基于DFA-灰色聚类模型的亚高山草甸风电场土地损毁评价

刘梓欣[1], 杨慧杰[1], 金千晖[1],
廖一倩[1], 尹 菁[1], 陈平平[2], 张耿杰[1,3,4], 张辅霞[4]
(1.云南农业大学 资源与环境学院 云南省耕地培育与产能提升重点实验室, 云南 昆明 650201; 2.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 3.云南农业大学 教务处, 云南 昆明 650201; 4.云南农业大学 云南省智慧环境国际联合研发中心, 云南 昆明 650201)

摘 要: [目的]构建亚高山草甸风电场土地损毁评价模型并开展实证研究,以期为该区域和其他风电场建设项目土地损毁区域的精准识别和评价提供理论依据和技术参考。[方法]以位于云南省寻甸县高本山的亚高山草甸风电场为例,选取17个评价指标(土壤要素10个、损毁要素7个),基于Delphi-Fuzzy-AHP(以下简称为DFA)方法确定指标权重,并结合灰色聚类法建立可能度函数,通过观测值计算7个评价单元(一期风机区2个,二期风机区2个,弃渣场,采石场,原地貌)的可能度函数值,最终通过比较系数大小,确定各评价单元的土地损毁程度分级。[结果]①损毁要素权重(0.642 0)显著高于土壤要素(0.358 0);损毁要素核心因子为损毁面坡长(0.183 2)与植被覆盖度(0.167 6),反映其对工程安全与水土流失的直接影响;土壤要素中土壤容重(0.069 5)与有机质含量(0.050 4)权重最高,主因是施工导致土壤结构变化与肥力下降。②灰色聚类评价显示,一期工程损毁程度为中度(Ⅲ级),二期风机区为极强度(Ⅴ级),弃渣场为强度(Ⅳ级),采石场为剧烈(Ⅵ级),原地貌为轻度(Ⅱ级)。③损毁程度差异源于施工扰动强度与修复周期:一期工程因表层土壤保存与自然恢复时间长,生态修复效果较好;二期工程扰动面积大且竣工时间短,植被恢复滞后。[结论]目前,该风电场建设土地损毁较为严重,其土地损毁以施工扰动为主导,损毁要素的高权重凸显其对工程安全与生态风险的重要性。研究结果也验证了DFA-灰色聚类模型在风电场生态修复与管理中的适用性。

关键词: 风电场; 亚高山草甸; 土地损毁评价; Delphi-Fuzzy-AHP(DFA); 灰色聚类法
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0235-12 **中图分类号:** X82, X171.1

文献参数: 刘梓欣, 杨慧杰, 金千晖, 等.基于DFA-灰色聚类模型的亚高山草甸风电场土地损毁评价[J].水土保持通报,2026,46(3):235-246. Liu Zixin, Yang Huijie, Jin Qianhui, et al. Land damage assessment of a subalpine meadow wind farm based on DFA-gray clustering model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(3):235-246.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.019 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.019**

Land damage assessment of a subalpine meadow wind farm based on DFA-gray clustering model

Liu Zixin[1], Yang Huijie[1], Jin Qianhui[1], Liao Yiqian[1],
Yin Jing[1], Chen Pingping[2], Zhang Gengjie[1,3,4], Zhang Fuxia[4]
(1.*Key Laboratory for Improving Quality and Productivity of Arable Land of Yunnan Province, College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan* 650201, *China*; 2.*Kunming Engineering Corporation Limited, PowerChina, Kunming, Yunnan* 650051, *China*; 3.*Academic Affairs Office of Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan* 650201, *China*; 4.*Yunnan Provincial International Joint Research Centre for Smart Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan* 650201, *China*)

收稿日期:2025-10-17 **修回日期:**2025-12-08 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:云南省水利科技项目"亚高山草甸植被及工程扰动影响研究"(2023BG204001-01); 国家重点研发计划(2024YFD1700104); "云南省兴滇英才支持计划"青年人才(YNWR-QNBJ-2018-338); 云南省教育厅项目(2022J0300)
第一作者:刘梓欣(2000—),女(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,研究方向为土地损毁评价与修复。Email:2023210266@stu.ynau.edu.cn。
通信作者:张耿杰(1983—),男(苗族),重庆市人,博士,副教授,主要从事土地整治与生态评价方面的研究。Email:jiegeng@ynau.edu.cn。

Abstract: [Objective] A land damage assessment model for subalpine meadow wind farms was developed, and empirical research was conducted in order to provide a theoretical basis and technical reference for the precise identification and evaluation of land damage areas in this area and other wind farm construction projects. [Methods] A subalpine meadow wind farm located on Gaoben Mountain in Xundian County, Yunnan Province, was taken as an example. Seventeen evaluation indicators (10 soil-related and 7 damage-related) were selected. The indicator weights were determined using the Delphi-Fuzzy-AHP (hereafter referred to as DFA) method. A possibility function was established by integrating it with the grey clustering method. Observed values were used to calculate the possibility function values of seven evaluation units (two units in the phase Ⅰ wind turbine zone, two units in the phase Ⅱ wind turbine zone, a waste dump, a quarry and the original topography). Finally, by comparing the magnitude of the coefficients, the land damage severity grades for each evaluation unit were determined. [Results] ① The weight of damage factors (0.642 0) was significantly higher than that of soil factors (0.358 0). The core damage factors were slope length of the damaged surface (0.183 2) and vegetation coverage (0.167 6), reflecting their direct influence on engineering safety and soil erosion. Among soil factors, soil bulk density (0.069 5) and organic matter content (0.050 4) had the highest weights, mainly due to soil structure change and fertility decline caused by construction disturbance. ② Grey clustering evaluation showed that the damage degree of the phase Ⅰ wind turbine zone was moderate (grade Ⅲ), that of the phase Ⅱ wind turbine zone was very strong (grade Ⅴ), that of the waste dump was strong (grade Ⅳ), that of the quarry was severe (grade Ⅵ), and that of the original topography was light (grade Ⅱ). ③ The difference in land damage degree resulted from construction disturbance intensity and restoration cycle. The phase Ⅰ project achieved better ecological restoration because surface soil was preserved and natural recovery time was longer, whereas the phase Ⅱ project involved a larger disturbance area and a shorter time since completion, resulting in delayed vegetation recovery. [Conclusion] Currently, land damage caused by wind farm construction is relatively serious, and the damage is dominated by construction disturbance. The high weights of damage factors highlight their importance for engineering safety and ecological risk. The results also verify the applicability of the DFA-grey clustering model in ecological restoration and management of wind farms.

Keywords: **wind farm; subalpine meadow; land damage assessment; Delphi-Fuzzy-AHP (DFA); grey clustering method**

中国风力发电领域在过去10 a呈现出强劲增长趋势。尤其是在“双碳”目标驱动下,中国陆上风电不仅成为能源转型的核心力量,更以技术创新、规模效应和全产业链优势,重塑全球新能源竞争格局。数据显示,截至2024年全国陆上风电累计装机容量突破5.20×10^8 kW,占全球总装机的45%以上,年发电量超1.10×10^{12} kW·h,相当于减少二氧化碳排放9.00×10^8 t。同时,陆上风电场因建设与运营过程中对区域自然可持续发展的影响也愈发受到重视,有关陆上风电场对环境影响的研究近年来逐渐增多。赵珍伟[1]对山西北部某风电场的地表植被研究,发现施工期和运营期对植被的影响呈现阶段性差异,不仅加大了风场范围内生境破碎化程度,且对草灌生态系统的影响范围达两侧100 m;谢嘉炜等[2]研究发现连州风电场建设对周边土壤物理性质影响显著,施工活动导致土壤结构破坏,容重增加,孔隙度降低,进而影响土壤保水保肥能力;张力琛等[3]的研究表明,将军山风电场施工活动显著改变了土壤物理性质(如容重增加、孔隙度降低)和化学性质(有机质及氮磷钾含量下降),并导致植被覆盖度短期降低;Li Lin等[4]以湖南临湘风电场为例,发现建设初期植被覆盖指数(FVC)降低,土壤有机碳、总氮等养分含量显著下降,尤其在靠近涡轮机的区域,表明施工对土壤肥力有负面影响。陆上风电场建设期间对生态环境造成的破坏已成为普遍共识。然而,目前对于风电场对土地损毁的量化与评估方法工作尚显不足。例如,怎样精准量化土地占用导致的损毁,怎样构建兼顾生态功能与空间结构的综合评估体系。这不仅影响了生态补偿政策的有效实施,也对后期生态修复技术的选择与应用以及恢复效果的评估产生了不利影响。

当前针对土地评价已有很多相关模型。国内外学者多采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)[5]、PSR模型(压力-状态-响应)[6]、灰色聚类法(grey clustering method)[7]、模糊综合评价法等[8]确定

权重及量化指标等级。其中,AHP法作为确定因子权重值的基础方法能够与其他方法或模型结合,从而增加评价结果的可靠性。例如,唐志敏等利用AHP-TOPSIS模型综合评价富硒土地资源的适宜性[9]。Makar等[10]提出的参数化AHP结合GIS,通过土地参数(坡度、盐度等)评级提升小麦种植适宜性评估精度。PSR模型强调三者的因果链,压力导致状态变化,状态信息又引发社会响应,而响应措施反过来影响压力,形成一个动态循环。如罗鹏等[11]基于PSR模型构建压力-状态-响应指标体系,对2011—2021年黄河流域甘肃段的生态系统健康状况进行了评价与趋势预测。灰色聚类法的核心在于基于灰色系统理论,将观测指标按灰类进行归纳,以判断其所属类别。如Zhang Lindan等[12]结合主成分分析与灰色聚类方法,对长江经济带11省(市)森林生态安全水平进行分类评价,并推广至土地生态安全评价。模糊综合评价法通过运用模糊数学的隶属度理论,将模糊的、难以量化的评价转化为定量的评价。如郝杰等[13]利用模糊综合评价法对矿山地质环境修复难度进行分区评价,为露天石灰岩矿山地质环境修复难度评价及分区治理提供参考。

现行评估模型可为工程建设土地损毁评估提供系统方法,该方法是在“土地损毁→生态补偿+生态修复”的框架下,对土地利用与管理研究的深化[14-17]。然而,从“土壤+损毁”要素出发,针对风电场建设所引发的土地影响评价的研究相对匮乏,相关理论基础尚显薄弱。

亚高山草甸作为云南省绿色生态屏障的核心要素,在维系区域生物多样性及保障生态系统稳定方面发挥着不可替代的作用,亚高山草甸多分布于海拔2 500～4 000 m的山脊或开阔台地,受季风和地形加速效应影响,年均风速常达6.5 m/s以上,风功率密度超过200 W/m^2,具备良好的风电场开发基础。但随着近年风电开发项目不断增加,工程建设扰动导致亚高山草甸原生植被破坏,土壤肥力下降等土地损毁状况日趋严重。本研究以云南省昆明市寻甸县金源乡的亚高山草甸风电场为主要研究区域,结合AHP法与灰色聚类法,从“土壤+损毁”要素角度构建土地损毁评价模型并开展实证研究,以期为其他风电场建设项目精准识别土地损毁区域提供理论依据和技术参考。

1　研究区概况

该区域地貌属滇东高原盆地区之曲靖喀斯特高原盆地亚区,工程区处在Ⅱ级剥夷面上,为构造剥蚀地貌单元之中切割中山缓坡区。风电场位于云南省昆明市寻甸回族彝族自治县以西,距寻甸县城约32 km,工程布置于寻甸县西部近南北走向的山梁上,高本山至小湾垭之间,海拔在2 700～3 200 m,地形坡度约5°～20°,无较大规模的滑坡、泥石流、崩塌等不良地质现象。该区域属低纬高原季风气候,冬春季干旱少雨,夏秋季多雨,5—10月为雨季,11月至次年4月为旱季,年均温度14～15.2 ℃,极端高温35 ℃,极端低温－13.9 ℃,平均降雨量为1 045 mm,多年平均蒸发量1 957.5 mm,雨季占全年降水量的80%以上。年平均风速8.64～9.65 m/s,常年主导风向为S(南风),其次是SW(西南风)。其植被类型属亚高山草甸,地表覆盖以裸石地、稀疏灌木林地及草地为主,记录有维管束植物75科,172属,202种。该区域土壤类型为棕壤及亚高山草甸土,风电场建设运营过程中对土地的主要损毁类型为压占与挖损。即风机平台、道路和弃渣排土场为压占,道路边坡与采石场为挖损。风电场的建设分为两个阶段。一期工程主要包括1—19号风机机组区、1—4号弃渣场,以及集电线路区、道路工程区、升压站区和施工生产生活区等关键设施。二期工程则完成了剩余的14台风机等建设项目设施。整个风电场共安装33台单机容量为1 500 kW的风电机组,并配套建设一座220 kV升压站,主变压器的初选容量为2.00×150 MVA。据估算,该风电场的年上网电量可达1.24×10^8 kW·h,平均每台风机的年上网电量为3.77×10^6 kW·h。年等效满负荷小时数为2 511 h,容量系数为0.29。项目占地总面积74.48 hm^2,其中,永久占地面积为23.56 hm^2,临时占地面积为50.92 hm^2,占地类型主要有草地、林地和其他用地(裸地及裸岩)。

2　研究方法

2.1　理论框架

风电场作为典型的分布式能源工程,多建于偏远地区,涉及分散的风机点位及集电线路、检修道路等线性工程,其建设与运营过程对土地和土壤产生显著影响。建设阶段可分为道路施工与设备安装。道路施工涉及开挖、平整及采石等作业,导致原地貌土地被挖掘与占用;设备安装则需重塑风机点位地貌,构建安装平台,进一步造成土地形态改变与占用。施工机械作业破坏土壤结构,降低稳定性与保水能力,加剧水土流失,同时可能因油污和废弃物造成污染(图1)。

风电场运营期间,负面影响主要来自机组运行产生的噪声、电磁辐射及振动,可能干扰植物生长、

影响土壤稳定性，并加剧养分流失；此外，维护活动仍可能带来污染与土地占用。但可通过“人工＋自然”相结合的生态措施进行修复。如恢复边坡与平台植被，可有效减轻侵蚀，提升生物多样性。因此，运营期土地质量的变化取决于负面干扰与生态修复之间的耦合协调作用，二者共同决定生态恢复成效。综上所述，在构建土地损毁评价模型时，以土地挖损和压占为出发点，从土壤要素和损毁要素两个方面筛选评价因子。从时空两个角度选择评价样地，即在时间上分为原地貌阶段、施工阶段和投入运营阶段，其中原地貌阶段是以空间换时间的方式确定；空间上是以土地利用覆盖确定，即以风机平台、弃渣排土场和原地貌为评价单元，具体研究流程如图2所示。

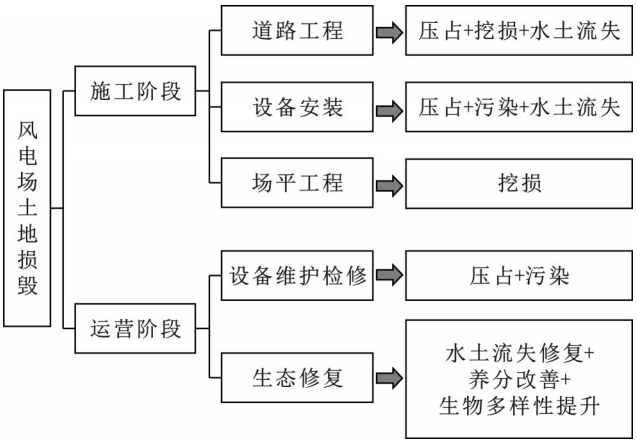


图1 风电场土地损毁理论框架

Fig.1 Theoretical framework of land damage in wind farm

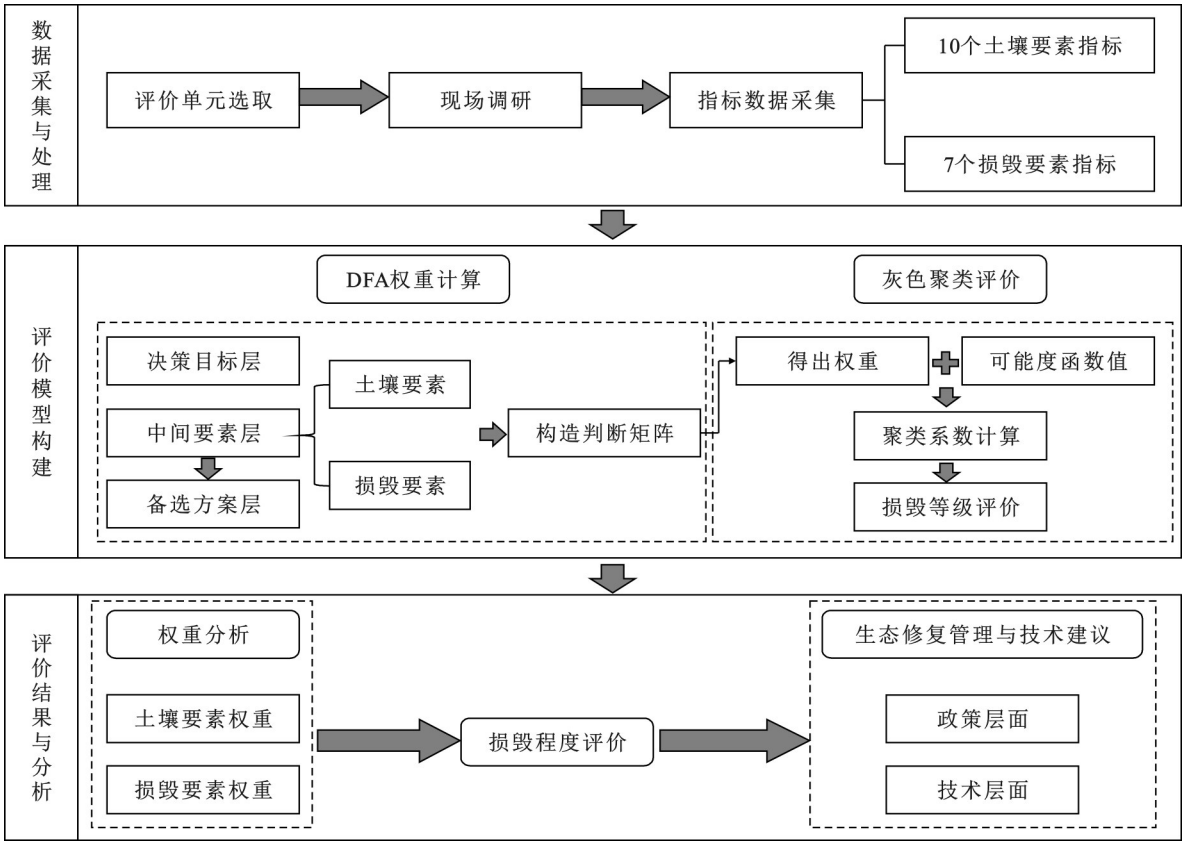


图2 风电场土地损毁评价流程示意图

Fig.2 Flowchart of land damage assessment of a subalpine meadow wind farm

2.2 数据来源与处理

本研究的评价单元布设采用典型样地法，依据代表性原则、控制性原则、随机性原则与简单、易实现原则[18]从不同土地利用阶段及不同土地利用类型两个方面进行评价单元选取，最终确定一期建设工程两个风机组平台（2011年11月竣工）损毁地貌、二期建设工程两个风机组平台（2022年8月竣工）损毁地貌、弃渣排土场地貌、采石场损毁地貌和原地貌未损毁土地（等同于土地本底状况）共7个评价单元（图3），野外采样时间为2024年6月中旬。这些评价单元系统性地覆盖了风电场建设与运营的所有关键阶段（如原始状态、施工期、稳定运营期）及所有主要的土地利用与损毁类型（如风机平台、道路、自然恢复区）。

各评价单元经纬度、海拔高度及所属期数详见表1。

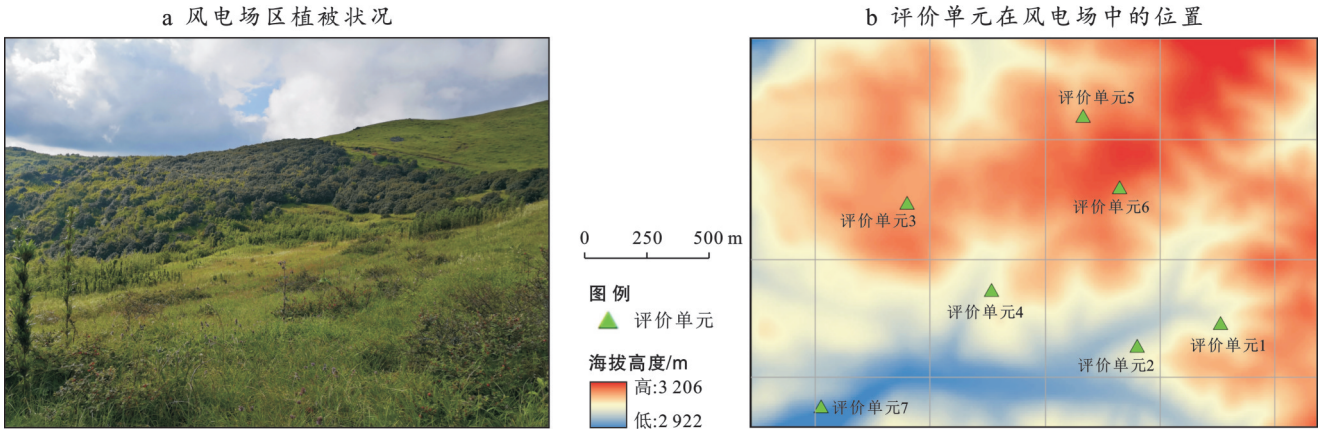


图 3　风电场植被状况及评价单元位置

Fig.3　Vegetation of wind farm and location of evaluation units

收集风电场地理位置、建设规模等关键信息,查询并借鉴国内外基于实地调查构建的植被生态质量和土地质量综合评价研究体系[19-20]。结合指标选取的可操作性、代表性、唯一性等原则,构建综合土地损毁程度和损毁因子的风电场建设工程评价指标体系,并根据风电场的具体情况进行调整和优化,将准则层分为土壤要素与损毁要素。

土壤要素中的方案层包含土壤容重、全N含量、全P含量、全K含量、水解性氮含量、有效磷含量、速效钾含量、土壤有机质含量、pH值和石油烃含量共10个指标;损毁要素中的方案层包含植被高度、植被覆盖度、生物多样性指数、细沟宽度、细沟深度、损毁面坡长和平均侵蚀模数共7个指标(如图4所示)。

其中土壤要素各指标因子按照梅花形布点法采集样品,样地优先布设在工程建设扰动区域及邻近区域,选取各评价单元周边的草地、裸地等不同地表覆盖类型进行样品采集,并在每个采样点采用混合采样,将混合样品充分混匀,按四分法取舍,保留足量样品检测。取土深度0—20 cm,各评价单元样点间距10—30 m;损毁要素中植被相关指标因子采用样方法测量特定区域内植物数目及个体数,草本植物样方面积为1~4 m^2,灌木样方面积为16~40 m^2;细沟宽度及深度采用现场调查;遥感影像(分辨率10 m)、DEM数字高程数据(分辨率12.5 m)获取自地理空间数据云平台(http://www.gs-cloud.cn/);降雨侵蚀力因子、土壤侵蚀力因子获取自中国科学院资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)。

表 1　风电场建设土地损毁评价单元

Table 1　Evaluation units for land damage assessment of wind farm construction

序号	评价单元位置	经纬度	海拔高度/m	所属建设期数
1	2号风机	25°50′22″N,103°11′23″E	3 097.0	一期
2	4号风机	25°50′19″N,103°11′12″E	2 978.4	一期
3	23号风机	25°50′37″N,103°10′42″E	3 096.8	二期
4	25号风机	25°50′26″N,103°10′53″E	2 987.3	二期
5	弃渣排土场	25°50′48″N,103°11′5″E	2 987.6	二期
6	采石场	25°50′39″ N,103°11′09″E	3 005.5	
7	原地貌	25°50′12″N,103°10′31″E	3 056.4	

各指标因子测定方法参考以下国家标准及行业标准,并根据风电场所在亚高山草甸的生态环境选取合适的测算方法:《土壤检测:土壤容重的测定(NY/T 1121.4—2006)》《土壤检测:土壤pH值的测定(NY/T 1121.2—2006)》《土壤检测:土壤有机质的测定(NY/T 1121.24—2012)》《土壤检测:土壤全氮的测定·自动定氮仪法(NY/T 1121.24—2012)》《土壤检测:土壤有效磷的测定·连续流动分析仪法(NY/T 1121.25—2012)》《土壤质量·基于风险的石油烃:用气相色谱法(静态顶空法)测定挥发性石油烃的脂肪族和芳香族馏分(ISO 16558—1:2015/Amd1:2020)》《第三次全国土壤普查养分分级标准》《林地分等定级规程(TD/T 1106—2025)》《草地分等定级规程(TD/T 1108—2025)》《天然草地退化、

沙化、盐渍化的分级指标(GB 19377—2003)》《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》《高寒草甸中、轻度退化草地植被恢复技术规程(DB63/T 608—2006)》《退化高寒山坡草地生态恢复效果评价(DB63/T 2038—2022)》《土壤环境质量标准(GB 15618—2008)》《区域生物多样性评价标准(HJ 623—2011)》。

为方便数据统一计算,将风电场建设土地损毁评价各指标因子数值划分为6个级别。表2为风电场土地建设损毁评价指标体系。

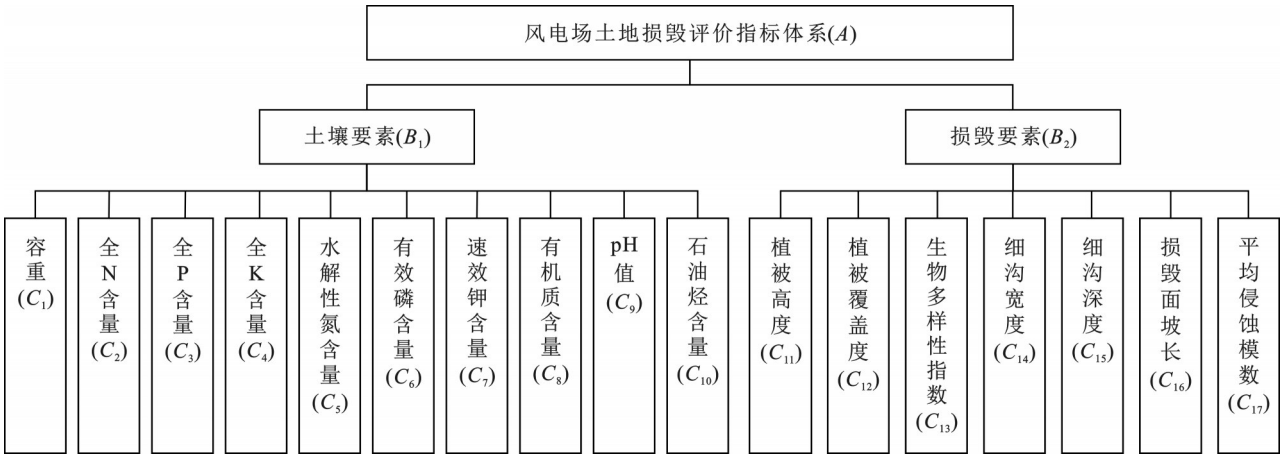


图4 风电场建设土地损毁评价指标

Fig.4 Indicators for land damage assessment of wind farm construction

表2 风电场土地建设损毁评价指标体系

Table 2 Indicator system for land damage assessment of wind farm construction

指标因子	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	Ⅵ级
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.2~1.3	1.1~1.2或1.3~1.4	1.0~1.1或1.4~1.5	0.9~1.0或1.5~1.6	0.8~0.9或1.6~1.7	<0.8或>1.7
全N含量/(g·kg^{-1})	>2	1.5~2	1~1.5	0.75~1	0.5~0.75	<0.5
全P含量/(g·kg^{-1})	>1	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
全K含量/(g·kg^{-1})	>25	20~25	15~20	10~15	5~10	<5
水解性氮含量/(mg·kg^{-1})	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	<30
有效磷含量/(mg·kg^{-1})	>40	20~40	10~20	5~10	3~5	<3
速效钾含量/(mg·kg^{-1})	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	<30
土壤有机质含量/(g·kg^{-1})	>40	30~40	20~30	10~20	5~10	<5
pH值	6.0~7.9	5.5~6.0	5.0~5.5	4.5~5	4~4.5	<4或>10
石油烃含量(C_{10}—C_{40})/(mg·kg^{-1})	<50	50~100	100~150	150~200	200~250	>250
植被高度/cm	>20	15~20	10~15	5~10	3~5	<3
植被覆盖度/%	>80	70~80	60~70	50~60	40~50	<40
生物多样性指数	>60	40~60	30~40	20~30	10~20	<10
细沟宽度/cm	<7	7~15	15~30	30~50	50~65	>65
细沟深度/cm	<2	2~6	6~15	15~30	30~40	>40
损毁面坡长/cm	<150	150~200	200~250	250~300	300~350	>350
平均侵蚀模数/(t·km^{-2}·a^{-1})	<500	500~2 000	2 000~5 000	5 000~8 000	8 000~11 000	>11 000

2.3 评价方法

2.3.1 基于Delphi-Fuzzy-AHP(简称为DFA)的土地损毁评价指标权重计算

Delphi-Fuzzy(专家调查模糊分析法)是通过Delphi方法收集专家意见并进行共识构建,同时利用模糊理论处理不确定性的分析法[21]。AHP(analytic hierarchy process,层次分析法)是一种系统化的多准则决策方法,由运筹学家Thomas[22]提出,旨在通过结构化分解与定量化分析解决复杂决策问题。综上所述,DFA相较于单一的AHP能够使后续分析所基于的层次结构本身是经过专家群体认可的,并处理主观判断的模糊性,使量化过程更符合实际。①将风

电场工程建设项目对土地损毁的影响因素分为决策目标层、中间要素层和备选方案层,将土壤要素和损毁要素归类于中间层,土壤容重、全N含量、全P含量、全K含量、水解性氮含量、有效磷含量、速效钾含量、土壤有机质含量、pH值和石油烃含量归类于土壤要素的备选方案层,植被高度、植被覆盖度、生物多样性指数、细沟宽度、细沟深度、损毁面坡长和平均侵蚀模数归类于损毁要素的备选方案层,形成树状层级关系;②采用1—9标度法对中间层要素及其下属指标进行两两比较,构造判断矩阵。通过特征向量法计算各指标局部权重,归一化后得到各指标因子的局部权重,并进行一致性检验。③自下而上逐层聚合,将中间层权重与方案层局部权重线性叠加,得到各指标对总目标的全局综合权重(表3)。

表3　风电场建设土地损毁评价体系各级指标权重

Table 3　Indicator weights at each level of land damage assessment system for wind farm construction

目标层	准则层	权重	指标层	权重
风电场建设土地损毁评价指标体系(A)	土壤要素(B_1)	0.358	土壤容重(C_1)	0.069 5
			全N含量(C_2)	0.030 8
			全P含量(C_3)	0.032 6
			全K含量(C_4)	0.030 9
			水解性氮含量(C_5)	0.022 5
			有效磷含量(C_6)	0.024 4
			速效钾含量(C_7)	0.020 4
			土壤有机质含量(C_8)	0.050 4
			pH值(C_9)	0.041 6
			石油烃含量(C_{10})	0.034 9
	损毁要素(B_2)	0.642	植被高度(C_{11})	0.059 9
			植被覆盖度(C_{12})	0.167 6
			生物多样性指数(C_{13})	0.043 5
			细沟宽度(C_{14})	0.087 4
			细沟深度(C_{15})	0.070 8
			损毁面坡长(C_{16})	0.183 2
			平均侵蚀模数(C_{17})	0.029 6

2.3.2　基于灰色聚类法的土地损毁综合评价

灰色聚类法(grey clustering method)是灰色系统理论中的一种重要数据分析技术,旨在通过有限或不完全信息对研究对象进行分类与评估[23]。本研究的灰色聚类评价流程包含标准计算与特殊情况判定两个部分。当评价单元满足以下任一前置条件时,其损毁程度已极为显著,无需经过复杂的模糊权重与聚类计算即可直接判定为第Ⅵ灰类(剧烈损毁),以确保评价结果对极端情况的高效与准确响应:地表覆盖类型为人为活动形成的、大面积连续裸露基岩或碎石,且无任何植被或水土保持措施;单元内超过90%的面积已被证实为不可逆的永久性建设用地。该规则的设计,可以避免在损毁程度明确的情况下,模型因参数计算而产生不必要的误差或敏感性波动,符合认知经济性与实际管理需求。其中标准计算流程为如下。

(1)将已选取的各评价指标基于区间值化法[24]进行无量纲化处理,将所有指标的值转换到[0,1]区间,消除量纲差异对分类结果的影响。

(2)参考《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》的分级描述,对风电场建设土地损毁评价设立6个等级,即微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈,分别对应评价的6个可能度函数,设计分段函数定义不同区间内数据对各类别的隶属关系,量化其“灰色”过渡特性。

其中对于上限测度可能度函数,用于描述数值越大,属于该灰类的可能性越大的情况(如土壤有机质含量),计算公式为:

$$f_j^k(x_{ij})=\begin{cases}0 & (x<a)\\ \dfrac{(x-a)}{(b-a)} & (a\leqslant x<b)\\ 1 & (x\geqslant b)\end{cases} \tag{1}$$

对于下限测度可能度函数,用于描述数值越小,属于该灰类的可能性越大的情况(如平均侵蚀模数),计算公式为

$$f_j^k(x_{ij})=\begin{cases}1 & (x\leqslant a)\\ \dfrac{(b-x)}{(b-a)} & (a<x\leqslant b)\\ 0 & (x>b)\end{cases} \tag{2}$$

式中:$f_j^k(x_{ij})$为第j个指标对灰类k的可能度函数值;x为指标的实际观测值;a,b为该评价指标设定值的上限与下限;i为评价单元的序号;j为评价指标的序号。

对于适中测度可能度函数,用于描述数值在某个中间范围内最好,属于该灰类的可能性最大(如pH值),计算公式为

$$f_j^k(x_{ij})=\begin{cases}0 & (x<a)\\ \dfrac{(x-a)}{(b-a)} & (a\leqslant x<b)\\ 1 & (x=b)\\ \dfrac{(c-x)}{(c-b)} & (b<x\leqslant c)\\ 0 & (x>c)\end{cases} \tag{3}$$

式中:a,c为该评价指标设定值的上限与下限;b为最佳值。

（3）综合各指标的可能度函数值与对应权重，计算每个评价单元对各类别的聚类系数：

$$\sigma_i^k=\sum_{j=1}^{m} f_j^k\left(x_{ij}\right)\cdot\eta_j \tag{4}$$

式中：σ_j^k为评价对象i属于灰类k的聚类系数，反映对象与灰类的匹配程度；$f_j^k(x_{ij})$为第j个指标对灰类k的可能度函数值，表征指标观测值x_{ij}在灰类k中的隶属度；η_j为第j个指标的权重，由DFA确定；k为灰类（对风电场建设土地损毁评价设立6个等级，对应微度至剧烈）；m为评价指标总数；x_{ij}为第i个评价单元在第j个指标上的观测值（即各评价指标实测值）。

按照最大隶属度原则，通过比较系数大小，即该指标在6个灰类区间中的最大可能性，就可以对应该指标评价方案结果。

$$\max_{1\leqslant k\leqslant s}\left\{\sigma_i^k\right\}=\sigma_i^{k^*} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{R}^*=\begin{bmatrix}0.030\,0 & 0.083\,3 & 0.471\,3 & 0.315\,8 & 0.150\,8 & 0.275\,0\\ 0.156\,3 & 0.191\,2 & 0.457\,5 & 0.273\,0 & 0.146\,4 & 0.207\,5\\ 0.190\,0 & 0.089\,0 & 0.226\,6 & 0.292\,7 & 0.429\,5 & 0.207\,5\\ 0.126\,7 & 0.217\,8 & 0.283\,8 & 0.265\,1 & 0.437\,5 & 0.160\,0\\ 0.227\,7 & 0.063\,9 & 0.186\,0 & 0.472\,8 & 0.264\,5 & 0.306\,0\\ 0.242\,2 & 0.699\,9 & 0.215\,5 & 0.575\,0 & 0.020\,0 & 0.121\,0\end{bmatrix} \tag{6}$$

根据灰色定权评估矩阵$\boldsymbol{R}^*$，可以得出聚类对象点的灰类。

（1）聚类对象点1，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_1^k\right\}=\sigma_1^3=0.471\,3$，属于第3灰类；

（2）聚类对象点2，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_2^k\right\}=\sigma_2^3=0.457\,5$，属于第3灰类；

（3）聚类对象点3，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_3^k\right\}=\sigma_3^5=0.429\,5$，属于第5灰类；

（4）聚类对象点4，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_4^k\right\}=\sigma_4^5=0.437\,5$，属于第5灰类；

（5）聚类对象点5，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_5^k\right\}=\sigma_5^4=0.472\,8$，属于第4灰类；

（6）聚类对象点6，$\max_{1\leqslant k\leqslant 6}\left\{\sigma_6^k\right\}=\sigma_6^2=0.669\,9$，属于第2灰类；

因此，可得到各评价单元目前的土地损毁程度，Ⅰ级为土地损毁程度最轻微，Ⅵ级为土地损毁程度最严重，风电场各评价单元土地损毁程度详见表4。

式中：s的值为6，即选择最大聚类系数对应的灰类，则判定对象i属于灰类k^*，判定评价结果所在的灰类区间，即最终等级归属，实现从多维度信息到单一分类结果的映射。

其中评价单元6为采石场，其为风机平台与道路建设提供石料。通过现场勘察与遥感解译均确认，该评价单元地表覆盖类型为大规模、人为形成的破碎裸露岩石，且尚未有任何生态修复或水土保持措施。根据本研究设定的特殊情况判定规则，该评价单元符合“直接判定为第Ⅵ灰类（剧烈损毁）”的前置条件，因此，其损毁程度被判定为“剧烈”。根据其余聚类对象（评价单元1，评价单元2，评价单元3，评价单元4，评价单元5，评价单元7）对灰类（k=1，2，3，4，5，6）的综合聚类系数（其中行对应聚类对象，列对应k值），可以得到灰色定权评估矩阵$\boldsymbol{R}^*$：

表4 风电场各评价单元土地损毁程度评价结果

Table 4 Land damage assessment results for each evaluation unit of wind farm

序号	评价单元位置	所属期数	等级	损毁程度
1	2号风机	一期	Ⅲ级	中度
2	4号风机	一期	Ⅲ级	中度
3	23号风机	二期	Ⅴ级	极强度
4	25号风机	二期	Ⅴ级	极强度
5	弃渣场	二期	Ⅳ级	强度
6	采石场		Ⅵ级	剧烈
7	原地貌		Ⅱ级	轻度

3 结果与分析

3.1 土地损毁评价指标权重分析

土壤要素（0.358 0）与损毁要素（0.642 0）两个准则层间，后者所占权重更大。这是源于损毁要素对工程安全的直接威胁、法规的强制要求及评价方法的逻辑导向，如土地塌陷、压占等，其严重程度直接影响工程结构的稳定性及周边生态安全；而土壤要素因影响滞后，如养分流失、板结化等，通常通过植被退化或生态失衡间接体现，且修复周期长达数年，短期内难以量化其生态代价，权重相对次之。因此，土壤要素在短期工程评价中的优先级低于损毁要素。这一指标体系权重设计既保障短期工程可行性，又为长期生态修复预留空间，体现了评价体系中“风险优先级”与“可持续发展”的平衡。

3.1.1 土壤要素

在土壤要素中，土壤容重（0.069 5）和土壤有机质含量（0.050 4）权重值最高，二者之和约占土壤要素权重值的33.5%。风电场建设中风机基础、道路等设施可能导致地表硬化或固体物压占，最直观的表现

就是土壤板结导致土壤容重变大。在风电场建设过程中,频繁的施工活动可能导致土壤酸化或碱化以及氮磷钾等物质含量的波动[25],工程建设中油污废水的排放则导致土壤中石油烃含量的增加。风电场所属区域中的棕壤具有黏粒含量低,持水性能差,地力易衰退等特点,亚高山草甸土遇水易崩解,土壤抗蚀性差[26],土壤容重和土壤有机质的变化将破坏土壤的结构和肥力,从而影响土地生态恢复进程,因此土壤容重和土壤有机质是土壤要素中的代表性指标因子。

3.1.2　损毁要素

在损毁要素中,损毁面坡长(权重0.183 2)与植被覆盖度(权重0.167 6)权重值最高,二者合计所占比例为54.6%。损毁面坡长指因风电场塔基、道路等施工活动导致原地貌坡面长度增加的部分。坡长增加会延长径流路径,增强径流侵蚀能力,导致细沟长度、宽度和深度随之扩展[27]。同时,施工破坏了原有植被,而风电场所在亚高山草甸区气候寒冷、植物生长缓慢、土壤微生物活性低,植被自然恢复困难。植被覆盖度下降使坡面失去保护,进一步加剧水土流失。因此,挖损面坡长和植被覆盖度在损毁要素中属于源头性指标因子,能够连带引发植被高度、生物多样性指数、细沟宽度、细沟深度、平均侵蚀模数等因子发生改变。

3.2　土地损毁综合评价

评价单元1,2属于风电场一期建设工程。施工前期对草甸进行剥离保护,待项目施工结束后,将剥离的草甸运至需要恢复的区域进行铺设种植,不足的区域再进行撒播草籽和栽植灌木,高山草甸剥离保护和铺设措施能对项目建设破坏的高山草甸进行一定的补偿,且剥离的高山草甸相比后期撒播草籽具有更强的适地性,并采用临时防护措施及施工后的水土保持措施,且由于一期建设工程竣工时间较长,受损毁的土壤及植被有较长时间进行自然修复和生态恢复。在这一过程中,土地质量得到显著提升,因此该区域土地质量等级为Ⅲ级,损毁程度为中度。评价单元3,4,5属于风电场二期建设工程,二期工程设计规格相较于一期有所升级,其核心设备(如风力发电机组组件及塔架)在尺寸与重量上均有显著增加,由此直接导致了道路拓宽与安装平台面积增加,从而扩大了整体的土地扰动范围和土石方开挖量。虽在施工建设中及建设后采取了一定的生态修复措施,如施工开挖产生的土石方分层临时堆放于一侧,待施工完成后及时进行分层回填,并使用乡土树种进行施工迹地恢复。但由于竣工时间较短,亚高山草甸受环境所限植被生长缓慢,还未达到理想的恢复状态。其中评价单元3,4为风机建设区,故土地质量等级为Ⅴ级,损毁程度为极强度;评价单元5为弃渣排土场区域,施工结束后进行原土填埋及植被恢复,可以缓解堆渣对生态环境和当地植被造成的破坏,故土地质量等级为Ⅳ级,损毁程度为强度。评价单元6为采石场,该区域大量岩石裸露,且无植被覆盖,在这种情况下,植被恢复和生态修复非常困难,故土地质量等级为Ⅵ级,损毁程度为剧烈。评价单元7为原地貌,即自然环境未受干扰的状态。棕壤及亚高山草甸土的土壤特性致使其保水能力相对较差[28],亚高山草甸的地表覆盖物多为裸石地、稀疏灌木林地及草地,易受风蚀及水蚀的影响,进而造成土地退化[29],因此原地貌代表的背景值在土地质量等级中为Ⅱ级,损毁程度为轻度。

4　生态修复管理与技术建议

针对亚高山草甸生态环境特征,后期需针对风电场建设导致的土地损毁问题,制定与当地国土空间生态修复规划相衔接的生态修复总体方案,且遵循《云南省国土空间生态修复规划(2021—2035年)》的相关规定,首先在受损区域开展水土流失防治工程;随后,进一步明确生态修复的技术标准,依据《土地复垦条例》严格制定复垦策略,根据土地损毁类型及原地貌特征确定复垦的具体方向与目标。同时,强化表土剥离的再利用监管,以确保土壤恢复的质量。

研究区生态系统本底脆弱,放牧干扰易诱发局部生态退化。在生态恢复的关键初期,系统结构与功能尚不稳定,必须实施严格的放牧管控,否则将显著加剧退化风险。在本研究区域,除风电场外,亚高山草甸的其他区域尚未经历开发活动。然而,该区域以其优美与原生态的自然景观吸引了众多徒步旅行者和自驾游客,部分游客驾驶摩托车或越野车进入草甸,造成车辙碾压,破坏了地表植被层,导致土壤和石块暴露,对生态环境和景观造成了显著的负面影响。鉴于此,当地政府应依据《中华人民共和国草原法》并结合本地区具体状况,制定相应的草甸保护措施。建议在草甸的显眼位置设置明确的警示标识和防护设施,对违规进入草甸并破坏植被的游客实施严格的监管和处罚措施。同时,应加强对游客的环境教育,提升其生态保护意识,确保游客充分理解保护亚高山草甸生态环境的重要性。此外,鼓励当地社区参与草甸保护工作,促进生态保护与旅游发展的和谐共存。

具体技术层面,可按照不同土地利用情况调整生态修复策略。如因压占挖损受破坏的土壤采用草

灌混播方式，并配置适宜基肥[30]，对被废水油污污染过的土壤使用生物炭-微生物联合修复[31]；对于道路，做好日常的路障清理，基础设施维护即可。主要是道路两旁的边坡需做好管护，防止垮塌。针对水土流失区域，尤其是采石场此类破碎岩石裸露地区，可通过坡面整理、生土熟化等进行土壤重构[32-33]，并持续监测土地质量状况，争取在高质量风电建设发展的同时兼顾高水平生态环境保护。

5 结 论

本研究从亚高山草甸风电场区域土地特性出发，研究并建立了风电场区土地损毁评价指标体系，运用DFA计算出各指标因子权重，进而基于灰色聚类法判别各评价单元损毁程度，确定了土地损毁情况。

（1）应用灰色聚类法构建了亚高山草甸风电场损毁土地评价模型，并分成6个土地质量评价等级。6个评价单元损毁程度评价结果分别为评价单元1，2属于风电场一期建设工程，该区域土地质量等级为Ⅲ级，损毁程度为中度；评价单元3，4，5属于风电场二期建设工程，其中评价单元3，4为风机建设区，土地质量等级为Ⅴ级，损毁程度为极强度；评价单元5为弃渣场区域，土地质量等级为Ⅳ级，损毁程度为强度；评价单元6为原地貌，其土地质量等级为Ⅱ级，损毁程度为轻度。土地质量等级的空间分布特征体现出较为明显的差异性。

（2）评价结果表明，该风电场建设导致了中度至剧烈的土地损毁，土地质量整体显著下降，其主要驱动因素为施工期的开挖扰动及构筑物压占，使得原有地表形态遭到破坏。在风电场建设过程中，工程活动对表层土壤结构造成破坏，致使植被覆盖度降低。这种扰动直接引发土壤物理化学特性退化，其抗侵蚀性能随之减弱，进而加剧了区域水土流失。同时，大规模土方工程开挖过程中，原始地形地貌形态发生改变，由此产生的边坡失稳问题增加了滑坡、崩塌等重力侵蚀灾害发生的概率。

（3）本研究将Delphi-Fuzzy-AHP-灰色聚类法的评价模型应用在亚高山草甸风电场建设土地损毁评价中，验证了模型的可信性。在亚高山草甸环境下的土地损毁评价工作中，该模型可通过多维度指标分析实现损毁程度的精准识别，为其他风电场工程建设管理与亚高山草甸生态保护提供科学依据。该评价模型的不足之处在于对动态评价的支持有限，其本质是静态评价模型，评价的是某一时间断面上的状态。如果评价对象随时间快速变化（如人为干扰导致用地变化），评价模型的指标权重及可能度函数阈值都需要重新评估。

风机叶片的旋转会改变局部风场强度、湍流频率及风向，加速地表空气流动，从而可能提升土壤水分蒸发速率，影响土壤结构稳定性[34]。不同风机位置的风速差异可能导致土壤风蚀的空间异质性[35]，后期研究需探究土壤结构变化与风机湍流强度的关联性。本研究以土壤容重作为表征土壤物理结构变化的指标，其数值变化已间接反映总孔隙度的相应变化（降低或升高），未来可通过测定孔隙大小分布，深入解析其对土壤水文特性与通气功能的差异化影响。同时，后续研究需扩大样本量并延长观测周期，以动态监测风电场不同运行阶段土地退化程度的演变特征，将矿物风化速率、微生物群落活性及土壤团聚体形成机制等多维评价指标纳入模型构建，并通过系列实证研究验证该模型在土地损毁过程与修复成效动态监管中的科学参考价值与实践指导作用。在此基础上，应系统研发基于亚高山草甸景观生态演替规律的生物-非生物协同修复技术，旨在强化生态修复区域碳汇功能，为实现碳中和目标提供科学支撑。

参考文献（References）

[1] 赵珍伟.山西北部风电场建设对地表植被的影响研究[J].环境科学与管理，2021，46(5)：160-164.
Zhao Zhenwei. Impact of wind farm construction on surface vegetation in northern Shanxi [J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(5): 160-164.

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

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

[4] Li Lin, Ma Wenjing, Duan Xiangyi, et al. Effects of wind farm construction on soil nutrients and vegetation: A case study of Linxiang wind farm in Hunan Province [J]. Sustainability, 2024, 16(15): 6350.

[5] 任姝昕.基于AHP的区域土壤修复技术方案研究[J].清洗世界，2025，41(5)：71-73.

Ren Shuxin. Study on regional soil remediation technology scheme based on AHP [J]. Cleaning World, 2025, 41(5):71-73.

[6] 马国强,李秋洁,张锦绣,等.基于PSR方法的抚仙湖流域土地生态安全评估[J].江西科学,2023,41(3):507-513.
Ma Guoqiang, Li Qiujie, Zhang Jinxiu, et al. Assessment of land ecological security in Fuxian Lake basin based on PSR model [J]. Jiangxi Science, 2023,41(3): 507-513.

[7] 孟源思,高琳琳,李子杰,等.农田土壤重金属污染风险评价模型与方法研究[J].地球与环境,2020,48(4):489-495.
Meng Yuansi, Gao Linlin, Li Zijie, et al. Review on risk assessment model and method of heavy metal pollution in farmland soil [J]. Earth and Environment, 2020,48(4): 489-495.

[8] 台辉,王苹,江宁,等.基于AHP-模糊综合评价法的生产建设项目水土保持效果研究[J].水土保持通报,2023,43(5):169-175.
Tai Hui, Wang Ping, Jiang Ning, et al. Research of soil and water conservation effects of production and construction projects based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):169-175.

[9] 唐志敏,湛龙,张晓东,等.基于生态位理论与AHP-TOPSIS模型的福建长汀县富硒土地资源综合评价[J].岩矿测试,2024,43(4):592-602.
Tang Zhimin, Zhan Long, Zhang Xiaodong, et al. Comprehensive evaluation of selenium-enriched land resources in Changting County, Fujian Province based on niche theory and AHP-TOPSIS model [J]. Rock and Mineral Analysis, 2024,43(4):592-602.

[10] Makar R S, Shahin S A, El-Hady M A. Development of a parametric-based Analytical Hierarchy Process (AHP) utilizing geographic information systems (GIS) for wheat land suitability evaluation [J]. Journal of Applied and Natural Science, 2024,16(1):390-399.

[11] 罗鹏,谈存峰,齐婷婷.基于PSR模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测[J].水土保持通报,2024,44(3):180-189.
Luo Peng, Tan Cunfeng, Qi Tingting. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):180-189.

[12] Zhang Lindan, Peng Wenfu, Zhang Ji. Assessment of land ecological security from 2000 to 2020 in the Chengdu Plain region of China [J]. Land, 2023,12(7): 1448.

[13] 郝杰,李洪涛,安成龙,等.露天石灰岩矿山地质环境修复难度评价方法及应用研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):175-184.
Hao Jie, Li Hongtao, An Chenglong, et al. Difficulty evaluation method and application study of geological environment restoration in open-pit limestone mines [J]. Mining Research and Development, 2024,44(4): 175-184.

[14] 杨崇曜,王军,张骁,等.基于自然的解决方案的生态保护修复前沿进展与实践路径研究[J].自然资源学报,2024,39(12):2753-2767.
Yang Chongyao, Wang Jun, Zhang Xiao, et al. Research on frontier advances and implementation pathway of ecological conservation and restoration with nature-based solutions [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(12):2753-2767.

[15] 白中科.国土空间生态修复若干重大问题研究[J].地学前缘,2021,28(4):1-13.
Bai Zhongke. The major issues in ecological restoration of China's territorial space [J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(4):1-13.

[16] 孙佑海,赵燊.国土空间生态修复法律制度建构的探讨[J].自然资源学报,2023,38(6):1482-1495.
Sun Youhai, Zhao Shen. Discussion on the construction of legal system for ecological restoration of territorial space [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(6): 1482-1495.

[17] 顾恬玮,彭建,姜虹,等.流域国土空间生态修复:理论认知与规划要点[J].自然资源学报,2023,38(10): 2464-2474.
Gu Tianwei, Peng Jian, Jiang Hong, et al. Watershed-based territorial ecological restoration: Theoretical cognition and key planning issues [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(10):2464-2474.

[18] 张耿杰.矿区复垦土地质量监测与评价研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
Zhang Gengjie. Study on monitoring and evaluation of the quality of reclaimed land in mining area: A case study in Pingshuo mining area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

[19] 安克俭,魏霞,贺燕,等.祁连山区4种高寒植被类型下土壤养分及含水率分布[J].水土保持通报,2022,42(3):16-22.
An Kejian, Wei Xia, He Yan, et al. Soil moisture content and nutrient distribution under four Alpine vegetation types in Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):16-22.

[20] Tan Yongzhong, Chen Hang, Lian Kuan, et al. Comprehensive evaluation of cultivated land quality at county scale: A case study of Shengzhou, Zhejiang Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(4):1169.

[21] Ormanci I F, Dengiz O. Establishing and verifying soil

quality index model based on GIS and remote sensing for cultivated lands under semi-humid terrestrial ecosystem [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025,13(2):379-394.

[22] 孙金辉,谢忠胜,陈欢,等.基于层次分析法的北川县环境地质承载力评价[J].水土保持通报,2018,38(4):125-128.
Sun Jinhui, Xie Zhongsheng, Chen Huan, et al. Assessment of geological environment carrying capacity of Beichuan County based on AHP [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):125-128.

[23] 胡军,许丽忠,张江山.基于改进灰色聚类法的大气环境质量综合评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2012,28(1):49-54.
Hu Jun, Xu Lizhong, Zhang Jiangshan. Modified grey clustering model on air quality assessment [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2012,28(1):49-54.

[24] Augustin T, Coolen F P A, de Cooman G, et al. Introduction to Imprecise Probabilities [M]. U S: Wiley, 2014.

[25] Lu Xinqing, Zhang Xiuying, Zhan Nan, et al. Factors contributing to soil acidification in the past two decades in China [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(3):74.

[26] 王忠良,范春梅,段继琪,等.滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系[J].水土保持学报,2024,38(4):170-180.
Wang Zhongliang, Fan Chunmei, Duan Jiqi, et al. Relationship between physicochemical properties and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in central Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):170-180.

[27] He Zimiao, Xiao Peiqing, Yu Xinxiao, et al. A field study for the effects of grass cover, rainfall intensity and slope length on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. Water, 2022,14(14):2142.

[28] 李继祥,段青松,王忠良,等.滇中亚高山棕壤各土层崩解特征及PAM加固研究[J].贵州农业科学,2025,53(3):140-148.
Li Jixiang, Duan Qingsong, Wang Zhongliang, et al. Study on disintegration characteristics and PAM reinforcement of different soil layers of subalpine brown soil in central Yunnan [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025,53(3):140-148.

[29] AbdelRahman M A E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications [J]. Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali, 2023, 34(3): 767-808.

[30] 董焕焕,赵红,邓俊双,等.植被恢复方式对红壤丘陵区弃土场植被生长指标与土壤理化性质的影响[J].环境工程技术学报,2022,12(1):145-152.
Dong Huanhuan, Zhao Hong, Deng Junshuang, et al. Effects of vegetation restoration methods on vegetation growth indexes and soil physical and chemical properties of spoil ground in red-soil hilly region [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(1): 145-152.

[31] Minnikova T, Kolesnikov S, Minin N, et al. The influence of remediation with *Bacillus* and *Paenibacillus* strains and biochar on the biological activity of petroleum-hydrocarbon-contaminated haplic chernozem [J]. Agriculture, 2023,13(3):719.

[32] 齐芳,丁建林,崔嘉琪,等.西南生态脆弱区重大建设工程渣场的生态修复技术和策略[J].应用与环境生物学报,2024,30(4):848-860.
Qi Fang, Ding Jianlin, Cui Jiaqi, et al. Overview of technologies and strategies for ecological restoration of dreg fields in major construction projects in ecologically fragile areas of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2024,30(4):848-860.

[33] Wu Songlin, Liu Yunjia, Southam G, et al. Ecological engineering of iron ore tailings into useable soils for sustainable rehabilitation [J]. iScience, 2023, 26(7): 107102.

[34] Wang Gang, Li Guoqing, Liu Zhe. Wind farms dry surface soil in temporal and spatial variation [J]. Science of the Total Environment, 2023,857(Pt 1):159293.

[35] 和继军,唐泽军,蔡强国.内蒙古农牧交错区农耕地土壤风蚀规律的风洞试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):35-39.
He Jijun, Tang Zejun, Cai Qiangguo. Study on changing laws of soil wind erosion by wind tunnel experiment in agro-pastoral area of Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):35-39.