

基于碳夹点分析理论的综合能源系统减碳能力研究

李 振¹ 周喜超¹ 王 楠¹ 赵鹏翔¹ 杨 铭^{2*}

1. 国网综合能源服务集团有限公司 北京 100052

2. 中国科学院电工研究所 北京 100190

摘要: 充分合理利用当地可再生资源是未来实现地区碳中和的必然途径。本文以鲁能山海天大型低碳社区建设项目为背景,以源荷协同为理念和碳夹点分析方法,研究该大型社区的可再生能源规划容量,并以此为依据获得碳减排潜力。根据计算结果显示,如果该开发区内常住人口数量能够长期保持在规划人口数量上,则应优先考虑太阳能生活热水系统的应用,在此基础上应用太阳能光伏系统,碳减排量达到30.9万tCO₂/a,相对于传统火电+燃气供能方式,年碳排放量降低约25%。如果该开发区内常住人口低于规划人口数量,如人口数量季节性变化明显,则应主要依靠太阳能光伏系统满足园区内建筑用能要求,在此种模式下,该社区最大碳减排为10%,相对于传统火电+燃气供能方式,年碳减排约12.1万tCO₂/a。本文得到的研究结果,已应用至该社区的低碳规划与建设中,并可作为真实案例,对同气候区内的其他低碳社区碳减排以及碳中和目标的制定起到参考作用。

关键词: 碳夹点; 低碳; 碳减排; 综合能源

引言:

能源低碳化发展是能源结构转型,进而促进碳中和的必然之路。众多专家和学者对某区域内的低碳型综合能源规划、运营与调度等方面进行了很多深入且系统化的研究。例如, Lee 等人^[1]提出了区域能源集成的概念(Locally Integrated Energy Sector (LIES)),并指出基于综合能源使用价格,以及焓损失指标,综合考虑热力与电力系统之间的能量调配,并充分利用当地可利用的余热资源。在充分利用余热发电、余热供热等前提下,系统综合效率提高的同时,可以有效降低总运行成本。王珺等人^[2]基于冷热电联供系统(CCHP)和热网模型,构建了区域综合能源规划模型,建立了多区域CCHP系统容量协同优化配置的混合整数线性规划模型,并以天津市某综合区域为例,优化冷热电运行参数,实现运行费用最低。在可再生能源资源配置研究中,碳夹点分析可谓是一种行之有效的理论方法,它被越来越多地应用到综合能源优化配置研究中^[2]。

本文以鲁能山海天大型低碳社区建设项目为背景,基于碳夹点分析方法,开展社区碳减排潜力分析与研究,提出符合该社区特点的二氧化碳减排目标以及清洁能源装机容量指标,为该社区未来制定可再生能源应用实施方案奠定基础,也为该气候区类似社区碳减排及碳中和目标的制定提供参考依据。

1. 低碳社区概况

1.1 社区简介

鲁能山海天位于海南省文昌市,该大型社区规划占地3537.81公顷,规划建筑总面积1459.6万m²。至2025年,规划常住人口19.01万人。总用地面积3537.81公顷,规划建筑面积1459.60万m²,居住、公共服务以及商业服务建筑面积较大,其中居住建筑占全规划区内建筑面积的52.3%,占比最高;其次为商业服务建筑,占全区规划区内建筑总

面积的37.6%，公共管理建筑面积占7.2%。

1.2 气候资源条件概况

该社区地处亚热带地区。根据当地典型年逐时气象数据统计分析，年平均气温约为23.7℃，每年约有5786小时（7.8个月）气温维持在20-30℃，其中有3148小时（约4.2个月）气温维持25-30℃，2638小时（约3.6个月）气温维持在20-25℃。从各月平均气温分布来看，每年10-12月，1-4月的平均气温介于15-25℃。

此外，当地气候湿润，年平均相对湿度为85%，由于受海洋调节，水气丰富，各月平均相对湿度变化不大，其变幅为82-87%。最小相对湿度为20.1%。

在太阳能资源方面，从水平面总辐照度、直射辐照度和散射辐照度推算，当地年累积散射辐照量高于水平面直射辐照量。水平面太阳能全年总辐照量1386.2kWh/m²。此外，从全年水平面太阳能总辐照度分布来看，超过300W/m²的辐照时数为697小时，占总辐照时数的21.5%（总辐照时数3245小时）。

2. 能阱侧分析

能阱主要指的是当地建筑年累计能耗量。

在建筑终端能耗统计中，居住建筑和公共建筑使用功能差异明显，分项能耗指标差异较大，因此在终端能耗统计中，分别计算居住建筑和公共建筑的累计能耗。根据《中国建筑节能年度发展报告》相关数据^[3,4]，对于亚热带气候区的建筑来说，空调制冷能耗是建筑能耗的主要组成部分。根据不同功能类型，利用DeST-h和DeST-c建立建筑能耗模型，进行逐时空调能耗模拟计算，进而得到全年累计终端空调能耗^[5]。

在其他建筑终端分项能耗统计中，根据常住人口数量、调研得到的典型行为模式、经验参数等进行测算。对于居住来说，除空调外的其余分项能耗包括：生活热水、炊事和家电。公共建筑除空调外分项能耗包括：热水、炊事、除空调外其他电耗（含办公设备、机械通风、电梯等多项能耗）。

从建筑分项能耗统计结果来看（见表1），空调制冷能耗最高，这是导致最终社区电耗量占比最大的重要原因。通过分项能耗，结合能源使用种类，可以获得最终的终端电需求量和热需求量。根据调研，空调制冷负荷一般由电力满足，运行平均EER为2.8。90%以上的家庭

使用电热水器，生活热水主要由电力满足，电热水器热效率一般可以达到0.95以上。在炊事方面，一般家庭均配备燃气灶和电磁炉，从使用频率上来说，燃气灶使用的频度和时间更长，因此炊事能耗归属于热力需求中，主要能源为燃气。

表 1 建筑终端分项年累计能耗统计表

类型	分项指标	单位	分项能耗数值	能源	数值
居住建筑	空调制冷	万kWh/a	44448.4	电力	15874.4
	生活热水	万kWh/a	6378.7	电力	6714.4
	炊事	万kWh/a	7424.1	热力	12373.5
	照明	万kWh/a	4278.3	电力	4278.3
	家电	万kWh/a	2260.1	电力	2260.1
公共建筑	空调制冷	万kWh/a	70831.6	电力	25297
	除空调外电耗	万kWh/a	40882.7	电力	40882.7
	生活热水	万kWh/a	14039.7	电力	14039.7
合计	炊事	万kWh/a	30.4	热力	50.7
	终端电需求	万kWh/a			109346.6
	终端热需求	万kWh/a			12424.2

空调制冷负荷与气象条件密切相关。根据逐时空调负荷预测值来看，园区内全年逐时制冷负荷峰值出现在8月份，总制冷负荷最大值约为1600MW。其中，居住建筑最大制冷负荷约为694.4MW，公共建筑最大制冷负荷约为869.3MW，公共建筑最大制冷负荷明显大于居住类建筑。居住建筑面积虽然占比最高，但能耗水平低于公共建筑。

3. 能源侧分析

供能侧可考虑太阳能、风能、生物质能的应用。分别测算太阳能、风能、生物质的资源量，为下一步碳夹点分析提供边界条件。根据计算，当地可再生资源量估算统计如图1所示，可知：

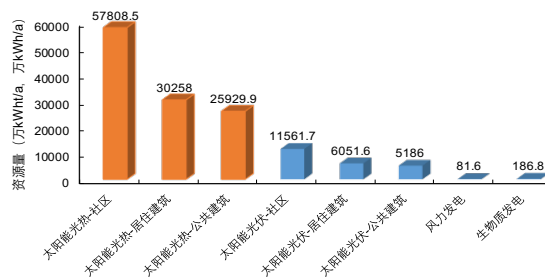


图 1 资源量评估统计图

(1) 太阳能资源量在可再生能源系统中总量占比最高，是当地可再生能源利用主要形式。

(2) 由于海南地区环境温度高，因此太阳能光热系统转化效率高，基本可以达到50%以上，因此从绝对数量

来看，太阳能光热资源量最大，可达到57808.5万kWh/a。

(3) 根据资源量测算，太阳能光伏系统最大可利用资源量达到11561.7万kWh/a，除去商业建筑（考虑光热系统的利用），资源量也可以达到6051.6万kWh/a。其他可再生能源发电（风电和生物质发电）总量为268.4万kWh/a，约为光伏发电量的2.3%，太阳能光伏发电仍是社区内绿色电力的最主要组成部分。

4. 基于碳夹点的社区碳减排潜力分析

4.1 能阱侧碳排放分析

依照终端年累计能耗，推算得到年累计电力以及燃气消耗量，如表2所示。根据数据分析，社区年电力消耗总量为109346.6万kWh/a，年燃气消耗量为12424.2万kWh/a。认为当地电力全部来自于火电，火电的碳排系数为1.109 kgCO₂/kWh，因此社区内电力碳排量为121.3万tCO₂/a。燃气主要用来炊事，燃气灶的热效率约为0.6，则炊事产生的碳排量为4.2万tCO₂/a。社区总碳排量125.5万tCO₂/a，其中主要为电力系统碳排放。热力系统碳排放明显低于电力系统，其年碳排放量约为总碳排放量的3.4%。根据我国居民炊事习惯，燃气是主要的能量来源，虽有部分电力补充，但是多数居民更加青睐使用燃气。当地生物质燃气量不足以支撑全社区规模化使用，因此在后面的可再生能源减排能力分析中，暂时不考虑炊事减排能力。充分利用当地光伏及光热资源，降低用电和生活热水的化石能源消耗，是社区降低碳排放的重要途径。

基于分项能耗测算结果，社区生活热水终端能耗量为20754.1万kWh/a，目前基本采用电力作为主要能源形式，其碳排放量为23.0万tCO₂/a。除生活热水外，其余使用电力的能源消耗量为88592.5万kWh/a，碳排放量为98.2万tCO₂/a。

表 2 社区内碳排放量分项统计表

建筑类型	分项指标	能源	碳排量 (万tCO ₂ /a)
居住建筑	空调制冷	电力	17.6
	生活热水	电力	7.4
	炊事	燃气	4.2
	照明	电力	4.7
	家电	电力	2.5
公共建筑	空调制冷	电力	28.1
	除空调外电耗	电力	45.3
	生活热水	电力	15.6
合计	炊事	燃气	0
	电力碳排		121.3
	热力碳排		4.2

4.2 社区内减排潜力分析

根据上述能源侧资源量评估分析可知，当地可利用可再生能源资源最大的为光伏和光热资源。首先，从经济性上来看，太阳能光伏系统投资约为700元/m²（采光面积），根据当地资源情况，光伏系统年发电量约为70kWh/(m²·a)，当地电价0.6元/kWh（调研数据），静态投资回收期约为16年。太阳能光热系统投资约为1000元/m²（采光面积），太阳能生活热水产热量约为550kWh/(m²·a)，相对于当地电力来说，静态投资回收期约为3年。因此，太阳能光热系统（提供生活热水）的经济性明显好于太阳能光伏系统。在能够使用太阳能光热的情景下应尽可能使用太阳能生活热水系统。

社区碳减排潜力分析主要考虑以下两种情景：1) 社区内常住人口数量能够长期保持在19.01万人，优先考虑太阳能光热利用，其次考虑太阳能光伏利用；2) 社区常住人口难以长期保持在19.01万人，不考虑太阳能光热利用，仅考虑太阳能光伏利用。

情景一：社区内常住人口数量能够长期保持在19.01万人，优先考虑太阳能光热利用，其次考虑太阳能光伏利用。

如图2所示，随着碳减排量的逐渐递增，能源曲线与x轴的交点逐步向右移动，这说明随着碳减排量的增加，所需的可再生资源也越多。当达到减排量100%时，所需要的太阳能光热资源量为2.1GWht/a，仍该资源小于社区内的太阳能最大资源量，由此说明社区内的太阳能光热资源能够满足所有生活热水需求，实现社区内的太阳能生活热水零碳排。若实现生活热水零碳排后，相当于年减碳排量23.0万tCO₂/a。

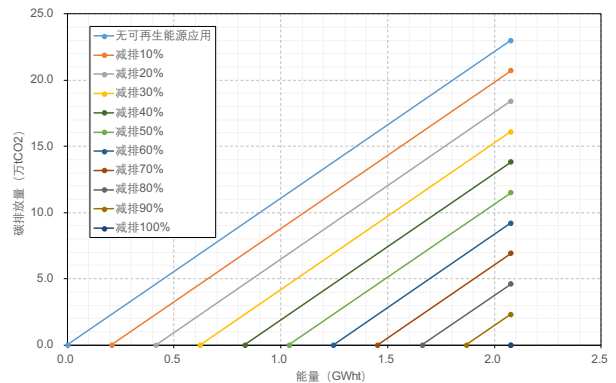


图 2 社区内生活热水能源曲线

当实现100%碳减排时，所需太阳能集热器采光面积约

为30万m²。根据建设总面积估算，屋顶有效利用面积为163万m²，则太阳能光伏可安装面积为103万m²，相应地，光伏资源量约为7144.9万kWh/a。当碳减排达到8%时，所需要的光伏资源量为7087.2万kWh/a，接近光伏最大可利用资源量，当达到减排量达到9%时，所需要的光伏资源量为7973.1万kWh/a，超过最大可利用资源量。由此可以判断，社区内光伏最大减排量约为8%，相当于年碳减排量为7.9万tCO₂/a，所需光伏资源量为7087.2万kWh/a（如图3所示）。

在此种情景下，光伏和光热总减排量为30.9万tCO₂/a，碳排放量降低约25%。

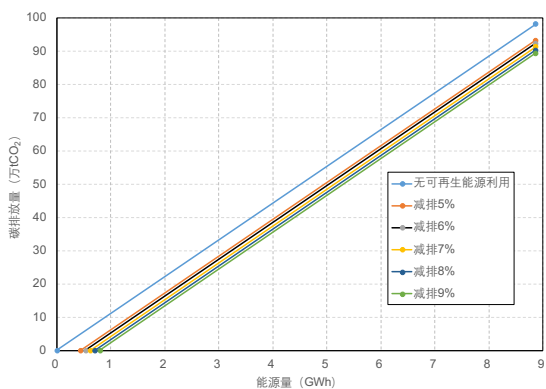


图3 社区内电力能源曲线

情景二：社区常住人口难以长期保持在19.01万人，不考虑太阳能光热利用，仅考虑太阳能光伏利用。

如图4所示，当碳减排量设定为10%时，所需太阳能光伏资源量为10935.0万kWh/a，接近于项目内最大太阳能光伏资源量。当碳减排量达到11%时，所需要的太阳能光伏资源量为12028.5万kWh/a，超过项目内最大太阳能光伏资源量。因此，在此种情景下，项目区内的最大碳减排量约为10%，即每年减少碳排12.1万tCO₂/a。

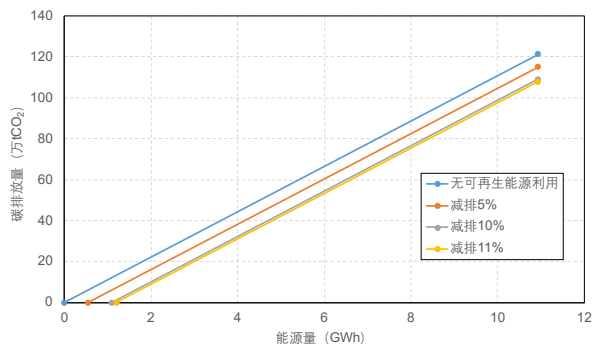


图4 社区内电力能源曲线

从两种情景分析来看，情景一的碳减排潜力更大，主要原因在于，太阳能光热在亚热带地区具有较高的集热效率，其集热效率明显高于光伏发电效率。但是，由于太阳能光热系统一般以分户、楼宇等分布式应用方式为主，为了保障系统的长期稳定性，光热系统应用应考虑如下原则：

- 1) 生活热水供热温度一般为40~50℃，建议使用平板、全玻璃真空管等非聚光型太阳能集热器。从安全性及建筑一体化设计考虑，建议使用平板集热器；
- 2) 对于全年使用时数较高且同时使用系数较高的酒店、医疗、宿舍等公共建筑，建议使用楼宇集中型热水供应系统，对于同时使用系数较低的居住建筑，建议采用分户式系统；
- 3) 对于一年中有相当长时间不使用生活热水的建筑而言，太阳能生活热水系统使用时数过低，会严重影响经济性，且长期闷晒，易导致集热器性能老化，此种情况下，不建议使用太阳能生活热水系统。

结束语

本文基于碳夹点分析方法对鲁能山海天低碳社区内最大可再生能源碳减排潜力进行了分析与研究。本文研究成果已应用至该社区的低碳规划与建设中，并可作为真实案例，对同气候区内的其他低碳社区可再生能源规划起到参考作用。

本文碳减排潜力分析基于两种典型情景：

- (1) 社区内常住人口数量能够长期保持在19.01万人。鉴于太阳能生活热水系统良好的经济性，优先考虑太阳能光热利用，其次考虑太阳能光伏利用。在这种情景下，社区内的太阳能光热资源能够满足所有生活热水需求，实现社区内的太阳能生活热水零碳排，所需要太阳能光热资源量20750万kWh/a，碳减排23.0万tCO₂/a。社区内光伏最大减排量约为8%，相当于减排7.9万tCO₂/a，所

需光伏资源量为7087.2万kWh/a。社区总碳减排量30.9万tCO₂/a，碳排放量降低约25%。

(2) 社区常住人口难以长期保持在19.01万人，不考虑太阳能光热利用，仅考虑太阳能光伏利用。在这种情景下，电力系统最大碳减排量为10%，即每年减排12.1万tCO₂/a，所需光伏资源量为10935.0万kWh/a。

由此可以看出，情景一的碳减排潜力更大一些。因此，从减排的角度出发，在当地尽可能优先考虑使用太阳能生活热水系统。但是，光热系统一般为分布式系统，对于一年中有相当长时间不使用生活热水的建筑而言，系统使用时数过低，会严重影响经济性，且长期闷晒，易导致集热器性能老化，此种情况下，不建议使用太阳能生活热水系统。

参考文献

- [1] R.Y.Lee, P.Y. Liew, and etc. Total Site Heat and Power Integration for Locally Integrated Energy Sectors[J]. Energy 2020 (204): 117959.
- [2] 王珺, 顾伟, 陆帅等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划 [J]. 电力系统自动化, 2016, 25: 17-24.
- [3] 中国建筑节能年度发展报告. 中国建筑工业出版社, 2017.
2017 Annual Report on China Building Energy Efficiency. China Architecture & Building Press, 2017.
- [4] 中国建筑节能年度发展报告. 中国建筑工业出版社, 2018.
2018 Annual Report on China Building Energy Efficiency. China Architecture & Building Press, 2018.
- [5] 建筑环境设计模拟分析软件DeST 第2讲 建筑动态热过程模型 [J]. 暖通空调, 2004 (08): 35-47.

基金项目:

本项目由国网科技项目“基于多能耦合的综合能源系统仿真平台开发(一期)”资助(项目编号5278991900MU)。