欧洲太阳能城市规划设计的研究进展

Research Process in Solar City Planning in Europe

陆明 付婧莞 杜江涛

Lu Ming, Fu Jingwan, Du Jiangtao

摘要: 我国对于太阳能的研究在建筑层面已经比较成熟,但在城市层面才刚刚起步。通过对欧洲太阳能城市前沿研究成果进行归纳,在太阳能城市的设计框架下,针对规划过程中城市分析与建模、太阳能潜能估算、城市文脉保护以及太阳能一体化质量评估的不同阶段总结了相应的技术和方法,并以太阳能地图的制作与应用为例展示了实践成果,同时未来的研究应关注城市风貌、规划实施与教育宣传。对于国内城市层面的太阳能利用可以在理论研究、规划方法、设计工具与政策体系上借鉴欧洲经验,建设本土的太阳能城市。

Abstract: The research of the integration of solar energy and buildings in China has been well developed. However, the utilization of solar energy on the urban scale has just started. This study presents the research methods and tools of European solar cities based on the solar city design framework, including urban analysis and modeling, solar potential estimation, solar energy promotion and the protection of urban context, and the application of solar map. Furthermore, the future research of solar city should pay attention to the urban context, the implementation and the educational propaganda. The European experience may provide references on the theoretical study, planning methods, design tools and policy systems for China to build local solar cities.

关键词: 太阳能利用; 太阳能城市规划设计; 太阳能地图; 欧洲经验

Keywords: Solar Energy Utilization; Solar Urban Planning and Design; Solar Map; European Experience

国家自然科学基金重点项目 (51438005), 黑龙江省科技攻关 (应用技术与开发) 计划项目 (GZ15A508), 住房和城乡建设部科学计划项目 (研究开发项目) (2016-K1-011)

作者: 陆明, 博士, 哈尔滨工业大学建筑学院城乡规划系, 副主任, 副教授, 博士生导师。hitlm1969@hit.edu.cn

付婧莞, 哈尔滨工业大学建筑学院—美国加州大学戴维斯分校联合培养博士研究生。fujingwan@126.com

杜江涛, 博士, 英国利物浦约翰摩尔斯大学建筑环境学院, 高级讲师。J.Du@lpmu.ac.uk

引言

欧洲国家为了在历史传承与快速城市化中寻找城市可持续发展的途径以缓解能源危机,采取了优先利用太阳能的节能手段,希望通过积极推进太阳能在城市规划中的应用来实现零能耗 (Zero Energy Building)^[1] 的目标。目前太阳能利用的相关成果已经从太阳能建筑一体化研究扩展到城市区域尺度——太阳能城市规划 (Solar Urban Planning)^[2,3],将太阳能利用与城市规划、建筑设计、景观风貌等相结合,达到太阳能利用与城市发展的一体化。太阳能城市设计可以通过减少能耗以及改善未来建筑性能,为世界能源问题提供新的解决方案,开拓可持续城市规划的“新阶段”^[2]。

近几年国务院及国家能源局陆续发布了《太阳能发电发展“十二五”规划》(2012年)、《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》(2013年)、《关于进一步落实分布式光伏发电有关政策的通知》(2014年)、《中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》(2016年)等一系列文件,并将太阳能资源在城市中的应用作为未来国家能源发展战略的重点之一,目的是推动城市能源可持续发展,解决城市能源短缺及环境污染等问题。本文旨在通过总结欧洲太阳能利用的规划研究,为城市规划师和建筑师提供借鉴,促进太阳能城市在中国的健康发展。

1 欧洲的太阳能资源分布及利用

欧洲的太阳能资源分布从北向南呈递增趋势 (图1)。北欧的大部分地区太阳辐射获得量较低,年太阳辐射量低于 $1\,200\text{ kWh/m}^2$,包括苏格兰、北爱尔兰、挪威、瑞典、丹麦和芬兰等;北纬 $46^\circ\sim 50^\circ$ 是太阳辐射获得量的中等地区,年太阳辐射量为 $1\,200\sim 1\,600\text{ kWh/m}^2$;而欧洲南部的太阳辐射获得量最多,年太阳辐射量大于 $1\,600\text{ kWh/m}^2$ ^[5]。

欧洲城市对太阳能的利用主要体现在太阳能集热器、被动加热、日照与采光和光伏发电等四个方面。一项欧洲中部的研究显示,每年在建筑立面上应用太阳能系统的基准值中:117 kWh/m² 用于被动加热;400 kWh/m² 用于太阳能集热器;800 kWh/m² 用于光伏系统;10KLx 用于天然光系统^[5,6]。据统计,包括欧洲在内的15个地区,光伏发电已满足了每年近10%的电力需求,预计至2020年光伏发电可以满足欧洲12%的电力需求。

自2002年以来,一些欧洲国家相继开展了城市中太阳能利用的相关研究。国际能源署(IEA)成立的太阳能供热和制冷项目(IEA-SHC)一直致力于该领域的前沿探索,并以提高长期的能源使用安全以及减少温室气体的排放为目标^[7],在太阳能利用的研发与实践上成果颇丰。该项目现已拥有包括中国在内的21个国家和6个国际组织参与^[8]。此外,国际太阳能学会(ISES)、欧洲太阳能光热产业联合会(ESTIF)、全球太阳能热利用委员会(GSTEC)等组织也积极致力于太阳能在城市中高效利用的研究^[9]。

2 太阳能城市的规划设计框架

太阳能城市规划的核心在于将城市中经济、社会、空间和政策等因素与太阳能的利用进行统筹规划。从前期的分析与设计到后期的实施与评价,都是城市规划与能源规划相互作用的过程。太阳能城市的设计流程(图2)可分为四个阶段:(1)目标定位阶段,以经济发展、环境保护和社会需求为出发点,综合考虑可持续发展的能源利用效率;(2)数据分析阶段,运用SWOT分析法对各项影响因素对比分析并估算太阳能潜能;(3)规划设计阶段,是城市设计与能源利用的交互过程,运用参数建模和太阳能模拟等工具建立优化的城市模型;(4)实施评价阶段,将城市规划与太阳能利用

图1 欧洲太阳能资源分布图

资料来源:参考文献[4]

的综合效益纳入评价体系,共同指导并完善城市太阳能利用模型。

根据该设计框架,可以对城市区域进行建模分析,获得太阳能城市规划前后的太阳能利用情况对比,以此提高城市的能源效益。以葡萄牙阿尔卡比德希镇为例^[2]。首先,运用ArcGIS获取该区域的场地数据并计算现状屋顶的太阳能利用潜力,见图3a;其次,运用Ecotect模拟阴影区面积和太阳辐射量,得到现状屋顶上能够有效接收太阳能的净面积;最后,综合考虑人口需求、活动功能、公共空间、智能生态系统等因素,在保证阳光入射与建筑之间遮挡最小化的前提下得出城市的太阳能利用模型,见图3b。优化后的模型适用于棚户区的改造,在不改变原有街道关系的情况下,拓展了更多的公共空间。

该案例的研究进一步验证了在太阳能城市的规划过程中,通过调整建筑朝向以及建筑立面周围的公共空间,可使安装光伏系统的建筑获取更多的太阳能,从而有助于实现零

图2 可持续的太阳能城市规划设计框架图

资料来源:参考文献[2]

图3 阿尔卡比德希镇太阳能利用的建模分析

资料来源:参考文献[2]

能耗的目标^[2]。而要实现整个城市的可持续发展,只考虑建筑单体的节能是远远不够的,必须将城市空间规划与太阳能利用进行交互设计。

3 太阳能城市的规划方法与技术研究进展

在太阳能城市设计框架的第Ⅱ和第Ⅲ阶段,针对城市规划与太阳能估算这一动态的交互过程,可通过分析城市规划的相关因素、建立城市街区模型、编辑算法、估算太阳辐射量以及计算城市能源平衡等五个步骤(图4)进行太阳能城市的规划。

3.1 太阳能城市的规划设计方法

针对各个规划阶段,涌现出一些新的研究方法,如:GUUD模型、BIPV、Leso-QSV法等。太阳能地图(Solar Map)则作为太阳能城市的实践成果为市民与城市管理者提供了太阳能资源的信息。

(1) 城市太阳能利用的单元提取:GUUD模型

在城市中广泛安装光伏系统和使用智能电网的背景下,整个城市的能源流动、生产和消费模式是动态关联的,因此必须对这一过程加以分析和控制^[10]。地理城市单元划分模型(GUUD: Geographical Urban Units Delimitation)^[10]在元胞自动机(CA)的基础上,将城市街区和邻里视为细胞一样的太阳能发电站,并根据建设周期、人口密度、城市形态和土地利用模式等四项标准将城市划分为不同的“细胞单元”(cellular unit)。通过提取城市形态中各个单元的典型特征,对比分析不同街区形式中建筑屋顶对太阳能的利用情况(图5),为城市中太阳能的利用与管理提供依据。

(2) 太阳能潜能估算:BIPV方法

图4 太阳能城市规划工作步骤与工具应用流程图

资料来源:参考文献[10]

提取建筑单元与街道模式	1. 行列式	2. 围合式	3. 有机混合式
屋顶形式	坡屋顶和平屋顶	坡屋顶	坡屋顶和平屋顶
利用 Ecotect 模拟太阳辐射			
预测可利用屋顶上光伏系统的电能年产量 (kWh)	2 280 441	742 816	1 576 178
居民年耗电量 (kWh)	3 655 770	2 583 504	984 192

图5 奥埃拉什(葡萄牙)城市街区典型模式提取与太阳能利用分析

资料来源:参考文献[10]

在区域规划之前,首先要量化太阳能潜能,其次是明确太阳能系统与建筑一体化方式^[11]。建筑与光伏一体化的太阳能潜能估算(BIPV: Building Integrated Photovoltaics)^[12]方法(图6),通过计算安装光伏系统后建筑表面获取的太阳能多少,为太阳能城市的选址与优化提供依据。其中,太阳能利用可行性系数F的确立主要根据两个原则^[12]:一是要考虑建筑设备的安装(空调、电梯和阳台等)、建筑的文化和历史价值(建筑特征的可见性)、遮阳系统以及其他特殊的不能遮盖立面的需求;二是要考虑建筑的地理位置、朝向、高度、表面的几何特征等。研究表明,在确定光伏系统及安装的最佳朝向后,根据当地人均能源供给所需的屋顶和立面面积,可以得到最适宜该地区利用太阳能的新建筑形式以及光伏系统的安装位置等,而对现有城市区域与新建城区的太阳能潜能进行对比,则可以优化城市中的太阳能利用形式^[12,13]。

(3) 城市文脉保护与太阳能一体化质量评估:Leso-QSV法

城市太阳能利用过程中,太阳能设备的安置可能会对城市风貌产生影响。最新提出的Leso-QSV(Quality-Site-Visibility)^[14]方法在促进太阳能利用的同时,也为保护城市风貌提供了评估依据。该方法围绕建筑物表面的“临界度”(architectural “criticity”)概念,由城市的文脉敏感度(城市中越重要的文脉,敏感度越高)和可见度(公共空间中建筑表面的可见程度,图7)共同限定:城市区域的敏感度越高,表面的可见度越高,则“临界度”也越高(图8),那么对太阳能与城市一体化质量的要求也要随之增加。该方法结合了两个互补的工具,Leso-QSV Acceptability和Leso-QSV Crossmapping^[14]。前者主要针对政府管理部门,提出了城市与太阳能一体化质量的评估方法,并适用于城市特殊性的要求;后者针对规划师,将城市中建筑表面的临界度地图与太阳辐射地理信息系统图相叠加,提供建筑与太阳能一体化建设后的太阳能潜能^[14]。研究发现,不同城市空间表面对太阳能利用效率各有利弊,而该方法有助于根据城市的特殊性来调整能源政策^[14]。

图6 太阳能利用潜能估算步骤

资料来源:作者改绘自参考文献[11]

3.2 太阳能城市技术应用平台：太阳能地图

太阳能地图^[15]是提供建筑表面（屋顶及立面）年太阳辐射量的在线 GIS 平台，为分析现有建筑环境的太阳能潜能（如太阳热能、光伏发电量等）提供了有效方式。据统计，到 2015 年末，世界上至少有 11 个国家，超过 45 个城市拥有在线的太阳能地图，其中欧洲城市约占总数的 35.5%。许多城市管理部门已经将详细的太阳能地图链接到公开网站，不仅作为面向市民的前端平台，告知他们自家屋顶的太阳能利用潜力；同时是面向城市管理者的后端工具，成为能源利用决策的基础^[15]。

(1) 太阳能地图的制作

太阳能地图制作的基础是遥感技术和地理信息系统的结合。目前的测算只针对屋顶区域，需要对建筑物及其周边的遮荫物体进行精确的定位和计算，包括日照、遮荫、屋顶面积和倾斜度、光伏板角度等参数（图 9）。

图 7 城市公共空间中不同水平的建筑表面可见度

资料来源：参考文献 [14]

图 8 城市表面的建筑临界度标准

资料来源：参考文献 [14]

各个城市对太阳能地图的完善程度有所不同。作为决策的辅助工具，太阳能地图在设计时要综合考虑三方面因素：

(1) 用户（政府管理者、城市规划者、投资者、房地产所有者）；(2) 规模（城市、街区和建筑的不同尺度）；(3) 软性方面（提高公众兴趣并鼓励参与式规划）^[15]。在内容的呈现上分为三个档次：初级（包括太阳辐射水平及其分类）、中级（增加了太阳能系统的产出，产能适宜区域的分类，光伏系统的效率等）以及高级（在中级的基础上增加了每月电能产量，投资、成本和税收等财务信息，安装知识，太阳能相关的信息等）^[15]。

(2) 太阳能地图的应用

在线太阳能地图为个人查询提供了便利，免费的咨询信息也是各城市鼓励市民使用清洁能源的策略。例如，在 Project Sunroof 官网 (<http://google.com/sunroof/>) 输入某个住宅的地址，系统就会使用来自 Google 地图的 3D 模组数据和高解析度空间绘图技术，建立该屋顶的三维模型，并考虑住宅附近树木和建筑物的阴影、屋顶方向、当地的天气等因素，分析屋顶全年的太阳照射位置、预计日照量，显示该区域附近屋顶的太阳能板数量，还可以分析云层覆盖状况、环境温度等。使用者也可以输入电费账单，让系统微调分析结果。

不同城市的在线太阳能地图展示形式各异（图 10、图 11），但界面直观，通过调节不同的参数信息，地图上会通过颜色差异显示出建筑屋顶太阳能利用潜能的位置与大小。用线段工具圈画出屋顶的范围，即可得到该处太阳能利用的相关数据，如安装光伏板后每日获得的电量，安装的最佳角度、朝向，每年节省的电费，减少的 CO₂ 排放量等，也可以通过调整参数使计算结果更加准确。同时，很多在线太阳能地图网站也会提供就近的光伏系统安装厂家信息，使市民更加便利地了解和参与到太阳能利用的进程中。

图 9 建立太阳能地图的方法

资料来源：参考文献 [15,16]

4 太阳能城市规划的未来研究方向

对于太阳能城市未来的研究,根据 IEA-SHC51 号课题提出的研究框架(图 12),不仅要进一步完善现状评价和应用阶段中的技术方法,还将实施阶段和传播发展阶段作为欧洲各国关注的重点,包括城市风貌、宏观规划和教育普及。

(1) 关注景观风貌与城市文脉

太阳能设备的使用会对城市环境的视觉体验造成影响,建筑与开放空间中大面积的太阳能板也会覆盖或遮挡历史遗产和植被用地,改变传统的城市文脉特征。因此,如何协调能源利用与景观风貌的关系成为太阳能城市规划的发展方

图 10 瑞典隆德城市在线太阳能地图
资料来源:参考文献[17]

图 11 奥地利维也纳城市在线太阳能地图
资料来源:参考文献[18]

图 12 51 号课题内容框架
资料来源:作者改绘自参考文献[19]

向。欧洲的一些城市也针对太阳能板对环境景观的影响设定了法律法规。

英国德文郡景观保护专业规章制度^[20]中列举了大面积铺设太阳能设备对景观的影响及改善方式。如光伏板的布置不遵循场地等高线或不规则边界时,它们规则的边缘在自然形态的景观中更为醒目;机架(高达 3 m)可能高于一般绿篱的边界等。为了改善大面积光伏设备带来的封闭感,可以在其周围做屏风式种植,或允许树篱自由生长,而使用乡土树种等管理方面的调整可能会丰富景观的多样性并对当地的景观风貌产生积极的改变。太阳能的利用得益于政府的支持,而城市风貌的保存也得益于法规的约束,因此,在获得能源与经济效益的同时不能忽视城市的美学问题和历史文化的保护。

(2) 强化宏观层面与规划实施

目前的研究大多注重单体建筑对太阳能的利用,忽视了建筑群以及城市街区的层面,存在碎片化的问题^[21]。而实际上在城市规划的初期就应该将太阳能的利用予以考虑,预先设计适合太阳能利用的建筑朝向、高度、规划布局以及街道关系。虽然有不少软件可以计算城市区域的太阳辐射量,但仍缺少将测量结果整合实施到已建成区域的方法^[21]。

在太阳能城市规划的实施过程中,仍存在有待补充的方面。如对现有指标的审查,修改不合理的地方并适应可持续城市规划的新指标;全面评估城市环境中太阳能的实际潜力并以此为依据支持城市规划设计和审批流程;通过记录太阳能城市规划的优秀实践案例(方法和过程)来展示城市规划与太阳能结合的卓越成果,建立可供学习的数据资源库;关注城市中可以通过规划改善太阳能获得量的区域,并采取积极的优化措施等。

(3) 重视专业教育与社会传播

太阳能的利用需要自上而下和自下而上的共同作用。为了适应未来城市发展的趋势,太阳能的学习和发展不仅仅是政府决策者、城市规划者和研究人员的责任,同时要面向大学教育,尤其要加强城市规划、建筑与工程专业中对太阳能的认知与实践。用于太阳能城市开发与实施的各项材料也可作为研究生课程与专业发展的教材资料^[22]。

各方参与者的通力合作是推动太阳能城市发展的基础,从政府到规划者到市民,普及可持续理念和参与式规划有助于城市快速地推进零能耗的目标。为了确保不同角色之间的良好沟通,51 号课题要求参与国的各城市之间进行对话和合作,同时这些城市也是传播阶段的目标群体^[22]。

5 总结与启示

目前,国际上针对太阳能利用的研究方法从静态向动态模式发展,技术标准更加注重整体性和实效性,应用对象已

从建筑单体转向城市环境。我国对太阳能在城市尺度的应用研究刚刚起步,在理论方法、技术标准和应用实践等方面均与国外前沿研究存在一定差距。虽然国外在该方向的研究也处于探索阶段,但欧洲太阳能城市规划的初步研究成果值得我们借鉴。

(1) 注重跨学科研究。在理论研究方面,我国太阳能与建筑一体化研究的理论技术趋于成熟,但太阳能与城市一体化的研究较少,应积极开展城乡规划学与能源科学的跨学科研究。尽管国外的研究方法和应用技术相对成熟,但不宜照抄照搬,因为中外城市形态及建筑布局存在较大差异,地域特点和气候环境也有所不同。

(2) 发展太阳能空间规划策略。在规划设计方法上,太阳能规划与城市空间规划相脱节,城市建设者和规划人员应注重城市规划与太阳能规划的交互式研究,制定太阳能资源的空间发展规划,建立太阳能可利用空间模式及发展策略,实现城市的可持续发展。

(3) 建立太阳能应用数据平台。在太阳能城市的设计工具方面,Radiance+PFF、DesignBuilder+EnergyPlus、ECOTECT、ENVI-met等都是国际前沿的太阳辐射模拟分析工具。太阳能地图为城市能源规划和管理提供信息服务,我国也应着手研发本土的太阳能地图。随着智慧城市以及生态城市的建设,可以结合大数据的技术平台,构建太阳能资源现状、利用潜力与实施绩效的数据库,实现太阳能城市规划的数据共享。

(4) 平衡城市多方需求。我国目前的太阳能开发利用侧重资源分布、节能减排、环境效益等方面,而较少关注太阳能系统对城市景观风貌、历史文化、市民心理感知等城市环境和社会人文层面的影响,这些方面在未来太阳能城市的规划中应予以重视。

(5) 完善政策保障体系。在太阳能利用的政策方面,我国虽然出台了一系列支持太阳能利用的政策,但因地制宜的政策仍有待完善,尤其是针对城市规划领域的太阳能实施细则、奖励机制以及数据平台等,完善的政策体系对促进太阳能城市的高效发展意义重大。

我国作为国际能源署的一员,正在积极探索太阳能的利用与发展。虽然目前将太阳能综合规划研究与实践扩大到整个城市及地区范围仍存在难度,但是通过政府、规划师、建筑师、工程师以及研究人员等多方协作,太阳能利用一定能为推进可持续城市建设贡献力量。UPI

- [2] AMADO M, POGGI F. Towards solar urban planning: a new step for better energy performance[J]. Energy Procedia, 2012, 30: 1261-1273.
- [3] KAISER N. Solar energy in architecture and urban planning[M]. New York: Prestel, 1996.
- [4] Solar Radiation Maps: Global Horizontal Irradiation (GHI)[EB/OL]. [2016-05-27]. <https://solargis.com/>.
- [5] 陆明,杜江涛. 欧洲城市环境中的太阳能设计和规划: 迈向可持续发展的坚实一步[J]. 城市空间设计, 2011, 5(2): 75-78.
- [6] MONTAVON M. Optimisation of urban form by the evaluation of the solar potential[J]. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010.
- [7] IEA-SHC : International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme[EB/OL]. [2016-06-27]. <http://www.iea-shc.org>.
- [8] IEA-SHC. SHC Members[EB/OL]. [2016-06-27]. <http://www.iea-shc.org/shc-members>.
- [9] Collaborating Organizations[EB/OL]. [2016-06-27]. <http://www.iea-shc.org/>.
- [10] AMADO M, POGGI F. Solar energy integration in urban planning: GUUD model[J]. Energy Procedia, 2014, 50(50): 277-284.
- [11] KANTERS J, WALL M. A planning process map for solar buildings in urban environments[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 173-185.
- [12] IEA-PVPS T7.4. Potential for Building Integrated Photovoltaics[EB/OL]. [2016-06-27]. www.iea-pvps.org.
- [13] AMADO M, POGGI F. Solar urban planning: a parametric approach[J]. Energy Procedia, 2014, 48: 1539-1548.
- [14] PROBST M C M, ROECKER C. Solar energy promotion & urban context protection: LESO-SV (quality-site-visibility) method[C]. 31th PLEA Conference, 2015.
- [15] KANTERS J, WALL M, KJELLSSON E. The solar map as a knowledge base for solar energy use[J]. Energy Procedia, 2014, 48: 1597-1606.
- [16] LUKAČ N, ŽLAUS D, SEME S, et al. Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data[J]. Applied Energy, 2013, 102: 803-812.
- [17] 瑞典隆德城市在线太阳能地图 [EB/OL]. [2016-06-27]. www.solkartan.se.
- [18] 奥地利维也纳城市在线太阳能地图 [EB/OL]. [2016-05-27]. www.wien.gv.at/umweltgut/public/grafik.aspx?ThemePage=9.
- [19] IEA-SHC Task51. SHC-Task51 Subtasks[EB/OL]. [2016-06-27]. <http://task51.iea-shc.org/subtasks>.
- [20] LUC. DLPG Advice Note No.2: Guidance on the Siting, Design and Assessment of Wind and Solar PV Developments in Devon's Landscape 2013 [EB/OL]. [2016-05-27]. <https://new.devon.gov.uk/planning/planning-policies/landscape/landscape-policy-and-guidance>.
- [21] IEA SHC TASK 51 News [EB/OL]. [2016-05-27]. <http://www.iea-shc.org/article?NewsID=124>.
- [22] IEA-SHC-2014 Annual Report: 133-136[EB/OL]. [2016-05-27]. www.iea-shc.org.

(本文编辑: 秦潇雨)

参考文献

- [1] MARSZAL A J, HEISELBERG P, BOURRELLE J S, et al. Zero energy building—a review of definitions and calculation methodologies[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(4): 971-979.