徐昉 . 碳中和背景下风能发展对景观规划的影响 [J]. 风景园林，2022，29（5）：52-58.

碳中和背景下风能发展对景观规划的影响

Impacts of Wind Energy Development on Landscape Planning in the Context of Carbon Neutrality

徐昉
XU Fang

开放科学（资源服务）
标识码（OSID）

中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2022)05-0052-07
DOI：10.14085/j.fjyl.2022.05.0052.07
收稿日期：2021-12-07
修回日期：2022-03-06

徐昉 / 女 / 博士 / 北京林业大学园林学院讲师 / 研究方向为景观生态规划与生态修复
XU Fang, Ph.D., is a lecturer in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape ecological planning and ecological restoration.

摘要：能源转型是实现碳达峰与碳中和目标的必然路径，但发展风能等可再生能源也会造成土地利用冲突、生物多样性丧失、景观质量下降等问题。中国的景观规划中对风能发展的负面影响考虑不足，评估相关风险的方法缺少系统分析。以德国为例，系统分析了德国景观规划中风能利用的相关策略方法。研究发现德国景观规划在实现法定目标能源量要求的同时，能够兼顾自然保护和景观维护目标。首先采用情景假设方法，结合空间分析确定潜在利用区域；其次利用 AIGILaP 模型、问卷调查、眼动追踪等方法评估风能利用和景观规划目标的潜在冲突，得出自然保护导向下风力涡轮机空间布局的最优方案。德国景观规划经验为中国提供了新思路：1）在规划到实施的全生命周期中贯彻景观保护理念；2）从未来情景假设中反思当下发展困境；3）结合公众认知完善空间模型，让景观规划在解决风能发展问题的同时真正服务于人的需求。

关键词：碳达峰；碳中和；景观保护；AIGILaP 模型；眼动追踪；情景假设
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金（编号 BLX201942）

Abstract: Energy transformation is an inevitable path to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality. However, the development of renewable energy sources, such as wind energy, may cause problems such as land use conflict, biodiversity loss and landscape quality deterioration. In China's landscape planning, the negative impacts of wind energy development fail to be fully considered, and the methods for assessing relevant risks typically lack systematic analysis. Taking Germany as an example, this research systematically analyzes the strategies and methods for wind energy utilization in German landscape planning. It is found through the research that German landscape planning can well satisfy the statutory expected requirements for target energy volume while achieving its nature conservation and landscape maintenance goals. The research firstly adopts the scenario hypothesis method to identify potential utilization areas in combination with spatial analysis. After that, it adopts such methods as AIGILaP model, questionnaire survey and eye tracking to assess potential conflicts between wind energy utilization and landscape planning objectives, obtaining the optimal scheme for spatial layout of wind turbines under the guidance of nature conservation. The research believes that German landscape planning experience can provide the following new ideas for China: 1) implement the concept of landscape protection in the whole life cycle from planning to implementation; 2) reflect on the present development dilemma from future scenario hypothesis; 3) improve spatial models in combination with public cognition, so as to make landscape planning well serve the needs of people while solving the problem of wind energy development.

Keywords: carbon peaking; carbon neutrality; landscape conservation; AIGILaP model; eye tracking; scenario hypothesis
Fund Item: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. BLX201942)

1 研究背景

1.1 气候变化与“双碳”目标

随着人类步入工业化进程，大气中 CO_2 等温室气体的排放量不断增加，导致全球变暖、冰川融化、海平面上升等环境问题。自工业革命以来，大气中 CO_2 浓度从 280.00×10^{-6} 增加到 416.45×10^{-6} [1]。全球变暖会导致降水格局的剧烈变化以及极端天气的不断增多，人类赖以生存的自然环境正面临前所未有的威胁和挑战。2015 年《巴黎协定》呼吁将全球平均气温升幅较工业化前水平控制在 2 ℃以内 [2]。2018 年，联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）提出了“净零排放”的目标，即到 20 世纪末将全球气温上升幅度限制在 1.5 ℃以内。此外，为避免气候变化带来最坏影响，到 2100 年的气温升幅需控制在 1.0 ℃以内 [3]。气温升高 2.0 ℃、1.5 ℃和 1.0 ℃对应的大气 CO_2 浓度分别约为 450×10^{-6}、400×10^{-6} 和 350×10^{-6}，即全球将在 2070 年、2055 年、2040 年实现 CO_2 零排放 [4]。目前，减少 CO_2 等温室气体的排放、减缓全球气候变暖进程已成为全人类的共同目标。

中国是全球 CO_2 排放大国，预计 2030 年左右 CO_2 排放将达到峰值 11 亿 t [5]。2020 年 9 月 22 日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，力争 2030 年前使 CO_2 排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。中国提出的碳达峰、碳中和愿景，是党中央、国务院统筹国际、国内 2 个大局作出的重大战略决策，影响深远，意义重大。

1.2 能源转型是实现碳中和的必要途径

全球能源结构经历了 2 次转型：第一次转型实现了从木材到煤炭的能源革命；第二次转型完成了从煤炭到石油、天然气的转变。如今，人类活动造成的 CO_2 排放主要来自化石燃料消耗，人类正在经历从传统化石燃料到可再生能源的第三次重大转变。

实现碳达峰、碳中和目标的关键在于能源转型，用清洁能源替代化石能源。2014 年，习近平提出了针对中国能源安全战略的“能源革命”。《中国能源革命十年展望（2021—2030）》指出，中国将有序推动形成“双循环”新发展格局和绿色能源体系，“十四五”期间努力推动非化石能源和天然气等清洁能源需求量占比合计超过 30%、煤炭需求量占比降至 50% 以下。由此可以看出，可再生能源的发展是能源转型的重点方向。2021 年，习近平主席在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上的主旨讲话中提道：为推动实现碳达峰、碳中和目标，中国将陆续发布重点领域和行业碳达峰实施方案和一系列支撑保障措施，构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系。中国将持续推进产业结构和能源结构调整，大力发展可再生能源，在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风电场、光伏基地项目 [6]。

可再生能源是能源转型的基础，包括风能、太阳能、水能、生物质能、地热能等非化石能源 [7]。其中，太阳能、风能在中国能源消费总量中的增长速度最快。通过减少化石燃料消耗、构建绿色低碳能源体系实现能源转型，是降低 CO_2 排放、实现全球碳中和的重要举措之一。然而在能源转型过程中基础设施建设的规模、速度以及对土地的需求意味着社会、环境和经济三者优先级的竞争，会对生态环境造成负面影响。

2 碳中和背景下风能发展的负面影响

风能发展既是一个解决方案，也是一个问题。大力发展风电产业可以减少 CO_2 排放，有助于保护气候，从而保护受气候变化威胁的生物多样性。同时，风能是需要大规模开发的重要可再生能源之一，其开发利用和能源转化过程对土地利用、物种和栖息地保护、景观质量等方面都会造成一定负面影响 [8-9]。

2.1 土地利用冲突

从空间影响上来说，陆上风电场的开发建设主要包含场区道路、风机基础、升压站、输电线路等，会占用周边大量土地资源从而对地表植被造成破坏，引发土地利用冲突。风能等可再生能源的能量密度通常低于其他不可再生能源 [10]，往往需要占用更多的土地。例如建设一个总装机容量为 200 MW 的陆上风电场需要占用 36 km^2 的土地放置风力涡轮机 [11]。

2.2 物种栖息地破坏

风能对动物的影响可以分为直接影响和间接影响，直接影响指的是动物与风力发电设备碰撞造成的死亡率，间接影响指是破坏栖息地和干扰迁移路线。例如，建在鸟类栖息地或迁徙路线周边的风电场对鸟类可造成一定的影响，主要表现为鸟类与风机或电线相撞而导致死亡、受伤，风机和电线阻碍鸟类迁徙等 [12]。德国勃兰登堡鸟类保护中心的调查结果显示，鸟类、蝙蝠等动物都是与风力涡轮机系统碰撞的受害者 [13]。

2.3 景观质量下降

在过去的 20 年里，风能等可再生能源的大规模扩张导致自然景观和文化景观发生了显著变化，也引起人们对景观变化的重视。风电站会引起大规模视觉影响，对景观的特殊性尤其是传统的乡村休闲景观产生负面影响，也会对具有历史文化意义的景观和建筑物造成视觉影响 [14]。如果在人口稠密地区大规模部署风力涡轮机，造成的视觉污染会导致公众对风电发展的接受程度低 [15]。

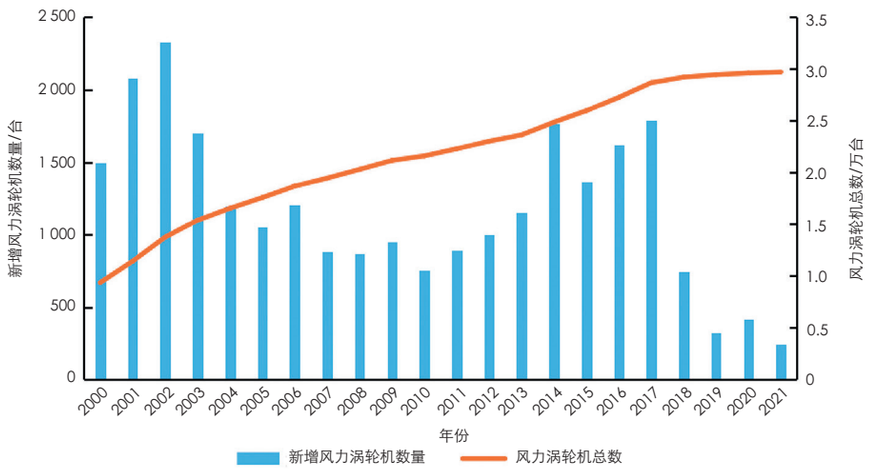
3 德国景观规划应对风能发展影响的策略

2020 年德国陆上和海上风能的总发电量超越核能和褐煤，占电力生产总量的 27%[16]。截至 2020 年底，德国陆上风力发电机组总数为 29 608 台，陆上风能总装机容量为 54 938 MW（图 1）。德国已将风能等可再生能源推广作为能源转型的核心支柱，并设定了必须实现的、法定的目标能源量，景观规划的编制要以这一法定目标为基础，平衡相关经济、技术和生态方面的价值目标。

3.1 情景假设——平衡目标的解决路径

可再生能源是德国最重要的电力来源之一。德国《可再生能源法》（德语：*Erneuerbare-Energien-Gesetz*, *EEG*）为可再生能源发展制定了具体目标：在 2035 年可再生能源占总发电量的比例达到 73%。所有可再生能源设施布局都要为实现这一目标服务。

然而，风能等可再生能源的发展会与自然环境和景观保护等方面发生冲



1

1 2000—2021 年德国每年新增风力涡轮机数量和风力涡轮机总数

Number of new wind turbines and total number of wind turbines in Germany each year from 2000 to 2021

表 1 风能利用的排除区域空间类别 [19]

Tab. 1 Spatial categories of excluded areas for wind energy utilization[19]

考虑要素	序号	空间类别
土地利用	1	住宅区及其周边 600 m 以内区域
	2	工商业区域及其周边 300 m 以内区域
	3	医疗区域及其周边 750 m 以内区域
	4	露营地和运动休闲区及其周边 400 m 以内区域
	5	湿地（面积≥ 10 hm^2）
	6	所有级别的河流，与一级河流和运河相距 50 m 的区域，与二、三级河流和运河相距 5 m 的区域
	7	内陆湖及其周边 5 m 以内区域
	8	空中交通管制系统（雷达和地面导航系统）及其周边 5 km 以内区域
	9	机场及其周边 1 760 m 以内区域
	10	交通基础设施（公路和铁路）、联邦高速公路周边 100 m 区域、其他道路周边 40 m 区域、铁路和缆车周边 150 m 区域
	11	架空电力线路及其周边 135 m 区域
	12	其他法律规定禁止进行风力涡轮机建设区域，包括军事训练区、地质灾害区、采矿破坏区、污水处理厂、堤防、港湾等
保护区	13	国家公园
	14	自然保护区
	15	生物圈保护区（Ⅰ、Ⅱ级区域）
	16	饮用水保护区和泉水保护区（Ⅰ、Ⅱ级区域）
地形	17	坡度 >30° 区域
对风能建设敏感的栖息地	18	自然和文化遗迹、受保护建筑群及其周边 800 m 区域
	19	森林（仅限特定类型，如防护林等）
	20	自然纪念碑
	21	受保护的鸟类和蝙蝠栖息地

突。根据德国《联邦自然保护法》（德语：*Bundesnaturschutzgesetz*）规定，景观规划的目标之一是“保护野生动植物、群落以及其栖息地”，同时还需要考虑“景观的多样性、独特性和美感以及自然景观的休闲价值”。因此，德国景观规划在预定的能源目标基础上，考虑风能发展与自然环境和景观保护的协调性，促进风能可持续发展的规划设计。

德国景观规划为实现 *EEG* 设定的目标能源量构建了不同的风能发展情景 [17]。利用情景假设考虑了不同驱动因素的影响，包括“效率”“负荷邻近度”和“自然保护”。“效率”和“负荷邻近度”是从能源经济角度制定的评价标准，“效率”主要考虑风速，以实现效率最大化为目标；“负荷邻近度”指风力发电厂与电力负荷中心的邻近程度，需要在选址时进行迭代计算，反映了风电产量与附近电力消耗之间的关系，邻近程度越高则运输产生的能源损耗越少。德国景观规划设定了 4 种风能发展情景，其中情景 A“效率”和情景 B“效率 / 负荷邻近度”是基于实现目标能源量的原则构建的；情景 A*“自然保护 / 效率”和情景 B*“自然保护 / 效率 / 负荷邻近度”则增加了对自然保护和景观维护（德语：Naturschutz und Landschaftspflege）的考虑。

3.2 空间布局——潜在区域的整体评估

德国景观规划在情景假设的基础上，通过整体空间评估确定风能发展潜在区域，并评估风能利用引发的潜在冲突，最后通过情景比较得出风能发展的合理方案。为了确定风能发展的潜在区域，首先需要确定不适合进行风力涡轮机建设的排除区域，这些排除区域综合考虑了自然保护和景观维护的因素。此外，不同位置由于风速差异，需要选择不同风力涡轮机系统。

3.2.1 生成排除区域

排除区域的确定分为 2 个步骤：1）将法律规定（如住宅区）或技术上（如坡度 >30° 的区域）不适合进行风能建设的区域排除；2）在全国统一地理数据的基础上，通过 GIS 技术将排除区域类别录入空间数据库 [18]。

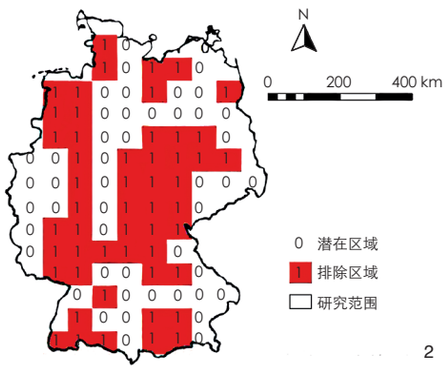
首先，*EEG* 统一规定了排除区域的具体类型，共 21 种（表 1）。其中，一些空间类别及其周边区域需要根据法律规定和技术要求进行排除；另一些类别需要进行个案评估，例如表中空间类别 18~21 由于没有全国可用的地理数据库，并没有被确认为排除区域。

其次采用 GIS 技术在全国范围建立分辨率为 25 m 的基本网格，根据各空间类别的保护距离划分缓冲区，并将各排除区域及其保护距离聚合，构成全国所有排除区域的空间分布。将空间分布图中单元格赋值为 0 和 1，0 代表可以被风力涡轮机使用的潜在区域，1 代表排除区域，最终得到的潜在区域作为计算风能发展方案的基础（图 2）。

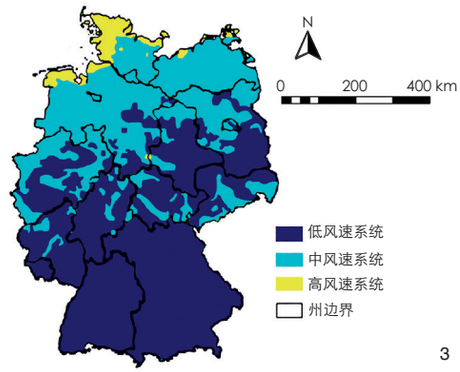
3.2.2 确定风力涡轮机技术参数

在情景构建过程中，需要根据 2035 年能源目标进行风力涡轮机系统参数假设，包括功率密度、转子直径、功率、轮毂高度以及总高度等。根据不同位置的年平均风速选择风力涡轮机类型，例如平均风速 <7.5 m/s 的位置使用低风速系统，平均风速在 7.5~8.5 m/s 则采用中风速系统，平均风速 >8.5 m/s 时使用高风速系统（图 3）。3 种风力涡轮机系统功率密度分别为 220 W/m²、285 W/m² 和 350 W/m²，输出功率范围约为 3 MW~5 MW，转子直径统一假设为 135 m，从而保证冲突风险评价结果的可比性（表 2）。

在确定各种法律、政策、技术因素导致的风能应用排除区域，以及根据不同位置的年平均风速选择不同功率的风力涡轮机后，风能发展的潜在区域和风力涡轮机的分布方案整体上得到确定。但这种潜在区域分布还比较宏观，风力涡轮机的具体选址还需要判定个别区域风能利用与自然保护、景观维护的冲突，同时需要考虑当地区域的公众认知评价。



2 德国风力涡轮机建设排除区域与潜在区域分布图 [20]
Distribution of excluded and potential areas for wind turbine construction in Germany[20]



3 基于德国多年平均风速的风力涡轮机空间分布 [21]
Spatial distribution of wind turbines based on mean wind speed for years in Germany[21]

表 2 基于不同风速的风力涡轮机系统参数 [22]
Tab. 2 Wind turbine system parameters based on different wind speeds[22]

风力涡轮机系统	功率密度 / W · m^{-2}	转子直径 / m	功率 / MW	轮毂高度 / m	总高度 / m
低风速系统	220	135	3.15	160	227.5
中风速系统	285	135	4.08	135	202.5
高风速系统	350	135	5.01	110	177.5

表 3 AIGILaP 模型中的景观质量评价属性、标准与指标 [24]
Tab. 3 Evaluation attributes, standards and indicators for landscape quality in AIGILaP model[24]

属性	标准	指标
多样性	土地利用多样性	单位面积内土地利用类型数
	地形多样性	地形粗糙度
独特性	土地利用分布特征	单位面积内土地利用分布与典型文化景观类型的偏差
	历史延续性	1996 年以来的景观变化程度分级
美感	美景度	保护区美景度
休闲价值	近距离休闲的潜在需求	到居住区的距离
	远距离休闲的潜在价值	是否有保护区
近自然度	近自然化土地利用	土地利用类型的近自然程度
	干扰度	是否存在听觉和视觉障碍

3.3 空间分异——潜在冲突的全面考量

《联邦自然保护法》规定了德国景观规划的目标，包括生物多样性、景观多样性、独特性和美感以及休闲价值等方面 [23]。风能利用与上述目标之间存在一定的冲突，基于 4 种情景假设评估发生冲突的风险，可以在风险较低的地方更好地实现风能利用和景观保护之间的平衡，评估结果可以作为 4 种情景的综合评价标准之一 [22]。

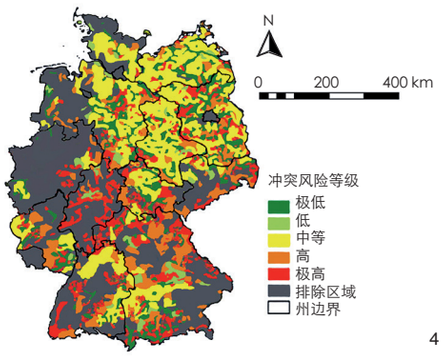
风能利用与景观规划目标的潜在冲突评估主要分为 2 步：首先基于预期迭代地理指标景观偏好模型（德语：Antizipativ-iteratives Geo-Indikatoren-Landschaftspräferenzmodell, AIGILaP）进行空间分析，即专家打分的方法，然后在此基础上面向公众采取问卷调查和眼动追踪方法补充非专业人士评价，使整体评价结果更为客观。

3.3.1 基于 AIGILaP 模型的潜在冲突评价

AIGILaP 模型是基于 GIS 评价模块，结合专家知识，利用现有的土地利用数据以及其他环境信息来评价景观质量的模型 [23]。该模型基于 25 m × 25 m 的网格单元，通过 GIS 从景观多样性、独特性、美感、休闲价值和近自然度多方面进行评价。评价模型主要由属性、标准与指标 3 个层次构成（表 3），通过具体标准表征多样性、独特性、美感、休闲价值和近自然度 5 种属性，选取可测量的景观特征作为评价指标，对风力涡轮机引起的潜在冲突进行评价。

为了充分识别风能利用引发的潜在冲突，有必要进一步拓展现有空间类别，根据特定的空间特性（用途、地形等）进行评估。例如景观保护区（德语：Landschaftsschutzgebiete）具有较高的休闲和景观价值，但景观保护区外的区域也可能具有较高的价值，因此需要全面考虑景观质量、景观可达性或与人口稠密地区的邻近程度等因素 [25]。

总体而言，德国景观规划从 2 个方面进行了风能利用潜在冲突评价：一方面，基于多样性、独特性、美感和休闲价值以及近自然度属性评价景观质量；另一方面，根据景观位置的特殊性进行补充，处于暴露位置（即海拔明显高于周围环境如山峰、斜坡）的景观通常风力资源较好，但对风力涡轮机引起的环境变化更敏感。因此在冲突风险评估中需



4 基于 AIGILaP 模型的风力涡轮机冲突风险等级 [26]
Wind turbine conflict risk levels based on AIGILaP model[26]

要考虑这些暴露位置的敏感性，在数字地形模型（Digital Geomorphic Model, DGM）基础上，计算每个像元与周围 10 km 范围内平均高程的差值，如果像元高程高于平均值 50 m 以上，则认为是暴露位置，其可见性与冲突风险增加的可能性都较高。

根据完善后的 AIGILaP 模型计算得到所有空间单元的潜在冲突，并结合特殊位置的敏感性，叠加得到全国范围内风能发展潜在冲突风险等级分布，按风险高低分为 5 级，其中 1 级代表潜在冲突风险极低，5 级代表潜在冲突风险极高（图 4）。

3.3.2 基于问卷调查和眼动追踪的风力涡轮机影响评价

AIGILaP 模型代表专家（景观规划人员等）观点，即专家基于专业知识对景观质量的评估，存在一定局限性，为了结合非专业人士的评价，德国景观规划以公众（包括专业及非专业人士）为研究对象，通过认知心理学方法对风力涡轮机的潜在影响进行评估 [27]。

德国景观规划主要运用问卷调查与眼动追踪方法获取公众对风力涡轮机影响下的“代表性景观”评价 [28]。首先在风能发展潜在区域中选取均匀分布、具有不同地形特征，且目前没有风力涡轮机的代表性景观，然后将经过可视化处理的景观照片（布有风力涡轮机）和没有风力涡轮机的照片进行对比，对观察者的反馈进行统计分析。

问卷调查要求观察者从多样性、独特性、美感和近自然度维度打分 [29]。根据语义差异量表，选取 8 个形容词描述这 4 个评价标准，即用“多变的”和“多样化的”描述多样性，“独特的”和“有特色的”描述独特性，“美丽的”和“有美感的”描述美感，“自然的”和“原始的”描述近自然度。根据知觉恢复量表（Percieved Restorativeness Scale, PRS）对景观休闲价值打分 [30]，指标包括远离（being away）、延展性（extent）、魅力性（fascination）和相容性（compatibility）[31]。

然而，通过问卷调查法或者图片评分法进行的景观质量评价，仅能反映被试者主观感知的结果，总体上缺乏更为客观的解读维度 [32]。将眼动追踪技术用于景观质量评价为传统主观评价方式提供了客观数据的支撑，能够更加客观地反映个体的感知过程。德国北莱茵 - 威斯特法伦州的城市东威斯特法伦 - 利珀（Ostwestfalen-Lippe）在景观规划中利用眼动追踪仪记录被试者观察景观照片时的注视行为 [33]①，实验选取首次注视时间、注视点数量、注视点持续时间、注视次数和注视热点图等指标衡量被试者的视觉关注点，以得出的客观数据分析被试者的心理活动和感知过程。眼动行为反映了观察者对视觉信息的选择，能够用于推断其心理认知过程 [34]。注视时间越长表明该对象越能吸引被试者的兴趣，在景观领域的眼动研究中多作为衡量被试者注意力分配的指标 [35]。眼动追踪研究证明，观察者对于景观中带有风力涡轮机的感兴趣区域（area of interest, AoI）注视时间更长，而对于 AoI 以外的注视时间明显缩短，表明风力涡轮机的存在会吸引观察者的注意力，造成视觉冲击 [35]。

3.4 情景构建——以自然保护为导向的风能发展情景

综合评估结果显示了不同情景下风力涡轮机的空间分布及数量、冲突风险（图 5）。情景构建方法将自然保护和景观维护作为决定风力涡轮机空间分布的驱动因素之一，4 种情景中有 2 种（情景 A*、B*）将自然保护和景观维护作为主要驱动力，而其他 2 种只考虑能源经济驱动力。通过情景预测，可以深入了解每个驱动因素的影响，提供了驱动因素之间的权衡方法。

与没有考虑自然保护和景观维护的情景 A、B 相比，情景 A*、B* 的冲突风险均有所降低。在相同的能源量目标（2035 年达 269 TWh）下，将自然保护和景观维护作为主要驱动力（最高优先级），使情景 A*、B* 的冲突风险分别降低了 26.1%、29.8%，而与此同时，只需要增加相对较少的风力涡轮机数量（情景 A* 增加 12.5%；情景 B* 增加 11.9%）。

4 种情景中，情景 A* 中风力涡轮机引起的潜在冲突最小。在相同能源目标下，情景 A* 所需风力涡轮机数量仅比情景 A 多 2 265 个。与情景 B（21 254 个风力涡轮机）和情景 B*（23788 个风力涡轮机）相比，情景 A* 的风力涡轮机明显少很多。

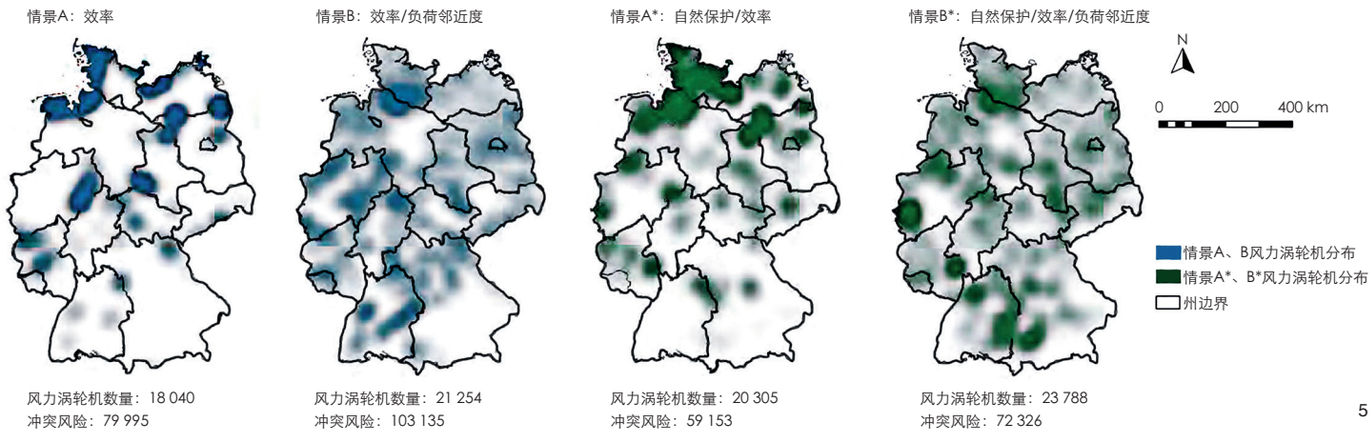
考虑负荷邻近度的情景 B 比考虑自然保护和景观维护的情景 A* 对低风速和中风速位置的压力更大。在负荷邻近度与自然保护相结合的情景（B*）中，使用低风速风力涡轮机的趋势增加，这表明与负荷邻近度相关的 2 种情景（B、B*）中，风能发展引起的潜在冲突较大。

总体而言，在德国 2035 年目标能源量为 269 TWh 的前提下，与自然保护和景观维护相适应的风能建设方案更合适。

4 建议

目前中国风景园林领域对于风能已有一定研究，例如社区低影响景观技术在风能利用方面的实践 [37]，但重点探讨的是小尺度层面景观营建技术手段，对风能利用的负面影响研究较少，景观和视觉影响评估方法缺失。总体而言，景观规划中尚未针对风能发展对环境的影响及应对策略形成较完善的理论及实践体系。

德国景观规划中关于风能发展的情景假设及与自然保护和景观维护相关的评估方法对中国景观规划有一定参考价值。这些假设情景预测了未来可能的风力涡轮机空间分布，并模拟了不同驱动因素对风能利用冲突风险的影响。景观规划需要同时考虑能源量（如风速）、负荷邻近度、自然保护和景观维护等重要因素。本研究针对中国景观规划现状，提



5 4 种情景中德国风力涡轮机的空间分布 [36]
Spatial distribution of wind turbines in Germany under four scenarios[36]

出 4 点建议。

4.1 从规划到实施的理念贯彻

通过情景假设方法可以更好地展示不同评估参数对于未来风力涡轮机空间分布的影响，并确定以自然保护为导向的风能发展可能性。情景假设表明，除了技术和经济方面，自然保护和景观维护问题同样重要，并可以与风能发展目标兼容。在国家层面的风能规划决策中，应该考虑自然保护和景观维护问题，并对风能发展引起的潜在冲突进行有效评估，这也是平衡经济、技术以及土地利用冲突、自然保护等问题的重要途径。

4.2 从未来到当下的回望反思

风能发展的情景假设和空间评估结果预测了未来的风力涡轮机数量，通过与现有风力涡轮机数量的比较，可以从自然保护和景观维护角度确定可能的合理分配方案。另外，AIGILaP 模型等评估工具也使得全国范围内的风能发展规划成为可能。对现状的比较反思需要全面、可靠的数据支撑，通过对比风力涡轮机分布现状和预测的情景方案，能够明确当前存在的问题和解决方案。

4.3 从专家到公众的全面评价

新能源应用和景观规划，最终都是服务于人的需要。德国景观规划在利用 AIGILaP 模型，根据专家知识进行风能利用冲突评价的同时，利用问卷调查和眼动追踪方法收集其他专业和非专业人士的认知评价，特别关注景观的整体审美价值和休闲功能。德国景观规划经验表明，评估方法必须更多地从专家和非专业人士等多方面考虑，从而识别不同群体的景观要求，并使得景观评价中“多样性”“独特性”“美感”等属性更具可测度性。另外，还可通过构建公众可理解的评估方法、标准和价值体系等方式来改进风能发展规划决策。

注释 (Note)：

① 注视是指将眼睛的中央窝对准某一物体的时间超过 100 ms，被注视的物体成像在中央窝上，获得充分的加工而形成清晰的像，见参考文献 [33]。

参考文献 (References)：

[1] TISEO I. Global Atmospheric Concentration of Carbon Dioxide 1959-2021[EB/OL]. (2022)[2022-04-18]. https://www.statista.com/statistics/1091926/atmospheric-concentration-of-co2-historic/.
[2] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Decision 1/CP.21: Adoption of the Paris Agreement[EB/OL]. (2015)[2022-03-07]. https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf.
[3] HANSEN J, KHARECHA P, SATO M, et al. Assessing “Dangerous Climate Change”: Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature[J]. PloS one, 2013, 8(12): e81648.
[4] MASSON-DELMOTTE V. Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Contextof Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
[5] ZOU C N, XIONG B, XUE H Q, et al. The Role of New Energy in Carbon Neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 480-491.
[6] 卢纯 . 开启我国能源体系重大变革和清洁可再生能源·创新发展新时代：深刻理解碳达峰、碳中和目标的重大历史意义 [J]. 人民论坛·学术前沿，2021（14）：28-41.
[7] ELLABBAN O, ABU-RUB H, BLAABJERG F. Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 748-764.
[8] FERNANDEZ-CAMPO M, RODRÍGUEZ-MORALES B, DRAMSTAD W E, et al. Ecosystem Services Mapping for Detection of Bundles, Synergies and Tradeoffs: Examples from Two Norwegian Municipalities[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 283-297.
[9] KIENAST F, HUBER N, HERGERT R, et al. Conflicts Between Decentralized Renewable Electricity Production and Landscape Services: A Spatially-Explicit Quantitative Assessment for Switzerland[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 397-407.
[10] BRIDGE G, BOUZAROVSKI S, BRADSHAW M, et al. Geographies of Energy Transition: Space, Place and the Low-Carbon Economy[J]. Energy Policy, 2013, 53: 331-340.
[11] FISCHER G, PRIELER S, VAN VELTHUIZEN H, et al. Biofuel Production Potentials in Europe: Sustainable Use of Cultivated Land and Pastures, Part II: Land Use Scenarios[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34: 173-187
[12] 崔怀峰 . 云南省风电开发对鸟类的影响研究 [D]. 昆明：云南大学，2013.
[13] BOSE A, DÜRR T, KLENKE R A, et al. Collision Sensitive Niche Profile of the Worst Affected Bird-Groups at Wind Turbine Structures in the Federal State of Brandenburg, Germany[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3777.
[14] PASQUALETTI M, STREMKE S. Energy Landscapes in a Crowded World: A First Typology of Origins and Expressions[J]. Social Science Research, 2018, 36: 94-105.
[15] KALDELLIS J K. Social Attitude Towards Wind Energy Applications in Greece[J]. Energy Policy, 2005, 33(5): 595-602.

[16] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2017[R]. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018.
[17] KEMFERT C. Die Energiewende in Deutschland: Strategische Entscheidungen für die Zukunft[J]. GWP–Gesellschaft. Wirtschaft. Politik, 2018, 67(1): 19-20.
[18] AL-Pro. Kurzfassung des Überarbeiteten Endberichts zur Windpotenzialstudie Saarland[R]. Saarbrücken: Saarländische Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr, 2011.
[19] LÜTKEHUS I, SALECKER H, ADLUNGER K. Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des Bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung[R]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2013.
[20] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI). Räumlich Differenzierte Flächenpotentiale für Erneuerbare Energien in Deutschland[R]. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, 2015.
[21] Deutscher Wetterdienst (DWD). 200 m x 200 m Rasterdaten der Mittleren Jährlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m bis 100 m Höhe (in 10 m Stufen) und Weibullparameter für Deutschland[R]. Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2014.
[22] KÖHLER B, PREIß A. Erfassung und Bewertung des Landschaftsbildes. Grundlagen und Methode zur Bearbeitung des Schutzguts, Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft in der Planung[J]. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, 2000, 20(1): 1-60.
[23] ROTH M. Landschaftsbildbewertung in der Landschaftsplanung. Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Validierung von Verfahren zur Bewertung des Landschaftsbildes durch internetgestützte Nutzerbefragungen[M]. Berlin: Rhombos-Verlag, 2012.
[24] STEMMER B, PHILIPPER S, MOCZEK N. Die Sicht von Landschaftsexperten und Laien auf Ausgewählte Kulturlandschaften in Deutschland–Entwicklung Eines Antizipativ-Iterativen Geo-Indikatoren-Landschaftspräferenzmodells (AIGILaP)[M]. Wiesbaden: Springer VS, 2019.
[25] GERHARDS I. Die Bedeutung der Landschaftlichen Eigenart für die Landschaftsbildbewertung. Dargestellt am Beispiel der Bewertung von Landschaftsbildveränderungen Durch Freileitungen[J]. Culterra, 2003, 33: 238.
[26] Bundesamt für Naturschutz(BfN). Erneuerbare Energien Report[R]. Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz(BfN), 2019: 44.
[27] KÜHNE O. Landschaft in der Postmoderne. Das Beispiel des Saarlandes[M]. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006.
[28] SCHMIDT C, VON GAGERN M, LACHOR M, et al. Landschaftsbild und Energiewende. Band 1: Grundlagen[R]. Dresden: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018: 266.
[29] HARTIG T, KAISER F G, BOWLER P A. Further Development of a Measure of Perceived Environmental Restorativeness[M]. Uppsala: Institutet för Bostads-och Urbanforskning, 1997.
[30] JOOS M, RÖTTING M, VELICHKOVSKY B M. Spezielle Verfahren I: Bewegungen des Menschlichen Auges: Fakten, Methoden und Innovative Anwendungen[M]. Berlin: De Gruyter Mouton, 2008: 142-168.
[31] 王欣歆，吴承照，颜隽 . 中文版知觉恢复量表 (PRS) 在城市公园恢复性评估中的实验研究 [J]. 中国园林，2019，35（2）：45-48.
[32] 齐童，王亚娟，王卫华 . 国际视觉景观研究评述 [J]. 地理科学进展，2013，32（6）：975-983.
[33] 刘凌汉，吴美阳，马艺萌，等 . 眼动追踪应用于景观领域的研究综述 [J]. 西部人居环境学刊，2021，36（4）：125-133.
[34] 邓铸 . 眼动心理学的理论、技术及应用研究 [J]. 南京师大学报 (社会科学版)，2005（1）：90-95.
[35] 赵莹，林家惠，刘逸 . 基于眼动实验的旅游地景观视觉评价研究：以珠海市唐家古镇为例 [J]. 人文地理，2020，35（5）：130-140.
[36] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit(BMU). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und Global[R]. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012: 345.
[37] 王天赋，罗杰威 . 国外生态村低影响景观生态技术实践可再生能源景观营造 [J]. 建筑节能，2016，44（6）：73-77.

图表来源 (Sources of Figures and Tables)：

图 1 由作者根据德国联邦风能协会统计数据绘制；图 2～5 分别引自参考文献 [20][21][26][36]；表 1～3 分别由作者根据参考文献 [19][22][24] 绘制。

（编辑 / 李清清）