

# 分布式新能源供需平衡导向的城市空间利用 与优化研究

邓羽<sup>1</sup>, 冯可心<sup>1,2\*</sup>, 安丰平<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

**摘要:** 在“双碳”目标驱动下, 城市分布式新能源的快速发展与传统城市空间规划的滞后性之间的矛盾日益突出, 能源供需的时空错配问题愈发凸显。本文旨在系统性地探究供需平衡导向下的城市空间优化路径, 以应对传统城市规划滞后性可能加剧的能源供需错配挑战, 并构建相应的多尺度调控与治理框架。文章遵循“格局研判—因素诊断—策略构建”的逻辑对现有研究进行梳理与整合: 首先, 总结了文献中揭示的分布式新能源生产空间与消费空间的“源荷分离”格局; 其次, 归纳了分布式新能源供需的多尺度影响因素, 并综合诊断了城市密度、容积率等关键空间要素在抑制供给与节约需求之间存在的内在矛盾; 最后, 在对现有策略进行评述的基础上, 构建了一套整合了多尺度空间调控与多维度治理的优化策略体系, 涵盖多中心城市结构、混合土地利用、物质空间精细化调控, 以及宏观规划整合与微观社区协同等方面。本研究为推动分布式新能源与城市空间的协同发展、助力城市高质量转型提供了系统性的理论框架与科学参照。

**关键词:** 城市空间, 分布式新能源, 供需平衡, 空间优化

## 1 引言

在全球气候变化加剧的背景下, 亟需推进城市能源系统从“高碳依赖”向“低碳自给”的绿色化转型, 实现城市能源“生产-消费-减排”的系统性集成<sup>[1-3]</sup>。大力发展高效、清洁能源成为实现经济增长与生态保护协同发展的关键路径<sup>[4]</sup>。截至 2024 年, 全球清洁电力占比首次突破 40.9%, 其中分布式光伏和风电贡献显著, 城市分布式新能源的爆发式增长正推动全球能源体系从集中式向去中心化转变<sup>[5]</sup>。城市分布式新能源是指风、光、生物质能等相对较低能源密度而就地产消的可再生能源, 能够激活建筑屋顶、交通廊道等低效空间, 有效提升城市空间复合利用率, 已成为实现清洁能源转向与空间高效利用的重要抓手<sup>[6-7]</sup>。

中国明确提出“到 2030 年实现碳达峰, 到 2060 年实现碳中和”的战略目标<sup>[8-9]</sup>。在“双碳”目标的驱动下, 分布式光伏发电量达 3462 亿千瓦时, 占光伏发电量的 41%<sup>[10]</sup>。但中国城市普遍存在空间规划与能源系统的割裂状态<sup>[11]</sup>, 呈现出

收稿日期: 2025-07-11; 修订日期: 2025-08-21。

第一作者简介: 邓羽(1985-), 男, 湖北恩施人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市空间更新与调控研究。E-mail: dengy@igsnrr.ac.cn

通信作者简介: \*冯可心(2001-), 女, 陕西商洛人, 博士研究生, 主要研究方向为城市地理学。  
E-mail: fengkexin1529@igsnrr.ac.cn

城市分布式新能源发展的空间适配双重挑战<sup>[12]</sup>。一方面，光伏、风能等多类型新能源因其技术特性而呈现出差异化的城市空间需求，导致生产空间呈现出碎片化特征，例如光伏发电在空间载体上高度依赖建筑屋顶和立面，通常在午间达到发电高峰；另一方面，居住、工业等多功能区的能源消费同样存在时空特性与差异显著，例如工业区长期稳定的高负荷消费、商业区则呈现为昼高夜低的消费需求、住宅区则呈现早晚双峰的消费特征，并且长期存在局部地区、局部时段消纳难的问题<sup>[13]</sup>，最新的研究已将这种复杂的时空错配问题进一步解构为总量的“数量错配”、峰值的“时段错配”以及曲线的“形态错配”三个核心维度，为系统性地理解和应对能源消纳问题提供了分析框架<sup>[14]</sup>。总而言之，分布式新能源项目建设和市场需求不匹配所导致的供需之间的时空错位，使得分布式新能源在有限的城市空间中难以兼顾经济性与产能需求，一度陷入“效率-空间悖论”<sup>[15]</sup>。因此，深入探究分布式新能源与城市空间的互动关系，研判供需平衡导向的城市空间利用方案与优化调控举措具有重要的政策价值与战略意义。

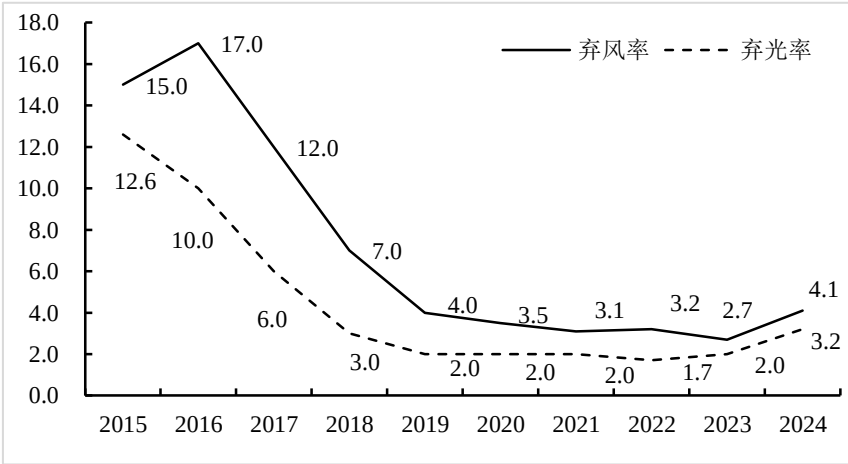


图 1 中国历年弃风弃光情况（2015-2024 年）

Fig.1 Historical Statistics (2015-2024) on Wind and Solar Curtailment in China

资料来源：中国政府网、人民网、中国经济网等相关网站

基于对城市分布式新能源与城市空间协同发展的系统性思考，本文总结了城市分布式新能源的“生产-消费”空间利用格局与分异规律。在此基础上，进一步归纳城市分布式新能源产消的多尺度影响因素，并系统诊断当前城市空间利用在适配分布式新能源时所面临的核心矛盾。通过评述当前城市空间承载分布式新能源面临的主要问题和症结，进而提出城市分布式新能源供需平衡导向下多尺度、多维度的城市空间优化策略体系，为推动分布式新能源与城市空间协同发展、助力实现“双碳”目标下的城市高质量转型提供科学参照。

## 2 城市分布式新能源的空间利用格局

### 2.1 生产空间

分布式新能源的生产空间本质上是城市对自然能源禀赋捕获与转化能力的地理体现，其空间分布受建成环境和功能布局深刻影响。

从空间集聚特征来看，高产能节点主要集中于两类空间：首先是以大型工业园区和物流仓储基地为代表的工业集中区，这些区域大面积连续的屋顶资源为规模化光伏矩阵提供了空间载体。例如，京能（锡林郭勒）发电有限厂区内的厂房和车间屋顶是分布式光伏发电的主要空间载体<sup>[16]</sup>。其次是由政策驱动的先行示范区，在“双碳”目标导向下通过设立试点社区对公共建筑等空间载体展开连片开发。这两类空间多位于城市郊区和新开发区，因生产潜力高且安装阻力小成为分布式能源主要集聚区。与之相对，低产能区域（不适宜区域）主要集中于两类约束性空间：其一是城市开发敏感区，主要涵盖历史风貌保护区及自然保护区等开发活动受到严格控制的空间。其中，历史风貌保护区的建筑改造受到严格限制，其核心目标在于维护建筑原真性、完整性与历史美学价值；而自然保护区则面临核心生态约束，任何可能干扰生态系统完整性与生物多样性的开放活动均受到限制。其二是高密度老旧住宅区，其存在着显著的制度性障碍与技术性瓶颈。例如，产权归属复杂、利益协调困难等制度性障碍导致项目推进流程繁琐且成本高昂；而既有建筑结构承载力不足等技术性瓶颈难以满足分布式屋顶光伏系统规模化安装的荷载要求，严重制约分布式可再生能源生产的规模化部署，进而导致其整体产能效率显著低下。

从空间载体类型来看，不同城市空间载体的产能特征存在显著差异。工业空间因其厂房屋顶和闲置空间广阔，备部署大规模、多类型分布式能源的条件；而独栋或联排别墅拥有独立的屋顶产权和较大的屋顶面积，是发展户用光伏的重点区域。大型公共建筑与商业设施如政府大楼、学校、医院、会展中心、购物中心等，其屋顶面积较大，且通常位于负荷中心，有利于就地消纳。此外，开放空间（如城市绿地）通过设施融合实现分布式能源生产与景观功能的协同<sup>[17]</sup>，但其适用性受生态敏感度影响较大<sup>[18]</sup>。此外，交通空间也是分布式新能源生产的关键场域铁路、公路、城市道路及交通枢纽都存在宜能的生产性空间<sup>[19]</sup>。

综上所述，城市分布式新能源的供给潜力呈现出显著的空间分异格局。高密度的城市中心区，由于高楼林立、阴影遮蔽严重，其单位土地面积的光伏发电潜力和能源自给能力反而相对有限。相反，城市周边区域，如郊区的低密度住宅区和拥有大面积平整屋顶的工商业园区，往往具备更优越的光伏安装条件和更大的供给潜力。

## 2.2 消费空间

城市能源消费在空间上表现出明显的集聚效应，在大型工业区和城市中心区形成若干高负荷中心。大型工业区集中了大量生产用能，通常是城市中能源消费强度最高的区域；城市中心区，特别是中央商务区和人口密集的核心建成区因其高密度的办公楼宇、商业设施和集中的人流，形成了电、热、冷等多种能源需求的负荷中心。以纽约市为例，办公楼大量集中的中央商务区商业建筑能源使用强

度可高达 250-350 kBTU/平方英尺，远高于城市平均水平，其能耗高峰集中于工作日的白天<sup>[20]</sup>。山东省潍坊市的能源消费热点区域高度集中于中心城区及几个外围工业城镇，并呈现出以建成区为核心、连片向外扩散的分布态势<sup>[21]</sup>。在东莞市，住宅建筑的用电量呈现由中心向郊区递减的梯度分布，商业建筑的用电量高峰集中于城市中心和主要商业城镇，工业建筑用电量则存在明显的空间集聚效应，工业发达的城镇具有许多高能耗的局部集群<sup>[22]</sup>。

城市内部不同功能区的能源需求差异巨大，工业区和商业区的能源消费强度最高。工业区的能源消费模式较为稳定，主要受生产班次影响，形成持续性的高负荷，其消费场景主要是维持工业流程和机械设备的运行。与工业区不同的是，商业区的高强度能源消费的时间节律与商业活动高度同步，通常在白天形成用能高峰，而在夜间消费量急剧下降。住宅区的能源消费量在城市能源消费中也占有较大比重，其消费节律与居民的日常作息模型紧密相关，表现出显著的早晚双峰模式<sup>[23]</sup>。以分布式光伏为例，其发电出力曲线呈典型的正午高、早晚低的单峰形态，高峰通常出现在中午 12:00 至下午 2:00。然而，城市的需求侧曲线却复杂多样：商业办公区的用电高峰（约上午 9:00 至下午 5:00）与光伏出力有较好重叠，但仍存在早晚时段的缺口；而住宅区的用电负荷则呈现显著的“反周期”特征，其早高峰和晚高峰恰好是光伏出力很低或为零的时段。这种现象在可再生能源渗透率高的地区尤为突出，形成了著名的“鸭子曲线”（Duck Curve）问题，即午间因光伏大发导致净负荷极低，而日落后需求激增导致电网爬坡压力巨大，这极大地挑战了电网的稳定性<sup>[22]</sup>。此外，城市交通网络（主干道、枢纽）和特定大型公共设施（医院、体育场等）也因其特殊功能而构成局部能耗高点<sup>[24-25]</sup>。

尽管分布式新能源发展迅速，但其供给量仍远小于城市总需求，大量高耗能区域仍主要依赖传统能源。因此，精准识别这些高耗能区域的空间分布特征，并深刻理解其背后的形成机制，是实现供需有效匹配与城市能源转型的重要前提。

### 3 城市分布式新能源的空间利用影响因素

城市分布式新能源的供需空间格局，是多尺度因素共同作用的结果。供给潜力的分布主要遵循物理几何逻辑，而需求负荷则由社会经济活动主导。

#### 3.1 宏观尺度：城市形态与空间结构

城市的宏观空间格局是决定能源消费基底和交通能耗规模的根本因素，其中城市形态是影响能源消费的核心因素之一。以低密度、功能单一、职住分离为特征的城市蔓延模式，会增加居住、就业和商业设施的物理距离，从而导致居民对小汽车的依赖增强，被大量研究证明与更高的能源消耗直接相关。相反，以高人口与建筑密度、功能混合为特征的“紧凑城市”发展模式，通过缩短出行距离和发展公共交通，能有效降低交通领域的能源消耗和碳排放<sup>[26-27]</sup>。此外，城市空间形态的量化指标也深刻影响能源效率。空间集聚度和中心性越高的城市，其能源密

集利用的效率也越高,因为高度集聚和中心化的结构有利于能源的集中供应,减少输配损耗。

同时,作为宏观关键变量的城市密度,其对供给潜力的效应具有两面性。一方面,高密度开发能够促进分布式新能源的规模化生产。以高密度、功能混合为特征的紧凑型城市形态,通过建筑屋顶资源的集中连片分布,更有利于形成规模化的分布式能源生产布局<sup>[28]</sup>。相反,低密度蔓延的城市发展模式,由于建筑分散、用地单一,导致分布式新能源生产设施难以形成规模效应,单位面积产能普遍较低<sup>[30]</sup>。另一方面,建筑容积率和建筑密度越大,屋顶可用于布置光伏的有效面积就越小;而且,高密度、高容积率的城市形态往往伴随着严重的建筑间相互遮挡,这会显著削减屋顶和墙面的太阳辐射得热,从而大幅降低光伏发电的有效潜力<sup>[26]</sup>。

### 3.2 中观尺度:土地利用与功能分区

从供给侧来看,规划行为通过赋予土地不同的功能属性,并施加相应的管制规则,从根本上决定了不同城市空间的能源生产潜力。工业园区、物流仓储区及大型商业区因其拥有大面积、产权单一的连续性屋顶,且社会接受度高、开发限制少,成为分布式光伏部署的“潜力高地”。此外,城市中的交通基础设施用地(如高速公路沿线、停车场顶棚)和部分公共设施用地也为能源生产提供了新的空间载体。与之相对,居住区的生产潜力则呈现内部分化:低密度住宅区因独立的屋顶产权而易于推广户用光伏,而高密度住宅区则常因产权分散、屋顶空间受限和结构安全等问题导致潜力难以释放。同时,历史风貌保护区、生态敏感区等特殊功能区,其土地利用法规通常严格限制新能源设施的安装,构成了能源生产的刚性约束区。因此,中观尺度的土地利用规划在很大程度上直接划定了城市能源生产的优势区与限制区。

在城市内部,土地利用的类型及其空间组合方式,直接决定了能源消费热点区域的分布和时空节律。首先,单一功能的土地利用分区固化了区域的能源消费特征。不同功能区具有截然不同的能源消费强度和特征:大型工业区通常表现为高强度的、持续性的基底负荷;中央商务区(CBD)以白天的制冷和照明需求为主,形成巨大的日间峰值;而大规模的纯居住区则呈现典型的早晚双峰模式。这种功能分区是导致城市能源消费空间异质性的最直接原因。此外,功能区的混合程度,尤其是居住、办公、商业、休闲等功能的复合,是解决城市低效能源消耗的重要手段。功能混合、公交导向(TOD)的城市空间结构,能有效缩短出行距离,提高公共交通分担率,从而降低交通能耗。

### 3.3 微观尺度:物质与社会经济空间差异

在微观层面,物质空间形态是决定供给潜力的基础,并与经济社会因素共同加剧了能源供需的空间异质性。

首先,物质空间形态是能源供需的基础载体。在供给侧,建筑屋顶的可利用面积、倾角、朝向和几何形状向是光伏设备安装容量和效率的基础。在高纬度地

区,按最佳倾角安装可使分布式光伏发电量提升超过 20%,建筑高度、宽度比与太阳能可用性呈现显著正相关<sup>[26]</sup>,能够通过适当提高容积率、控制建筑间距实现太阳能利用潜力的有效提高。建筑年代、结构类型和产权状况等物理属性直接影响设备安装可行性:新建建筑因考虑新能源适配性,分布式新能源安装率相对较高,而老旧小区受制于结构安全和产权纠纷,安装率普遍较低。在需求侧,建筑的高度、新旧、类型和品质,直接影响能源消耗。能源消耗量随建筑高度升高而增加,办公楼每增加一层,其用电量和化石燃料使用量分别增加 2.4% 和 2.9%<sup>[31]</sup>;10 层以上的高层建筑比 5 层以下的低层建筑的单位面积用电量增加 76%。新建的高档商品房社区,由于其居民通常拥有更多的家用电器和更高的舒适度要求,其人均能耗往往高于老旧社区<sup>[31]</sup>。同时,老旧建筑集中区域因保温性能差等问题,供暖与制冷能耗也可能较高。

此外,城市经济空间差异同样是制约新能源生产设施布局的重要因素。分布式新能源的开发利用前期需要高昂的成本投入,经济实力相对薄弱的城市在相关设施的布设上面临严峻挑战<sup>[33]</sup>。在同一城市内部,不同街道的经济发展水平也可能导致新能源设施建设的空间差异。较为富裕的街道更能吸引投资和政策支持,进而促进新能源设施的建设,而经济不发达的街道则可能因缺乏资金和技术支持而处于劣势。公众认同一定程度上制约着城市分布式新能源的生产布局<sup>[14]</sup>。老旧小区住户通常对于新能源技术接受度较低,而高新住宅小区住户通常更容易接受新能源技术,进而促进了分布式能源生产设施布局。同时,居民的社会经济条件和生活方式也在空间上产生分化,不同收入阶层的家庭,其能源消费水平和结构存在显著差异。随着环保意识的觉醒和对可持续生活方式的追求,部分消费者会主动选择节能产品和绿色能源,这种消费行为的转变也可能在不同社区呈现出集聚特征,从而影响局地的能源消费模式<sup>[31]</sup>。

### 3.4 外部因素：政策制度

政策制度是推动城市分布式新能源发展的关键外部驱动力。不同类型的政策制度则展现出不同的影响效应,例如,技术发展政策能够普适地推进新能源发展,综合规划政策的影响在新能源潜力较低的省份更重要,市场管理政策的影响则对潜力更大的省份更显著<sup>[34]</sup>。有效的政策不仅能提供经济激励<sup>[36]</sup>,更能通过顶层设计与空间规划相结合,为可再生能源发展提供法律和空间保障。世界各国的实践为此提供了丰富经验。例如,德国的《可再生能源法》(EEG)早期通过实施高额的固定上网电价,为投资者提供了长达 20 年的稳定收益预期,是德国分布式光伏实现快速增长的制度基石。在空间规划层面,德国通过划定风能和太阳能优先区,系统性地将能源生产融入国土空间<sup>[37][38]</sup>。与此同时,政策制度还可能通过技术扩散和企业迁移,对邻近地区产生非线性的空间溢出效应<sup>[39][40]</sup>,如低碳城市试点政策不仅促进了本地节能技术的进步,还通过企业研发和迁移对周边地区产生了非线性的空间溢出效果。

## 4 城市分布式新能源的空间利用约束诊断

城市分布式新能源的供给与需求遵循着两种不同甚至相悖的空间逻辑。供给潜力的空间分布，主要由物理几何逻辑主导，其关键变量是建筑形态、密度、朝向、遮挡等，这些是城市设计和控制性详细规划的直接产物。而需求负荷的空间分布，则主要由社会经济活动逻辑主导，其关键变量是土地利用功能、居民生活方式、通勤模式等，这些是经济组织和社会行为的空间投射。

这是由于，传统的城市规划在组织空间时，往往优先考虑社会经济效率或生活便利性，而鲜少将能源生产的几何条件作为核心约束。这种规划逻辑的惯性，导致了城市形态在能源维度上的缺陷：一个在经济功能上高效、在居住环境上宜人的城市片区，可能恰恰是一个在能源自给上效率低下的空间。这种供给与需求在逻辑上的分歧，构成了城市中分布式可再生能源供需错配问题的根源。

分布式新能源的供给潜力和能源需求在空间格局与时间序列上的不一致，构成了供需错配的核心问题。这一问题不仅是技术和经济层面的挑战，更在城市和区域空间中引发了一系列深刻的矛盾与冲突。

### 4.1 供给和需求的时空错配

城市分布式新能源的供给潜力与消费负荷在空间和时间维度上存在显著的异质性，形成了“源荷分离”的格局。分布式新能源通常以就近、就地消纳为主，但因城市功能分区差异，高产能空间与高耗能空间存在显著地理分离，导致能源传输损耗增大。这种时空错位不仅削弱了分布式能源的经济性，还对局部电网的稳定性构成挑战，成为制约城市能源系统整体效率提升的瓶颈。为系统性诊断这一问题，可将城市空间依据“新能源供给潜力”和“能源需求负荷”两个维度，划分为以下四种典型的“源荷错配”类型（图 2）。

首先是“产能富余区”，即高供给-低需求的城市郊区和新开发区。典型代表包括大型物流仓储基地、低密度独立住宅区和市郊大型风光电基地等，大面积连续屋顶、独立的屋顶产权和优越的日照条件使得其成为发展分布式系能源的重点区域。但这些空间本地能源消费强度相对较低，难以就地消纳其巨大产能，甚至导致弃光、弃风等问题，造成能源浪费<sup>[40]</sup>。





图 2 城市分布式新能源供需“空间错配”类型示意图

其次是“源荷整合潜力区”，典型空间包括屋顶空间较大的办公楼、医院、会展中心等公共建筑以及能源需求强度高的产消一体化新兴工业园区，这类空间能源需求大、发展分布式新能源的潜力高，是实现供需平衡的理想载体。然而，该区域也面临着新能源生产和消费的时间节律错配问题。分布式新能源的生产存在间歇性和波动性，如太阳能仅在白天发电，风能受气象等因素影响，发电较不稳定；而城市的能源需求则存在明显的峰谷特征，如居民区早晚间用电高峰、商业区白天用电高峰<sup>[42]</sup>。这种日内波动导致白天可能出现电力过剩而夜间短缺的现象，意味着即使在总发电量与总需求量相当的情况下，瞬时功率也难以平衡，给电网的稳定运行带来巨大压力<sup>[43]</sup>。

再次是低供给-高需求的“产能赤字区”，这是城市能源供需矛盾最尖锐的区域。这些空间人口密集、经济活动强度高，能源需求巨大，但其物理空间形态却严重限制了新能源的在地生产。该区域主要包括三类典型空间，一是高密度老旧住宅区，人口密度大，能源消耗强度高，但受制于建筑结构安全、屋顶产权分散、楼间阴影遮挡等因素，分布式新能源安装困难；二是高密度商业核心区(CBD)，其林立的高层办公楼宇构成了城市能耗热点，但高容积率和遮挡效应使得单位土地面积的有效光伏利用率降低；三是高负荷交通空间，其道路网络和枢纽因承载巨大的交通流量和维持系统运行的基础设施而构成局部能耗高点，而其线性的空间形态决定了其在地发电潜力较小。因此，这些区域深度依赖外部电网的持续输入。

最后是低供给-低需求的“供需双低区”，主要由生态或文化敏感区构成。这部分空间涵盖城市绿地、公园以及历史风貌保护区，因其重要的生态景观或文



化价值而受到严格的开发管制，新能源设施部署受限，供给潜力低下。虽然部分前沿实践将能源生产与城市景观功能深度融合，构建“产能景观”<sup>[44],[45]</sup>，但其生态与文化保护的主导功能，以及设施小型化、分散化的特点，决定了这些区域无法成为能源供给的主力。同时，这些区域通常不承载高强度的经济社会活动，能源需求也相对较低。它们虽非当前能源供需矛盾的焦点，但构成了城市能源规划中必须尊重的“刚性约束”。

## 4.2 城市空间形态对供需平衡的双重制约

城市分布式新能源的供需平衡，不仅受制于其供需错配的格局，更受制于城市空间形态等影响因素在供需两侧存在的内在矛盾。城市形态的集约化，虽然在节约能源需求侧有积极作用，但往往以抑制能源供给潜力为代价。将城市密度、容积率、土地利用混合度及物质空间形态等关键影响因素进行对比分析，可以更直观地揭示其对城市能源供需两侧的矛盾。

首先，城市密度的提升在节约城市能源需求的同时抑制了新能源的生产。从需求侧看，以高密度为特征的紧凑城市，通过缩小职住距离、优化公共交通网络，能够降低整个城市的能源消耗，尤其是交通能耗<sup>[46]</sup>。同时，高密度开发也有利于供热、供冷等能源基础设施的集中高效布局，减少输配过程中的损耗。然而在供给侧，高密度的开发却对分布式能源的生产潜力构成了严峻制约。不断缩小的建筑间距加剧了楼宇间的阴影遮挡，严重削减了建筑屋顶和立面可用于光伏发电的有效面积和时长，从而抑制了整个区域的在地能源生产潜力<sup>[47]</sup>。总之，正是这种根本性的矛盾，在空间上塑造了“产能赤字区”与“产能富余区”的巨大分异。

其次，建筑容积率则从建筑的微观尺度进一步加剧了上述矛盾。在需求侧，高容积率虽是实现城市紧凑、享受其节能效益的必要手段，但超高层建筑本身因其高密度办公、商业等功能的供暖、供冷和基础电力需求，具有更高的设备运行能耗。在供给侧，容积率的提升直接导致了屋顶面积相对于总建筑面积的比例急剧下降。这意味着，尽管能源需求随着建筑体量的增加而集中，但单位建筑面积可摊分的在地供给能力却被严重稀释。研究表明，在相同密度下，容积率从 1 提升到 2.5，分布式光伏的自给率降低了 6.4%<sup>[42]</sup>。这种矛盾使得高容积率的城市核心区极易成为供需缺口最大的“产能赤字区”。

与密度和容积率的强矛盾性不同，土地利用混合度则展现出显著的协同效应。从供给侧看，功能混合区的能源设施可在不同用户间分时共享，从而提高供给侧设施的整体利用率和经济性。从需求侧看，商业的日间用电高峰与住宅的早晚高峰可以相互叠加、互为补充，有效平滑整体负负荷曲线，起到“削峰填谷”的作用，从而降低对电网的冲击。因此，提高土地利用混合度是化解矛盾、促进供需耦合的关键空间策略。

此外，物质空间形态的影响也呈现出复杂的两面性。在供给侧，新建或高品质建筑因其更优的结构承载力、预留的安装空间以及良好的技术兼容性，具备更高的供给潜力；老旧建筑则因结构安全、产权分散等问题，潜力释放受限。在需求侧，老旧建筑因保温隔热性能差、设备能效低，通常是城市中的能耗高点；而

新建建筑虽普遍采用节能设计，但也可能因智能设备增多、居住面积扩大而提高能源消费需求，未必能实现预期的节能效果。这种供给潜力与需求效益的不确定性，直接导致了老旧住宅区“高耗低产”的典型困境，同时也解释了部分新建区域虽具备高供给潜力，却仍可能因高品质生活带来的高能耗而难以实现净零排放的复杂局面。

表 1 城市空间关键因素对供需两侧的矛盾影响

| 影响因素     | 对供给侧的影响                              | 对需求侧的影响                                    | 空间表现                       |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| 城市密度     | <b>抑制：</b> 建筑间距缩小，阴影遮挡加剧，削减太阳能潜力。    | <b>节约：</b> 缩短通勤距离，降低交通能耗；利于基础设施集中高效布局。     | 城市中心—产能赤字，郊区-产能富余          |
| 建筑容积率    | <b>抑制：</b> 可用于布置能源设施的屋顶面积减少，降低供给能力。  | <b>增加：</b> 提高能耗集中人口与经济活动，但高容积率建筑自身运行能耗更高。  | 高密度商业核心区—产能赤字              |
| 土地利用混合度  | <b>促进：</b> 能源设施可分时共享，提高利用率与经济性。      | <b>优化：</b> 用能曲线互补，实现“削峰填谷”；减少长距离通勤。        | 是构建“源荷整合潜力区”、实现动态平衡的关键空间策略 |
| 城市物质空间形态 | <b>分化：</b> 新建/高品质建筑生产潜力大；老旧建筑生产潜力受限。 | <b>分化：</b> 新建建筑自身节能，但存在高能耗设备和生活方式；老旧建筑能耗高。 | 老旧住宅区—高耗低产                 |

## 5 面向分布式新能源供需平衡的城市空间优化策略

### 5.1 城市空间利用的多尺度调控

面对分布式新能源带来的供需错配与空间冲突，城市空间优化应从被动适应转向主动塑造。欧洲的经验表明，若缺乏有效的供需协同规划，超前的供给投资与不确定的需求增长之间可能产生巨大的财政风险与系统性低效<sup>[48]</sup>。因此，应该通过在城市结构、土地利用和城市物质空间三个尺度上进行系统性的调控与重组，缩短能源流动的时空距离，促进生产与消费的高效耦合。

一是构建多中心、组团式的分布式城市结构。这是应对“源荷分离”问题、促进能源供需平衡和提升能源系统韧性关键路径。传统的单中心、蔓延式的城市结构导致能源需求高度集中，长距离输电损耗巨大且系统脆弱性高。因此，通过国土空间规划引导城市向多中心紧凑型模式发展至关重要。这一理念在全球先进的城市规划实践中得到广泛印证，新加坡和上海都提出了多中心的智慧城市能源治理模式<sup>[48]</sup>，意大利萨伦托半岛的多中心结构也有助于其可持续能源系统的发展<sup>[46]</sup>。这种多中心结构通过构建多个功能相对完善、职住平衡的城市次中心或“组团”，实现了风险与管理的分散化。每个组团可视为一个本地能源社区，内

部都包含居住、就业和公共服务，能形成独立的能源微循环，并通过内部精细化规划实现动态供需平衡。多中心结构将就业、商业和公共服务功能分散到多个城市次中心，通过促进职住平衡降低跨区域交通能耗<sup>[51]</sup>，城市多中心性每增加1%，碳排放量减少3.5%<sup>[52]</sup>。同时，分布式模块化结构能够增强系统韧性，可隔离极端天气或设备故障引发的能源系统中断，避免集中式系统的连锁瘫痪风险。此外，各组团可基于本地资源禀赋建立独立且互联的能源系统，优先实现能源就地生产与消纳，减少跨区域能源输送损耗。

二是推行多功能混合的土地利用模式。这是在能源需求侧实现平滑用能曲线的关键手段。单一功能的土地利用，其能源消耗模式单一且峰值明显，给电网带来巨大压力。多功能混合土地利用模式通过社区尺度上居住、商业、办公及文娱功能的紧凑复合布局，一方面能够通过缩短出行距离直接降低城市交通领域的能源消耗，根据估算，城市公交分担率每提升1%，便可降低城市总能耗的0.07%至0.08%<sup>[53]</sup>。另一方面，通过整合不同功能的互补性能源消费节律实现能源负荷的“削峰填谷”。商业办公区的日间用电高峰与居住区早晚高峰叠加后可形成平滑的综合负荷曲线，显著削减峰谷差，实证研究也证明了混合功能社区在负荷平滑上的有效性<sup>[54]</sup>，通过融入绿色建筑实践，混合用途开发项目可将能耗降低高达30%。此外，在混合功能区内，储能、充电桩等能源基础设施可以被不同类型的用户分时共享，从而提高能源供给设施的整体利用率和经济性。

三是城市物质空间的精细化调控，这是化解城市密度在能源供需两侧的内在矛盾的必要途径。空间优化需从单纯控制容积率指标，转向对建筑三维形态的综合设计，并对新建与存量建筑采取差异化策略。对于新建建筑，调控核心在于形态的前瞻性引导，寻求能源效益最优的阈值密度。例如，容积率介于1.5至2.5、建筑高度在7至27层之间时，社区的能源效率可能达到最高<sup>[53]</sup>。以阿布扎比某社区为例，通过优化建筑间距等密度相关参数，建筑能耗最高可降低10.5%<sup>[55]</sup>。对存量建筑，则应该推行“能源化更新”来深入挖掘其新能源生产潜力。这要求大力推广建筑光伏一体化（BIPV）技术并通过结构评估、轻量化组件应用及保温性能提升，综合改善其能源表现。同时，将能源利用空间从二维屋顶拓展至三维立面与附属空间，并根据工业、公共、居住等不同建筑类型分类施策，系统性推进其能源化改造。精细化的设计能使城市空间在维持合理开发强度、享受交通节能效益的同时，最大限度地保留能源生产潜力。

为了使上述多尺度调控策略更具针对性，避免“一刀切”的规划模式，应该针对不同类型的空间“对症下药”。具体而言，针对高密度建成区等“产能赤字区”，其优化核心应聚焦于需求侧管理和微观空间潜力挖掘，包括推行更严格的建筑能效强制标准、在城市更新中大力推广BIPV技术以及实施需求响应激励等政策。而对于郊区工业园等“产能富余区”，策略重点则在于提升就地消纳能力和优化能源输配，可通过前瞻性地规划储能设施、引导高负荷产业布局以及构建区域级智慧微电网等手段实现。对于具备源荷匹配潜力的“源荷整合潜力区”，关键在于通过平滑负荷曲线和提升系统灵活性来释放其潜力，例如鼓励土地功能

混合、推广分时电价以及配置社区级储能设施。这种基于诊断的差异化策略组合，是推动城市空间优化迈向精准化、系统化治理的关键。

## 5.2 城市空间利用的多维度治理

有效的空间治理与管控是引导分布式新能源有序发展、化解空间冲突、实现供需高效匹配的关键。世界各国在实践中探索了多样的政策工具与治理模式，为我国提供了宝贵经验。

宏观治理的核心在于实现能源目标与空间规划的整合。这要求在国家立法层面，明确分布式可再生能源的空间利用优先权，为潜在的土地利用冲突提供裁决依据。德国通过其标志性的《可再生能源法》，从国家立法层面确立了可再生能源发展的优先地位，为解决可再生能源项目与生态环保之间的选址冲突提供了强有力的法律依据<sup>[57]</sup>。日本政府则根据《离岸可再生能源发电法》划定并授权特定的沿海区域用于风电开发，为大规模项目提供了明确的空间指引<sup>[58]</sup>。参考国际经验，须将能源规划深度融入国土空间规划体系，通过系统性的资源潜力评估，划定能源开发的优先区、适宜区与限制区，使能源要素成为决定城市形态与土地利用布局的前置性与约束性指标，为分布式新能源的有序发展提供稳固的制度保障。

分布式能源部署的最终落地，尤其是在产权分散、人口密集的建成区，高度依赖于微观层面的社区参与。丹麦作为推广社区风电的先驱，其成功关键在于通过成立集体经济组织、推广居民入股等方式，建立了创新的所有权与利益共享模式<sup>[60]</sup>。这种模式将当地居民从潜在的反对者转变为项目的受益者和所有者，有效化解了“邻避效应”，为分布式能源的落地扫清了社会障碍。通过建立社区所有权和利益共享机制，将本地居民从能源项目的被动接受者转变为项目所有者与直接受益者。这种利益协同的模式，能够极大提升项目的社会接受度，是克服产权碎片化障碍、在城市更新与社区改造中成功嵌入分布式能源系统的关键所在。

总体而言，面向供需平衡的城市空间优化是一个系统工程。它要求将多尺度的空间调控与多维度的治理手段紧密结合，通过构建分布式城市结构、推行混合土地利用、精细化调控物质空间，并辅以顶层规划整合与底层社区赋能，进而破解供需错配难题，推动城市向低碳、韧性、高效的能源自给模式转型。

## 参考文献

- [1] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586(7830): 482-483.
- [2] 刘桢, 谢鹏程, 黄莹, 等. 基于能源政策模拟模型的广州市 2050 年实现碳中和的路径研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(4): 211-219.
- [3] Shan Y, Guan Y, Hang Y, et al. City-level emission peak and drivers in China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(18): 1910-1920.
- [4] 林泽融, 陈建宝. 中国分布式能源的影响因素实证分析——基于空间门限面板模型[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(6): 835-842.
- [5] Euan Graham, Nicolas Fulghum, Katye Altieri. Global electricity review 2025[J]. 2025.

- [6] 陈思梦, 邹志坚, 王勇. 可再生能源发展推动能源转型的现状、问题与路径研究——以新疆为例. 金融发展评论, 2022(11): 51-63
- [7] 刘保留, 潘家华, 陈梦玫. 分布式零碳能源规模化发展与产业空间格局重构——新经济地理学产业空间集聚模型的适用性辨析[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2024, 24(6): 122-138.
- [8] Dai H, Su Y, Kuang L, et al. Contemplation on China's energy-development strategies and initiatives in the context of its carbon neutrality goal[J]. Engineering, 2021, 7(12): 1684-1687.
- [9] 张烈辉, 曹成, 文绍牧, 等. 碳达峰碳中和背景下发展 CO<sub>2</sub>-EGR 的思考[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 13-22.
- [10] 国家能源局 2025 年一季度新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2025-01-23)[2025-8-16]. <https://www.nea.gov.cn/20250123/544b9af2b6aa4590a60945e81e0d8ee1/c.html>
- [11] 周立. 空间政治经济学研究进展评介[J]. 中南财经政法大学学报, 2021, 3: 113-125.
- [12] Lobosco G, Tinti L, Magagnoli B, et al. Landscape as a palimpsest for energy transition: correlations between the spatial development of energy-production infrastructure and climate-mitigation goals[J]. Atmosphere, 2023, 14(6): 921.
- [13] 于娟. 促进我国可再生能源发电上网消纳的政策建议[J]. 中国物价, 2021, (02): 89-92.
- [14] Heussaff C, Zachmann G. The changing dynamics of European electricity markets and the supply-demand mismatch risk[R]. Bruegel Policy Brief, 2024.
- [15] 马华, 方叶兵, 贝亦明, 等. 中国可再生能源发展水平时空分异特征及影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 1131-1142.
- [16] 王馨, 崔强, 苗锦宏, 等. 工业厂区屋顶分布式光伏系统设计及应用[J]. 能源与节能, 2024, (11): 1-5.
- [17] 德克, 西蒙斯. 景观与能源[J]. 风景园林, 2016, 11.
- [18] 王凯伦, 牛铜钢, 刘恋, 等. 低碳视角下城市绿地可再生能源应用路径[J]. 风景园林, 2025, 32(4): 116-124.
- [19] 韩丹. 交通空间可再生能源规划策略研究[D]. 天津大学, 2018.
- [20] Howard B, Parshall L, Thompson J, et al. Spatial distribution of urban building energy consumption by end use[J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 141-151.
- [21] 付博, 翟家宁, 许耀天, 等. 基于 POI 大数据的城乡能耗空间量化表达及实证: 以山东省潍坊市为例[J]. 地球环境学报, 2023, 14(6): 774-785.
- [22] Liu G, Ou J, Zheng Y, et al. Large-scale building-level electricity consumption estimation for multiple building types: A case study from Dongguan, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 121: 106224.
- [23] Hou Q, Zhang N, Du E, et al. Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: Concept, modeling, and empirical analysis in China[J]. Applied Energy, 2019, 242: 205-215.
- [24] 张力, 刘海洋, 段德萱, 等. 交能融合背景下的高速公路光储充一体化发展路线展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 86-94.
- [25] Sekki T, Airaksinen M, Saari A. Impact of building usage and occupancy on energy consumption in Finnish daycare and school buildings[J]. Energy and Buildings, 2015, 105: 247-257.
- [26] Yan L, Zhu R, Kwan M P, et al. Estimation of urban-scale photovoltaic potential: A deep learning-based approach for constructing three-dimensional building models from optical remote sensing imagery[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 93: 104515.
- [27] Liu B, Liu Y, Cho S, et al. Urban morphology indicators and solar radiation acquisition: 2011–2022 review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 199: 114548.
- [28] Güneralp B, Zhou Y, Ürge-vorsatz D, et al. Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(34): 8945-8950.
- [29] Mostafavi N, Heris M, Góndara F, et al. The Relationship between Urban Density and Building Energy

- Consumption[J]. *Buildings*, 2021, 11(10): 455.
- [30] 李文龙, 吴天谋. 新能源示范城市规划建设策略——以吐鲁番新区规划建设为例[J]. *规划师*, 2015, 31(S1): 153-158.
- [31] Godoy-shimizu D, Steadman P, Hamilton I, et al. Energy use and height in office buildings[J]. *Building Research & Information*, 2018, 46(8): 845-863.
- [32] 荣培君, 张丽君, 杨群涛, 等. 中小城市家庭生活用能碳排放空间分异——以开封市为例[J]. *地理研究*, 2016, 35(8) : 1495-1509.
- [33] Carpentieri G, Zucaro F, Guida C. Urban Energy Consumption in the City of Naples (Italy): A Geographically Weighted Regression Approach[M]//He B J, Jupesta J, Pignatta G. *Resilient Horizons: Building Sustainable Environments for Climate Adaptation and Health*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 93-104.
- [34] Bourcet Clénence. Empirical determinants of renewable energy deployment: a systematic literature review[J]. *Energy Economics*, 2019, 85(C).
- [35] Hu X, Guo Y, Zheng Y, et al. Which types of policies better promote the development of renewable energy? Evidence from China's provincial data[J]. *Renewable Energy*, 2022, 198: 1373-1382.
- [36] Sun P, Nie P yan. A comparative study of feed-in tariff and renewable portfolio standard policy in renewable energy industry[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 255-262.
- [37] Geiger C, Tafarte P, Wolfram E, et al. Wind power deployment in Germany: trade-offs of spatial planning instruments[J]. *Journal of Land Use Science*, 2025, 20(1): 1-20.
- [38] 李品, 谢晓敏, 黄震. 德国能源转型进程及对中国的启示[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(1): 116-126.
- [39] Graziano M, Gillingham K. Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: The influence of neighbors and the built environment[J]. *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(4): 815-839.
- [40] Zhang J, Ballas D, Liu X. Neighbourhood-level spatial determinants of residential solar photovoltaic adoption in the Netherlands[J]. *Renewable Energy*, 2023, 206: 1239-1248.
- [41] Liu J, Wang Q, Song Z, et al. Bottlenecks and Countermeasures of High-Penetration Renewable Energy Development in China[J]. *Engineering*, 2021, 7(11): 1611-1622.
- [42] 深圳市建筑科学研究院股份有限公司. 城市建筑光储直柔系统构建模式与工程示范[R/OL]. 能源基金会, 2023. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-lccp-20231215-zh>.
- [43] 任东明. 我国可再生能源开发面临的问题和障碍[J]. *太阳能*, 2013(04): 18-21.
- [44] 姜丽. 城市公共空间中可再生能源景观协同作用探究[Z]//城市建筑: 卷 19. 2022: 1-4.
- [45] 刘森, 荣振光, 王子悦, 等. 产能景观研究综述[Z]//建筑与文化. 2025: 134-135.
- [46] Li Q, Yang L, Huang S, et al. The Effects of Urban Sprawl on Electricity Consumption: Empirical Evidence from 283 Prefecture-Level Cities in China[J]. *Land*, 2023, 12(8): 1609.
- [47] Cheng V, Steemers K, Montavon M, et al. Urban Form, Density and Solar Potential[J]. *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 2006.
- [48] Heussaff C, Zachmann G. The changing dynamics of European electricity markets and the supply-demand mismatch risk[R]. *Bruegel Policy Brief*, 2024.
- [49] Nyangon J. Smart Energy Frameworks for Smart Cities: The Need for Polycentrism[M]//Augusto J C. *Handbook of Smart Cities*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 55-87.
- [50] Balena P, Vomero M, Leone A. Urban Polycentric Structures: Scenarios of Energy Communities of Small and Medium-Sized Cities[M]//Marucci A, Zullo F, Fiorini L, et al. *Innovation in Urban and Regional Planning*: 467. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 512-522.
- [51] Jung M C, Kang M, Kim S. Does polycentric development produce less transportation carbon emissions? Evidence from urban form identified by night-time lights across US metropolitan areas[J]. *Urban Climate*,



2022, 44: 101223.

- [52] Li Q, Yang X, Lin T. Polycentric urban development and carbon emission Intensity——An examination of 268 Chinese cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 510: 145599.
- [53] Resch E, Bohne R A, Kvamsdal T, et al. Impact of Urban Density and Building Height on Energy Use in Cities[J]. *Energy Procedia*, 2016, 96: 800-814.
- [54] Zhao W, Deng Z, Chen Y. Building energy consumption and peak load reduction potential of mixed-use community through urban building energy modeling[C]//2023 Building Simulation Conference. 2023.
- [55] Dawodu A, Cheshmehzangi A. Impact of Floor Area Ratio (FAR) on Energy Consumption at Meso Scale in China: Case Study of Ningbo[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 3449-3455.
- [56] Mirkovic M, Alawadi K. The effect of urban density on energy consumption and solar gains: the study of Abu Dhabi's neighborhood[J]. *Energy Procedia*, 2017, 143: 277-282.
- [57] Laird F N, Stefes C. The diverging paths of German and United States policies for renewable energy: Sources of difference[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(7): 2619-2629.
- [58] Schroeder A, Oei P Y, Sander A, et al. The integration of renewable energies into the German transmission grid—A scenario comparison[J]. *Energy Policy*, 2013, 61: 140-150.
- [59] Shiraki H, Sugiyama M, Matsuo Y, et al. The role of renewables in the Japanese power sector: implications from the EMF35 JMIP[J]. *Sustainability Science*, 2021, 16(2): 375-392.
- [60] Sovacool B K. An international comparison of four polycentric approaches to climate and energy governance[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3832-3844.
- [61] Bolinger M A. Making European-style community wind power development work in the US[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, 9(6): 556-575.

## Research on Urban Spatial Utilization and Optimization oriented by Supply-Demand Balance of Distributed Renewable Energy

DENG Yu<sup>1</sup>, FENG Kexin<sup>1,2</sup>, AN Fengping<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Driven by the 'dual carbon' goals, the disconnect between the rapid development of urban distributed renewable energy and the lagging nature of traditional urban spatial planning has become increasingly prominent, exacerbating the problem of spatiotemporal mismatch in energy supply and demand. This study aims to systematically explore pathways for urban spatial optimization oriented toward supply-demand balance. Following a logical framework of "pattern analysis—factor diagnosis—strategy formulation," to integrate existing research, firstly, this study summarizes the "source-load separation" pattern between energy production and consumption spaces revealed in the literature; and secondly identifies multi-scale influencing factors on distributed renewable energy supply and demand, diagnosing inherent contradictions in key spatial elements (e.g., urban density, floor area ratio) between suppressing supply and conserving demand.

Finally, building on a critique of existing strategies, this study construct an integrated optimization framework combining multi-scale spatial regulation and multi-dimensional governance, including polycentric urban structures, mixed land use, refined physical spatial, macro-level planning integration, and micro-level community coordination. This study provides a systematic theoretical framework and scientific reference for synergizing distributed renewable energy with urban spatial development and facilitating high-quality urban transformation.

**Keyword:** Urban spatial; Distributed renewable energy; Supply-demand balance; Spatial optimization