升”协同共生的典范提供基础支撑。研究区共记录植物 48 种,分属 20 科 41 属,表明在不同恢复措施处理下,风电场草地生态系统成功构建了物种萌发与生长所需的微环境,具备了恢复物种多样性的基础。从草地生产力角度,豆科禾本科播种比例 5∶5,覆土厚度 20 cm,播种行距 30 cm,施氮肥组合处理为风电场草地最佳恢复模式;从物种多样性角度,豆科禾本科播种比例 7∶3,覆土厚度 20 cm,播种行距 15 cm,施氮肥的组合处理为风电场草地适宜补播的恢复模式。因覆土成本高于种子成本,从经济成本角度考虑,豆科禾本科播种比例 7∶3,覆土厚度 10 cm,播种行距 15 cm,施氮肥组合处理是仅次于草地生产力最佳模式的恢复组合。然而,由于不同风电场显著的地理区位差异,以及本研究时间有限,适宜多数风电场推广应用的生态恢复模式仍有待进一步研发,未来需要有针对性地开展连续性的生态监测,便于掌握生态恢复的长期动态变化,为制定风电场生态恢复方案提供科学依据。

参考文献(References)

[1] Foley Aoife M, Leahy Paul G, Marvuglia Antonino, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. Renewable Energy, 2012,37(1):1-8.

[2] 蔡靖,张雅娴,项潇智,等.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[J].生态学报,2025,45(24):12373-12383.
Cai Jing, Zhang Yaxian, Xiang Xiaozhi, et al. Influence and driving mechanism of wind power construction on vegetation carbon sequestration capacity in Xilingol area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(24):12373-12383.

[3] 胡春成.风力发电发展现状以及行业发展浅谈[J].科技创新与生产力,2023,44(3):55-57.
Hu Chuncheng. Brief discussion on the wind power generation development status and industry development [J]. Taiyuan Science and Technology, 2023,44(3):55-57.

[4] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024 [EB/OL]. (2024-04-16)[2026-08-20]. https://gwec.net/global-wind-report-2024/.

[5] 王焜平.风电场建设对周边生态环境的影响及其恢复措施[J].环境保护科学,2015,41(2):105-108.
Wang Kunping. Impacts of wind farm construction on the surrounding environment and restoration measures [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41 (2): 105-108.

[6] Zajamšek Branko, Hansen Kristy L, Doolan Con J, et al. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016,370:176-190.

[7] 周原庆.风力发电系统对生态环境的影响评估与应对措施[J].中国资源综合利用,2025,43(3):190-192.
Zhou Yuanqing. Assessment and response measures of the impact of wind power generation system on the ecological environment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025,43(3):190-192.

[8] Saidur R, Rahim N A, Islam M R, et al. Environmental impact of wind energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(5):2423-2430.

[9] Balog Irena, Ruti Paolo M, Tobin Isabelle, et al. A numerical approach for planning offshore wind farms from regional to local scales over the Mediterranean [J]. Renewable Energy, 2016,85:395-405.

[10] 彭波,苏旭芳.丘陵地区某风电场建设存在问题与对策研究[J].四川环境,2022,41(6):305-311.
Peng Bo, Su Xufang. Research on problems and countermeasures of a wind farm construction in hilly area [J]. Sichuan Environment, 2022,41(6):305-311.

[11] 梅毓雨.风电场基建工程与边坡生态修复的推广与应用[J].电工技术,2023(增刊1):77-79.
Mei Yuyu. Extension and application of wind farm infra-

structure engineering and slope ecological restoration [J]. Electric Engineering, 2023(S1):77-79.

[12] 昂格力玛,周丹丹,乌兰图雅,等.风电场建设运营对荒漠草原区景观格局的影响[J].西北林学院学报,2026,41(1):255-264.
Anggelima, Zhou Dandan, Wulantuya, et al. Impact of wind farm construction on desert steppe landscape patterns [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2026,41(1):255-264.

[13] 刘静文,刘辉,吴唯科.高海拔风电场植被恢复及关键技术研究[J].中国水土保持,2021(8):33-34.
Liu Jingwen, Liu Hui, Wu Weike. Vegetation restoration and key technologies of high altitude wind farm [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(8):33-34.

[14] 李志国,徐昔保,李景宜,等.生态修复研究进展与展望[J].环境生态学,2024,6(1):103-110.
Li Zhiguo, Xu Xibao, Li Jingyi, et al. Research progress and prospect of ecological restoration [J]. Environmental Ecology, 2024,6(1):103-110.

[15] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, et al. Combatting global grassland degradation [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,2(10):720-735.

[16] 王宗松,姜丽丽,汪诗平,等.草地退化恢复评估方法述评[J].生态学报,2022,42(16):6464-6473.
Wang Zongsong, Jiang Lili, Wang Shiping, et al. Assessment methods for grassland restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(16):6464-6473.

[17] 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.

[18] Zhao Xuancheng, Li Fengshi, Yuan Yuan , et al. Wind farms reduce grassland plant community diversity and lead to plant community convergence [J]. BMC Ecology and Evolution, 2025,25:10.

[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 Songyao, Chen Long, Teng Zeyu, et al. Vegetation changes in wind farm in desert steppe region [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(2):186-192.

[20] 唐华俊,辛晓平,李凌浩,等.北方草甸退化草地治理技术与示范[J].生态学报,2016,36(22):7034-7039.
Tang Huajun, Xin Xiaoping, Li Linghao, et al. North meadow degraded grassland treatment technology and demonstration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22):7034-7039.

[21] 贺金生,刘志鹏,姚拓,等.青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J].科技导报,2020,38(17):66-80.
He Jinsheng, Liu Zhipeng, Yao Tuo, et al. Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau [J]. Science & Technology Review, 2020,38(17):66-80.

[22] 蒋胜竞,冯天骄,刘国华,等.草地生态修复技术应用的文献计量分析[J].草业科学,2020,37(4):685-702.
Jiang Shengjing, Feng Tianjiao, Liu Guohua, et al. A bibliometric analysis of the application of grassland ecological restoration technology [J]. Pratacultural Science, 2020,37(4):685-702.

[23] 仝淑萍,苗彦军,边步云,等.不同恢复措施对藏北草地群落生产力和多样性影响的研究[J].草地学报,2018,26(5):1078-1083.
Tong Shuping, Miao Yanjun, Bian Buyun, et al. Effects of different restoration measures on productivity and diversity of grassland communities in northern Tibet [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018,26(5):1078-1083.

[24] 李健萍.草原深处崛起百万千瓦级风电大基地[N].人民日报,2023-02-13.
Li Jianping. A million kilowattwind power base is rising deep in the grassland [N]. People's Daily.2023-02-13

[25] 宝音陶格涛.不同改良措施下退化羊草(*Leymus chinensis*)草原群落恢复演替规律研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.
Baoyintaogetao. The study on dynamic succession of community in degraded steppe of *Leymus chinensis* after different improvement measures [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2009.

[26] 宋永昌.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2001.
Song Yongchang. Vegetation Ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.

[27] 田曼,严成,周静.覆土厚度对受损河滩草地群落特征的影响[J].草业科学,2019,36(9):2193-2200.
Tian Man, Yan Cheng, Zhou Jing. Influence of varying cover-soil thickness on the restoration of degraded riparian grassland [J]. Pratacultural Science, 2019,36(9):2193-2200.

[28] 郭常英,王伟,蒲小剑,等.播种方式和行距对燕麦/饲用豌豆混播草地生产性能及种间关系的影响[J].草地学报,2022,30(9):2483-2491.
Guo Changying, Wang Wei, Pu Xiaojian, et al. Effects of sowing method and row spacing on production performance and interspecific relationship of oat/forage pea mixed grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9):2483-2491.

[29] 段成伟,李希来,柴瑜,等.不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J].生态学报,2022,42(18):7652-7662.
Duan Chengwei, Li Xilai, Chai Yu, et al. Effects of dif-

ference, 2026, 43(5): 1232-1241.

[33] 刘海强,李世雄,赵文,等.免耕补播对中度退化草地植被及土壤细菌群落特征的影响[J].草地学报,2025,33(10):3280-3290.
Liu Haiqiang, Li Shixiong, Zhao Wen, et al. Effects of No-tillage reseeding on community characteristics of vegetation and microorganisms in moderately degraded alpine meadows [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(10):3280-3290.

[34] 李希来,马昀峤,段成伟,等.施肥和补播对不同坡向斑块化退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响[J].中国草地学报,2024,46(5):1-13.
Li Xilai, Ma Yunqiao, Duan Chengwei, et al. Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024,46(5):1-13.

[35] 鲍平安,文志林,王炎,等.不同牧草补播模式对荒漠草原植物群落结构及土壤特性的影响[J].草业学报,2025,34(10):62-73.
Bao Pingan, Wen Zhilin, Wang Yan, et al. Effects of different forage reseeding patterns on plant community structure and soil characteristics in desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(10):62-73.

(上接第 9 页)

[26] 唐远.菱镁矿选择性捕收剂设计优选及作用机理研究[D].辽宁 沈阳:东北大学,2021.
Tang Yuan. Molecular design and interacting mechanisms of selective collectors for magnesite [D]. Shenyang, Liaoning: Northeastern University, 2021.

[27] 罗雪娇.苏打盐碱土壤黏粒分散特征及阻控研究[D].黑龙江 哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2024.
Luo Xuejiao. Research on clay dispersion characteristicsand amelioration process in saline-sodic soils [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2024.

[28] Lei Sihong, Jia Xiaoxu, Zhao Chunlei, et al. A review of saline-alkali soil improvements in China: Efforts and their impacts on soil properties [J]. Agricultural Water Management, 2025,317:109617.

[29] 崔翔.灌水施氮对西辽河灌区盐碱耕地土壤特性及玉米产量的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Cui Xiang. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on soil characteristics and maize yield in saline-alkali farmland in Xiliaohe irrigation area [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[30] Yan Sihui, Chen Haorui, Chang Xiaomin, et al. Investigating periodic variations of salt-affected soil distribution from the perspective of salt absorption and migration pathway shifts induced by salt discharge zone [J]. Geoderma, 2026,467:117750.

[31] 王凡.生物炭与木醋液复配对盐渍化农田作物生长及水土环境影响试验研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
Wang Fan. Study on the influence of water and soil environment and crop growth of the salinized farmland treated by the biochar with wood vinegar [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.

[32] 陈聪.盐碱地微生物改良剂动态施用对玉米生长和产量影响的试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2024.
Chen Cong. Experimental study on the effect of dynamic application of microbial modifier on maize growth and yield in saline-alkali soil [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024.