

基于多主体代理模型的屋顶分布式光伏采纳及扩散激励机制分析

赵晓丽 曾筠 孙楚钰

摘要 屋顶分布式光伏发电具有分布广、潜力大的特征。为研究如何促进屋顶分布式光伏发电增长，本文整合了多主体代理模型和计划行为理论，构建了屋顶分布式光伏采纳及扩散仿真模型，将“反馈”机制“政府信息干预”“企业与代理人交互模块”加入模型，更真实地刻画了光伏采纳决策及扩散过程，并能更好捕捉到市场微观主体的动态变化。基于该模型，以北京市为例模拟了屋顶分布式光伏发电在不同激励机制下的发展前景。研究表明：本文所构建的模型可以有效刻画建筑代理人的决策行为及其对激励机制的响应特征；发现不同的激励机制，如地方政府补贴、建设示范项目和出资模式选择，通过影响代理人的感知行为控制、态度和社会压力，对屋顶分布式光伏的采纳扩散产生显著的影响。其中，光伏企业出资模式选择对屋顶分布式光伏采纳影响最大。进一步地，通过比较不同商业模式下的建筑代理人收益，发现“全额出资”模式与租赁模式相比更有利于促进屋顶分布式光伏采纳。最后，提出了鼓励“全额出资”模式以及扩大光伏安装示范项目比例等促进屋顶分布式光伏采纳的政策建议。

关键词 屋顶分布式光伏 采纳及扩散 激励机制 多主体代理模型

[中图分类号] F206 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X(2025)03-0055-16

一、引言

屋顶分布式光伏具有距离能源消费中心近、可利用资源广泛、投资成本相对较低等优点，因此成为低碳能源系统构建中受到广泛青睐的一种低碳能源。但是，中国屋顶分布式光伏发电在大多数城市目前仅开发了不到1%的潜力(Zhang Z. et al., 2023)。在“退补”背景下，如何促进屋顶分布式光伏的采纳及扩散，提高屋顶分布式光伏的装机容量及发电量使其发展潜力转变为现实的电力供应能力，是一个需要研究解决的重要问题。

已有研究表明，受教育程度与分布式光伏的采纳呈正相关关系(Dharshing S., 2017)，并且对环境的关注是采纳分布式光伏的决定因素(Schelly C., 2014)。此外，光伏板外观对光伏采纳的影响已达成共识：分布式光伏外观不佳会阻碍光伏的采纳(Faiers A. et al., 2007)，人们通常愿意为美丽支付更高的价格(Petrovich B. et al., 2019)。随着研究的深入，学者还发现财务因素可能不再是光伏扩散的主要驱动力(Karneyeva Y. et al., 2017)，社会影响因素发挥着越来越重要的作用，

【基金项目】国家社会科学基金重大项目(22&ZD103)；国家社会科学基金重点项目(21AZD111)。

【作者简介】赵晓丽、曾筠，中国石油大学(北京)经济管理学院、中国石油大学(北京)低碳经济与政策研究中心，邮政编码：102249；孙楚钰，中国石油大学(北京)经济管理学院、中国石油大学(北京)低碳经济与政策研究中心，本文通讯作者，邮政编码：102249。

信息获取成本发挥着关键影响作用 (Rai V. et al., 2016), 同时, 同伴效应 (Petrovich B. et al., 2019) 能够促进信息传播, 进而发挥着更重要的作用。

分布式光伏的采纳与扩散过程也是创新扩散行为的一个具体体现。多主体代理模型 (Agent Based Model, ABM) 广泛用于分析公共政策仿真及各类激励机制下新技术的采纳及扩散 (丁超等, 2021)。最初, 基于 ABM 分析分布式光伏采纳与扩散仅考虑了财务激励单一度量指标 (Zhang H. et al., 2016); 随后, 建筑代理人 (光伏安装的决策主体) 态度 (Zhao J. et al., 2011)、环境因素 (Alyousef A. et al., 2017) 也被纳入模型之中; 最终, 计划行为理论整合了上述所有元素, 可以较为全面地衡量不同激励机制下光伏采纳及扩散决策行为 (Schiera D. S. et al., 2019)。推动分布式光伏采纳及扩散是一个多主体参与、多层次决策、多网络联系的复杂系统问题, 其涉及自然人主体、法人单位主体、光伏企业主体等多主体互动, 对分布式光伏采纳及扩散问题的已有研究, 一方面在考虑建筑代理人之间观点的相互影响时, 未充分考虑建筑代理人采纳后对光伏的重新评价与反馈将影响其他建筑代理人的行为, 而根据实际调研发现由于屋顶分布式光伏推广时存在夸张话术、早期光伏技术不达标等原因, 导致屋顶分布式光伏的实际发电能力与预期严重不符, 这将直接影响建筑代理人对屋顶分布式光伏的采纳意愿; 另一方面, 主要将 ABM 中的建筑代理人描述为个人、家庭或建筑, 研究中仅考虑了需求侧消费者之间采纳与扩散互动, 但是忽略了卖家即光伏企业和消费者的互动, 而充分考虑各类主体的有限理性互动是建立有效的分布式光伏利用激励机制的重要基础。

综上, 与已有研究相比, 本文创新之处是: 第一, 基于 ABM 分析建筑代理人是否采纳屋顶分布式光伏的决策过程中, 模型结构方面引入了动态反馈机制、代理人与企业交互模式以及政府信息干预强度。动态反馈机制方面, 设定上一期代理人反馈的结果将影响下一期其他代理人的认知与决策; 通过引入代理人与企业之间的交互机制, 投资回收期将根据建筑代理人选择不同出资模式而动态变化, 突破了传统仅假设单一回收期的局限; 政府信息干预强度的表征则可以使代理人决策能够实时响应政策变化。上述机制加深了对微观主体行为特征的认识, 有利于揭示市场微观主体的动态演变特征, 并可以更准确地刻画建筑代理人对不同激励机制的响应特征。第二, 现有研究已经从成本 (Petrovich B. et al., 2019)、产品美学 (Petrovich B. et al., 2019)、企业宣传 (Palm J. et al., 2018)、企业集聚 (Schaffer A. J. et al., 2015) 等角度分析了光伏企业对分布式光伏采纳及扩散的影响, 但是没有研究光伏企业与建筑代理人出资模式选择的不同对分布式光伏发展带来影响的差异; 本研究比较了“全额出资”与“屋顶租赁”两种商业模式下的建筑代理人收入与成本, 探究了哪种商业模式更具有发展潜力, 可以为促进屋顶分布式光伏发展的商业模式选择提供决策参考。

二、基于 ABM 的分布式光伏采纳及扩散模型构建

(一) 分布式光伏发电的决策主体交互行为模型

分布式光伏主要有两种商业模式: 一是光伏企业采取屋顶租赁模式; 二是建筑代理人自行出资模式。本文对建筑代理人 (包括光伏采纳者和未采纳光伏者) 及光伏企业有关人员进行了访谈^①, 以确定 ABM 构建的基础元素, 包括分布式光伏采纳决策过程、ABM 的环境等。访谈主要涉及五方面内容: 一是受访者的性别、年龄等社会信息; 二是受访者接触、认识屋顶分布式光伏的契机; 三

^① 对光伏采纳及扩散行为相关人员进行了一对一访谈, 其中, 光伏采纳者 47 人 (包括养老院经理、商用大厦物业、办公楼物业、住宅小区物业、住宅小区居委会、住宅小区居民、自建房居民、工厂厂长等不同类型建筑户主), 未采纳光伏者 15 人 (包括住宅居民、自建房居民、小微企业经理) 以及光伏企业员工 2 人, 这 2 人分别来自采取屋顶租赁模式的光伏企业和采取建筑所有人/承包人自行出资模式的光伏企业。由于光伏企业一般仅有上述两种出资模式, 而出资模式特征在业界属于常识, 因此对于文章中重点讨论的全额出资和屋顶租赁两种典型模式各选择访谈一名专业人员。

是采纳或不采纳屋顶分布式光伏的思考过程，包括光伏装机容量、收益情况、是否后悔等；四是受访者对屋顶分布式光伏有关政策、发电能力等决策信息的了解程度；五是受访者的消费习惯及投资风险偏好（王晓珍等，2019）。

1. 建筑代理人是否安装分布式光伏的决策模型

建筑代理人考虑是否安装分布式光伏的决策过程包括：首先，形成安装分布式光伏的想法；其次，了解投资回收期、运维成本等信息；最后，做出决策。该过程可基于计划行为理论进行刻画，在已有研究（Schiera D. S. et al., 2019）基础上将影响代理人观点的光伏采纳后的“反馈”、代表政府倡导行为力度的“政府信息干预”以及改变光伏投资回收期的“代理人与企业交互”模式加入决策模型（见图1）。

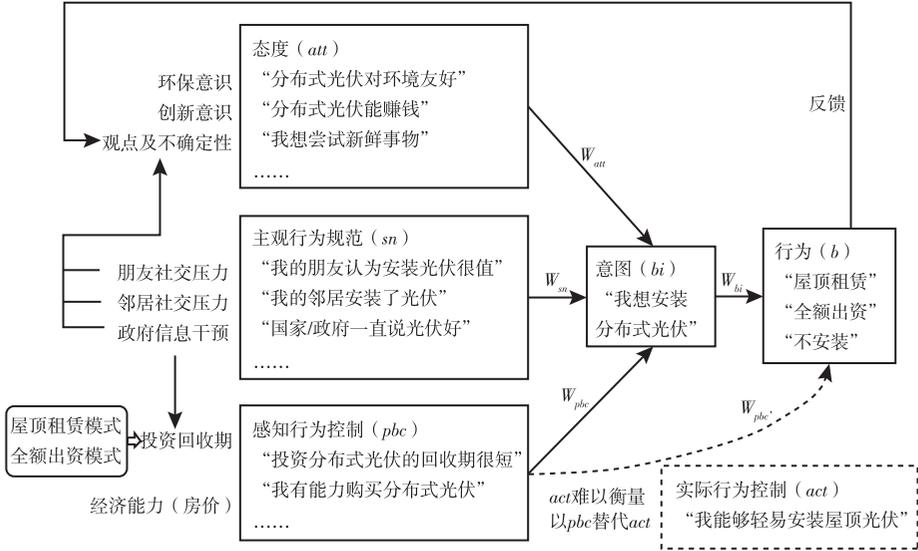


图1 建筑代理人是否安装屋顶分布式光伏的决策模型

2. 建筑代理人与光伏企业在安装分布式光伏中的交互关系

对建筑代理人而言，“屋顶租赁”型企业及“全额出资”型企业随机出现，以模拟光伏企业业务员的推广行为。基于调研获得的信息是：屋顶租赁模式下，光伏企业向建筑代理人租赁屋顶，租赁价格为每年固定支付，租期为15年。15年内，屋顶分布式光伏发电收益归光伏企业所有。15年后，光伏发电收益全部归建筑代理人所有。全额出资模式下，光伏企业仅提供安装及运维服务，全部发电收益归建筑代理人所有。

(二) 计划行为理论框架下的分布式光伏采纳机制

根据计划行为理论，确定采纳屋顶分布式光伏的意图 b_i [见公式(1)]， att 、 sn 与 pbc 分别表示对屋顶分布式光伏采纳行为的态度、主观规范及感知行为控制， W_{att} 、 W_{sn} 、 W_{pbc} 分别表示这三者在意图形成中的权重。

$$b_i = W_{att} \times att + W_{sn} \times sn + W_{pbc} \times pbc \quad (1)$$

最终，建筑代理人会采取的行动 b 建筑代理人 i 的意图 b_i 与实际控制 act 构成 [见公式(2)]， W_{bi} 是公式(1)计算的行为意图在最终行为中所占权重， W_{act} 是实际行为控制所占权重。由于实际行为控制难以估计，因此通常以感知行为控制 pbc 衡量（Schiera D. S. et al., 2019）。此外，由于中国光伏补贴政策退坡时，引起了大规模抢装行为，因此，使用 pbc 和 b_i 可以预测行为 b 。

$$b = W_{bi} \times b_i + W_{pbc'} \times pbc \quad (2)$$

效用阈值 ρ 可反映采纳分布式光伏技术满足建筑代理人偏好的程度 (Alderete Peralta A. et al., 2022)。因此, 本文使用 ρ 表示决策者作出决策阶段的意愿见公式 (3), 若意愿 b 高于阈值 ρ , 则建筑代理人采纳屋顶分布式光伏; 反之, 则不采纳。

$$b \geq \rho \tag{3}$$

由于个体因素、社会因素和信息共同促成信念的形成, 而这些信念又以对行为的态度、主观规范和感知行为控制为基础, 因此, 下文对分布式光伏采纳的态度、主观行为规范和感知行为控制的模型构建进行阐述。

1. 影响屋顶分布式光伏采纳的因素——代理人对屋顶分布式光伏的态度

基于已有光伏采纳相关的研究 (Caprioli C. et al., 2020), 从对屋顶光伏的观点、环境意识及创新意识这三种不同的信念来构建代理人的态度, 共同形成代理人对屋顶分布式光伏的态度 [见公式 (4)]。其中, opi_{std} 、 aw_{env} 、 inn_{std} 分别为对屋顶光伏的观点、环境意识及创新意识, W_{opi} 、 W_{aw} 、 W_{inn} 分别为这三者在形成态度中的权重。

$$att = W_{opi} \times opi_{std} + W_{aw} \times aw_{env} + W_{inn} \times inn_{std} \tag{4}$$

组成态度的第一项因素: 建筑代理人对屋顶分布式光伏观点的变化, 遵循“相对一致意见理论”(Relative Agreement, RA)。在 RA 中, 观点由基本态度 x 和不确定性 μ 表述。在本文中, 对每个建筑代理人的观点进行区间标准化处理 [见公式 (5)]; 通常, 已经采纳屋顶分布式光伏的建筑代理人对光伏的观点 (Caprioli C. et al., 2020) 满足 $x \geq 0.8$, $u = 0.1$, 然而由于推广过程中存在夸大宣传以及早期光伏技术不达标等问题, 屋顶分布式光伏的实际发电能力与预期相去甚远, 甚至只有宣传效果的 20%。因此本文引入“反馈”变量 $result$, 定义屋顶分布式光伏采纳后对光伏的重新评价与反馈, 若 $result$ 取 1, 表示光伏技术成熟, 光伏发电能力与预期一致, 建筑代理人喜爱光伏; 若 $result$ 取 -1, 表示建筑代理人厌恶光伏 [见公式 (6)]; 从实地调研情况看, 越早期的分布式光伏满意程度越低, 越靠近 2021 年建成的光伏满意程度越高, 本研究假设 $result$ 遵循技术发展的 S 型曲线 (Denholm P. et al., 2008)。S 型曲线已被广泛应用于社会科学规律的探索, 比如, Cowley T. et al. (2025) 针对区域供热网络技术采纳及扩散的研究中, 就采取了 S 型曲线刻画代理人对于新技术的态度。因此, 本文假设“反馈”变量也遵循 S 型曲线, 即在光伏技术发展初期, 由于信息渠道有限、社会关注度低, 且早期推广过程中存在夸大宣传以及早期光伏技术不达标等问题, 代理人对光伏满意程度较低。但随着政策推广、光伏市场日趋规范、技术成熟度逐步提高, 更多代理人开始认识并尝试该技术, 其对光伏的认知与满意度开始上升; 最后, 公众认知与态度增长速度放缓并趋于稳定。因此 $result$ 取 1 的概率应为随时间增加的函数, a 、 b 用于描述 S 型曲线的形态, 这两者取值将于仿真中依据实际数据进行调节 [见公式 (7)]。

$$opi_{std} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{5}$$

$$x_t = x_{t-1} \times result, result = -1, 1 \tag{6}$$

$$p(result = -1) = \frac{1}{1 + a^{t+b}} \tag{7}$$

组成态度的第二项因素: 环境意识, 代表一个建筑代理人在采取可持续的环境行动方面的自觉性和主动性的程度 (Mokha A. K., 2018)。环境意识介于 0 和 1 之间, 值越高越有环境意识 (Nuñez-Jimenez A. et al., 2020)。环境意识也被定义为随机分布, 与建筑代理人的其他特征没有任何关系。

组成态度的第三项因素：建筑代理人的创新水平代表了建筑代理人对创新的倾向性。这个静态变量取决于许多特征，如生活方式、习惯和个性，因此在本文提出的模型中，它根据建筑代理人的社会角色分配 (Schiera D. S. et al., 2019)。创新值在 1 到 5 范围变化，值越高越有创新能力。创新水平与观点类似，在最终计算态度之前将进行区间标准化处理。

2. 影响屋顶分布式光伏采纳的因素——主观行为规范

主观行为规范也称为感知的社会压力 (Subjective Norm, SN)，表示建筑代理人受到对他们重要的人的影响，如家人、朋友及地理意义上周围的人。

在主观行为规范的计算中，分布式光伏的采纳考虑了人际交往压力 (由朋友、家人、邻居等产生) (Caprioli C. et al., 2020) 以及社会压力 (由政府鼓励光伏发展产生)。主观行为规范为这两类压力的加权之和，如公式 (8) 所示：

$$sn_i = W_{social} \times (W_{splink} \times sp_{link} + W_{spdistrict} \times sp_{district}) + W_{gov} \times sp_{gov} \quad (8)$$

一般而言，朋友对建筑代理人的影响 sp_{link} 强于邻居的影响 $sp_{district}$ ，因此，朋友影响权重 W_{splink} 设定大于邻居的权重 $W_{spdistrict}$ 。 sp_{link} 和 $sp_{district}$ 均基于朋友社交网络和物理邻近网络 (Sekara V. et al., 2016) 中态度的平均值计算，其中 n_1 与 n_2 分别为朋友与邻居数量，计算方法如公式 (9) —公式 (11) 所示：

$$sp_{ij} = att_i \times \left[1 - \frac{u_i - 0.05}{20 - 0.05} \times (att_i - att_j) \right] \quad (9)$$

$$sp_{link} = \frac{1}{n_1} \times \sum_{j=1}^n sp_{ij} \quad (10)$$

$$sp_{district} = \frac{1}{n_2} \times \sum_{j=1}^n sp_{ij} \quad (11)$$

其中， sp_{ij} 为代理人 j 对代理人 i 产生的影响，该值以公式 (9) 计算，式中 20 和 0.05 分别是在 0 和 1 之间建立影响率的最大值及最小值，该算法遵循 RA 理论。当代理人 j 属于代理人 i 的朋友时，遵循公式 (10) 计算社会压力；当代理人 j 属于代理人 i 的邻居时，遵循公式 (11) 计算社会压力 (Alyousef A. et al., 2017)。

3. 影响屋顶分布式光伏采纳的因素——感知行为控制

感知行为控制可通过屋顶分布式光伏的投资回收期及建筑代理人财富情况 [见公式 (12)] 进行量化计算 (Caprioli C. et al., 2020)：

$$pbc_i = W_{pfi} \times pf_i + W_{ifi} \times if_i \quad (12)$$

其中， pf_i 是标准化的屋顶分布式光伏的投资回收期， if_i 是标准化后建筑代理人 i 的财富情况。 W_{pfi} 及 W_{ifi} 分别指代投资回报及财富的权重。

本研究用获取的房价情况表征光伏采纳者的财富情况信息。房价因素一方面决定了屋顶分布式光伏的机会成本，房价越高对户主而言屋顶的休闲娱乐、绿化等非经济效用更大，对闲暇等需求越高越不利于屋顶分布式光伏采纳；另一方面高房价地区的居民往往为高收入阶层，消费及投资能力较强，能承担较高的光伏初期建设成本。以公式 (13) 计算 if_i ， $houseprice$ 为房价数据， $houseprice_i$ 为 i 处的房价：

$$if_i = \left(\frac{houseprice_i - \min houseprice}{\max houseprice - \min houseprice} \right) \quad (13)$$

在实地调研中发现，光伏推销员通常以项目的投资回收期，而非投资回报率向客户介绍分布式光伏。同样地，光伏采纳者通常以“几年回本”这样的说法向本研究描述分布式光伏的盈利能力。归一化后的投资回收期如公式 (14) —公式 (16) 表示：

$$pf_i = \frac{PP_{max} - PP}{PP_{max} - PP_{min}} \quad (14)$$

$$npv = -I + \sum_{y=0}^n \frac{R(y)}{(1+r)^y} \quad (15)$$

$$npv \geq 0 \rightarrow y = pp \quad (16)$$

公式 (14) 为计算归一化后的投资回收期，公式 (15) 及公式 (16) 为投资回收期 pp 的计算过程： y 为屋顶分布式光伏采纳时长， r 为贴现率， I 为初始投资成本， $R(y)$ 为采纳屋顶分布式光伏的年收入。其中，建筑代理人与光伏企业合作模式决定了 I 与 $R(y)$ 的计算。

屋顶租赁模式中，建筑代理人收益为屋顶租金，成本为屋顶使用的机会成本。建筑代理人对屋顶分布式光伏的初始投资 I 为机会成本 *OpportunityCost* [见公式 (17)]；年收入为屋顶租金 [见公式 (18)]。

$$I = OpportunityCost \quad (17)$$

$$R(y) = rent \quad (18)$$

在全额出资模式中，建筑代理人自费安装屋顶光伏，光伏企业仅提供安装与后续运维支持。建筑代理人的初始投资成本如公式 (19) 所示：

$$I(y) = \frac{1}{10} \times \alpha \times S \times C_{pv} \times (1 + r_{pv})^t \quad (19)$$

其中， $1/10$ 为光伏面积与装机容量的转换率^①， α 为屋顶利用率， S 为屋顶面积， C_{pv} 为单位投资成本， $(1 + r_{pv})^t$ 为单位投资成本随时间 t 以速率 r_{pv} 变化。建筑代理人全额出资模式中，其收益如公式 (20) 所示：

$$R(y) = \frac{1}{10} \times \alpha \times h \times S(P + subsidy) - C_{o\&m} (1 + r_{o\&m})^t \quad (20)$$

其中， h 为年利用小时数， P 为光伏电价，若光伏为“全部自用”模式，该价格为自用电价，节约的电费视为收益；若光伏上网模式为“自发自用、余电上网”模式，那么该电价由自用电价格及当地脱硫燃煤标杆上网电价共同构成；若光伏上网模式为“全额上网”，则该电价为当地脱硫燃煤标杆上网电价。*subsidy* 为政府补贴，补贴品类及额度各地区不尽相同。 $C_{o\&m}$ 为年运维成本， $(1 + r_{o\&m})^t$ 表示单位投资成本随着时间 t 以速率 $r_{o\&m}$ 变化。

(三) 考虑网络结构效应的分布式光伏扩散路径及方式

1. 扩散路径：小世界网络与物理邻近网络

小世界网络很好地映射了人与人之间存在的真实关系网络 (王璐等, 2022)，因此，本研究的分布式光伏采纳及扩散模型中采纳的社会网络赋予小世界属性。此外，已有研究表明分布式光伏的分布具有显著的空间同伴效应 (梅应丹等, 2022)。因此，本研究将邻居作为社会压力的一个来源。邻居的计算分为三个步骤。首先，计算建筑的中心位置。以建筑平面图的质心作为建筑的中心位置，计算仿真范围内所有建筑的中心点。其次，计算所有建筑中心点与其他所有建筑的距离。最

① 数据来源：根据实际调研得到。

后，根据实际情况，选取合适的距离长度，将范围内的所有建筑作为邻居。通过物理邻近网络，接收邻居对代理人观点的影响。

2. 观点相互影响程度

人际交往会产生社会中的多元观点，意见动力学模型通常用于描述观点的形成 (Deffuant G. et al., 2000)。在意见动力学模型中，社会行为者会根据社会影响或自己的经验对意见进行修正。本文将分布式光伏采纳的观点扩散视为时间上的连续变量，可影响个体的最终行为。在本模型中，分布式光伏的口碑演变直接影响行为态度和社会规范。运用文献 (Deffuant G. et al., 2000) 提出的连续意见动力学模型，观点的扩散方式遵循 RA 算法，观点 x 在 -1 到 1 范围变化，不确定性 u 在 0 到 2 范围变化，如图 2 所示。

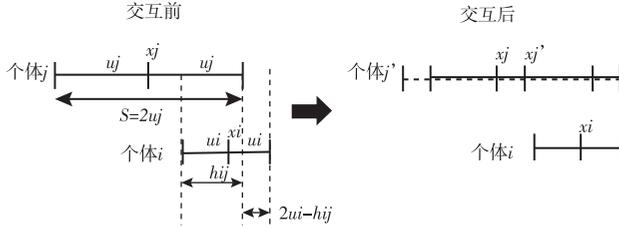


图 2 基于“相对一致意见”的个体 i 对个体 j 的影响

在图 2 中，个体 i 与个体 j 的重叠部分代表 i 与 j 的相似程度，以一致性 $h_{ij} = \min(x_i + u_i, x_j + u_j) - \max(x_i - u_i, x_j - u_j)$ 表示，此时，非重叠部分的宽度为 $2u_i - h_{ij}$ 。重叠部分减去非重叠部分构成了协议长度： $2(h_{ij} - u_i)$ 。相对一致性是一致性除以段 S 的长度： $h_{ij}/u_i - 1$ 。

若 $h_{ij} > u_i$ ，则通过个体 i 的交互作用，个体 j 的观点及不确定性的修改与有界置信区间的修改非常类似，只是需要乘以相对一致性，如公式 (21) 所示。

$$\begin{aligned} x'_j &= x_j + \mu \left(\frac{h_{ij}}{u_i} - 1 \right) (x_i - x_j) \\ u'_j &= u_j + \mu \left(\frac{h_{ij}}{u_i} - 1 \right) (u_i - u_j) \end{aligned} \quad (21)$$

其中， μ 是一个常数参数，决定了相对一致意见趋同的速度，通常取值为 0.5 (Deffuant G. et al., 2000)。 h_{ij} 表示个体 i 与个体 j 观点一样的部分， x'_j 表示个体 j 受到个体 i 影响之后的新观点， u'_j 表示个体 j 受到个体 i 影响之后新观点的不确定性。

若 $h_{ij} \leq u_i$ ，则个体 i 对个体 j 没有影响，个体的观点不会使个体 j 的观点发生变化。

三、仿真计算与模型校准

仿真计算中的建筑信息与地理位置数据来自《城市用地分类与规划建设用地标准》、北京市发改委公布的 2016—2021 年底光伏并网装机容量等数据；建筑代理人对分布式光伏采纳的态度、小世界网络链接的朋友数量、物理邻近网络链接的邻居数量、政府信息干预强度、代理人的财富能力等数据通过文献调研、实地调研、图像识别结果及公开数据库获得^①。房价数据从链家、我爱我家等房地产交易平台中以爬虫方式获取。对于数据缺失的建筑，在 Arcmap 软件中对点数据形式的房价数据进行克里金插值，得到所有建筑的房价数据 *houseprice*。

① 由于篇幅所限，这部分内容不再阐述，感兴趣的读者可以向作者索要。

不同电价会导致代理人采纳光伏的投资回收期不同。按照建筑类型不同，自发自用模式中代理人的收益部分来自节约的电费，电价数据为北京市居民电价、一般工商业电价、大工业的用电价格（执行峰谷差价的取峰段与平段的按时间比例的加权平均数）（见表 1），其中，一般工商业与大工业电价具体分为城区电价与郊区电价，城区包括老城区东西城和次新的朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区，其余为郊区。

表 1 电力上网价格参数

价格分类(单位:元/千瓦时)	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
居民电价	0.4883	0.4883	0.4883	0.4883	0.4883	0.4883
城区一般工商业电价	1.1374	1.1374	1.1374	1.0476	1.0476	1.0302
城区大工业电价	0.8497	0.8317	0.8317	0.8317	0.8317	0.986
郊区一般工商业电价	1.1374	1.1274	1.1274	1.0034	1.0034	0.7893
郊区大工业电价	0.8497	0.8217	0.8217	0.8217	0.8217	0.7793
脱硫燃煤机组标杆上网电价	0.3515	0.3598	0.3598	0.3598	0.3598	0.3598
一般项目租金(元/千瓦/年)	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000
装机补贴项目租金(元/千瓦/年)	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000	16.0000	16.0000

注：根据国家发改委、北京市发改委及北京市各区发改委公开文件整理所得。

北京市分布式光伏发电项目可以同时享受国家级、北京市级与各行政区域的补贴。国家层面以度电补贴为主，并在 2020 年大幅退补；北京市在承接国家补贴基础上对执行居民电价的非居民用户的度电补贴提高至 0.4 元；区级项目则采取初始投资补贴与度电补贴结合的模式，具体补贴额汇总于表 2。

表 2 北京市屋顶分布式光伏项目补贴汇总

补贴分类	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
国家度电补贴(元/千瓦时)	0.42	0.42	0.37	0.32	户用: 0.08 工商业: 0.05	户用: 0.08 工商业: 0.00
北京市常规项目补贴(元/千瓦时)	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>
北京市执行居民电价的非居民用户补贴(元/千瓦时)	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.30</u>	<u>0.40</u>	<u>0.40</u>
海淀区(元/千瓦)	300	300	300	30% 投资 额补助	未享受市级补 贴的项目;300	30% 投资 额补助
西城区	—	—	—	—	30% 投资 额补助	30% 投资 额补助
顺义区(对自然人项目的补贴,元/千瓦时)	—	0.40	0.40	河西:0.30 河东:0.36	与市级一致	与市级一致
顺义区(对法人项目的补贴,元/千瓦)	—	300	300	河西:225 河东:270	与市级一致	与市级一致

注：①加粗字体表示补贴 20 年，加下划线表示补贴 5 年，没有加粗与下划线的为一次性补贴；②数据来源：根据国家发改委、北京市发改委及北京市各区发改委公开文件整理所得。

本研究将建筑物所属价格根据用地类型进行分类，执行居民电价的为处于教育用地、居住用地上的建筑，取北京市一档居民电价 0.4883 元/千瓦时以计算收益下限；执行一般工商业电价的，为

位于商业用地、旅游景区用地上的建筑；工业用地、交通用地等用地建筑执行大工业电价；对于医疗卫生设施用地与文化体育用地等无法区分用电类型的项目，取居民、工商业以及大工业电价中最低的居民电价。上网电价执行北京市脱硫燃煤机组标杆上网电价，2016年的脱硫燃煤机组标杆电价为0.3515元/千瓦时，2017—2021年为0.3598元/千瓦时。

光伏采纳扩散模型校准包括调整在屋顶分布式光伏采纳意图形成中的权重、建筑代理人效用阈值 ρ 的值以及“反馈”*result*中的参数。对于每位建筑代理人来说，这三类参数可能不尽相同，但将参数精细度覆盖至每栋建筑的目标，以当前的数据统计情况难以达成，因此本部分根据2016—2021年的北京市分布式光伏装机容量对模型进行校准，调整三类参数值，以使得本研究的ABM可以描述微观建筑代理人到宏观屋顶分布式光伏采纳及扩散的涌现现象。参数调整的主要步骤如下：

首先，通过国内外文献调研设定计划行为理论模型中的初始参数，发现其他地区研究参数不完全适用于北京市，如美国因家庭政治身份（Mildenberger M. et al., 2019）和种族差异（Sunter D. A. et al., 2019）影响光伏采纳率，德国绿党地区光伏采纳率更高（Inhoffen J. et al., 2019），因此各权重取值部分参考现有文献，部分根据2016—2021年的北京市分布式光伏装机容量校准，如表3所示。其次，固定各权重参数，调整效用阈值 ρ ，在进行模型校准过程中发现，当阈值小于0.5时，拟合值高于真实值，过多建筑代理人采纳屋顶分布式光伏，此时阈值设定偏低；当阈值大于0.6时，拟合值低于真实值，过少建筑代理人采纳屋顶分布式光伏，因此，合理阈值 ρ 为0.5至0.6。最后，固定效用阈值 ρ ，调整反馈*result*概率参数 a 与 b 观察光伏技术与预期一致的概率变化对装机容量增速的影响。仿真模型在PyCharm社区版环境进行开发，使用计算机CPU型号为英特尔i5-12600K、三星16.0GB内存。

表3 关键参数及取值

符号	含义(权重)	取值	符号	含义(权重)	取值
W_{bi}	行为意图	0.7	W_{slink}	朋友压力	0.7
W_{pbc}	实际行为控制	0.3	$W_{spdistrict}$	邻居压力	0.3
W_{att}	态度	0.33	W_{gov}	政府推动压力	0.5
W_{sn}	主观行为规范	0.33	W_{social}	人际交往压力	0.5
W_{pbc}	感知行为控制	0.33	W_{pfi}	投资回收期	0.5
W_{opi}	对光伏的意见	0.5	W_{yfi}	财富情况	0.5
W_{aw}	环境意识	0.25	a	<i>result</i> 增长率	4
W_{inn}	创新意识	0.25	b	<i>result</i> 后置量	-3

表3中关键参数取值的理由是：（1）在实际调研中发现强烈的安装意愿是光伏采纳行为的主要驱动力，若代理人没有采纳光伏的意图，即使补贴等外部政策环境再优越也难以使其安装光伏，实际行为控制则衡量了意图转化为行为的可能性，基于该发现参考了Schiera D. S. et al. (2019)的研究对行为意图权重 W_{bi} 和实际行为控制权重 W_{pbc} 取值为0.7和0.3，并遵从Caprioli C. et al. (2020)假设态度 W_{att} 、主观行为规范 W_{sn} 、感知行为控制 W_{pbc} 具有相同的权重。（2）由于缺乏实证以及文献支撑，初始设计对光伏的意见 W_{opi} 、环境意识 W_{aw} 以及创新意识 W_{inn} 这三个权重相等，但在校准过程中发现对光伏的意见 W_{opi} 权重变动对于模型校准效果影响更大，这主要是因为模型核心刻画的是光伏采纳行为，因此对于对屋顶分布式光伏的固有观点意见占主导地位，而环境意识和创新意识作为间接动机，相对于对光伏的意见不占主导地位，最终通过模型校准将这三类权重设置为

0.5、0.25与0.25。(3)朋友对代理人的影响大于邻居对代理人的影响,因此参考文献 Caprioli C. et al. (2020),将朋友与邻居的权重 W_{slink} 和 $W_{sdistrict}$ 分别设定为0.7与0.3。在缺乏实证数据明确表明哪一种压力对于代理人更重要的情况下,假设政策环境与社会互动对个体决策影响大致相当,从而避免人为偏差,因此政府推动压力 W_{social} 及人际交往压力 W_{gov} 权重均设定为0.5。(4) Caprioli C. et al. (2020) 的研究表明,投资回收期 W_{pfi} 与财富情况 W_{fi} 在建筑代理人感知行为控制过程的起到同样重要的作用,因此这两个权重均取0.5。(5)在确定了前述权重基础上,对a与b取整排列组合,通过模型校准发现a为4、b为-3时校准效果最佳。

建筑代理人的朋友由小世界网络生成,小世界网络的主要参数取节点N设定为57万栋建筑,即57万个代理人,反映了网络中的所有节点数量。根据“六度分隔”理论,将每个人的朋友定义为6位,因此聚合系数K取6。并根据课题组前期对北京市屋顶光伏识别工作中的屋顶分布式光伏用户距离,将邻居定义为距离100米内的建筑。

出于仿真结论的可靠性和普遍性考虑,在同一参数设置下,重复10次仿真,形成平均拟合数据,最终平均拟合值如图3所示,将仿真拟合值与北京市2016—2021年分布式光伏项目审批容量、《中国电力统计年鉴》2022版中公布的北京市分布式光伏装机容量进行对比,本研究拟合误差为6%,具有可靠性。

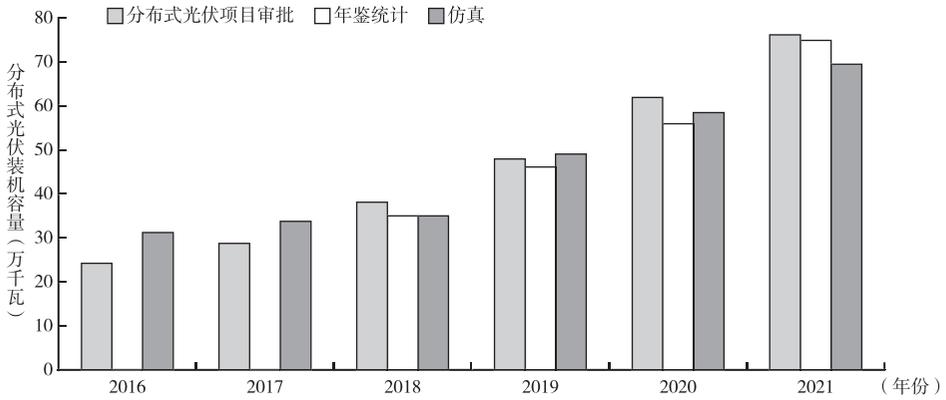


图3 北京市屋顶分布式光伏装机容量仿真计算的模型校准效果

四、不同激励机制下的北京市屋顶光伏采纳扩散结果及分析

屋顶分布式光伏能够在土地稀缺且相对昂贵的人口稠密地区大规模部署,可以提高北京市这种超大城市的本地可再生能源比例,减轻对跨省输电的依赖。本部分利用前面建立的分布式光伏采纳及扩散模型,对不同激励机制下北京市屋顶分布式光伏装机容量进行仿真预测,分析各类激励机制对北京市在2025年实现“十四五”能源规划阶段性目标的影响差异。

(一) 基准情景下的结果分析

基准情景下,既定政策保持不变,仿真结果如图4所示。此情景下,2025年北京市屋顶分布式光伏累计装机容量约为129万千瓦,年发电量约为15.61亿千瓦时,其中自用电量约为10.93亿千瓦时,上网电量可达4.68亿千瓦时。

从政策实施成本来看,补贴年限不同会直接影响补贴政策实施的成本。在基准情景下,政府在2022—2025年的财政支出不仅涵盖了同期新建的分布式光伏项目,还包括2018—2021年项目的存续补贴。按补贴总年限为5年计算,2018年投运的项目在2022年仍有1年补贴期,同理2019—

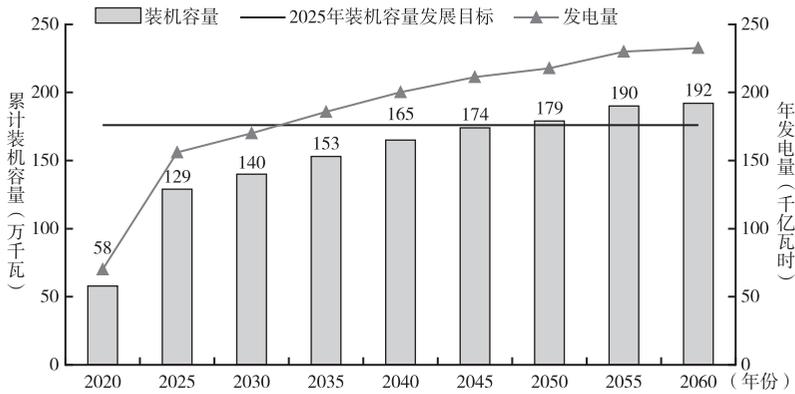


图4 基准情景下未来北京市屋顶分布式光伏装机容量及发电量

数据来源：根据《北京市“十四五”时期能源发展规划》、国家能源局公开数据整理所得。

2021年投运的项目在2022—2025年分别还有2—4年的补贴期；而2022—2025年新建项目，其补贴期截至2025年时分别剩余4年、3年、2年和1年。根据“一般项目”及“享受居民电价的非居民项目”两类项目比例不同，北京市政府在2022—2025年需投入的补贴总金额为6—8亿元^①，按照《北京市“十四五”时期能源发展规划》规定，以2020年为基期，“到2025年，全市整区屋顶分布式光伏试点新增光伏发电装机120万千瓦”，即至2025年累计装机176万千瓦。因此，基准情景下无法达到北京市屋顶分布式光伏发展目标。

（二）北京市度电补贴提高的激励效果

财政补贴可以直接提高分布式光伏的收益，缩短投资回收期，从而提高建筑代理人的感知行为控制能力，促成代理人对分布式光伏的采纳。本研究参考周燕和潘遥（2019）的做法，使用分位数法将财政补贴设置为提高0.1元/千瓦时、0.2元/千瓦时、0.3元/千瓦时三种情况进行仿真模拟，仿真结果如图5所示。

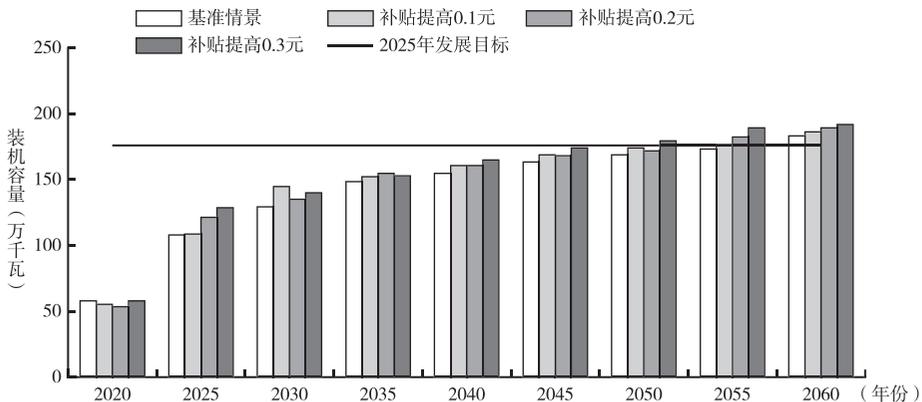


图5 不同财政补贴额下北京市屋顶分布式光伏装机容量

表4展示了不同度电补贴下的财政补贴总额支出。在度电补贴情景下，即使补贴提高0.3元/千瓦时，财政支出将近10亿元仍无法达到2025年分布式光伏发展目标，原因是国家补贴退坡造成的影响无法通过市级补贴对冲。2019年以前，国家补贴力度大，每千瓦时最低补贴0.37元，且持

^① 根据文中表2所示补贴政策，通过区分不同区域的补贴政策、建筑主体类型，计算已有装机容量及2022—2025年新增装机容量，并将每栋建筑的补贴额进行累加，得出该补贴总额。

续时间达二十年，2021年起取消了工商业分布式光伏的度电补贴，户用分布式光伏补贴也锐减至0.08元/千瓦时，而北京市的补贴政策为连续五年以0.3元/千瓦时补贴分布式光伏发电量。因此，即使北京市五年的度电补贴额度提高一倍，仍难以抵消二十年国家度电补贴退坡造成的新增分布式光伏装机容量下降。

表4 2025年屋顶分布式光伏装机容量及财政补贴总额（度电补贴模式）

度电补贴提高额度 (元/千瓦时)	2025年装机容量 (万千瓦)	2022—2025年财政补贴总额 (亿元)
0.00	108.02	6.00—8.00
0.10	109.24	6.29—8.38
0.20	121.67	7.03—9.38
0.30	128.58	7.84—10.45

（三）建设分布式光伏示范项目的激励效果

本部分模拟在2022年建设不同数量的分布式光伏项目试点，通过试点项目带动的模式，完成2025年北京市分布式光伏发展目标。研究首先通过分位数法（周燕和潘遥，2019）设置2022年建设1万、2万、3万、4万、5万栋建筑采纳屋顶分布式光伏，当明确范围后，通过二分法寻求达到分布式光伏发展目标的临界值，结果如图6所示。研究发现，当2022年在33000—35000栋建筑建设屋顶分布式光伏示范项目时，通过屋顶分布式光伏的扩散现象，可以在2025年达到北京市分布式光伏发展目标。

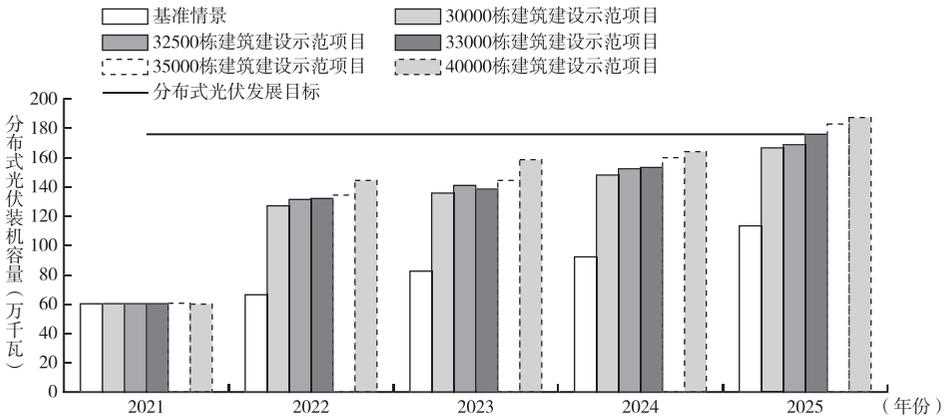


图6 不同示范项目规模下北京市屋顶分布式光伏装机容量

（四）光伏企业出资模式不同对光伏采纳及扩散的影响

本部分区分“屋顶租赁”模式、“全额出资”模式以及两种模式共存的混合模式，分别拟合了北京市屋顶分布式光伏在2020—2060年装机容量变化（见图7）。

图7显示，采取“全额出资”方式的分布式光伏装机容量增长迅速，在基期条件没有发生变化时，即可达到2025年光伏发展目标。而仅采取“屋顶租赁”模式时，分布式光伏长期维持在装机容量较低的水平。可能的原因是，当分布式光伏投资回收期可预期时，“屋顶租赁”及“全额出资”模式的本质，是分布式光伏发电收益在光伏企业或者建筑代理人中的分配问题。“屋顶租赁”模式下光伏企业享有大部分收益，“全额出资”模式中建筑代理人占据大部分收益。因此，“屋顶租赁”模式降低了建筑代理人采纳分布式光伏的意愿，相对不利于分布式光伏的推行。

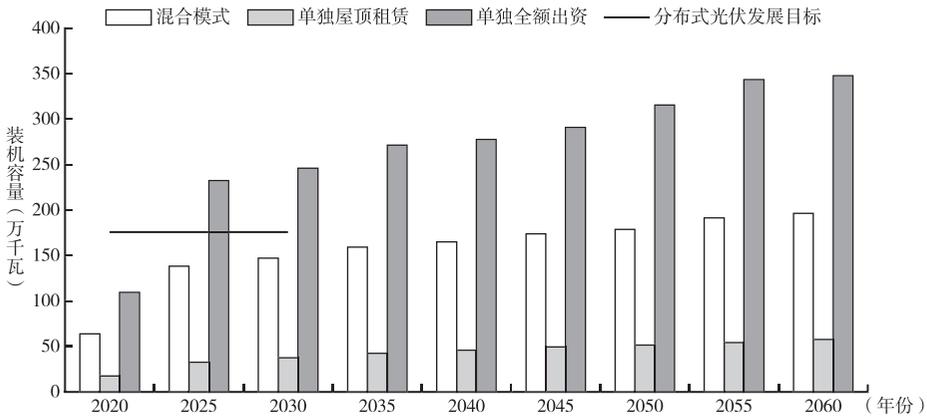


图7 不同交互方式下北京市屋顶分布式光伏装机容量

五、结语

分布式光伏利用是促进城市能源转型的重要手段，中国分布式光伏已步入快速发展阶段，近3年并网容量年均增长速度达到47.68%，然而其潜力还未得到充分开发（Zhang Z. et al., 2023）。尤其是在国家财政“退补”背景下，亟须设计合理的激励分布式光伏发展的机制。

针对当前关于分布式光伏激励机制研究中忽视光伏企业与消费者互动的问题，本文整合了ABM和计划行为理论模型，考虑了“反馈”“政府信息干预”“企业与代理人交互”因素，基于此构建了分布式光伏采纳及扩散模型；基于该模型，并以北京市为例，分析了地方财政补贴上升、示范项目建设、光伏企业出资模式等不同情景下，北京市分布式光伏的发展情形。研究发现，地方政府补贴、建设示范项目、不同出资模式几类激励机制通过感知行为控制、态度、社会压力传导影响分布式光伏的采纳，其中，首先是光伏企业出资模式选择对屋顶分布式光伏采纳影响最大，其次是建设示范项目、地方政府补贴。研究还发现，只是延续当前北京市分布式光伏激励政策，则较难实现2025年分布式光伏发展目标；如果采取建设示范试点项目的激励方式，则可以促使目标达成；若鼓励“全额出资”模式，则至2025年可超额完成目标，累计装机可达232万千瓦。本模型是基于ABM框架并嵌入计划行为理论以刻画建筑代理人的决策过程，代理人的核心决策逻辑（如计划行为理论框架下的态度、主观行为规范以及感知行为控制对采纳意愿均有影响）具有普适性，但是当政策环境或研究区域不同时，需调整基础数据输入及不同参数权重，基础的数据包括不同地区的建筑数据、电价、补贴政策、房价等，而模型内部参数的权重需因地制宜校准，例如在政策扶持力度较强的地区，代理人的经济收益预期明确，决策中对经济回报周期、成本收益的权重可能较高；而在政策激励不确定性较强的地区，代理人可能更加注重光伏系统的技术可靠性、维护成本以及社会网络中的成功案例等非经济因素，可在模型中调高态度与主观行为规范的权重并调整小世界网络参数。

基于以上研究结论，本文提出如下政策建议：

第一，鼓励光伏企业与建筑代理人在政策扶持力度较强、电价较高的地区以“全额出资”模式签订合同。若具备类似北京这样较好的政策环境，可优先采用“全额出资”模式。但与“屋顶租赁”模式相比，“全额出资”模式所需的初始投资较大，对经济条件较薄弱的家庭构成一定经济压力，因此推广该模式需要配套相应金融优惠政策，并加强对光伏企业的资质审核与监管，提高光伏板安装质量。

第二，在城市建筑密度较大的地区扩大光伏安装示范项目比例，优化示范项目布局。示范项目

比例的扩大在北京市之所以能够通过网络效应迅速带动周边装机,是因为依托于高密度建筑环境和成熟的宣传机制。本研究显示,平均每增加一个示范性项目能够增加0.3MW的装机。因此,为促进屋顶分布式光伏发展应适时扩大示范项目的比例。同时,由于示范项目主要通过网络结构效应进行扩散,可以选取在示范项目选址时考虑多中心布局,以辐射影响更大范围的居民;而在农村或电网负荷薄弱区域则需优先选取具有代表性的行政村或乡镇集体场所作为节点,并配合当地媒体和村务组织的推广,最大化社会传播影响。

第三,2025年以后可以考虑取消北京市级分布式光伏发电的财政补贴。为达到北京市“十四五”能源发展规划中分布式光伏增长目标,北京市对2025年前并网发电主体仍实施补贴^①,但2025年后是否继续施行补贴政策仍不明确。本研究发现,当取消2025年以后的北京市分布式光伏度电补贴时,尽管预测装机容量在2030年略有下降,但将时间延伸至2060年时,取消补贴与继续补贴的装机容量几乎一致。同时,若2025年以后取消对分布式光伏的市级财政补贴,每年至少节约财政支出6亿—8亿元。

需要说明的是,本文还存在诸多不足:首先,本研究基于实地调研与文献回顾尽可能细化建筑代理人的决策过程,但示范项目效应仅通过数量模拟,未体现项目规模、技术水平等因素的影响,并且在代理人态度建模时未能刻画接网难度等细节。在未来研究中,将通过实地调研、问卷访谈及公开资料收集等多种形式,获取示范项目的装机规模、技术类型、运行效率等关键特征,并将接网难度这一指标纳入模型中;其次,本研究尚未将碳交易市场与绿证交易机制纳入模型。随着全国碳交易市场与绿证市场逐步完善,后续研究可增设相应子模块,构建分布式光伏项目参与绿证交易与碳交易的行为逻辑,可定量评估绿证价格和碳价对光伏发电经济效益的边际影响,进而分析不同定价水平下屋顶分布式光伏采纳与扩散的变化,并基于不同区域的绿证价格与碳价水平开展敏感性分析,以揭示碳交易与绿证交易机制对屋顶分布式光伏采纳与扩散的影响机制;最后,本文仅考察了不同政策的激励效果,探讨何种政策能够更有效促进屋顶分布式光伏的采纳与扩散,但是缺少对于不同政策成本效益以及实施路径的比较分析,未来将通过更广泛的调研进一步对不同政策进行比较。

参考文献

丁超、付汉良、何玉麒等(2021):《再生水回用行为引导政策作用效果仿真》,《中国人口·资源与环境》第3期,第161—170页。

梅应丹、邱纪翔、许杏柏等(2022):《网络效应对家庭分布式光伏发电行为的影响》,《中国人口·资源与环境》第3期,第28—37页。

王璐、马庆庆、杨劼等(2022):《基于复杂网络演化博弈的绿色消费者对新能源汽车扩散的影响研究》,《中国管理科学》第4期,第74—85页。

王晓珍、郑颖、蒋子浩等(2019):《补贴政策对家用光伏购买意愿的影响——基于心理距离和风险偏好的实证分析》,《软科学》第4期,第130—135页。

周燕、潘遥(2019):《财政补贴与税收减免——交易费用视角下的新能源汽车产业政策分析》,《管理世界》第10期,第133—149页。

Alderete Peralta A., Balta-Ozkan N. and Longhurst P. (2022), “Spatio-temporal modelling of solar photovoltaic adoption: An integrated neural networks and agent-based modelling approach”, *Applied Energy*, 305: 117949.

Alyousef A., Adepetu A. and De Meer H. (2017), “Analysis and model-based predictions of solar PV and battery adoption in Germany: an agent-based approach”, *Computer Science-Research and Development*, 32 (1-2): 211-223.

Caprioli C., Bottero M. and De Angelis E. (2020), “Supporting Policy Design for the Diffusion of Cleaner

^① 曹政:《新建公共机构建筑屋顶至少半数覆盖光伏》,《北京日报》2023年3月29日,第6版。

- Technologies: A Spatial Empirical Agent-Based Model”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9 (10): 581.
- Cowley T., Hutty T. and Hammond J., et al. (2025), “Accelerating residential decarbonisation: How stakeholder decision-making and socio-economic dynamics affect multi-decadal district heating network expansion”, *Energy*, 326: 136304.
- Deffuant G., Neau D. and Amblard F., et al. (2000), “Mixing beliefs among interacting agents”, *Advances in Complex Systems*, 3 (1n04): 87–98.
- Denholm P. and Margolis R. (2008), “Supply Curves for Rooftop Solar PV-Generated Electricity for the United States”, *Technical Report*.
- Dharshing S. (2017), “Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany”, *Energy Research & Social Science*, 23: 113–124.
- Faiers A., Cook M. and Neame C. (2007), “Towards a contemporary approach for understanding consumer behaviour in the context of domestic energy use”, *Energy Policy*, 35 (8): 4381–4390.
- Inhoffen J., Siemroth C. and Zahn P. (2019), “Minimum prices and social interactions: evidence from the german renewable energy program”, *Energy Economics*, 78: 350–364.
- Karneyeva Y. and Wüstenhagen R. (2017), “Solar feed-in tariffs in a post-grid parity world: The role of risk, investor diversity and business models”, *Energy Policy*, 106: 445–456.
- Mildenberger M., Howe P. D. and Miljanich C. (2019), “Households with solar installations are ideologically diverse and more politically active than their neighbours”, *Nature Energy*, 4 (12): 1033–1039.
- Mokha A. K. (2018), “Impact of Green Marketing Tools on Consumer Buying Behaviour”, *Asian Journal of Management*, 9 (1): 168–174.
- Núñez-Jimenez A., Knoeri C. and Hoppmann J., et al. (2020), “Can designs inspired by control theory keep deployment policies effective and cost-efficient as technology prices fall?”, *Environmental Research Letters*, 15 (4): 044002.
- Palm J. and Eriksson E. (2018), “Residential solar electricity adoption: how households in Sweden search for and use information”, *Energy, Sustainability and Society*, 8 (1): 1–9.
- Petrovich B., Hille S. L. and Wüstenhagen R. (2019), “Beauty and the budget: A segmentation of residential solar adopters”, *Ecological Economics*, 164: 106353.
- Rai V., Reeves D. C. and Margolis R. (2016), “Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV”, *Renewable Energy*, 89: 498–505.
- Schaffer A. J. and Brun S. (2015), “Beyond the sun—Socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany”, *Energy Research & Social Science*, 10: 220–227.
- Schelly C. (2014), “Residential solar electricity adoption: What motivates, and what matters? A case study of early adopters”, *Energy Research & Social Science*, 2: 183–191.
- Schiera D. S., Minuto F. D. and Bottaccioli L., et al. (2019), “Analysis of Rooftop Photovoltaics Diffusion in Energy Community Buildings by a Novel GIS – and Agent-Based Modeling Co-Simulation Platform”, *IEEE Access*, 7: 93404–93432.
- Sekara V., Stopczynski A. and Lehmann S. (2016), “Fundamental structures of dynamic social networks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113 (36): 9977–9982.
- Sunter D. A., Castellanos S. and Kammen D. M. (2019), “Disparities in rooftop photovoltaics deployment in the United States by race and ethnicity”, *Nature Sustainability*, 2 (1): 71–76.
- Zhang H., Vorobeychik Y. and Letchford J., et al. (2016), “Data-driven agent-based modeling, with application to rooftop solar adoption”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 30 (6): 1023–1049.
- Zhang Z., Chen M. and Zhong T., et al. (2023), “Carbon mitigation potential afforded by rooftop photovoltaic in China”, *Nature Communications*, 14 (1): 2347.
- Zhao J., Mazhari E. and Celik N., et al. (2011), “Hybrid agent-based simulation for policy evaluation of solar power generation systems”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19 (10): 2189–2205.

Assessment of Rooftop Distributed Photovoltaic Adoption and Diffusion Incentive Mechanisms By Developing Agent-based Modeling

ZHAO Xiaoli, ZENG Yun, SUN Chuyu

(School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;
Institute for Low Carbon Economy and Policy, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: Rooftop distributed PV has the characteristics of widespread and great potential. To investigate the measures of promoting rooftop distributed PV, this study integrates the theory of planned behavior and the multi-agent model, constructs a simulation model of rooftop distributed PV adoption and diffusion, incorporating the “feedback” mechanism, “government information intervention”, and “enterprise-agent interaction module” into the analytical framework to more realistically depict the PV adoption decision-making and diffusion process. Then the micro-dynamic change of markets can be better captured. The study shows that the model constructed in this paper can effectively explain rooftop distributed PV agents’ decision-making behavior and their response to incentive mechanisms. It is found that different incentive mechanisms, such as local government subsidies, construction demonstration projects, and choice of funding model, have relatively significant differential impacts on the diffusion of rooftop distributed PV adoption by influencing agents’ perceived behavioral control, attitudes, and social pressures. Among all the incentive measures, the choice of PV company’s investment model has the greatest impact on rooftop distributed PV adoption. Further, by comparing the benefits of building agents under different business models, it is found that the “sole investment” model is more conducive to promoting the adoption of rooftop distributed PV than “leasing roof” model. Finally, policy recommendations to encourage the “sole investment” model and to expand the proportion of demonstration projects for rooftop PV installation were proposed to promote the adoption rooftop distributed PV.

Key Words: rooftop distributed PV; adoption and diffusion; incentive mechanism; agent-based modeling

责任编辑：宋迎昌