

引用格式:刘俊伶, 项启昕, 王克, 等. 中国建筑部门中长期低碳发展路径[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 509-520. [Liu J L, Xiang Q X, Wang K, et al. Mid- to long-term low carbon development pathways of China's building sector[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 509-520.] DOI: 10.18402/resci.2019.03.09

中国建筑部门中长期低碳发展路径

刘俊伶^{1,2}, 项启昕², 王克², 邹骥², 孔英^{1,3}

(1. 清华—伯克利深圳学院 环境科学与新能源技术研究中心

低碳经济与金融风险分析研究实验室, 深圳 518055;

2. 中国人民大学环境学院, 北京 100872;

3. 约克大学经济系, 多伦多 M3J1P3, 加拿大)

摘要:本文讨论了城镇化背景下建筑部门未来发展驱动因子与能源服务需求的变化趋势,并设定基准(BAU)、自主贡献(NDC)和强化低碳(ELC)3个情景,运用自下而上的建筑部门能源系统模型(PECE-Building)分析2013—2050年不同发展路径下建筑部门能源需求和CO₂排放趋势,评估建筑部门实现中长期低碳发展目标的技术路线图和投资需求。研究结果表明,受城镇化进程与收入增长驱动,中国中长期建筑部门能源服务需求将快速增长,建筑部门成为中国未来能耗与排放增长的重要来源。BAU情景下建筑部门2050年能耗与CO₂排放水平较2013年分别上升142.8%、103.1%;NDC情景下全社会CO₂排放达峰,但建筑部门排放依然保持持续增长;ELC情景下建筑部门有望在2027年左右以7.8亿t CO₂排放达峰,2050年排放降至6.15亿t,低于2013年水平。ELC情景下能效技术与新能源技术累计减排量分别占比33.4%和66.6%,北方城镇供暖是最重要的减排领域。实现该低碳发展目标所需新增投资共计2694.3亿元,占各期GDP比重均不超过0.26%。因此,建筑部门有望走上一条技术可行、经济可接受的低碳转型之路。

关键词:建筑部门;中长期低碳发展;技术路径;低碳投资需求;自下而上模型

DOI:10.18402/resci.2019.03.09

1 引言

2015年6月30日,中国向联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)提交了应对气候变化国家自主贡献文件,确立CO₂排放量于2030年左右达到峰值并争取尽早达峰的行动目标^[1]。作为主要温室气体排放和能源消费部门之一^[2],2013年中国建筑部门¹⁾占终端能耗的18.5%,占全社会碳排放的16.2%^[3,4]。根据发达国家的经验,2010年欧盟国家建筑能耗占终端能耗的比重达40%^[5],远高于中国水平。未来随着中国城镇化和现代化建设的推进,大批农村人

口转移到城镇,住宅建筑面积将不断增长。同时,随着旅游、会展、教育、医疗等第三产业迅速发展,以及居民收入提高和生活质量改善,将进一步增加对室内供暖、制冷、热水等能源服务的需求,推动建筑运行能耗和碳排放快速上升,给全社会碳减排带来巨大压力。因此建筑部门的低碳发展对实现中国自主贡献目标和中长期低碳发展战略意义重大。

现有关于中国建筑部门未来碳排放情景的研究大致可分为以下2类:一类采用自上而下方法,重点讨论建筑部门碳排放的驱动因素。王怡^[6]运用灰色斜率关联度模型分析,建筑业碳排放与建筑业

收稿日期:2018-09-27,修订日期:2018-11-25

基金项目:科技部改革发展专项(YJ201603)。

作者简介:刘俊伶,女,湖南衡阳人,博士,博士后,主要研究领域为能源与气候变化经济学。E-mail: liujunling8838@gmail.com

通讯作者:王克, E-mail: wangkert@ruc.edu.cn

1)按照国际通行的能源系统部门划分标准和能耗概念,建筑部门能耗指建筑运行能耗,而非建筑建造过程中的能耗。建筑运行能耗指建筑内运行设备的能源消耗,例如灯具、空调、电梯等电器^[3]。本文采用这一国际惯例。

GDP指数、能源消费量关联度超过90%。何长全等^[7]运用Tapio模型得出中国建筑业碳排放增长率与经济增长处于弱脱钩态势,其能耗总量为决定脱钩的主要因素。运用LMDI指数分解法,Lin等^[8]识别出人均收入水平上升对建筑部门能源相关碳排放增长起正向作用,能效提高和能源结构转型则起反向作用。祁神军等^[9]运用投入产出法分析建筑业碳足迹模型,并运用改造的kaya恒等式进行建筑业碳排放影响因素分解,分析得出建筑业能源结构和产业规模为其节能减排的重点。另一类使用自下而上模型,基于丰富的技术信息研究建筑部门未来的排放路径、技术选择和减排成本。部分研究关注未来建筑部门能耗和碳排放趋势。Shi等^[10]建立能源系统优化模型(TIMES)按建筑保温改善情况和可再生能源应用的不同条件分情景讨论未来建筑部门能耗趋势;纪建悦等^[11]使用STIRPAT模型,预测建筑业碳排放单位增加值能耗年均降低6%的速度下可于2034年达峰。其他研究侧重于分析主要减排手段和政策措施。Tan等^[12]构建CAS模型预测不同减排政策下未来建筑部门碳排放水平,提出新能源应用和绿色建筑将分别贡献19%和14%的减排量;Xiao等^[13]以2011—2030年为时间跨度,计算得到建筑部门边际减排成本为19.5美元/t,减排投资需求累计达935亿美元;Yang等^[14]建立CBCEM模型,为实现中国建筑部门在2030年左右达峰,提出控制能耗总量与建筑面积、调整能源结构、实行更严格的建筑能效标准等建议。

与基于宏观指标评估能源消耗、碳排放与社会经济发展关系的自上而下方法相比,富含技术细节的自下而上方法能深入讨论实现特定低碳发展目标的具体路径、减排潜力和成本。总结现有自下而上的建筑部门情景研究,存在几个方面的改进空间:首先,现有研究未能对影响建筑部门未来能耗和排放趋势的社会经济驱动因子作深入讨论;其次,模型结构较粗,对占建筑能耗1/4^[15]的北方城镇供暖的节能减排潜力的分析不够深入;再者,研究的时间尺度多以近中期为主,未能从更长的时间尺度考虑应对气候变化目标对建筑部门长期转型的要求。

鉴于上述不足,本文基于长期能源替代规划(Long-range Energy Alternatives Planning, LEAP)模

型框架^[16],构建了自下而上的建筑能源系统模型PECE-Building (Programme of Energy and Climate Economics-Building),对中国建筑部门中长期低碳发展路径展开情景研究。研究以2050年为目标年,2013年为基准年,识别关键驱动因子并讨论驱动因子未来变动趋势对建筑部门的影响,根据中长期低碳发展目标讨论建筑部门低碳发展技术路线图和投资需求。

2 方法与数据

2.1 PECE-Building模型

图1为PECE-Building模型框架,在传统划分基础上,即区分城镇居民、农村居民和公共与商业建筑之外,模型进一步考虑北方城镇供暖,该子部门不仅用能占比高,而且使用的技术类别也与其他子部门和分散供暖不同,因此进行单独讨论。各子部门内包含不同能源服务类型,主要包括供暖、制冷、炊事、热水、照明和家电,公共与商业建筑还包括办公设施用电需求。因普通公共建筑与大型公共建筑能源强度差别显著,因此将分别讨论这2类建筑未来发展趋势及能耗影响。

模型的一般分析步骤为:由人口、经济等社会经济驱动因子决定家庭规模、建筑面积、家电保有

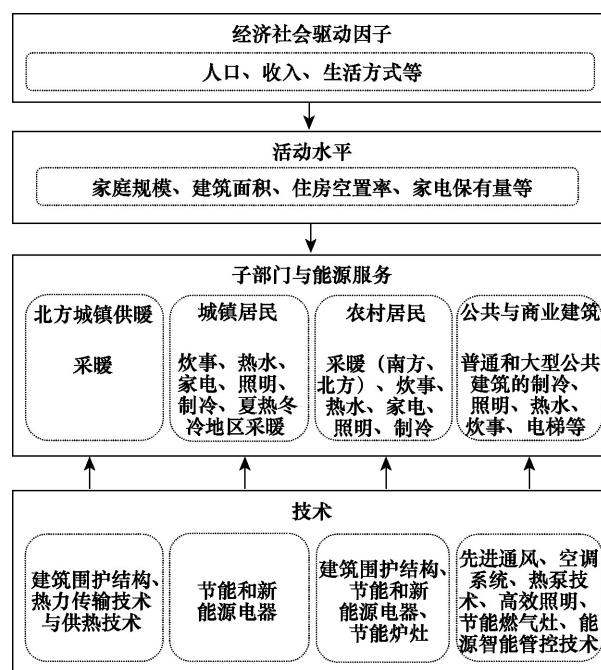


图1 PECE-Building模型框架

Figure 1 Model structure of Programme of Energy and Climate Economics (PECE)-Building

2019年3月

量等活动水平,并作为外生变量输入模型,确定未来建筑部门的能源服务需求。然后根据不同情景下的技术扩散率和终端技术能效水平、加工转化技术的转换效率依次得到满足能源服务需求的终端能源消费量和一次能源消费量,最后根据分燃料品种的排放系数得到建筑部门总排放量。由活动水平、单位活动水平能源强度和单位燃料排放因子得到建筑部门的碳排放总量,公式如下:

$$E_b = \sum_i \sum_n A_i EI_{i,n} EF_n$$

式中: E_b 为建筑部门的CO₂排放总量; A_i 表示活动水平,如每户人口、家庭户数、建筑面积等; $EI_{i,n}$ 为单位活动水平能源强度,其中*i*表示各项终端用途,*n*表示各燃料品种,如人均热水需求量、单位建筑面积照明用电量等; EF_n 为各燃料品种的排放因子。由于电力消费排放与电力行业能源结构调整趋势相关,超出本文的研究范围,因此本文只计算直接碳排放,不考虑电力消费导致的间接排放。为了全面反映提供能源服务需求的各项技术选择,例如提供热水的电热水器、燃气热水器、太阳能热水器,PECE-Building共含有涉及各项能源服务需求的91种技术(主要技术类别如表1),丰富的技术信息可支持不同技术组合下能耗与排放趋势的评估,以及实现特定气候目标的技术路线图和成本分析。

基于技术路线图,PECE-Building进一步核算低

碳技术投资需求,考虑技术的固定成本、运营和维护成本,得到各个情景下的累计投资需求;通过各个情景的成本对比,得到相比于其他情景的新增投资需求。为了使各年份成本和各情景成本具有可比性,模型按照2013年不变价,并参考国家发改委和住建部发布的《建设项目经济评价方法与参数》^[17]中8%贴现率折算投资的净现值。

由于模型涉及的子部门、技术种类、研究内容多,计算过程复杂,本文利用由瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发的LEAP软件完成情景模拟及能耗、排放及成本核算。LEAP软件是能源系统建模的主流分析工具之一,已经在全世界190多个国家得到应用,PECE-Building是在LEAP软件框架基础上,重新设计搭建完成。值得注意的是,情景研究结果并非对未来的预测,而是讨论满足特定假设下未来建筑部门系统发展趋势,其有关人口、经济、技术变动等假设存在不确定性。为了降低这些因素的影响,在取值过程中本文作了大量的文献调研工作,基于最新调研数据、官方统计与众多学者的研究成果作出假设,具体假设依据将在社会经济驱动因子、活动水平与能源服务需求分析中介绍。

2.2 数据来源

PECE-Building模型参数主要分基年现状与未来发展趋势2类。基年数据包括能源消费和技术水平,能源消费数据来自《能源统计年鉴》的能源平衡

表1 建筑部门各子部门主要减排技术

Table 1 Major emission reduction technologies of the four subsectors of the building sector

北方城镇供暖	城镇居民	农村居民	公共与商业建筑
高效燃煤锅炉、燃气锅炉	节能冰箱		温湿度独立调节技术
蒸汽节能输送技术	节能电饭锅		动态冰蓄冷技术
墙体用超薄绝热保温板技术	节能电风扇		过程能耗管控系统技术
热电协同的集中供热技术	节能微波炉		分布式能源冷热电联供技术集成
低辐射玻璃隔热膜及隔热夹胶玻璃节能技术	节能空调(定速、变频)		建筑(群落)能源动态管控优化系统技术等
CHP供热技术	节能洗衣机(波轮、滚筒)		中央空调全自动清洗节能系统-BTS
地源热泵	高耗能电器(带烘干功能洗衣机、全自动洗碗机)		低辐射玻璃隔热膜及隔热夹胶玻璃节能技术
	燃气热水器、储水式电热水器、空气源热泵热水器、太阳能热水器		磁悬浮变频离心式中央空调机组
	节能炉灶(煤炉、生物质炉)		基于人体热源的室内智能控制节能技术
			基于LED发光特性的广告灯箱节能技术
			金属纤维全预混强制鼓风商用燃气灶节能技术

表^[18]、《中国城乡建设统计年鉴》^[19];各个技术的能源强度信息来自国家发改委^[20]、行业协会^[21]报告,成本信息来自国家发改委^[20]和京东、天猫商城²⁾。然后将基于技术信息自下而上核算的能源消费量并与国家能源平衡表的分品种能耗数据进行匹配,确定技术参数的最终取值,完成模型基准年的参数校对。

未来发展趋势包括社会经济和技术发展参数,社会经济包含人口和经济增速,参考《世界人口展望2015年版》^[22]、中国新时代社会主义现代化发展目标和其他发达国家经验决定^[23]。城镇化率根据《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》^[24]和发达国家城镇化水平确定。低碳技术发展潜力来自《国家重点节能技术推广目录》^[20]、清华大学建筑节能研究中心^[15]和IEA^[25-28]技术研究报告。

3 模型设定

3.1 建筑部门社会经济驱动因子与活动水平

根据党的“十九大”提出的新时代中国特色社会主义现代化建设部署,到2050年中国将发展为社会主义现代化强国,进入发达国家行列。参考“十三五”规划中的经济发展目标,结合发达国家经验,本文假设2016—2020年中国GDP年均增速为6.5%,之后缓慢下降,2020—2030年、2030—2040年和2040—2050年年均GDP增速分别为5.5%、4.5%和3.5%,到2050年GDP总量达到345.8万亿元人民币³⁾,人均GDP达25.7万元,即4万美元左右,达到发达国家平均水平(如表2)。参考联合国的研究,预计中国人口在中期内缓慢上升,于2028年左右达到人口峰值,约14.2亿人口,随后逐渐下降,2050年又回到2013年水平(约13.5亿人口)。社会形态也随之发生变化,家庭规模逐渐缩小,参考发达国家经验,假设到2050年城镇和农村家庭平均每户人口分别为2.7和3,影响每户住房建筑面积与用能需求。中国城镇化进程在中期内快速推进,预计到2020年中国城镇化率达到60%,2030年达到70%,之后速度放缓,至2050年达到78%,2013—2050年将有近3亿人口从农村转移到城镇。

伴随城镇人口增长,城镇居民住房建筑需求快速

上升。2013年城镇人均住房建筑面积仅28.4 m²^[15],远低于发达国家水平,随着收入水平增长,如果要实现比较舒适的居住环境,未来人均住房建筑面积应在50 m²以上,同时考虑中产阶级及以上收入人群购买多套房的需求和潜力,假设到2050年城镇住房建筑面积达708亿m²。农村人均住宅建筑面积随收入水平上升和农村人口下降而增长,假设人均建筑面积从2013年37.8 m²上升到2050年50 m²。城镇人口增加带来公共服务需求,令未来城镇人均公共建筑面积达到发达国家水平。到2050年,总建筑面积将达到1077亿m²。根据中国家庭金融调查与研究中心调研^[29],2013年中国城镇多套房空置率为17.3%,这部分城镇住宅不会产生建筑运行能耗。发达国家和地区的经验显示,住房空置率水平通常保持在10%~17%之间,假设到2050年,中国城镇住房空置率为15%,则空置住房建筑面积为106亿m²,假设该部分面积并不产生实际用能消费。

中国家电拥有量还有继续增长的空间,冰箱、洗衣机、热水器等基础家用电器还没有实现完全普及,未来将有更多家庭拥有多台电视机,以满足不同家庭成员的休闲需求,电视机新技术新功能发明应用也会加快家庭电视机的更新速度。越来越多的家庭会在卧室、客厅分别安装空调;随着收入水平的提高,也会有更多的农村居民购买和使用空调,改善室内热环境。计算机将实现全面普及,成为办公娱乐必不可少的工具,使用频率也会持续上升。模型对城乡居民未来家电保有量的假设如表2所示。

3.2 未来能源服务需求假设

在城镇化进程和社会经济驱动因子的推动下,建筑部门能源服务需求具有很高的增长潜力,各项能源服务需求的发展现状和未来变化趋势的分析和讨论如下:

虽然北方城镇集中供暖地区已经基本满足当地居民冬季供暖需求,但是位于夏热冬冷的南方区域还远未达到舒适的生活环境水平。目前夏热冬冷地区的城镇居民冬季采暖以空调和直接电加热为主,农村地区以火盆、煤炉为主,室内温度显著低

2) 京东网站. [2016-06-02]. <https://www.jd.com/>; 天猫电器城网站. [2016-06-02]. <https://3c.tmall.com/>

3) 2013年不变价,下同

表2 建筑部门能源需求和二氧化碳排放驱动因子及活动水平假设

Table 2 Assumptions for the driving factors and activity levels of energy demand and carbon emissions of the building sector

		2013	2050
经济社会驱动因子	GDP总量/万亿		345.8
	GDP年均增速/%		3.5
	人均GDP/(万元/人)		25.7
	人口/亿	13.6	13.5
	城镇化率/%	53.7	78.0
活动水平	城镇家庭规模/人	2.9	2.7
	农村家庭规模/人	3.9	3.0
	城镇人均住宅建筑面积/m ²	28.4	67.4
	农村人均住宅建筑面积/m ²	37.8	50.0
	城镇人均公共建筑面积/m ²	13.5	21.0
	城镇多套房空置率/%	17.3	15.0
	城镇每百户冰箱保有量/台	89.2	100.0
	农村每百户冰箱保有量/台	72.9	100.0
	城镇每百户电视保有量/台	118.6	150.0
	农村每百户电视保有量/台	112.9	140.0
	城镇每百户洗衣机保有量/台	88.4	100.0
	农村每百户洗衣机保有量/台	71.2	100.0
	城镇每百户微波炉保有量/台	50.6	90.0
	农村每百户微波炉保有量/台	14.1	80.0
	城镇每百户空调保有量/台	102.2	250.0
	农村每百户空调保有量/台	29.8	150.0
	城镇每百户抽油烟机保有量/台	66.1	100.0
	农村每百户抽油烟机保有量/台	12.4	80.0
	城镇每百户计算机保有量/台	71.5	150.0
	农村每百户计算机保有量/台	20.0	100.0
	城镇每百户电饭锅保有量/台	100.0	100.0
	农村每百户电饭锅保有量/台	100.0	100.0

于北方集中供暖地区,空调开启时间只有10%~20%,卧室内使用电热毯进行睡前预热,其他时间也一般以局部加热设备为主。随着居民收入水平增长,预计未来南方地区冬季供暖需求快速增长,假设到2050年城镇和农村地区达到北方集中供暖地区相同的室内热环境。

与采暖类似,中国居民夏季制冷能耗也有较大的上升空间。与发达国家对比,2013年中国城镇家庭制冷能耗约67 kgce/户,仅为美国的6.4%^[15]。从设备水平来看,2013年中国城镇居民每百户空调拥有量仅102台,夏季空调使用率偏低且使用习惯较节省^[30]。为满足居民对夏季舒适环境的需求,模型假设至2050年城镇居民卧室及客厅均配备空调并当室内温度超过28℃时就开启,使用频率上升,城

镇单位建筑面积制冷能耗从当前约3 kWh/m²上升至2050年11 kWh/m²。

中国居民热水消费量远低于发达国家水平。据调研,冬季约67%左右的家庭会在洗菜、洗碗时使用热水,夏季这一比例仅为29%^[31],洗澡频率也显著低于发达国家。2011年中国城镇人均生活热水能耗为20 kgce/人,仅为美国的9.1%^[15]。可见,中国居民热水需求还有很高的增长潜力,假设未来实现24小时热水不间断供应,满足人人冬季都能用上热水,洗衣、洗碗不再受冻的基本要求。

中国城乡居民人均炊事能耗已经基本稳定,假设未来一直维持该消费水平。农村居民照明用电强度很低,还不到城镇家庭单位面积用电强度的1/4^[15]。随着农村居民收入增长和生活质量改善,每户灯具

数量和使用率都会上升,假设2030年农村居民照明用电强度到城镇居民水平,即5 kWh/m²,城镇居民照明用电强度保持不变。

2001—2013年,公共建筑单位面积能耗从16.8 kgce/m²增长至21.3 kgce/m²,其中大型公共建筑占比增长是主要原因^[15]。根据发达国家经验,大型公共建筑面积随城镇人口增长继续增加,假设未来大型公共建筑比重从当前不足10%^[30]上升到2050年的40%。

3.3 情景设定

为研究建筑部门不同发展方式下的能耗与碳排放趋势、技术需求和成本,模型设置了3个情景,分别为:基准情景(Business As Usual, BAU)、自主贡献情景(Nationally Determined Contribution, NDC)情景和强化低碳情景(Enhanced Low Carbon, ELC)。BAU情景描述了不采取额外的减缓行动的能耗与排放趋势,为未来的低碳政策行动的影响提供一系列比较基准点。NDC情景考虑落实现有能源与气候行动,包括实现NDC目标与“十三五”规划中相关目标的未来建筑部门系统发展趋势。在NDC基础上,ELC情景以长期气候变化目标为排放约束,强化减排行动,加快建筑部门脱碳速度,得出其排放轨迹和实现条件。

3个情景对建筑部门技术进步和发展速度的内涵和假设不同。BAU情景下,在没有额外的减排行动约束下,建筑部门技术进步速度维持历史发展趋势,能效水平缓慢提高,其中,2050年电器等用能设备能效相比2013年提高20%~30%,2050年北方城镇单位面积耗热量从0.37 GJ/m²下降至0.35 GJ/m²。NDC情景下通过节能技术推广应用,能效水平在BAU基础上提高1倍,2050年北方城镇单位面积耗热量下降至0.33 GJ/m²。ELC情景进一步加强对建筑部门的系统优化,充分发挥热源、管网效率和终端需求节能潜力^[32],显著降低过热供热量,2050年北方城镇单位面积耗热量进一步降至0.28 GJ/m²,相比2013年水平下降25%。

除了提高能效,不同情景下建筑部门能源结构将发生不同程度的转变。在BAU情景下,由于不受政策约束,未来能源结构保持不变。在现有低碳政策指导下,燃气供暖、地源热泵和空气源热泵等供

暖技术在NDC情景得到推广,取代部分居民供热用煤炭消费。为实现长期2℃温控目标,ELC情景下应进一步加快散煤替代与可再生能源在建筑领域的应用,例如太阳能热水器、地源热泵、空气源热泵技术等;农村电气化率水平将显著提高,导致散煤与传统生物质消费大大降低。

4 建筑部门中长期低碳发展路径

4.1 建筑部门能耗及碳排放趋势

如图2所示,2013年中国建筑部门能源消费总量(不包括传统生物质能)为4.8亿tce,随着城镇化进程推进和人民收入水平提高,各情景下建筑部门未来能耗持续增长。BAU情景下2050年建筑部门能耗水平比2013年增长142.8%,达到11.6亿tce;NDC情景下能耗增长至10.2亿tce,较BAU情景下降12.4%;ELC情景可进一步控制在9.2亿tce,较BAU情景下降21.3%。从各子部门能源消费趋势来看,各情景下城镇居民、北方城镇供暖和公共与商业建筑能耗显著上升。随着城镇人口增长和服务业快速发展,BAU情景下2050年城镇居民、北方城镇供暖和公共与商业建筑能耗相比2013年分别增长263.4%、157.9%和184.9%,3个子部门能耗占建筑部门能耗比重分别从2013年的25.9%、22.7%和17.5%增至2050年34.0%、36.1%和20.5%。农村居民能耗随农村人口减少而降低,BAU情景、NDC情景与ELC情景下农村居民能耗分别从2013年1.2亿tce下降到2050年的1.1亿tce、1.0亿tce和0.9亿tce,占建筑能耗比重从2013年34.0%下降到2050年的

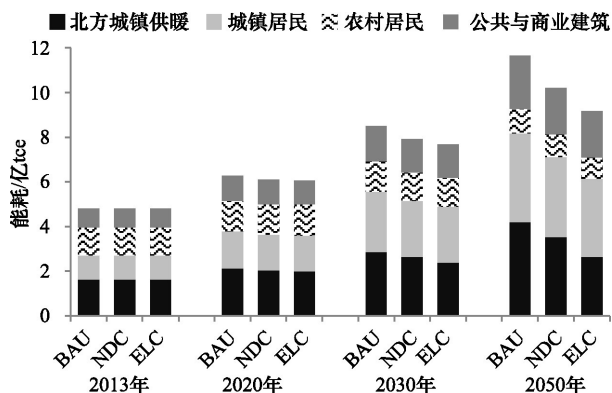


图2 3种情景下各子部门能耗趋势

Figure 2 Energy consumptions of the four subsectors of the building sector under the business as usual (BAU), nationally determined contribution (NDC), and enhanced low carbon (ELC) scenarios

2019年3月

9.4%、9.8%和10.2%。

虽然各情景下未来建筑能耗持续增长,但是不同的技术选择使各情景呈现完全不同的排放路径。如图3所示,BAU情景下中国建筑部门CO₂排放从2013年6.9亿t上升到2050年14.0亿t,上升103.1%。落实NDC和“十三五”规划相关目标可使2050年CO₂排放降至10.0亿t,较BAU情景下降28.3%,但是仍未改变建筑部门排放持续上升的趋势。然而在ELC情景下,域CO₂排放将在2027年以7.8亿t达峰,随后持续下降,2050年回到2013年水平,约排放6.2亿t CO₂,比BAU情景下降56.0%,实现建筑部门低碳发展。

图4进一步展示各子部门排放趋势。北方城镇供暖作为最大的排放子部门,未来排放规模和比重还会持续上升,这与该子部门以煤炭和天然气消费为主及持续增长的城镇人口相关。BAU情景下,北方城镇供暖碳排放从2013年4.0亿t CO₂增至2050年10.4亿t CO₂,占建筑总排放的比重相应地从2013年的58.3%上升到2050年74.1%;NDC情景下,随供热系统效率提高,2050年北方城镇供暖碳排放达到6.9亿t CO₂,占比69.2%;ELC情景下,受供热系统优化和煤炭消费替换影响,北方城镇供暖排放显著下降,2050年排放低于2013年水平,仅3.8亿t CO₂,占建筑部门的排放比重为61.9%;累计减排109.1亿t CO₂,占建筑部门累计减排量的80.6%,为减排潜力最大的子部门。由于城镇居民和公共与商业建筑电气化水平较高,未来随城镇人口增长CO₂排放将持续上升,ELC情景下2个子部门CO₂排放占比分别从2013年的14.1%和1.6%上升到2050年的25.7%和4.0%。农村居民碳排放随人口减少和散煤替代逐渐降低,ELC情景下2013—2050年CO₂排放从1.8亿t下降为0.5亿t。

4.2 建筑部门低碳发展技术路线图

受城镇化进程和生活质量改善推动,建筑部门未来能源服务需求和能耗快速增长,成为中国能源消费的重要增长来源,即便国家总体碳排放放在2030年左右达峰,建筑部门排放还将继续上升。因此,建筑部门是否能尽快达峰,对于中国实现长期低碳转型目标至关重要。

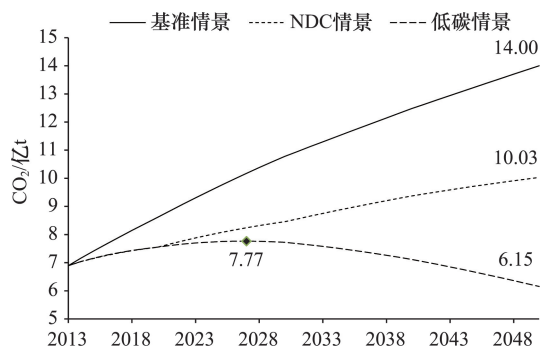


图3 3种情景下建筑部门CO₂排放趋势

Figure 3 CO₂ emission trends of the building sector under the business as usual (BAU), nationally determined contribution (NDC), and enhanced low carbon (ELC) scenarios

如上文分析,ELC情景下建筑部门碳排放将在2027年左右达峰,随后碳排放持续下降,到2050年回到2013年水平。从技术路线图来看(图5),实现该低碳路径,相比BAU情景排放水平,ELC情景下能效技术和能源结构调整技术可以分别贡献2013—2050年33.4%和66.6%的直接累计减排量⁴⁾。从各子部门减排贡献来看,北方城镇供暖、城镇居民、农村居民和公共与商业建筑分别直接减排80.6%、4.1%、14.7%和0.6%。

在能效技术措施方面,来自北方城镇供暖、城镇居民、农村居民和公共与商业建筑子部门的能效提高可分别贡献25.8%、0.2%、7.0%和0.4%的累计减排量(表3)。其中,提高北方城镇供热系统效率(包括推广高效供热锅炉、提高集中供热比例)和提高建

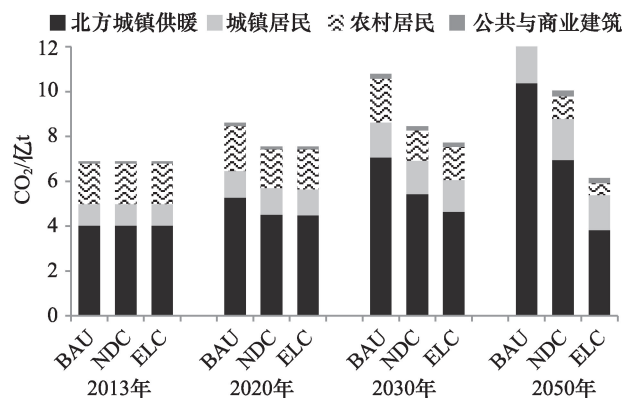


图4 3种情景下各子部门碳排放趋势

Figure 4 Carbon emissions of the four subsectors of the building sector under the business as usual (BAU), nationally determined contribution (NDC), and enhanced low carbon (ELC) scenarios

4)本文中累计减排量是指在2013—2050年间相比BAU情景累计排放量的差。

筑保温水平(如改造旧建筑的维护结构、实施更严格的新建筑节能设计标准、供暖热计量改造)是最主要的措施,通过发挥最大的节能潜力,北方城镇单位建筑面积供热量可在2013年基础上降低24.3%,累计减排34.9亿t CO₂。在城镇与农村居民建筑中,现有家电能效水平与国家1级能效水平还有显著差距,其中家用冰箱、变频空调、洗衣机、电饭锅等电器分别具有38%、36%~41%、39%~42%和8%的节能潜力,提高能源效率可以带来城镇居民2473.6万t CO₂减排潜力。在农村居民建筑,包括煤炉、柴灶和家电在内的效率提高能带来9.5亿t CO₂减排量。提高公共与商业建筑用能设备效率可以贡献5202.6万t CO₂减排量。

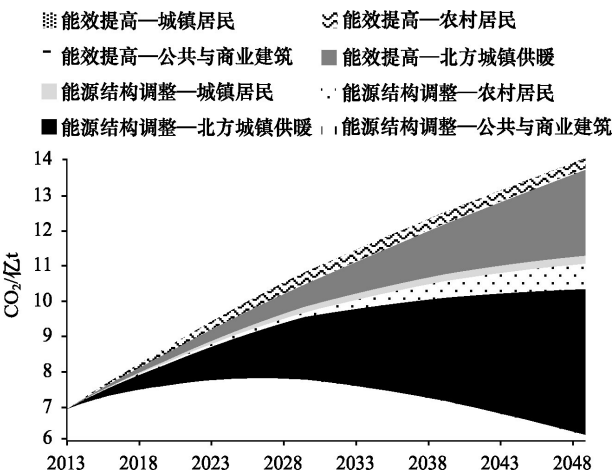


图5 建筑部门低碳发展技术路线图
Figure 5 A technology roadmap for low-carbon development of the building sector

在能源结构调整措施方面,北方城镇供暖、城镇居民、农村居民和公共与商业建筑子部门的能源结构调整分别贡献54.8%、3.9%、7.7%和0.2%的累计减排量。北方城镇供暖作为化石能源消费最多的子部门,2013年北方城镇供暖煤炭热源占84%,其中燃煤锅炉48%,燃煤热电厂36%、燃气锅炉、燃气热电厂只占8%和6%,煤炭消费量占建筑部门煤炭消费总量的68%,因此其能源结构调整是降低建筑部门直接排放的关键。通过推广天然气集中供热和热电冷多联供技术、积极发展地源热泵技术取代燃煤供暖等手段,到2050年可将燃煤供暖面积占比控制在10%以内,并形成以燃气和地源热泵为主的热源结构,能带来累计减排量74.2亿t CO₂。在城镇居民建筑积极推广太阳能热水器、空气源热泵技术,降低燃气消费比重,可贡献5.2亿t CO₂减排量。农村能源结构调整的重点措施是提高燃气、电力等现代能源和太阳能等可再生能源比例,降低散煤和传统生物质能源消费比重,使散煤和传统生物质能耗占比分别从2013年的26%和46%降至2050年的9%和32%,可以带来10.5亿t CO₂减排潜力。

4.3 建筑部门低碳发展投资需求

图6为分情景建筑部门投资需求。ELC情景下建筑部门2016—2020年累计投资需求为1069.0亿元,2021—2030年为1894.5亿元,2031—2050年为1291.7亿元,共计4255.2亿元。为实现中长期低碳发展目标,ELC情景较BAU情景累计新增投资2694.3亿元,3个阶段需求量分别为589.1亿元、

表3 ELC情景下建筑部门子部门分技术类别累计减排量

Table 3 Accumulative carbon emissions reduction of the four subsectors of the building sector under the enhanced low carbon (ELC) scenario

	能效提高		能源结构调整	
	主要减排技术	累计减排量/亿t CO ₂	主要减排技术	累计减排量/亿t CO ₂
北方城镇供暖	高效供热技术(高效燃煤锅炉、CHP供热、热电协同集中供热) 建筑保温技术(隔热等保温材料技术)	34.95	天然气集中供热技术 热电冷多联供技术 地源热泵技术	74.15
城镇居民	节能家电技术(节能冰箱、空调、洗衣机等)	0.25	太阳能热水器技术 空气源热泵技术等	5.24
农村居民	节能家电技术(节能炉灶、生物质炉、冰箱、空调、洗衣机等)	9.49	燃气热水器、电热水器、 太阳能热水器技术 燃气锅炉、地源热泵	10.46
公共与商业建筑	节能设备技术(节能空调、LED广告灯箱、商用燃气灶等)	0.52	地源热泵技术 水源热泵技术 空气源热泵技术	0.32

2019年3月

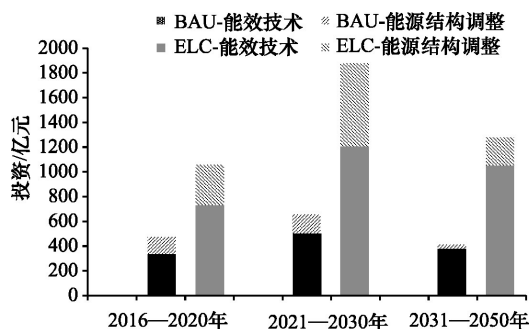


图6 BAU情景和ELC情景下建筑部门投资需求

Figure 6 Investment demand of the building sector under the business as usual (BAU) and enhanced low carbon (ELC) scenarios

1233.2亿元和872.0亿元,各时期新增投资需求占GDP比重最高不超过0.26%,具有较强的经济可行性。从分技术投资需求来看,能效技术的新增投资需求较大,ELC情景下占2016—2050年新增投资需求的66.2%;能源结构调整投资需求相对较小,但考虑其66.6%的累计减排潜力,具有很高的经济效益。

5 结论与讨论

本文讨论了城镇化背景下建筑部门未来驱动因子与能源服务需求变化趋势,并设定基准、NDC和低碳3个情景,运用自下而上的建筑能源系统模型PECE-Building分析2013—2050年不同发展路径下建筑部门未来能源和碳排放趋势,评估建筑部门实现中长期低碳发展目标的技术路线图和投资需求。主要的研究结论为:

(1)中长期中国建筑部门能源服务需求,尤其是供暖、制冷和热水需求将快速增长。2013—2050年,预计有近3亿人口从农村转移到城镇,推动2050年全国建筑面积总量达到1077亿 m^2 ,接近2013年的2倍,供暖和制冷面积迅速增长。此外,伴随居民收入水平的提高,追求更高的生活质量与室内热环境,供暖、制冷与热水需求和能源消费将快速增长。

(2)建筑部门将成为中国未来能源消费和碳排放的重要增长来源。受能源消费需求增长驱动,建筑部门未来能源消费量将持续增长。BAU情景、NDC情景和ELC情景下2050年能源消费需求分别是2013年的2.4倍、2.1倍和1.9倍。直接 CO_2 排在BAU情景和NDC情景下2050年比2013年分别增长142.8%、112.7%,成为中国未来碳排放的重要增长来源。即便中国总体碳排在2030年左右达

峰(NDC情景),建筑部门排放还将继续上升。因此,建筑部门是否能尽快达峰,对于中国实现长期低碳转型目标至关重要。

(3)通过加快发展低碳技术,建筑部门有望走上低碳路径。在各子部门积极推广和应用低碳能效技术和新能源技术,有望使建筑部门在2027年左右以7.8亿 t CO_2 排放量达峰,随后持续下降,2050年排放6.2亿 t CO_2 ,回到2013年水平。模型结果显示,ELC情景下能效技术和能源结构调整技术可分别带来33.4%和66.6%的直接累计减排量;从各子部门减排潜力来看,北方城镇供暖减排贡献最大,占ELC情景累计减排量的80.6%,其中高效供暖技术与清洁供暖燃料可分别贡献25.8%和54.8%。农村居民、城镇居民和公共与商业建筑可分别累计直接减排14.7%、4.1%和0.6%。

(4)实现建筑部门低碳发展具有较强的经济可行性。实现建筑部门中长期低碳发展需累计投资4255.2亿元,相比BAU情景累计新增投资2694.3亿元。各期新增投资规模占GDP的比重最高不超过0.26%,具有较强的经济可行性。能源结构调整技术投资的费用效益突出,能以较低的投资需求贡献更高的减排潜力。

与国内外同类研究相比,国际能源署(IEA)^[33]的新政策情景预测2040年中国建筑部门终端能源消费需求将达8.3亿 tce , CO_2 排放约5~6亿 t CO_2 ;国家发改委能源研究所^[34]预期2050年建筑部门有望将终端能源消费需求控制在7~8亿 tce , CO_2 排放控制在6~7亿 t CO_2 。总体而言,本文与现有的对中国建筑部门低碳发展路径下未来能耗与排放趋势的判断比较一致,但对终端能源需求模拟结果略高,这主要与不同的模型假设、基准年相关。例如,本文考虑了城镇化进程和不同收入群体对未来建筑面积的需求而设置了较高的假设,又如上述能源研究所模型基准年较早,为2010年,对长期能源消费和 CO_2 排放增长潜力的判断会有一定的影响。

本研究结果显示,伴随城镇化进程和居民收入的增长,建筑部门未来能耗和碳排放将快速增长,成为全社会能源与排放的重要增长来源,对中国实现中长期低碳发展目标形成巨大挑战。但是,通过发展低碳技术,提高建筑能效和推广清洁燃料,严

格控制北方城镇供暖等重点排放领域,将实现中国建筑部门排放在2027年左右提前达峰,走上一条技术可行、经济可接受的低碳转型之路。

参考文献(References):

- [1] 国家发改委. 强化应对气候变化行动: 中国国家自主贡献[EB/OL]. (2015-11-18)[2018-04-07]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2015/20151119/xgbd33811/Document/1455864/1455864.htm>. [National Development Reform Commission. Strengthening Climate Change Adaptation: China's National Determined Contributions[EB/OL]. (2015-11-18)[2018-04-07]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2015/20151119/xgbd33811/Document/1455864/1455864.htm>.]
- [2] Lucon O, Ürge-Vorsatz D, Zain Ahmed A, et al. Buildings[A]. IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 邹骥, 王克, 等. 中国城市温室气体排放清单[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013. [Zou J, Wang K, et al. China Urban Greenhouse Gas Emission Inventory[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.]
- [4] 刘俊伶. 中国中长期低碳发展战略目标与实现路径研究[D]. 北京: 中国人民大学, 2017. [Liu J L. Research on China's Mid and Long Term Low Carbon Development Strategic Goals and Roadmap[D]. Beijing: Renmin University of China, 2017.]
- [5] International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050[EB/OL]. (2013-06-27)[2018-08-02]. https://www.oecd-ilibrary.org/transition-to-sustainable-buildings_5k44zbqfkg34.pdf?itemId=%2Fcontent%2Fpublication%2F9789264202955-en&mimeType=pdf.
- [6] 王怡. 我国建筑业碳排放灰色斜率关联及情景预测研究[J]. 石家庄经济学院学报, 2013, 36(3):53-59. [Wang Y. Grey slope correlation and scenario prediction of carbon emissions in China's building industry[J]. *Journal of Shijiazhuang University of Economics*, 2013, 36(3): 53-59.]
- [7] 何长全, 刘兰, 段宗志, 等. 建筑业碳排放与经济增长关系研究: 基于“脱钩”理论视角[J]. 建筑经济, 2016, 37(1):97-99. [He C Q, Liu L, Duan Z Z, et al. Research on the relationship between carbon emissions and economic growth in construction industry: Based on the theory of “decoupling”[J]. *Construction Economics*, 2016, 37(1): 97-99.]
- [8] Lin B Q, Liu H X. CO₂ emissions of China's commercial and residential buildings: Evidence and reduction policy[J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 418-431.
- [9] 祁神军, 张云波. 中国建筑业碳排放的影响因素分解及减排策略研究[J]. 软科学, 2013, 27(6):39-43. [Qi S J, Zhang Y B. Research on the influencing factors and reduction strategies of carbon emission of construction industry in China[J]. *Soft Science*, 2013, 27(6): 39-43.]
- [10] Shi J C, Chen W Y, Yin X. Modeling building's decarbonization with application of China TIMES model[J]. *Applied Energy*, 2016, 162:1303-1312.
- [11] 纪建悦, 姜兴坤. 中国建筑业碳排放预测研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2012, (1):53-57. [Ji J Y, Jiang X K. Research on carbon emission prediction in China's construction industry[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Science Edition)*, 2012, (1): 53-57.]
- [12] Tan X C, Lai H P, Gu B H, et al. Carbon emission and abatement potential outlook in China's building sector through 2050[J]. *Energy Policy*, 2018, 118: 429-439.
- [13] Xiao H, Wei Q P, Wang H L. Marginal abatement cost and carbon reduction potential outlook of key energy efficiency technologies in China's building sector to 2030[J]. *Energy Policy*, 2014, 69: 92-105.
- [14] Yang T, Pan Y Q, Yang Y K, et al. CO₂ emissions in China's building sector through 2050: A scenario analysis based on a bottom-up model[J]. *Energy*, 2017, 128: 208-223.
- [15] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2008-2016 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008-2016. [Tsinghua University Building Energy Conservation Research Center. China Building Energy Efficiency Annual Development Research Report 2008-2016 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008-2016.]
- [16] Heaps C G. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) System Software Version[EB/OL]. (2016-12-20)[2016-12-25]. <https://www.energycommunity.org>.
- [17] 国家发改委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006. [National Development and Reform Commission, Ministry of Construction. Economic Evaluation Methods and Parameters of Construction Projects[M]. Beijing: China Planning Press, 2006.]
- [18] 国家统计局. 能源统计年鉴 2014-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015, 2016. [National Bureau of Statistics. Energy Statistics Yearbook 2014-2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015, 2016.]
- [19] 住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2010-2013[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011-2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Statistical Yearbook of Urban Construction in China 2010-2013[M]. Beijing: China Planning Press, 2011-2014.]

2019年3月

- [20] 国家发改委.《国家重点节能技术推广目录》(1-6批)和第7批[EB/OL]. (2014-12-17)[2017-01-05]. http://hzs.ndrc.gov.cn/new-zwxx/201412/t20141217_652539.html. [National Development and Reform Commission. National Key Energy Conservation Technology Promotion Catalogue" (1-6 Batches) and 7th Batch [EB/OL]. (2014-12-17)[2017-01-05]. http://hzs.ndrc.gov.cn/new-zwxx/201412/t20141217_652539.html.]
- [21] 中国标准化研究院. 中国用能产品能效状况白皮书(2013)[M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2013. [China National Institute of Standardization. White Paper on Energy Efficiency of Energy Products in China (2013) [M]. Beijing: China Quality Inspection Press, China Standard Press, 2013.]
- [22] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2015 Revision, DVD Edition[R]. New York: United Nations, 2015.
- [23] 世界银行. 世界银行发展指数数据库[EB/OL]. (2017-12-14)[2017-12-15]. <http://data.worldbank.org/>. [World Bank. World Bank Development Index Database[EB/OL]. (2017-12-14)[2017-12-15]. <http://data.worldbank.org/>.]
- [24] 国务院. 国家新型城镇化规划(2014-2020年)[EB/OL]. (2014-03-16)[2016-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm. [State Council. National New Urbanization Plan(2014-2020)[EB/OL]. (2014-03-16)[2016-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm.]
- [25] International Energy Agency. Technology Roadmap Wind Energy [EB/OL]. (2015-07-01)[2018-08-10]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238831-en>.
- [26] International Energy Agency. Solar Photovoltaic Energy[EB/OL]. (2015-07-01)[2018-08-10]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238817-en>.
- [27] International Energy Agency. Technology Roadmap Solar Thermal Electricity[EB/OL]. (2015-07-01)[2018-08-10]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238824-en>.
- [28] International Energy Agency. Geothermal Heat and Power[EB/OL]. (2011-06-23)[2018-08-10]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264118485-en>.
- [29] 赵奉军. 住房空置率估计结果与争议[J]. 中国房地产(市场版), 2014, (8): 26-28. [Zhao F J. Estimation results and dispute of housing vacancy rate[J]. *China Real Estate (Market Edition)*, 2014, (8): 26-28.]
- [30] 杨秀. 基于能耗数据的中国建筑节能问题研究基于能耗数据的中国建筑节能问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. [Yang X. Research on China's Building Energy Saving Based on Energy Consumption Data[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.]
- [31] 胡珊. 中国城镇住宅建筑能耗及与发达国家的对比研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. [Hu S. China's Urban Residential Building Energy Consumption and Comparison with Developed Countries [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.]
- [32] 住房和城乡建设部.《建筑能耗标准》征求意见稿[EB/OL]. (2016-04-15)[2016-12-27]. <https://max.book118.com/html/2014/0414/7655796.shtm>. [Ministry of Housing and Construction and the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. "Building Energy Standards" Exposure Draft [EB/OL]. (2016-04-15)[2016-12-27]. <https://max.book118.com/html/2014/0414/7655796.shtm>.]
- [33] 国际能源署. 世界能源展望: 中国特别报告[EB/OL]. (2017-12-08)[2018-11-19]. <https://www.iea.org/weo/china/cn/>. [International Energy Agency. World Energy Outlook: China Special Report[EB/OL]. (2017-12-08)[2018-11-19]. <https://www.iea.org/weo/china/cn/>.]
- [34] 能源研究所. 中国低碳建筑情景和政策路线图研究[EB/OL]. (2014-07-06)[2018-11-18]. <http://www.efchina.org/Attachments/Report/reports-20140706-zh/reports-20140706-zh>. [Energy Research Institute. Study on China's Low Carbon Building Scenarios and Policy Roadmap[EB/OL]. (2014-07-06)[2018-11-18]. <http://www.efchina.org/Attachments/Report/reports-20140706-zh/reports-20140706-zh>.]

Mid- to long-term low carbon development pathways of China's building sector

LIU Junling^{1,2}, XIANG Qixin², WANG Ke², ZOU Ji², KONG Ying^{1,3}

(1. *Low Carbon Economy and Financial Risks Analysis Lab, Environmental Science and New Energy Technology Research Center, Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518055, China;*

2. *School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China;*

3. *Department of Economics, York University, Toronto M3J1P3, Canada)*

Abstract: This article discusses the trends of future driving factors and energy service demands of China's building sector in the context of urbanization. Three scenarios——business as usual (BAU), nationally determined contribution (NDC), and enhanced low carbon (ELC)——were set in a bottom-up energy system model of building sector (Programme of Energy and Climate Economics (PECE-Building)). The model was used to analyze the energy demand and carbon emission trends of China's building sector under different development pathways during 2013-2050, and to assess the technology roadmap and investment needs to achieve the sector's medium- and long-term low carbon development goals. The results show that the energy service demand of China's building sector will grow rapidly due to the urbanization process and income growth. The sector will become an important source of China's future energy consumption and carbon emissions growth. Under the BAU scenario, the energy consumption and CO₂ emissions of the building sector will increase by 142.8% and 103.1% in 2050 compared with 2013. Under the NDC scenario, the building sector's CO₂ emissions will grow despite of the emission of the whole society reaching the peak. Under the ELC scenario, carbon emission of China's building sector is expected to peak in 2027 at around 780 million tons, and return to an annual emission of 615 million tons in 2050, which is below the 2013 emission level. Application of energy efficient technologies and new energies will contribute 33.4% and 66.6% of the cumulative emission reduction respectively. Heating in the northern urban areas is the most important mitigation subsector. Compared to BAU, the additional investment under the ELC scenario required to achieve this low carbon development pathway will be RMB 269.4 billion, not exceeding 0.26‰ of GDP in all time periods. Therefore, China's building sector is able to embark on a technologically viable and economically acceptable low carbon transformation pathway.

Key words: building sector; mid- to long-term low carbon development; technology roadmap; low carbon investment demand; bottom-up model