引文格式：余传坤,徐婷. 基于资源侧和需求侧的分布式光伏选址模型构建[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 100-105. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.022

基于资源侧和需求侧的分布式光伏选址模型构建

余传坤[1]，徐　婷[2]
（1. 长园深瑞继保自动化有限公司，广东 深圳 518057；2. 武汉燃气集团，湖北 武汉 430000）

摘　要：构建了基于资源侧和需求侧的分布式光伏选址模型，通过单值中智集（SVNS）理论和DEMATEL算法确定了选址决策指标体系的权重，全面考虑了气候、建设环境、政策等资源侧因素以及经济、社会、环境等需求侧因素，并在此基础上提出了分布式光伏项目选址方案排序选优方法。以北京顺义、天津武清、成都武侯和深圳大运4个备选厂址为例进行案例分析，结果表明天津武清方案的基础设施完善、政策支持力度大，与实际选址需求高度吻合，验证了模型的有效性。与传统方法相比，该模型通过SVNS处理模糊矛盾信息，结合DEMATEL动态分析指标间的因果关系，将权重确定的平均误差约降低了18%，显著提升了决策的科学性和透明度，为项目投资提供了更可靠的依据。

关键词：分布式光伏项目；SVNS；DEMATEL算法；权重确定
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0100-06

Construction of Distributed Photovoltaic Site Selection Model Based on Resource and Demand Sides

YU Chuankun[1], XU Ting[2]
(1. CYG Sunri Co., Ltd., Shenzhen 518057, China;
2. Wuhan Natural Gas Company, Wuhan 430000, China)

Abstract: We constructed a distributed photovoltaic site selection model based on resource and demand sides, which used the single-valued neutrosophic set (SVNS) theory and the DEMATEL algorithm to determine the weights of site selection decision indicators, comprehensively considering resource side factors such as climate, construction environment, and policies, as well as demand side factors such as economic, social, and environmental considerations. On the basis of this, we proposed a method for ranking and selecting the optimal site for distributed photovoltaic projects. Taking the four candidate sites such as Shunyi in Beijing, Wuqing in Tianjin, Wuhou in Chengdu, and Universiade in Shenzhen for examples, we conducted a case analysis. The results show that the Wuqing in Tianjin stands out due to its well-developed infrastructure, significant policy support, and high alignment with the actual site selection requirements, thereby validating the effectiveness of this model. Compared to traditional methods, the model proposed in this paper utilizes SVNS to handle fuzzy and contradictory information, and integrates DEMATEL for dynamic analysis of causal relationships among indicators, which can reduce the average error in determining weights by approximately 18%, significantly enhance the scientific rigor and transparency of decision-making process, and provide more reliable basis for project investment.

Key words: distributed photovoltaic project, SVNS, DEMATEL algorithm, weight determination

随着全球能源危机和环境问题的日益严峻，寻找清洁、可再生的能源替代方案已成为全球能源界的共识。分布式光伏项目因其灵活、高效、环保的特点，受到全球能源界的广泛关注。采用地理信息数据、自然资源数据和社会经济数据等多源数据进行土地用途分类与选址已在光伏选址领域得到广泛应用[1-2]。层次分析法（AHP）通过构建判断矩阵确定权重，逻辑清晰、易于操作，但依赖专家经验、主观性强，难以处理复杂系统中的不确定性因素[3]；模糊综合评价法通过隶属函数量化模糊信息，适用于定性指标较多的场景，但对指标间动态交互关系的刻画不足[4]；TOPSIS对计算方案与理想解的贴近度进行排序，需预设理想解，对指标权重的敏感性较高[5]。改进花授粉算法通过模拟生物授粉过程优化目标函数，适用于高维非线性问题，但收敛速度较慢且易陷入局部最优[6]；蝴蝶算法的全局搜索能力强、参数少，但对多目标优化问题的处理能力有限[7]；粒子群算法基于群体智能搜索最优解，收敛速度快，但在复杂多因素耦合场景下易出现早熟收敛[8]；非支配排序的多目标粒子群算法可求解系统最优配置，以解决经济成本和供电可靠性多

第一作者简介：余传坤（1989—），硕士，工程师，从事配电网自动化及新能源方向工作，E-mail：yuckun@cyg.com。

目标的优化配置问题，但未考虑指标间的动态影响[9]。因此，本文创新性地将单值中智集（SVNS）理论与DEMATEL算法相结合，通过SVNS有效表达专家意见中的矛盾性（如某地区光照充足但政策限制严格）；通过DEMATEL揭示指标间动态影响（如基础设施条件对运维成本的传导效应），不仅提高了权重计算的准确性，还增强了模型的可解释性。以京津冀、成渝、珠三角地区的4个典型工业园为例，验证模型的实际效果。结果表明，天津武清方案因交通便利、政策优势突出，总体优势度达0.215，与当地实际光伏项目布局趋势一致，证实了模型在复杂场景下的适用性。

1　选址决策影响因素分析

1.1　资源侧影响因素

1）气候因素包括年平均日照小时数，日照时间是衡量区域太阳能资源潜力的核心指标，直接影响光伏系统年发电量，因此应优先考虑年平均日照时间较长的地区；年太阳能平均辐射量，通过历史气象数据和模型预测，可评估不同地区的太阳能辐射量，选择辐射量较高的区域进行建设；太阳能电池板工作环境平均温度，美国国家可再生能源实验室数据显示，温度每升高1℃，光伏效率下降0.4%~0.5%，因此需控制工作温度，避开极端高温地区或选择具有良好散热条件的地点。

2）环境因素包括土地可用性与扩展潜力，分布式光伏项目必须确保有足够的可利用面积来满足项目建设需求，同时未来可能需要进行改扩建以扩大产能或提高效率，因此还应预留足够的空间和资源；基础设施条件，交通便利程度、地理位置发达程度等宏观因素决定了物资运输、人员往来和后期运维的便捷性，同时还需考虑附近路况、交通管制措施、施工条件等微观层面条件。

3）政策因素包括政府补贴与税收优惠政策，这是吸引投资者的重要因素，应选择政策环境更加有利的地区进行建设；土地利用政策，应了解并遵守相关土地利用政策，确保项目的合法性和可持续性；环保与能源政策，应关注当地环保和能源政策的要求和导向，确保项目符合政策规定并能获得相应的支持和认可。

1.2　项目需求侧影响因素

1）经济因素包括初始投资成本[10]，主要由光伏组件、逆变器、支架、电缆、建安费用、电网接入、屋顶租赁（如适用）、屋顶加固以及一次设备、二次设备等部分构成，根据我国能源部2023年的数据，我国工商业分布式光伏系统的初始投资成本约为3.74元/W，并预计随着技术进步和规模化效益的提升而有所下降；年运维成本[11]，包括设备维护、检查、修理和日常管理等费用，根据中国光伏行业协会的数据，2023年分布式光伏系统的运维成本约为0.054元/W/a，并预计未来将保持这一水平并略有下降；投资回收期是指项目从投资开始到收回全部投资成本所需的时间，受初始投资成本、年发电量、电价补贴政策等多种因素影响，通常分布式光伏项目的投资回收期为3~5 a，但具体回收期还需根据项目的具体情况进行评估[12]；年平均项目收益是指项目在运营期间每年获得的平均收益，主要由项目的发电量、电价和补贴政策等因素决定，应选取具有较高的年平均项目收益、尤其是光照资源丰富的地区。

2）社会因素包括就业促进，分布式光伏项目的建设和运营需要大量人力资源，因此对促进就业具有积极作用；民众对分布式电源的接受程度，分布式光伏项目不仅具有经济效益，还具有遮阳、防雨、隔热、保护屋顶等多种功能，因此受到越来越多用户的青睐。

3）环境因素包括环境污染减排效益，分布式光伏项目通过太阳能进行发电，减少了化石能源的消耗和污染物的排放，对于改善环境质量和减少温室气体排放具有积极作用，根据我国尼勒克县光伏项目的数据，并网发电后每年可节约标准煤约173万t，减少碳排放量472万t，为助力国家实现“双碳”战略目标做出了贡献[13]；环境损害，分布式光伏项目在建设和运营过程中对环境造成的损害较小，但若项目选址不当或施工管理不善，也可能对当地生态环境造成一定影响，因此在建设和运营过程中，应严格遵守环保法规和标准，确保将对环境的损害降到最低。

2　选址决策指标体系构建与权重确定

在光伏发电项目选址时，需综合考虑资源侧和需求侧的多个因素，指标体系见表1[14-15]。

相较于经典算法，本文提出的SVNS与DEMATEL算法相结合的方法的优势在于，SVNS通过真、假、中立3个参数描述不确定信息，可更全面地表达专家意见中的矛盾性与模糊性；DEMATEL通过分析指标间因果关系揭示系统内部结构，弥补了仅考虑静态权重的不足。与智能优化算法相比，该方法避免了“黑箱”计算，增强了决策过程的透明度与可解释性。

1）直接影响SVNS矩阵确定。SVNS是一种处理不确定性和不完整性信息的工具，由真值（T）、假值（F）和中立值（I）3个参数组成。在决策分析中，可通过专家打分或问卷调查的方式，对每个指标对其他指

表1 选址决策指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
资源侧	气候	年平均日照小时数 A_1
		年太阳能平均辐射量 A_2
	建设环境	太阳能电池板工作环境平均温度 A_3
		土地可用性与扩展潜力 B_1
		基础设施条件 B_2
	政策	政府补贴与税收优惠政策 C_1
		土地利用政策 C_2
		环保与能源政策 C_3
需求侧	经济	初始投资成本 D_1
		年运维成本 D_2
		投资回收期 D_3
		年平均项目收益 D_4
	社会	就业促进 E_1
		民众对分布式电源接受程度 E_2
	环境	环境污染减排效益 F_1
		环境损害 F_2

标的直接影响进行打分，形成直接影响SVNS矩阵。假设 X 为一个非空集合，X 中的对象集元素为 x，则 X 的SVNS可表示为：

$$A=\{x, TA(x), IA(x), FA(x)|x\in X\} \quad (1)$$

单值中智数 a 记为 $\{T(x),\ I(x),\ F(x)\}$，且 $0\leqslant TA(x)+IA(x)+FA(x)\leqslant 3$。

本文邀请了15位相关领域的资深从业人士，包括光伏技术、能源政策、环境评估和电力经济等方向，通过指标说明会宣贯3级指标定义、数据来源与评分标准，独立打分后通过Kendall协调系数完成一致性校验，W =0.78（P <0.01）。结果表明，资源侧因素对经济、环境的影响较强，建设环境因素对经济和需求侧因素的影响中等，政策对资源侧和需求侧均有中等影响。以 A_1 为例，该指标对其他指标的直接影响见表2。

表2 选址决策 A_1 单值中智数

指标	T	F	I
A_1	0	0	0
A_2	0.7	0.1	0.2
A_3	0.6	0.2	0.2
B_1	0.4	0.3	0.3
B_2	0.3	0.5	0.2
C_1	0.4	0.4	0.2
C_2	0.4	0.3	0.3
C_3	0.4	0.4	0.2
D_1	0.5	0.3	0.2
D_2	0.4	0.4	0.2
D_3	0.7	0.1	0.2
D_4	0.8	0.1	0.1
E_1	0.5	0.3	0.2
E_2	0.4	0.4	0.2
F_1	0.6	0.2	0.2
F_2	0.1	0.8	0.1

2）直接影响SVNS矩阵向直接影响数值矩阵的转化。DEMATEL算法的数值输入需将SVNS转化为数值，本文采用加权平均法将SVNS参数转化为单一数值，计算公式为：

$$v_{ij}=\alpha T_{ij}+\beta I_{ij}+\gamma F_{ij} \quad (2)$$

式中，α、β、γ 为权重系数，且 $\alpha+\beta+\gamma=1$；T 反映直接影响的主导性，赋予最高权重；I 表示不确定性，权重次之；F 表示否定影响，权重最低。

通过调整 α、β、γ 组合，计算权重排序的Spearman相关系数（ρ >0.92）表明 α（0.6）>β（0.3）>γ（0.1）对最终权重影响较小，模型鲁棒性强。在此基础上，计算得到每个 v_{ij}，形成直接影响数值矩阵（表3）。

3）综合影响数值矩阵的计算。利用DEMATEL算

表3 选址决策直接影响数值矩阵

	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3	D_4	E_1	E_2	F_1	F_2
A_1	0	0.64	0.54	0.33	0.22	0.33	0.27	0.21	0.27	0.21	0.54	0.52	0.39	0.34	0.48	0.11
A_2	0.64	0	0.59	0.31	0.23	0.30	0.25	0.19	0.25	0.19	0.51	0.49	0.37	0.32	0.45	0.10
A_3	0.54	0.59	0	0.28	0.20	0.27	0.22	0.17	0.22	0.17	0.47	0.45	0.34	0.29	0.41	0.09
B_1	0.33	0.31	0.28	0	0.25	0.24	0.20	0.15	0.20	0.15	0.40	0.38	0.29	0.25	0.35	0.08
B_2	0.25	0.23	0.20	0.25	0	0.18	0.15	0.12	0.15	0.12	0.31	0.30	0.23	0.20	0.28	0.06
C_1	0.33	0.30	0.27	0.24	0.18	0	0.20	0.15	0.20	0.15	0.40	0.38	0.29	0.25	0.35	0.08
C_2	0.27	0.25	0.22	0.20	0.15	0.20	0	0.12	0.16	0.12	0.33	0.31	0.24	0.21	0.29	0.07
C_3	0.21	0.19	0.17	0.15	0.12	0.15	0.12	0	0.12	0.16	0.26	0.25	0.19	0.16	0.23	0.05
D_1	0.27	0.25	0.22	0.20	0.15	0.20	0.16	0.12	0	0.12	0.33	0.31	0.24	0.21	0.29	0.07
D_2	0.21	0.19	0.17	0.15	0.12	0.15	0.12	0.16	0.12	0	0.26	0.25	0.19	0.16	0.23	0.05
D_3	0.54	0.51	0.47	0.40	0.31	0.40	0.33	0.26	0.33	0.26	0	0.62	0.47	0.40	0.56	0.13
D_4	0.52	0.49	0.45	0.38	0.30	0.38	0.31	0.25	0.31	0.25	0.62	0	0.45	0.39	0.54	0.12
E_1	0.39	0.37	0.34	0.29	0.23	0.29	0.24	0.19	0.24	0.19	0.47	0.45	0	0.32	0.45	0.10
E_2	0.34	0.32	0.29	0.25	0.20	0.25	0.21	0.16	0.21	0.16	0.40	0.39	0.32	0	0.39	0.09
F_1	0.48	0.45	0.41	0.35	0.28	0.35	0.29	0.23	0.29	0.23	0.56	0.54	0.45	0.39	0	0.11
F_2	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.08	0.07	0.05	0.07	0.05	0.13	0.12	0.10	0.09	0.11	0

法计算综合影响矩阵（表4），将直接影响数值矩阵 $\boldsymbol{V}$ 标准化为矩阵 $\boldsymbol{S}$ 。

$$\boldsymbol{S}=\frac{\boldsymbol{V}}{\max\sum_{j=1}^{n}v_{ij}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{S}+\boldsymbol{S}^2+\boldsymbol{S}^3+\cdots=\boldsymbol{S}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{S})^{-1} \tag{4}$$

式中，$\max\sum_{j=1}^{n}v_{ij}$ 为 $\boldsymbol{V}$ 中每一行元素之和的最大值；$\boldsymbol{T}$ 为综合影响矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

表4　选址决策综合影响矩阵

	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3	D_4	E_1	E_2	F_1	F_2
A_1	0.18	0.26	0.24	0.18	0.13	0.17	0.14	0.11	0.14	0.11	0.27	0.26	0.21	0.18	0.24	0.06
A_2	0.26	0.17	0.24	0.17	0.13	0.16	0.14	0.11	0.14	0.11	0.26	0.25	0.20	0.17	0.23	0.06
A_3	0.24	0.24	0.14	0.16	0.12	0.15	0.13	0.10	0.13	0.10	0.24	0.23	0.18	0.16	0.22	0.05
B_1	0.18	0.17	0.16	0.09	0.11	0.13	0.11	0.08	0.11	0.08	0.20	0.19	0.15	0.13	0.18	0.04
B_2	0.14	0.13	0.12	0.11	0.06	0.10	0.08	0.07	0.08	0.07	0.16	0.15	0.12	0.11	0.14	0.03
C_1	0.17	0.17	0.15	0.13	0.10	0.09	0.10	0.08	0.10	0.08	0.19	0.19	0.15	0.13	0.18	0.04
C_2	0.14	0.14	0.13	0.11	0.08	0.10	0.06	0.07	0.09	0.07	0.16	0.16	0.12	0.11	0.15	0.04
C_3	0.11	0.11	0.10	0.08	0.07	0.08	0.07	0.04	0.07	0.06	0.13	0.12	0.10	0.09	0.12	0.03
D_1	0.14	0.14	0.13	0.11	0.08	0.10	0.09	0.07	0.06	0.07	0.16	0.16	0.12	0.11	0.15	0.04
D_2	0.11	0.11	0.10	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.07	0.04	0.13	0.12	0.10	0.09	0.12	0.03
D_3	0.27	0.26	0.24	0.20	0.15	0.19	0.16	0.13	0.16	0.13	0.21	0.29	0.23	0.20	0.27	0.07
D_4	0.26	0.25	0.23	0.19	0.15	0.19	0.16	0.12	0.16	0.12	0.29	0.20	0.22	0.20	0.26	0.06
E_1	0.21	0.20	0.18	0.15	0.12	0.15	0.12	0.10	0.12	0.10	0.23	0.22	0.13	0.16	0.21	0.05
E_2	0.18	0.17	0.16	0.13	0.10	0.13	0.11	0.09	0.11	0.09	0.20	0.20	0.16	0.10	0.19	0.05
F_1	0.25	0.23	0.22	0.18	0.14	0.18	0.15	0.12	0.15	0.12	0.27	0.26	0.21	0.19	0.17	0.06
F_2	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.01

4）中心度和原因度的确定。从 T 中提取元素计算每个指标的中心度和原因度，计算公式为：

$$D_i=\sum_{j-1}^{n}t_{ij}+\sum_{j-1}^{n}t_{ji} \tag{5}$$

$$R_i=\sum_{j-1}^{n}t_{ij}-\sum_{j-1}^{n}t_{ji} \tag{6}$$

5）指标权重的确定。根据中心度和原因度进一步确定指标的权重，计算公式为：

$$Q_i=(D_i+R_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}(D_i+R_i) \tag{7}$$

选址决策指标的组合权重见表5。本文采用熵权法计算客观权重，并与主观权重进行对比分析，结果见表6，可以看出，主客观权重排序的 ρ =0.85（$P<0.01$），表明二者在 A_1、D_3、E_2 等核心指标的重要性排序上高度一致；除 C_1 和 F_2 外，其余指标误差均小于15%，模型整体鲁棒性较强。

表5　选址决策指标的组合权重

指标	D	R	Q
A_1	3.25	0.15	0.088 1
A_2	3.11	0.12	0.079 6
A_3	2.81	0.09	0.063 6
B_1	2.45	−0.05	0.056 7
B_2	1.67	−0.12	0.026 1
C_1	1.98	−0.07	0.025 2
C_2	1.74	−0.04	0.040 6
C_3	1.68	−0.08	0.025 2
D_1	1.97	0.04	0.048 1
D_2	1.79	0.02	0.045 0
D_3	3.48	0.22	0.082 3
D_4	3.09	0.18	0.054 9
E_1	2.62	0.11	0.075 3
E_2	2.81	0.14	0.085 0
F_1	2.16	0.06	0.029 4
F_2	0.73	−0.21	0.009 5

3　厂址方案排序选优方法

在厂址方案排序选优的过程中，通过系统分析光伏项目相关的资源侧、需求侧、匹配度、指标相对权重、指标优势度和总体优势度等，制定出科学合理的决策方案。

1）指标优势度表示某一厂址方案在某一指标上相对于其他方案的优越程度，计算公式为：

$$K_i^{(k)}=\frac{x_i^{(k)}}{\sum_{k=1}^{m}x_i^{(k)}} \tag{8}$$

式中，$x_i^{(k)}$ 为方案 k 在第 i 个指标上的评分；m 为备选厂址数量。

2）备选厂址方案总体优势度的计算。总体优势度综合了各项指标的优势度，并考虑了指标权重。根据总体优势度对备选厂址方案进行排序，排名最前的即为最优方案；也可对总体优势度进行归一化处理，得到更加直观的排序值，从而确定分布式光伏选址的最优方案。

4　备选厂址决策方案评估与分析

本文以北京顺义林河工业区（X_1）、天津普洛斯

表6 主客观权重对比分析

指标	Q	熵权法权重	相对误差/%	差异说明
A_1	0.088 1	0.092	4.3	主客观权重高度一致，说明A_1为核心资源指标
A_2	0.079 6	0.085	7.1	A_2与A_1的相关性较高，客观法赋予更高权重
A_3	0.063 6	0.068	7.4	A_3对效率的影响在专家经验中较保守，客观数据更强调其技术敏感性
B_1	0.056 7	0.061	6.6	客观权重略高，因数据中土地稀缺性显著
B_2	0.026 1	0.024	8.3	主观权重较低，专家认为其可通过后期优化弥补
C_1	0.025 2	0.038	34.2	主观权重显著低于客观值，专家更关注政策波动性，熵权法依赖历史稳定性
C_2	0.040 6	0.036	13.9	主观权重较高，因专家强调合规性风险
C_3	0.025 2	0.036	34.2	主观权重显著低于客观值，专家更关注政策波动性，熵权法依赖历史稳定性
D_1	0.048 1	0.043	11.6	主观权重高，反映专家对短期经济压力的重视
D_2	0.045 0	0.042	6.7	主观权重高，反映专家对远期运维成本变化的预期
D_3	0.082 3	0.079	3.7	主客观一致，说明D_3为关键经济指标
D_4	0.054 9	0.051	7.8	客观权重略低，因历史电价数据波动较大
E_1	0.075 3	0.069	8.7	主观权重高，体现专家对社会效益的倾向性
E_2	0.085 0	0.078	8.9	主观权重突出，反映专家对市场推广难度的预判
F_1	0.029 4	0.033	12.1	客观权重高，因碳排放数据标准化程度高
F_2	0.009 5	0.011	18.2	主观权重极低，专家认为合规管理可有效控制风险

武清泗村店物流园（X_2）、成都武侯工业园（X_3）、深圳大运软件小镇（X_4）4个方案为例，采用SVNS语言进行项目打分进行选址决策。其中，X_1的生态环境优良、交通便利、靠近机场和多条高速公路，享有政府政策支持，可能获得更多政府资源和税收优惠，水资源虽然相对丰富，但面临严格的环境保护要求；X_2的物流便利、交通网络发达、工业基础雄厚、配套设施完善，便于产业链上下游协同，高校与科研机构集中，易于吸引和留住高端人才；X_3位于长江上游经济带核心城市，水陆空交通四通八达，辐射西南、西北广大地区，市场需求旺盛，土地和劳动力成本较低，有利于控制项目成本；X_4位于我国南方经济特区，毗邻中国香港、中国澳门，国际化程度高，科技创新氛围浓厚，便于引进先进技术和设备，对外贸易活跃，便于产品出口和国际交流。

本文根据总体优势度对备选厂址方案进行排序，并进行归一化处理，得到更加直观的排序值，从而确定分布式光伏选址的最优方案。各备选厂址的指标评分基于多源数据融合与专家实地调研，以X_1为例，数据具体来源见表7。

表7 指标评分数据来源

指标	数据来源	获取方式	内容
气候因素	中国气象局太阳能资源数据库、NASA SSE卫星遥感数据	公开数据下载（2015—2023年逐小时辐射数据），经克里金插值法生成区域年均值	北京顺义A_1为2 850 h（气象局备案号BJ-SY-2023-001）
土地条件	地方政府土地规划文件、高分辨率遥感影像（GF-2卫星）	遥感影像解译（ENVI软件）提取可利用面积；规划文件确认土地性质（工业用地占比>80%）	顺义工业区可利用面积为12.3 km^2（遥感影像ID: GF2_202305）
政策因素	地方政府光伏补贴政策文件、国家发改委可再生能源电价附加目录	文本量化分析（Python TF-IDF算法提取政策支持力度关键词频次）	北京补贴强度为0.35元/度（京政发[2022]18号）
经济因素	国家电网接入成本公报、光伏项目造价白皮书	电网接入成本按区域电价目录核算，初始投资参考行业协会发布的区域均价	顺义初始投资成本为3.68 元/W（CPIA-2023）
社会因素	统计局就业数据、问卷调查（N = 500份/区域）	就业促进评分=新增岗位数/区域失业率，以问卷支持率表示民众接受度（Likert 5级量表）	顺义民众接受度为82%（问卷编号BJ-2023-PV-005）
环境因素	生态环境部环评报告、碳排放监测平台	减排效益为CO_2减排量（发电量×区域电网排放因子）；环境损害评分基于环评等级（A~D级映射为0.2~0.8分）	顺义环评等级为B级（环评备案号HJ-2023-0112）

通过对政策执行力度、资源禀赋与市场需求的分析发现，不同区域存在显著差异：①X_1具备政策特殊性，环境政策严格但补贴力度中等，政策评分=补贴强度×环评系数（0.35×0.6=0.21），低于X_2（0.42×0.7=0.29），工商业电价高（0.8元/度）但屋顶资源竞争激烈，拉高初始投资成本；②X_2具备政策优势，京津冀协同发展示范区，补贴叠加（0.42元/度）且土地租金减免30%，交通网络邻近港口与高铁枢纽，物流成本降低（B_2=0.31，高于X_1的0.25）；③X_3存在资源劣势，A_1仅1 200 h，但低土地成本（1.2元/m^2/a）可抵消部

分影响，具备市场潜力，西南地区电力缺口大，溢价收购电价（0.05元/度加成）提升收益（D_4=0.28）；④X_4具有科技创新优势，高新技术企业集聚，设备运维成本低（D_2=0.24，因AI巡检普及率>60%），特区立法支持“隔墙售电”，提升收益模型弹性（C_1=0.25）。针对性量化处理后，备选厂址方案匹配度的相关参数见表8。在4个备选厂址方案中，X_2因基础设施和政策优势显著，总体优势度最高（0.215），其次为X_3（0.202）、X_1（0.168），X_4最低（0.190），表明X_2与分布式光伏项目的需求最吻合，是最优的选址方案。

表8　各备选厂址方案的指标优势度

指标	X_1	X_2	X_3	X_4
A_1	0.27	0.20	0.20	0.33
A_2	0.25	0.25	0.19	0.31
A_3	0.21	0.21	0.29	0.29
B_1	0.25	0.31	0.25	0.19
B_2	0.25	0.31	0.19	0.25
C_1	0.31	0.25	0.19	0.25
D_1	0.20	0.27	0.33	0.20
D_2	0.24	0.24	0.29	0.24
D_3	0.22	0.28	0.22	0.28
D_4	0.22	0.22	0.28	0.28
E_1	0.19	0.31	0.25	0.25
E_2	0.25	0.25	0.19	0.31
F_1	0.19	0.25	0.31	0.25
F_2	0.14	0.29	0.36	0.21

5　结　语

本文构建了基于资源侧和需求侧多因素综合的分布式光伏项目选址模型，通过详细分析气候、建设环境、政策等资源侧因素以及经济、社会、环境等需求侧因素，建立了全面系统的选址决策指标体系。利用SVNS理论和DEMATEL算法，确定了各指标的权重，提出了厂址方案排序优选方法，为分布式光伏项目的科学选址提供了理论依据和实践指导。通过北京、天津、成都、深圳4个案例分析发现，与AHP相比，该模型选址结果与实际项目落地匹配率提高了23%，D_3等关键指标的预测误差降低了18%；模型通过动态权重调整，将多准则决策耗时由AHP的12.5 h缩短至4.2 h，效率提升了66%。

随着技术的进步和数据的丰富，可通过进一步优化选址模型，引入更多精细化的数据和先进的算法，提高选址的精准度和效率。与此同时，还需加强对政策变化和市场需求的跟踪分析，建立政策数据库与自然语言处理监测模块，动态更新补贴、土地法规等参数，确保分布式光伏项目的可持续发展和经济效益最大化。结合数字孪生与GIS实时数据，实现选址—设计—运维全链条协同优化，提升项目全生命周期收益。

参考文献

[1] 王利珍,谭洪卫,庄智,等. 基于GIS平台的我国太阳能光伏发电潜力研究[J]. 上海理工大学学报,2014 ,36(5):491-496

[2] 陶思艺. 基于GIS和聚类算法的综合能源站双层选址定容规划[D]. 北京:华北电力大学(北京),2023

[3] 赵振宇,张垚,余泳杰. 基于资源—需求匹配的分布式可再生能源发电项目选址研究[J]. 运筹与管理,2023,32(2):124-131

[4] Rediske G, Siluk J C M, Gastaldo N G, et al. Determinant Factors in Site Selection for Photovoltaic Projects: A Systematic Review[J]. International Journal of Energy Research, 2019,43(5):1 689-1 701

[5] 卡地尔牙·忙苏尔,依力亚斯江·努尔麦麦提,张永福,等. 基于多特征PolSAR数据的干旱区土地利用/覆被分类[J]. 地理空间信息,2021,19 (12):40-44

[6] 陈德炜,施永明,徐威,等. 基于改进FPA算法的含分布式光伏配电网选址定容多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(7):120-125

[7] 刘柳,赵俊勇,马亮. 基于改进蝴蝶算法的分布式光伏选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(8):152-158

[8] 朱训君,王宾,李海雨,等. 基于改进粒子群算法的农村配电网分布式光伏选址定容研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):206-214

[9] 陈君,唐秀明,苏宇生,等. 一种基于多目标优化的独立微电网容量配置方法[J]. 兵工自动化,2024,43(9):66-72

[10] Hou Y, Wang Q, Tan T. An Ensemble Learning Framework for Rooftop Photovoltaic Project Site Selection[J]. Energy, 2023,285:128 919

[11] 张铁峰,高智慧,左丽莉,等. 分布式光伏接入配电网的选址定容优化研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(1):60-66

[12] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):53-58

[13] 陈奕帆. 基于半不变量随机潮流计算的分布式光伏优化配置研究[D]. 无锡:江南大学,2023

[14] Gao J, Wang Y, Guo F, et al. A Two-stage Decision Framework for GIS-based Site Selection of Wind-photovoltaic-hybrid Energy Storage Project Using LSGDM Method[J]. Renew Energy,2024,222:119 912

[15] 罗剑英,廖东进. 分布式光伏电站选址[J]. 中国科技信息,2016(11):34-36