Journal of Global Energy Interconnection

文章编号: 2096-5125 (2021) 02-0178-10 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.02.008 中图分类号: TK01; TM61

文献标志码: A

计及台风极端天气影响的城市能源规划

景锐,韩晖,林剑艺*

(中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室,福建省 厦门市 361021)

Urban Energy Planning Considering Impacts of Typhoon Extreme Weather

JING Rui, HAN Hui, LIN Jianyi*

(Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021,

Fujian Province, China)

Abstract: Climate change leads to more frequent extreme weather events, thereby posing unprecedented challenges for urban energy supply. Few studies on urban energy planning have investigated the impacts of extreme weather events on urban energy systems. Based on historical weather data and system performance during extreme weather, extreme weather scenarios can be established and further combined with conventional scenarios to establish a modeling framework for urban energy planning. The specific power expansion planning case study conducted in Xiamen City indicates that when considering the "Once-in-ten-year" or "Once-in-fifty-year" typhoons as representative extreme weather, the total cost for 20 years' design and operation of urban energy system is 1.8% or 1.1% higher than that when not considering extreme weather events; moreover, an increase in the proportion of gas power could enhance climate resilience of urban energy systems. In this study, we propose a flexible and extensible modeling framework, and the insights generated by the case study could offer referencing support for energy planning in coastal cities.

Keywords: energy planning; extreme weather; urban energy system; modeling and optimization

摘 要: 气候变化导致极端天气事件频发,给城市能源供应 带来了前所未有的挑战。但现有的城市能源规划研究较少考 虑极端天气事件对城市能源系统的影响。基于天气历史数据 与极端天气条件下系统运行情况生成极端天气情景,提出融 合常规情景与极端天气情景的城市能源规划模型架构,并以 厦门市的城市电源规划为案例展开研究。结果表明,当考虑 以"十年一遇"或"五十年一遇"台风为例的极端天气时, 城市能源系统20年的设计与运行综合成本将比不考虑极端天 气事件时分别高1.8%和1.1%,同时适当增加气电的比例有助 于提升城市能源系统的气候韧性。所提出的考虑极端天气事件的城市能源规划模型是灵活且可拓展的,可为中国易受台风极端天气影响的沿海城市提供参考。

关键词: 能源规划; 极端天气; 城市能源系统; 建模与优化

0 引言

根据联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 最新的评估报告,全球气候变化不断加剧,导致诸如 暴雨、台风、高温热浪、干旱等极端天气事件频发^[1], 对能源基础设施带来前所未有的威胁。目前,全球超 过35亿人居住在城市,城市是社会经济活动的中心^[2], 城市能源系统若不能有效应对极端天气的影响,将造 成极其严重的经济损失。面对外在的极端天气影响以 及能源系统内部高比例可再生能源的渗透,分析城市 能源系统气候变化脆弱性,并基于韧性理论提出能够 应对不同气候不确定性的规划策略,即研究城市能源 系统的气候韧性(climate-resilient)是当务之急^[3-5]。

由于气候系统自身多维度、多尺度变化,以及气 候系统与能源系统之间复杂的相互作用,量化极端天 气对能源系统的影响极具挑战性^[6]。过去20年中,相关 学者已在开发气候模型以及预测未来天气数据方面取 得了重大进展,通过历史数据、模拟工具以及改进型 聚类算法的联合,开发了生成未来气候数据的方法^[78], 为研究未来气候对能源系统的影响提供了良好基础。 近年来,极端天气对能源系统源、网、荷单个环节的 影响研究方面也有显著进展,例如预测未来天气中光 照条件对太阳能发电的影响^[9]、评估风速对风力发电 的影响^[10]、量化气候变化导致冷却水升温对火力发电

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71573242)。 National Natural Science Foundation of China (71573242).

的影响^[11]、分析极端天气对电力系统规划的影响^[12]、 总结应对极端天气的电网韧性评估方法^[13]、提出考虑 安全约束的输配网络规划方法^[14]、归纳电网韧性提升 的策略^[15],以及未来气候条件对建筑能源需求的影 响^[16]等。基于这些研究,有必要进一步通过构建城市 能源规划模型,开展未来极端天气对城市能源系统供 给、需求以及转型路径多维度、系统性影响的研究。 目前研究在构建城市能源规划模型时,通常采用基于 聚类的典型情景生成方法^[17],而发生概率较小的极端 天气的情景则易被忽略^[18],导致目前大多城市能源规 划模型未考虑极端天气对能源系统的影响。当极端天 气确实发生时,可能由于规划不当而造成不可估量的 损失^[19]。特别是在如何捕捉并量化极端天气对城市能 源规划的综合影响方面仍存在研究空白^[5]。

因此,本文提出融合常规情景与极端天气情景的 城市能源规划研究架构,并以厦门市在台风极端天气 条件下为例,开展中长期电源规划研究,量化极端天 气对城市能源转型综合成本的影响,旨在加深极端天 气对城市能源系统影响的认识,为中国其他易受极端 天气影响的沿海城市的能源规划提供参考。

1 城市能源规划的研究框架

城市能源系统的对象边界以及模型相关前提与假 设介绍如下。

1.1 系统总体介绍

城市能源系统内涵丰富,包括电、煤、油、气、 冷、热等多种能源品类,涉及种类繁多的能源技术与 燃料,如图1所示。在当前城市电气化率越来越高的 背景下,本文重点研究电能供应系统。所构建的规划 模型考虑燃煤、燃气、风、光、垃圾焚烧等多种发电 技术以及抽水蓄能、电池储能2种储能技术的投资决 策与运行调度;并考虑农业、工业、服务业、居民、 交通等全社会用电情况与电力负荷。极端天气种类繁 多,主要包括高温、严寒、干旱、洪涝、暴雨及台风 等,本文考虑案例城市厦门的实际情况,以台风为例 展开研究。

1.2 前提假设

本文旨在研究以台风为例的极端天气条件下城市 能源规划问题,在20年时间跨度内,以电能供给与需 求逐时平衡等为约束条件,求解综合成本最低的城市







能源系统投资决策与逐年逐时运行策略协同优化问题。研究做如下假设:

1) 从宏观规划角度出发,假设决策者对整个规划 期内具有完美的预见性(perfect foresight),可对城市 能源系统的整体装机投资与系统运行做决策。

2)为保证优化模型可解,将每年8760 h划分为
 3个典型季节:夏季(5月—9月)、冬季(12月—次年
 2月)和过渡季(其余月份);每年5月—9月是中国台风的集中期,假设台风发生在夏末时节;各典型季的时长可随不同案例城市的气候条件而不同。

3)假设台风对易受天气因素影响的发电技术 (风电和光伏)有不同程度的影响,台风过境后发电 可迅速恢复,台风对其他发电技术的影响忽略不计。 暂未考虑能源系统拓扑结构及输配电系统在台风条件 下可能发生的故障。

4) 在20年规划期内,城市能耗随社会经济发展 逐年上升,而新能源技术的投资及运维成本随技术进 步总体呈逐年下降趋势。

2 城市能源规划的模型描述

2.1 模型架构

基于随机规划的建模方法,构建了融合常规情景 与极端天气情景的自下而上的城市能源规划模型^[20], 见图2。该模型是以20年总费用现值最小化为目标的 混合整数线性规划(MILP)模型,同时优化规划期 内每一年的投资决策变量与年内不同情景下逐时的系 统运行变量。其中,投资决策变量主要包括能源技术 的投资时机、各种能源技术的组合、各能源技术的新 增装机容量、年度碳排放、各能源技术的投资等;运 行变量主要指各能源技术的逐时出力、各能源技术 的逐时燃料消耗、各能源技术的运维费用等。在每一 年内的运行情景中,进一步针对3个典型季节取工作 日与休息日2类典型日;考虑到台风极端天气通常发 生在夏季,故将夏季运行情景进一步细分为"常规情 景"与"台风发生"2类情景。因此,在总规划期内 每一年的运行情景树包含8个情景,每一年的运行情 景将影响当年度的投资决策,同时上一年度的投资决 策又将影响后续年度的投资决策及相应年度的系统运 行策略。本研究考虑台风通常发生在夏末,故将台风 极端天气情景树置于夏季。后续研究可针对城市的气 候条件与极端天气的实际情况,相应调整极端天气情 景树的位置,如极寒天气通常发生在冬季等。



图 2 常规情景与极端天气情景一体的城市能源规划模型架构 Fig. 2 Outline of the proposed urban energy planning model considering conventional and extreme weather scenarios

2.2 目标函数

模型以能源系统20年的总费用现值(*C*^{TDC})最小为目标函数^[21-22],目标函数及其计算方式为

$$\min C^{\text{TDC}} \tag{1}$$

$$C^{\text{TDC}} = \sum_{y=1}^{20} \frac{1}{(1+r)^{y-y_0}} \left(E_y^{\text{CAPEX}} + E_y^{\text{OPEX}} \right)$$
(2)

$$E_{y}^{\text{CAPEX}} = \sum_{k} U_{k,y}^{\text{gen}} \times P_{k,y}^{\text{CAP}} + U_{y}^{\text{PHES}} \times P_{\text{PHES},y}^{\text{CAP}} + U_{y}^{\text{batt}} \times P_{\text{batt},y}^{\text{CAP}}$$
(3)

$$E_{y}^{\text{OPEX}} = \sum_{s,h} C_{y}^{\text{O&M}} + \sum_{s,h} C_{y,s,h}^{\text{fuel}} + \sum_{s,h} C_{y,s,h}^{\text{impt}}$$
(4)

$$C_{y}^{\text{O&M}} = \sum_{k} C_{k,y}^{\text{gen}} \times P_{k,y}^{\text{O&M}} + C_{y}^{\text{PHES}} \times P_{\text{PHES},y}^{\text{O&M}} + C_{y}^{\text{batt}} \times P_{\text{batt},y}^{\text{O&M}}$$
(5)

$$C_{y,s,h}^{\text{fuel}} = \sum_{ka} \frac{E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}}}{\eta_{ka}} \times P_{ka,y}^{\text{fuel}}$$
(6)

$$C_{y,s,h}^{\text{impt}} = E_{y,s,h}^{\text{impt}} \times P_{y,h}^{\text{impt}}$$
(7)

式中:下标y表示各年, y_0 为起始年份(即所有费用 折算基准),s表示各情景,h为各典型日内每小时,k表示各供能技术,PHES为抽水蓄能,batt为电池储 能,ka表示需要消耗燃料的发电技术(ka为k的子集); E^{CAPEX} 为各年投资费用; E^{OPEX} 为各年运行费用; U^{gen} 、 U^{PHES} 、 U^{batt} 分别表示各发电技术、抽水蓄能及电池储 能的新增容量; P^{CAP} 与 $P^{O&M}$ 分别表示各技术的单位投 资价格与单位运维价格; $C^{O&M}$ 、 C^{fuel} 、 C^{impt} 分别表示运 维成本、燃料成本与外调电力成本; C^{gen} 、 C^{PHES} 、 C^{batt} 分别为各发电技术、抽水蓄能及电池储能当年度的装 机容量; E^{gen} 与 E^{impt} 分别为发电量与外调电量; η 为发 电效率; P^{fuel} 与 P^{impt} 分别为单位燃料价格与单位外调电 力价格。

2.3 约束条件

模型的约束条件主要包括能量平衡(总供给大于 等于总需求)、设备扩容约束(考虑年建设能力与开 发总潜力)、能量转换约束(燃气与燃煤发电)、系统 运行约束(爬坡与开关约束)、储能约束(抽水蓄能 与电池储能)、外调电力约束(电力购入与售出)、碳 排放约束(2030年前达峰)等^[23]。

能量平衡约束见式(8)。

$$E_{y,s,h}^{\text{dem}} + E_{y,s,h}^{\text{cha_PHES}} + E_{y,s,h}^{\text{cha_batt}} \leq E_{y,s,h}^{\text{disc_PHES}} + E_{y,s,h}^{\text{disc_batt}} + E_{y,s,h}^{\text{impt}} + \sum E_{k,y,s,h}^{\text{gen}}$$
(8)

式中:下标y表示各年,s表示各情景,h为各典型日内 每小时; E^{dem} 为电量需求; E^{cha_PHES} 为抽水蓄能充能量; E^{cha_batt} 为电池储能充能量; E^{disc_PHES} 为抽水蓄能释能量; E^{disc_batt} 为电池储能释能量; E^{impt} 为外购电量; E^{gen} 为本 地各种技术发电量。

设备扩容约束见式(9)一式(14)。

$$C_{k,y}^{\text{gen}} = C_{k,y-1}^{\text{gen}} + U_{k,y}^{\text{gen}}$$
(9)

$$C_{ka,y}^{\text{gen}} - E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}} \ge C_{ka,y}^{\text{gen}} \times R_{ka}^{\text{M}}$$
(10)

$$E_{\text{solar},y,s,h}^{\text{gen}} \leq C_{\text{solar},y}^{\text{gen}} \times S_{y,s,h} \tag{11}$$

$$E_{\text{wind},y,s,h}^{\text{gen}} \leq C_{\text{wind},y}^{\text{gen}} \times W_{y,s,h}$$
(12)

$$U_{k,y}^{\text{gen}} \leqslant \overline{U_{k,y}^{\text{gen}}} \tag{13}$$

$$\sum_{y} U_{k,y}^{\text{gen}} \leqslant \overline{\sum_{y} U_{k,y}^{\text{gen}}}$$
(14)

式中: 下标y表示各年, s表示各情景, h为各典型日内

每小时,k表示各供能技术,ka表示需要消耗燃料的 发电技术; C^{sen} 为本地发电技术装机容量; U^{sen} 为本地 发电技术当年扩容量; E^{sen} 为本地消耗燃料的机组发 电容量; R^{M} 为备用率;S为太阳能辐射强度系数(根 据当地光照条件折算为一个取值0~1范围内的系数,0 表示无光照,1表示最大光照);W为风速系数(根据 当地风速条件折算为一个取值0~1范围内的系数,0表 示风电不出力,1表示风电满出力); $\overline{U^{\text{sen}}_{k,y}}$ 与 别为各技术每年的扩容限制与总开发潜力。

能量转换约束见式(15)一式(17)。

$$E_{\text{gas},y,s,h}^{\text{gen}} = \eta_{\text{gas},y} \times Q_{\text{gas},y,s,h}$$
(15)

$$E_{\text{coal } v, s, h}^{\text{gen}} = \eta_{\text{coal } v} \times Q_{\text{coal } v, s, h} \tag{16}$$

$$E_{\text{bio} v s h}^{\text{gen}} = \eta_{\text{bio} v} \times Q_{\text{bio} v s h} \tag{17}$$

式中: 下标y表示各年, s表示各情景, h为各典型日 内每小时, gas、coal、bio分别表示燃气、燃煤、垃圾 焚烧发电(均为k集中的元素); η为发电效率; *Q*为相 应燃料消耗量。

系统运行约束见式(18)一式(24)^[24]。

$$\left|E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}} - E_{ka,y,s,h-1}^{\text{gen}}\right| \leq R_{ka}^{\text{Ramp}} \tag{18}$$

$$E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}} \leq \beta_{ka,y,s,h} \times M_1 \tag{19}$$

$$E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}} \ge (\beta_{ka,y,s,h} - 1) \times M_2 + \mu_{ka} \times C_{ka,y}^{\text{gen}}$$
(20)

$$\sum_{h} \chi_{ka,y,s,h} \leqslant 1 \tag{21}$$

$$\chi_{ka,y,s,h} \ge \beta_{ka,y,s,h} - \beta_{ka,y,s,h-1}$$
(22)

$$\chi_{ka,y,s,h} \leq 1 - \beta_{ka,y,s,h-1} \tag{23}$$

$$\chi_{ka,y,s,h} \leq \beta_{ka,y,s,h} \tag{24}$$

式中:下标y表示各年,s表示各情景,h为各典型日内 每小时,k表示各供能技术,ka表示需要消耗燃料的 发电技术; E^{sen} 为发电出力; β 为二进制变量,表示设 备开关状态; μ 为最小负载率; χ 为二进制变量,控制 每日设备的启停次数; M_1 和 M_2 为数值足够大的"大 M"数。

抽水蓄能与电池储能约束类似(仅参数取值不同)。以抽水蓄能为例,式(25)为储能能量平衡,式 (26)和式(27)控制充能/释能量小于装机容量,式 (28)确保上库水位不低于最大库容的20%且库容满足 连续6 h的满功率释能,式(29)约束装机容量与扩容 量,式(30)和式(31)分别约束总开发潜力与年度扩 容进度,式(32)一式(34)避免充能/释能同时发生。

$$E_{y,s,h}^{\text{disc_PHES}} / \eta^{\text{disc_PHES}} + E_{y,s,h}^{\text{in_PHES}} = E_{y,s,h}^{\text{in_PHES}} + \eta^{\text{cha_PHES}} \times E_{y,s,h}^{\text{cha_PHES}}$$
(

$$E_{y,s,h-1} + \eta - \chi E_{y,s,h}$$
 (23)

$$E_{y,s,h}^{\text{cha_PHES}} \leqslant C_y^{\text{PHES}} \tag{26}$$

$$E_{\nu,s,h}^{\text{dis_PHES}} \leq C_{\nu}^{\text{PHES}} \tag{27}$$

$$E_{y,s,h}^{\text{in_PHES}} \ge 0.2 \times 6 \times C_y^{\text{PHES}}$$
(28)

$$C_{y}^{\text{PHES}} = C_{y-1}^{\text{PHES}} + U_{y}^{\text{PHES}}$$
(29)

$$C_y^{\text{PHES}} \leq \overline{C}^{\text{PHES}}$$
 (30)

$$U_{y}^{\text{PHES}} \leqslant \overline{U}^{\text{PHES}} \tag{31}$$

$$E_{y,s,h}^{\text{cha}_\text{PHES}} \leq \alpha_{y,s,h}^{\text{cha}_\text{PHES}} \times M_3$$
(32)

$$E_{y,s,\bar{h}}^{\text{disc_PHES}} \leq \alpha_{y,s,\bar{h}}^{\text{disc_PHES}} \times M_3$$
(33)

$$\alpha_{y,s,\bar{h}}^{\text{disc_PHES}} + \alpha_{y,s,\bar{h}}^{\text{cha_PHES}} \leq 1$$
 (34)

式中:下标y表示各年,s表示各情景,h为各典型日 内每小时; $\eta^{cha_PHES} \subseteq \eta^{disc_PHES}$ 分别为充能/释能效率; E^{cha_PHES} 、 $E^{dis_PHES} \subseteq E^{in_PHES}$ 为分别充能/释能量及储能 量; $C^{PHES} \subseteq U^{PHES}$ 分别为抽水蓄能装机容量与当年扩 容量;(•)表示相应变量的上限值; α 为二进制变量, 避免充能/释能同时发生; M_3 为"大M"数。

外调电力约束见公式(35)一式(37)。

$$0 \leq E_{v,s,h}^{\text{expt}} \leq \delta_{v,s,h}^{\text{expt}} \times E_{v,s,h}^{\text{expt}}$$
(35)

$$0 \leqslant E_{v,s,h}^{\text{impt}} \leqslant \delta_{v,s,h}^{\text{impt}} \times E_{v,s,h}^{\text{impt}}$$
(36)

$$\delta_{v_{s,h}}^{\text{expt}} + \delta_{v_{s,h}}^{\text{impt}} \leq 1 \tag{37}$$

式中:下标y表示各年,s表示各情景,h为各典型日 内每小时; $E^{impt} \pi E^{expt}$ 分别为买/卖电量; $\overline{(\cdot)}$ 表示相应 变量的上限值; $\delta^{impt} = \delta^{expt}$ 分别为二进制变量,控制与 上级电网买/卖电状态。

碳排放约束见式(38)和式(39)。

 C_v^e

$$C_{y}^{\text{emi}} = \sum_{ka,s,h} E_{ka,y,s,h}^{\text{gen}} \times \lambda_{ka} + \sum_{s,h} E_{y,s,h}^{\text{impt}} \times \lambda_{\text{impt},y}$$
(38)

$$\sum_{y=2030}^{\text{mi}} \leq C_{y=2030}^{\text{emi}}$$
 (39)

式中: C_y^{emi} 为各年度碳排放; λ_{kb} 和 λ_{impl} 分别为各消耗燃料的发电技术与外购电力的排放因子。

3 厦门市能源系统基本信息与情形设置

3.1 能源系统基本信息

厦门市位于中国东南沿海,是福建省的重要海滨 城市,因其地理位置而易受台风袭击。厦门市是国家 首批经济特区,2019年常住人口约429万。作为国家 首批低碳试点城市,厦门市的能源系统具有以下特 点:①出于控制碳排放考虑,不再规划建设煤电,碳 达峰时间不应晚于2030年;②本地不具备建设核电条 件;③天然气供应较为充足;④垃圾焚烧发电具有一 定潜力;⑤积极开展分布式光伏试点;⑥风力资源丰 富,海上风电具有一定潜力;⑦本地电力供应能力有 限,十分依赖从福建省电网外调输入(应当指出不同 城市的电能自给率差异极大,越是大型城市外来电比 例往往越高);⑧本地具有抽水蓄能开发潜力^[25]。模 型中涉及的关键输入参数见附录A,主要包括:厦门 各典型季节的逐时能耗需求,各能源技术的现有装机 容量、年建设速度约束与总开发潜力^[26]等技术参数以 及投资运维燃料成本等经济参数。

3.2 规划情形设置

本文共设置了3种情形用于对比讨论,见表1。

表 1 情形设置与相应台风发生概率 Table 1 Situations setting and typhoon probability

情形	是否考虑台风	台风发生概率	台风过境时对单个
名称	影响		能源技术的影响
情形1	不考虑	_	_
情形2	考虑遭遇"十	夏季有10%概率	风电与光伏出力降
	年一遇"台风	出现	至额定值的50%
情形3	考虑遭遇 "五十年—遇" 台风	夏季有2%概率 出现	无风电与光伏出力

4 厦门市能源规划的情形分析

以厦门市的能源系统为例,对比分析考虑台风对 2020—2039年能源系统规划的影响,模型优化计算的 结果表明:若以不考虑台风的情形(情形1)为对照 组,考虑遭遇"十年一遇"台风(情形2)时,能源 系统的转型成本将增加1.8%;而考虑遭遇"五十年一 遇"台风(情形3)时,能源系统的转型成本将增加 1.1%。

4.1 各种情形下的新增装机对比

当考虑台风影响时,能源系统转型过程中逐年的新增装机决策将受到一定影响。图3(a)一(c)分别表示情形1一情形3的年度新增装机决策,由图可知:①无论考虑极端天气与否,风电与垃圾焚烧发电

技术宜尽快部署; ②从2026年起,光伏的装机决策在 3种情形中较为稳定,一方面由于光伏成本进一步下 降,另一方面前期建设的燃气燃煤电厂可保障极端天 气条件下的能源供给; ③考虑台风影响时,第1年燃 气发电装机容量大于不考虑台风的情形,通过气电机 组的灵活运行,弥补当台风发生时风电与光伏出力的 不足,以保障能源的供给,可见气电作为一种灵活性较 高的电源,是提升城市能源系统气候韧性的关键; ④储 能技术亦通常被视为提升系统韧性的关键,尽管本模 型中考虑了电池储能和抽水蓄能,但单纯以经济性为 目标的模型计算结果并未选择部署储能技术,这也意 味着未来城市能源规划中应当进一步加强系统韧性或 弹性方面的考虑。



Fig. 3 Comparison of annual decisions on capacity expansion in three situations

4.2 常规情形下的系统运行策略

在常规的冬季、夏季与过渡季中,3种情形的系 统运行策略基本一致。以情形1(不考虑台风发生)中 的2039年为例,图4(a)-(c)分别表示冬季、过渡 季和夏季典型工作日的逐时能源供需平衡与各技术出 力组合。

在冬季典型工作日中,燃煤、燃气与垃圾焚烧发 电保持稳定出力,风电出力夜大昼小与光伏出力形成 一定互补,在晚高峰时段需适当外购电力以保障供 给,如图4(a)所示。

在过渡季典型工作日中,燃煤与垃圾焚烧发电保

🔤 燃煤发电 🔜 燃气发电 📉 风电 🗾 垃圾焚烧 光伏 外购电力 —— 能源需求曲线 5000 能源供需平衡/MWh 4000 3000 2000 1000 0 0:00 12:00 6:00 18:00 24:00 时刻 (a) 冬季 5000 能源供需平衡/MWh 4000 3000 2000 1000 0 18:00 24:00 0:00 6:00 12:00 时刻 (b) 过渡季 8000 7000 能源供需平衡/MWh 6000 5000 4000 3000 2000 1000 0 0:00 6:00 12:00 18:00 24:00 时刻 (c)夏季

图 4 以2039年为例的典型季节中逐时能源供需平衡与各 技术出力组合

Fig. 4 Energy supply demand balance at hourly basis and the technology mix in representative seasons in 2039 as an example

持稳定,无需燃气发电(因燃料成本仍相对较高), 在晚高峰时段仍需适当外购电力以保障供给,如图4 (b)所示。

在夏季典型工作日中,燃煤、燃气与垃圾焚烧发 电保持稳定出力,风电出力夜大昼小与光伏出力形成 一定互补,除清晨用电低谷外其余时段均需要大量外 购电力以保障供给,如图4(c)所示。

4.3 极端天气的系统运行策略

优化模型可在优化常规情形下系统运行策略的同时,优化当台风极端天气发生时的系统运行策略。以 图5(a)所示的情形1(不考虑台风)中常规情景夏







季工作日的系统调度策略为基准线,图5(b)给出情 形2(考虑"十年一遇"台风)中台风发生时的系统 调度策略,当光伏和风电出力受台风影响而部分受限 时,本地燃煤、燃气和垃圾焚烧发电保持稳定出力, 同时系统外购电力的数量大于常规情景夏季工作日。 图5(c)给出情形3(考虑"五十年一遇"台风)中台 风发生时的系统调度策略,当台风导致光伏与风电出 力完全受限后,本地燃煤、燃气和垃圾焚烧发电仍可 稳定出力,同时系统需大量外购电力以满足能源需 求,意味着在高比例可再生能源渗透率的情况下,加 强城市间的能源网络互联有助于提高城市能源系统气 候韧性^[27]。

5 结论与展望

气候变化导致极端天气日益频发,对能源系统的 转型规划提出了更高要求。通过构建计及极端天气影 响的城市能源规划模型,量化极端天气事件对能源系 统规划的影响,并协同优化能源系统的投资决策、常 规情景下的调度策略以及极端天气情景下的调度策 略。以厦门市能源系统为例,评估台风对城市能源系 统规划、设计与调度的影响程度,研究方法与结果可 为中国沿海易受极端天气影响的城市的能源规划提供 参考。

 1)以厦门市为例的20年能源规划,在分别考虑 "十年一遇"和"五十年一遇"台风影响时,比不考 虑台风影响分别需增加1.8%和1.1%的建设与运行总 成本。

2)基于随机规划的建模方法在模拟极端天气对能 源系统影响方面具有较好的灵活性,可在每一年中设 置情景树。特别是考虑到气候变化导致极端天气愈加 频繁和剧烈,可通过调整模型中每一年极端天气的发 生概率以及每一年极端天气发生时各技术受影响的程 度,为建模提供必要的灵活性。后续研究可以进一步 考虑总结各类极端天气的共有特征,从多重极端天气 事件联合发生概率、极端天气对能源系统供给侧/需 求侧影响程度等多角度出发,建立各种极端天气的模 拟情景集及复合情景集,并与基于随机规划的建模方 法相结合,评估多种极端天气对城市能源系统的综合 影响。

3)城市能源系统转型规划决策需要构建复杂的优 化模型,如随机规划模型、鲁棒规划模型、鲁棒-随 机混合规划模型等,求解代价往往较高。考虑极端天 气情景使得模型求解难度进一步加大,未来需要开发 更加高效的模型方法以量化极端天气对城市能源系统 的影响。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2021: impacts, adaptation and vulnerability[R]. Switzerland, 2019.
- United Nations. The sustainable development goals report[R/ OL]. (2020)[2020-12]. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/.
- [3] 丁月婷, 聂锐, 高凯. 韧性理论在能源系统问题研究中的应用综述[J]. 科技管理研究, 2019, 39(24): 225-233.
 DING Yueting, NIE Rui, GAO Kai. Application review of resilience theory in energy system research[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(24): 225-233(in Chinese).
- [4] 陈莎,向翩翩,姜克隽,等.北京市能源系统气候变化脆弱性分析与适应建议[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(6): 614-622.
 CHEN Sha, XIANG Pianpian, JIANG Kejun, et al. Analysis of climate change vulnerability and adaptive suggestions in energy system in Beijing City[J]. Climate Change Research,
- [5] PERERA A T D, NIK V M, CHEN D L, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. Nature Energy, 2020, 5(2): 150-159.

2017, 13(6): 614-622(in Chinese).

- [6] HOFFMANN M, KOTZUR L, STOLTEN, D, et al. A review on time series aggregation methods for energy system models[J]. Energies, 2020, 13(3): 641.
- [7] WANG M, YU H, LIN X Y, et al. Comparing stochastic programming with posteriori approach for multi-objective optimization of distributed energy systems under uncertainty[J]. Energy, 2020, 210: 118571.
- [8] KOTZUR L, MARKEWITZ P, ROBINIUS M, et al. Impact of different time series aggregation methods on optimal energy system design[J]. Renewable Energy, 2018, 117: 474-487.
- [9] FERON S, CORDERO R R, DAMIANI A, et al. Climate change extremes and photovoltaic power output[J]. Nature Sustainability, 2020: 1-7.
- [10] GAO Y, MA S X, WANG T. The impact of climate change on wind power abundance and variability in China[J]. Energy, 2019, 189: 116215.
- [11] European Environment Agency. Adaptation challenges and opportunities for the European energy system[R]. Luxembourg: EEA, 2019.
- [12] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [13] JUFRI F H, WIDIPUTRA V, JUNG J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and

enhancement strategies[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1049-1065.

- [14] GOMES P V, SARAIVA J T. A two-stage strategy for securityconstrained AC dynamic transmission expansion planning[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180: 106167.
- [15] MAHZARNIA M, MOGHADDAM M P, BABOLI P T, et al. A review of the measures to enhance power systems resilience[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4059-4070.
- [16] MOAZAMI A, NIK V M, CARLUCCI S, et al. Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions[J]. Applied Energy, 2019, 238: 696-720.
- [17] TEICHGRAEBER H, BRANDT A R. Clustering methods to find representative periods for the optimization of energy systems: an initial framework and comparison[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1283-1293.
- [18] NIK V M, PERERA A T D, CHEN D L. Towards climate resilient urban energy systems: a review[J]. National Science Review, 2020, nwaa134, https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa134.
- [19] ROTH S. What caused California's rolling blackouts? Climate change and poor planning[N]. Los Angeles Times, 2020-10-06.
- [20] MAX W, SHUBA, R, PATRICIA H. Building a healthier and more robust future: 2050 low-carbon energy scenarios for California[R]. California Energy Commission, 2017.
- [21] 马丁,陈文颖. 基于中国TIMES模型的碳排放达峰路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(10): 1070-1075.
 MA Ding, CHEN Wenying. China's carbon emissions peak path—based on China TIMES model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(10): 1070-

模型的输入参数具体如下。假设规划期内能耗随 经济发展逐年增加,外购电力的排放系数随电网发展 逐年下降,见图A1。 1075(in Chinese).

[22] 侯方心,张士宁,赵子健,等.实现《巴黎协定》目标 下的全球能源互联网情景展望分析[J].全球能源互联网, 2020,3(1):34-43.

HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global energy interconnection scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 34-43(in Chinese).

- [23] JING R, LIN Y F, KHANNA N, et al. Balancing the Energy Trilemma in energy system planning of coastal cities[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116222.
- [24] JING R, WANG M, ZHANG Z H, et al. Distributed or centralized? Designing district-level urban energy systems by a hierarchical approach considering demand uncertainties[J]. Applied Energy, 2019, 252: 113424.
- [25] LIN J Y, KANG J F, KHANNA N, et al. Scenario analysis of urban GHG peak and mitigation co-benefits: a case study of Xiamen City, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 972-983.
- [26] LIN J Y, KANG J F, BAI X M, et al. Modeling the urban water-energy nexus: a case study of Xiamen, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 680-688.
- [27] 黄武靖,张宁,董瑞彪,等. 构建区域能源互联网:理念 与实践[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 103-111.
 HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Construction of regional energy Internet: concept and practice[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 103-111(in Chinese).

附录A 模型输入参数

厦门市地处中国东南沿海,夏热冬暖,故夏季能 耗显著高于其他季节,见图A2。







Fig. A1 Forecasted annual energy demand and emission factor for purchased electricity

假设各种技术的单位装机价格总体上随技术进步 呈现下降趋势,见图A3。





假设各种技术的运维成本(O&M)总体上随技术 进步呈现下降趋势或保持稳定,见图A4。



图 A4 不同技术的运维成本预测 Fig. A4 O&M cost for different technologies forecast

厦门市各种能源技术的现有装机、年度扩容约束 以及总开发潜力见表A1。

表 A1	厦门市各种能源技术基本情况
Table A1 Dec	is information of each facella technology

Table AT	Basic information of each leasible technology			
能源技术	现有装机容量 /MW	年度建设约束 /(MW·a ⁻¹)	总潜力约束 /MW	
燃煤发电	1200	0	1200	
燃气发电	1000	300	_	

			续表
能源技术	现有装机容量 /MW	年度建设约束 /(MW·a ⁻¹)	总潜力约束 /MW
光伏发电	0	200	2000
风力电光	0	200	2000
垃圾焚烧发电	18	100	500
电池储能	0	100	—
抽水蓄能	0	300	1400

考虑到日益严格的排放要求,假设煤炭和天然气价格逐年上升,见图A5。





考虑通货膨胀,假设外购电力价格逐年略微增长,见图A6。





夜间风力大于日间,不同季节风力大小略有不同。为便于建模,将风力标准化,见图A7。 各季节太阳辐照度略有不同,见图A8。





图 A8 不同季节太阳辐射度预测曲线

Fig. A8 Solar radiation forecast curve for different seasons

收稿日期: 2020-12-20; 修回日期: 2021-02-02。

景锐

作者简介: 景锐(1989),男,博士,特别 研究助理,研究方向为能源系统建模 与优化,能源系统综合,能源转型与 气候变化,E-mail:rjing@iue.ac.cn。 韩晖(1997),男,硕士研究生,

研究方向为能源环境大数据分析, E-mail: hhan@iue.ac.cn。

林剑艺(1978),男,博士,研 究员,研究方向为能源与环境,低碳城市,复杂系统建 模。通信作者,E-mail: jylin@iue.ac.cn。

(责任编辑 李锡)

