

作品名称： 北京市分布式光伏的部署潜能和经济性

作品类别： 学术论文类

作者团队： 赵军军 华北电力大学 工管 1602

指导教师： 袁家海 华北电力大学

摘要

2016 年我国建筑行业能源消耗总量达 9.3 亿 tce，其中电力能源的消耗量为 1700TWh，占全国能源消费总量的 21.3%。北京市作为中国的首都，能源储存量和能源生产量都很贫瘠，但是能源消耗量却非常大，严重依赖其他能源丰富省份的电力供应。目前，在确保电力和热力供应的情况下，北京正在努力改善空气质量。分布式光伏是一种可再生能源系统，可以在城市和农村地区灵活布置和应用，可以为城镇化的快速实现提供一定数量的电力能源，缓解化石能源使用对环境的负面影响。本文在可再生能源平价上网的背景下，对北京市屋顶光伏系统的资源潜能、发电经济性和政策支持进行了系统分析。首先引入 DEM 技术，对北京市可用于分布式光伏发电项目建设的屋顶面积进行统计和计算，再结合北京地区的光辐射范围和日照小时数，得到北京市分布式屋顶光伏发电的部署潜能，为 11.47GW；然后根据平准发电成本模型，假设基准情境，计算全生命周期内的一定内部收益率下的 LCOE 和在考虑补贴的实际电价下的 IRR，从而完成经济性分析；在上述基础上，若北京市分布式屋顶光伏建设全面完成，将会替换 11.47GW 的燃煤发电，减少了污染性气体（如 SO₂、PM、NO_x 等）和温室气体的排放量，会带来很大的环境效益，本文将此部分进行分析和估算。本文还结合我国电力市场正在进行的电力市场改革，探讨了分布式光伏发电在北京大规模部署的可行性。

关键词:屋顶光伏；数字高程模型；经济性分析；平准化发电成本

第 1 章 引言

目前,太阳能光伏发电和风力发电在全球范围内有了一定得发展,在落实使用和技术创新方面也有着巨大挑战。在能源供应体系向安全可靠、低成本、低碳转型的过程中,可再生能源的发展能够有效地应对气候变化和当地空气污染问题,正在成为许多国家的最佳选择^{〔1〕}。当前的能源政策把发展可再生能源作为一项基本的行动计划,从而在有效应对气候变化和空气污染问题的同时,满足未来几十年内不断增长的能源需求。在这种背景下,光伏发电是一种最具可持续发展理想特征(最丰富的资源和最洁净的发电过程)的可再生能源发电技术,成为最优选择^{〔2〕}。

太阳能光伏系统具有分布式的特点,可根据地区特点进行建设和安装,可实现在城市、农村和郊区的普遍部署^{〔3〕}。同时在环境政策的激励和技术的不断创新下,可再生能源发电有了很大的发展,能源成本急剧下降,能源收益也十分可观。特别是光伏发电系统,从 2009 年到 2018 年,发电成本下降了 75%,装机容量达到 397(GW),总装机容量占可再生能源总装机容量的 17%,发电量占可再生能源总发电量的 5.78%^{〔4〕}。分布式光伏(DPV)和小型太阳能设备(如商用公园光伏和太阳能家庭系统)的电力供应增长尤其迅速。IRENA 的数据显示,通过家用太阳能光伏发电系统和太阳能微型电网应用越来越广泛,大约有 2500 万人可以获得更高水平的可再生能源服务^{〔5〕}。由此我们可以预见,发展分布式光伏将加快电气化和智慧城市的实现。

屋顶光伏部署潜能评估一直是学者们非常重要和广阔的研究邻域,这里我们引进地理信息技术(GIS),发挥其高效的空问辨别和计算能力,评估结果的可靠度和精确度要远远高于人工统计。查阅资料可知,GIS 有几种非常通用的工具包,分别是特征分析工具、光探测与测距和数字表面模型(DSM)^{〔6〕}。例如:Wiginton 等人^{〔7〕}运用特征分析工具在区域尺度上计算出适合太阳能光伏的屋顶面积,运用激光雷达常来识别屋顶几何特征,从而估计 DPV 的安装潜能^{〔8〕},虽然激光雷达数据提高了潜能评估的准确性,但由于其本身的缺陷使其对大规模屋顶光伏的可用性受到约束,同时也受成本约束的限制;Buffat 等人采用 DSM 来识别可用于屋顶光伏的屋顶表面,然而使用激光雷达创建 DSM 需要昂贵的投资,而且间隔时间要长得多,另一种替代 DSM 的方法是使用航拍照片创建 3D 建筑模型,正如谷歌地图所示,但是这种技术还处于正在发展完善阶段,现阶段还不能广泛地投入使用。本文利用地理国情监测云平台支持的 DEM,对北京地区的屋顶几何形态进行识别,并计算出光伏的部署潜能。因此,下文将进一步阐述 DEM 评估的过程。

发电项目的经济评价指标包括工程经济学的各种技术指标,包括净现值(NPV)、生命周期成本、平准化发电成本(LCOE)、内部收益率(IRR)和投资回收期等。Short 等人(1995)对经济评价模型进行了全面而详细的综述^[9]。NPV 指数是资本预算中使用的盈利指标,是指现金流入的现值减去现金流出的现值。Li 和 Liu^[10]将 NPV 分析与已开发的基于像素的方法相结合,来估算潜在建筑光伏项目的收益。IRR 定义为 NPV 为零时的贴现率,即流入的总现值等于流出的总现值。IRR 方法将项目在生命周期内的收益与其总投资集成在一起,并提供一个基准指标来确定项目是否值得投资(Zhao et al., 2017)。值得注意的是,在评估独立项目时, NPV 和 IRR 会产生相同的决策结果。由于 NPV 在计算时需要预先设定一个适当的贴现率,因此, IRR 分析通常优于 NPV 分析。动态回收期通常用于评估各种投资项目的经济可行性^[11]。LCOE 方法广泛应用于各种电力技术选择或新兴技术选择的平准发电成本^[12], LCOE 分析的基本原理是考虑全生命周期发电和成本来评估单位电价,同时最小化不同发电技术之间的偏差^[13]。因此,本文采用 LCOE 方法和 IRR 分析方法对北京市屋顶光伏系统进行了评价。

化石燃料的燃烧主要通过释放二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)和二氧化碳(CO₂)导致大气环境恶化。在中国,燃煤发电造成了严重的区域污染问题。随着燃煤电厂大气污染物排放限制的日益严格,中国对环境保护的要求也越来越严格。北京及其周边地区明确禁止建设燃煤电厂,从而用于限煤和改善空气质量^[14],分布式光伏发电的部署将有利于这一目标的实现。Jones and Gilbert^[15]使用生命周期评估法(LCA)来评估光伏发电在总配电网规模下的温室气体排放。Wang 等人^[16]估计了北京三种不同模式的生命周期 CO₂ 减排潜能。Allouhi 等人^[17]通过评估碳减排潜能,如果光伏装置产生的电能可以替代火力发电,那光伏系统就可以对环境产生积极的影响。Sagani 等^[18]研究发现,额定功率越高的光伏系统对环境的影响越大。上述文献采用碳排放单因素进行环境影响分析,该模型下没有考虑 SO₂、NO_x 和 PM 的排放减少量,低估了光伏系统所带来的环境效益价值。因此,本文将对价值问题进行阐述,以提高其严谨性水平。

第 2 章 北京市电力能源发展状况

北京作为中国的首都,常住人口有 2710 万,面积达 16410 平方公里,人口密度大,能源消耗量大。2017 年,北京每天的能源消耗量相当于 19.5 万吨煤耗量,在过去,由于快速的城市化发展和大量的煤炭燃烧,北京的环境遭到了破坏,污染问题日益严重。政府部门的政策和规定一直在不断地建立和更新,不断变化,特别是在工业、电力、供热等领域,通过控制煤炭的使用,改善了能源结构优化

和环境保护问题。从 2013 年开始，中国政府承诺逐步淘汰所有燃煤发电机组，建设新的天然气装机容量，截至 2017 年底，北京市能源结构包括煤炭(5.65%)、石油(33.8%)、天然气(31.8%)、外来输电(25.99%)等^[19]。据统计，每日平均二氧化硫浓度从 2000 年的 71 毫克/立方米下降到 2017 年的 8 毫克/立方米，空气质量取得了很大的改观。

如图 1 所示，北京 PM2.5 平均浓度估计值降到了 50.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占据 2018 年首都城市排名第八名(AirVisual， 2018)。而与此同时，印度德里的 PM2.5 平均浓度估计值仍然很高，在 2018 年高达 113.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，接近于北京在 2010 年 PM2.5 浓度水平。不可否认的是，北京环境绩效的提高得益于清洁能源发展和供应。

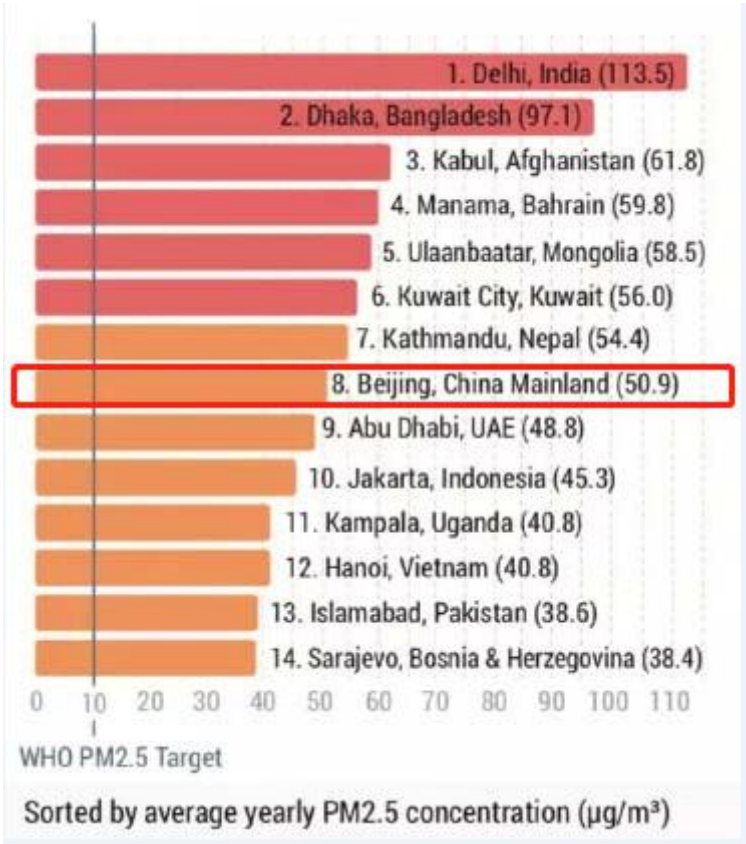


图 1：城市排名

北京地区工商用和居民用光伏发电的自然资源十分丰富。北京地区年太阳辐射约为 4600-5700MJ/M²，位于中国二类资源区域(图 2 所示)，北京地区 DPV 系统年平均发电小时可达 1214 小时，如果给予合理补贴，DPV 系统将会获得满意的投资回报。光伏系统可以根据其运行类型和功能需求分为并网系统和独立系统，而光伏并网发电系统的技术可行性问题已经在许多研究中得到了解决^[20]。因此，本文对工商用和居民用并网屋顶光伏系统和独立屋顶光伏系统的经济评价进行了比较。

SOLAR RESOURCE MAP

PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL

CHINA

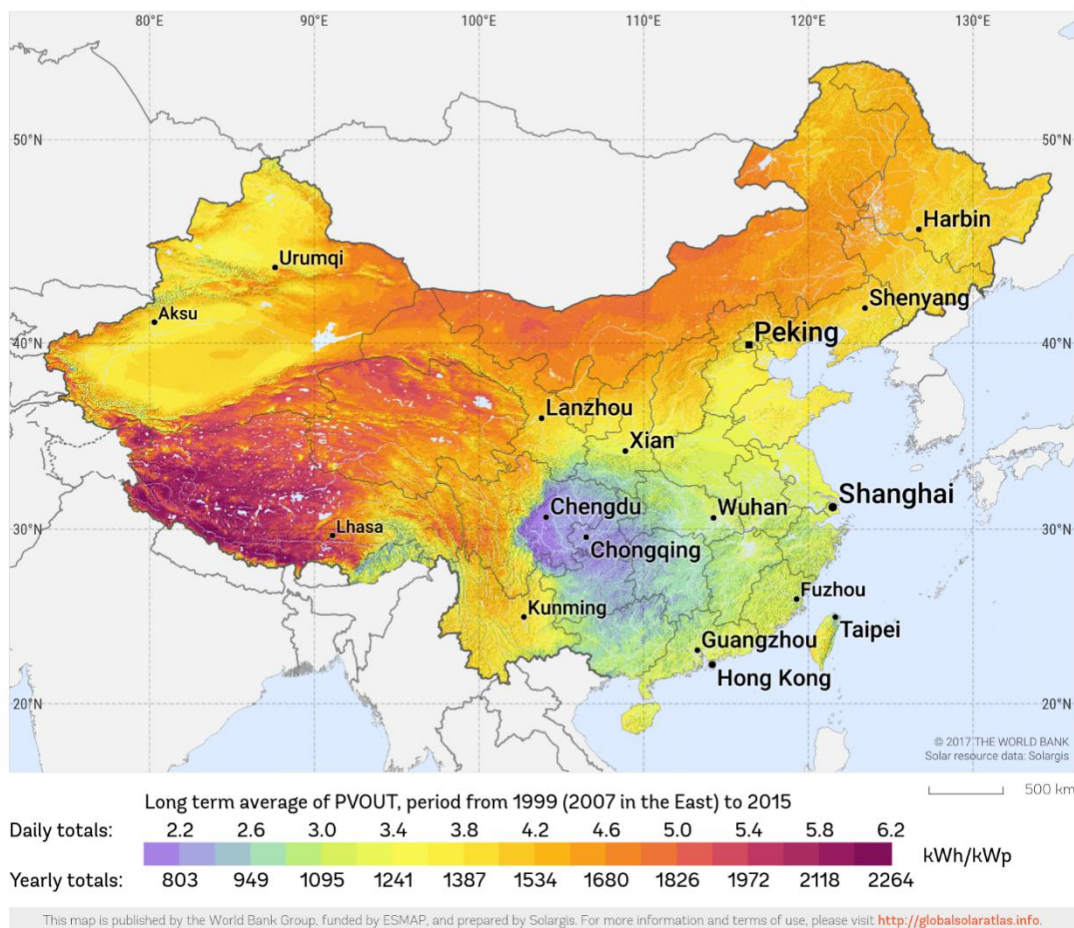


图 2：中国光伏发电潜能

资料来源:SolarGis

如果把外来电力作为清洁电力提供给当地消费者，北京将率先完成全面供应清洁电力的目标。2017 年，北京市电力主要来自地方燃气发电(34.7%)和可再生能源发电(1.57%)，以及周边省份输送的外部电力(63.7%)。截至 2018 年底，北京市太阳能光伏装机容量累计达 400MW，其中 DPV 装容量达机 350MW，还有最近新建的 150MW 的光伏电站都是自 2018 年以来建成的分布式光伏电站。截至目前，政府已发布了 7 次光伏发电项目获奖名单，其中商业光伏项目共 141 个，家庭光伏并网项目共 9796 个(表 1 所示)。北京市政府明确表示到 2020 年北京将实现装机容量 1000MW。由于特殊的地理位置与政治地位，北京市的土地资源和空间资源都十分的稀缺，使用成本十分昂贵，不具备建设集中型的大型光伏发电项目，因此，

下阶段北京市将以分布式光伏发电项目为主要建设目标。

表 1：北京 DPV 发电项目获奖统计

时间	编号	工商业		居民	
		数量	装机容量 (KW)	数量	装机容量(KW)
2016.03.14	1	7	4319.4	19	110.34
2016.09.18	2	11	14446.52	210	1758.875
2017.03.02	3	9	7986.3	1207	10074.5
2017.08.31	4	7	11038.1	2045	16869.32
2018.03.02	5	37	12500.6	2431	20342.375
2018.09.05	6	70	28265.92	3884	34230
2019.03.08	7	67	37343	2337	23546.24
Total		208	115909.84	1222.3	106931.65

此外，国家和地方政府的双重补贴也促进了北京市 DPV 发电项目的成功部署^{〔21〕〔22〕}。国家和北京地区对分布式光伏发电都对分布式发电进行了一定的补贴，从而激励我国分布式光伏发电的发展，促进能源结构的转型和优化，截至目前为止，已经颁布并且实施的补贴政策如表 2 所示：

表 2：光伏发电配套政策及政府补贴情况

年份	政策	主要内容	来源
2013	关于促进光伏产业健康发展的意见	优先支持商用光伏，鼓励公共和家庭光伏	国务院
2013	关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知	DPV 补贴 0.42 元/KWh	国家发展和改革委员会
2015	关于北京市 DPV 发电奖励资金的通知	北京地区对分布式光伏前五年进行补贴，0.3 元/KWh	北京发展研究中心
2018.01	关于 2018 年光伏发电价格政策的通知	对分布式光伏补贴，0.37 元/kWh	国家发展和改革委员会
2018.06	关于 2018 年光伏发电有关事项的通知	对分布式光伏补贴，0.32 元/kWh	国家发展和改革委员会
2019.05	关于完善光伏发电价格机制的通知	DPV 补贴：工商业 0.1 元/kWh，居民 0.18 元/kW	国家发展和改革委员会

如图 3 所示，到 2017 年底，北京的总电力消耗量已增至 1067 TWh。其发展过程具有以下几个显著特征：

- ①2000 年的快速增长是为了缓解环境污染，压缩煤炭在终端能源消费中的利用，煤炭在终端能源消费中的比重从 1978 年的 70%下降到 2000 年的 43%；
- ② 2011 年服务业用电量超过第二产业，表明服务业实体经济增长强劲；
- ③居民用电量增长较快，2017 年是 1986 年的 44 倍；
- ④ 2016 年用电量增长反弹，部分原因是煤转电清洁供热政策。

同时，2017 年北京市居民生活用电量达到 1004KWh/h，相当于德国、韩国和意大利 2011 年的用电量水平。在电力消费情况介绍方面，北京展示了 DPV 电力电气化和智能化发展的巨大潜能。

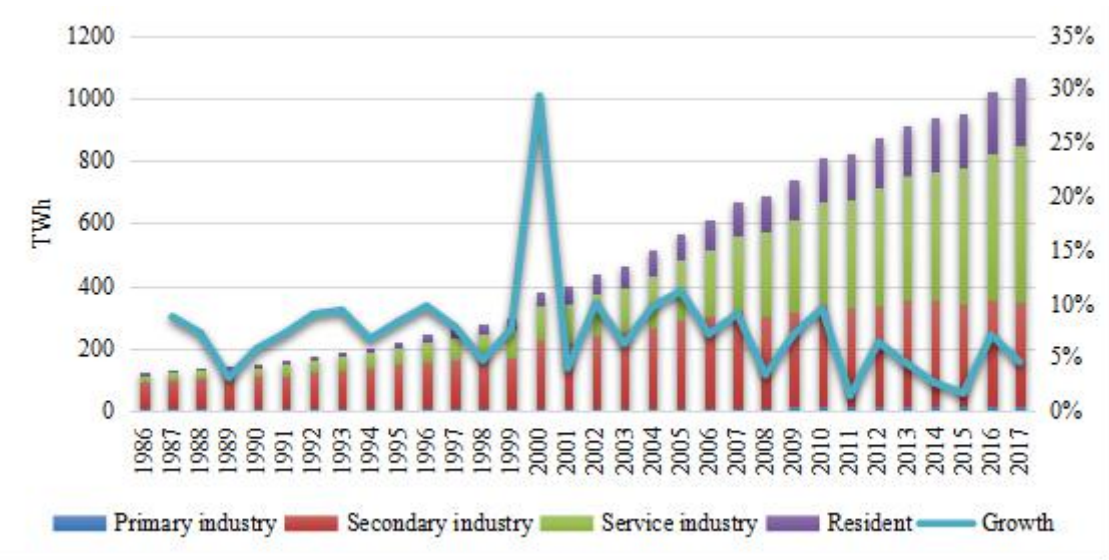


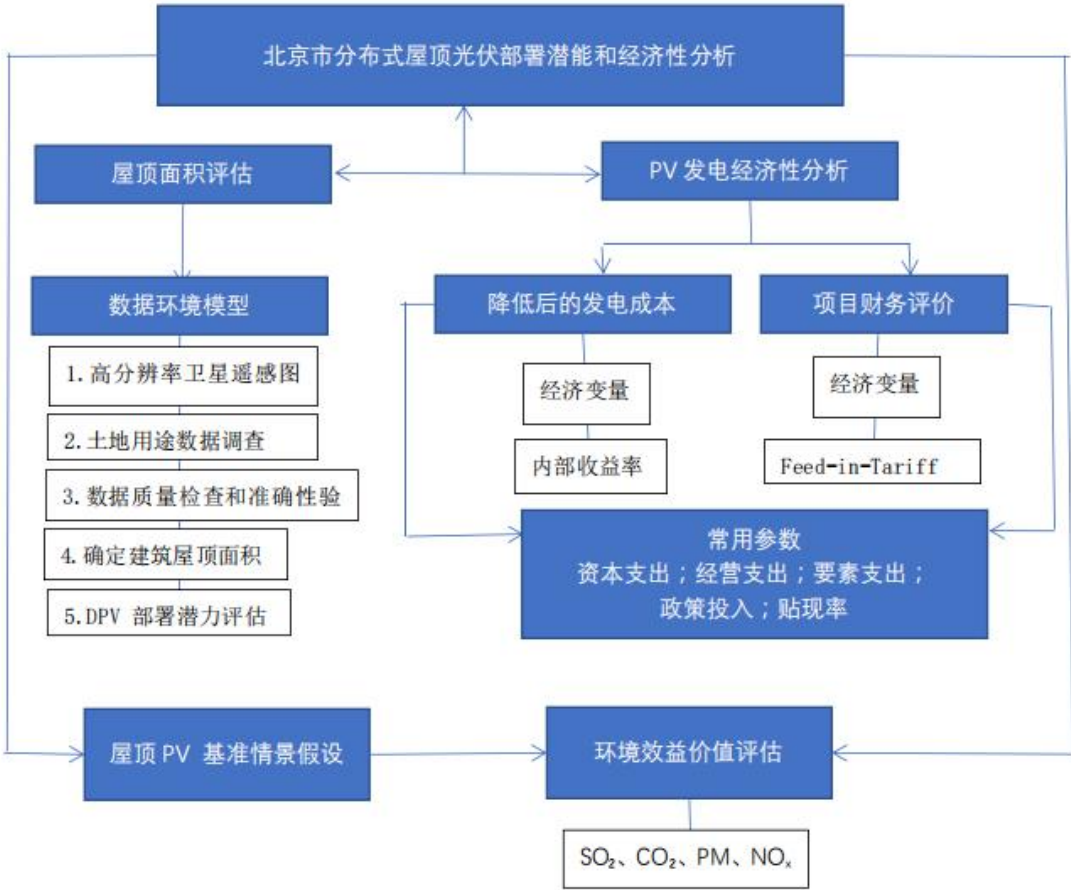
图 3： 1986-2017 年北京市电力消费情况

第三章 方法

我们设计了一个三阶段方法来计算北京屋顶光伏的部署潜能和经济效益。我们进行研究评估的内容分为两部分：屋顶面积评估、光伏发电经济和环境价值(如图 4 中所示)。在本位中屋顶光伏的部署潜能取决于工商业和居民住宅建筑的屋顶面积大小，我们基于 DEM，根据建筑屋顶自身的特性进行识别和筛选，统计和计算需要用到的建筑面积大小，又由于屋顶受遮阳的影响较小，所以，我们可以假设屋顶面积等于建筑面积，从而得到屋顶面积的大小。然后，我们再运用工程项目财务评价方法，包括电力成本水平法和项目财务评价法，对项目的投资吸引力水平进行量化和分析。最后，我们通过得到分布式光伏发电的部署潜能，若其完全去替换燃煤发电，可以为我们带来十分可观的环境效益，然后，我们在评估在

这种理想情况下的环境效益价值，环境效益价值评估的结果可以为北京市节能减排提供新的思路，具有很高的参考价值。

图 4：总体研究思路和方法



3.1 数字高程模型

数字高程模型(DEM)是一种通过有限的地形高程数据实现地形的数字模拟的方法(即地形表面形态的数字表示)。它是一个实体地形模型，以一组有序的数值阵列的形式表示地形高程。

从数据源和采集方法来看，建立 DEM 的方法有几种：

- ①利用水平导轨、针筒、针座和相对高程测量板等仪器，以及 GPS、全站仪、野外测量等高端仪器，直接从地面进行测量；
- ②根据摄影测量所获得的航空或航天图像，例如立体坐标观测和空间三加密、分析制图和数码摄影。阴影测量等；
- ③收集现有地形图，例如网格读取方法、数码仪手持跟踪和扫描仪半自动采集，然后通过插值生成 DEM。

地理国情监测云平台支持的 DEM 数据库采用全数字人机交互遥感快速提取方法，建立建设用地空间数据集，同时制作多尺度栅格数据。高质量 DEM 数据空间分辨率有 30m、90m、1km，覆盖城市建设、农村居民用地以及其他建设用地。最后，我们从海量的土地利用数据中筛选出适合建设屋顶光伏发电项目的屋顶，并且统计和计算屋顶面积大小。

3.2 LCOE

LCOE 指标通常是指应用于新能源领域的用来分析和比较成本结构不同的发电技术的平准化能源成本。本文研究的平准化成本（LCOE）指的是分布式光伏发电系统在假定的建造运营周期内每千瓦时的发电成本。其中，计算分布式光伏的 LCOE 的关键变量包括：初期投资成本变量，融资成本变量、运维成本变量，财税及政策投入成本变量，发电能力变量。

本文将利用 LCOE 模型，通过计算分布式光伏发电系统从初建到运营的总成本费用支出的折现值与其在寿命周期内能量产出的经济时间价值的比值，拟得到分布式光伏发电的平准化贴现成本（度电成本），其推导过程为：

已知未来各期的价值 F 较现期的价值 P 低，用折现率 r 来衡量这一差别，即：

$$P = F(1+r)^{-n} \quad (1)$$

而净现值 NPV 则是多期的价值的集合，通常是指一个项目的寿命周期内的所有期间。对 LCOE 的定义来自于收入的净现值等于成本的净现值这一恒等式，即

$$\sum_{n=0}^N \frac{Revenues_n}{(1+r)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{Cost_n}{(1+r)^n} \quad (2)$$

$$NPV = \sum_{n=0}^N PV = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{n=0}^N \frac{(LCOE_n) \times (E_n)}{(1+r)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{Cost_n}{(1+r)^n} \quad (4)$$

$$LCOE = \left(\sum_{n=0}^N \frac{Cost_n}{(1+r)^n} \right) / \left(\sum_{n=0}^N \frac{E_n}{(1+r)^n} \right) \quad (5)$$

基于上述公式，推导出度电成本 LCOE 的完整计算公式：

$$LCOE = \left(\sum_{n=1}^N \frac{(CAPEX_n + OPEX_n + TAX_n)}{(1+r)^n} \right) / \left(\sum_{n=1}^N \frac{(C \times H \times (1 - o_u))_n}{(1+r)^n} \right) \quad (6)$$

$CAPEX_n$ ——初始投资成本的年值，包括自有资金、贷款以及折旧；

$OPEX_n$ ——运维成本的年值，包括保险费用、修理费用、劳动成本等；

TAX_n ——电厂每年应纳税额，包括营业税、增值税、土地税等；

C —装机容量；

H —年利用小时数；

O_u —厂用电率；

N —电厂运营年限；

r —贴现率。

3.3 项目财务评估

工程项目财务评价分析是在一定的会计、税收、价格体系下，综合投资、成本、收入、税收和利润，对项目的盈利能力、偿债能力和财务可行性进行综合评价^[21]，同时，资金来源和贷款资金的偿也会影响现金流量，进而影响企业的经济效益。因此，经济评价包括两个评价：

- ①“全投入”财务分析将所有资金视为自有资金，考察企业范围内的经济效果；
 - ②“自营基金”财务分析考虑包括财务状况在内的所有因素来调查企业的盈利能力。
- 在本文中，我们评估的是工程项目的经济效益，而不是自身投资的盈利能力。因此，充分的投资评估符合目的。

如前所述，IRR 是判断项目是否值得投资的一个合理指标。IRR 一般被认为是反映投资效率的指标。因此，我们采用充分投资 IRR 作为经济指标。

LCOE 分析和项目财务评估有许多共同的变量和参数，它们可以集成为四类：技术和经济变量、税费、运营支出和财务变量(图 5)。Yuan 等认为，由于系统的功率输出随时间略有下降，系统性能因数受内外因素的限制，系统的年退化率为 0.6%，性能因数为 75%。中国的标准贷款投资率为 6%(中国人民银行，2012)。我国发电项目的平均 IRR 为 8%，因此我们将基准利率作为贴现率(北京市发改委，2013)。税收和收费符合中国政府文件的规定。

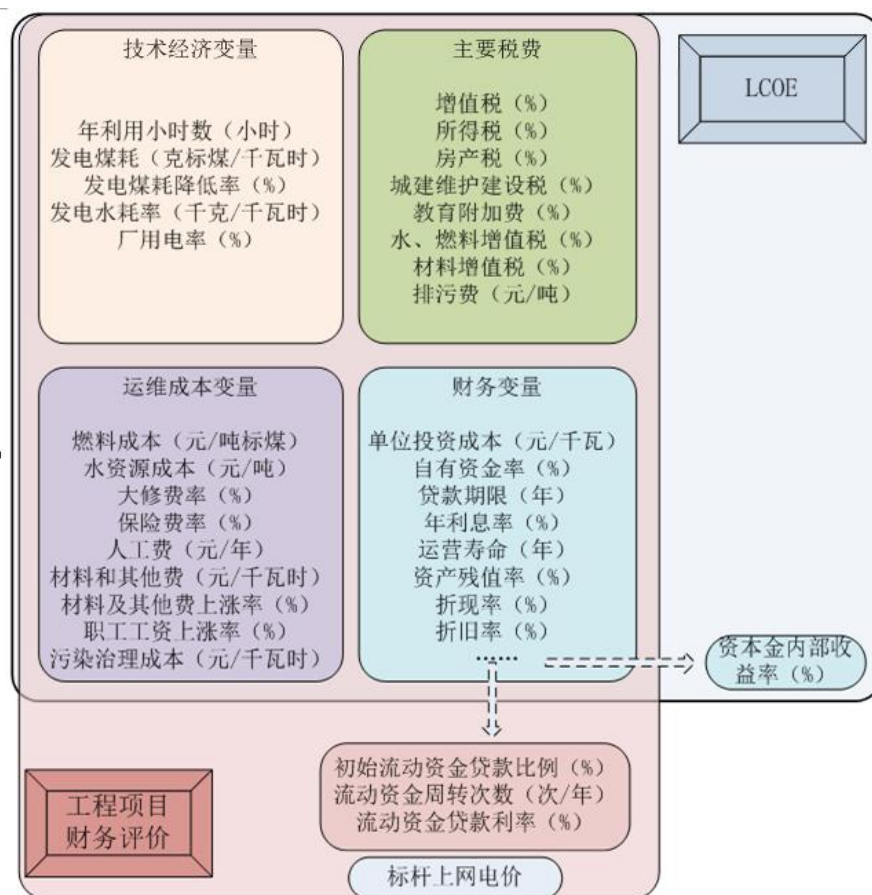


图 5：模型变量和参数

表 3：屋顶光伏经济分析常用参数

常用参数	值
技术和经济参数	
年利用小时数 (h)	1214
系统衰减率 (%)	0.6
系统效率 (%)	75
财务参数	
自有资金比率 (%)	80
投资贷款利率(%)	6
贷款期限(年)	15
机组生命 (年)	25
项目残值率 (%)	5
折旧	15
贴现率 (%)	8

运营成本费用	
维修费率 (%)	1.2%
保险费率 (%)	0.25
屋顶租金 (元/m ²)	4
税率	
所得税 (%)	前三年全部免征，后三年减半免征，其他 15%
增值税 (%)	8.5%
房产税(%)	1.2%，屋顶租金减免 30%
城市维护建设税 (%)	5
教育附加税 (%)	1

第 4 章 结果与讨论

4.1 北京屋顶光伏的部署潜能

高功能的 DEM 可以很准确的对北京建设用地的土地类型划分为城市用地、农村用地和工业交通用地，其中，城市用地又包括商业建筑、古建筑、办公建筑(包括政府、医院、教育机构)、城市住宅(包括多户、独立式住宅)和公共设施（包括交通、水利和工业用地），他们都具有对应的标识，方便我们统计和计算。本文将商业建筑、办公建筑和住宅建筑作为屋顶光伏系统的可用屋顶面积区域。

根据 DEM 数据信息的描述，我们可以得知北京市 2018 年的土地利用面积为 16411km²，其中建筑面积所占的比例较高为 19.7%（如图 6 所示），其中适合进行分布式屋顶 PV 建设的建筑面积约为 241km²，占总建筑面积的 7.45%(如图 7 所示)。在此之前，我们统计的在 2015 年，北京的建筑屋顶总面积约为 200km²。据统计。2016 年北京市城市和农村地区、行业和矿业对土地占有面积达到 306km²(北京市统计局的数据，2017)。

北京市政府发布了《城市规划》，承诺到 2020 年，实现将城乡建设用地面积控制在 2860km² 以内，其中居住用地占 37%，其中建筑屋面占居住用地的 25%(北京市人民政府，2017)，这样，我们可以初步估计北京的建筑屋顶将达到 264km²。综上所述，计算出的屋顶面积 241km² 是相当正确。

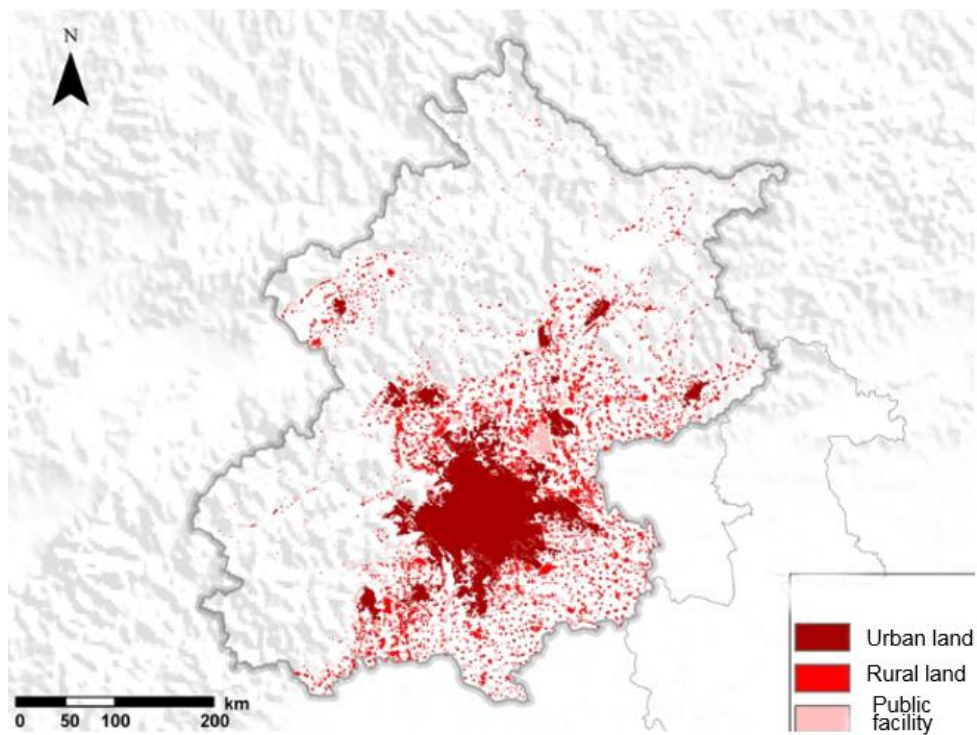


图 6：北京市建设用地空间分布图

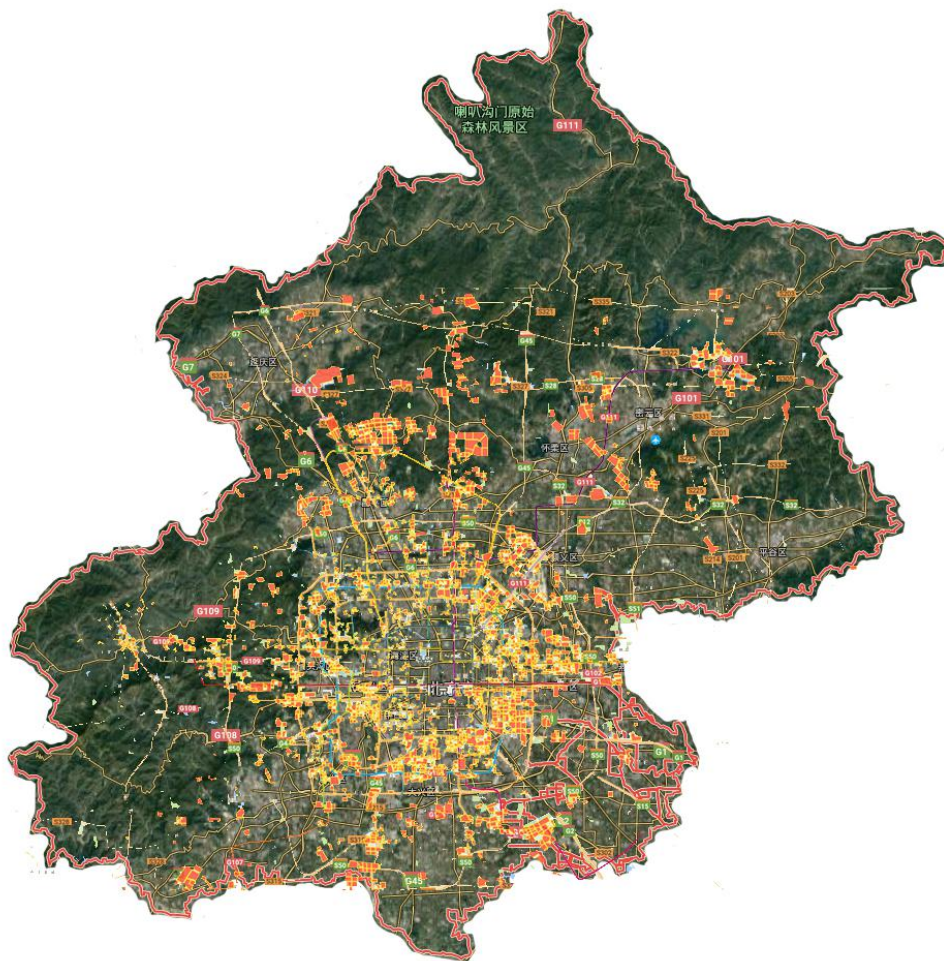


图 7: 适合北京屋顶光伏的建筑面积

整个分布式光伏系统包括光伏阵列、变换器、电池、充电控制器以及各种辅助设备。然后，屋顶光伏将安装在建筑物屋顶上，使其地理位置与太阳辐射形成良好的角度。Li 等(2018)表示 12 月北京地区的太阳辐射范围为 2.46 kWh/m²/d，5 月为 6.17 kWh/m²/d(纬度 39.92°N，经度 116.46°E)，为二类太阳资源区，全年平均太阳辐射值为 4.32 kWh/m²/d。2015 年 12 月，国土资源部(现更名为自然资源部)制定了太阳能光伏项目土地利用指标，如表 4 所示。本文中，我们假设屋顶光伏项目的平均用地面积为 21 m²/KW，再加上估计的建筑屋顶面积 241km²，所以北京分布式光伏的部署潜能评估结果被确定为 11.47 GW。

表 4: 1KW 光伏阵列最佳角度土地利用基准

纬度 (°N)	255Wp	260 Wp	265 Wp	270 Wp	275 Wp	280 Wp	285 Wp	290 Wp
18	10.98	10.68	10.55	10.37	10.20	10.02	9.84	9.66
20	11.45	11.13	11.01	10.82	10.64	10.45	10.27	10.08
25	12.92	12.56	12.42	12.21	12.00	11.79	11.58	11.37
30	14.94	14.53	14.37	14.13	13.88	13.64	13.40	13.16
35	17.89	17.39	17.20	16.91	16.62	16.33	16.04	15.75
40	22.49	21.86	21.62	21.25	20.89	20.53	20.16	19.80

4.2 LCOE 结果

本文通过对市场调查结果的简要总结，将屋顶光伏项目按发电量分为 6 组，作为 LCOE 和 IRR 估算的基线水平。分布式光伏具体定义为：发电容量小于 6MW 的电站^[22]。超过 1MW 的大型屋顶光伏可安装在商业区域和写字楼，小型 DPV 可安装在住宅(公寓楼和独立式住宅)。目前市场上规模最小的屋顶光伏初始单位投资成本最高，为 9000 元/千瓦时。此外，2 千瓦时规模的光伏项目由于投资规模小，很少获得贷款，所以我们其自有资金比例可以设置为 100%。DPV 的年利用小时数来源于前几年的年有效数据提取。表 5 给出了北京屋顶光伏项目 LCOE 的基线水平。

表 5: 不同规模屋顶光伏项目的基线 LCOE 水平

光伏项目	商业屋顶光伏			居民屋顶光伏		
装机容量	6MW	2MW	1MW	20kW	10kW	2kW
单位投资成本	6000	6500	7000	8000	8500	9000

(元/kW)						
自有资金占比	80%	80%	80%	80%	80%	100%
年可利用小时数 (h/year)	1214	1214	1214	1214	1214	1214
屋顶使用面积 (m ²)	126000	42000	21000	420	210	42
LCOE (元 Y/kWh)	0.57	0.62	0.67	0.69	0.73	0.79

根据上述基本参数，利用 LCOE 平准成本模型，计算出的各基线水平下的 LCOE 结果如下图 8 所示。

图 8：LCOE 计算结果



对于不同规模的屋顶光伏项目，其基准情景下的 LCOE 水平在处于 0.57 - 0.79 元/千瓦时之间，跟以往的计算结果相比有明显下降，Yuan 等(2014)研究的数值结果表明，DPV 的 LCOE 在 1.16 - 1.29 元/KWh 之间，这大大超过了我们的估计。光伏组件操作和维护成本的降低进一步降低了分布式光伏发电的 LCOE 水平，再加上 DPV 新增的补贴政策，LCOE 计算结果已接近煤电上网电价基准水平 0.36 元/千瓦时，尤其是大型屋顶光伏项目。综上所述，DPV 的发展状况十分乐观，DPV 并网平价即将到来。

4.3 IRR 评估

我们假设屋顶所有者和投资者是相同的，因此分布式光伏发电的使用途径通常为“自发自用、余量上网”和全额上网。

同 4.2 所示，为了计算出具有典型性的 IRR 结果，我们设定了一些基本参数，组成分布式屋顶光伏建设的基线水平，为方便起见，我们做了一些假设：①所有者和屋顶光伏投资者都是相同的，因此“自发自用、余量上网”的规则可以批准，然后商业电费节省相当于第一项项目的收入；②商用屋顶光伏和住宅屋顶光伏并网发电份额分别为 50%和 20%；③由于北京已无煤电可用，根据河北省(北京周边地区)市场电价，将煤电上网基准电价设定为 0.36 元/千瓦；④商业和住宅平均电价分别为 1 元和 0.5 元/千瓦。表 6 报告了北京市工商业和住宅 DPV 基准情景下的 IRR 结果。

表 6：IRR 计算结果

光伏项目	工商业屋顶光伏			居民屋顶光伏		
装机容量	6MW	2MW	1MW	20kW	10kW	2kW
单位投资成本（元/kW）	6000	6500	7000	8000	8500	9500
自有资金占比	80%	80%	80%	80%	80%	100%
年可利用小时数(h/year)	1214	1214	1214	1214	1214	1214
上网比例	50%	50%	50%	20%	20%	20%
工商业居民电力价格（元/kW）	1	1	1	0.5	0.5	0.5
煤炭发电上网电价基准（元/kW）	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
国家补助（CNY/kW）	0.1	0.1	0.1	0.18	0.18	0.18
工商业补贴（元/kW）	0.46	0.46	0.46	0.54	0.54	0.54
北京市价格补贴（五年内）（元/kW）	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
IRR	14.4%	12.9%	11.7%	8.6%	7.9%	7.0%

我们将资金时间价值基本收益率设置为 8%，并将我们得到的不同装机容量下的 DPV 发电的 IRR 与 8%进行比较，分析其经济性和投资吸引力。由上可知，居民屋顶光伏 10KW 和 2KW 装机容量收益率分别为 8.6%和 7.0%，IPP 水平均小于行业参考收益率 8%，说明在即使有政府补贴的情况下，投资吸引力也较不太乐观。除此之外的其他四种基准水平下的内部收益率均高于 8%，其中装机容量为 6MW 的工商业屋顶光伏内部收益率达到 14.4%，远远超过基准内部收益率，具有较高的投资吸引力水平。北京市部分可再生能源上网电价相当于煤炭上网电价基准再加可再生能源价格补贴，其中前 5 年的补贴是额外的。综上所述：北京市住宅 DPV 的装机容量小，单位投资成本较高，内部收益率相较于基准收益率差异不大，投资

吸引力水平较小，与住宅 DPV 相比，工商业 DPV 的发展状况就十分乐观了，由于投资成本低、商业电价高,大型商业屋顶光伏项目的 IRR 普遍高于行业基准收益率，具有很大的投资吸引力，是现阶段进行 DPV 发电项目建设的主要方向。

4.4 环境价值估算

现阶段中国电力能源结构发展到一定阶段，还是以高污染、高排放的煤电为主，在满足电力能源需要的同时也给我们的环境带来了很大的压力，假设我们充分挖掘出北京市屋顶光伏发电项目的部署潜能，从而可以利用光伏发电代替一部分燃煤发电，将会减少 SO₂、CO₂ 等气体的排放，给我们带来不小的环境效益，下面就对环境效益进行估值。

对于单位 KWh 燃煤发电的污染物排放因子如表 7 所示。

表 7：单位 KWh 排放因子排放指标

排放因子	排放量（g/kwh）	单位减排效益（元/t）
CO2	987.23	80
SO2	1.37	1260
NOX	4.07	2000
PM	0.11	550

由 4.1 可知，北京市屋顶光伏部署潜能达到 11.47GW/年，年利用小时数为 1085h，所以我们可以计算出北京市屋顶光伏发电量潜能为 $12.44 \times 10^9 KWh$ ，这样可以带来的排放因子的排放减少量和减排效益如表 8 所示。

表 8：减排效益计算结果

排放因子	排放减少量（t）	减排效益（元）
CO2	13746763.11	1099741049
SO2	19076.6746	24036610
NOX	56673.0406	113346081.2
PM	1531.7038	842437.09

综上所述：合计带来总减排效益 12.38 亿元

4.5 讨论和敏感性分析

当然，在实践中，由于国民经济分发展和科学技术的进步，前面设定的参数并不是一层不变的，其中单位建设成本、政策补贴水平甚至贷款比都会对 LCOE 结果产生影响，本部分将对主要影响因素进行敏感性分析。敏感性分析是在基准情景下仅改变相应敏感性因素， 来观察该因素对基准情境下的屋顶分布式光伏系统 LCOE 的影响程度。

分别选择典型的工商业和居民分布式屋顶光伏为对象进行敏感性因素的敏感性分析。

表 9：基准情景一：（工商业）

装机容量	2MW
单位投资成本（元 /kW)	6500
自有资金占比	80%
年可利用小时数 (h/year)	1214
屋顶使用面积(m2)	42000
LCOE (元 Y/kWh)	0.62

首先，对年利用小时数进行敏感性分析，年利用小时数直接影响发电量的大小，随着利用小时数增加；再对单位投资成本进行敏感性分析，单位投资成本受技术进步的影响十分各容量大，且对 LCOE 的影响程度也十分高；计算结果如下图 9 和图 10 所示。

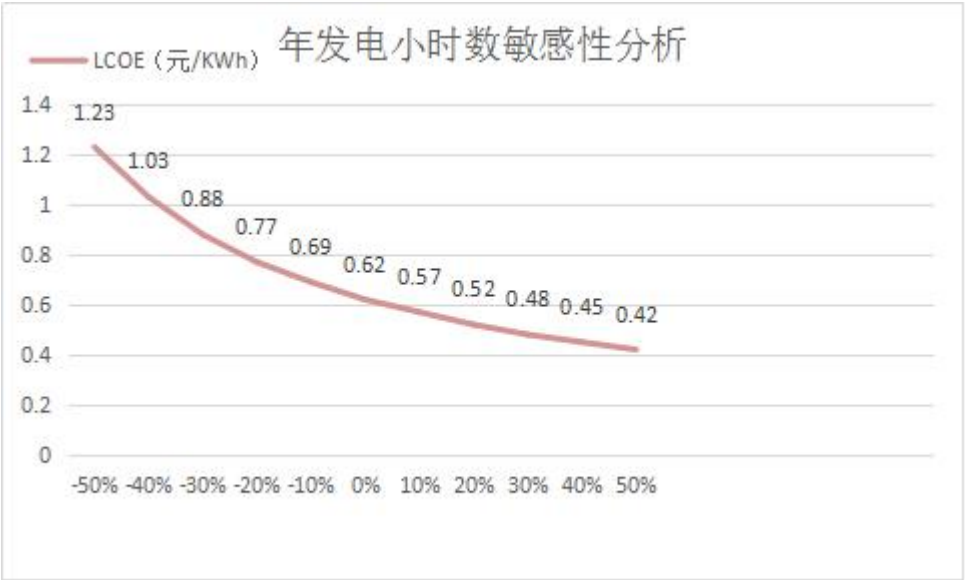


图 9：年发电小时数敏感性分析曲线

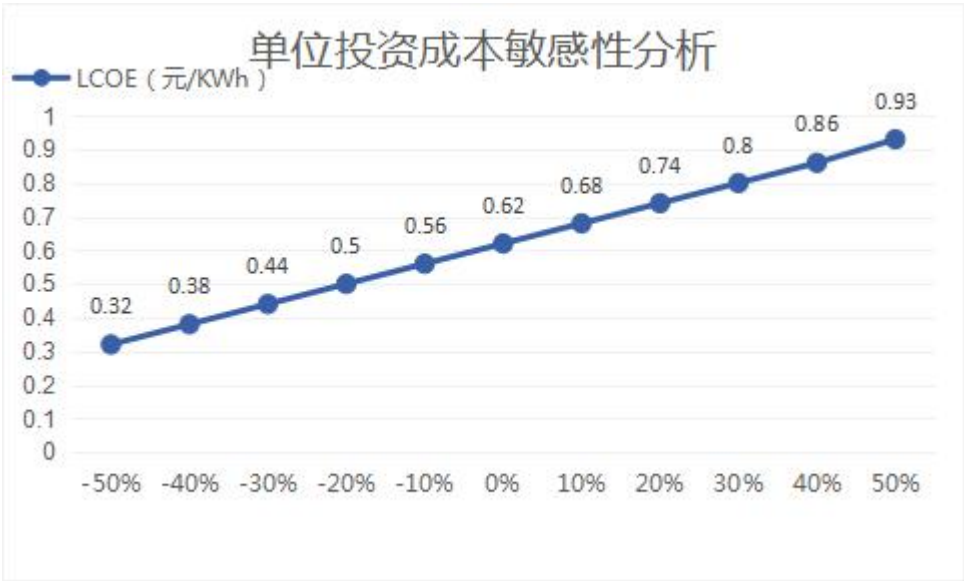


图 10：单位投资成本敏感性分析曲线

由敏感性曲线可知，年发电小时数载较小的时候对 LCOE 的影响较大，在最初年发电小时数每增加 10%可使 LCOE 增加 0.20 元/kWh，随着年发电小时数的不断增加，LCOE 的变化率越来越小，当年发电小时数增加 50%时，LCOE 为 0.42 元/kWh，远低于工商业平均电价。由单位投资成本的敏感性曲线可知，单位投资成本对 LCOE 的影响基本呈线性变化，平均单位投资成本每降低 10%，LCOE 降低 0.06 元/kWh，当平均投资成本降低 50%时，LCOE 可达 0.32 元/kWh，远低于工商业平均电价。

由分析结果可知：

表 10：基准情景二：（居民）

装机容量	10kW
单位投资成本（元/kw)	8500
自有资金占比	80%
年可利用小时数(h/year)	1214
屋顶使用面积(m2)	210
LCOE (元 Y/kWh)	0.73

我们可以得到年发电小时数敏感性曲线和单位投资成本敏感性曲线：

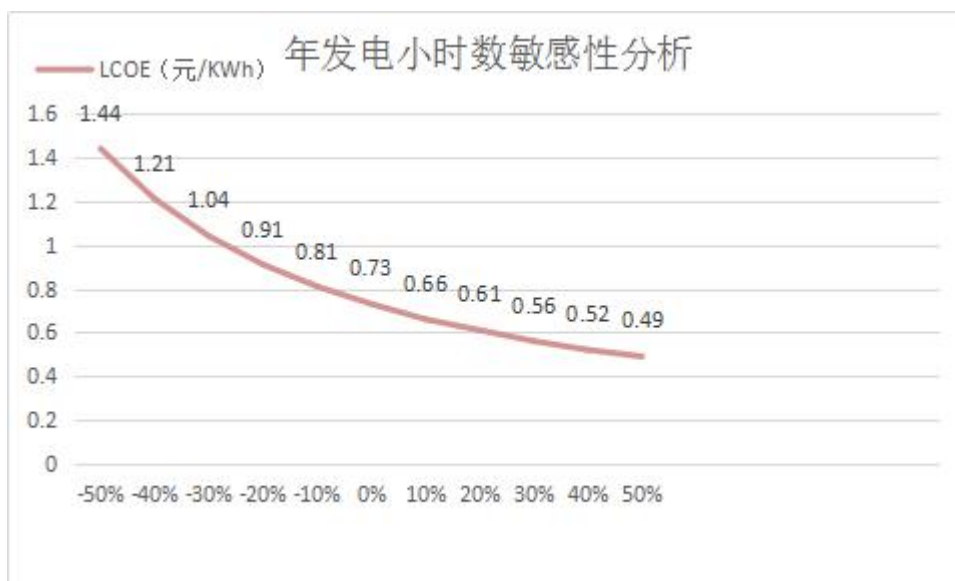


图 11：年发电小时数敏感性分析曲线

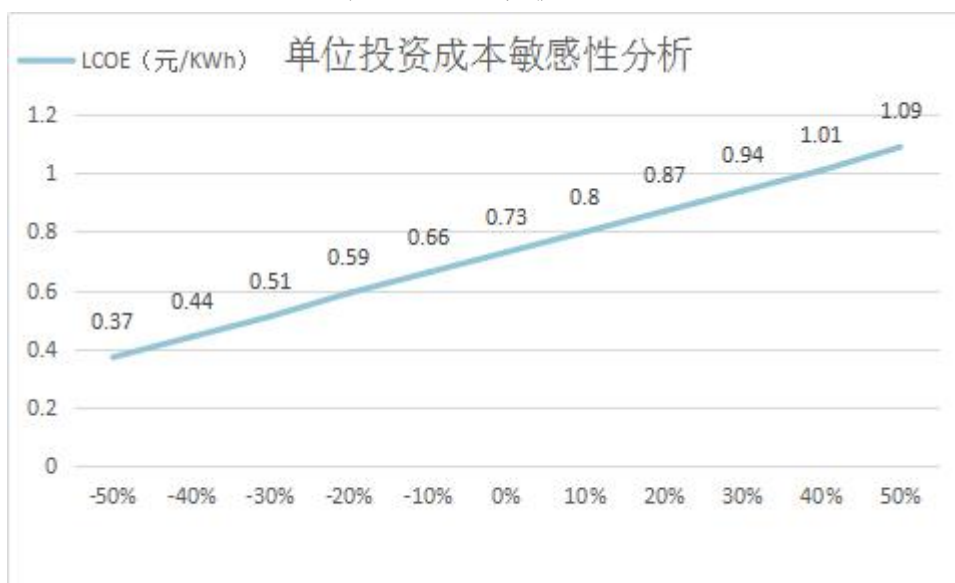


图 12：单位投资成本敏感性分析曲线

由敏感性曲线可知，年发电小时数载较小的时候对 LCOE 的影响较大，在最初年发电小时数每增加 10%可使 LCOE 增加 0.23 元/KWh，随着年发电小时数的不断增加，LCOE 的变化率越来越小，当年发电小时数增加 50%时，LCOE 为 0.49 元/KWh，低于居民平均电价平均电价。由单位投资成本的敏感性曲线可知，单位投资成本对 LCOE 的影响基本呈线性变化，平均单位投资成本每降低 10%，LCOE 降低 0.07 元/KWh，当平均投资成本降低 50%时，LCOE 可达 0.37 元/KWh，远低于居民平均电价。

第 5 章 结论及政策影响

自 2006 年《可再生能源法》颁布以来，我国先后出台了很多可再生能源发展的优惠政策，包括总量目标、分类补贴制度、专项资金制度、强制上网制度、成本分担制度等。通过电力能源结构布局优化、可再生能源友好调度、跨区域输电等解决方案，缓解了可再生能源的服务削减。与发达国家类似，我国可再生能源发展初期主要依靠政策推动和财政激励，在发展阶段通过技术进步、市场保障机制、大规模开发等手段实现成本的降低，为参与电力市场竞争奠定了基础。

当然，过度的可再生能源补贴将增加公共财政负担，推高电价，解决之道是建立适合市场的运行机制，然后与市场相结合。与正在进行的电力市场改革相一致，补贴的减少预示着即将到来的大规模分布式光伏并网。在中国，在没有任何补贴的情况下，一些 DPV 的试点项目正在获得发展势头。与此同时，为促进市场化交易，政府出台了一系列规定，包括降低非技术成本、配套电网的配备以及对不达标行为的处罚。非技术成本困境包括贷款成本、土地租用成本和输配价格。综上所述，我们可以得出结论，充分发挥市场驱动和政策保障，是实现 DPV 良性发展的关键，并且，中国的经验对其他国家发展可再生能源具有很好的借鉴意义。

参考文献

【1】IRENA, 2019. Innovation landscape for a renewable-powered future: solutions to integrate variable renewables

【2】Bye, B., Fæhn, T., Rosnes, O., 2018. Residential energy efficiency policies: Costs, emissions and rebound effects. Energy 143, 191–201

【3】IRENA (2018), Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhab,
www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-powergeneration-costs-in-2017

【4】IE A (International Energy Agency) (2018), World Energy Outlook 2018, OECD/IEA, Paris, p. 528

【5】IRENA, 2016. Accelerating Off-grid Renewable Energy

【6】Dehwah, A.H.A., Asif, M., Rahman, M.T., 2018. Prospects of PV application

in unregulated building rooftops in developing countries: A perspective from Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 171: 76-87

【7】Wiginton L, Nguyen HT, Pearce JM. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Comput Environ Urban Syst* 2010;34(4):345–57.

【8】Jacques DA, Gooding J, Giesekam JJ, Tomlin AS, Crook R. Methodology for the assessment of pv capacity over a city region using low-resolution lidar data and application to the city of Leeds (UK). *Appl Energy* 2014;124:28–34.

Gooding J, Crook R, Tomlin AS. Modelling of roof geometries from low-resolution lidar data for city-scale solar energy applications using a neighbouring buildings method. *Appl Energy* 2015;148:93–104.

Lingfors D, Bright J, Engerer N, Ahlberg J, Killinger S, Widén J. Comparing the capability of low- and high-resolution LiDAR data with application to solar resource assessment, roof type classification and shading analysis. *Appl Energy* 2017

【9】Short W, Packey D, Holt T. A manual for economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. National Renewable Energy Laboratory; 1995. p. 1-120

【10】Li Y, Liu C, 2018. Revenue assessment and visualisation of photovoltaic projects on building envelopes. *Journal of Cleaner Production*, 182: 177-186

【11】Alam, M., Singh, H., Suresh, S., Redpath, D.A.G., 2017. Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings. *Appl. Energy* 188, 1–8.

【12】Branker K, Pathak M, Pearce JM. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:4470e82.

Congedo, P.M., Malvoni, M., Mele, M., De Giorgi, M.G., 2013. Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules in South-eastern Italy. *Energy Convers. Manage.* 68, 1–10.

Larsson S, Fantazzini D, Davidsson S, Kullander S, Mikael H. Reviewing electricity production cost assessments. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;30: 170e83.

【13】Yuan J, Sun S, Zhang W, Xiong M, 2014. The economy of distributed PV in China. *Energy*, 78: 939-949

【14】国家发改委, 国家能源局, 2017. 《关于推进供给侧改革, 防止和解决燃煤发电行业产能过剩的意见》

【15】Jones C, Gilbert P, 2018. Determining the consequential life cycle

greenhouse gas emissions of increased rooftop photovoltaic deployment. Journal of Cleaner Production, 184: 211-219

【16】 Wang M, Mao X, Gao Y, He F, 2018. Potential of carbon emission reduction and financial feasibility of urban rooftop photovoltaic power generation in Beijing. Journal of Cleaner Production, 203: 1119-1131

【17】 Allouhia A, Saadanib R, Buker M S, 2019. Energetic, economic and environmental (3E) analyses and LCOE estimation of three technologies of PV grid-connected systems under different climates. Solar Energy, 178: 25-36

【18】 Allouhia A, Saadanib R, Buker M S, 2019. Energetic, economic and environmental (3E) analyses and LCOE estimation of three technologies of PV grid-connected systems under different climates. Solar Energy, 178: 25-36

【19】 AirVisual, 2018. World Air Quality Report 2018.
<https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities>

【20】 李冲,周成交,郑元,2018.短时间内对五个气候区的光伏发电系统的技术经济比较研究,中国。能源, 165:1352 - 1369

【21】 中国人民银行, 货币政策部门.降低基准利率的决定. <http://www.pbc.gov.cn/publish/zhengcehuobisi/625/2012/20120705184941036264037/20120705184941036264037.html>

【22】 国家能源局.《分布式光伏发电管理暂行办法》.2013.http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201312/t20131211_1735.htm