DOI: 10.5846/stxb202112283683

艾婧文,余坤勇,黄茹鲜,耿建伟,谢祯,刘健.风电项目对潜在生态廊道的影响——基于 MSPA-MCR 模型.生态学报,2023,43(9):3665-3676. Ai J W, Yu K Y, Huang R X, Geng J W, Xie Z, Liu J.The impact of wind power projects on potential ecological corridors based on the MSPA-MCR Model.Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3665-3676.

风电项目对潜在生态廊道的影响

----基于 MSPA-MCR 模型

艾婧文1,2,余坤勇1,2,黄茹鲜1,2,耿建伟1,2,谢 祯1,2,刘 健1,2,*

- 1 福建农林大学,福州 350002
- 2 3S 技术与资源优化利用福建省高等学校重点实验室,福州 350002

摘要:风电作为构建新型电力系统的主体,能够有效助力电力系统脱碳,是实现"双碳"目标的主力军。但风电规模化建设与生态环境保护之间的矛盾日益突出,风电项目对生态环境,尤其是对区域生态廊道及生态安全格局的影响急需厘清。以福建平潭陆上风电项目所在区域为研究单元,运用形态学空间格局分析法和最小累积阻力模型、重力模型等判别重要生态源地及潜在生态廊道,评估风电项目对潜在生态廊道连通性、重要性和结构性等影响。研究表明:(1)研究区生态源地主要位于生态价值高的森林公园及风景名胜区内。受风电项目影响,源地呈现破碎化趋势,核心区占景观要素百分比由 79.53%下降至76.64%。(2)风电项目导致生态廊道畅通性降低,生态廊道的走向及长度发生显著变化,大大增加了生物迁徙的空间阻力。(3)风电项目弱化了生态源地之间关联性。核心廊道和次级廊道均减少了6条,且重要性强的生态廊道完全避开风电项目所在位置。风电项目建设之后生态网络流通性变差,网络更为单一、整体生态效能降低。本研究不仅从生态环境敏感脆弱区域的生态安全角度给风电项目建成区周边生态修复提供科学参考,也为未来风电项目选址及环境质量评估提供了重要的方法支撑。

关键词:风电项目;生态廊道;MSPA;MCR模型;重力模型

The impact of wind power projects on potential ecological corridors based on the MSPA-MCR Model

AI Jingwen^{1,2}, YU Kunyong^{1,2}, HUANG Ruxian^{1,2}, GENG Jianwei^{1,2}, XIE Zhen^{1,2}, LIU Jian^{1,2,*}

- 1 Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China
- 2 University Key Laboratory for Geomatiscs Technology & Optimization Resources Utilization in Fujian Province, Fuzhou 350002, China

Abstract: As a new energy source, wind power is the mainstay of building a new power system, which can effectively contribute to decarbonize the power system and achieve carbon peak and neutrality targets. However, the contradiction between the large-scale construction of wind power and ecological protection is becoming increasingly prominent. It is urgent to clarify the impact of wind power projects on the ecological environment, especially on potential ecological corridors and regional ecological security patterns. This study took Pingtan as the study area, and applied Morphological Spatial Pattern Analysis, Minimal Cumulative Resistance and gravity models to identify importantly ecological source sites and potential corridors. In addition, the impacts of wind power projects on the connectivity, pathways and importance of ecological corridors were assessed. The results showed that: (1) the ecological sources were mainly located in forest parks and scenic spots with high ecological value. The fragmentation of ecological source was increasing due to the impact of wind power projects. The percentage of ecological core areas decreased from 79.53% to 76.64%. (2) Wind power projects have reduced ecological corridor accessibility, significantly changed the alignment and length of ecological corridors, and greatly increased the spatial resistance for biological migration. (3) The wind power project weakened the correlation between

基金项目:福建省水利厅科技专项(MSK201705); 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室建设项(PTJH17014)

收稿日期:2021-12-28; 网络出版日期:2022-08-29

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: filiujian@ 126.com

ecological source sites. Both important and secondary corridors were reduced by six and the ecological corridors of high importance completely avoided the location of the wind power project. After the construction of wind power projects, the ecological network became less fluid, more homogeneous, and less effective overall. This study not only provided a reference for biodiversity conservation and ecological security patterns in the ecologically fragile areas around wind power projects, but also provided important methodological support for wind power project siting and environmental quality assessment.

Key Words: wind power projects; ecological corridors; morphological spatial pattern analysis; minimal cumulative resistance model; gravity model

近年来,全球自然灾害频发,气候变化问题再敲警钟。2021 年 11 月 13 日,《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会(COP26)签署《格拉斯哥气候公约》,首次达成 1.5℃ 控温目标的共识,承诺降低化石燃料的使用^[1],并呼吁各国加快向低碳能源体系转型。风能作为一种资源潜力巨大、成本低、利用率高、且污染小的可再生能源,在各国能源改革中占有重要地位。当前全球近 800GW 的风电可帮助世界每年减少超过11 亿 t 的二氧化碳排放量(相当于拉丁美洲每年的碳排放总量)^[2],并且在 2050 年净零排放路线图中全球发电总量近 35%将来自风能发电。为承担解决气候变化问题中的大国责任、落实碳达峰、碳中和目标,我国加快能源低碳绿色转型,提升化石和新能源优化组合的高质量利用,已成为可再生能源发电量最大的国家^[3]。国家各部委以及地方政府发布多项风电环保、风电建设、风电补贴、风电消纳等举措促进风电产业发展,风电飞速发展成为我国既火电、水电之后的第三大电源^[4-5]。至 2020 年底,全国风电累计装机 2.81 亿 kW,其中陆上风电累计装机 2.71 亿 kW、海上风电累计装机约 900 万 kW。在风电产业发展阶段,科学界给予风能资源评价^[6-7]、风电机组类型及部件优化^[8-9]、风力发电项目投资和建设运营模式^[10-11]等更多的关注。但随着风电技术的日渐成熟及风电规模的大幅度扩大,许多学者开始意识到风力发电项目建设对生态环境的负面影响^[12-14]。

首先,风电项目的开发和建设过程中,会对当地的生态环境产生剧烈地扰动,改变或破坏当地的生态安全维持机理:一方面会破坏区域植物群落结构、驱赶动物,造成生态系统生产力及生物多样性降低^[13];另一方面风电场的施工不可避免地对土壤结构造成破坏,造成土壤理化性质及肥力发生变化。其次,在风电项目运营过程中,会造成风力、温度及湿度的改变,影响区域小气候^[14];风机涡轮叶片工作时转速高达 300 km/h,风电场内鸟类和蝙蝠因碰撞造成死亡的现象时有发生^[15-16],且高速旋转的风车阵对鸟类飞行迁徙构成巨大威胁;涡轮叶片旋转产生的低频噪声及阴影也引起生物的一系列习性变化,造成生物栖息地和觅食地的丧失^[17-18]。总之风电项目对植被、土壤、群落微环境等生境要素均存在威胁,而生境要素的变化将进一步影响生态系统能流、物流和信息流的流通,因而需将风电场纳入生态系统的干扰源中,从生态系统连通性等出发探究风电项目对区域整体生态安全格局的影响。

生态网络作为区域景观的重要空间格局特征,主要由生态价值高的源地及生物流通性强的廊道组成,在一定程度上能够有效地抵御景观扰动对生态过程及生态安全的影响,能够很好地体现区域生态安全格局状况。风电项目对生态廊道连通性、重要性及结构性的影响将直接干扰生态网络发挥维护生态安全及生物多样性等功能。因此,结合景观连通性及生态网络等相关理念,科学评估风电项目对于区域生态环境影响评估是很有必要的。当前生态廊道及生态安全格局构建研究逐渐成熟,基本形成以"源地识别—阻力面构建—廊道提取"为主的研究范式,研究方法及理论主要集中在以景观格局分析、形态学空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA) [19—20]、生态系统服务评估与权衡模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST) [21] 等识别生态源地,以最小累积阻力模型(Minimal Cumulative Resistance, MCR) [22—23]、图论法[24]、电路理论模型[25]等识别生态廊道等。

我国幅员辽阔,风力资源十分丰富,其中沿海地区及海岛为最大风力资源区,风电并网和就地消纳能力强,开发潜力强,但沿海地区也属于生态功能极重要、生态极敏感的区域,因而风电项目建设对于沿海地区生

态安全产生怎样的干扰、程度如何更值得关注。基于此,本研究以平潭岛北部风电项目建设区域为研究对象,试图从"源—汇"理论出发,通过形态学空间格局分析法(MSPA)、最小累积模型(MCR)以及重力模型等方法对平潭岛陆上风电项目所在区域的生态环境变化展开研究,聚焦于风电项目对于生态廊道走向、连通性重要性及结构性的影响。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

平潭地处台湾海峡与海坛海峡之间的风口走廊,多年平均风速可达 8.4m/s,且每年长达 200 多天风力达 7级以上,是当之无愧的"风能宝地"。平潭不仅风能资源丰富,风能可利用率也高,年有效风速 4.5—25m/s,年有效风功率密度高达 930.4W/km²。平潭于 1976 年开始"化风为宝"的探索与尝试,并成立平潭县风力发电实验小组,成为全国最早成立的风力发电试验机构的地方之一。2000 年长江澳风力发电一期工程 10 台 600kW 风力发电机组全部并网发电,开创了福建省风力发电商业化运行的历史。2007 年长江澳风力发电二期增设 50 台 2000kW 风力发电机组。2013 年平潭青峰风电场(一期)24 台单机容量 2000kW 的并网型风力发电机组投产发电。平潭岛现已建成三项陆上风电项目,总装机容量达 154MW。因此,本研究以平潭岛陆上风电项目所在行政区作为研究单元,包括白青乡、平原镇及长江澳部分区域(图 1),总面积约 38.2827km²。

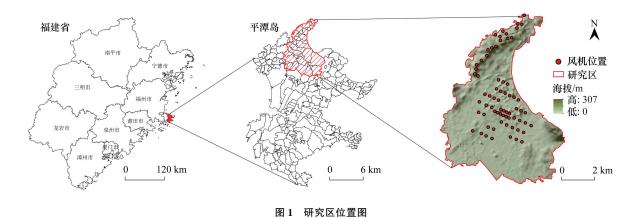


Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源及预处理

研究所采用的 2000 年(Landsat7 ETM)以及 2020 年(Landsat8 OLI_TIRS)卫星遥感影像数据云量均小于 5%,且均来源于地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/)。基于 ENVI 5.3 对影像进行大气校正、辐射定标、几何校正等预处理,将 30m 空间分辨率的多光谱数据和 15m 的全色数据融合获得空间分辨率为 15m× 15m 的影像数据。运用随机森林分类器提取研究区水体、林地、耕地、不透水面和其他用地(包括未利用地、沙地等)五种景观类型(图 2),两期分类精度分别为 0.87 和 0.95,均满足分析要求^[26]。研究区高程数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)。利用 QGIS 软件在 Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)在线地图网站上爬取平潭岛陆上风机点位数据。

2 研究方法

2.1 基于 MSPA 的生态源地选择

利用空间形态学分析法对 2000 年及 2020 年土地利用数据进行景观格局空间特征分析^[27],将生态价值高且人为干扰较少的林地设置为"前景",其余土地利用类型为背景,获得前景与背景的二元分析底图。在GuidosToolbox2.8 平台下,二元栅格图像通过开闭运算等空间形态学分析将研究区重新解译为核心区(Core)、

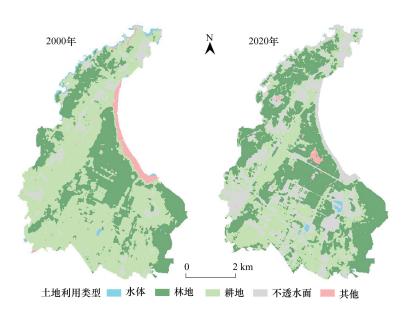


图 2 土地利用分布图

Fig.2 Land use distribution map

孤岛(Islet)、桥接(Bridge)、环道(Loop)、边缘(Edge)、穿孔(Perforation)以及支线(Branch)七种景观类型。

景观连通性反映的是各生态源地之间物质能量交换及流通的强度、频率等,能够衡量生态源地功能性及其网络的整体结构性^[28]。可能连通性指数指两个生境斑块之间生态流直接扩散的可能性,是景观水平上景观整体连通性的表征。当景观中某个斑块被剔除之后,整体景观结构及连通性将会发生改变,这种变化被称为该斑块的景观连接重要程度^[29],因此将整体连通性指数(IIC)、可能连通性(*PC*)以及连接重要性(dPC)作为生态源地选择的重要参考,具体计算如下:

IIC =
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2}$$
 (1)

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_L^2}$$
 (2)

$$dPC = 100 \times \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC}$$
 (3)

式中,n 为斑块总数量; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的面积; A_L 为景观总面积; nl_{ij} 为 i 和 j 之间最短路径的连接值; p_{ij}^* 是 i 与 j 之间能量扩散的最大可能; PC_{remove} 为移除斑块 i 后剩余斑块组成景观的可能连接度。

结合研究区实际情况并参考相关研究^[19,30-32],利用 Conefor 2.6 软件量化生态源地重要程度,将连接的距离阈值和概率分别设置为 1000 及 0.5,提取研究区内 dPC 大于 5 且面积前 5%的生境斑块作为重要生态源地。

2.2 空间阻力面构建

生态物质在空间上的扩散和迁移能够提高生物多样性,有利于维持生态系统稳定性,但能量流动的便捷性受到空间阻力影响,因此合理地构建空间阻力面是提取生态廊道的关键。土地覆盖类型能够直接影响着生境质量优劣^[33];坡度和地形起伏度会影响植被生长以及生物流动范围^[34];植被覆盖度能直接反映区域地表植被状况^[35]。因此,将土地覆盖类型、MSPA景观类型、坡度、植被覆盖度及地形起伏度作为生态廊道建设主要环境阻力因子(表 1)。

风机的涡轮及发电机产生的噪声、投影等会干扰物种的迁徙^[36]。在声环境方面,在风机 300m 范围之内的生物受影响最大^[15],但由于声音传播在空气中的衰减效应,风机所产生的噪声在 500m 之外的影响甚至不高于当地夜间的最小噪音^[37]。在光影方面,风机及叶片投影对植物叶片的光合速率影响较大,根据风机塔高和光的折射原理,距离风机 500m 之外的区域光影强度较低,影响甚微。因此,将距风机距离纳入空间阻力分析,阻力值设置如表 1 所示。利用熵权法获得各个阻力因子的权重值,运用综合加权指数法构建综合阻力面。

		Table 1	Resistance fa	ctors and resistance values	ı		
阻力因子 Evaluation factors	权重 Weight	阻力类型 Resistance types	阻力值 Resistance value	阻力因子 Evaluation factors	权重 Weight	阻力类型 Resistance types	阻力值 Resistance value
土地覆盖类型	0.3124	林地	1	植被覆盖度(F)	0.1854	F≥0.8	1
Land cover type		耕地	60	Vegetation coverage(F)		$0.6 \le F < 0.8$	20
		水体	80			$0.4 \le F < 0.6$	60
		建设用地及其他	100			$0.2 \le F < 0.4$	80
MSPA 景观类型	0.1229	核心区	5			F<0.2	100
MSPA landscape type		桥接	10	地形起伏度(R)	0.1173	R<10m	1
		环道	30	Degree of relief (R)		$10 \text{m} \leq R < 20 \text{m}$	20
		支线	40			$20 \text{m} \leq R < 35 \text{m}$	60
		孤岛	50			$35 \mathrm{m} \leq R < 55 \mathrm{m}$	80
		边缘	60			<i>R</i> ≥55m	100
		穿孔	70	距风机距离(D)	0.1522	$D \ge 500 \text{m}$	1
		背景	100	Distance to wind		$300 \mathrm{m} \! \leq \! D \! < \! 500 \mathrm{m}$	60
坡度(i)	0.1098	i<8°	1	power (D)		D<300m	100
Slope (i)		8° ≤ <i>i</i> <15°	20				
		15° ≤ <i>i</i> <25°	60				
		25° ≤ <i>i</i> <35°	80				
		<i>i</i> ≥35°	100				

表 1 阻力因子及阻力值

2.3 生态廊道提取

最小累积阻力模型(MCR)是一种探究生物从源斑块到目的斑块运动过程中所需耗费代价的模型,它最早由 Knaapen 提出^[38],之后该模型被广泛应用到自然生态及人文科学的研究^[23,39—40],其计算公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{i=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$
(4)

式中, D_{ij} 指斑块 i 到 j 的空间距离; R_i 表示斑块 i 空间扩张的阻力系数;f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

2.4 生态廊道重要性判定

重力模型能够将源地间的相互作用定量化,可用于评价的生态廊道的相对重要性,其值越大,源地斑块间的作用强度越大^[20,22–23],计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_i} \times \ln(S_i)\right] \left[\frac{1}{P_j} \times \ln(S_j)\right]}{\left(\frac{L_{ij}}{L}\right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \times \ln(S_i) \times \ln(S_j)}{L_{ij}^2 \times P_i \times P_j}$$
(5)

式中, G_{ij} 指斑块 i 与 j 之间的相互作用力; N_i 和 N_j 为斑块 i 和斑块 j 的权重; D_{ij} 指斑块 i 到 j 的潜在廊道标准化阻力值; P_i 和 S_i 为斑块 i 的阻力值和面积; P_j 和 S_j 为斑块 j 的阻力值和面积; L_{iij} 是连接斑块 i 和 j 的累积阻力值, L_{max} 为所有廊道的最大阻力值。

2.5 潜在生态网络评价

利用网络分析中常见的网络环度指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)、网络连通性指数(γ 指数)以及廊道密度指数(ρ 指数)评价风电项目影响前后潜在生态网络结构特征[24],计算公式如下:

$$\alpha = (L - V + 1)/(2V - 5) \tag{6}$$

$$\beta = L/V \tag{7}$$

$$\gamma = L/L_{\text{max}} = L/3(V-2) \tag{8}$$

$$\rho = D/A \tag{9}$$

式中,V为节点数,L为实际廊道数, L_{max} 为网络最大可能廊道数,D为廊道总长度,A为研究区面积。

3 结果分析

3.1 重要生态源地判别

研究区两期 MSPA 景观分类结果如表 2 及图 3 所示。2000 年核心区面积为 9.4869 km²,占景观要素的 79.53%,2020 年核心区面积占比下降至 76.64%。2020 年桥接、环道、支线、孤岛、边缘及穿孔占景观要素百分比均有增加,大片密集且均匀的生境斑块转化为更为分散和破碎的小型斑块,生境斑块数量增加。鉴于连通性高且面积大的源地生态资源更为充足,更有利于生物的栖息及物质能量交换,综合两期 MSPA 景观分类及连通性评价结果最终划定 7 处稳定性较强的重要生态源地(图 3),总面积为 6.1691km²,主要分布于青峰山森林公园、十八村森林公园、瓦瑶山森林公园、君山景区西部。

表 2 MPSA 景观类型统计

Table 2	Area and	proportion	of MSPA

	2000 年面积 Area/km ²	占景观要素百分比 Proportion/%	2020 年面积 Area/km ²	占景观要素百分比 Proportion/%
核心区 Core	9.4869	79.53	12.1840	76.64
桥接 Bridge	0.0459	0.38	0.0934	0.59
环道 Loop	0.0324	0.27	0.0767	0.48
支线 Branch	0.2178	1.83	0.3503	2.20
孤岛 Islet	0.1024	0.86	0.1483	0.93
边缘 Edge	1.7879	14.99	2.5603	16.10
穿孔 Perforation	0.2561	2.15	0.4856	3.05

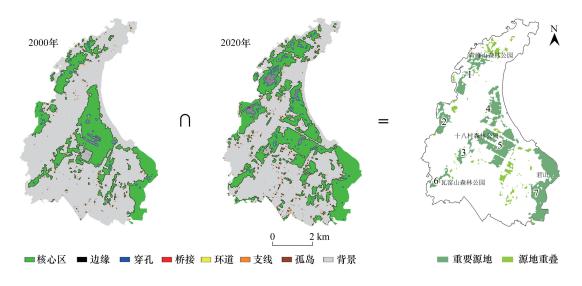


图 3 基于 MSPA 的重要源地选择(图中数字为生态源地代码)

Fig.3 The selection of important ecological sources based on MSPA(the numbers in the diagram are ecological source codes)

3.2 基于最小累积阻力模型的潜在生态廊道构建

利用空间叠加分析构建综合阻力面(图 4),研究区阻力平均值由 2000 年的 36.2037 增长到 2020 年 39.8225,阻力高值区由北部转移至中南部,该区域风电项目分布密集。为了保证景观的连通性,确保生物可以在源地间顺畅交流,将7个重要源地两两之间通过生态阻力最小空间形成廊道连接,创建了21条潜在生态廊道。图 5 可以看出风电项目影响前后潜在生态廊道空间变化较大,重叠较少,网络由紧密转变为稀疏的状态。

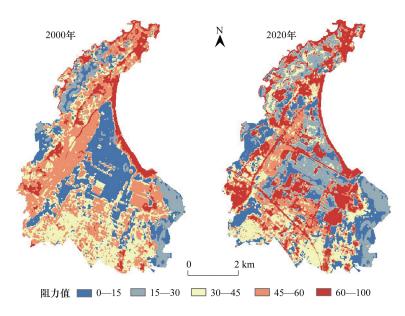


图 4 空间阻力面构建

Fig.4 The spatial distribution of resistance

3.3 风电项目对潜在生态廊道的影响分析

3.3.1 对生态廊道空间阻力及路径的影响

风电项目影响前后源地之间的累积耗费阻力如图 6 所示,21 条潜在廊道的最小累积成本平均值由 44819 增长到 64007。源地之间的最小成本阻力大幅增加,阻力最大值由 95484 增长到 107084,可见风电项目的建设严重阻碍了源地之间的物质循环和生态流动畅通性。虽然源地 1 与源地 2、4,源地 2 与源地 3、6 之间的累积阻力值有所下降,但综合风电项目所在位置(图 5)可发现源地 1 与源地 4,源地 2 与源地 3、6 连接的潜在生态路径变化明显,且基本完全避开风电项目位置,这从侧面反应风电项目制约了部分潜在廊道生态价值的发挥。

图 7显示了风电项目建设前后潜在生态廊道长度的变化,廊道 1—3、1—6、1—7长度变化明显。源地 1与源地 2、3、4,即青峰山森林公园与十八村森林公园的生态廊道受风电项目影响较小。十八村森林公园内部的源地之间、十八村森林公园与君山、瓦瑶山森林公园之间的生物交流路径变化明显,但是长度变化不大,所形成的潜在生态网络被风电项目分割,布局分散,尤其

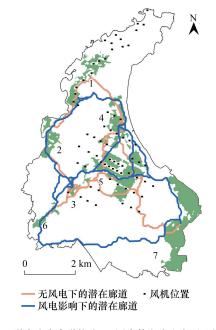


图 5 潜在生态廊道构建图(图中数字为生态源地代码)

 $\label{eq:Fig.5} \textbf{Potential ecological corridors} \ (\ \text{the numbers in the diagram} \\ \text{are ecological source codes})$

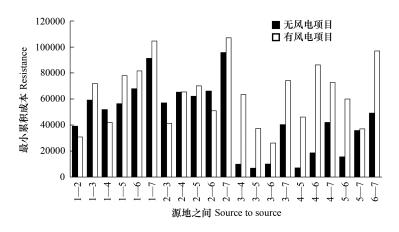


图 6 风电项目对廊道空间阻力的影响

Fig.6 The impact of the wind power project on ecological corridor patency

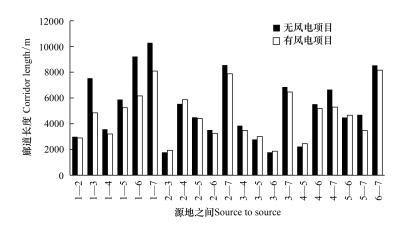


图 7 风电项目对生态廊道长度的影响

Fig.7 The impact of the wind power project on ecological corridor length

是源地7与源地4和6的连接避开了风电项目所在位置,并完全偏离了原有的路径。

3.3.2 对生态廊道重要性的影响

利用重力模型获得风电项目影响前后源地间相互作用矩阵(表 3,表 4),结果差异性显著。无论是否有风电项目的影响,源地 1 和源地 7 之间的关联性都最弱,斑块间物质交换最为困难,需增加生态踏脚石等。在无风电项目的情况下,源地 3 和源地 5 之间的相互作用强度最大,为 1105.4838,表明物质在这两源地之间生态连接最强,能量交换更为便捷。风电项目影响下,21 条廊道重要性值均降低,研究区内连接性最强的源地组合为源地 3 与源地 6,相互作用强度为 15.5237。

进一步将重要性值大于 100 的生态廊道划定为核心廊道,重要性值介于 1 到 100 的廊道划定为次级廊道,其余的为一般廊道。在无风电项目的情况下,核心廊道集中于源地 3、4、5、6 之间,空间上覆盖研究区中部地区,将长江澳与十八村森林公园、瓦瑶山森林公园相连接。但在风电项目影响下,核心廊道不复存在。风电项目建设后次级廊道由 11 条减少为 5 条,一般廊道增加 12 条。尤其是源地 2 与源地 3、4 之间的连接已完全避开风电机组。

3.3.3 对生态网络结构的影响

生态网络主要由生态源地、生态廊道及生态节点组成,其中生态节点在生态网络中起沟通生态源地间物质转换的"踏脚石"的作用,主要由最小路径交点或与最大路径的交点构成,具有重要的战略节点价

值 $^{[23,25,41]}$ 。综合生态廊道连通性及重要性,剔除冗余的潜在生态廊道及生态节点,构建风电项目建设前后研究区生态廊道网络(图 8)。风电项目建设后 α 指数、 β 指数、 γ 指数以及 ρ 指数均下降(表 5),下降幅度为:66.67%、22.22%、22.22%以及 11.51%。风电项目建设之后生态流在整个研究区内流通性降低,网络更为单一、节点的通达程度变差、生态效能降低。

表 3 无风电项目影响下的潜在生态廊道重要性矩阵

Table 3 Matrix of the importance of ecological corridors without the wind power project

重要性 Importance	源地 1 Source 1	源地 2 Source 2	源地 3 Source 3	源地 4 Source 4	源地 5 Source 5	源地 6 Source 6	源地 7 Source 7
源地 1 Source 1	_	8.0813	4.9568	5.6904	5.9818	4.0566	0.9459
源地 2 Source 2	_	_	9.3241	6.2547	8.5669	7.4801	1.4997
源地 3 Source 3	_	_	_	409.7050	1105.4838	483.6465	12.0779
源地 4 Source 4	_	_	_	_	900.0799	120.5685	9.8101
源地 5 Source 5	_	_	_	_	_	216.3886	16.8382
源地 6 Source 6	_	_	_	_	_	_	8.7836
源地 7 Source 7	_	_	_	_	_	_	_

表 4 风电项目影响下的潜在生态廊道重要性矩阵

Table 4 Matrix of the importance of ecological corridors with the wind power project

Table 4 Matrix of the importance of ecological corridors with the wind power project							
重要性 Importance	源地 1 Source 1	源地 2 Source 2	源地 3 Source 3	源地 4 Source 4	源地 5 Source 5	源地 6 Source 6	源地 7 Source 7
源地 1 Source 1	_	5.3793	0.7890	1.7934	0.7388	0.7269	0.5155
源地 2 Source 2	_	_	5.3109	1.6355	2.0223	4.1257	1.0868
源地 3 Source 3	_	_	_	1.3890	5.7001	12.5237	1.8030
源地 4 Source 4	_	_	_	_	2.8929	0.8942	1.4602
源地 5 Source 5	_	_	_	_	_	2.6148	7.9715
源地 6 Source 6	_	_	_	_	_	_	1.2560
源地 7 Source 7	_	_	_	_	_	_	_

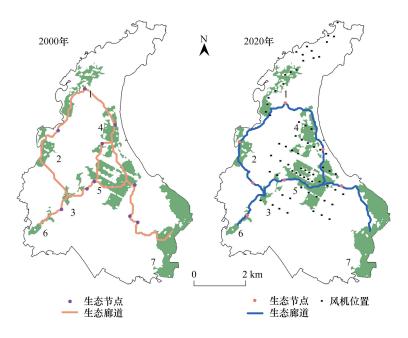


图 8 生态廊道网络构建结果(图中数字为生态源地代码)

Fig.8 The result of ecological network (the numbers in the diagram are ecological source codes)

表 5 风电项目影响下的潜在生态网络结构特征指数

Table 5 Indicators of network structure characteristics with and without the wind power projects

	α 指数 αindex	β指数 βindex	γ指数 γindex	ρ指数(m/m²) ρindex
无风电项目 without the wind power project	0.3333	1.2857	0.6000	0.0289
有风电项目 with the wind power project	0.1111	1	0.4667	0.0256

4 讨论与结论

4.1 讨论

- (1)风电项目对生态廊道的影响。生态廊道能够将区域内优质生态资源串联,具有保护生物多样性、水土保持、防风固沙、过滤污染物、促进生态流动等功能^[20,22,41]。但风力发电属于电力基础设施项目,不具备生态功能,且人为扰动大,不利于生态廊道的形成。风电项目作为点状和线状要素的建造对景观有明显的切割作用^[16,18],易将完整的生境斑块切割成破碎的景观单元,破坏生态源地的生境质量及景观结构,不利于生态系统的完整性。由于野生动植物对人工基础设施及人类活动敏感,为避开风机涡轮产生的低频噪声及叶片阴影,它们会改变觅食和迁徙路径^[17—18],本研究在空间上量化了风电项目建设前后生态流的方向变化(图 5),论证了风电项目对物种的栖息、迁徙和扩散等生态过程的阻碍;进一步证明风电项目的建设在空间上支离了自然生境,阻碍了不同生境之间信息交流与能量流动的畅通性,破坏物种物质间能量交换的生态廊道,进而严重威胁区域生态安全稳定。
- (2)对风电项目规划及管理的建议。一方面为适应"双碳"发展战略,我国设定年均新增风电装机 5000万kW以上目标,风电产业发展势头强劲,另一方面生态环境保护的重要性及紧迫性日益突出,两者如何平衡及协调,成为当前亟待解决的问题。本研究基于"源—汇"理论论证风电项目对区域生态安全格局的影响能够为风电项目的规划及管理提供指导方向:在项目建设初期选址阶段,从生态源地保护出发,风电场选址应尽量避开生境质量高、生态系统服务价值高以及生态脆弱区域,如自然保护地、基本农田、水源涵养区等。在生态廊道方面,可模拟风电项目建设前后区域生态安全格局变化,优先识别并尽量避开对生态廊道连通性危害较大的风电位置。由于生态廊道的宽度也影响着物种的多样性及迁徙效率[41],可根据风电项目所在区域的土地利用类型及物种类型设置生态廊道宽度,在保证风能利用效率的情况下,风机选址尽量避开生态廊道覆盖区域;在已建成的风电项目区域,可对比风电项目建设前后生态廊道的变化(如图 5),有效识别因风电项目建设而发生重大变化的生态廊道及生态修复重点区域,及时制定相关的保护及恢复策略,尽快恢复区域生态稳定,改善生态系统服务功能。如利用周边风电项目影响较小、生境质量较高的景观,以优质生态流帮助区域内景观自我修复,改善风电项目影响范围内景观功能退化严重的不健康景观。
- (3)本研究主要从风机机位空间排布出发,利用距离量化风电项目产生的光影及噪声等对区域生态安全格局的影响,将风机作为一种点源影响要素纳入到生态空间阻力值计算,定量评估风电项目对生态廊道畅通性及重要性的影响,丰富了风电项目的环境影响评价内涵。然而,本研究也存在一定缺陷。首先,本研究主要基于"源一汇"理论探讨风电项目对景观连通性及区域生态安全格局的影响,但风电项目不仅是单纯的点状要素,还涉及到输电线路及周边路网,这些基础设施建设不可避免地会对原有的生态系统造成破坏。因此风机组合形成的线性或网络空间是否会加剧对区域生态安全格局的危害,如何在生态阻力面构建过程中量化这种叠加效应值得进一步探讨。其次,本研究主要聚焦于廊道走向及重要性的变化,未进行廊道宽度的量化及对比分析,未来可深入风电项目对于生态廊道宽度的影响研究。本研究71.01%的风机位于林地内,而风电项目可能位于草原、湿地、农田、海洋等其他环境中,风电项目对于区域景观连通性及生态安全格局的影响是否受到所处土地利用类型的不同而存在差异有待进一步分析。

4.2 结论

本研究以平潭岛陆上风电项目所在区域为研究单元,利用 MSPA、景观连通性指数等提取重要生态源地,

将距风机距离作为阻力因子纳入生态廊道提取框架,量化了风电项目对潜在生态廊道路径、连通性及重要性等的影响,为区域生态网络安全格局构建及优化、风电项目选址规划等提供新的研究思路和方法,研究结论如下:(1)研究区提取重要生态源地7个,主要分布在森林公园及风景名胜区内,总面积达6.1691 km²,占研究区面积的16.11%。(2)风电项目作为点和线性景观要素,不仅对区域景观有明显的切割效果,将大面积的森林生境切割成若干个孤立的斑块,而且在空间上显著增加了区域生态景观流动的阻力,潜在廊道平均阻力值由36.2037增长到39.8225。(3)在风电项目影响下,研究区生态廊道所形成的空间分布格局由紧密转为疏散,并且源地之间生态廊道的畅通性降低,廊道的走向及长度变化明显。(4)未建设风电项目时,以分布在十八村森林公园内部的源地之间的相互作用力最强。但风电项目建设之后重要源地之间最紧密连接的组合则转变为青峰山南部与瓦瑶山森林公园(该区域无风电项目分布)。(5)风电项目建设使得生态网络连通性明显降低,系统内节点之间联系更为困难。

参考文献 (References):

- [1] UNFCCC. Glasgow climate pact. (2021-11-13). https://unfccc.int/documents/310475.
- [2] GWEC. COP26; A Wind Industry Score-sheet. (2021-12-17). https://gwec.net/cop26-a-wind-industry-score-sheet/.
- [3] IRENA. Country rankings. (2022-07-20). https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings.
- [4] Feng Y, Lin H Y, Ho S L, Yan J H, Dong J N, Fang S H, Huang Y K. Overview of wind power generation in China: status and development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 847-858.
- [5] Sun S P, Liu F L, Xue S, Zeng M, Zeng F X. Review on wind power development in China; current situation and improvement strategies to realize future development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45; 589-599.
- [6] 蒋洁, 刘永学, 李满春, 钟礼山, 陈振杰, 张荷霞. 基于 ENVISAT ASAR 影像与 QuikSCAT 风场数据的近海风能资源评价——以香港东南海域为例. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 39-43.
- [7] 王燕涛,李勇,王大亮,刘随亮.基于 DEA 模型的风能资源利用效率评价研究——甘肃、吉林等 25 省区实证分析. 科技管理研究, 2017, 37(8):82-87.
- [8] 郭艳珍, 隋文涛, 窦亚萍. 风电叶片单轴疲劳试验弯矩匹配智能优化. 振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 490-494.
- [9] 张亚楠,周勃,俞方艾,沈臣.含缺陷风电叶片复合材料的失稳状态识别和预测.太阳能学报,2021,42(9):318-325.
- [10] 李建强, 郑晓, 赵铁男. 风电产业的金融扶持. 中国金融, 2014, (16): 84-85.
- [11] 韩梦瑶,刘卫东,刘慧.中国跨境风电项目的建设模式、梯度转移及减排潜力研究——以中巴经济走廊优先项目为例.世界地理研究, 2021, 30(3): 490-500.
- [12] 蒋俊霞,杨丽薇,李振朝,高晓清.风电场对气候环境的影响研究进展.地球科学进展,2019,34(10):1038-1049.
- [13] Buchholz S, Kelm V, Ghanem S J. Mono-specific forest plantations are valuable bat habitats; implications for wind energy development. European Journal of Wildlife Research, 2021, 67(1); 1.
- [14] Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, Rivas J, Kucharski F, Kirk-Davidoff D, Bach E, Zeng N. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. Science, 2018, 361(6406): 1019-1022.
- [15] 蔡国威,袁倩敏,梁健超,魏龙,蔡坚,丁志锋.广东连州风电场鸟类多样性及其对风机的响应.四川动物,2021,40(5):558-567.
- [16] Gaultier S P, Blomberg A S, Ijäs A, Vasko V, Vesterinen E J, Brommer J E, Lilley T M. Bats and wind farms: the role and importance of the Baltic sea countries in the European context of power transition and biodiversity conservation. Environmental Science & Technology, 2020, 54 (17): 10385-10398.
- [17] Escobar L E, Juarez C, Medina-Vogel G, Gonzalez C. First report on bat mortalities on wind farms in Chile. Gayana, 2015, 79(1): 11-17.
- [18] Pescador M, Ramírez J I G, Peris S J. Effectiveness of a mitigation measure for the lesser kestrel (Falco naumanni) in wind farms in Spain. Journal of Environmental Management, 2019, 231; 919-925.
- [19] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2119-2127.
- [20] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 基于 MSPA-MCR 模型的太湖流域生态安全格局构建与调控. 生态学报, 2022, (5): 1-13. (2021-11-17). https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx? dbcode = CAPJ&dbname = CAPJLAST&filename = STXB2021111600M&uniplatform = NZKPT&v = mAykE0i2yY0KPYsYcIBipldHQ_v8Bl9JIPpjShfexSS7ymfmeTzaS3frswdkyoCV.
- [21] 李怡, 赵小敏, 郭熙, 周丙娟, 黄心怡, 易丹, 丁徽. 基于 InVEST 和 MCR 模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化. 自然资源学报, 2021, 36(11): 2980-2994.

- [22] 黄木易,岳文泽,冯少茹,蔡接接.基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化.自然资源学报,2019,34(4):771-784.
- [23] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 刘金兰, 张雪, 赖小君. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建. 农业机械学报, 2021, 52(3): 275-284.
- [24] 刘祥平, 张贞, 李玲玉, 李明欣. 多维视角下天津市生态网络结构演变特征综合评价. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1554-1562.
- [25] 汪勇政,李久林,顾康康,陆林.基于 MSPA-CIRCUIT 的城市绿色基础设施网络格局优化——以合肥市为例.生态学报, 2022, (5): 1-11. (2021-11-17). https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx? dbcode = CAPJ&dbname = CAPJLAST&filename = STXB2021111600 K&uniplatform=NZKPT&v=mAykE0i2yY0bR5_v8MGnbjao0DZEpPQp9IzHc908nulIK0ulzLIIM7UJ06SN7Sqg.
- [26] Fang S F, Gertner G, Wang G X, Anderson A. The impact of misclassification in land use maps in the prediction of landscape dynamics. Landscape Ecology, 2006, 21(2): 233-242.
- [27] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [28] 岳天祥, 叶庆华. 景观连通性模型及其应用沿海地区景观. 地理学报, 2002, 57(1): 67-75.
- [29] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于"重要性—敏感性—连通性"框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [30] 黄河, 余坤勇, 高雅玲, 刘健. 基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建. 中国园林, 2019, 35(11): 70-75.
- [31] 高雅玲,黄河,李治慧,陈凌艳,何天友,郑郁善.基于 MSPA 的平潭岛生态网络构建.福建农林大学学报:自然科学版,2019,48(5):640-648.
- [32] Saura S, Pascual-Hortal L. Conefor Sensinode 2.2 user's manual. Lérida: University of Lleida, 2007.
- [33] 于成龙,刘丹,冯锐,唐权,郭春玲.基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建.生态学报,2021,41(1):290-301.
- [34] 李航鹤,马腾辉,王坤,谭敏,渠俊峰.基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. 生态与农村环境学报,2020,36(8):1036-1045.
- [35] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [36] 朱永可,李阳端,楼瑛强,周江,孙悦华.风力发电对鸟类的影响以及应对措施.动物学杂志,2016,51(4):682-691.
- [37] 王跃华. 风电场噪声、光影环境防护距离的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [38] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [39] 李琼雯, 李双, 曹铭昌, 徐海根. 钱江源国家公园黑麂(Muntiacus crinifrons) 生境适宜性评价及廊道设计. 生态与农村环境学报, 2021, 37 (6): 778-785.
- [40] 李恒凯, 刘玉婷, 李芹, 王秀丽. 基于 MCR 模型的南方稀土矿区生态安全格局分析. 地理科学, 2020, 40(6): 989-998.
- [41] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 基于"HY-LM"的生态廊道与生态节点综合识别研究. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.