

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-305-06

双碳背景下建筑碳排放动态基准线研究

郑立红^{1,2} 周志华¹ 郭而郭² 王辰冬² 罗丹吴²

(1. 天津大学环境科学与工程学院 天津 300354;

2. 天津生态城绿色建筑研究院有限公司 天津 300467)

【摘要】 据统计, 建筑运行阶段的碳排放占总碳排放比例为 28%, 对我国实现“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标至关重要, 而建筑运行阶段也确实有较大节能潜力。故基于寒冷地区某城区当前民用建筑的建筑类型、节能标准执行情况、项目设备选用情况、运行阶段能源消费水平以及城市碳排放指标体系等基础数据, 采用四分位统计方法, 应用 LEAP 软件对碳达峰的路径进行仿真和情景分析, 制定符合此城区实际运行情况的民用建筑动态碳排放基准线。研究实施方案和策略, 并搭建能源管理平台对建筑进行精细化控制和管理。经过测算, 2030 年有望实现碳达峰, 城镇住宅、政府办公、中小学、幼儿园、普通办公、商业、文体设施、星级酒店、医疗建筑的碳排放基准线分别为 50.52kgCO₂/m², 129.92kgCO₂/m², 68.27kgCO₂/m², 96.15kgCO₂/m², 59.67kgCO₂/m², 136.31kgCO₂/m², 146.99kgCO₂/m², 132.73kgCO₂/m², 164.37kgCO₂/m²。

【关键词】 建筑碳排放; 基准线; LEAP; 情景分析
中图分类号 TU981.2 文献标识码 A

Research on Dynamic Baseline of Building Carbon Emission under Double Carbon Background

Zheng Lihong¹ Zhou Zhihua¹ Guo Erfu² Wang Chendong² Luo Danwu²

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300354;

2. Tianjin Eco-city Green Building Research Institute, Tianjin, 300467)

【Abstract】 According to statistics, the carbon emission in the building operation stage accounts for 28% of the total carbon emission. So reducing building energy consumption is very important for China to achieve the goal of "carbon peak in 2030 and carbon neutralization in 2060". Zero energy consumption building is the future development trend, which relying on renewable energy without conventional energy consumption. Therefore, basing on the basic data of the current civil buildings in an urban area in the cold area, such as the building type, the implementation of energy-saving standards, the selection of project equipment, the energy consumption level and the urban carbon emission index system, the paper formulates the dynamic carbon emission baseline of civil buildings with the actual operation of this urban area. Using the quartile statistical method, the path of carbon peak is simulated and analyzed by LEAP software. At the same time, the implementation scheme and strategy are studied, and an energy management platform is built for fine control and management of the building. It is estimated that the carbon peak is expected to be achieved in 2030. The carbon emission baseline of urban housing, such as government office, primary and secondary schools, kindergartens, general office, commerce, sports facilities, star hotels and medical buildings are 50.52kgCO₂/m², 129.92kgCO₂/m², 68.27kgCO₂/m², 96.15kgCO₂/m², 59.67kgCO₂/m², 136.31kgCO₂/m², 146.99kgCO₂/m², 132.73kgCO₂/m², 164.37kgCO₂/m².

【Keywords】 building carbon emissions; datum line; LEAP; scenario analysis

0 引言

众所周知,当前能源消耗持续增长,能源危机问题明显,节能减排形势严峻,作为世界上最大的能源消费国,中国提高能源效率的努力对全球能源和气候格局至关重要。2018年,仅中国就占全球能源消耗的22%,燃料燃烧产生的CO₂排放总量的29%^{Error! Reference source not found.}。据国际能源署统计,在社会碳排放中,建筑终端能源消耗量占比为36%且碳排放占比为39%^{Error! Reference source not found.},而运行阶段建筑碳排放占全生命周期的比例为70%–80%^{Error! Reference source not found.}。建筑运行阶段存在能耗高、效率低、污染强的问题,故建筑节能减排是实现碳达峰和碳中和目标的关键。中国特色社会主义进入新时代,我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。随着我国国际地位的不断提高,经济增长速度保持稳定向前,人民不仅仅满足于温饱问题,更多的是追求美好生活的品质,故应设立合理并行之有效的能耗基准线,控制建筑能耗总体碳排放,进而实现“30·60”目标。

国内外关于基准线的研究较多,在碳排放研究方面,张孝存^{Error! Reference source not found.}采用混合法构建了单体建筑全生命周期碳排放的量化体系,并采用基于数据质量评价的半参数化概率分析,对碳排放量化的不确定性进行了研究。杨斯慧^{Error! Reference source not found.}我国公共建筑碳交易现状进行了梳理,分析了我国公共建筑碳交易过程中碳排放责任划分、碳配额分配方面存在的问题,对碳排放

配额分配方法提出了调整思路。孙颖^{Error! Reference source not found.}在分析碳配额分配影响因素的基础上,对比分析不同的配额分配方法,选择熵权法和基准法构建了一套系统的公共建筑碳排放配额初始分配体系。在能耗基准线研究方面,朱能^{Error! Reference source not found.}等对统计学方法、线性回归法、四分位法、概率分布法进行了对比,确定能耗基准线并进行了校园案例研究。李月寒^{Error! Reference source not found.}等人则结合上海市公共建筑实际运行数据对基准线进行了动态调整,使其更加适应碳交易体系,张慈枝^{Error! Reference source not found.}基于监测平台的实测数据样本,运用统计分析方法,制定教学楼、学院、学生宿舍等各类型教育建筑的能耗定额,建立教育建筑能耗评价,为推动公共建筑实行量化管理及节能改造提供参考依据。

从以上分析可以看出,现有文献大多偏向于对能耗基准线的研究,而针对能耗设定值与碳排放指标相结合的研究内容较少,由此,本文根据寒冷地区某区域实际能源消耗数据确定了不同情景动态碳排放基准线,以此作为城市能源规划和运行管理的依据。

1 技术路线

采用建筑行业碳排放总量和碳排放强度双控措施,首先根据实际能源水平制定不同建筑类型、不同能源类型的碳排放基准线,采用不同情景分析基准线是否满足达峰要求,最后结合国家和地方政策制定达峰情景下的基准线和实施方案,如图1所示。

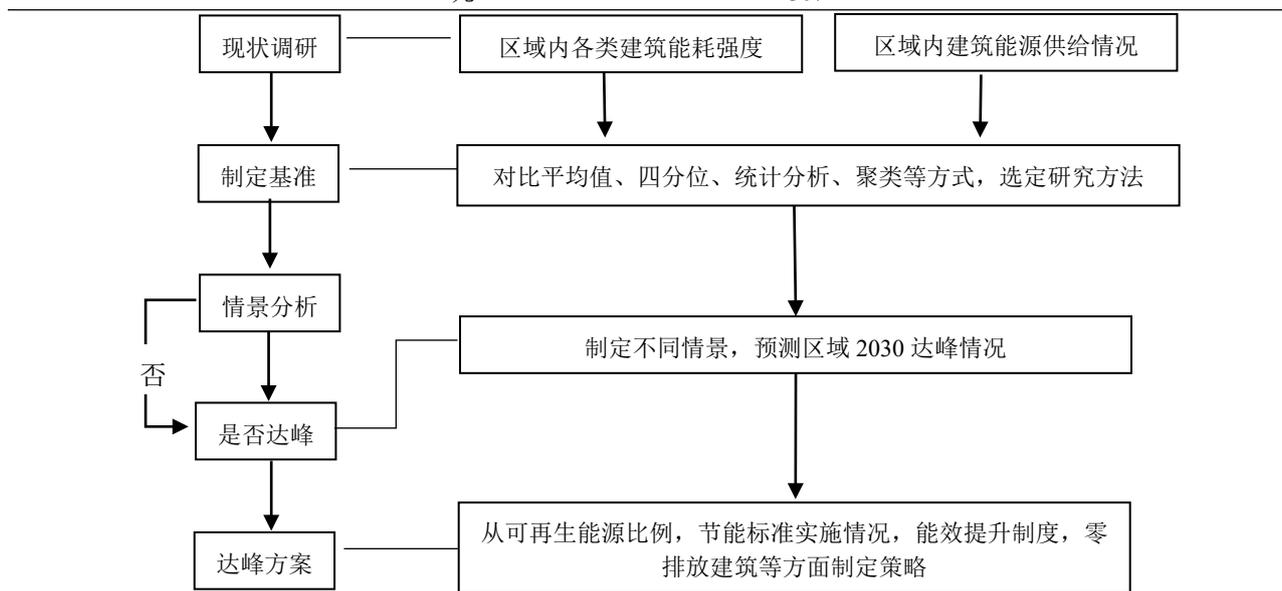


图 1 技术路线图

Fig.1 technical roadmap

2 研究方法

2.1 指标选择

我国建筑能耗基准线的研究和应用包括两类, 第一, 基于基准模型的能耗基准线, 第二就是基于统计数据的能耗基准线 **Error! Reference source not found.**, 后者更侧重于建筑的实际能耗水平。本文借鉴能耗基准线的制定方法, 统计各类型民用建筑实际碳排放数据, 根据算术平均法、四分位法、线性回归法、概率分布法等统计学方法确定该行业的动态基准线。常用的基准单位有单位面积碳排放强度、单位人口碳排放强度以及单位产值碳排放强度 **Error! Reference source not found.**, 对于建筑行业, 更适合采用单位面积碳排放强度。

2.2 影响因素分析

建筑碳排放具有多样性、周期性与复杂性的特点, 因此影响因素考虑越全面, 分类越详细, 基准线设定将越精准。将影响建筑碳排放的主要影响因素进行划分如下:

(1) 建筑类型。建筑功能是影响公共建筑的重要因素, 其运营方式各有特点, 各项节能标准的制定、能耗监测要求和审计工作的开展也经常按照建筑类型进行分类。故此, 按建筑类型将研究对象分为居住建筑、公共建筑和工业建筑; 其中, 公共建筑按照功能分为政府办公、中小学、幼儿园、办公建筑、商业建筑、酒店、文娱设施以及场站类建筑。

(2) 能源供应。由于地源热泵有很好的节能效果, 对可再生能源利用率贡献较大, 能源供应类型也有所区别, 故针对不同能源类型分为地源热泵情况和市政热+多联机情况分别制定基准线。

(3) 节能标准 **Error! Reference source not found.**。建筑围护结构、建筑规模、照明功率密度、新风量指标、设备功率密度等设计值都会影响建筑能耗, 而不同的节能标准对应不同的性能要求, 本文按照居住建筑从四步节能到五步节能, 公共建筑从二步节能到三步节能进行区分和设置。

2.3 基准线研究方法

为了提高数据准确度, 本文以建筑 3 年平均能耗作为基础数据。能耗基准线的计算方法有很多种, 包括单项目基准线、多项目基准线、技术标志基准线和混合基准线等方式。单项目基线一般针对单体项目设立, 适用性强、数据可获取性高, 但长期收集数据, 会存在成本高和工作重复的问题。多项目基准线是针对一类具有相似特征项目群设置的基准线, 数据透明度高, 后期工作量少, 但在初期测算时数据采集成本很高。技术标志基准线是将采用相对先进水平技术所产生的碳排放量作为统一排放标准的基准线, 科学性高、适用范围广, 但可操作性较差, 难以实际落实。混合基准线则是以上几种方法的组合, 从技术角度来说比较复杂, 但均衡性较好。本文采用多项目基准线, 以居住建筑为例, 分析均值法、四分位法、聚类分析法和概率分步法

Error! Reference source not found.的适宜性。

2.4 情景分析方法

情景分析法是在假定某种现象或某种趋势将持续到未来的前提下,对预测对象可能出现的情况或引起的后果做出预测的方法,通常用来对预测对象的未来发展趋势做出种种设想或预计,是一种直观的定性预测方法。LEAP 是一个集成的、基于场景的建模工具,是斯德哥尔摩环境研究所开发的一个广泛使用的用于能源政策分析和气候变化缓解评估的软件工具,可用于跟踪能源消耗、生产和资源开采,可核算能源部门和非能源部门的温室气体(GHG)排放和碳汇。LEAP 已被全球 190 多个国家的数千个组织采用,正在迅速成为各国进行综合资源规划、温室气体(GHG)缓解评估和低排放发展战略制定(LED)的研究工具。

LEAP 模型采用的是自下而上的计算方法,根据碳排放影响因素和能源种类建立合理的数据结构,输入碳排放系数和能源强度等数据,由 LEAP 软件计算结果,并可直观判定是否达峰。计算公式如(1)-(4)所示:

$$P_z = P_o + P_e \quad (1)$$

$$P_o = (\sum E_i P_i) \quad (2)$$

$$P_e = E_e (\sum W_{i,j} P_{i,j}) \quad (3)$$

$$E = \sum_{s,l} A_{s,l} * q_{s,l} \quad (4)$$

其中: P_z 为建筑碳排放总量; P_o 为其他能源碳

排放总量; P_e 为电力碳排放总量。 E_i 为各类能源碳排放量; i 为各类能源的碳排放因子; E_e 为电力能耗总量; $W_{i,j}$ 为电力来源, i 为各类能源的碳排放因子, j 为各类电力来源占比; $A_{s,l}$ 为不同建筑类型的建筑面积, s 为建筑类型, l 为节能标准; $q_{s,l}$ 为单位建筑面积排放强度。

3 能源和碳排放现状

3.1 能源现状

本文中的电、气、热能源数据源于区域数据平台,通过监测用户电表燃气表和热表,将数据采集并上传,基准线的初步确认常用方法为均值法、四分位法和聚类分析法。

均值法是以历史 3 年的能耗强度作为依据,计算平均值。

四分位法是将居住建筑能耗强度从小到大排列分成四等份,按顺序三个分割点 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 位置的数值分别记为下四分位数、中位数和上四分位数作为排放基准,一般选用上四分位数作为基准值,即有 25% 的建筑超出规定限额,通过审计后需要进行节能减排。

聚类分析法是利用 SPSS 软件的聚类分析,将数据导入软件,输入聚类数为 4,最大迭代次数为 20,收敛因子为 0.02。再根据各聚类中心的中点边界来确定能耗基准线,即低能耗线,中能耗线和高能耗线,

住宅项目按不同方法计算如表 1 所示。

表 1 均值法能耗强度计算结果

Table 1 Calculation results of energy consumption intensity by mean method

方法	分项	单位建筑面积电耗 kWh/m ²	单位建筑面积气耗 kWh/m ²	单位建筑面积采暖能 耗 kWh/m ²	总能耗 kWh/m ²
均值法	—	27.13	7.47	59.19	93.80
四分位法	下四分位	21.89	6.8	58.6	87.29
	中位数	23.82	7.65	60.04	91.51
	上四分位	29.2	8.57	65.9	103.67
聚类分析法	低能耗线	22.27	4.84	30.89	58.00
	中能耗线	34.9	6.77	50.16	91.83
	高能耗线	47.23	8.12	66.29	121.64

通过分析发现,聚类分析法数据偏高,如电耗为 47.23kWh/m² 的基准线, 95% 的项目均能满足,

不利于节能减排的工作,综合考虑上海等其他区域基准线制定方法,本文选定四分位法作为基准线研

究方法, 代入碳排放模型进行达峰测算。

3.2 碳排放现状

通过区域能源平台, 获取各项目的实际能源情况, 根据《建筑碳排放计算标准》方法, 得到不同建筑类型不同能源类型近三年的碳排放情况, 平均值如图 2 所示。总体来看, 三种供能形式中, 电力碳排放量较大, 其次是天然气; 对于不同建筑类型, 政府办公、文体设施碳排放较高; 而从两种采暖方式对比可以发现, 地源热泵的节能潜力较大, 故需要将降低电力碳排放和重点领域碳排放作为实现碳达峰目标的突破口, 研究减碳策略。

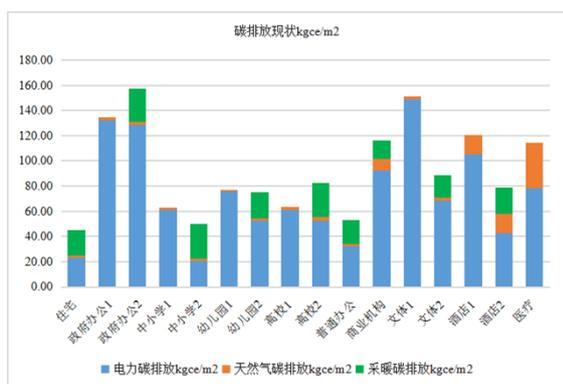


图 2 建筑 2018-2020 碳排放水平
(1 代表地源热泵, 2 代表市政采暖)

Fig.2 Carbon emission level of buildings from 2018 to 2020 (1 represents ground source heat pump and 2 represents municipal heating)

4 情景分析

4.1 情景设置

根据十三五建设情况和十四五绿色建筑专项规划要求, 现制定情景如下:

(1) 基准情景。新建建筑按照现在标准建设和运行, 即住宅建筑满足四步节能要求, 公共建筑满足三步节能要求, 包含可再生能源, 既有建筑不进行改造。

(2) 节能情景。新建住宅全部执行五步节能标准, 新建公建 2020-2025 全部执行三步节能, 2026 年以后执行四步节能, 绿色建筑比例为 100%, 包含可再生能源, 既有建筑不改造成。

(3) 低碳情景。在节能情景基础上提高可再生能源利用率, 同时对既有建筑进行能源管控, 大面积推广零能耗建筑。

(4) 达峰情景。在低碳情景基础上, 优化能源结构, 降低建筑碳排放水平, 使其实现 2030 年碳排放达峰。

4.2 情景分析

在模型中输入 2021 年至 2040 年规划各类型建筑面积、各类能源碳排放因子, 不同情景下的直接能源消耗强度, 模型分析时间步长为 1 年, 预测范围为 2021 年至 2040 年, 最终得出碳排放情况如图 3 所示。达峰情景下, 建筑碳排在 2030 年达峰, 碳排放量控制在 2402.3 千吨 CO₂ 以内, 比基准情景碳排放降低 35.82%。至 2040 年, 达峰情景碳排放量为 2148.6 千吨 CO₂ 以内, 比基准情景碳排放降低 51.84%。2021 年至 2040 年间累计碳排放量为 43036.7 千吨 CO₂, 比基准情景碳排放降低 38.49%。

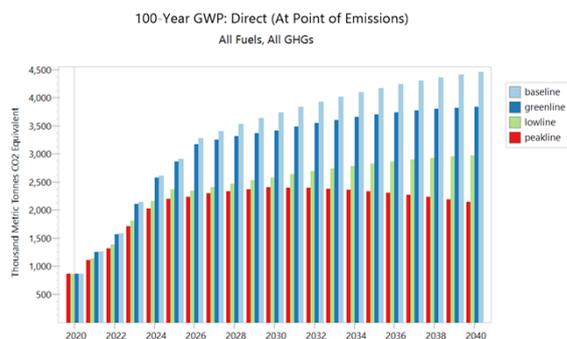


图 3 不同情境下碳排放情况

Fig.3 Carbon emissions under different scenarios

4.3 达峰基准线

碳排放因子会随着国家政策的完善逐渐降低, 基准线也逐年调整。经测算, 若建筑碳排放于 2030 年达峰, 此年基准线的模拟结果为: 住宅建筑 32.87kgce/m², 政府办公地源热泵和市政供暖分别为 64.77kgce/m² 和 49.73kgce/m², 中小学地源热泵和市政供暖分别为 34.75kgce/m² 和 28.83kgce/m², 幼儿园地源热泵和市政供暖分别为 42.13kgce/m² 和 42.14kgce/m², 高校地源热泵和市政供暖分别为 35.47kgce/m² 和 55.51kgce/m², 普通办公为 35.45kgce/m², 商业机构为 80.66kgce/m², 文体地源热泵和市政供暖分别为 72.33kgce/m² 和 59.76kgce/m², 酒店地源热泵和市政供暖分别为

71.84kgce/m² 和 57.24kgce/m², 医疗为 75.79kgce/m²。



图4 建筑 2030 年碳排放基准线
(1 代表地源热泵, 2 代表市政采暖)

Fig.4 Carbon emission baseline of buildings in 2030
(1 represents ground source heat pump and 2 represents municipal heating)

5 碳达峰实施路径

(1) 大力调整能源结构, 发展新能源替代行动

随着建筑面积的增加, 建筑能源需求呈现逐年增长状态, 如图 5 所示。在低碳情景下增加第五种情景 (reduce energy), 将建筑能源消耗降低 6.47%, 从结果看出碳排放水平仅降低 4%, 效果不显著, 所以仅控制能源需求量也很难实现碳达峰目标, 如图 6 所示, 故必须提高可再生能源应用比例。

大力发展可再生能源, 是推动绿色低碳发展的重要支撑, 也是我国应对气候变化、履行国际承诺的重要举措。近年来, 我国风电、光伏发电等行业快速发展。截止到 2020 年底, 全国风电、太阳能、生物质累计装机分别达到 2.81 亿 kW、2.53 亿 kW、2952 万 kW, 到 2030 年, 风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿 kW 以上, 非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右。有研究指出, 2030 年世界可再生能源占比可达 49%。中国近几年可再生能源发展速度递增, 为了实现建筑行业 2030 年碳达峰, 2040 年绿电发电比例应达到 45%, 项目级可再生能源利用率应达到 50%, 较基准情景比可降低碳排放量约 22.39%。

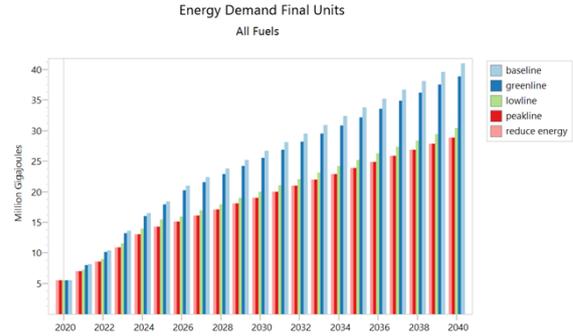


图 5 建筑能源需求情况

Fig.5 Building energy demand

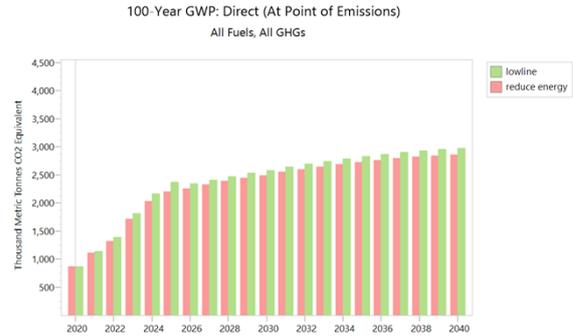


图 6 降低能耗后碳排放趋势

Fig.6 Carbon emission trend after reducing energy consumption

(2) 全面执行节能标准, 提升建筑能效水平
在增加可再生能源比例基础上, 同步推进建筑节能, 形成建设领域能耗总量和能耗强度“双控”目标, 2021 年全面执行居住建筑五步节能标准, 2026 年全面执行公共建筑四步节能标准, 推动新建建筑严格实施节能措施, 大力推广零能耗建筑, 2030 年之前累计建成零能耗建筑 100 万平方米, 2040 年累计完成 200 万平方米。推进绿色建材评价认证和推广应用, 建立绿色建材采信机制, 并进行设计、施工和运行全过程管理, 不断提升新建建筑能效水平。坚持政府和市场两手抓, 推广合同能源管理模式, 对既有建筑能耗进行管控和约束, 进行节能服务体系建设, 促进各类节能技术服务机构的创新模式和领域拓宽, 增强服务能力, 提高服务水平。推动绿色债券、绿色信贷等绿色金融工具应用, 探索与改造需求相匹配的市场推广模式, 鼓励公共建筑加强绿色改造, 较基准情景比可降低碳排放量约 13.43%。

(3) 加大科技攻关力度, 推动绿色低碳技术

实现重大突破

依托城区和项目级能耗监测平台, 推进能耗统计和公示, 加强智慧节能的应用, 做到科技节能, 研究探索能耗监测、运行大数据挖掘与建筑节能改造工作的有机反馈和联动机制, 充分挖掘节能降耗潜能, 建立长效节能机制。应用碳捕捉和存储技术 (“CCS 技术”), 从生产活动中将二氧化碳从空气中分离出来, 运输到已开采油田、海洋等其他安全地下场所进行封存, 可使得建筑行业更早实现碳达峰。

6 结论

(1) 民用建筑碳排放有望在 2030 年达峰, 碳排放量控制在 2402.3 千吨 CO₂ 以内, 比基准情景碳排放降低 35.82%。

(2) 达峰情景应同时满足绿电比例 2030 年达 28%, 2040 年达 45%, 可再生能源 2030 年达 20%、2050 年达 50%, 建成零能耗建筑 100 万平方

米以及碳排放基准线的要求。

(3) 根据建筑能耗排放现状, 采用四分位方法, 按照不同建筑类型与不同能源类型确定了精细化的动态碳排放基准线, 经测算, 2030 年碳排放指标为: 住宅建筑 32.87kgce/m², 政府办公地源热泵和市政供暖分别为 64.77kgce/m² 和 49.73kgce/m², 中小学地源热泵和市政供暖分别为 34.75kgce/m² 和 28.83kgce/m², 幼儿园地源热泵和市政供暖分别为 42.13kgce/m² 和 42.14kgce/m², 高校地源热泵和市政供暖分别为 35.47kgce/m² 和 55.51kgce/m², 普通办公为 35.45kgce/m², 商业机构为 80.66kgce/m², 文体地源热泵和市政供暖分别为 72.33kgce/m² 和 59.76kgce/m², 酒店地源热泵和市政供暖分别为 71.84kgce/m² 和 57.24kgce/m², 医疗为 75.79kgce/m²。

(4) 当前建筑有较大的节能潜力, 应采用合同能源管理等市场化机制或能源审计等管理办法, 尽可能降低建筑能耗。

(下转第 336 页)