

多约束条件下城市能源规划前期研究方法及案例分析

霍沫霖^{1*}, 陈爱康², 刘智超³, 郭磊²

(1. 三峡集团战略与发展研究中心, 北京市 海淀区 100038;

2. 国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司, 江苏省 苏州市 215163;

3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Methods and Case Study for Preliminary Research of Urban Energy Planning Under Multiple Constraints

HUO Molin^{1*}, CHEN Aikang², LIU Zhichao³, GUO Lei²

(1. China Three Gorges Group Strategy and Development Research Center, Haidian District, Beijing 100038, China;

2. State Grid (Suzhou) City & Energy Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215163, Jiangsu Province, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

Abstract: Urban energy planning is a design document that guides the transition of urban energy supply and consumption. Based on the actual situation in China, this paper proposes a set of reproducible and popularized steps and methods for the preliminary research of urban energy planning, which provides practical guidance and reference for urban energy planning. This paper analyzes four aspects of the preliminary research of the planning, and innovatively proposes the “6-step” procedure for scenario analysis of the energy supply and demand. Then the “3Y” method, based on the constraint analysis, trend prediction, and expert judgment analysis, is proposed for comprehensive potential analysis. Finally, based on the energy status, the situation, and the challenge of S City, the proposed steps and methods are used to analyze the energy supply and demand situation of S City. Then put forward the development suggestions such as energy reform and development goals, key tasks, and safeguard measures.

Keywords: urban energy planning; energy demand forecast; scenario analysis

摘要: 城市能源规划是引导城市能源供给侧和消费侧转型的顶层设计文件。结合城市能源规划研究和编制的实际复杂情况, 自主设计了一套可复制、可推广的城市能源规划前期研究方法体系, 为城市能源规划工作提供实用指导与参考。

基金项目: 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金(U1766212)。

The Smart Grid Joint Fund Integration Program of National Natural Science Foundation of China and State Grid Corporation of China (U1766212).

梳理了规划前期研究的4个阶段, 提出能源供需形势情景量化分析的“6步骤”, 提出基于约束条件分析、趋势预测分析和专家研判分析的转型潜力“3Y”分析法。最后基于S市的能源发展历史成效与未来形势, 使用提出的方法学量化研判S市的能源供需形势, 基于情景比较结果提出能源变革发展目标、重点任务和保障措施等建议。

关键词: 城市能源规划; 能源需求预测; 情景分析

0 引言

城市能源发展五年规划(下文简称“城市能源规划”)是落实国家级和省级政策要求, 统筹推动城市能源发展的规划文件。城市能源规划是为了更好地适应城市经济、社会发展和生态环境保护要求, 在城市发展总体目标指导下的城市重点专项规划, 是指导城市未来五年能源发展的总体蓝图和行动纲领^[1], 是规划建设有关重大能源设施的基本依据。城市能源规划系统谋划城市能源发展目标、发展方向和重点举措, 指导各类专项规划以及区(市)县能源发展规划编制, 可推动节能、减煤、能耗“双控”、碳中和等目标实现^[2]。随着城市能源治理的综合性、系统性、复杂性全面提升, 能源规划的重要性和迫切性进一步增强。

有文献从城市能源规划的角度进行了总体框架设计^[3-8], 如文献[3]提出城市规划与能源规划结合的必要性, 文献[8]从建设条件、整体规划、综合服务平

台、政策机制等方面对城市智慧能源系统顶层设计进行了探讨, 但缺乏清晰的规划体系做指导, 系统性不强。有文献从建模的角度对能源规划模型进行了改进与创新^[9-15], 如文献[9]针对易受台风等极端天气影响的沿海城市能源规划, 提出了融合常规场景与极端天气场景的城市能源规划模型。也有学者以案例分析的形式展开研究^[16-20], 如文献[18]提出了一种城市综合能源规划和方案评估方法, 量化了城市能源规划战略在节能减排和提高可再生能源发电方面的影响, 但是都未提及模型求解过程中如何考虑不同情景下约束的影响作用。总体来看, 中国地、县级别的城市能源规划研究对复杂的约束条件考虑不够充分, 缺乏实用性高的研究方法。

城市能源规划文本形成过程中, 在前期研究阶段, 重点是研判未来能源供需形势和重点任务; 在规划编制阶段, 深入研究论证重大项目、重点任务, 形成规划初稿; 在衔接审议阶段, 与国家、省级能源及专项规划进行衔接, 形成规划送审稿, 并征求区县、部门、专家和社会意见。其中围绕城市能源规划前期研究, 系统考虑复杂的现实约束条件、历史趋势以及专家经验, 本文提出能源供需形势情景量化分析的“6步骤”, 以及转型潜力综合分析的“3Y”分析法, 提供可复制推广的实用指导与参考。

1 城市能源规划前期研究方法体系

1.1 规划前期研究流程

城市能源规划前期研究包括4个阶段, 如图1所示。一是梳理城市过去5 a的能源发展情况, 包括能源消费、供应、产业、节能减排等, 总结城市能源发展的历史趋势, 分析存在的问题。二是研究城市能源变革面临的新形势, 评价政治、经济、社会、技术等4类外部影响因素对城市能源发展的影响, 分析所带来的机遇与挑战。三是基于上述研究和LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) 模型, 对未来5 a以及中长期10~15 a的能源供需形势进行情景量化分析。LEAP模型可用于城市能源系统的中长期规划, 包括能源需求分析模块、能源转化模块、资源模块和非能源模块^[21]。城市能源规划研究主要使用了能源需求分析模块和能源转化模块^[22]。四是基于情景分析比较结果, 选择最合适的规划政策建议, 包括城市能源转型总体思路、发展目标、重点任务和保障措施等。

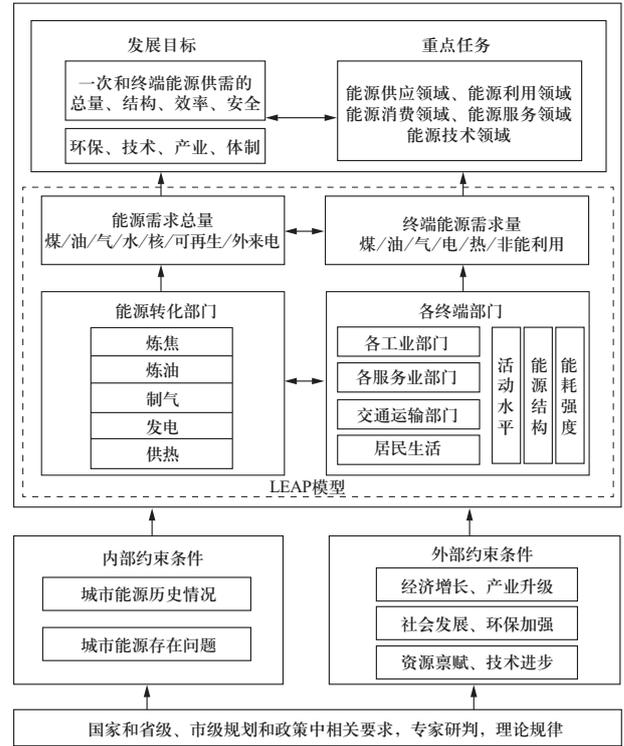


Fig. 1 The analytical framework of preliminary research on urban energy planning

1.2 能源供需情景分析“6步骤”

对能源供需形势量化研判, 需要充分考虑国家级、省级、城市级政府的相关要求, 以及本地的资源禀赋、经济社会发展、环境保护等方面条件, 因此本文设计了能源供需情景分析“6步骤”, 如图2所示。

步骤一是设定情景。基于对过去与当前状况分析, 构建不同的情景方案^[23]。定量评估不同决策情景下未来能源供需形势, 并针对不同的新政策情景结果, 从经济、社会、环境等角度进行综合评估, 从而帮助决策者选择出相对更优的决策。常见情景有基准情景、常规转型情景、节能减排政策强化情景、电气化政策强化情景、可再生能源政策强化情景等。

步骤二是综合分析宏观参数的变化潜力区间。通过约束条件分析、趋势预测分析、专家研判分析等, 综合分析界定经济社会、能源消费、能源供给等关键宏观参数未来5 a或10 a的变化潜力区间。

步骤三是综合分析各个部门领域参数的变化潜力区间。综合分析界定工业、交通运输、居民生活和服务业等终端部门和能源转化部门的活动水平、能耗强度、终端能源消费结构等关键参数变化潜力区间。

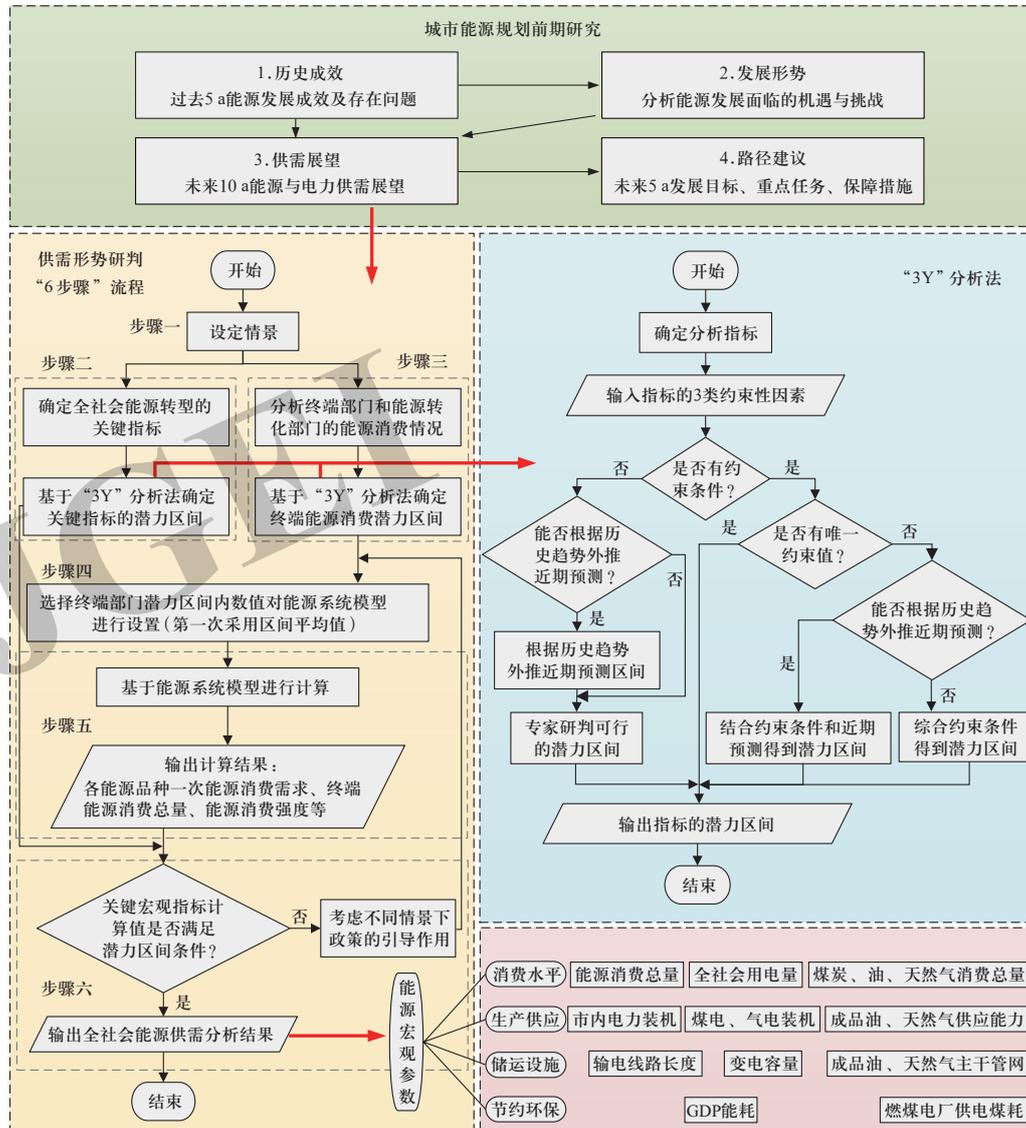


图2 城市能源规划前期研究方法体系

Fig. 2 Methodology of preliminary research on urban energy planning

步骤四是将终端数据输入到能源系统模型。在终端部门和能源转化部门参数变化潜力区间内选择数值输入到能源系统模型中。初始输入通常是变化潜力区间的平均值。

步骤五是基于LEAP能源系统模型进行自底向上运算得到宏观参数数值。

步骤六是对宏观参数进行比对分析。将步骤五的运算结果与步骤二综合分析的宏观参数未来潜力区间进行比较，若运算结果位于未来潜力区间内，则分析结束，反之则返回到步骤四，考虑不同情景下政策的引导作用，在未来潜力区间内调整终端部门的能耗强度、能源消费结构、活动水平等参数取值。依次重复

步骤五和步骤六，直至运算结果位于未来潜力区间内。最后对不同情景进行比选。

1.3 发展潜力综合分析方法

步骤二和步骤三中进行的未来发展潜力综合分析详细流程如图2所示，分析约束条件，进行趋势外推预测和专家研判。取约束、预测、研判的拼音首字母Y，简称为“3Y”分析法。

1.3.1 约束条件分析方法

各项参数的约束条件主要有以下3类。

第一类是国家和省级规划和政策中相关要求。常见的约束性指标包括能源消费强度、能源消费总量、

煤炭消费、环境污染物排放等。各省特色指标包括非化石能源比重、碳排放强度、煤炭消费、油品和天然气消费、终端部门能效水平、新能源发展等。

第二类是市级规划和政策中相关要求。城市的国民经济和社会发展规划纲要、城市总体规划、土地利用总体规划、能源政策、全产业链重大项目建设投产和运行达产情况等是编制能源规划的基础。

第三类是本地资源禀赋条件。分布式光伏可开发潜力主要受到太阳辐射强度、城镇和农村住宅屋顶面积、工矿用地屋顶面积、滩涂水库坑塘和农业大棚面积等约束^[24-25]。

1.3.2 趋势预测方法

由于经济发展、技术发展、基础设施投资具有一定的历史惯性,因此可以基于历史年度数据趋势,预测未来2~3 a发展情况^[26]。趋势预测方法比较多,常用的方法有相关指标法、时间序列法和回归分析法^[27],需结合数据可获取性、数据质量等情况选择最合适的方法,或者采用综合预测值^[28]。其中相关指标法依靠一些宏观变量之间的相互关系对未来能源电力需求做方向性研判,如产业产值能耗法^[29]、电力弹性系数法^[30]、人均电量指标法^[31]等。时间序列法将历史时间序列数据进行趋势外推预测,简单易行,适用于短期预测。回归分析法基于历史数据识别各影响因素的影响强度,研判能源需求,适合中短期预测。

1.3.3 专家研判可行潜力方法

行业专家结合知识经验和行业信息综合研判潜在政策支持下的经济可行潜力。对于终端部门能效提升潜力,可考虑技术进步、政策法规出台、产品结构变化、产品能耗变化等的影响。

对于终端部门能源消费结构优化潜力,可考虑环保与能源政策出台、细分领域的终端能源消费结构、关键用能设备应用的影响。对于分布式可再生能源发展潜力,可考虑开发成本变化、补贴水平变化、市场机制建设等的影响。

2 S市“十四五”及中长期能源预测案例

2.1 历史成效

S市作为中国典型的工业强市,能源是推动其经济社会发展的重要基础和主要动力。“十三五”期间,S市能源消费呈现出消费总量高、结构偏煤、消费集中、严重依赖外部能源供给、基础设施规模大等特征。“十三五”期间,S市能源设施更加完善,煤炭、

成品油、天然气、电力保障水平明显提升;清洁能源消费占比逐步提升,能源结构不断优化,电力在终端能源消费占比达到30.8%;节能降耗成效显著,能效水平保持领先,规上工业企业单位增加值综合能耗2020年较2015年累计下降20.4%,单位GDP能耗2020年较2015年累计下降超过18%。

2.2 发展形势

S市步入经济高质量发展的新阶段,现代产业体系构建促进产业高端化、低碳化调整,促进能源供需变化,倒逼能源转型进程加快,S市能源结构步入加速调整期,能源系统步入韧性铸造期,能源效率步入攻坚突破期,基础设施步入补强升级期。在构建与新发理念、新发展阶段、新发展格局相适应的现代能源体系的过程中,S市面临诸多问题和挑战。在能源结构方面,S市形成了以煤为主、多元发展的能源结构,清洁能源比重偏低、碳排放强度偏高的问题较为突出;在能源系统韧性方面,S市能源资源贫乏,能源供应保障和清洁化提升将主要依赖外部电力受人,显著增加了能源安全稳定供应的压力;在能源效率方面,发电、钢铁、化工、造纸等主要耗能行业的节能减排空间已普遍收窄,能源效率提升需要统筹技术创新和产业结构调整;在基础设施方面,电力、天然气消费的快速增长要求加快解决供应网络局部薄弱的问题。

2.3 能源供需展望

结合“十三五”期间S市经济社会发展的现实需求,本文基于LEAP构建S市能源分析模型,考虑参考情景、常规转型情景和加速转型情景3种情景,对S市“十四五”及中长期(至2035年)能源需求进行预测。

2.3.1 情景设定

参考情景:基准年之后无新政策出台;相关技术推广率不变且无重大突破;当前产业布局调整趋势保持延续。

常规转型情景:在新政策支持下实现相关规划目标,电气化水平加速上升,天然气消费快速增长,煤炭、石油消费减量,清洁能源占比日益提升;产业结构转型升级,用能技术不断进步,终端能效持续提高。

加速转型情景:在常规转型情景的基础上,产业结构调整、煤炭减量替代、电能替代、节能减排技术推广等能源转型措施均进一步加强,加快推动能源绿色低碳发展。

2.3.2 宏观参数变化潜力区间综合分析

基于“3Y”分析法,结合上级政府提出的考核指标、历史数据趋势分析以及专家研判等,对S市经济、社会、能源等宏观参数的变化潜力区间进行综合分析,结果如表1所示。

表1 宏观参数综合分析

Table 1 Comprehensive analysis of macro parameters

关键参数	综合分析结果	综合分析依据
GDP年均增速	“十四五”期间: 5.7% 2025—2035年: 5.2%	要实现2035年人均国内生产总值达到中等发达国家水平,静态来看GDP增速每年至少4.7%;《S市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中提出,“十四五”期间S市GDP年均增速预期目标为6%,到2035年全市人均地区生产总值在2020年基础上实现翻一番
经济结构	2025、2035年二产占比分别为43%、37%	根据历史趋势,S市经济结构发展方向依旧保持“优二进三”的趋势,将达到目前德国、日本的水平
人口总量	2025年和2035年分别达到1400万和1600万人口	参考《C地区城市群发展规划》、《S市城市总体规划》;根据历史趋势,S市生育率降低、老龄化问题突出,人口红利减弱,流动人口趋于稳定,机械增长人口逐年减少
城镇化率	2025年和2035年分别达到78%和87%	S市城镇化率变化趋势对比;《S市国土空间总体规划》及落户政策调整指导意见
非化石能源占能源消费总量比重	2025年至少达12%	上级政府指标分解
区外受入电力供应能力	2025年至少达2500万kW	参考《国家电网有限公司2020社会责任报告》中特高压工程相关数据
煤电装机	明确退役至少42.3万kW	参考S市发改委调研结果
可再生能源装机	2025年提升至400万kW~600万kW	根据建筑面积测算分布式光伏资源禀赋潜力;参考S市发改委调研结果;参考《S市电力设施规划》《J省“十四五”可再生能源发展专项规划》

2.3.3 分部门关键参数变化潜力区间

基于“3Y”分析法,对工业、交通运输、居民生活和服务业等终端部门和能源转化部门的活动水平、能耗强度、能源消费结构等关键参数变化潜力区间进行综合分析,结果如表2所示。

表2 分部门关键参数综合分析

Table 2 Comprehensive analysis of sectors key parameters

关键参数	综合分析结果
工业	
新兴产业产值占比	2025年较2020年上升4%~6%, 2035年较2025年上升6%~14%
单位产值能耗	2025年较2020年下降8%~13%, 2035年较2025年下降15%~20%
交通	
私人汽车保有量	2025年较2020年上升26%~30%, 2035年较2025年上升23%~27%
单位里程油耗	2025年较2020年下降7%~19%, 2035年较2025年下降7%~20%
居民生活	
人均住宅面积	2025年较2020年上升3%~5%, 2035年较2025年上升4%~8%
单位面积能耗	2025年较2020年下降0.2%~0.5%, 2035年较2025年下降4%~9%
服务业	
第三产业就业人口 人均公建面积	2025年较2020年上升3%~5%, 2035年较2025年上升2%~3%
单位面积能耗	2025年较2020年下降1%~3%, 2035年较2025年下降2%~3%
能源转换环节	
煤电机组供电煤耗	2025年较2020年下降8%~13%, 2035年较2025年下降10%~15%
可再生能源 发电量占比	2025年较2020年上升3%~5%, 2035年较2025年上升17%~23%

2.3.4 能源供需形势情景分析结果

参考“6步骤”中的步骤四、五、六,基于所构建的S市模型,依据表1和表2中参数综合分析,对能源供需反复迭代优化,并对3种情景下S市能源需求总量、结构、强度、分部门等维度进行展望。

在用能结构优化、先进节能技术推广、能源服务效率提升等措施的推动下,S市终端能源需求总量增速减缓。常规转型情景下,2020—2025年终端能源需求总量平均增速为1.1%左右;加速转型情景下,终端能源需求总量在2020—2025年步入增长平台期,增速为0.3%左右,此后以-0.6%左右的平均增速进入负增长。分部门来看,随着工业增加值增速的减缓,以及工业产业结构和用能技术的优化升级,S市的工业部门的终端能源需求占比稳步下降,交通运输、居民生活和服务业用能占比持续上升。

随着清洁电力大规模发展、用电技术不断进步和电力市场逐步完善,如图3所示,S市终端能源需求持续增长,其中电力在终端用能环节竞争力明显增强。

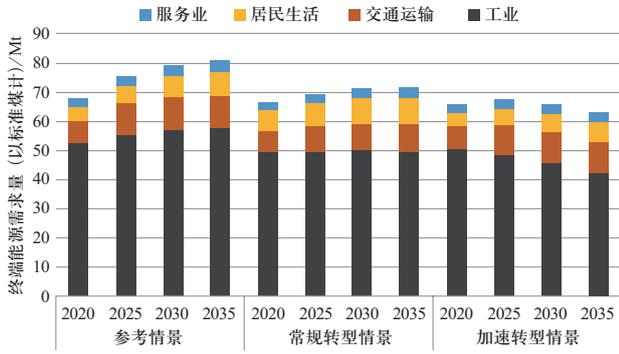


图3 分部门终端能源需求量展望

Fig. 3 The final energy consumption expected of each sector

在参考情景下，电力需求的高速增长主要受能源需求偏高影响，而不是电能替代程度的加深。常规转型情景下，电力需求2025年达到1790亿kWh，2035年达到2040亿kWh左右。加速转型情景下，电力需求2035年达到2260亿kWh左右。

S市能源需求总量增速显著放缓。常规转型情景下，能源消费总量延续近10 a来的趋势保持低速增长，并在2030年左右达到峰值，2020—2030年年均增速约为0.4%。加速转型情景下，在产业结构优化、先进节能技术推广等措施更为强力的推动下，2025年S市能源需求总量在达到峰值后保持-0.9%左右的年均增速缓慢下降。

S市能源需求结构持续清洁低碳化，非化石能源占比稳步增长。如图4所示，煤电为主的电源结构的改变、传统高煤耗产业的转移、工业的去煤化和电气化改造等都促使S市煤炭需求总量稳步下降，煤炭占能源需求总量的比重持续下降，加速转型情景下2025年降至53%，2035年进一步降至41%左右。公共交通和新能源交通的快速发展及燃油经济性的不断提升，加速转型情景下2035年油品占能源需求总量比重降至10%左右。天然气需求量及其占能源需求总量的比重上升明显，加速转型情景下2035年增加至25%左右。

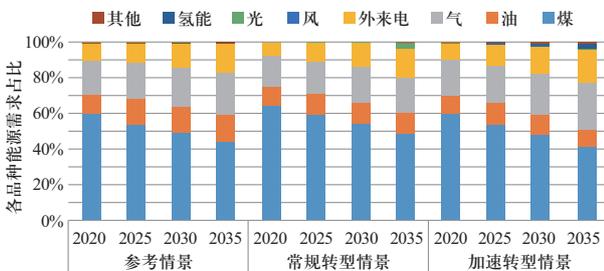


图4 能源需求结构展望

Fig. 4 The energy demand mix expected

S市单位GDP能耗持续稳步下降，呈现经济增长与能源消费脱钩的趋势。如图5所示，常规转型情景下，单位GDP能耗2025年较2020年下降23%左右，2035年较2025年下降40%左右。加速转型情景下，2025年后单位GDP能耗下降速度加快，2035年较2025年下降45%左右。

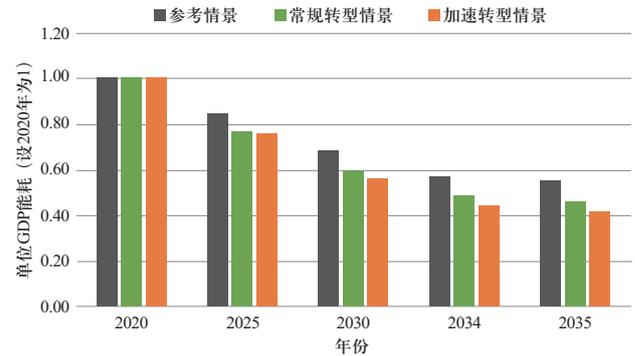


图5 能源强度展望

Fig. 5 The energy intensity expected

综合比较展望结果，可以发现，参考情景下，城市能源发展按部就班，能源供需难以满足增量、强度等各类发展指标要求。常规转型情景和加速转型情景虽均能满足发展指标，但加速转型情景下各部门能效提升、能源结构调整也需付出更大努力。

2.4 S市能源规划发展路径建议

根据科学性、可监测、前沿性等原则，对3种情景下S市能源供需展望进行比对分析，最终从能源供应、能源结构、能源消费3个方面提出S市能源发展目标体系，如表3所示。

表3 分部门关键参数综合分析S市能源发展目标体系
Table 3 Comprehensive analysis on sector key parameters and energy development target system of S City

类别	指标	单位	2020年	2025年	指标属性
能源供应安全韧性	能源消费增量 (以标煤计)	万t		100	约束性
	电力装机容量	万kW	2338	2600	预期性
能源结构清洁低碳	天然气年供气能力	亿m ³	80	100	预期性
	非电行业煤炭消费总量	万t	2052	1920	约束性
	煤炭占能源消费总量比重	%	59.2	53	预期性
	非化石能源占能源消费总量比重	%	8.5	14	约束性

续表

类别	指标	单位	2020年	2025年	指标属性
能源结构清洁低碳	外来电力占全社会用电量比重	%	32.5	47	预期性
	可再生能源发电装机容量	万千瓦	192.5	530	预期性
能源消费绿色高效	单位GDP二氧化碳年均下降率	%		5.6	约束性
	单位GDP能耗年均下降率	%		5.3	约束性
	电能占终端能源消费比例	%	30.8	36	预期性

S市能源发展应以经济社会发展全面绿色转型为引领,坚持能源与城市深度融合,全面推进能源绿色低碳发展,构建现代城市能源体系,探索能源革命驱动城市全面高质量发展的创新道路。

可通过夯实能源供应保障基础,提升能源梯级利用、因地制宜、多能互补和互联互通能力^[32],提升能源应急响应能力,完善能源系统项目储备机制来构建安全韧性的能源供应体系。通过加强煤炭利用管控,推动可再生能源快速健康发展,加强天然气高效应用来打造清洁低碳的能源利用格局。通过深化开展降碳降耗,强化终端电能替代,鼓励能源互联网建设,培育绿色低碳产业集群来形成绿色高效的能源消费方式。通过提升能源服务水平,加强能源惠民利民,建设能源民生工程,促进能源基础设施共享利用来推动自立自强的能源技术创新。

3 结论与建议

城市能源规划涉及煤炭、石油、天然气、可再生能源、电力、热力等多种能源品种和能源系统多环节,既要全面统筹谋划能源供应安全、能源消费总量控制、煤炭消费总量控制等全局性问题,又要协同推进供给侧和消费侧的能源转型。要考虑全产业链的经济性、环保性以及自主创新性,推动对不同技术的系统集成,实现多种技术的优势互补和共同发展。当国际政治、极端天气、公共卫生等不确定因素对能源电力供需双侧产生较大影响时,需对关键因素进行情景分析,从而做好对策准备。

城市能源规划研究包括4个阶段,其中能源供需形势情景量化分析可采取“6步骤”流程,转型潜力综合分析可采取“3Y”分析法。城市能源规划研究

中,需加强与国家、省能源规划的衔接,与经济社会发展规划、产业发展规划、土地利用规划、生态环境保护协同,使能源转型既满足经济社会发展的需要,又满足空间格局优化和生态环境保护的要求。

参考文献

- [1] 杨富强, 陈怡心. “十四五”推动能源转型实现碳排放达峰[J]. 阅江学刊, 2021, 13(4): 73-85.
YANG Fuqiang, CHEN Yixin. “The 14th five-year plan” promotes energy transformation and achieves the peak of carbon emissions[J]. Yuejiang Academic Journal, 2021, 13(4): 73-85(in Chinese).
- [2] 龙惟定, 潘毅群, 张改景, 等. 碳中和城区的建筑综合能源规划[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(8): 25-36.
LONG Weiding, PAN Yiqun, ZHANG Gaijing, et al. The energy planning for buildings in carbon neutral district[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(8): 25-36(in Chinese).
- [3] DE PASCALI P, BAGAINI A. Energy transition and urban planning for local development. A critical review of the evolution of integrated spatial and energy planning[J]. Energies, 2018, 12(1): 35.
- [4] 罗曦, 郑伯红. 低碳城市规划体系中的能源规划思路[J]. 求索, 2016(12): 133-137.
- [5] 朱毅华. 广州市国土空间规划中能源规划思路研究[J]. 城市住宅, 2019, 26(7): 60-62.
ZHU Yihua. Study on energy planning thoughts in the planning of national land in Guangzhou[J]. City & House, 2019, 26(7): 60-62(in Chinese).
- [6] 陈娟, 黄元生, 鲁斌. 面向低碳城市发展目标的区域分布式能源系统规划[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 41-45.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Regional distributed energy system planning for low carbon city development[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(7): 41-45(in Chinese).
- [7] 霍沫霖, 郭磊, 陈光. “双碳”目标对城市能源发展规划提出新要求[J]. 中国电力企业管理, 2021(10): 55-57.
- [8] 王雪, 陈昕. 城市能源变革下的城市智慧能源系统顶层设计研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 85-91.
WANG Xue, CHEN Xin. Top-level design of urban intelligent energy systems under urban energy revolution[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 85-91(in Chinese).
- [9] 景锐, 韩晖, 林剑艺. 计及台风极端天气影响的城市能源规划[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 178-187.
JING Rui, HAN Hui, LIN Jianyi. Urban energy planning considering impacts of typhoon extreme weather[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 178-187(in Chinese).
- [10] 梁宇希. 不确定条件下的城市能源优化模型[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2010.
LIANG Yuxi. Optimization model of urban energy under

- uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010(in Chinese).
- [11] 姜柯柯, 张新松, 徐杨杨, 等. 基于协同进化的光伏电站与电动汽车充电站联合规划[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 62-68.
JIANG Keke, ZHANG Xinsong, XU Yangyang, et al. Joint planning of photovoltaic generation and electric vehicle charging station based on co-evolution[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 62-68(in Chinese).
- [12] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 67-80.
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 67-80(in Chinese).
- [13] 卢一涵, 余晓丹, 靳小龙, 等. 考虑用户用电灵活性的社区能源系统双层优化[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 133-141.
LU Yihan, YU Xiaodan, JIN Xiaolong, et al. Bi-level optimization framework of community energy system considering user flexibility[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 133-141(in Chinese).
- [14] 张嘉睿, 陈晚晴, 张雅青, 等. 考虑配网功率约束及可靠供暖的园区蓄热式电采暖双层优化配置方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 142-152.
ZHANG Jiarui, CHEN Wanqing, ZHANG Yaqing, et al. Bi-level optimal planning method for park regenerative electric heating considering capacity of distribution network and reliable heating[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 142-152(in Chinese).
- [15] YU H, SELVAKKUMARAN S, AHLGREN E O. Integrating the urban planning process into energy systems models for future urban heating system planning: a participatory approach[J]. Energy Reports, 2021, 7: 158-166.
- [16] ZANON B, VERONES S. Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools[J]. Land Use Policy, 2013, 32: 343-355.
- [17] YAMAMURA S, FAN L Y, SUZUKI Y. Assessment of urban energy performance through integration of BIM and GIS for smart city planning[J]. Procedia Engineering, 2017, 180: 1462-1472.
- [18] DE ALMEIDA COLLAÇO F M, SIMOES S G, DIAS L P, et al. The dawn of urban energy planning - Synergies between energy and urban planning for São Paulo (Brazil) megacity[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 458-479.
- [19] KEIRSTEAD J, JENNINGS M, SIVAKUMAR A. A review of urban energy system models: approaches, challenges and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3847-3866.
- [20] 王永真, 林伟, 李成宇, 等. 工业型城市能源转型的综合评价——以苏州市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 188-196.
WANG Yongzhen, LIN Wei, LI Chengyu, et al. Comprehensive evaluation of energy transition in industrial cities: a case study of Suzhou[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 188-196(in Chinese).
- [21] 谢珊, 贾跃龙, 白雪涛, 等. 城市能源系统规划设计及能耗分析工具综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 163-177.
XIE Shan, JIA Yuelong, BAI Xuetao, et al. A review of tools for urban energy systems planning and energy consumption analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 163-177(in Chinese).
- [22] YAZDANIE M, OREHOUNIG K. Advancing urban energy system planning and modeling approaches: gaps and solutions in perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110607.
- [23] 姜伟, 李萌. 情景分析法在能源规划研究中的应用[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 17-21.
LOU Wei, LI Meng. Application of scenario analysis in the research of energy economy[J]. Electric Power, 2012, 45(10): 17-21(in Chinese).
- [24] CHATZIPOULKA C, COMPAGNON R, NIKOLOPOULOU M. Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: using London as a case study[J]. Solar Energy, 2016, 138: 53-66.
- [25] 蔺阿琳, 陆明, 姜健坤. 能源景观视角下城市太阳能可利用空间评估研究[J]. 规划师, 2021, 37(1): 77-83.
LIN Alin, LU Ming, LOU Jiankun. The assessment of urban solar energy's available space based on energy landscape[J]. Planners, 2021, 37(1): 77-83(in Chinese).
- [26] 吕岩, 潘毅群, 刘海静, 等. 冷热负荷预测在区域供能项目中的应用: 以上海西虹桥1号能源站为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 197-203.
LYU Yan, PAN Yiqun, LIU Haijing, et al. Application of cooling and heating load prediction for district energy supply: a case in west Hongqiao 1# energy station[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 197-203(in Chinese).
- [27] 张全斌, 周琼芳. 中国中长期能源消费发展预测研究[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(3): 10-17.
ZHANG Quanbin, ZHOU Qiongfang. Research on China's medium and long-term energy consumption development forecast[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(3): 10-17(in Chinese).
- [28] 杨明, 杜萍静, 刘凤全, 等. 能源消费发展及预测方法综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 56-62.
YANG Ming, DU Pingjing, LIU Fengquan, et al. Review of energy consumption and demand forecasting methods[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(1): 56-62(in Chinese).
- [29] 宋卫东, 王乾坤. 产业和能源消费结构调整对单位产值能耗影响分析[J]. 中国能源, 2013, 35(12): 34-37.

SONG Weidong, WANG Qiankun. Analysis of impact of industrial and energy consumption structure adjustment on TPES/GDP[J]. Energy of China, 2013, 35(12): 34-37(in Chinese).

- [30] 单葆国, 李江涛, 谭显东, 等. 经济转型时期电力弹性系数应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 1-4.

SHAN Baoguo, LI Jiangtao, TAN Xiandong, et al. The application of electricity elasticity coefficient during economic transition period[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 1-4(in Chinese).

- [31] 钟成元, 陈祥平, 徐孟霞, 等. 基于新型城镇化发展的人口与用电消费趋势预测[J]. 电力与能源, 2017, 38(3): 283-288.

ZHONG Chengyuan, CHEN Xiangping, XU Mengxia, et al. Forecast of population and electricity consumption trends based on new urbanization[J]. Power & Energy, 2017, 38(3): 283-288(in Chinese).

- [32] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 84-95. WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al.

Development history, typical form and future trend of integrated energy system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(8): 84-95(in Chinese).

收稿日期: 2022-06-12; 修回日期: 2022-07-27。



霍沫霖

作者简介:

霍沫霖(1986), 女, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为能源规划与产业政策、能源企业战略与商业模式。通信作者, E-mail: huomolin@163.com。

陈爱康(1994), 男, 硕士, 研究方向为城市能源规划、综合能源优化运行控制, E-mail: chenicon@163.com。

刘智超(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源优化规划, E-mail: zhichaol@hust.edu.cn。

(责任编辑 李锡)