



魏雨萌,宋思远,王玉华.北京官厅风电场景观视觉影响评价与优化[J].中国农业大学学报,2026,31(03):248-265.

WEI Yumeng, SONG Siyuan, WANG Yuhua. Landscape visual impact assessment and optimization of Guanting Wind Farm in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03):248-265.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.20

北京官厅风电场景观视觉影响评价与优化

魏雨萌¹ 宋思远² 王玉华^{3*}

(1. 中国农业大学 园艺学院, 北京 100193;

2. 中国人民大学 公共管理学院, 北京 100872;

3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 为全面评估风电设施建设对周边环境的影响,并对后续更新改造提出优化方案,针对风电场的景观视觉影响,以北京官厅风电场为研究区域,根据层次分析法,运用景观视觉敏感度和景观视觉量等指标构建了景观视觉影响评价体系,通过开放数据平台、遥感与地理信息系统、专家打分法和德尔菲法获取了相关数据,分别从全域尺度和局域尺度进行了综合评定。结果表明:1)规则式风电场布局相较于不规则式,其景观视觉影响程度较低,距离风电场越近,所受视觉冲击越显著;2)官厅风电场5 km缓冲区内,景观视觉影响程度较高,其中风电场包络矩形正视方向是重点影响区域;3)风机对官厅风电场关键区域的水体景观、村落景观和道路景观均产生了较大影响,与陆地相比风机对水体的视觉影响更为明显,平行经过风电场的道路所受视觉影响比垂直经过的道路更明显;4)官厅风电场景观视觉可从多个方面进行整体提升与优化,包括构筑水体与湿地生态脉络、优化农田林网、连接道路景观、重构滨水景观和营造风电场景观等,以减轻官厅风电场对周边环境的影响,发挥其独特的景观效果。本研究可为风电场景观视觉影响的科学评价与优化实践提供参考。

关键词 能源景观; 风电场; 视觉影响评价; GIS; 空间分析; 优化路径

中图分类号 {X828}

文章编号 1007-4333(2026)03-0248-18

文献标志码 A

Landscape visual impact assessment and optimization of Guanting Wind Farm in Beijing

WEI Yumeng¹, SONG Siyuan², WANG Yuhua^{3*}

(1. College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Public Administration and policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To comprehensively assess the impact of wind power facility construction on the surrounding environment and propose optimization solutions for future upgrades and retrofits, this study investigates the landscape visual impact of wind farms, taking the Beijing Guanting Wind Farm as the study area. Based on the Analytic Hierarchy Process, the landscape visual impact evaluation system was constructed using indicators such as landscape visual sensitivity and landscape visual magnitude. Relevant data were obtained through open data platforms, remote sensing and geographic information systems, expert evaluation method, and Delphi method. A comprehensive evaluation was conducted at both global and local scales. The results showed that: 1) Compared to irregular wind farms layout, regular wind farms layout has a lower degree of landscape visual

收稿日期: 2025-05-15; 接受日期: 2025-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101122); 国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目(32161143029); 中国农业大学2115人才工程资助项目(2017025)

第一作者: 魏雨萌(ORCID:0009-0004-0040-0159), 硕士, 主要从事乡村景观规划设计研究, E-mail: 15176955020@163.com

通讯作者: 王玉华(ORCID:0009-0004-0119-0069), 副教授, 主要从事城镇与区域规划研究, E-mail: wangyuhua@cau.edu.cn

impact, and the closer they are to the wind farms, the more significant the visual impact they receive. 2) Within the 5 km buffer zone of Guanting Wind Farm, the landscape visual impact is relatively high, with the frontal direction of the wind farm Enclosure Rectangle being the key affected area. 3) Wind turbines have a significant impact on the water, village and road landscape of the key areas of the Guanting Wind Farm. Compared with the land, the visual impact of the wind turbines on the water bodies is more obvious, and the visual impact on roads passing parallel to the wind farm is more significant than those passing vertically. 4) The landscape of Guanting Wind Farm can be improved and optimized from multiple aspects, including building ecological networks of water bodies and wetlands, optimizing networks of farmlands and forests, connecting road landscapes, and reconstructing waterfront landscapes, to reduce the impact of Guanting Wind Farm on the surrounding environment. This study can provide a reference for the scientific assessment and optimization practices of landscape visual impacts in wind farms.

Keywords energy landscape; wind farms; visual impact assessment; GIS; spatial analysis; optimization path

中国的风能利用起源于20世纪90年代,随着风电机组逐渐临近使用年限,早期建设的风电场问题逐渐显露,其对区域景观环境的影响也日益显现^[1]。风电项目的建设涉及不同尺度、不同类型的景观空间,且与周围的自然和人文景观形成强烈对比,改变了原有的景观结构和空间秩序^[2],破坏了景观的整体性和连贯性^[3],对视觉效果造成巨大干扰。为在后续更新建设中对其进行准确评估并加以改善,需要对风电场产生的景观视觉影响^[4]进行深入分析。

国内相关研究中,鲜有从视觉影响角度探讨能源设施对景观环境质量影响的报道,缺乏系统、科学的能源景观视觉影响评价规范^[5-7]。国外相关研究较多,但未能有效平衡公众主观评价与客观指标数值,公众对景观视觉影响的评价持不同意见。因此,需要一套全面的评价指标、有效的评估方法。

风电能源设施视觉评价现有研究中,其内容主要涉及风电场景观的可视性评价^[8-10]、影响评估^[11-14]和公众感知^[15-19]3个方面。评价方法主要包括详细描述法、公众偏好法和景观综合分析法。前2类方法在应用过程中均无法较好地处理主客观关系,景观综合分析法则试图弥补这2类方法的不足,即从主客观综合的角度进行评价,但仍有改进空间。

本研究拟基于北京官厅风电场景观视觉影响评价,将主观评价与景观客观特征相结合,共同构成评价体系,对风电场的视觉影响进行量化分析,旨在得出全面的评价结果并提出优化路径,以期为官厅风电场景观规划与区域可持续发展提供理论支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域

北京官厅风电场一期项目风机共33台,占地面积约为15 km²,风机总高约100.5 m,位于怀来县官厅水库旁,如图1所示。场地主导风向为东北方向,属于陆地平原型风电场。一期项目已超过15年使用期,是正面临改造升级的风电场之一^[20]。因此,对其进行视觉影响分析评价^[21]对提升综合发展效率、提高新质生产力以及优化整体景观效果具有推动作用。

在能源设施中,风电场因其“高、大、动、密”四项基本特征,成为具有代表性的类型之一。百米级塔筒与叶片使风机在多数地形中成为新的视觉制高点,远超出原有农林和构筑物的高度,极易打破视觉平衡;单台风机扫风面积可达0.8~1.2 hm²,群体布置时形成连片布局,占据显著视觉权重,对周边景物造成遮挡;风机叶片持续旋转发生醒目的动态变化,与静态环境具有显著差异;为提高效率,风电场普遍采用紧凑间距,其密集分布会导致视觉重复频率高,与自然景观不协调。上述多种特征叠加,使风电场兼具“大尺度遮挡”与“动态干扰”双重属性,对传统以静态建筑物为核心的视觉影响评价方法提出了挑战。

本研究将风电场作为一个整体,按风机布局定义包络矩形,其中矩形的长边由距离最远的2个风机A1和A2决定,随长边分别向两侧平移至最远点风机B1和B2构成矩形的宽。在视觉影响分析中将以此风电场的包络矩形为中心,依据太阳视角原理,确定此风电场人眼视觉可感知到的最远距离为12 km,则为官厅风电场视觉影响的范围,面积约783 km²,如图2所示。

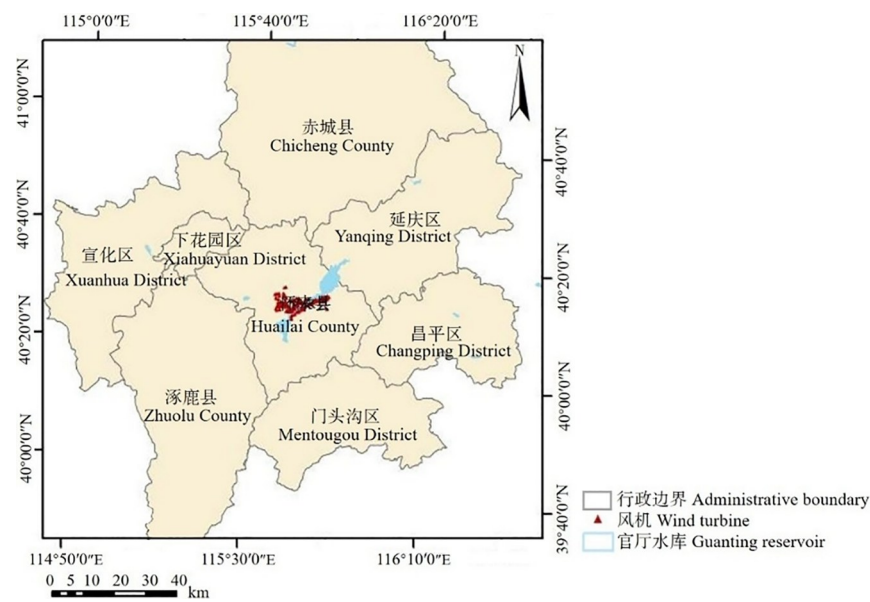
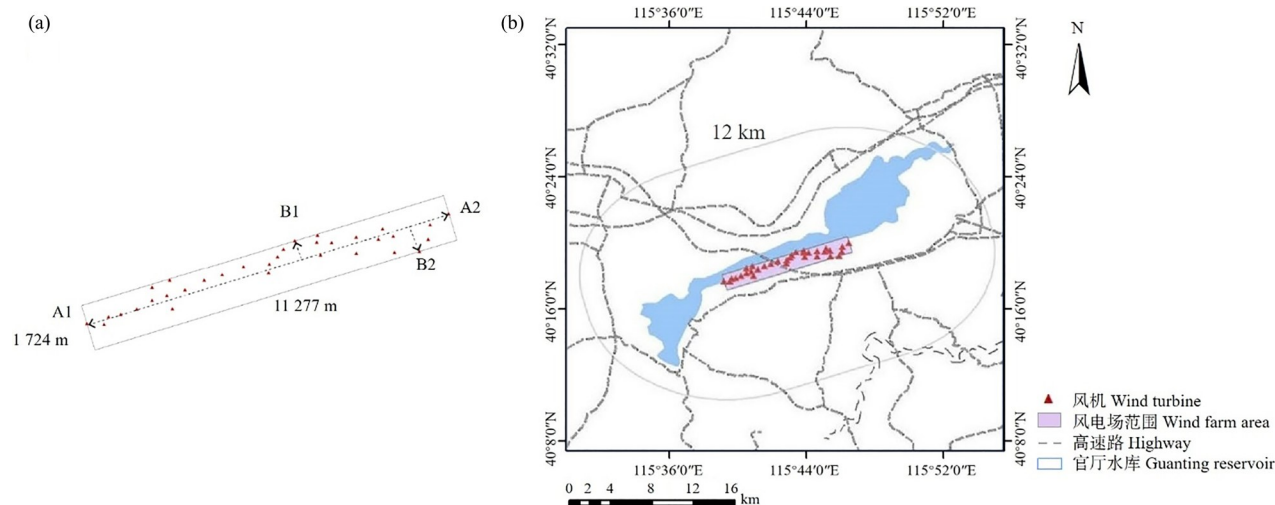


图1 官厅风电场区位图

Fig. 1 Location map of Guanting Wind Farm



A1和A2为长边方向距离最远的2台风机,B1和B2为短边方向距离最远的2台风机。
A1 and A2 are the two most distant wind turbines in the long-edge direction, B1 and B2 are the two most distant wind turbines in the short-edge direction.

图2 官厅风电场包围矩形(a)及研究范围(b)

Fig. 2 Enclosure rectangle of Guanting Wind Farm (a) and research scope (b)

1.2 数据来源及处理

1.2.1 矢量数据

1)行政边界矢量数据。从资源环境科学与数据中心发布的数据中,获取北京市和张家口市的行政区划边界数据。

2)道路矢量数据。来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/main.do?method=index>),并从BBBike.org网站(<https://www.bbbike.org/>)

中补充了乡村街道数据。

3)水体矢量数据。水体边界数据来自国家基础地理信息中心发布的1:100万地形数据。

4)建筑面数据。从天地图WGS84坐标系电子地图中下载详细建筑影像,选择下载级别18级,并对建筑面进行提取。

5)官厅风电场一期风机点位数据。来源于Open Street Map矢量地图提供的风机点坐标,并筛

选出一期风电场点位,共计33台风机。

1.2.2 栅格数据

1) 高程数据。数据来源于ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D-30 m”(AW3D30),本研究采用V2.2数据版本,分辨率为30 m,高程精度为5 m。

2) 人口密度。来源于WorldPop数据库(<https://hub.worldpop.org/>)中国大陆人口统计2021(100 m精度)。

3) 植被分布。来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)中国10 m逐年NDVI最大值数据集(2021)。

1.2.3 问卷数据采集

在景观视觉影响评价中,由于人们对于视觉

影响的主观感受因人而异且难以量化,此类研究较难获得全面且准确的数据。本研究通过问卷调查以得到更加真实可靠且具有即时性的数据,用于分析人们对官厅水库地区风电景观的视觉感受。

如图3所示,问卷依据实地调研的相关视频和照片等素材,获得官厅风电场景观现状,拟从环境对比度、植被覆盖丰富度和毗邻风景美观度3个因素对其醒目性进行综合评分。通过德尔菲法多次对评分标准进行调整,最终评分标准见表1,并结合专家打分法^[22-23]获得数据。评价者选择专业教授15名,风景园林和城乡规划专业学生65名,非相关专业人员40名,共发放问卷120份,其中回收有效问卷102份,有效率为85%。



图3 官厅风电场实地调研相关照片

Fig. 3 Photos related to field research of Guanting Wind Farm

表1 问卷评分标准

Table 1 Questionnaire scoring standards

因素 Factor	评价标准 Evaluation criteria	得分 Score
环境对比度 Environmental contrast	丰富的色彩组合;在土壤、岩石、植被和水体中有愉悦的色彩对比;风电设施与环境相融合	4~5分
	色彩有一定变化;在土壤、岩石、植被和水体中存在色彩对比;风电设施与环境存在色彩对比	2~3分
	色彩变化较少;在土壤、岩石、植被和水体中色彩对比比较小;风电设施与环境色彩对比强烈	0~1分
植被覆盖丰富度 Vegetation coverage richness	植被类型丰富,呈现多样的形状、色彩和样式	4~5分
	植被类型变化较少,仅有1~2种主要变化	2~3分
	植被变化极少或无明显变化	0~1分
毗邻风景美观度 Adjacent scenery aesthetics	除风电设施外,周围风景美观性高,极大提高视觉质量	4~5分
	除风电设施外,周围风景美观性较高,适度提高视觉质量	2~3分
	周围风景美观性低,对视觉质量影响较小或无影响	0~1分

1.3 分析方法

1.3.1 视觉影响评估等级划分

依据西班牙法^[24-25]以视觉敏感程度(S)为判定标准,将风电场视觉影响分为6级,划分标准见表2。

1.3.2 风电场景观视觉影响评价指标体系

景观视觉影响评价分为全域尺度和局域尺

度两方面,全域尺度的评价以风电场整体布局为主体,以景观视觉敏感度为准则;局域尺度的评价以风机单体为主体,以景观视觉量为准则。将全域层面分析结果中的重点影响区域作为分析范围,得到综合评估结果,具体评价指标体系见表3。

表2 官厅风电场景观视觉影响评估等级划分

Table 2 Classification of visual impact assessment levels for Guanting Wind Farm landscape

影响程度 Degree of impact	描述 Description
I微弱影响($0<S\leq0.1$) I negligible impact ($0<S\leq0.1$)	风电场的安装对周边环境视觉影响微弱,不会引起明显不适
II轻度影响($0.1<S\leq0.3$) II low impact ($0.1<S\leq0.3$)	风机可能会被周围建筑物和树木等遮挡或出现视觉弱化现象,但不会对周边环境造成过度的视觉冲击
III中等影响($0.3<S\leq0.5$) III moderate impact ($0.3<S\leq0.5$)	视觉影响较为明显,但可通过改变风机颜色或增加周边植被等方式来减少其影响
IV严重影响($0.5<S\leq0.7$) IV high impact ($0.5<S\leq0.7$)	视觉影响非常明显,需要采取措施对风电场的部分位置进行调整或改变风机设计,以减少对周边居民的视觉冲击
V极重影响($0.7<S\leq0.9$) V very high impact ($0.7<S\leq0.9$)	视觉冲击已达到极限,需要尽可能减少,如重新安置离居民点较近的风机,或采取其他有效措施来缓解视觉影响
VI深刻影响($0.9<S\leq1.0$) VI severe impact ($0.9<S\leq1.0$)	视觉影响难以避免,已达到极高程度,需要进行全面评估和分析,以采取最合适的措施来减轻视觉影响

表3 官厅风电场景观视觉影响评价指标体系

Table 3 Visual impact assessment index system for Guanting Wind Farm landscape

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	因子层 Factor layer	二级评价因子 Secondary evaluation factor
官厅风电场景观视觉影响 Visual impact of Guanting Wind Farm landscape	全域景观视觉敏 感度	可视性(风电场累积可视域)	风机点位总数 风机采样点(风机顶点高度)
		方位(视角)	正面视图 对角视图 纵向视图
			—
		醒目性	环境对比度 植被丰富度 毗邻风景美观度
		相对距离	—
	局域景观视觉量	可视性(关键视点累积可视域)	风机视点总数 风机关键视点(风机按高度分段)
		方位(视角)	正面视图 对角视图 纵向视图
			—
		相对距离	—

本研究构建的“全域景观视觉敏感度—局域景观视觉量”双尺度评价框架对于能源设施的基本特征具有针对性,其在指标选取、空间尺度和权重计算三方面均与风电场“高、大、动、密”的特征匹配。

在全域尺度下,评价体系以累积可视域代替单点可视域,将密集分布的风机作为整体,克服传统方法在单一尺度分析的不足,引入“方位值”对风机的不同角度进行定量分析,充分考虑其动态变化特征。在局域尺度下,采用10段高程采样并根据叶片面积比赋方位值,兼顾风机高度与动态特征,使视觉量随距离、视角和叶片运动状态实时变化。

1.3.3 全域视觉评估指标

1)可视性。根据风电场每个风机点位计算出每个地形栅格中风机的可视频次,对其进行视域分析,从而准确地评估场地内风机的可视情况,计算公式如下:

$$v = \sum_i \frac{V_i}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: v 为风电场累积可视域; W 为风机单体采样点总数; V_i 指 i 处可见风机采样点数量。

2)相对距离。在全域分析中,以风电场包络矩形作为整体进行距离赋值,对于官厅风电场在0~2 km范围内,赋值为1;距离>2 km,则对其赋值一次函数 $2/d$ 。根据人眼能够分辨物体存在的最远距离判定风电场的可辨别距离^[26-27],构建公式如下:

$$d = \sqrt{\frac{a \cdot c}{25}} \quad (2)$$

式中: d 为可视距离,m; a 为物体面积, m^2 ; c 为球面度转平方分的常数, $c = (180 \times 60 / \pi)^2 \approx 1.18 \times 10^7$ 。

3)方位。将风电场的周围区域划分为3种不同的类型,正面视图、对角视图和纵向视图,并分别进行赋值,实现不同排布方式的风电场方位视角的定量分析。

4)醒目性。景观醒目性指一个景观在视觉上引起注意和吸引力的程度,包括景观的线条、形体、色彩、质地以及动静对比。通过问卷调查和专家评价法进行评判,并经过数据综合处理得到醒目性值。

5)景观视觉敏感度。官厅风电场附近的道路和村落类型较为单一,范围内主要道路为高速公路,且村落规模较为相似,故仅考虑物理因素带来

的视觉影响,其表达式为:

$$S = v_w \times o_w \times d_w \times m_w \quad (3)$$

式中: S 为风电场视觉敏感度值; v_w 为一定范围内可见风电场的百分比; o_w 为风电场各方位值; d_w 为对风电场距离赋值; m_w 为风电场醒目性评价价值。

1.3.4 局域视觉评估指标

1)可视性。考虑地物对风机遮挡的影响,仍旧将风机单体均分为10段,每隔10 m设置一个高程点数据^[28],并进行可见性分析,结果表示每一观察点能看到风机的百分比。

2)相对距离。局域相对距离将每个风机的具体位置作为目标点,并按照视觉量的计算公式进行视觉影响评价。由此可以清晰地评估每台风机对该观察点的视觉影响程度。

3)方位。对于局域方位值,以风机单体作为研究对象,根据风机叶片的朝向定义视角,从而呈现正面、纵向和对角线视图。根据不同视角下叶片静止和运动的面积比,分别进行赋值。

4)景观视觉量。视觉量(Visual magnitude, VM)即对象的垂直和水平视角的乘积,会随观察者到风机的距离,风机数量、尺寸、布局 and 朝向,以及风机可视范围而变化。计算公式如下:

$$M_o = \sum_i \frac{v_i \times o_i \times A_i}{D_{oi}^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: M_o 为观察点 o 处的视觉量; v_i 为观察点 t 处可见单个风机的百分比; o_i 表示单个风机方位赋值; D_{oi} 指从观察点 o 到 i 处风机的距离,m; A_i 指单个风机可见面积, m^2 ,100.5 m高的风机最大面积约为 $400 m^2$ 。

针对道路,研究仅考虑其影响长度和总影响量,计算公式如下:

$$P_L = \sum_{b=0}^n M_b \quad (5)$$

式中: P_L 为道路 L 的累积视觉量; M_b 为采样点 b 的视觉量; b 为道路 L 的每个采样点(本研究中道路采样间距为200 m); n 为道路 L 的采样点总数。

对于关键村落,其视觉影响表示为整个区域的平均视觉量(Average visual magnitude, AVM),计算公式如下:

$$P_A = \frac{\sum_{s=0}^e M_s}{e} \quad (6)$$

式中: P_A 指村落 A 的平均视觉量; M_s 为栅格 s 的视觉量; s 为村庄的各个栅格; e 为村落 A 的栅格总数。

2 测算结果与分析

2.1 全域景观视觉影响因素测算

2.1.1 可视性

根据风机点坐标建立高程点数据,高程即地面高程与风机高度(100.5 m)的和,再按照每 10 m 设置一个高程点的原则,将每台风机从低到高分

10 段,共计 330 个高程点,得到分段高程的点数据。研究对 2 组高程数据分别进行视域分析,得到风电场和单体风机的累积可视域空间分布,分别见图 4 和图 5。借助累积可视域计算公式,获得可见风机的比值,即可视性 v 。通过比较得出在细分风机单体数据后,其可视性有所下降,表明在考虑地物对风机的遮挡后,视域分析结果更为精准。

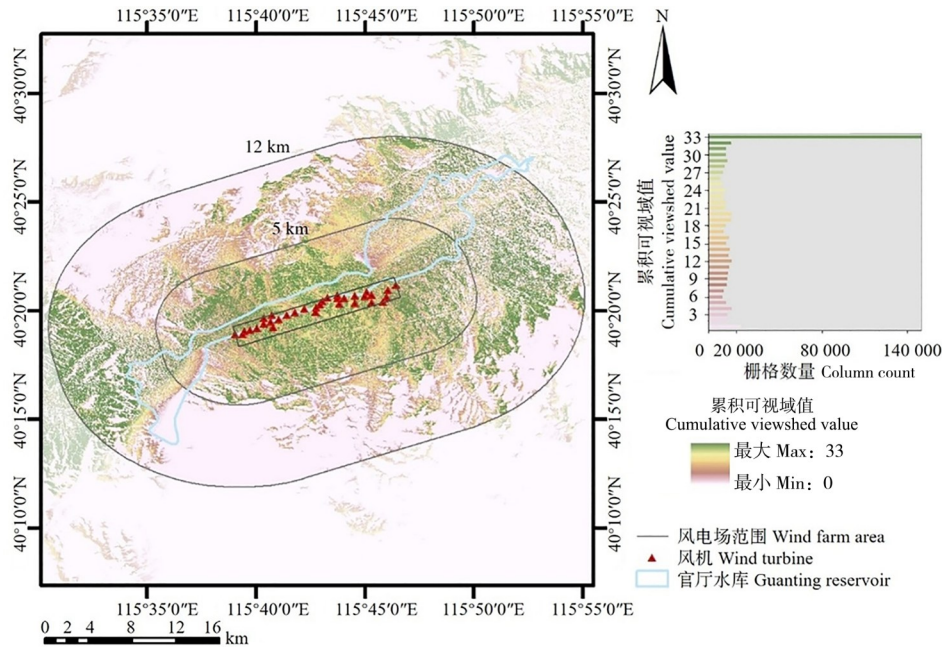


图 4 官厅风电场的累积可视域
Fig. 4 Cumulative viewshed of Guanting Wind Farm

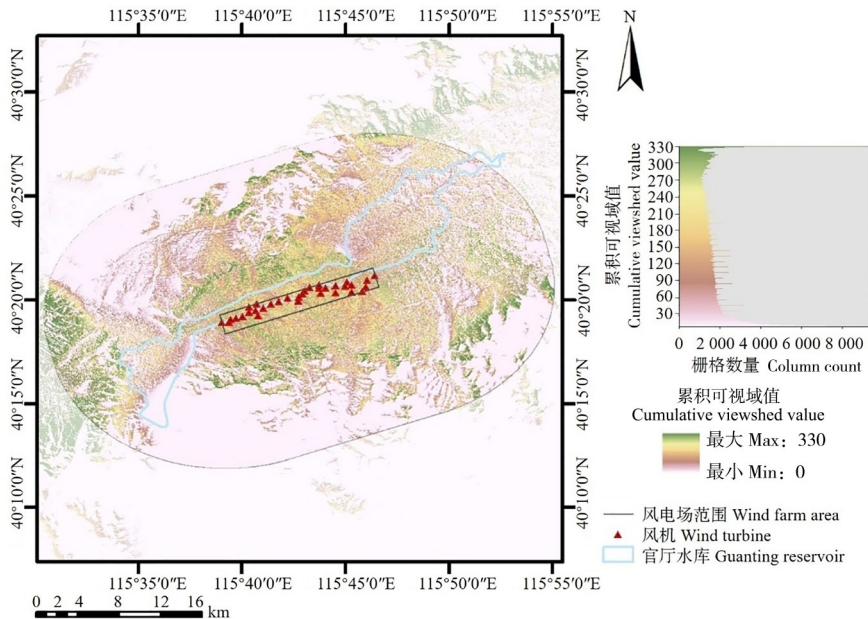


图 5 风机单体的累积可视域
Fig. 5 Cumulative viewshed of a single wind turbine

2.1.2 相对距离

根据人视觉感知特性,随着距离的增加,风机的视觉影响降低^[29]。对于官厅风电场 100.5 m 高的风

机,其可视距离为 12 km,超过此距离则无视觉影响。对风电场 12 km 范围进行距离赋值与归一化处理,通过分析得到归一化距离指数 d 的空间分布见图 6。

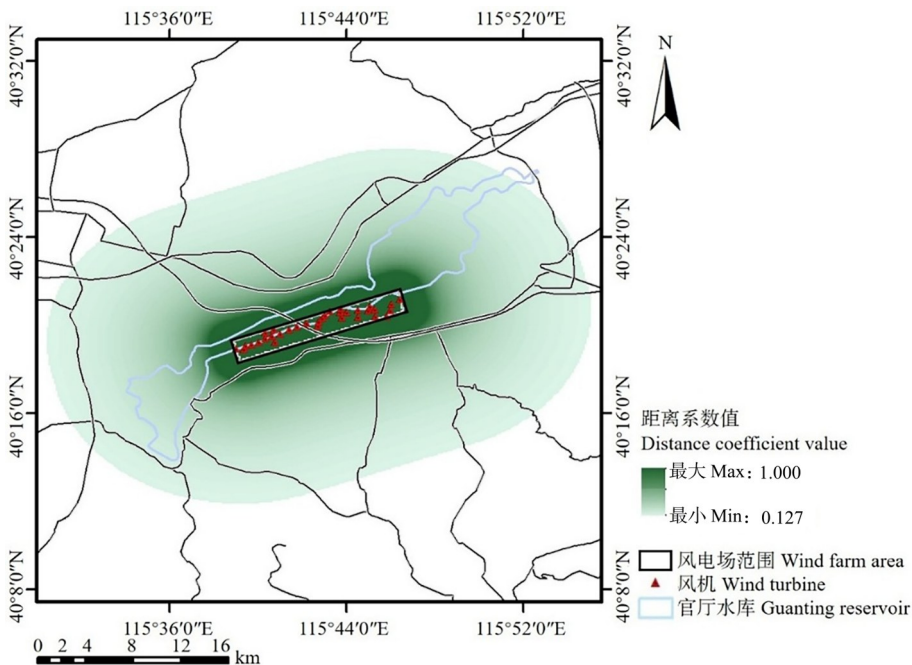


图6 官厅风电场全域距离赋值示意图

Fig. 6 Schematic diagram of global distance assignment of Guanting Wind Farm

2.1.3 方位

方位因子值主要受风机的排布方式影响^[30]。根据风电场包络矩形的构建,通常将长边作为风电场的正向视图,其能看到最多数量的正面朝向的风机。在纵向视图和对角视图中,风机的遮挡关系则增强,使得其视觉影响减小,与正面视图差异较大。按照风电场正向视图视角($\angle a$)、对角视图视角($\angle b$)和纵向视图视角($\angle c$)的比,分别赋值为 1.0、0.4 和 0.2,其各方位视角示意图和全域方位赋值图见图 7。

2.1.4 醒目性

将收集到的问卷进行汇总和统计,先对其进行归一化处理,计算每张照片各单项因子的评分平均值,3项因子所占权重相同,综合各因子分值从而得到每张照片的醒目程度综合评分见表 4,由此计算官厅风电场醒目性值为 0.709 5。

2.1.5 景观视觉敏感度

全域景观视觉评价基于上述可见性、方位、相对距离和醒目性 4 个指标,通过综合计算得出风电场的视觉敏感度分布图和分级图分别见图 8 和图 9。

2.2 局域景观视觉影响因素测算

根据全域测算结果,视觉敏感度等级在 III~VI 级的区域主要分布在距离风电场约 5 km 范围内。因此,本研究在 5 km 范围内选取了视觉敏感度等级在 IV 级及以上的村落和道路作为关键研究区域。村落包括小七营村、大古城村、佟庄新村、官庄新村、小南辛堡新村、定州营新村、段庄村和四营村,道路包括 G6 国道、G7 国道、G110 国道和 S313 省道。

2.2.1 可视性

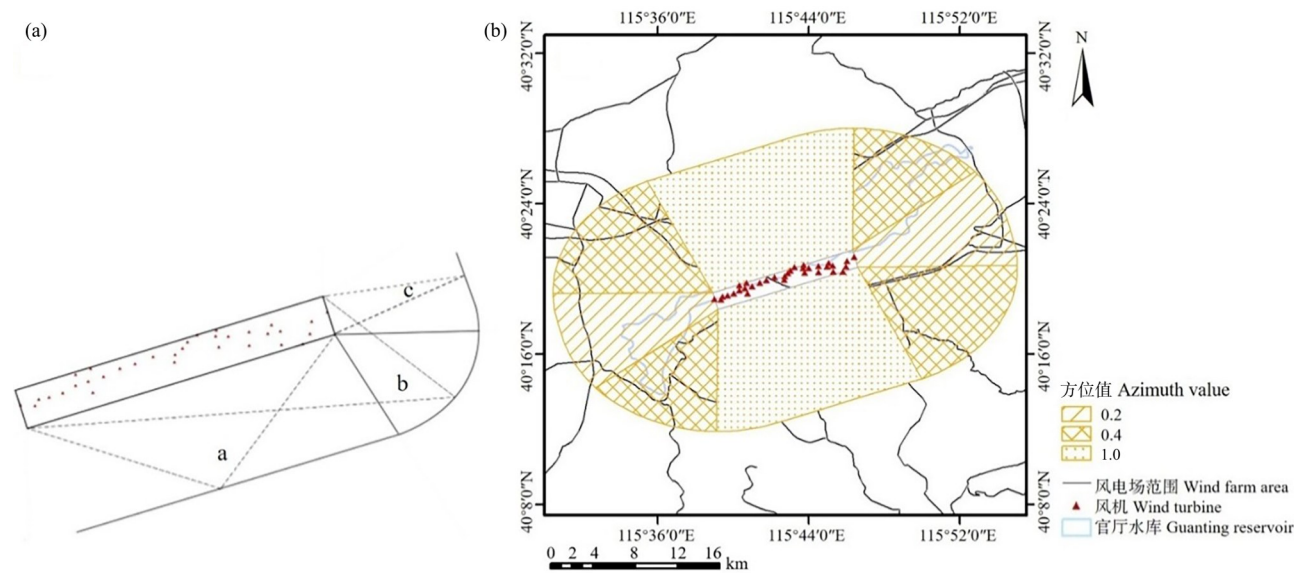
局域可视性的计算方式与全域相同,对风机高程点数据、分段高程点数据分别进行分析,借助累积可视域公式计算各点的属性,获得了各点可见风机的比例值,即可视性 v 。

2.2.2 相对距离

根据全域分析结果对关键村落和道路布置观察点,在局域分析中以每台风机为目标点,单独计算其距离属性,从而分析得到观察点与目标点的相对距离。

2.2.3 方位

局域分析采用单个风机不同视图的面积比为



$\angle a$ 、 $\angle b$ 和 $\angle c$ 分别表示风电场的正向视图视角、对角视图视角和纵向视图视角。
 $\angle a$, $\angle b$, and $\angle c$ represent the forward visual angle, diagonal visual angle, and longitudinal visual angle of the wind farm, respectively.
图7 官厅风电场各方位视角示意图(a)和全域方位赋值图(b)

Fig. 7 Diagram from various perspectives (a) and overall orientation assignment map of Guanting Wind Farm (b)

表4 官厅风电场醒目性评分

Table 4 Landscape sensitivity score of the Guanting Wind Farm

照片 序号 Photo number	环境对比度 Environmental contrast	植被覆盖 丰富度 Vegetation coverage richness	毗邻风景 美观度 Adjacent scenery aesthetics	综合评分 Composite score	照片 序号 Photo number	环境对比度 Environmental contrast	植被覆盖 丰富度 Vegetation coverage richness	毗邻风景 美观度 Adjacent scenery aesthetics	综合评分 Composite score
1	0.784 3	0.617 6	0.725 5	0.709 2	14	0.852 9	0.735 3	0.852 9	0.813 7
2	0.539 2	0.848 0	0.612 7	0.666 7	15	0.671 6	0.553 9	0.607 8	0.611 1
3	0.715 7	0.656 9	0.715 7	0.696 1	16	0.725 5	0.784 3	0.745 1	0.751 6
4	0.813 7	0.725 5	0.833 3	0.790 8	17	0.720 6	0.764 7	0.730 4	0.738 6
5	0.642 2	0.416 7	0.583 3	0.547 4	18	0.838 2	0.696 1	0.843 1	0.792 5
6	0.833 3	0.642 2	0.828 4	0.768 0	19	0.705 9	0.789 2	0.696 1	0.730 4
7	0.710 8	0.348 0	0.681 4	0.580 1	20	0.710 8	0.558 8	0.642 2	0.637 3
8	0.764 7	0.514 7	0.705 9	0.661 8	21	0.808 8	0.857 8	0.828 4	0.831 7
9	0.740 2	0.828 4	0.769 6	0.779 4	22	0.661 8	0.451 0	0.578 4	0.563 7
10	0.833 3	0.725 5	0.794 1	0.784 3	23	0.647 1	0.720 6	0.622 5	0.663 4
11	0.872 5	0.852 9	0.862 7	0.862 7	24	0.705 9	0.598 0	0.686 3	0.663 4
12	0.794 1	0.598 0	0.774 5	0.722 2	25	0.676 5	0.500 0	0.622 5	0.599 7
13	0.750 0	0.862 7	0.701 0	0.771 2					

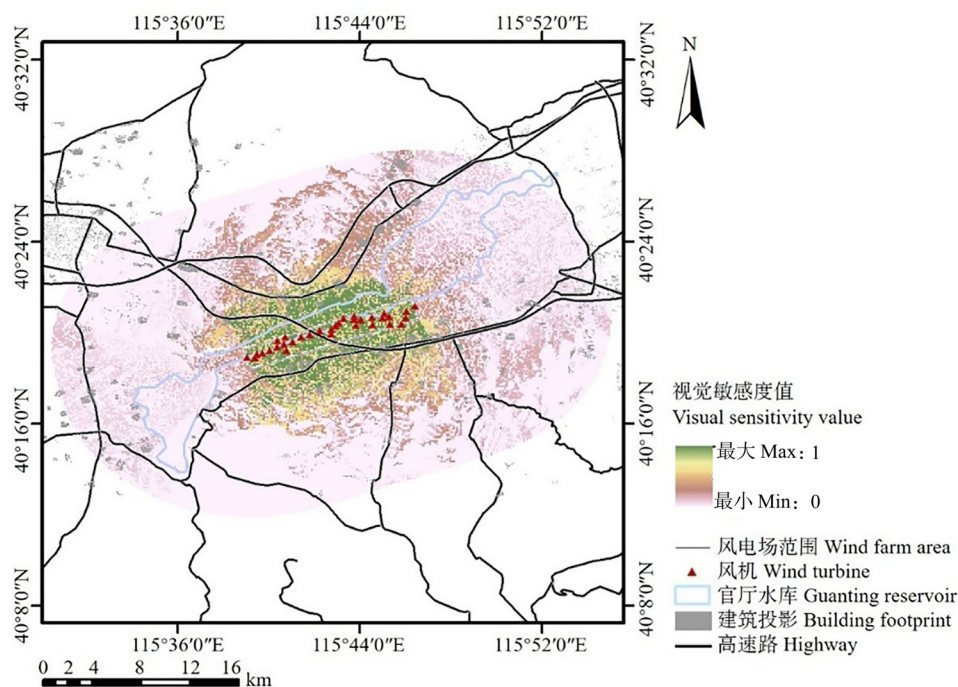


图8 官厅风电场视觉敏感度分布图

Fig. 8 Degree distribution of visual sensitivity of Guanting Wind Farm

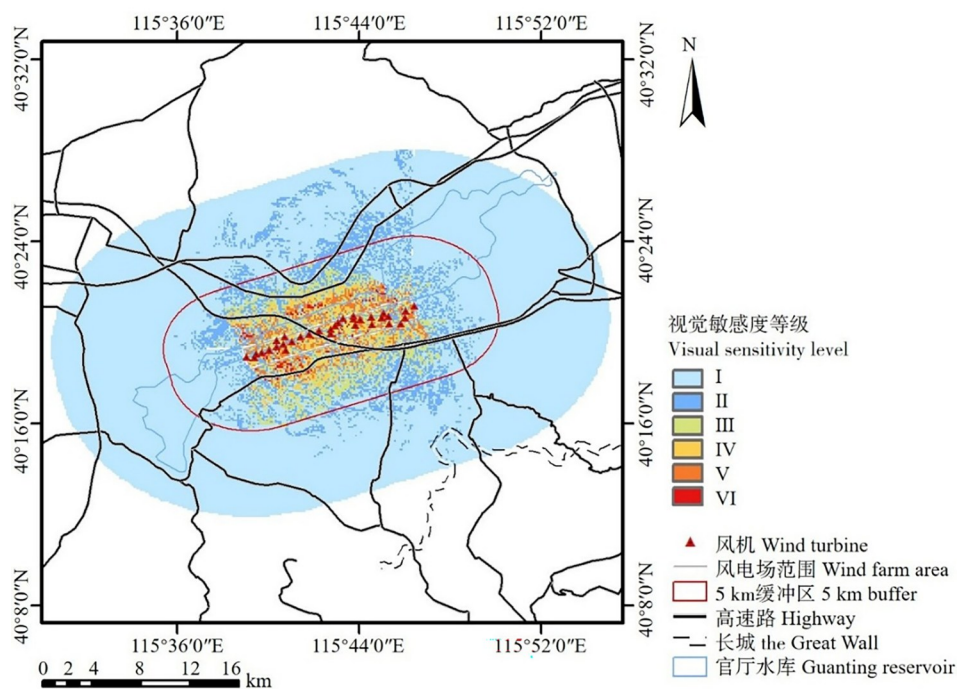


图9 官厅风电场视觉敏感度分级图

Fig. 9 Visual sensitivity grading of Guanting Wind Farm

方位值,该比值介于叶片静止面积比与叶片运动面积比之间,因此,其正面视图、对角视图和纵向视图方位值分别赋值为1.0、0.7和0.4(表5)。

2.2.4 视觉量

从上述可见性、相对距离和方位3个指标计算局域景观视觉量。对每台风机分别建立点矢量数

表5 风机方位值

Table 5 Orientation values of wind turbines

方位 Orientation	叶片静止面积比 Static blade area ratio	叶片运动面积比 Dynamic blade area ratio	O_i 值 O_i Value
正面视图 Front view	1.0	1.0	1.0
对角视图 Diagonal view	0.8	0.6	0.7
侧面视图 Side view	0.6	0.2	0.4

据,从而根据视觉量计算公式获得道路视觉量和村落平均视觉量,分别见表6和表7。

3 评价结果与分析

3.1 全域景观视觉影响评价

根据上述评价指标和计算方法,使用 Arc GIS

相关软件^[31]将多指标叠加进行风电场全域景观敏感度综合评价,并针对区域中的道路、水面和村落建筑的视觉影响情况进行分析。由于该风电场所处区域人口稀少,人口密集区域距离风电场较远,已超出视觉影响的评价范围,故不再将人口密度作为评价标准。

表6 道路视觉量统计表

Table 6 Road visual magnitude statistics table

道路 Road	采样点总数 Total sampling points	长度/km Length	总计 VM Total VM
G6	100	20.37	9.52
G7	22	4.98	0.61
G110	49	10.61	1.52
S313	87	18.23	3.72

表7 村落平均视觉量统计表

Table 7 Statistical table of average visual magnitude capacity of villages

村落 Village	采样点总数 Total sampling points	面积/m ² Area	总计 VM Total VM
小七营村 Xiaoqiying Village	244	188 582	0.957 7
大古城村 Dagucheng Village	483	400 326	0.970 4
佟庄新村 Tongzhuang New Village	234	197 399	0.923 2
官庄新村 Guanzhuang New Village	317	268 299	0.736 8
小南辛堡新村 Xiaonanxinbao New Village	943	793 504	0.697 8
定州营新村 Dingzhouying New Village	350	296 089	1.668 9
段庄村 Duanzhuang Village	203	172 532	1.751 6
四营村 Siying Village	169	144 586	0.795 8

全域景观视觉影响评价的主要影响因素包括风电场整体的可视性、方位、相对距离以及主观评价得出的环境对比度、植被丰富度和毗邻风景美观度,其评价结果会随风电场的可视范围、观察点的距离、整体的遮挡程度与醒目程度而变化。观察点的可视范围越大、距离风电场越近、遮挡方位越少、与周边环境对比越强烈则景观视觉影响越大,反之则越小。

3.1.1 道路

提取影响区域内道路的矢量数据,并将线要

素转为200 m间距的点要素,将全域视觉敏感度值提取至道路点要素中,从而获得道路视觉敏感度分级图见图10。

视觉敏感度越高则表示道路受到风电场的视觉冲击越大、影响越高。依据敏感度分级图可看出道路景观敏感度等级大于Ⅲ级的区域集中于风电场5 km范围内,且高影响范围内不同视点的视觉敏感度差异较大,风电场南侧道路所受影响更大。

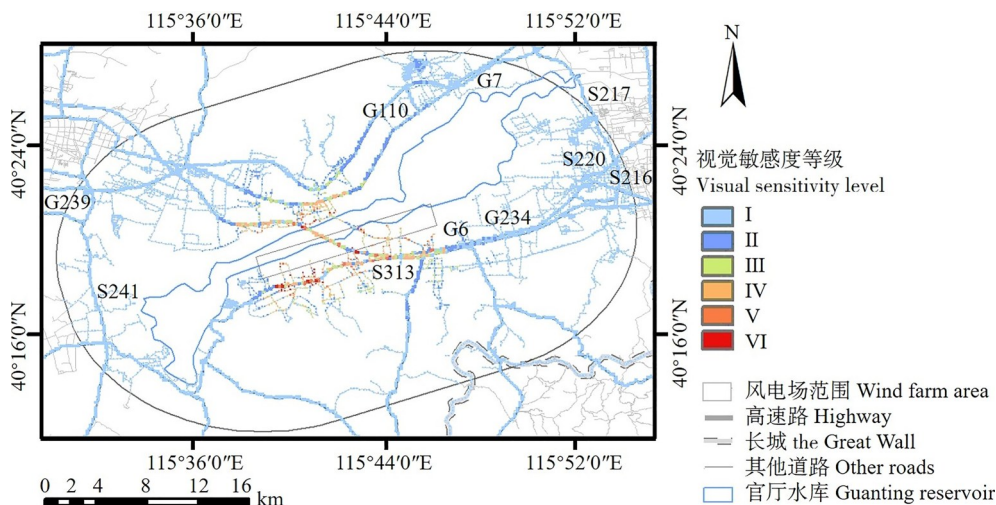


图10 道路视觉敏感度分级图

Fig. 10 Road visual sensitivity grading map

由表8计算结果可知,视觉影响敏感度由高到低排序为:S313>G6>G110>G7>G234>S241>S217>S216>S239>S220>SL71,其中道路S313以较近的距离几乎同风机布局平行设置,使得道路受影响长度较长,视觉影响较高。高速路G6横穿风电场包络矩形的长边,视域范围内风机互相遮挡,一定程度上减少了视觉冲击,仅在较短的距离内所受视觉影响较高。高速G110和G7位于水库的北侧与风电场相对,距离较远、遮挡物较多,道路景观视觉敏感度较低、所受视觉影响较低。

3.1.2 水面

通过提取水面的矢量数据,将面要素转换为点要素,提取相应的全域视觉敏感度值,从而获得水面视觉敏感度分级图。由图11可知,等级在Ⅲ~Ⅵ级的水面区域集中在风电场的正视方向。

由表9可知,官厅水库受到的视觉影响面积超过70%,其中视觉敏感度等级高于Ⅲ级的影响面积占据水库总面积的15%,集中在官厅水库中部较窄

区域。水库东部和西部开阔水面由于风电场侧视图方位值较小,视觉敏感度较低,等级在Ⅱ级及以下,且由于距离风电场较远,减轻了对官厅水库的视觉影响。

3.1.3 村落建筑

根据风电场全域景观视觉敏感度分级图,对建筑面数据的栅格赋值,得到村落建筑的视觉敏感度分级图见图12。影响区域内建筑多为低矮平房或多层住宅,高度较低,距离和方位仍是影响建筑的视觉敏感度等级的主要因素。

距风电场2.5 km范围内的村落视觉影响等级多为V、Ⅵ级,风电场视觉冲击达到极限;距风电场2.5~5 km范围内的村落仍受到Ⅲ、Ⅳ级的视觉影响;5 km范围以外的视觉影响多处于Ⅰ级,可忽略不计。

研究根据乡镇界限划分影响区域,并根据表10进一步统计可知,小南辛堡镇和狼山中村落建筑受到的视觉冲击较高,有50%左右的建筑区域视觉

表8 道路视觉敏感度分级表

Table 8 Grading table of road visual sensitivity

道路名称 Road name	总长度/km Total length	采样点总数 Total sampling points	VS 等级 VS level							视觉影响长度/km Visually impacted length
			无影响 No impact	I	II	III	IV	V	VI	
G6	35.04	174	17	84	19	27	21	6	0	31.61
G7	32.16	159	24	104	26	5	0	0	0	27.31
G110	29.23	146	2	87	35	17	5	0	0	29.03
G234	24.51	119	18	96	5	0	0	0	0	20.80
G239	5.19	24	11	13	0	0	0	0	0	2.81
S216	4.23	19	5	14	0	0	0	0	0	3.12
S217	4.14	20	2	18	0	0	0	0	0	3.73
S220	2.60	12	3	9	0	0	0	0	0	1.95
S313	32.64	159	34	59	18	25	17	3	3	25.66
S241	11.83	58	8	50	0	0	0	0	0	10.20
SL71	2.08	10	1	9	0	0	0	0	0	1.87

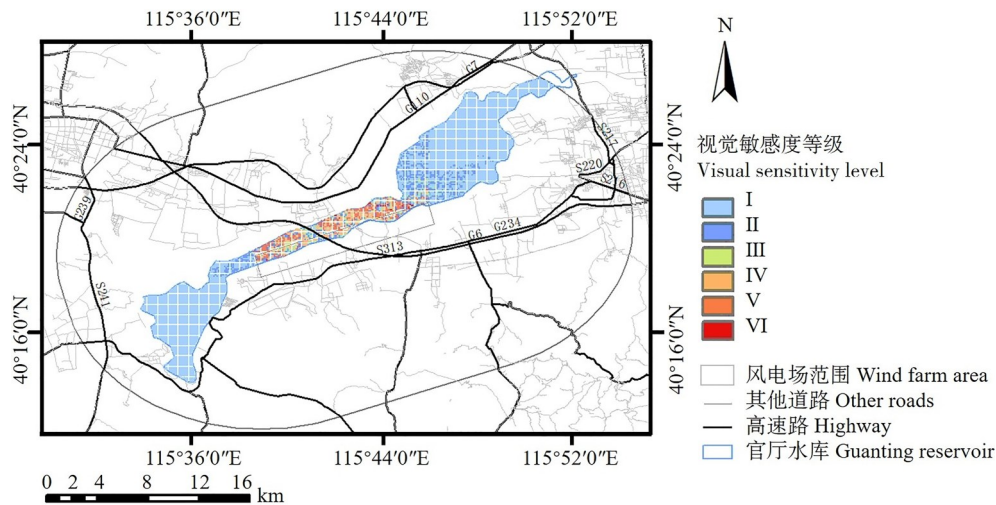


图11 官厅水库视觉敏感度分级图

Fig. 11 Visual sensitivity grading map of Guanting reservoir

表9 官厅水库景观视觉敏感度分级表

Table 9 Grading table of visual sensitivity of Guanting reservoir landscape

面积/km ² Area	采样点总数 Total sampling points	VS 等级 VS level							视觉影响面积/km ² Visually impacted area
		无影响 No impact	I	II	III	IV	V	VI	
82.99	8 819	2 688	3 926	946	461	380	397	21	62.05

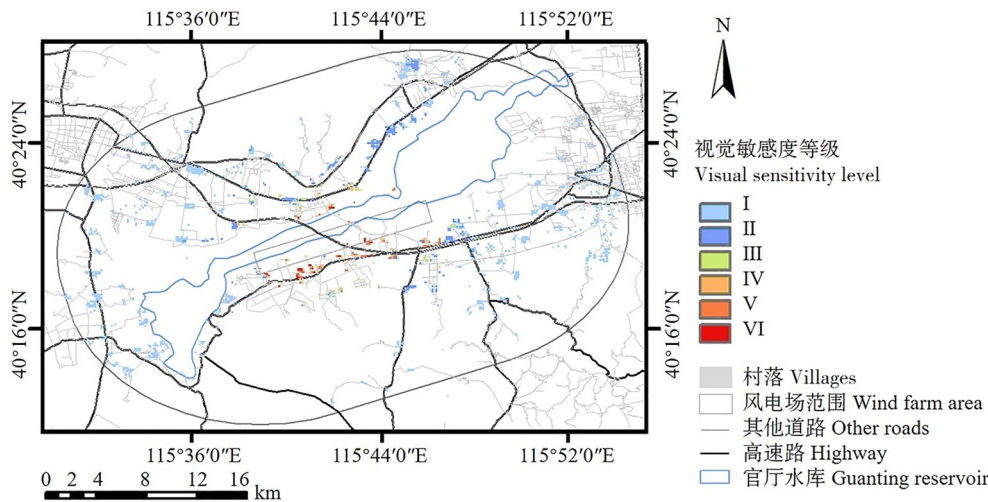


图 12 村落建筑景观视觉敏感度分级图

Fig. 12 Grading chart of visual sensitivity of village architectural landscape

表 10 村落建筑景观视觉敏感度分级表

Table 10 Grading table of visual sensitivity of village architectural landscape

乡镇 Town	建筑面 积/km ² Built-up area	采样点总数 Total sampling points	VS 等级 VS level							视觉影响面 积/km ² Visually impacted area
			无影响 No impact	I	II	III	IV	V	VI	
北辛堡镇 Beixinbu Town	5.01	211	21	74	116	0	0	0	0	4.51
狼山乡 Langshan Township	2.24	150	11	23	47	33	22	10	4	2.07
小南辛镇 Xiaonanxin Town	3.24	206	27	12	40	33	30	38	26	2.81
东花园镇 Donghuayuan Town	3.32	345	77	170	57	24	9	8	0	2.58

影响等级在Ⅲ级及以上;东花园镇中有少量建筑区域受到较高视觉冲击;北辛堡镇中整体视觉影响等级在Ⅱ级及以下,影响较轻。

3.2 局域景观视觉影响评价

局域景观视觉影响评价的主要影响因素包括风机单体的可视性、方位以及相对距离,其评价结果会随观察者到风机的距离,风机数量、尺寸、布局 and 朝向,以及风机可视范围而变化。观察点距离风机越近、风机数量越多、尺寸越大、朝向越接近正视、遮挡越少则景观视觉影响越大,反之则越小。

3.2.1 关键道路视觉量分析

根据图 13 对道路的视觉量值分析发现,横向与

风电场并行的道路 S313 视觉影响相对较大,纵向经过风电场的道路 G6 在部分点位受到极大影响。距离风机 500 m 之外的路段视觉影响会大幅度减小。此外,G7 和 G110 道路在官厅水库的另一侧,距离风电场较远,视野更开阔,能在一定程度上降低视觉影响。

3.2.2 关键村落视觉量分析

对各风机对村落的视觉量值进行统计,结果见图 14。特殊风机对特定村落的视觉量值较高(不包含 1、2 和 19 号风机),产生较大的影响,其中小七营村受到风机 15、16 和 30 的影响较高;定州营新村受到风机 5、6、27、28 和 29 的影响较高;段庄村受到风机 4 和 5 的影响较高。

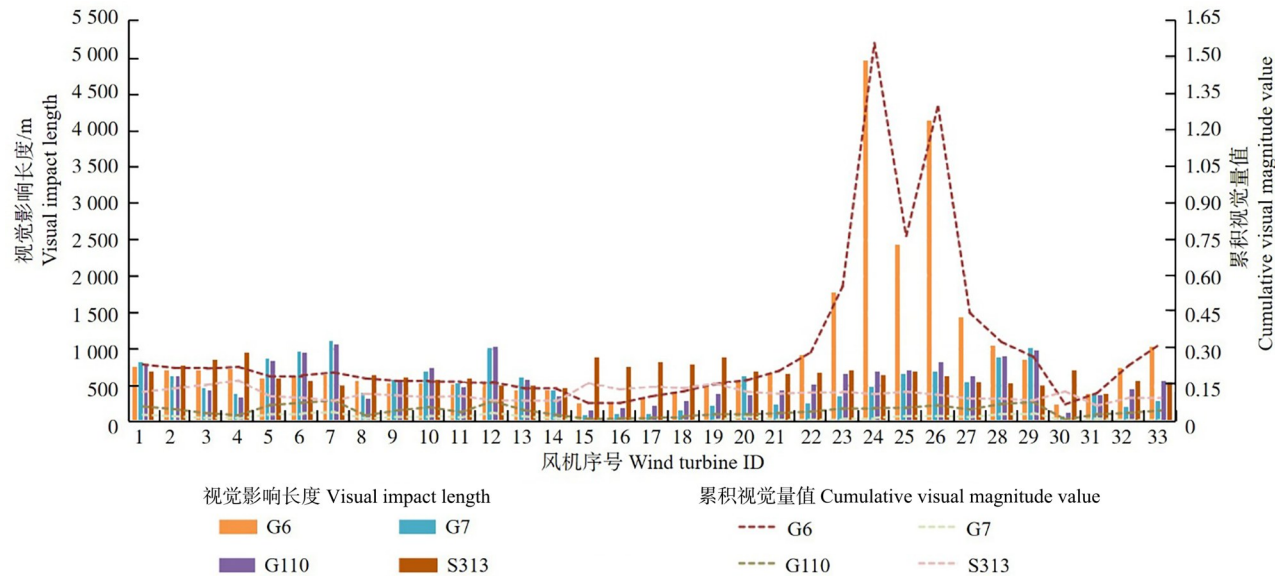


图 13 道路积累视觉量及视觉影响长度统计图

Fig. 13 Statistical chart of road accumulation visual magnitude and visual impact length



图 14 村落平均视觉量统计图

Fig. 14 Statistical chart of average visual magnitude acuity of villages

在平均视觉量值方面,定州营新村受到影响值最高,是重点景观视觉保护区域,而官庄新村和小南辛堡新村处于视觉影响较低的区域。因此,该风电场十分有必要对现有的布局进行优化,以合理利用风能景观带来的优势,平衡其视觉环境影响与经

济生态效益。

4 景观优化路径

4.1 水体及湿地生态脉络构筑

在官厅水库的优化过程中,需要保护湿地生境

和水资源,并通过适当扩大滨水区绿地,形成大面积生态休闲绿地,加大观赏点与风电场的距离,调控观赏方位、视角,从而减少风电场的视觉影响。同时因地制宜地选择根系发达、抗病虫害、抗逆性强、适合生长在湿润环境中的植物种类,从而形成水生、湿生和沼生植物群落等,与湿地野生动物共同构成相对稳定的生态系统。建设绿色廊道,为生物生存提供综合保障,实现人工景观和自然景观之间的自然过渡,塑造文化、工程、自然相配合的和谐山地水库型湿地景观。

4.2 农田林网优化

通过形成绿色屏障,降低风电场的可视性,提高植被丰富度与风景美观度,从而减少风电场的视觉冲击。因当地气候干旱,风沙较为严重,因此在农田防护林的种植上,需考虑其生长速度、根系发达程度和抗逆性等因素。利用“乔灌结合、针阔混交”的树种混交原则,避免形成大面积纯林,将常绿与落叶树种混交,乔木与灌木树种混交,经济树与景观树混交等合理配置,使得农田林网既可满足视觉效果,又可为当地居民提供经济收益。

4.3 道路景观连接

根据评估结果,对视觉敏感度超过IV级的路段采取遮蔽措施,建立屏障和植物种植,降低风电场的可视性,弱化其视觉影响。由于怀来地区冬季寒冷,绿色植被较少,为减缓冬季的视觉影响,应增加针叶树种,如油松、白皮松和云杉等常绿树种,以丰富冬季景观。在高架和桥梁等无法种植植被的路段,可在局部设置绿色防眩晕板以规避视角,避免风电设施的凸显,同时降低安全风险,起到视线引导的作用。

4.4 滨水景观重构

官厅风电场的风机大多排布在河岸周边,该水库的滨水景观是该地区的重要资源之一,应在保证其实现防洪调蓄的基本功能的前提下,通过优化各个景观节点,提高毗邻风景美观度,充分考虑人们的使用需求,提高景观的利用率和吸引力,以此转移观景者的视觉重心,降低风电场的醒目性,减轻能源景观的视觉影响,有助于形成独具特色的滨水旅游资源,带动当地经济发展。

4.5 风电场景观营造

在整体方面,以风电场包络矩形的长轴为主脊,梳理现有道路、水体和村落形成视觉通廊,通过

线性绿化和地形起伏引导视线先抑后扬。在单体方面,统一风机的色彩与照明,强化风电场的视觉冲击,形成可远观、可俯瞰、可穿透的多维观赏序列。同时,对高敏感度区(IV级以上)与低敏感度区之间进行过渡,加密农田林网和湿地缓冲带,削弱视觉压迫感,使风电场成为串联水库、村落、道路与农田的独特景观。

5 结论

本研究在综合了多个景观视觉影响评估指标的基础上,建立官厅风电场景观视觉影响评价指标体系,从全域尺度和局域尺度两方面进行评估,得出该区域景观视觉影响评价结果,提出了针对官厅风电场的景观优化路径。主要结论如下:

1)风电场的布局 and 风机体量是控制其视觉影响的关键因素。规则式布局比不规则式布局视觉影响程度低,且距离风电场越近,其受到视觉冲击越显著,视觉影响程度越高,正视方向更甚。

2)与陆地相比,官厅风电场对湖面的视觉影响更为明显;对道路而言,平行经过官厅风电场的道路受到的视觉影响比垂直经过的道路更大。

3)在选择风电场的建设地点时,应避免建于盛行风方位村落的视觉区域内,距离风电场1~3 km范围内的村落可以通过植被遮挡来减轻风机带来的视觉冲击。

4)距离官厅风电场500 m内的村落受到的视觉影响极大,需要采取其他有效措施,提升景观质量和景观效果,转移视觉重心,消解景观视觉影响。

5)官厅风电场景观视觉的提升与优化可以从构筑水体与湿地生态脉络、优化农田林网、连接道路景观、重构滨水景观、营造风电场景观等方面进行,通过多种优化路径减轻风电场对于周边环境和景观视觉的影响,发挥其独特的视觉效果,促进区域可持续、高质量发展。

参考文献 References

- [1] 周强,汪宁渤,何世恩,沈琛云,杨林,赵龙,陈钊.高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J].电力系统保护与控制,2017,45(10):146-154
Zhou Q, Wang N B, He S E, Shen C Y, Yang L, Zhao L, Chen Z. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(10): 146-154 (in Chinese)
- [2] 吴建国,巩倩,王阳.风电场对生态系统、生物多样性及环境的影响[J].生

- 态经济, 2023, 39(9): 167-178, 229
- Wu J G, Gong Q, Wang Y. The impacts of wind farms on ecosystems, biodiversity, and the environments[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(9): 167-178, 229 (in Chinese)
- [3] 贝耀平, 汪锡彪, 鲁健, 李斌斌, 徐家隆. 安徽省低山丘陵区风电场生态环境问题及植被恢复技术探讨[J]. 中国水土保持, 2021(11): 23-25
- Bei Y P, Wang X B, Lu J, Li B B, Xu J L. Discussion on ecological environment issues and vegetation restoration technology of wind farm in low mountain and hilly area of Anhui Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(11): 23-25 (in Chinese)
- [4] 吴仁海. 景观及视觉影响评价初探[J]. 环境科学研究, 1999, 12(3): 58-59
- Wu R H. A preliminary study of landscape and visual impact assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(3): 58-59 (in Chinese)
- [5] 王怡云. 风电场景观视觉评价方法研究: 以苏州阳澄湖风电场为例[D]. 南京: 东南大学, 2021
- Wang Y Y. Research on visual assessment method of wind farm: A case study of Yangcheng Lake, Suzhou[D]. Nanjing: Southeast University, 2021 (in Chinese)
- [6] 刘谓承, 肖朝明. 平原地区风电工程景观视觉环境影响分析: 以湛江某风电场工程为例[C]//2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 广东: 中国环境科学学会, 2015(1): 1609-1613
- Liu X C, Xiao C M. Analysis of the visual environmental impact of wind power engineering landscape in plain areas: taking a wind farm project in zhanjiang as an example[C]. In: *Proceedings of the Chinese Society for Environmental Sciences Annual Conference 2015*. Guangdong: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015(1): 1609-1613 (in Chinese)
- [7] 魏雨萌, 王玉华, 李原欣, 李世峰. 基于CiteSpace的国内外能源景观视觉环境质量评价研究综述[C]//中国环境科学学会2022年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分会场论文集. 南昌: 中国环境科学学会环境工程分会, 2022: 926-933, 968
- Wei Y M, Wang Y H, Li Y X, Li S F. Review of enery landscape visual environment quality evaluation at domestic and foreign based on citespace [C]. In: *Proceedings of the 2022 Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences-Subconference on Environmental Engineering Technology Innovation and Application*. Nanchang: Science and Technology Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences-Environmental Engineering Technology Innovation and Application Sub venue, 2022 (in Chinese)
- [8] Palmer J F. Deconstructing viewshed analysis makes it possible to construct a useful visual impact map for wind projects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 225: 104423
- [9] Schäffer B, Pieren R, Wissen Hayek U, Biver N, Grêt-Regamey A. Influence of visibility of wind farms on noise annoyance-A laboratory experiment with audio-visual simulations [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 186: 67-78
- [10] Palmer J F. The contribution of a GIS-based landscape assessment model to a scientifically rigorous approach to visual impact assessment[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 80-90
- [11] Mohammadi M, Chen Y, Tuihedur Rahman H M, Sherren K. A saliency mapping approach to understanding the visual impact of wind and solar infrastructure in amenity landscapes[J]. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2023, 41(2): 154-161
- [12] Spielhofer R, Hunziker M, Kienast F, Wissen Hayek U, Grêt-Regamey A. Does rated visual landscape quality match visual features: An analysis for renewable energy landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 209: 104000
- [13] Frantál B, Bevk T, Van Veelen B, Hărmănescu M, Benediktsson K. The importance of on-site evaluation for placing renewable energy in the landscape: A case study of the Búrfell wind farm (Iceland)[J]. *Moravian Geographical Reports*, 2017, 25(4): 234-247
- [14] Bishop I D. The implications for visual simulation and analysis of temporal variation in the visibility of wind turbines [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 59-68
- [15] Silva L, Delicado A. Wind farms and rural tourism: A Portuguese case study of residents' and visitors' perceptions and attitudes [J]. *Moravian Geographical Reports*, 2017, 25(4): 248-256
- [16] Brennan N, Van Rensburg T M, Morris C. Public acceptance of large-scale wind energy generation for export from Ireland to the UK: Evidence from Ireland[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2017, 60(11): 1967-1992
- [17] Vecchiato D, Tempesta T. Public preferences for electricity contracts including renewable energy: A marketing analysis with choice experiments [J]. *Energy*, 2015, 88: 168-179
- [18] Petrova M A. From NIMBY to acceptance: Toward a novel framework: VESPA: For organizing and interpreting community concerns [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 1280-1294
- [19] Kirchhoff T, Ramisch K, Feucht T, Reif C, Suda M. Visual evaluations of wind turbines: Judgments of scenic beauty or of moral desirability [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104509
- [20] 高新宇, 范伯元, 张红光, 王伟. 基于清洁发展机制的北京市风电开发[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1546-1549
- Gao X Y, Fan B Y, Zhang H G, Wang W. The wind-power development in Beijing based on clean development mechanism [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(11): 1546-1549 (in Chinese)
- [21] Maslov N, Claramunt C, Wang T Z, Tang T H. Method to estimate the visual impact of an offshore wind farm[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1422-1430
- [22] 黄耀志, 罗曦. 浅议历史文化街区的景观视觉影响评价: 以苏州寒山寺为例[J]. 现代城市研究, 2010(6): 44-49
- Huang Y Z, Luo X. A brief analysis on visual's impact assessment of landscape about historical cultural block: A case study of Hanshan temple in Suzhou, China[J]. *Modern Urban Research*, 2010(6): 44-49 (in Chinese)
- [23] 徐欢, 曹林森, 李红. 大运河淮安段遗产周边环境景观视觉影响评价[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(6): 171-176
- Xu H, Cao L S, Li H. Visual impact assessment of heritage landscape in surrounding environment along the Grand Canal Huai'an section[J]. *Areal Research and Development*, 2021, 40(6): 171-176 (in Chinese)
- [24] Hurtado J P, Fernández J, Parrondo J L, Blanco E. Spanish method of visual impact evaluation in wind farms[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, 8(5): 483-491
- [25] Manchado C, Gomez-Jauregui V, Otero C. A review on the Spanish Method of visual impact assessment of wind farms: SPM2[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 756-767
- [26] Fuego N, Sanz Y, Rodrigues M, Montañés C, Dopazo C. High resolution modelling of the on-shore technical wind energy potential in Spain[J]. *Wind Energy*, 2010, 13(8): 717-726
- [27] Shang H D, Bishop I D. Visual thresholds for detection, recognition and visual impact in landscape settings [J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2000, 20(2): 125-140
- [28] Wróżyński R, Sojka M, Pyszný K. The application of GIS and 3D graphic

- software to visual impact assessment of wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2016, 96: 625-635
- [29] Bishop I D, Miller D R. Visual assessment of off-shore wind turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(5): 814-831
- [30] Betakova V, Vojar J, Sklenicka P. Wind turbines location: How many and how far[J]. *Applied Energy*, 2015, 151: 23-31
- [31] 张林波, 王维, 吴春旭, 熊严军. 基于GIS的视觉景观影响定量评价方法理论与实践[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2784-2791
- Zhang L B, Wang W, Wu C X, Xiong Y J. Quantitative method of visual landscape EIA based on GIS: A case of the Ming Tombs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2784-2791 (in Chinese)
- 责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 魏雨萌, 中国农业大学风景园林专业硕士, 主要研究方向为乡村景观规划设计。参加了Q-City品质城市中国计划国际青年设计师竞赛(中国榆林)和2022年中国风景园林学会大学生设计竞赛, 参与济宁城市总体设计——高速内环及门户景观、西藏那曲市“系列规划”项目景观部分。获得第十届全国大学生乡村振兴暨农业建筑环境与能源工程相关专业创新创业大赛二等奖。



通讯作者简介: 王玉华, 北京大学城市与环境学系博士, 中国农业大学水利与土木工程学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为有机农业空间组织优化与乡村产业发展研究、乡村空间发展模式与乡村规划研究、区域产业发展与城乡融合发展。主持完成国家自然科学基金面上项目和青年项目、国家科技支撑课题子课题等国家和地方课题10余项, 参加国家与地方合作项目20余项; 发表学术论文40余篇。